

2. H u, G., X u, S., L i, S., X iao, C., & L iu, S. (2006) Steam Gasification of Apricot Stones with Olivine and Dolomite as Downstream Catalysts. *Fuel Processing Technology*, 87 (5), 375–382. Doi: 10.1016/j.fuproc.2005.07.008.
3. Y u, Q. Z., B r a g e, C., N o r d g r e e n, T., & S j ö s t r ö m, K. (2009) Effects of Chinese Dolomites on tar cracking in Gasification of Birch. *Fuel*, 88, 1922–1926. Doi: 10.1016/j.fuel.2009.04.020.
4. P é r e z, P., A z n a r, M. P., C a b a l l e r o, M. A., G i l, J., M a r t í n, J. A., & C o r e l l a, J. (1997). Hot Gas Cleaning and Upgrading with a Calcined Dolomite Located Downstream a Biomass Fluidized Bed Gasifier Operating with Steam-Oxygen Mixtures. *Energy and Fuels*, 11 (6), 1194–1197. Doi: 10.1021/ef970046m.
5. M y r e n, C., H o r n e l l, C., B j o r n b o m, E., & S j o s t r ö m, K. (2002) Catalytic Tar Decomposition of Biomass Pyrolysis Gas with a Combination of Dolomite and Silica. *Biomass and Bioenergy*, 23 (3), 217–237. Doi: 10.1016/S0961-9534(02)00049-1.
6. H a n, J., & K i m, H. (2008) The Reduction and Control Technology of Tar During Biomass Gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12 (2), 397–416. Doi: 10.1016/j.rser.2006.07.015.
7. R o d r i g u e z-N a v a r r o, C., R u i z-A g u d o, E., L u q u e, A., R o d r i g u e z-N a v a r r o, A. B., & O r t e g a-H u e r t a s, M. (2009) Thermal Decomposition of Calcite: Mechanisms of Formation and Textural Evolution of CaO Nanocrystals. *American Mineralogist*, 94, 578–593. Doi: 10.2138/am.2009.3021.
8. W i l b u r n, F. W., & S h a r p, J. H. (1993) The Bed-Depth Effect in the Thermal Decomposition of Carbonates. *Journal of Thermal Analysis*, 40, 133–140. Doi: 10.1007/BF02546563.
9. R o d r i g u e z-N a v a r r o, C., K u d l a c z, K., & R u i z-A g u d o, E. (2012) The Mechanism of Thermal Decomposition of Dolomite: New Insights From 2D-XRD and TEM Analyses. *American Mineralogist*, 97 (1), 38–51. Doi: 10.2138/am.2011.3813.
10. M i k u l i č i ć, H., v o n B e r g, E., V u j a n o v i ć, M., P r i e s c h i n g, P., P e r k o v i ć, L., T a t s c h l, R., & D u i ć, N. (2012) Numerical Modeling of Calcination Reaction Mechanism for Cement Production. *Chemical Engineering Science*, 69 (1), 607–615. Doi: 10.1016/j.ces.2011.11.024.
11. S i l c o x, G. D., K r a m l i c h, J. C., & P e r s h i n g, D. W. (1989) A Mathematical Model for the flash Calcination of Dispersed CaCO<sub>3</sub> and Ca(OH)<sub>2</sub> Particles. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 28 (2), 155–160.
12. S c h n e i d e r, M. (2003) *Experimentelle und Mathematische Modellierung der Festbettvergasung am Beispiel der Gleichstromvergasung von Holzhackschnit-Zeln*. Ph.D. Thesis. TU. Dresden (German).
13. K e r n, C., & J e s s, A. (2006) Verkokung und Koksabbrand in Heterogenen Katalysatoren [Coking and Coke Burn Off in Heterogeneous Catalysts]. *Chemie-Ingenieur-Technik*, 78 (8), 1033–1048. Doi: 10.1002/cite.200600051 (German).
14. M o h r, M. (2001) *Numerische Simulation der Simultanen Reaktion von Kalkstein und Kohle Bei der Zementherstellung*. Ph.D. Thesis. Bochum, University of Ruhr. (German).
15. M c i n t o s h, R. M., S h a r p, J. H., & W i l b u r n, F. W. (1990) The Thermal Decomposition of Dolomite. *Thermochimica Acta*, 165 (2), 281–296. Doi: 10.1016/0040-6031(90)80228-Q.

