

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В БАРАБАНЕ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т.<sup>1)</sup>, асп. КУХОРЕНКО А. Н.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>2)</sup>Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

E-mail: kux@tut.by

Работа регулятора в типовой трехимпульсной системе автоматического регулирования уровня воды в барабане котла не обеспечивает качественную отработку внутреннего и крайнего внешнего возмущений (наличие статических ошибок регулирования). Это делает актуальными вопросы ее модернизации. Рассмотрены различные методы настройки ПИ-регулятора типовой трехимпульсной системы автоматического регулирования питания. Предложены способы, позволяющие существенно улучшить качество регулирования уровня воды в барабане котла, устранив при этом недостатки типовой системы автоматического регулирования. Обусловлена актуальность использования каскадной системы автоматического регулирования на основе передаточной функции оптимального регулятора.

Выявлено, что оптимальные переходные процессы обеспечивают расчет численных значений коэффициента передачи регулятора при  $\gamma = 2,618$ , что больше, чем рекомендуемые в литературе, однако при этом сохраняются статические ошибки регулирования при отработке внутреннего и внешнего возмущений с явлением «набухания уровня». Рекомендован метод моделирования переходных процессов в ускоренном масштабе времени, что позволяет значительно раньше установить величину статической ошибки регулирования при возмущении расходом перегретого пара и соответствующим образом изменить задание корректирующему устройству каскадной системы автоматического регулирования. При этом численные значения постоянных времени критериев оптимальности стабилизирующего и корректирующего регуляторов следует вычислять на основе ряда чисел правила золотого сечения, приняв за целое соответствующие постоянные времени опережающего участка и запаздывания, запаздывания по каналу регулирующего воздействия, с учетом максимальной величины регулирующего и корректирующего воздействий. Такое решение позволяет в два раза сократить полное время регулирования, уменьшить абсолютную ошибку регулирования в три раза, а максимальную величину регулирующего воздействия расходом питательной воды – в 1,7 раза.

**Ключевые слова:** переходный процесс, уровень воды, барабан паровых котлов.

Ил. 7. Библиогр.: 10 назв.

## OPTIMIZATION OF TRANSIENT PROCESSES OF WATER LEVEL VARIATION IN DRUM OF STEAM BOILERS

KULAKOV G. T., KUHARENKO A. N.

*Belorussian National Technical University,*

*“Institute of Command Engineers” of the Ministry for Emergency Situations  
of the Republic of Belarus (ICE)*

The work of regulator in general three-impulse automatic control system of water level in drum of boiler doesn't supply quality of internal and external distur-

bance attack (presentation of regulation mistakes). That is why it is needed to improve. Different methods of proportional plus reset controller regulation of three-phase automatic feed control system are considered. There were suggested new methods to improve the quality of regulation of water level in boilers. Here the step system of automatic regulation was determined, on the base of transfer function.

It is noticed that optimal transient processes supply calculation of numerical value of transmission factor of regulator at  $\gamma = 2,618$ , it is more then was recommended, but statistic mistakes remain. The transient simulation method in fast-time scale is recommended, this allow to determine early the value of statistic mistake of regulation by disturbances of reheated steam consumption and properly change the task to compensating device of step automatic control system. And numerical value of time constant criteria should be calculated on the base of numbers of golden section( $\Phi$ ), taking into account the definite time constant of lead section and time-lag, time-lag on controlled influence channel, and also taking into account maximum value of controlled influence. This method allow to reduce in two times the total time of regulation, to decrease absolute mistake of regulation in three times, and maximum value of regulation influence by feedwater in 1,7 times.

**Keywords:** transient process, water level, drum of steam boilers.

Fig. 7. Ref.: 10 titles.

Максимально допустимые отклонения уровня воды в барабане котла конкретного типа устанавливаются заводом-изготовителем. Поэтому поддержание заданного уровня воды в барабане котла является важным технологическим параметром, от которого также зависят надежность, безопасность и экономичность работы котельного оборудования электростанции. Это требование – важная и актуальная задача при их эксплуатации. Паровые барабанные котельные агрегаты, оставшиеся в наследство Республике Беларусь от распада СССР, получили широкое распространение в ее энергетике, как и трехимпульсные системы автоматического регулирования (САР), а также их модификации [1].

Регулятор трехимпульсной САР обеспечивает хорошую отработку скачка задания, но не обеспечивает качественную отработку внутреннего и крайнего внешнего возмущений (наличие статических ошибок регулирования). Такая работа регулятора снижет экономичность, надежность и долговечность работы котла, а также делает актуальными вопросы ее модернизации. Динамика уровня воды в барабане котла при возмущении расходом питательной воды характеризуется отсутствием самовыравнивания, а также явлением «набухания уровня» при возмущении расходом перегретого пара [2].

