

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-223-235>

УДК 621.18-5

## **Синтез котельных регуляторов системы автоматического управления мощностью энергоблоков**

**Г. Т. Кулаков<sup>1)</sup>, К. И. Артёменко<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020  
Belarusian National Technical University, 2020

**Реферат.** Статья посвящена вопросу структурно-параметрической оптимизации каскадной системы автоматического регулирования на примере котельного регулятора мощности и регулятора топлива. Каскадная система автоматического регулирования, являющаяся составной частью системы автоматического управления мощностью энергоблоков, состоит из двух контуров: внутреннего, предназначенного для стабилизации системы, и внешнего, предназначенного для корректирования, а также из двух регуляторов: внешнего (основного), необходимого для стабилизации выходной величины объекта (в рассматриваемом случае – фактической мощности энергоблока), и внутреннего (вспомогательного), назначением которого является регулирование расхода топлива. Внутренний регулятор формирует управляющее воздействие регулятором нагрузки котла энергоблока. По сравнению с одно-контурными системами автоматического регулирования каскадная система обеспечивает лучшее качество регулирования переходного процесса из-за более высокого быстродействия внутреннего контура системы. Данное преимущество особенно заметно при компенсации возмущений, которые поступают по каналу регулирующего воздействия. Каскадная система автоматического регулирования предназначена для автоматического управления объектами с большим запаздыванием по каналу регулирующего воздействия. Предложены два метода настройки: регулятора топлива и котельного регулятора мощности. Использование этих методов позволяет повысить качество регулирования мощности и снизить расход топлива в переходных режимах по сравнению с настройкой данных регуляторов типовой системы автоматического управления мощностью энергоблоков. Результаты компьютерного моделирования переходных процессов в каскадной системе автоматического регулирования при скачке задания и внутреннем возмущении подтверждают преимущества предлагаемых методов.

**Ключевые слова:** структурно-параметрическая оптимизация, каскадная система автоматического регулирования, котельный регулятор мощности, регулятор топлива, оптимальный регулятор, ПИ-регулятор, реальный ПИД-регулятор

**Для цитирования:** Кулаков, Г. Т. Синтез котельных регуляторов системы автоматического управления мощностью энергоблоков / Г. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 3. С. 223–235. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-223-235>

---

### **Адрес для переписки**

Кулаков Геннадий Тихонович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-91-45  
tes\_bntu@tut.by

### **Address for correspondence**

Kulakov Gennady T.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-91-45  
tes\_bntu@tut.by

---

## Synthesis of Boiler Controllers of the Automatic Power Control System of Power Units

G. T. Kulakov<sup>1)</sup>, K. I. Artsiomenka<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The article concerns the problem of structure-and-parametric optimization of a cascade automatic control system (CACS) by an example of a boiler power controller and a fuel controller. This CACS, which is a part of automatic control systems for power units, consists of two loops, viz. of an inner loop (which purpose is stabilization of the system) and an outer loop (designed for the adjustment) and, also, of two controller, viz. an outer controller (which is a basic one) provided for stabilization of the output value of the object (in our case, of the actual power unit capacity) and of an inner controller (which is an auxiliary one) provided to regulate fuel consumption. The internal controller builds up the control action with the aid of the boiler load controller of the power unit. As compared to single-loop automatic control systems, the cascade system provides better quality of transient control due to the higher performance of the internal loop of the system. This advantage is especially noticeable when compensating for disturbances that come through the channel of regulating impact. The article presents two methods of setting, viz. the fuel controller and the boiler power controller. The application of these methods can improve the quality of power control and reduce fuel consumption in transient modes in comparison with the setting of these controllers of a typical power unit automatic power control system. The results of computer simulation of transient processes in CACS for input step surge and internal perturbation confirm the advantages of the methods are presented in this article.

**Keywords:** structure-and-parametric optimization, cascaded automatic control system, boiler power controller, fuel controller, optimal controller, PI-controller, real PID-controller

**For citation:** Kulakov G. T., Artsiomenka K. I. (2020) Synthesis of Boiler Controllers of the Automatic Power Control System of Power Units. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (3), 223–235. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-223-235> (in Russian)

### Введение

Котельный регулятор мощности (КРМ) и регулятор топлива (РТ) представляют собой каскадную систему автоматического регулирования (КСАР), в которой стабилизирующий ПИ-регулятор топлива настраивают на оптимальную обработку внутреннего возмущения, а корректирующий котельный ПИ-регулятор – на оптимальную обработку задающего сигнала [1–3].

Структурная схема моделирования переходных процессов КСАР приведена на рис. 1.