Представлена кафедрой ПТ и Т

Поступила 25.05.2015

УДК 621.187.132 (088.8)

## ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПИТАНИЯ БАРАБАННОГО ПАРОВОГО КОТЛА

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: ank-17@ya.ru

На качество переходных процессов изменения уровня воды в барабане котла при основных воздействиях существенное влияние оказывает выбор структуры системы регулирования, закона регулирования и оптимальных параметров динамической

настройки регулятора. В настоящее время приемы аналитического конструирования оптимальных систем регулирования позволяют улучшить качество переходных процессов. Применение метода структурно-параметрической оптимизации и теории инвариантности дает возможность за счет изменения структуры системы и оптимизации динамической настройки системы автоматического регулирования питания существенно улучшить качество поддержания уровня воды в барабане котла. Однако это достигается за счет увеличения максимального значения регулирующего воздействия расходом питательной воды. Вместе с тем, показатель последнего должен быть меньше величины регулирующего воздействия типовой трехимпульсной системы автоматического регулирования питания, так как он напрямую связан с надежностью котельного оборудования, долговечностью металла барабана и водяного экономайзера. Для устранения этого недостатка предложено параллельно реальному инерционному участку объекта регулирования сформировать его динамическую модель, что позволит выделить эквивалентное внешнее возмущение без его измерения, а выход устройства компенсации ограничить до величины регулирующего воздействия типовой трехимпульсной системы автоматического регулирования питания. Это приведет к уменьшению максимальной величины регулирующего воздействия, причем время отработки внешних возмущений останется прежним. При всех воздействиях получено существенное улучшение качества регулирования по сравнению с типовой трехимпульсной системой автоматического регулирования питания.

**Ключевые слова:** автоматическое регулирование питания, динамическая модель, барабанный паровой котел.

Ил. 5. Библиогр.: 12 назв.

## INVARIANT SYSTEM OF THE STEAM-DRUM BOILER FEED AUTOMATIC REGULATION

KULAKOV G. T.<sup>1)</sup>, KUKHORENKO A. N.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>*Belarusian National Technical University,*

<sup>2)</sup>*Command-Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations  
of the Republic of Belarus*

The choice of the controlling system structure, law of control, and optimal parameters for the regulator dynamic settings exercise, under principal influences, substantial effect on quality of the transient processes of water-level change in the shell of the boiler. At the present moment, techniques of design by analysis for the optimal regulating systems allow improving quality of the transient processes. Applying the method of structural-parametrical optimization and the invariance theory render it possible to significantly improve quality of the boiler-shell water level maintaining by means of changing the system structure and optimizing the feed automatic-control system dynamic settings. However, this becomes attainable at the expense of increasing the control-action maximum magnitude with the feeding water rate. At the same time, the indicator of the latter should be less than the control-action value of the typical three-element control of the feed-regulation system as this directly links to the boiler equipment safety, the drum metal and the feed-water economizer longevity. For removal of this shortcoming, the paper proposes to form in parallel to the real inertial region of the controlled member its dynamic simulation which allows separating the equivalent external disturbance without having to measure it. And to limit the compensation device output to the control-action value of the typical three-element control system of the automatic feed-regulation. This leads to the maximum control-action magnitude decrease, besides, the external-disturbances execution time remains unchanged. Altogether, under all the influences, the authors report of receiving substantial improvement of regulation quality as compared with the typical three-element automatic feed-regulation system

**Keywords:** automatic feed-regulation, dynamic simulation, steam-drum boiler.

Fig. 5. Ref.: 12 titles.