Простейший статический регулятор (П-регулятор) имеет угол опережения, равный  $\varphi = \pi$ , что позволяет ему обеспечивать минимальную динамическую погрешность регулируемого параметра в переходных режимах для объектов без самовыравнивания. Простейший идеальный астатический регулятор (И-регулятор) имеет малый угол опережения, равный  $\varphi = \pi/2$ , что не пригодно для работы на объектах без самовыравнивания, так как замкнутая система становится нейтральной или неустойчивой. Угол опережения у реального интегрирующего регулятора занимает промежуточное положение между этими двумя регуляторами, но динамическая погрешность регулирования у него больше, чем у статического. Поэтому в трехимпульсной САР уровня воды в барабане котла с целью повышения устойчивости регулирования применяют ПИ-регулятор с жест-

кой обратной связью. При этом САР состоит из двух контуров: внутреннего, включающего регулятор и устройство жесткой обратной связи, и внешнего, включающего объект регулирования и эквивалентный регулятор, состоящий из устройства жесткой обратной связи и регулятора [3].

Схема моделирования переходных процессов трехимпульсной САР питания барабанных паровых котлов [2] приведена на рис. 1.

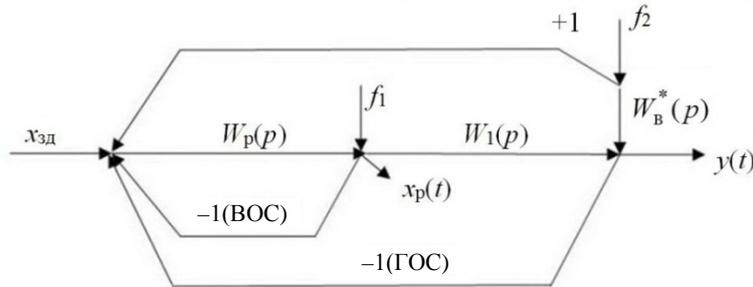


Рис. 1. Схема моделирования САР питания барабанного парового котла:

$y(t)$  – основная регулируемая величина;  $x_{зд}$  – заданное значение основной регулируемой величины;  $x_p(t)$  – регулирующее воздействие;  $f_1$  – внутреннее возмущение;  $f_2$  – возмущение нагрузкой (расходом перегретого пара);  $W_p(p)$  – передаточная функция ПИ-регулятора;  $W_1(p)$  – передаточная функция объекта регулирования по каналу регулирующего воздействия;  $W_b^*(p) = W_2(p) - W_3(p)$  – передаточная функция внешнего возмущения расходом перегретого пара; ГОС – главная обратная связь; ВОС – внутренняя обратная связь

Передаточная функция объекта регулирования представлена в виде реального интегрирующего звена

$$W_1^*(p) = \frac{1}{T_1 p (\tau_1 p + 1)}, \quad (1)$$

где  $T_1$  – постоянная времени идеального интегрирующего звена;  $\tau_1$  – постоянная времени инерционного звена первого порядка, численно равная величине запаздывания по каналу регулирующего воздействия;  $p$  – оператор Лапласа.

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид

$$W_p(p) = \frac{k_p (T_n p + 1)}{T_n p}, \quad (2)$$

где  $k_p$  – коэффициент передачи;  $T_n$  – время интегрирования ПИ-регулятора, численное значение которого рекомендуется выбирать по динамике внутреннего быстродействующего контура, определяемой изменением расхода питательной воды [2].

Численное значение коэффициента передачи ПИ-регулятора трехимпульсной САР обычно рассчитывают с учетом передаточной функции объекта (1) по формуле

$$k_p = \gamma \frac{T_1}{\tau_1}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – доля отношения постоянных времени  $T_1/\tau_1$ , численное значение которой у различных авторов переменное.

Например, в [2] рекомендуется принимать  $\gamma = 1,0$ , в [4] –  $\gamma = 0,8$  при степени затухания переходных процессов  $\psi = 0,75$ , в [5] –  $\gamma = 0,55$  при степени затухания переходных процессов  $\psi = 0,9$ .

Передаточная функция внешнего возмущения расходом перегретого пара с явлением «набухания уровня» воды в барабане котла имеет следующий вид [6]:

$$W_B^*(p) = W_2(p) - W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1} - \frac{1}{T_4 p}, \quad (4)$$

т. е. представляет собой разницу передаточных функций инерционного звена первого порядка и идеального интегрирующего звена. При этом величина «набухания уровня» будет тем больше, чем больше численное значение коэффициента передачи инерционного звена первого порядка  $k_3$ .