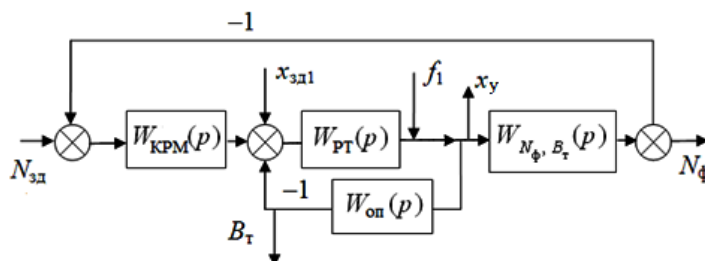


Рис. 1. Структурная схема каскадной системы автоматического регулирования

Fig. 1. The block diagram of the cascade automatic control system

На рис. 1 использованы следующие обозначения:  $N_{зд}$  – заданное значение мощности энергоблока;  $N_{ф}$  – фактическая электрическая мощность энергоблока;  $f_1$  – внутреннее возмущение;  $x_{зд1}$  – задание регулятору топлива;  $B_T$  – расход топлива;  $W_{N_{ф}, B_T}(p)$  – передаточная функция по электрической мощности при скачкообразном изменении задания котельному регулятору нагрузки;  $x_y$  – управляющее воздействие;  $W_{KPM}(p)$  – передаточная функция котельного регулятора мощности;  $W_{PT}(p)$  – то же регулятора топлива;  $W_{оп}(p)$  – то же опережающего участка по расходу топлива (газа).

Передаточная функция по электрической мощности при скачкообразном изменении задания котельному регулятору нагрузки

$$W_{N_{ф}, B_T}(p) = \frac{K_1 e^{-\tau_1 p}}{(T_1 p + 1)(\sigma_1 p + 1)} = \frac{1,8 e^{-13,4p}}{(133p + 1)(25,2p + 1)}, \quad (1)$$

где  $K_1$  – коэффициент передачи по электрической мощности, МВт/%;  $\tau_1$  – время запаздывания по каналу регулирующего воздействия, с;  $T_1$ ,  $\sigma_1$  – большая и меньшая постоянные времени передаточной функции по электрической мощности, с.

Передаточная функция опережающего участка по расходу топлива (газа) рассчитывается по формуле

$$W_{оп}(p) = \frac{K_{оп}}{(T_{оп} p + 1)(\sigma_{оп} p + 1)} = \frac{1,18}{(6,6p + 1)(0,66p + 1)}, \quad (2)$$

где  $K_{оп}$  – коэффициент передачи опережающего участка, м<sup>3</sup>/%;  $T_{оп}$ ,  $\sigma_{оп}$  – большая и меньшая постоянные времени передаточной функции опережающего участка по расходу топлива (газа), с.

Если в (2) пренебречь второй производной [4], то

$$W_{оп}(p) = \frac{K_{оп}}{(T_{оп} + \sigma_{оп})p + 1} = \frac{1,18}{7,26p + 1}. \quad (3)$$

Передаточные функции (1)–(3) служат исходными данными для разработки методов оптимизации КСАР в режиме постоянного давления пара перед турбиной. Эта проблема решается выбором оптимальной структуры и настроек двух регуляторов системы – РТ и КРМ [5–7].

### Разработка методов оптимизации стабилизирующего регулятора

В типовой системе автоматического управления мощностью энергоблоков (САУМБ) в качестве РТ используется ПИ-регулятор [8, 9], передаточная функция которого имеет следующий вид:

$$W_{ПИ}(p) = \frac{K_p (T_i p + 1)}{T_i p}, \quad (4)$$

где  $K_p$  – коэффициент передачи регулятора;  $T_i$  – постоянная времени интегрирования, с.

В настоящее время существует множество различных способов настройки ПИ-регуляторов [10]. Один из самых простых и наглядных – автоматизированная настройка регулятора в среде Simulink MatLab. Процесс настройки и выбора параметров описан в [11]. В рассматриваемом случае после автоматизированной настройки были предложены следующие параметры оптимальной динамической настройки ПИ-регулятора (вариант I) исходя из критерия минимума интеграла от квадрата ошибки (ISE):  $K_p = 0,401$  и  $T_n = 0,187$  с. При данных настройках у системы автоматического управления обеспечиваются минимальные перерегулирование  $\sigma$  и время вхождения регулируемой величины в зону нечувствительности регулятора  $t_p$  ( $\pm 2\%$ ). Стоит отметить, что данный способ не позволяет настроить регулятор таким образом, чтобы при скачкообразном изменении заданного значения управляемой величины  $N_{зд}$  управляемая величина  $N_{ф}$  изменялась монотонно без перерегулирования. Передаточная функция РТ, настроенная по этому варианту, имеет следующий вид:

$$W_{РТ1}(p) = \frac{0,401(0,187p + 1)}{0,187p}.$$

Структуру предлагаемого РТ (вариант II) формируем на основе передаточной функции оптимального регулятора с использованием передаточной функции (3) опережающего участка по расходу топлива (газа) [12]