В типовой трехимпульсной системе автоматического регулирования (САР) питания водой парогенератора (котла), которая имеет наибольшее распространение на атомных и тепловых электростанциях [1–3], пропорционально-интегральный регулятор охвачен обратной связью по расходу питательной воды. Введение этого импульса придает регулятору функции стабилизатора расхода воды, устраняя зависимость уровня от колебаний перепада давлений на клапане. Поэтому настройку трехимпульсного регулятора производят таким образом, чтобы одинаковые изменения расхода пара и воды вызывали одинаковые перемещения штока регулирующего питательного клапана. При такой настройке изменение нагрузки котла приводит к соответствующему изменению расхода воды, и САР переходит в новое состояние равновесия без существенного изменения уровня. Импульс по уровню является корректирующим, устраняющим неточности настройки и несоответствия, возникающие в процессе регулирования, что особенно важно для объекта регулирования без самовыравнивания [4].

Работа типовой трехимпульсной САР питания и ее недостатки исследованы в [5, 6], где обусловлена актуальность ее модернизации для существенного улучшения качества регулирования в широком диапазоне изменения нагрузок котла. На качество переходных процессов изменения уровня воды в барабане котла при основных воздействиях существенное влияние оказывает выбор структуры системы регулирования, закона регулирования и оптимальных параметров динамической настройки регулятора. Попытки улучшения качества работы типовой трехимпульсной САР питания предпринимались многими инженерами. В [7] для улучшения работы трехимпульсного регулятора питания рекомендовано использовать схему с дифференциатором, на выход которого подается сигнал по материальному небалансу расходов пара и питательной воды (рис. 1).

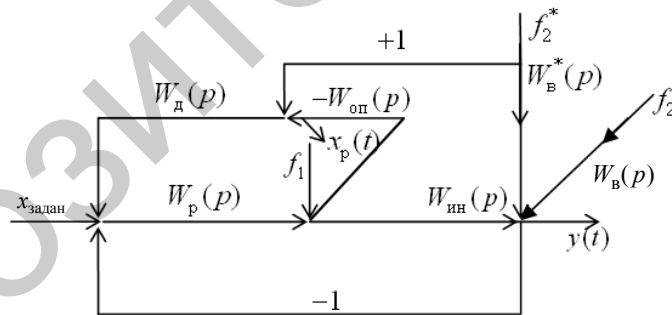


Рис. 1. Структурная схема моделирования типовой трехимпульсной САР с дифференциатором:  $y(t)$  – основная регулируемая величина;  $x_{\text{задан}}$  – заданное значение основной регулируемой величины;  $x_p(t)$  – регулирующее воздействие;  $f_1$  – внутреннее возмущение;  $f_2$  – внешнее топочное возмущение;  $f_2^*$  – внешнее возмущение расходом перегретого пара;  $W_{\text{в}}(p)$  – передаточная функция топочного возмущения;

$W_{\text{в}}^*(p)$  – то же внешнего возмущения расходом перегретого пара;  
 $W_p(p)$  – то же ПИ-регулятора;  $W_d(p)$  – то же дифференциатора;  
 $W_{\text{оп}}(p)$  – то же опережающего участка объекта регулирования;  
 $W_{\text{ин}}(p)$  – то же инерционного участка объекта регулирования

В качестве объекта регулирования выбран парогенератор БКЗ-210-140, работающий на общую паровую магистраль: максимальная производительность 210 т/ч, минимальная 140 т/ч [3]. Передаточную функцию внешнего возмущения расходом перегретого пара с явлением «набухания уровня» воды в барабане котла принимали в виде разности передаточных функций инерционного звена первого порядка и идеального интегрирующего звена [8]

$$W_b^*(p) = W_2(p) - W_3(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1} - \frac{1}{T_3 p}, \quad (1)$$

где  $T_2 = 20$  с;  $T_3 = 67$  с;  $k_2 = 0,75$ ;  $p$  – оператор Лапласа.

Передаточную функцию топочного возмущения принимали в следующем виде:

$$\frac{k_b}{T_b p + 1} = \frac{0,5}{30 p + 1}, \quad (2)$$

где  $k_b$  – коэффициент усиления возмущения;  $T_b$  – постоянная времени.