Передаточную функцию ПИ-регулятора, охваченного единичной обратной связью, приведем к виду передаточной функции эквивалентного регулятора

$$W_{\text{эвл}}(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{T_n p + 1}{T_n \left( \frac{1 + k_p}{k_p} \right) p + 1}, \quad (5)$$

т. е. получаем интегро-дифференцирующее звено.

Так как  $T_n \left( \frac{1 + k_p}{k_p} \right) > T_n$ , передаточная функция эквивалентного регулятора (5) в динамике представляет собой звено медленного реагирования.

На примере парогенератора БКЗ-210-140, работающего на общую паровую магистраль (максимальная производительность 210 т/ч; минимальная – 140 т/ч [2]), осуществим моделирование переходных процессов трехимпульсной САР питания при основных возмущениях с использованием пакета Simulink программного обеспечения MatLab. Динамика объекта регулирования по уровню при возмущении расходом питательной воды и перегретого пара парогенератора БКЗ-210-140 имеет следующие параметры:  $\tau_1 = 21$  с;  $T_1 = 37$  с;  $k_3 = 1,5$ ;  $T_3 = 20$  с;  $T_4 = 67$  с.

При моделировании переходных процессов численное значение  $\gamma$  в формуле (3) изменяли в пределах от 0,146 до 2,382 в соответствии с рядом чисел правила золотого сечения, приняв за целое отношение  $T_1/\tau_1$ . Полученные при этом графики переходных процессов трехимпульсной САР питания при основных возмущениях приведены на рис. 2.

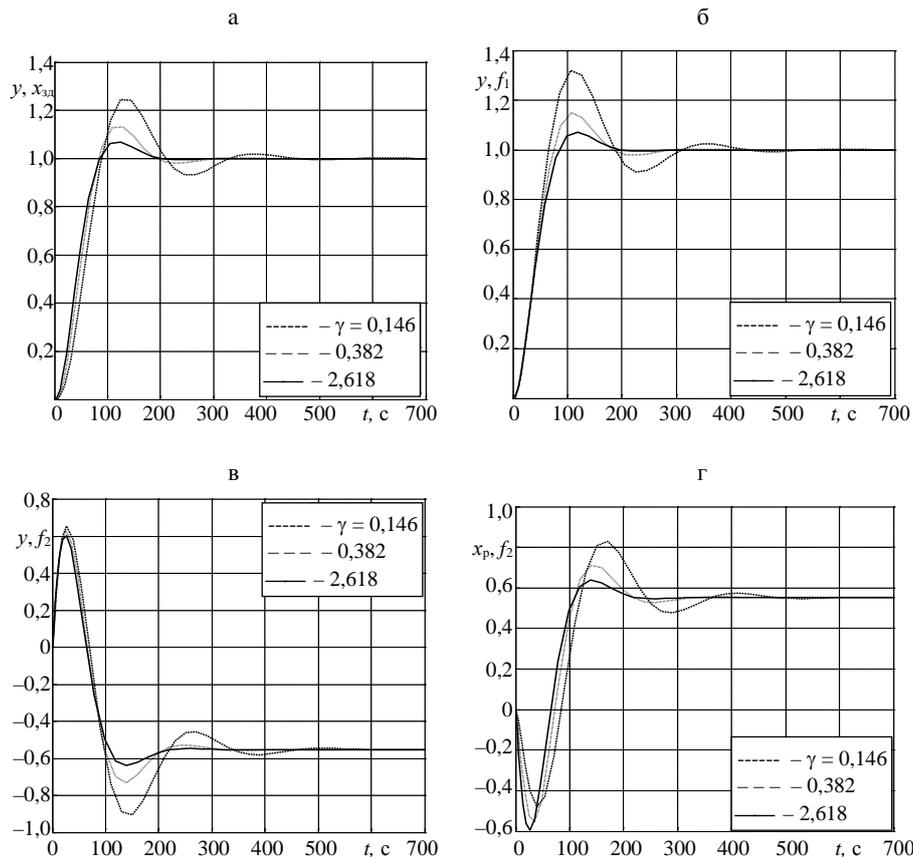


Рис. 2. Переходные процессы трехимпульсной САР питания барабанного парового котла БКЗ-210-140 при отработке основных возмущений с различными значениями  $\gamma$ : а – отработка скачка задающего воздействия  $x_{зад}$ ; б – отработка внутреннего возмущения  $f_1$ ; в – отработка внешнего возмущения расходом пара с явлением «набухания уровня»  $f_2$ ; г – изменение регулирующего воздействия  $x_p$  (расхода питательной воды) при отработке внешнего возмущения расходом пара;  $t$  – время

Из приведенных на рис. 2 графиков переходных процессов видно, что при отработке внутреннего возмущения появляется статическая ошибка регулирования, которая устанавливается на одном уровне при любых значениях  $\gamma$ . Вместе с тем, лучшие прямые показатели качества регулирования обеспечиваются при численном значении коэффициента  $\gamma > 1$ : сокращается время регулирования, уменьшаются максимальная величина перерегулирования и отклонения расхода питательной воды. Статическая ошибка регулирования также возникает при отработке внешнего возмущения расходом пара, появление которого характеризуется явлением «набухания уровня» в барабане котла и стабилизируется на одном уровне. Следует отметить, что при топочном возмущении статическая ошибка регулирования отсутствует.