$$W_{РТ2}(p) = [W_{оп}(p)]^{-1} W_{зд1}^{pc(n=1)}(p), \quad (5)$$

где  $W_{зд1}^{pc(n=1)}(p)$  – передаточная функция разомкнутой системы в виде идеального интегрирующего звена,

$$W_{зд1}^{pc(n=1)}(p) = \frac{1}{T_{зд1}p}; \quad (6)$$

$T_{зд1}$  – единственный расчетный параметр динамической настройки РТ, рассчитываемый по формуле

$$T_{зд1} = T_{оп} + \sigma_{оп}. \quad (7)$$

С учетом передаточных функций (3), (5), (6) и равенства (7) передаточная функция РТ примет вид ПИ-регулятора (4) с параметрами  $K_p = 1/K_{оп}$  и  $T_n = T_{оп} + \sigma_{оп}$

$$W_{РТ2}(p) = \frac{(T_{оп} + \sigma_{оп})p + 1}{K_{оп}(T_{оп} + \sigma_{оп})p} = \frac{0,847(7,26p + 1)}{7,26p}. \quad (8)$$

Третий вариант настройки РТ (вариант III) осуществляем по передаточной функции опережающего участка (2) с использованием метода частичной компенсации [1–3]. Для этого необходимо рассчитать относительное значение коэффициента передачи стабилизирующего регулятора  $K$

$$K = K_p K_{\text{оп}} = 0,7395T \left(1 + \frac{1}{T}\right)^2 - 1, \quad (9)$$

где  $K_p$  – коэффициент передачи стабилизирующего ПИ-регулятора;  $T$  – относительная постоянная времени передаточной функции опережающего участка (2),

$$T = \frac{T_{\text{оп}}}{\sigma_{\text{оп}}} = \frac{6,6}{0,66} = 10. \quad (10)$$

$$\text{Тогда } K = 0,7395 \cdot 10 \left(1 + \frac{1}{10}\right)^2 - 1 = 7,948.$$

Затем с учетом (2) и (9) находим абсолютное значение  $K_p$

$$K_p = \frac{K}{K_{\text{оп}}} = \frac{7,948}{1,18} = 6,73. \quad (11)$$

Относительное значение времени интегрирования стабилизирующего регулятора  $I$  рассчитываем с учетом (9) и (10) по формуле

$$I = \frac{T_{\text{и}}}{\sigma_{\text{оп}}} = \frac{6,3K}{T \left(1 + \frac{1}{T}\right)^3} = \frac{6,3 \cdot 7,948}{10 \left(1 + \frac{1}{10}\right)^3} = 3,8. \quad (12)$$

С учетом (2) и (12) находим абсолютное значение времени интегрирования  $T_{\text{и}}$

$$T_{\text{и}} = I \sigma_{\text{оп}} = 3,8 \cdot 0,66 = 2,51 \text{ с}. \quad (13)$$

Таким образом, передаточная функция варианта III настройки РТ с учетом (4), (11) и (13) имеет следующий вид:

$$W_{\text{РТ3}}(p) = \frac{6,73(2,51p + 1)}{2,51p}.$$

Схема моделирования переходных процессов стабилизирующего регулятора КСАР при изменении задания РТ и внутреннем возмущении представлена на рис. 2.

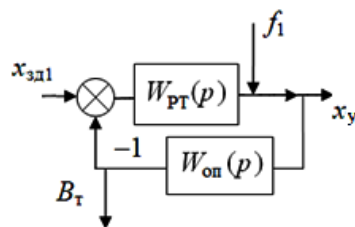


Рис. 2. Схема моделирования переходных процессов регулятора топлива при изменении задания и внутреннем возмущении

Fig. 2. The block diagram of transient simulation of fuel controller under the alteration of the step input and internal perturbation

Результаты моделирования переходных процессов для трех вариантов стабилизирующего регулятора КСАР при изменении задания РТ  $x_{зд1}$  и внутреннем возмущении  $f_1$  приведены на рис. 3.