Передаточная функция опережающего участка по расходу питательной воды при скачкообразном перемещении регулирующего питательного клапана имеет вид инерционного звена первого порядка

$$W_{оп}(p) = \frac{k_{оп}}{T_{оп} p + 1} = \frac{1}{5 p + 1}, \quad (3)$$

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

Экспериментальная кривая по уровню воды в барабане котла при возмущении расходом питательной воды может быть представлена в виде реального интегрирующего звена типа

$$W_1^*(p) = \frac{1}{T_1 p (\tau_1 p + 1)}, \quad (4)$$

где  $T_1 = 37$  с – постоянная времени реального интегрирующего звена;  $\tau_1 = 21$  с – время запаздывания по каналу регулирующего воздействия [3].

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет следующий вид:

$$W_p(p) = \frac{k_p (T_n p + 1)}{T_n p}, \quad (5)$$

где  $k_p$  – коэффициент передачи регулятора;  $T_n$  – время интегрирования регулятора.

Настройку ПИ-регулятора производили по методу симметричного оптимума [9]

$$k_p = \frac{T_1}{2k_{оп} \tau_1} = 0,88; \quad T_n = 4\tau_1 = 84 \text{ с.} \quad (6)$$

Параметры дифференциатора принимали согласно [10]

$$W_d(p) = \frac{T_1 p}{T_1 p + 1} = \frac{37p}{37p + 1}. \quad (7)$$

Результаты моделирования переходных процессов САР с дифференциатором при основных возмущениях с использованием пакета Simulink программного обеспечения MatLab представлены на рис. 2.