Аналогичное моделирование проводили с использованием ПИ-регулятора, настроенного по методу симметричного оптимума [7]. Однако при этом скачок задания обрабатывали с величиной перерегулирования 43,2 %, а максимальная динамическая ошибка регулирования при отработ-

ке внутреннего возмущения превысила допустимые значения, но в пределах допустимой степени затухания переходного процесса [2].

Так как динамика переходных процессов типовой каскадной и САР с дифференциатором при основных воздействиях адекватна [8], то дальнейшее исследование проводили с использованием каскадной двухконтурной САР (КСАР), стабилизирующий регулятор которой оптимизирует внутреннее возмущение, но при этом обрабатывает задающее воздействие  $x_{зд1}$  без перерегулирования, а корректирующий – внешнее возмущение (рис. 3).

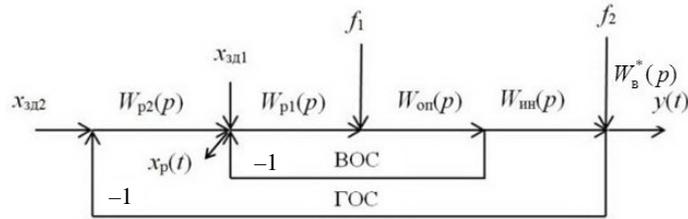


Рис. 3. Схема моделирования каскадной двухконтурной САР уровня воды в барабане котла:  
 $y(t)$  – основная регулируемая величина (уровень воды в барабане котла);  
 $x_{зд1}, x_{зд2}$  – заданное значение промежуточной и основной регулируемой величины соответственно;  $x_p(t)$  – регулирующее воздействие (расход питательной воды);  
 $f_1, f_2$  – внутреннее и внешнее возмущения (расходом перегретого пара);  
 $W_{p1}(p), W_{p2}(p)$  – передаточная функция стабилизирующего и корректирующего регулятора;  
 $W_{б}^*$  – передаточная функция внешнего возмущения расходом перегретого пара;  
 ГОС – главная обратная связь; ВОС – внутренняя обратная связь;  
 $W_{оп}(p), W_{ин}(p)$  – передаточная функция опережающего и инерционного участков объекта регулирования соответственно

Передаточная функция опережающего участка имеет вид

$$W_{оп}^*(p) = \frac{k_{оп}}{T_{оп}^* p + 1}, \quad (6)$$

где  $k_{оп}$  – коэффициент передачи;  $T_{оп}^*$  – эквивалентная постоянная времени опережающего участка, характеризующая динамику изменения расхода питательной воды.

Передаточная функция стабилизирующего регулятора на основе передаточной функции оптимального регулятора примет вид

$$W_{p1}(p) = \frac{1}{W_{оп}^*(p)} \frac{W_{зд1}(p)}{1 - W_{зд1}(p)}. \quad (7)$$

При этом оптимальная передаточная функция замкнутой САР внутреннего контура по задающему воздействию (критерий оптимальности)  $x_{зд1} = 1(t)$  соответствует инерционному звену первого порядка

$$W_{зд1}(p) = \frac{1}{T_{зд1} p + 1}, \quad (8)$$

где  $T_{зд1}$  – заданная постоянная времени критерия оптимальности по промежуточной регулируемой величине.

Подставив (6) и (8) в (7), получим

$$W_{p1}(p) = \frac{T_{оп}^* p + 1}{k_{оп} T_{зд1} p}. \quad (9)$$

Видно, что в качестве стабилизирующего регулятора получился ПИ-регулятор с одним параметром оптимальной динамической настройки  $T_{зд1}$ . Выбор значений  $T_{зд1}$  осуществляют в соответствии с правилом золотого сечения, используемым для оптимизации КСАР в [9, 10]. При этом за целое принимали постоянную времени разгона по расходу питательной воды ( $T_{оп}^* = 5$  с)

$$T_{зд1} \in [0,146; 0,236; 0,382; 0,44; 0,56; 0,618; 1,0] T_{оп}^*. \quad (10)$$

Оптимальная передаточная функция корректирующего устройства имеет следующий вид:

$$W_{p2}(p) = \frac{1}{W_{эKB2}(p)} \frac{W_{зд2}(p)}{1 - W_{зд2}(p)}, \quad (11)$$

