

УДК 621.181.6

ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В БАРАБАНЕ КОТЛА

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

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

E-mail: ank-17@ya.ru

Качество регулирования уровня воды в барабане котлов тепловых электростанций и парогенераторов атомных электростанций во многом определяют надежность и экономичность их работы. Последнее может быть достигнуто путем значительного уменьшения времени работы исполнительных механизмов, что напрямую зависит от качества регулирования.

Рассмотрены зарубежные методы настройки ПИД-регулятора в каскадной системе автоматического регулирования уровня воды в барабане котла, на базе которой предложена инвариантная каскадная система автоматического регулирования. В такой системе предложено не измерять внешнее возмущение, например расход пара, а параллельно реальному инерционному участку объекта регулирования реализовать модель этого участка. Разница текущего значения уровня воды в барабане и выхода модели инерционного участка объекта регулирования подается на вход устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения. Это позволяет использовать устройство компенсации в замкнутом контуре, следовательно, качество регулирования улучшается при воздействии любых внешних возмущений. Сравнительный анализ результатов моделирования каскадной системы автоматического регулирования с ПИД-регулятором, настроенным по зарубежным методам, и предлагаемой инвариантной системы показал значительное улучшение качества регулирования в последней, а именно: в 2,5 раза повышается быстродействие системы при отработке скачка задания, максимальная величина перерегулирования уменьшается с 42,5 до 10,0 %; при отработке внутреннего возмущения время регулирования сокращается на 33 %, максимальная динамическая ошибка регулирования – на 65 %; время отработки внешнего топочного возмущения уменьшается в два раза, максимальная динамическая ошибка регулирования – на 63 %; максимальная динамическая ошибка регулирования при отработке внешнего возмущения расходом перегретого пара уменьшается на 71 %, время регулирования сокращается в 1,5 раза.

Ключевые слова: каскадная система автоматического регулирования, барабан котла, уровень воды.

Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

INVARIANT SYSTEM OF AUTOMATIC WATER-LEVEL REGULATING IN THE BOILER SHELL

KULAKOV G. T.¹⁾, KUCHORENKO A. N.²⁾

¹⁾*Belorussian National Technical University,*

²⁾*Command-Engineering Institute of the Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Belarus*

The quality of water-level regulation in the boiler-shells of heat-power and nuclear-power plants largely determines reliable and economical operation. The latter can be accomplished by means of massive reduction of the actuation-mechanism running time which depends directly on the regulator performance.

The paper examines some foreign methods of PID-regulator adjusting in the cascade system of boiler-shell water-level automatic regulation. The authors derive an invariant cascade system of automatic regulation in which they offer not to measure external disturbance, the steam rate for instance, but to realize a concurrent model of the real inertial section of the controlled member. The disparity between the current value of the water-level in the shell and the output from the inertial section of the controlled-member model is fed to the input of the external-disturbance equivalent compensating device. This allows employing the compensating device in closed circuit, and consequently, the regulation quality improves under the influence of any external disturbances. The comparative analysis of the modeling results of the Cascade-System Automatic Regulation (CSAR) with PID-regulator adjusted according to the foreign methods and of the proposed invariant system shows considerable improvement in regulation quality of the latter, viz.: system performance grows 2,5 times when working through the task jump, the peak value of overcorrection lowers from 42,5 to 10,0 %; while working through the internal disturbance, the regulating time reduces by 33 %, the maximum dynamic error of the regulation lowers by 65 %; the time of external combustion disturbance workout completion reduces two times, the maximum dynamic error of regulating – by 63 %; the maximum dynamic error of regulation while working through external disturbance with overheated steam rate diminishes by 71 %, the regulating time reduces by 1,5 times.

Keywords: cascade system of automatic adjustment, boiler shell, water level.