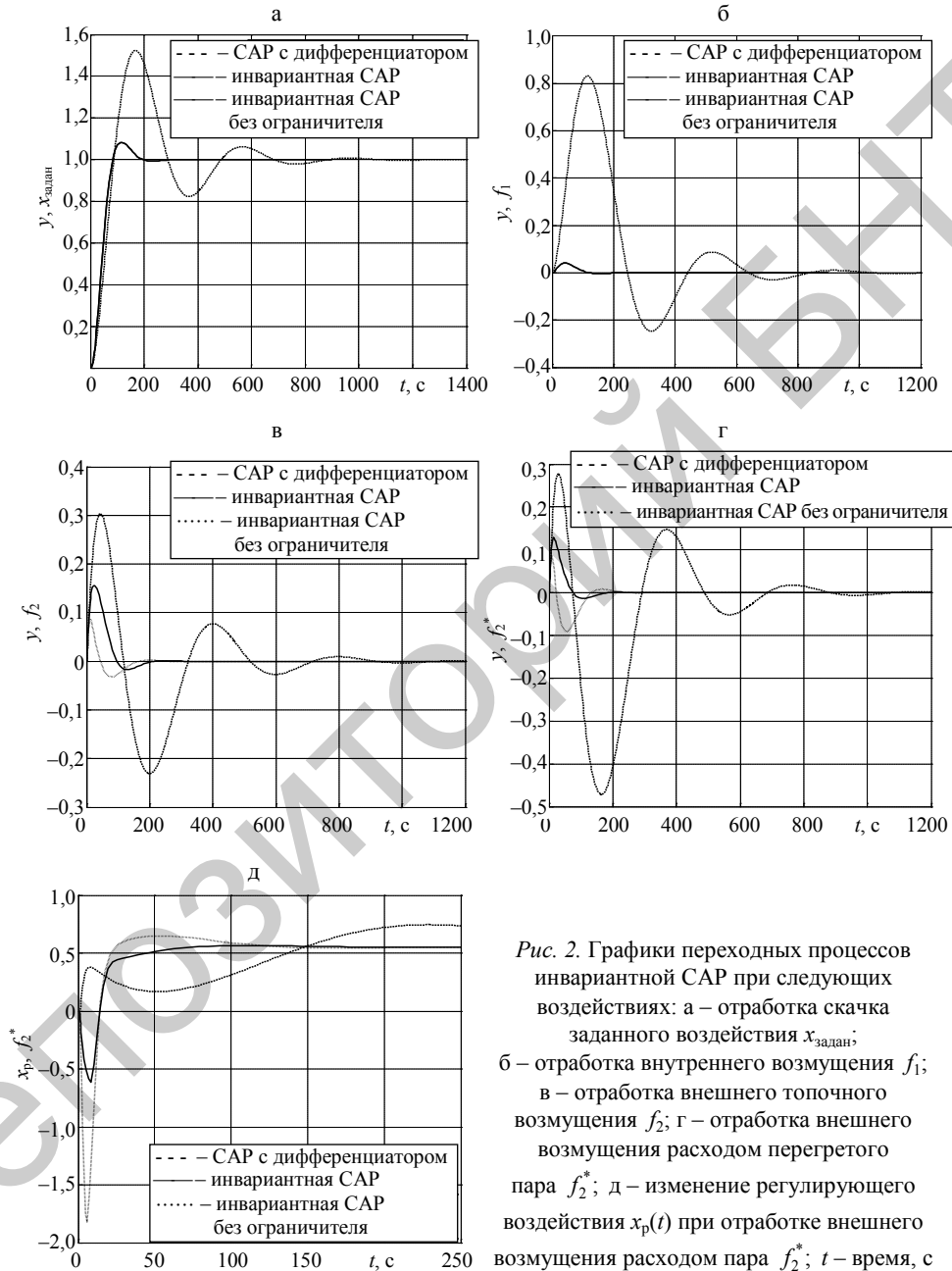


Рис. 2. Графики переходных процессов инвариантной САР при следующих воздействиях: а – отработка скачка заданного воздействия  $x_{\text{задан}}$ ; б – отработка внутреннего возмущения  $f_1$ ; в – отработка внешнего топочного возмущения  $f_2$ ; г – отработка внешнего возмущения расходом перегретого пара  $f_2^*$ ; д – изменение регулирующего воздействия  $x_p(t)$  при отработке внешнего возмущения расходом пара  $f_2^*$ ;  $t$  – время, с

В настоящее время приемы аналитического конструирования оптимальных систем регулирования позволяют улучшить качество переходных процессов, а результаты проведенных исследований в [5, 6] показали,

что применение метода структурно-параметрической оптимизации и теории инвариантности позволяет за счет изменения структуры системы и оптимизации динамической настройки САР питания существенно улучшить качество поддержания уровня воды в барабане котла. Однако это достигается за счет увеличения максимальной величины регулирующего воздействия расходом питательной воды. Вместе с тем, значение последнего должно быть меньше величины регулирующего воздействия типовой трехимпульсной САР, так как оно напрямую связано с надежностью котельного оборудования, долговечностью металла барабана и водяного экономайзера.

Для определения рациональной структуры и оптимальных параметров динамической настройки предлагаемой САР (рис. 3), обеспечивающей существенное улучшение качества поддержания уровня воды в барабане котла при основных воздействиях с учетом максимальной величины регулирующего воздействия, запишем передаточную функцию оптимального регулятора [11]

$$W_p(p) = \frac{1}{W_{оп}(p)} \frac{W_{задан}(p)}{1 - W_{задан}(p)}. \quad (8)$$

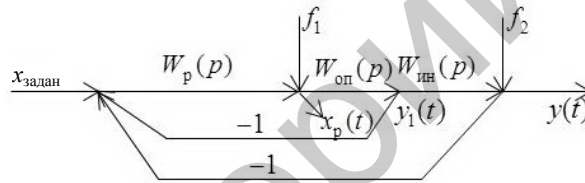


Рис. 3. Структурная схема моделирования двухконтурной САР:  
 $f_2$  – внешнее возмущение;  $y_1(t)$  – промежуточная регулируемая величина  
 (остальные обозначения на рис. 1)

При этом оптимальная передаточная функция внутреннего контура системы по задающему воздействию (критерий оптимальности) соответствует инерционному звену первого порядка

$$W_{задан}(p) = \frac{1}{T_{задан1}p + 1}, \quad (9)$$

где  $T_{задан1}$  – заданная постоянная времени критерия оптимальности по промежуточной регулируемой величине.