где передаточная функция эквивалентного объекта  $W_{эKB2}(p)$  с учетом заданной передаточной функции внутреннего контура (8) и передаточной функции инерционного участка (1) примет следующий вид:

$$W_{эKB}(p) = W_{зд1}(p) W_1^*(p) = \frac{1}{T_1 p (\tau_1 p + 1) (T_{зд1} p + 1)}. \quad (12)$$

При этом заданная передаточная функция системы при отработке скачка задания  $x_{зд2} = 1(t)$  (критерий оптимальности) согласно структуре эквивалентного объекта будет равна

$$W_{зд2}(p) = \frac{1}{(T_{зд2} p + 1)^3}. \quad (13)$$

где  $T_{зд2}$  – заданная постоянная времени критерия оптимальности по основной регулируемой величине.

Подставив (12) и (13) в (11), получим значение оптимальной передаточной функции корректирующего устройства

$$W_{p2}(p) = \frac{T_1 (\tau_1 p + 1) (T_{зд1} p + 1)}{3 T_{зд2} \left( \frac{T_{зд2}^2}{3} p^2 + T_{зд2} p + 1 \right)}. \quad (14)$$

Выбор численных значений постоянной времени  $T_{зд2}$  критерия оптимальности по основной регулируемой величине осуществляли также с использованием ряда чисел правила золотого сечения, однако при этом за целое принимали численное значение  $\tau_1 = 21$  с. При моделировании переходных процессов приняты следующие значения заданных постоянных времени:  $T_{зд1} = 0,146T_{оп}^*$ ;  $T_{зд2} = 0,618\tau_1$ ;  $T_{зд2} = 1\tau_1$ . Графики переходных процессов КСАР при основных воздействиях приведены на рис. 4.

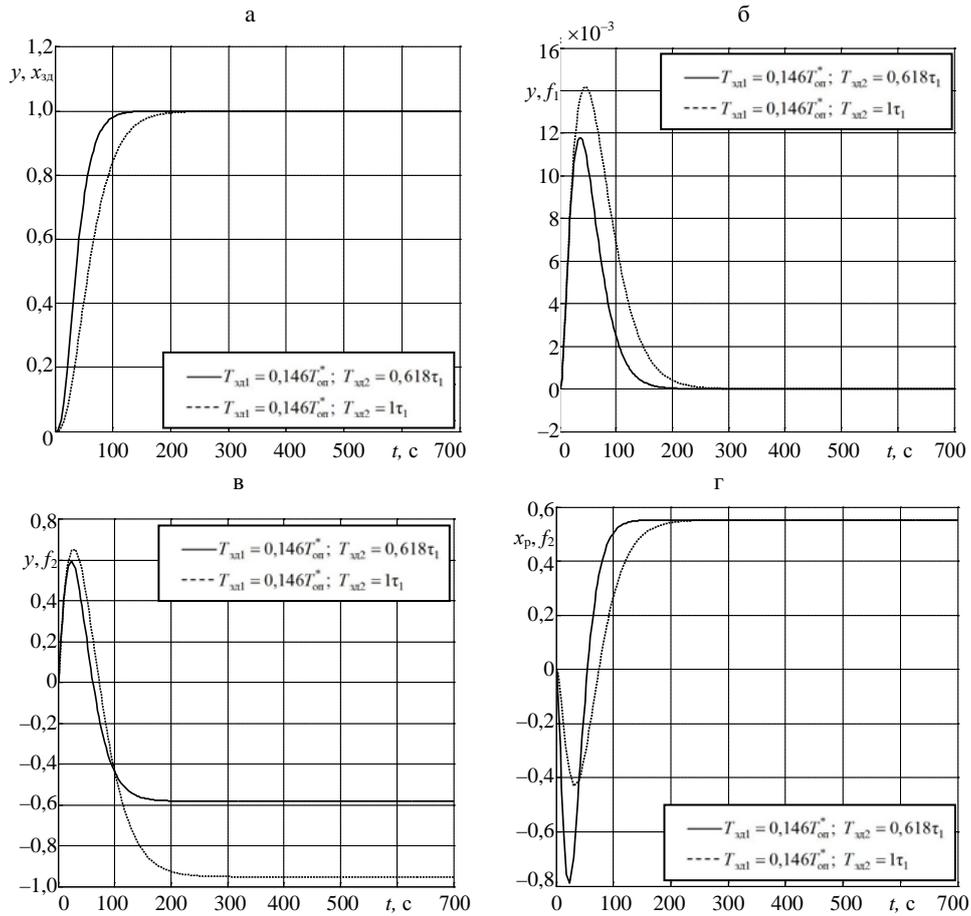


Рис. 4. Переходные процессы каскадной двухконтурной САР уровня воды в барабане котла при отработке основных возмущений с различными значениями времени  $T_{зд1}$  и  $T_{зд2}$ : а – отработка скачка задающего воздействия  $x_{зд}$ ; б – отработка внутреннего возмущения  $f_1$ ; в – отработка внешнего возмущения расходом пара  $f_2$ ; г – изменения регулирующего воздействия  $x_p$  при отработке внешнего возмущения расходом пара