Fig. 5. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

Автоматизация работы энергетического оборудования электростанций ведется по многим направлениям, при этом одним из основных является регулирование уровня воды в барабане котла (парогенератора). Качество регулирования уровня воды в барабане котлов тепловых электростанций (ТЭС) и парогенераторов атомных электростанций (АЭС) во многом определяют надежность и экономичность работы ТЭС и АЭС. В соответствии с этим актуальными становятся вопросы существенного улучшения качества регулирования уровня воды в барабане котла (парогенератора).

Трехимпульсные системы автоматического регулирования (САР) уровня воды в барабане получили наибольшее распространение на ТЭС и АЭС [1–3]. Применение в этих САР классических регуляторов с устройством жесткой обратной связи повышает устойчивость системы, но не обеспечивает качественного регулирования уровня воды в барабане котла [4, 5]. Типовая трехимпульсная САР уровня воды в барабане котла обладает такими недостатками, как:

- наличие трех датчиков измерения (уровня, расходов перегретого пара и питательной воды);

- наличие статической ошибки регулирования в конце переходного процесса при внутреннем возмущении, а также при внешнем возмущении расходом перегретого пара с явлением «набухания уровня» [3].

Для устранения указанных недостатков в [5] на примере САР питания котла БКЗ-210-140 предложено использовать структурно-параметрическую оптимизацию каскадной САР. При этом ликвидация статической ошибки регулирования при отработке внутреннего возмущения осуществляется стабилизирующим регулятором, а устранение статической ошибки регулирования при отработке крайнего внешнего возмущения с явлением «набухания уровня» производится соответствующим выбором структуры корректирующего устройства, а также коррекцией задания последнему на величину статической ошибки регулирования в момент времени, когда основная регулируемая величина стабилизируется. Вместе с тем в этом случае интеграл от модуля ошибки регулирования по уровню при отработке внешних возмущений хотя и меньше, чем в типовой трехимпульсной САР, однако возможность существенного улучшения качества регулирования уровня воды имеется.

Из всех типовых алгоритмов регулирования ПИД-регуляторы обеспечивают наилучшее качество регулирования для теплоэнергетических объектов. Каскадная система автоматического регулирования (КСАР) получила широкое распространение в области автоматизации технологических процессов [6, 7]. Уровень воды в барабане парогенератора при возмущении расходом питательной воды относится к объектам без самовыравнивания и описывается передаточными функциями идеального интегрирующего звена с запаздыванием

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

где T_1 – постоянная времени интегрирующего звена; τ_1 – время запаздывания по каналу регулирующего воздействия; p – оператор Лапласа.

Кроме того, экспериментальная кривая по уровню воды в барабане котла при возмущении расходом питательной воды может быть представлена в виде реального интегрирующего звена типа

$$W_1^*(p) = \frac{1}{T_1 p(\tau_1 p + 1)}. \quad (2)$$

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 [3]. Передаточная функция внешнего возмущения расходом перегретого пара с явлением «набухания уровня» воды в барабане котла может быть аппроксимирована разностью передаточных функций инерционного звена первого порядка и идеального интегрирующего звена вида [8]

$$W_b^*(p) = W_2(p) - W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1} - \frac{1}{T_4 p}, \quad (3)$$

где $T_3 = 20$ с; $T_4 = 67$ с; $k_3 = 1,5$.

При этом величина «набухания уровня» будет тем больше, чем больше численное значение коэффициента передачи инерционного звена первого порядка k_3 . Передаточная функция топочного возмущения имеет вид инерционного звена первого порядка

$$W_b(p) = \frac{k_b}{T_b p + 1} = \frac{5}{30p + 1}, \quad (4)$$

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

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

$$W_{оп}(p) = \frac{k_{оп}}{(T_{оп} p + 1)(\sigma_{оп} p + 1)} = \frac{1}{(10p + 1)(1,2p + 1)}, \quad (5)$$

где $k_{оп}$ – коэффициент передачи; $T_{оп}$ – большая постоянная времени опережающего участка; $\sigma_{оп}$ – меньшая постоянная времени опережающего участка.

Структурная схема моделирования КСАР питания котла приведена на рис. 1.