Подставив передаточные функции (3) и (9) в (8), получим оптимальную передаточную функцию регулятора (ПИ-регулятора) с одним параметром динамической настройки  $T_{задан1}$

$$W_p(p) = \frac{T_{оп}^*p + 1}{k_{оп}T_{задан1}p} = \frac{5p + 1}{T_{задан1}p}. \quad (10)$$

Произведем замену внутреннего контура (рис. 3) инерционным звеном первого порядка (9) и получим одноконтурную САР (рис. 4). Запишем

передаточную функцию замкнутой САР (рис. 4) по задающему воздействию:

$$W_{y, x_{\text{задан}}}(p) = \frac{W_{\text{задан}}(p)W_{\text{ин}}(p)}{1 + W_{\text{задан}}(p)W_{\text{ин}}(p)}; \quad (11)$$

$$W_{y, x_{\text{задан}}}(p) = \frac{1}{T_1 \tau_1 T_{\text{задан}} p^3 + T_1 (T_{\text{задан}} + \tau_1) p^2 + T_1 p + 1}. \quad (12)$$

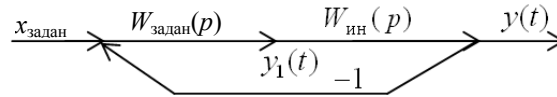


Рис. 4. САР с заменой внутреннего контура

В результате в знаменателе передаточной функции (12) получили характеристическое уравнение третьего порядка. Согласно [12]:

$$a_0 = T_1 \tau_1 T_{\text{задан}}; \quad a_1 = T_1 (T_{\text{задан}} + \tau_1); \quad a_2 = T_1; \quad a_3 = 1; \quad (13)$$

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0; \quad (14)$$

$$s^3 + A_2 s^2 + A_1 s + 1 = 0; \quad (15)$$

$$A_1 = \frac{a_2}{\sqrt[3]{a_0 a_3^2}}; \quad A_2 = \frac{a_1}{\sqrt[3]{a_0^2 a_3}}, \quad (16)$$

где  $A_1, A_2$  – коэффициенты Вышнеградского, при  $A_1 = A_2 = 3$  переходные процессы в системе будут апериодические с максимальным быстродействием:

$$a_2 = 3\sqrt[3]{a_0 a_3^2}; \quad a_1^3 = 27 a_0 a_3^2; \quad T_1^3 = 27 T_1 \tau_1 T_{\text{задан}}. \quad (17)$$

Отсюда с учетом (4) находим оптимальное численное значение постоянной времени  $T_{\text{задан}}$  критерия оптимальности

$$T_{\text{задан}} = \frac{T_1^2}{27 \tau_1} = 2,41 \text{ с}. \quad (18)$$

Для существенного улучшения качества отработки внешних возмущений двухконтурную САР (рис. 3) преобразуем в инвариантную САР, структурная схема которой представлена на рис. 5. Для этого параллельно реальному инерционному участку объекта регулирования формируем динамическую модель данного участка, выход которой алгебраически складываем с основной регулируемой величиной. Подаем полученную разность на вход устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения без его измерения, а выход с обратным знаком через ограничитель на вход регулятора.

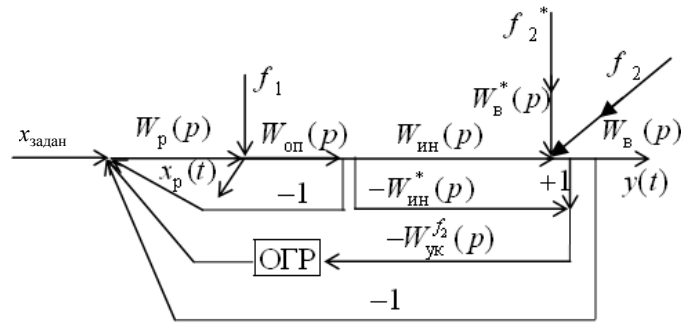


Рис. 5. Структурная схема моделирования переходных процессов инвариантной САР питания:  $W_{ук}^{f_2}(p)$  – передаточная функция устройства компенсации внешнего возмущения;  $W_{ин}^*(p) = W_{ин}(p)$  – то же модели инерционного участка объекта регулирования; ОГР – ограничитель величины коррекции задания (остальные обозначения на рис. 1)

Определяем передаточную функцию устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения из следующего условия инвариантности основной регулируемой величины от изменения внешних возмущений:

$$W_{ук}^{f_2}(p)W_{задан2}(p)W_{ин}(p) = 1, \quad (19)$$

где  $W_{ук}^{f_2}(p)$  – передаточная функция устройства компенсации внешнего возмущения.