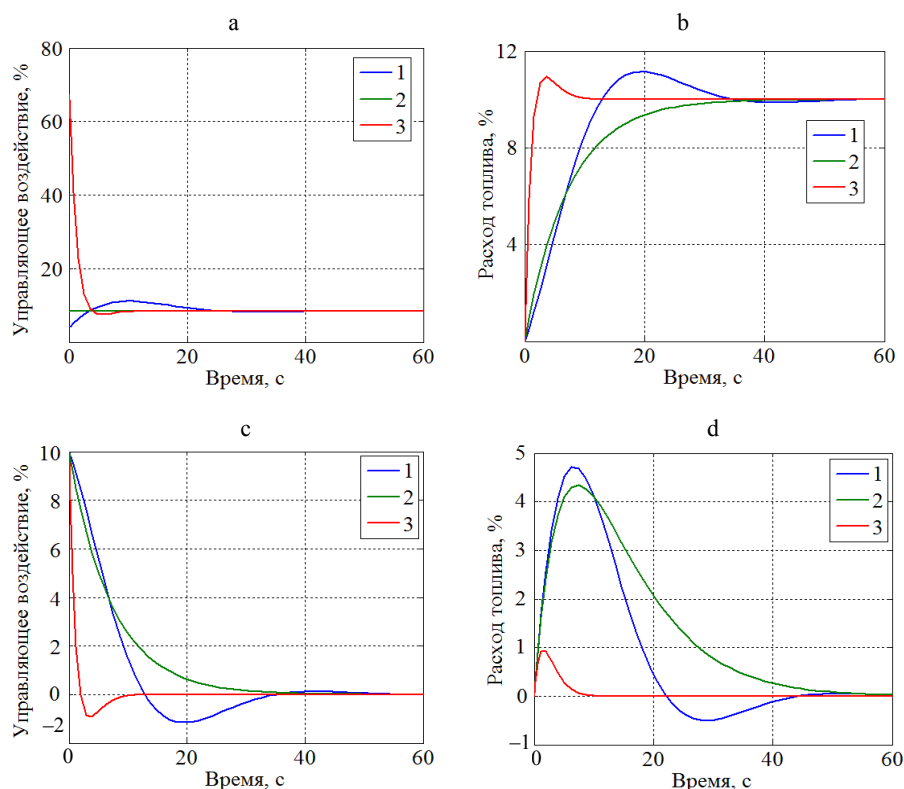


Рис. 3. Результаты моделирования переходных процессов регулятора топлива в случае изменения: а, б – управляющего воздействия и расхода топлива при изменении задания  $x_{зд1}$ ; в, д – то же при внутреннем возмущении  $f_1$ ; 1 – ПИ-регулятор, настроенный в Simulink MatLab; 2 – то же, настроенный по передаточной функции оптимального регулятора; 3 – то же, настроенный по методу частичной компенсации соответственно

Fig. 3. The results of transient simulation of a fuel controller in case of the alteration of: а, б – control action and fuel flow under the step input  $x_{зд1}$ ; в, д – same under the internal perturbation  $f_1$ ; 1 – PI-controller adjusted in the Simulink MatLab; 2 – same adjusted according to transfer function of the optimal controller; 3 – same adjusted according to a segmented compensation method respectively

Для анализа вариантов настройки РТ определены прямые показатели качества (ППК) переходных процессов, представленные в табл. 1.

При изменении задания регулятору наименьшее время регулирования наблюдалось у варианта III, у вариантов II и I оно больше по сравнению с вариантом III в 3,5 и 4 раза. Однако вариант II не имеет перерегулирования при отработке задания и у него наименьшее максимальное изменение управляющего воздействия (у вариантов I и III оно больше по сравнению с вариантом II соответственно в 1,31 и 7,92 раза).

Таблица 1

Прямые показатели качества сравниваемых вариантов настройки стабилизирующего регулятора каскадной системы автоматического регулирования

Direct quality indicators of the compared options for setting the stabilizing controller of the cascade automatic control system

Вариант	Вид возмущения	$t_p$ , с	$\sigma_m$ , %	$x_y^m$ , %	$\Delta B_T^m$ , %
I	$x_{зд1}$	32	11,5	11,1	–
	$f_1$	38	–	–	4,70
II	$x_{зд1}$	28	0	8,5	–
	$f_1$	42	–	–	4,30
III	$x_{зд1}$	8	9,4	67,3	–
	$f_1$	6	–	–	0,92

Обозначения:  $t_p$  – время вхождения регулируемой величины в зону нечувствительности регулятора ( $\pm 2$  %);  $\sigma_m$  – максимальное перерегулирование;  $x_y^m$  – максимальное изменение управляющего воздействия;  $\Delta B_T^m$  – максимальное динамическое отклонение расхода топлива при внутреннем возмущении.

При внутреннем возмущении наименьшее время регулирования у варианта III, у вариантов II и I оно больше по сравнению с III в 7 и 6,33 раза. При этом наименьшая величина максимального динамического отклонения расхода топлива также получилась у варианта III, у вариантов II и I он соответственно в 4,67 и 5,11 раза больше, чем у варианта III.

Для дальнейшей структурно-параметрической оптимизации КСАР выберем вариант II настройки РТ, поскольку отсутствие перерегулирования позволит снизить расход топлива в КСАР. Также существенным недостатком варианта III является то, что его высокое быстродействие достигается за счет слишком большой величины управляющего воздействия, а это будет негативно сказываться на долговечности металла котла.