Из анализа приведенных на рис. 4 графиков переходных процессов в системе следует, что уменьшение численного значения постоянной времени  $T_{зд2}$  приводит к улучшению регулирования при всех видах воздействий, однако при этом увеличивается максимальная величина регулирующего воздействия (рис. 4г). Статическая ошибка регулирования при отработке внешнего возмущения хотя и уменьшается, но не исчезает.

Для устранения этого недостатка дополнительно измеряли расход перегретого пара (при моделировании крайнего внешнего возмущения  $f_2$ ), устанавливали время стабилизации уровня  $t_1$ , определяли величину статической ошибки регулирования, как разность заданного и установившегося значения ошибки регулируемой величины (уровень воды в барабане), и в момент времени стабилизации уровня изменяли задание корректирующему регулятору на величину  $\Delta u = x_{зд2} - y(t_1)$  с противоположным знаком. В результате чего устраняли статическую ошибку регулирования при отработке внешнего возмущения с явлением «набухания уровня» (рис. 5), однако при этом увеличивалось время регулирования.

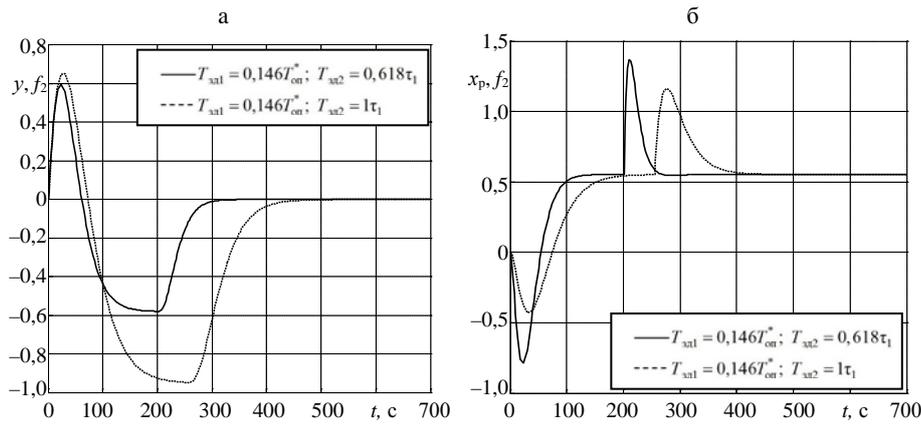


Рис. 5. Переходные процессы каскадной двухконтурной САР уровня воды в барабане котла с устройством корректировки ошибки регулирования при возмущении расходом пара: а – отработка внешнего возмущения расходом пара  $f_2$ ; б – величина регулирующего воздействия  $x_p$  при отработке внешнего возмущения расходом пара

Причем увеличение численного значения постоянной времени  $T_{зд2}$  с  $0,618\tau_1$  до  $1,000\tau_1$  приводило к увеличению отклонений уровня воды в барабане котла от заданного значения (рис. 5а), однако несколько уменьшало отклонения расхода питательной воды (рис. 5б). Вместе с тем из-за того, что коррекцию задания проводили в моменты времени стабилизации уровня, т. е. после окончания переходных процессов (рис. 4), общая площадь ошибки регулирования по уровню была достаточно велика (рис. 5). Для устранения этого недостатка одновременно с изменением нагрузки (расхода пара) запускали программы моделирования САР уровня воды в барабане котла при возмущении расходом пара в ускоренном масштабе времени, например с уменьшением реального времени в 20 и 40 раз (рис. 6).

Видно, что величины статических ошибок регулирования в конце переходных процессов на рис. 6 совпадают с данными рис. 4в, однако время определения статической ошибки регулирования существенно сокращается. Это позволяет значительно раньше установить величину статической ошибки регулирования при возмущении расходом перегретого пара и соответствующим образом изменить задание корректирующему устройству.