Из (19) находим передаточную функцию устройства компенсации внешнего возмущения, которую с целью ее физической реализуемости умножаем на передаточную функцию инерционного звена 3-го порядка с одинаковыми постоянными времени  $T_{задан2}$ :

$$W_{ук}^{f_2}(p) = \frac{T_1 p (\tau_1 p + 1) (T_{задан} p + 1)}{(T_{задан2} p + 1)^3}. \quad (20)$$

Приняв

$$T_{задан2} = T_{задан1}, \quad (21)$$

получим

$$W_{ук}^{f_2}(p) = \frac{T_1 p (\tau_1 p + 1)}{(T_{задан2} p + 1)^2} = \frac{T_1 p}{T_{задан2} p + 1} \frac{\tau_1 p + 1}{T_{задан2} p + 1}. \quad (22)$$

То есть имеем последовательное соединение дифференцирующего звена и звена быстрого реагирования, так как численное значение  $\tau_1$  числителя больше  $T_{задан2}$  знаменателя. Поскольку разность сигналов основной регулируемой величины и выхода модели инерционного участка объекта регулирования поступает вначале на вход звена быстрого реагирования, а затем на вход дифференциатора, то большой сигнал с выхода дифференцирующего звена должен быть ограничен по величине с целью уменьшения величины коррекции задания регулятора. Это приведет к соответствующему уменьшению максимальной величины регулирующего воздействия расходом питательной воды.



Из приведенных графиков переходных процессов видно, что при всех рассмотренных возмущающих воздействиях время регулирования у инвариантной САР сокращается в пять раз по сравнению с САР с дифференциатором. Величина перерегулирования при обработке скачка задания сокращается в 4,3 раза, а максимальные динамические ошибки регулирования: при обработке внутреннего возмущения – в 16,4 раза; при обработке топочного возмущения – в 2 раза; при обработке возмущения расходом пара – в 2,1 раза. Величина регулирующего воздействия у САР с дифференциатором находится в пределах от 0 до +0,75, а у инвариантной САР от –0,6 до +0,56.

Ограничение выходного сигнала устройства компенсации внешнего возмущения приводит к уменьшению максимальной величины регулирующего воздействия (рис. 2д), причем время отработки внешних возмущений остается прежним, хотя при этом несколько уменьшается максимальная динамическая ошибка регулирования при внешних возмущениях. Вместе с тем, при всех воздействиях получено существенное улучшение качества регулирования по сравнению с типовой САР питания с дифференциатором.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена инвариантная система автоматического регулирования питания барабанного парового котла, отличающаяся тем, что:

- пропорционально-интегральный регулятор системы имеет один параметр динамической настройки, численное значение которого выбирают из условия равенства коэффициентов Вышнеградского  $A_1 = A_2 = 3$ . Это позволяет обрабатывать задающее воздействие с максимальным быстродействием;
- параллельно реальному инерционному участку объекта регулирования формируют его динамическую модель, что позволяет выделить эквивалентное внешнее возмущение без его измерения.

2. Сравнение графиков переходных процессов системы автоматического регулирования питания с дифференциатором и разработанной инвариантной системы автоматического регулирования питания показало значительное преимущество последней.

3. Введение ограничителя выходного сигнала с устройства компенсации внешнего возмущения приводит к уменьшению максимальной величины регулирующего воздействия по расходу питательной воды, которое меньше, чем у типовой трехимпульсной системы автоматического регулирования, не ухудшая качество переходных процессов при обработке скачка задания и внутреннего возмущения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. П л е т н е в, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учеб. для студ. вузов / Г. П. Плетнев. – 4-е изд., перераб. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с.
2. Д е м ч е н к о, В. А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС / В. А. Демченко. – Одесса: Астропринт, 2001. – 308 с.
3. 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.