На входе контура стабилизирующего регулятора, настроенного по передаточной функции оптимального регулятора, необходимо поставить усилитель с коэффициентом усиления, равным коэффициенту передачи  $K_{оп}$  передаточной функции опережающего участка по расходу топлива (газа), для превращения данного контура в единицу. Докажем это. Передаточная функция по задающему воздействию схемы для моделирования переходных процессов стабилизирующего регулятора КСАР (рис. 2) с учетом (3) и (8) имеет вид

$$W_{x_y, x_{зд1}}(p) = \frac{W_{РТ}(p)}{1 + W_{РТ}(p)W_{оп}(p)} = \frac{1}{\frac{1}{W_{РТ}(p)} + W_{оп}(p)} = \frac{1}{K_{оп}}.$$

В результате последовательного соединения дополнительного усилителя с коэффициентом передачи  $K_{оп}$  внутреннего контура с РТ скачок задания  $x_{зд1}$  на входе регулятора или скачок корректирующего воздействия на выходе корректирующего регулятора без искажения превращается в управляющее воздействие  $x_y$ .

**Разработка методов оптимизации корректирующего регулятора**

В типовой САУМБ в качестве КРМ используется ПИ-регулятор [8, 9], параметры динамической настройки которого (вариант I) рассчитываем аналогично типовому РТ в Simulink MatLab [11] ( $K_p = 1,008$  и  $T_i = 0,00806$  с). Передаточная функция варианта I настройки КРМ имеет следующий вид:

$$W_{\text{КРМ1}}(p) = \frac{1,008(0,00806p+1)}{0,00806p}.$$

В качестве предлагаемого варианта выбора структуры КРМ используем оптимальный регулятор (вариант II), передаточная функция которого [12]:

$$W_p^{\text{opt}}(p) = [W_{\text{об}}^o(p)]^{-1} W_{\text{зд}}^o(p) [1 - W_{\text{зд}}^o(p) e^{-\tau_y p}]^{-1}, \quad (14)$$

где  $W_{\text{об}}^o(p)$ ,  $W_{\text{зд}}^o(p)$  – часть передаточной функции объекта и заданной системы, которые не содержат запаздывания;  $\tau_y$  – условное запаздывание, с.

Рассматриваемому объекту соответствует следующая заданная передаточная функция замкнутой системы при отработке скачка задания, выполняющая роль критерия оптимальности [12]:

$$W_{\text{зд}}^o(p) = \frac{1}{(T_{\text{зд}}p+1)^2}, \quad (15)$$

где  $T_{\text{зд}}$  – численное значение постоянной времени критерия оптимальности как единственного параметра динамической настройки оптимального регулятора, с.

Условное запаздывание заданной передаточной функции замкнутой системы автоматического регулирования (критерий оптимальности) примем равным условному запаздыванию  $\tau_1$  объекта регулирования с передаточной функцией (1), т. е.  $\tau_y = \tau_1$ .

Подставив в передаточную функцию оптимального регулятора (14) передаточную функцию объекта (1) и критерий оптимальности (15), получим передаточную функцию предлагаемого КРМ

$$W_{\text{КРМ2}}(p) = \frac{(T_1p+1)(\sigma_1p+1)}{K_1(T_{\text{зд}}p+1)^2} \left[ 1 - \frac{e^{-\tau_1 p}}{(T_{\text{зд}}p+1)^2} \right]^{-1}. \quad (16)$$

Единственный расчетный параметр динамической настройки  $T_{\text{зд}}$  определим по правилу золотого сечения, приняв за целое меньшую постоянную времени передаточную функцию объекта (1):

$$T_{\text{зд}} = 3,034\tau_1 = 3,034 \cdot 13,4 = 40,7 \text{ с}. \quad (17)$$

С учетом (17) и коэффициентов передаточной функции объекта (1) получим передаточную функцию оптимального регулятора



$$W_{\text{KPM2}}(p) = \frac{(133p+1)(25,2p+1)}{1,8(40,7p+1)^2} \cdot \left[ 1 - \frac{e^{-13,4p}}{(40,7p+1)^2} \right]^{-1}.$$

Если условное запаздывание представить в виде [4]

$$e^{-\tau_y p} = \frac{1}{\tau_y p + 1}, \quad (18)$$

то передаточную функцию объекта (1) можно преобразовать

$$W_{N_{\Phi}, B_T}(p) = \frac{K_1}{(T_1 p + 1)(\sigma_1 p + 1)(\tau_1 p + 1)}. \quad (19)$$

Если при этом пренебречь второй производной в скобках с меньшими постоянными времени, то:

$$W_{N_{\Phi}, B_T}(p) = \frac{K_1}{(T_1 p + 1)[(\sigma_1 + \tau_1)p + 1]}. \quad (20)$$

Как третий способ выбора структуры КРМ предлагаем использовать реальный ПИД-регулятор. Передаточной функции объекта (20) будет соответствовать передаточная функция оптимального регулятора [12]

$$W_{\text{KPM3}}(p) = \left[ W_{N_{\Phi}, B_T}(p) \right]^{-1} W_{\text{зд}}^{\text{pc}(n=2)}(p), \quad (21)$$