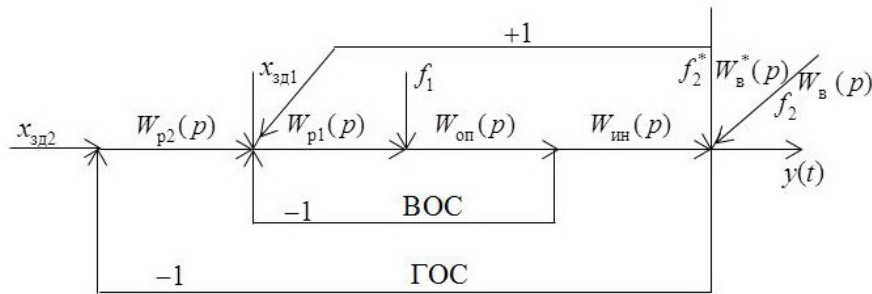


Рис. 1. Структурная схема моделирования КСАР питания котла:

$y(t)$ – основная регулируемая величина (уровень воды в барабане котла);

$x_{3д1}$ – заданное значение промежуточной регулируемой величины;

$x_{3д2}$ – заданное значение основной регулируемой величины; f_1 – внутреннее возмущение;

f_2 – внешнее топочное возмущение; f_2^* – внешнее возмущение расходом перегретого пара;

$W_{p1}(p)$ – передаточная функция стабилизирующего регулятора;

$W_{p2}(p)$ – то же корректирующего регулятора; $W_{оп}(p)$ – то же опережающего участка объекта регулирования; $W_{ин}(p)$ – то же инерционного участка объекта регулирования;

$W_b(p)$ – то же внешнего топочного возмущения; $W_b^*(p)$ – то же внешнего возмущения расходом перегретого пара; ВОС – внутренняя обратная связь;

ГОС – главная обратная связь

Методика определения оптимальных параметров динамической настройки регуляторов типовой КСАР основана на возможности расчета одного контура независимо от другого. Вначале производят настройку стаби-

лизирующего регулятора, после чего выполняют расчет динамической настройки корректирующего регулятора. Обычно в типовой КСАР используют в качестве корректирующего и стабилизирующего регуляторов ПИ-алгоритмы формирования регулирующего воздействия, хотя известно, что из всех линейных регуляторов лучшее качество переходных процессов обеспечивают ПИД-регуляторы. В связи с этим выполним замену ПИ-регуляторов КСАР на ПИД-регуляторы. При этом вывод передаточной функции оптимального стабилизирующего регулятора произведем исходя из обратной модели объекта регулирования и заданной оптимальной передаточной функции замкнутой САР по задающему воздействию. Запишем передаточную функцию замкнутой САР $W_{y, x_{зл}}(p)$ по задающему воздействию

$$W_{y, x_{зл}}(p) = \frac{W_{pl}(p)W_{оп}(p)}{1 + W_{pl}(p)W_{оп}(p)}. \quad (6)$$

Передаточную функцию внутреннего контура выбираем так, чтобы она соответствовала критерию качества по задающему воздействию:

$$W_{y, x_{зл}}(p) = W_{зл}^{opt}(p), \quad (7)$$

где $W_{зл}^{opt}(p)$ – оптимальная передаточная функция внутреннего контура по задающему воздействию.

С учетом (7) передаточная функция (6) примет вид

$$W_{зл}^{opt}(p) = \frac{W_{pl}(p)W_{оп}(p)}{1 + W_{pl}(p)W_{оп}(p)}. \quad (8)$$

Из (8) находим оптимальную передаточную функцию стабилизирующего регулятора

$$W_{pl}(p) = \frac{1}{W_{оп}(p)} \frac{W_{зл}^{opt}(p)}{1 - W_{зл}^{opt}(p)}, \quad (9)$$

где $W_{pl}(p)$ – оптимальная передаточная функция регулятора, которая реализует заданную оптимальную передаточную функцию внутреннего контура САР по задающему воздействию $x_{зл}$.