4. Деянов, В. А. Автоматизация, защита и сигнализация на электростанциях / В. А. Деянов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 384 с.
5. Кулаков, Г. Т. Математическое моделирование переходных процессов трех-импульсной системы автоматического регулирования питания водой парогенератора на сброс нагрузки / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2014. – № 1. – С. 57–64.
6. Кулаков, Г. Т. Оптимизация переходных процессов изменения уровня воды в барабане паровых котлов / Г. Т. Кулаков, А. Н. Кухоренко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2014. – № 4. – С. 63–74.
7. Гуревич, Э. З. Состояние, перспективы развития и технико-экономическая оценка автоматизации питания барабанных парогенераторов / Э. З. Гуревич. – Минск, 1974. – 60 с.
8. Широкий, Д. К. Расчет параметров промышленных систем регулирования: справ. пособие / Д. К. Широкий, О. Д. Куриленко. – Киев: Техшка, 1972. – 232 с.
9. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования: пер. с нем. / Ф. Фрер, Ф. Орттенбургер. – М.: Энергия, 1973. – 193 с.
10. Трехимпульсный регулятор питания: а. с. 230832 СССР: МПК F 22 d / Э. З. Гуревич, Г. И. Хутский; дата публ. 15.11.1968.
11. Структурно-параметрическая оптимизация систем автоматического регулирования с дифференцированием промежуточного сигнала / Г. Т. Кулаков [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2012. – № 3. – С. 64–71.
12. Кулаков, Г. Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования: учеб. пособие / Г. Т. Кулаков. – Минск: Технопринт, 2003. – 136 с.

#### REFERENCES

1. Pletnev, G. P. (2007) *Automation of Technological Processes and Production in the Heat-Power Engineering*. 4<sup>th</sup> pub. Moscow, MEI Publishing House. 352 p. (in Russian).
2. Demchenko, V. A. (2001) *Automation and Simulation of the NPP and TPP Technological Processes*. Odessa, Astroprint. 308 p. (in Russian).
3. Klyuev, A. S., Lebedev, A. T., & Novikov, S. I. (1985) *Adjusting Automated Control Systems of the Steam Drum-Boilers*. Moscow, Energoatomizdat. 280 p. (in Russian).
4. Deуанov, V. A. (1963) *Automation, Protection and Signaling at the Electric Power Plants*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat. 384 p. (in Russian).
5. Kulakov, G. T., Kulakov, A. T., & Kухoryenko, A. N. (2014) Mathematical Simulation of the Transient Processes in Three-Element Automatic Control System for the Steam Generator Water Feed to Load Tripping. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 1, 57–64 (in Russian).
6. Kulakov, G. T., & Kухoryenko, A. N. (2014) Optimizing Transient Processes of Water-Level Changes in the Drums of Steam Boilers. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 4, 63–74 (in Russian).
7. Gurevich, E. Z. (1974) *The State, Development Prospects and Technical-and-Economic Assessment of Feeding Automation of the Drum-Type Steam Generators*. Minsk. 60 p. (in Russian).
8. Shirokiy, D. K., & Kurilenko, O. D. (1972) *Parameters Computation of the Industrial Regulating Systems. Reference aid*. Kiev, Tekhshka. 232 p. (in Russian).
9. Frer, F., & Orttenger, F. (1973) *Introduction to Electronic Control Engineering*. Moscow, Energy. 193 p. (in Russian).
10. Gurevich, E. Z., & Khutskii, G. I. (1968) *Three-Pulse Power Regulator*. Inventor's Certificate of the USSR No 230832 (in Russian).
11. Kulakov, G. T., Kulakov, A. T., Korzun, M. L., & Basalai, D. V. (2012) Structural Parametric Optimization of the Automatic Control Systems with Differentiating the Intermediate Signal. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG – Energetika* [Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Energetika], 3, 64–71 (in Russian).
12. Kulakov, G. T. (2003) *Analysis and Synthesis of the Automatic Control Systems: Educational aid*. Minsk, Technoprint. 136 p. (in Russian).

Представлена кафедрой ТЭС БНТУ

Поступила 27.02.2015