где  $W_{\text{зд}}^{\text{pc}(n=2)}(p)$  – заданная передаточная функция разомкнутой системы в виде реального интегрирующего звена,

$$W_{\text{зд}}^{\text{pc}(n=2)}(p) = \frac{1}{2T_{\text{зд}} p \left( \frac{T_{\text{зд}}}{2} p + 1 \right)}. \quad (22)$$

Подставив (20) и (22) в передаточную функцию КРМ (21), получим

$$W_{\text{KPM3}}(p) = \frac{(T_1 p + 1)[(\sigma_1 + \tau_1)p + 1]}{K_1 2T_{\text{зд}} p \left( \frac{T_{\text{зд}}}{2} p + 1 \right)}. \quad (23)$$

Единственный расчетный параметр динамической настройки КРМ определим по формуле

$$T_{\text{зд}} = \frac{T_1 + \sigma_1 + \tau_1}{2K_1} = \frac{133 + 25,2 + 13,4}{2 \cdot 1,8} = 47,67 \text{ с}. \quad (24)$$

Подставив численные значения передаточной функции объекта (1) и  $T_{\text{зд}}$  в передаточную функцию КРМ (23), получим

$$W_{\text{КРМЗ}}(p) = \frac{(133p + 1)(38,6p + 1)}{1,8 \cdot 95,33p(23,83p + 1)}$$

Математическое моделирование переходных процессов в КСАР для трех вариантов выбора структуры и настройки КРМ будем производить по схеме, представленной на рис. 1, при двух видах возмущений: увеличение заданной мощности  $N_{\text{зд}}$  с 90 % номинальной мощности до 100 % [13] и скачок внутреннего возмущения  $f_1$ . Графики математического моделирования переходных процессов изображены на рис. 4.

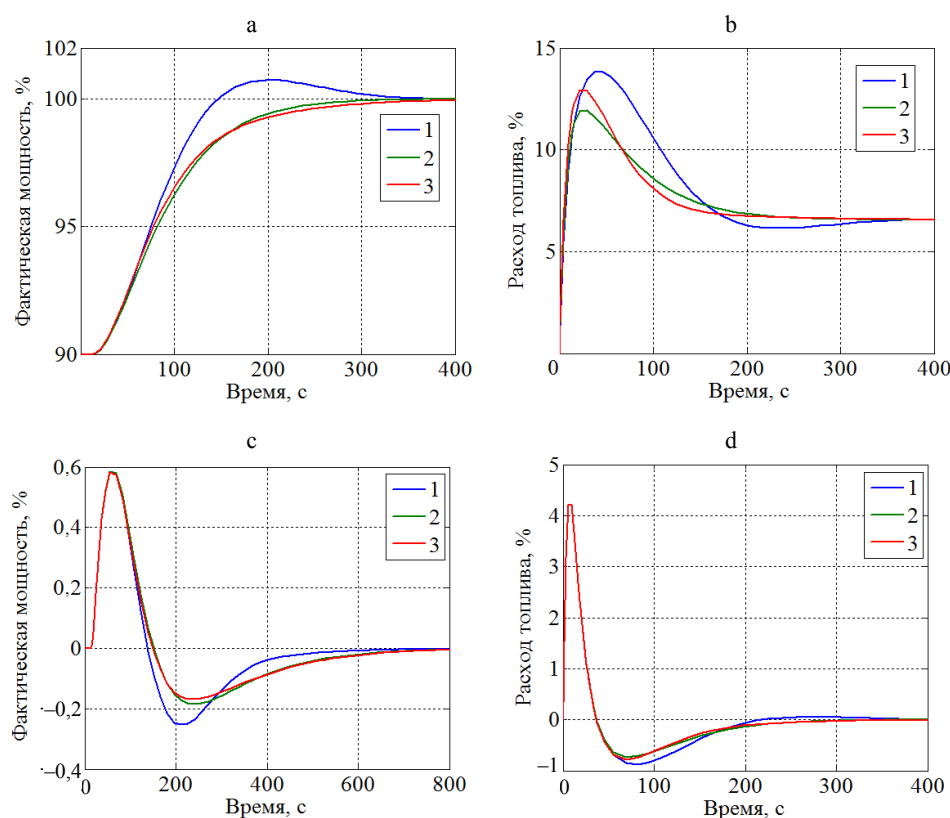


Рис. 4. Результаты моделирования переходных процессов каскадной системы автоматического регулирования в случаях изменения: а, б – фактической мощности энергоблока и расхода топлива при скачке задания;

с, д – то же при внутреннем возмущении; 1 – ПИ-регулятор, настроенный в Simulink MatLab; 2 – оптимальный регулятор; 3 – реальный ПИД-регулятор

Fig. 4. The results of transient simulation of cascaded automatic control system in case of the alteration of: а, б – factual power unit capacity and fuel flow under the step input; с, д – same under the internal perturbation; 1 – PI-controller designed by Simulink MatLab; 2 – optimal controller; 3 – real PID-controller

Для анализа вариантов различных структур и параметров динамической настройки КРМ определены ППК, представленные в табл. 2.