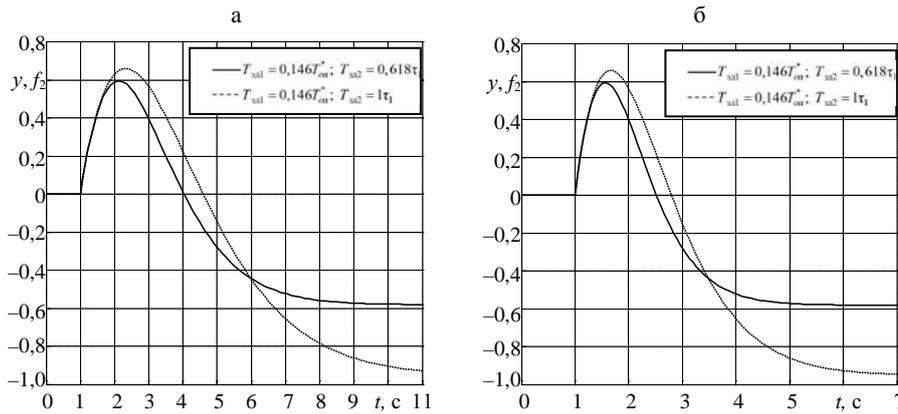


Рис. 6. Отработка внешнего возмущения расходом пара  $f_2$  каскадной двухконтурной САР уровня воды в барабане котла в ускоренном масштабе времени: а – в 20 раз; б – в 40 раз

Результаты моделирования отработки внешнего возмущения расходом пара КСАР уровня воды в барабане котла с ускоренной коррекцией задания  $x_{зд2}$  на величину статической ошибки регулирования приведены на рис. 7 (для постоянных времени:  $T_{зд1} = 0,146T_{оп}^*$ ;  $T_{зд2} = 0,618\tau_1$ ).

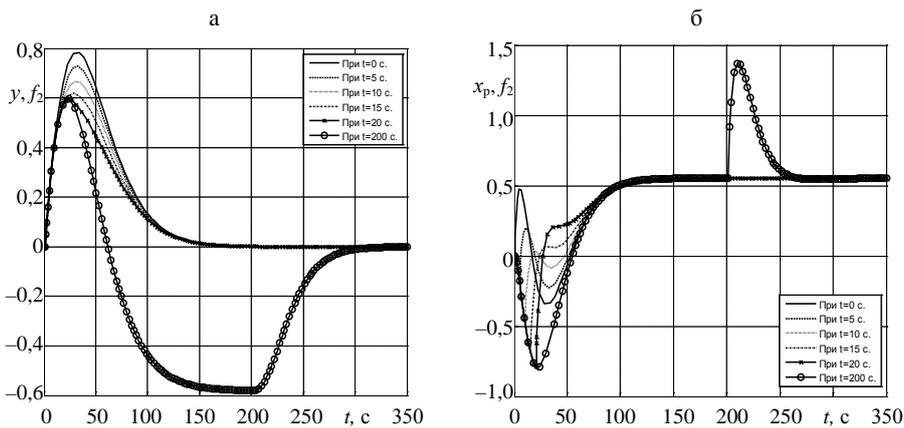


Рис. 7. Отработка внешнего возмущения расходом пара  $f_2$  каскадной двухконтурной САР уровня воды в барабане котла: а – с корректировкой величины статической ошибки регулирования при  $t \in 0; 5; 10; 15; 20$  с и при  $t = 200$  с; б – изменения регулирующих воздействий  $x_p$  при отработке внешнего возмущения расходом пара

Ускоренная корректировка задания позволила существенно улучшить качество регулирования уровня воды в барабане котла при возмущении расходом перегретого пара: полное время регулирования уменьшилось в два раза, абсолютная линейная ошибка регулирования сократилась в три раза, а максимальная величина регулирующего воздействия расходом питательной воды – в 1,7 раза.

## ВЫВОДЫ

1. Результаты моделирования переходных процессов показали, что типовая трехимпульсная система автоматического регулирования при расче-

те численного значения коэффициента  $\gamma$  обеспечивает отработку скачка задания без статической ошибки регулирования. Причем оптимальные переходные процессы обеспечивает расчет численных значений коэффициента передачи регулятора при  $\gamma = 2,618$ , что больше чем рекомендуемые в [2, 4, 5]. Однако при этом сохраняются статические ошибки регулирования при отработке внутреннего и внешнего возмущений с явлением «набухания уровня».

2. Для устранения статических ошибок регулирования предложено использовать структурно-параметрическую оптимизацию каскадной системы автоматического регулирования. Устранение статической ошибки регулирования при отработке внутреннего возмущения осуществляется стабилизирующим регулятором, а статической ошибки регулирования при отработке крайнего внешнего возмущения с явлением «набухания уровня» – соответствующим выбором структуры корректирующего устройства, а также коррекцией задания последнему на величину статической ошибки регулирования в момент времени, когда основная регулируемая величина стабилизируется. Тем не менее абсолютная величина ошибки регулирования при отработке внешнего возмущения получается достаточно большой. При этом структурно-параметрическую оптимизацию регулирующих устройств каскадной системы автоматического регулирования проводят на основе передаточной функции оптимального регулятора. Численные значения постоянных времени критериев оптимальности вычисляют на основе ряда чисел правила золотого сечения, приняв за целое для стабилизирующего регулятора эквивалентную постоянную времени опережающего участка, а для корректирующего устройства – постоянную времени запаздывания по каналу регулирующего воздействия с учетом максимальной величины регулирующего и корректирующего воздействий.