Производим выбор структуры и оптимальной динамической настройки стабилизирующего регулятора. Так как передаточная функция опережающего участка (5) имеет второй порядок, $W_{зл}^{opt}$ принимаем в следующем виде:

$$W_{зл}^{opt}(p) = \frac{1}{(T_{зл}p + 1)^2}, \quad (10)$$

где $T_{зл}$ – заданная постоянная времени инерционного звена второго порядка.

Подставив (5) и (10) в (9), получим (для стабилизирующего регулятора) передаточную функцию реального ПИД-регулятора с одним параметром динамической настройки $T_{зд1}$

$$W_{p1}(p) = \frac{(T_{оп} p + 1)(\sigma_{оп} p + 1)}{2k_{оп} T_{зд1} p \left(\frac{T_{зд1}}{2} p + 1 \right)} = \frac{(10p + 1)(1,2p + 1)}{2T_{зд1} p \left(\frac{T_{зд1}}{2} p + 1 \right)}. \quad (11)$$

Определение численного значения $T_{зд1}$ осуществляем с использованием ряда чисел правила золотого сечения [9], приняв за целое $T_{оп}^* = T_{оп} + \sigma_{оп} = 11,2$ с. Выбираем следующее значение постоянной времени критерия оптимальной отработки задания внутренним контуром:

$$T_{зд1} = 0,146T_{оп}^* = 1,63 \text{ с.} \quad (12)$$

Настройку корректирующего регулятора (табл. 1) осуществим по некоторым зарубежным методам. В качестве рациональной структуры регулятора выберем классический ПИД-регулятор, передаточная функция которого имеет следующий вид [10]:

$$G(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) \frac{1 + p T_d}{1 + p \frac{T_d}{N}}, \quad (13)$$

где K_c – коэффициент передачи регулятора; T_i – время интегрирования регулятора; T_d – время дифференцирования регулятора; N – коэффициент уменьшения времени дифференцирования при формировании балластной постоянной времени регулятора.

Таблица 1

Зарубежные методы динамической настройки ПИД-регулятора [10]

Автор метода оптимизации (год)	Параметры динамической настройки регулятора
Ford (1953)	$k_p = 1,48 \frac{T_1}{\tau_1} = 2,6$; $T_n = 2\tau_1 = 41 \text{ с}$; $T_d = 0,37\tau_1 = 7,77 \text{ с}$
Hay (1998)	$k_p = 0,4 \frac{T_1}{\tau_1} = 0,7$; $T_n = 3,2\tau_1 = 67,2 \text{ с}$; $T_d = 0,8\tau_1 = 16,8 \text{ с}$
NI Labview (2001)	$k_p = 1,1 \frac{T_1}{\tau_1} = 1,93$; $T_n = 2\tau_1 = 42 \text{ с}$; $T_d = 0,5\tau_1 = 10,5 \text{ с}$
Sree and Chidambaram (2005)	$k_p = 0,896 \frac{T_1}{\tau_1} = 1,57$; $T_n = 2,5\tau_1 = 52,5 \text{ с}$; $T_d = 0,55\tau_1 = 11,55 \text{ с}$

Согласно [10], выбранный регулятор используется в следующих изделиях (продуктах): toshiba TOSDIC 200 product with $3.33 \leq N \leq 10$ (McMillan, 1994); foxboro EXACT Model 761 product with $N = 10$ (McMillan, 1994); honeywell TDC3000 Process Manager product – Type A, interactive mode with

$N = 10$ (ISMC, 1999), в соответствии с чем численную величину коэффициента N примем равной 10, так как с уменьшением балластной составляющей передаточной функции реальный регулятор в динамике приближается к идеальному.

Результаты моделирования переходных процессов КСАР питания котла при основных возмущениях с использованием пакета Simulink программного обеспечения MatLab представлены на рис. 2.