Таблица 2

**Прямые показатели качества сравниваемых вариантов структур  
и параметров динамической настройки корректирующего регулятора  
каскадной системы автоматического регулирования**

**Direct quality indicators of the compared variants of structures and parameters  
of dynamic adjustment of the correction controller of the cascade automatic control system**

Вариант	Вид возмущения	$t_p$ , с	$\sigma_m$ , %	$B_T^{M*}$ , о. е.	$B_T^M$ , %	$\Delta N_\phi^M$ , %
I	$N_{зд}$	124	0,74	2,11	–	–
	$f_1$	–	–	–	4,2	0,59
II	$N_{зд}$	172	0	1,82	–	–
	$f_1$	–	–	–	4,2	0,59
III	$N_{зд}$	176	0	1,97	–	–
	$f_1$	–	–	–	4,2	0,59

*Обозначения:*  $t_p$  – время вхождения регулируемой величины в зону нечувствительности системы автоматического управления мощностью энергоблока ( $\pm 1\%$  от номинальной мощности энергоблока);  $B_T^{M*}$  – максимальное относительное изменение расхода топлива (отношение максимального значения расхода топлива к установившемуся значению);  $B_T^M$  – максимальное изменение расхода топлива;  $\Delta N_\phi^M$  – максимальное динамическое отклонение фактической мощности при внутреннем возмущении.

При скачке задания  $N_{зд}$  наименьшее время регулирования настройки КРМ у варианта I, у вариантов II и III оно больше соответственно на 38,7 и 41,9 %, что все равно меньше требуемых стандартом [13] 300 с для газомазутных энергоблоков. В то же время увеличение фактической мощности на 5 % (половина регулировочного диапазона) у варианта I происходит за 75 с, у варианта II – за 82 с, у варианта III – за 78 с, что гораздо больше требуемых 15 с. Для выполнения этого требования необходимо в системе автоматического управления мощностью энергоблока правильно настроить турбинный регулятор мощности, дифференциатор инвариантности и формирователь сигнала задания. У вариантов II и III график изменения фактической мощности имеет апериодический характер без перерегулирования, у варианта I перерегулирование не превышает 1 % номинальной мощности энергоблока, что удовлетворяет требованиям [13]. Наименьший относительный расход топлива у варианта II, у вариантов III и I он больше на 8,2 и 15,9 % соответственно.

При внутреннем возмущении графики изменения фактической мощности и расхода топлива для всех трех вариантов схожи. При этом отклонение фактической мощности не выходит за пределы зоны нечувствительности регулятора. Расход топлива увеличивается на 4,2 % для всех трех вариантов настройки при внутреннем возмущении.

## ВЫВОДЫ

1. Предложены два варианта настройки ПИИ-регуляторов топлива – по передаточной функции оптимального регулятора и по методу частичной компенсации.
2. Для настройки ПИИ-регулятора топлива целесообразно использовать передаточную функцию оптимального регулятора, так как отсутствие

перерегулирования позволит снизить расход топлива в каскадной системе автоматического регулирования.

3. Существенным недостатком ПИИ-регулятора топлива, настроенного по методу частичной компенсации, является его высокое быстродействие, достигаемое за счет большой величины управляющего воздействия, что будет негативно сказываться на долговечности металла котла.

4. Предложены два метода настройки котельного регулятора мощности: оптимальный регулятор и реальный ПИД-регулятор, структура которого определена на базе передаточной функции оптимального регулятора.

5. Как базу для дальнейшей структурно-параметрической оптимизации системы автоматического управления мощностью энергоблока в качестве котельного регулятора мощности целесообразно использовать оптимальный регулятор, который обеспечивает переходные процессы без перерегулирования и имеет минимальный расход топлива при отработке скачка задания. Более высокое быстродействие типового ПИИ-регулятора, настроенного в Simulink MatLab, достигается за счет увеличения расхода топлива, что экономически нецелесообразно.