3. Для устранения указанного недостатка одновременно с моментом появления крайнего внешнего возмущения расходом пара осуществляют моделирование переходных процессов в ускоренном масштабе времени, что позволяет значительно раньше определять величину статической ошибки регулирования и соответствующим образом скорректировать задание корректирующему устройству. В результате этого существенно улучшается качество поддержания уровня воды в барабане котла при уменьшении максимальной величины регулирующего воздействия расходом питательной воды в 1,7 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г у р е в и ч, Э. З. Состояние, перспективы развития и технико-экономическая оценка автоматизации питания барабанных парогенераторов / Э. З. Гуревич. – Минск, 1974. – 60 с.
2. К л ю е в, А. С. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов / А. С. Ключев, А. Т. Лебедев, С. И. Новиков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 280 с.
3. Н о в и к о в, С. И. Рекомендации по обучению приемам настройки регуляторов на специальном стенде / С. И. Новиков, Б. Я. Жихарев, М. Н. Г. Мац. – М.: СЦТИ ОРГРЭС, 1973. – 43 с.
4. С т е ф а н и, Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / Е. П. Стефани. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.
5. С п р а в о ч н и к по наладке автоматических устройств контроля и регулирования / В. А. Дубровный [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1981. – Ч. 2. – 940 с.

6. Широкий, Д. К. Расчет параметров промышленных систем регулирования: справ. пособие / Д. К. Широкий, О. Д. Куриленко. – Киев: Техшка, 1972. – 232 с.
7. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования: пер. с нем. / Ф. Фрер, Ф. Орттенбургер. – М.: Энергия, 1973. – 193 с.
8. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления: учеб. / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2010. – 574 с.
9. Кулаков, Г. Т. Методика структурно-параметрической оптимизации каскадных систем автоматического регулирования на основе модифицированного упредителя Смита / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, В. В. Кравченко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2012. – № 2. – С. 40–45.
10. Сороко, Э. М. Золотые сечения, процессы самоорганизации и эволюции систем: введение в общую теорию гармонизации систем / Э. М. Сороко. – М.: КомКнига, 2006. – 264 с.

#### REFERENCES

1. Gurevich, E. Z. (1974) *State, Long-Term Plan of Development and Technical-Economical Analysis of Feed Automation of Drum Heat Generators*. Minsk. 60 p. (in Russian).
2. Kluev, A. S., Lebedev, A. G., & Novikov, S. I. (1985) *Adjustment of Automatic Regulation System for Drum Steam Boilers*. Moscow, Energouzdats. 280 p. (in Russian).
3. Novikov, S. I., Zhiharev, B. Ya., & Maz, M. N. G. (1973) *Training Recommendations on Regulators Adjustment on Special Bench*. Moscow, SShchTI ORGRES. 43 p. (in Russian).
4. Stefani, E. P. (1972) *Basis of Adjustment Calculation for Regulators of Heat Power Processes*. Moscow, Energy. 376 p. (in Russian).
5. Dubrovnyi, V. A., Zabolotskiy, E. I., Tregub, V. G., & Kholodovskii, B. A. (1981) *Ref. Book on Adjustment of Automatic Control and Regulation Devices*. Kiev, Navukova Dumka, Part 1. 940 p. (in Russian).
6. Shiroki, D. K., & Kurilenko, O. D. (1972) *Parameters Calculation of Industrial Regulation Systems*. Kiev, Texshka. 232 p. (in Russian)
7. Frer, F., Orttensburger, F. (1973) *Introduction in Electronic Devices of Regulation*. Moscow, Energy. 193 p. (in Russian).
8. Kuzmitskiy, I. F., & Kulakov, G. T. (2010) *Theory of Automatic Control*. Minsk: Belorussian State Technical University. 574 p. (in Russian).
9. Kulakov, G. T., Kulakov, A. T., Kravchenko, V. V. (2012) Methods of Structural Parameters Optimization of Step Automatic Regulation on the Base of Modified Predictor Smit. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika*. [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 2, 40–45 (in Russian).
10. Soroko, E. M. (2006) *Gold Cross-Sections, Processes of Self-Organization, Evolution of Systems: Introduction Into General Theory of Harmonization System*. Moscow, KomKniga. 264 p. (in Russian).

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 07.04.2014