6. Если нет возможности замены аналогового регулятора на цифровой контроллер со свободно программируемой логикой, то целесообразно применять реальный ПИД-регулятор, так как этот вариант легко реализуется при помощи аналоговой техники в отличие от оптимального регулятора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаков, Г. Т. Параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в режиме постоянного давления пара перед турбиной / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-451-462>.
2. Кулаков, Г. Т. Параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в режиме переменного давления пара перед турбиной / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 540–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-539-551>.
3. Артёменко, К. И. Структурно-параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в широком диапазоне изменения нагрузок / К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 469–481. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-469-481>.
4. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования / Ф. Фрер, Ф. Орттенбургер. М.: Энергия, 1973. 192 с.
5. Лебедев, А. Т. Информационный метод расчета каскадных систем автоматического регулирования / А. Т. Лебедев // Автоматика и телемеханика. 1980. № 6. С. 188–191.
6. Мань, Н. В. Оптимальный синтез робастной каскадной автоматической системы управления / Н. В. Мань // Теплоэнергетика. 2000. № 9. С. 22–28.
7. Ротач, В. Я. К расчету каскадных систем автоматического регулирования / В. Я. Ротач, Н. З. Фьюнг // Теплоэнергетика. 1999. № 10. С. 10–16.
8. Кулаков, Г. Т. Теоретические основы экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического управления для повышения эффективности использования теплоэлектростанций в переменных режимах / Г. Т. Кулаков. Минск, 1990. 450 с.
9. Давыдов, Н. И. Результаты испытаний и модельных исследований системы автоматического управления мощностью газомазутного энергоблока 300 МВт / Н. И. Давыдов, Д. Г. Бояршинов, Н. В. Зорченко // Теплоэнергетика. 2005. № 10. С. 36–41.

10. Aidan, O'Dwyer (2009) Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules / O'Dwyer Aidan. – 3<sup>rd</sup> ed. Dublin: Institute of Technology; Ireland, Imperial College Press. 529 p.
11. PID Controller Tuning in Simulink [Electronic Resource] // MathWorks. 2019. Access mode: <https://www.mathworks.com/help/slcontrol/guided-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html>. Date of access: 25.11.2019.
12. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / Г. Т. Кулаков [и др.]; под общ. ред. Г. Т. Кулакова. Минск: Вышэйш. шк., 2017. 238 с.
13. Нормы участия энергоблоков тепловых электростанций в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и потоков активной мощности: СТО 59012820.27.100.002–2013. Введ. 25.04.2013. М.: ОАО «СО ЕЭС», 2013. 36 с.

Поступила 04.12.2019    Подписана в печать 11.02.2020    Опубликовано онлайн 29.05.2020

#### REFERENCES

1. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Artsiomenka K. I. (2018) Parametric Optimization for Automatic Control System of 300 MW Power Units at a Constant Steam Pressure Upstream of the Turbine. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-451-462> (in Russian).
2. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Artsiomenka K. I. (2018) Parametric Optimization for Automatic Control System of Power Units of 300 MW for the Mode of Variable Pressure of Turbine Inlet Steam. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 539–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-539-551> (in Russian).
3. Artsiomenka K. I. (2019) Structural-and-Parametric Optimization of Automatic Control System for Power Units of 300 MW in Wide Range of Load Variations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 469–481. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-469-481> (in Russian).
4. Frer F., Orttenger F. (1973) *Introduction to Regulating Electronic Technology*. Moscow, Energiya Publ. 192 (in Russian).
5. Lebedev A. T. (1980) Information Method for Computation of Cascade Automatic Control Systems. *Avtomatika i Telemekhanika = Automation and Remote Control*, 6, 188–191 (in Russian).
6. Man' N. V. (2000) Optimal Synthesis of a Robust Cascade Automatic Control System. *Thermal Engineering*, (47) 9, 783–791.
7. Rotach V. Ya., Fyong N. Z. (1999) On the Calculation of Cascade Automatic Control Systems. *Thermal Engineering*, 46 (10), 813–819.
8. Kulakov G. T. (1990) *Theoretical Fundamentals of Proximate Methods of Structural-Parametric Optimization of Automatic Control Systems to Improve Efficiency of the Use of Heat Power Plants in Variable Operation Modes*. Minsk. 450 (in Russian).
9. Davydov N. I., Boyarshinov D. G., Zorchenko N. V. (2005) Results from Tests and Model Investigations of the Automatic Power Governing System for a 300 MW Gas-and-Oil-Fired Power Unit. *Thermal Engineering*, 52 (10), 776–781.
10. Aidan O'Dwyer (2009) *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. 3<sup>rd</sup> ed. Dublin, Institute of Technology; Ireland, Imperial College Press. 529. <https://doi.org/10.1142/p575>.
11. PID Controller Tuning in Simulink. (2019) *MathWorks*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/slcontrol/guided-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html>. (Accessed 25 November 2019).
12. Kulakov G. T., Kulakov A. T., Kravchenko V. V., Kuchorenko A. N., Artsiomenka K. I., Kovrigo Yu. M., Golinko I. M., Bagan T. G., Bunke A. S. (2017) *Automatic Control Theory for Heat Power Processes*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 238 (in Russian).
13. Company Standard 59012820.27.100.002–2013. *Norms of Participation of Thermal Power Plant Units in the Normed Primary Frequency Regulation and in the Automatic Secondary Frequency and Active Power Flows Regulation*. Moscow, JSC “SO EES”, 2013, 36 (in Russian).

Received: 4 December 2019

Accepted: 11 February 2020

Published online: 29 May 2020