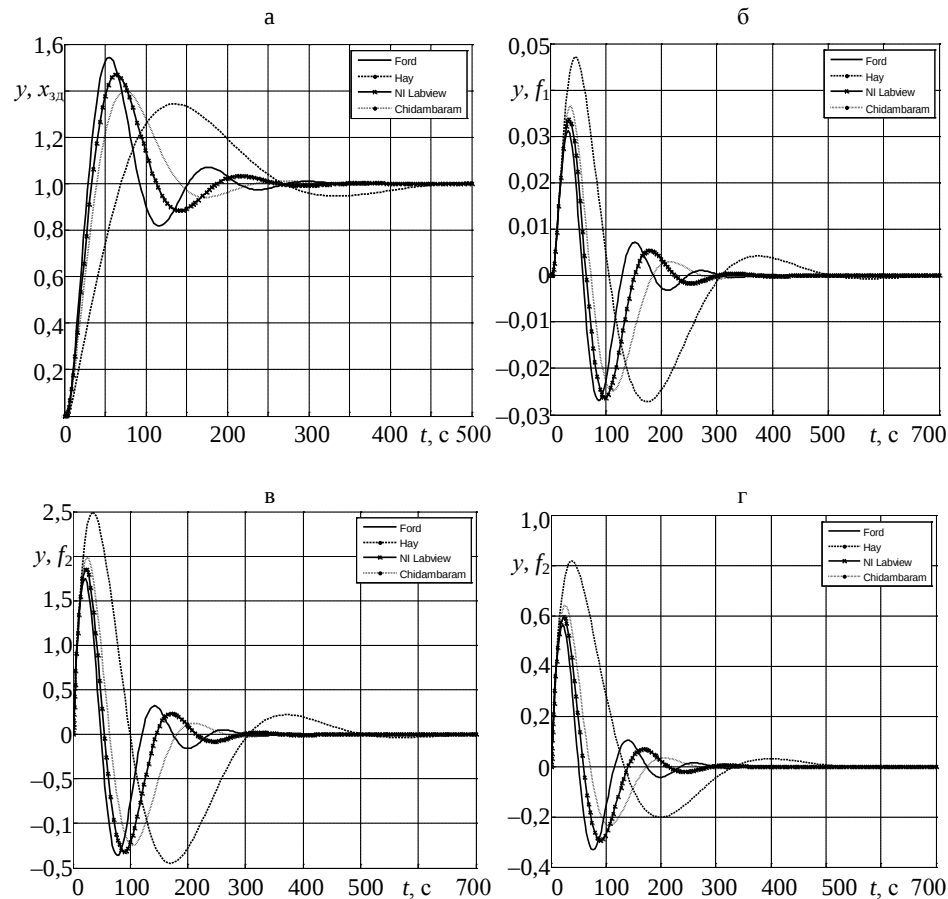


Рис. 2. Графики переходных процессов КСАР питания котла:
а – отработка скачка задающего воздействия $x_{3д}$; б – то же внутреннего возмущения f_1 ;
в – то же внешнего топического возмущения f_2 ; г – то же внешнего возмущения
расходом перегретого пара f_2 ; t – время, с

Из графиков переходных процессов видно, что при отработке скачка задания появляется перерегулирование до 50 %, минимальное время регулирования составляет 250 с. При отработке внутреннего и внешнего возмущений статические ошибки регулирования отсутствуют, минимальное время регулирования составляет 300 с. Минимальные величины максимальной динамической ошибки регулирования составляют: при отработке внутреннего возмущения – от +3,0 до –2,5 %; при отработке внешнего топического возмущения – от +36,0 до –25,0 %; при отработке внешнего возмущения расходом пара – от +58,0 до –22,0 %. Лучшие прямые показатели

качества при основных воздействиях соответствуют методу NI Labview (2001) (табл. 1) ($k_p = 1,93$; $T_n = 42$ с; $T_d = 10,5$ с).

На регулируемую величину оказывают влияние возмущающие воздействия, причем самое опасное – возмущение расходом перегретого пара, приложенное к выходу САР. В инвариантных САР компенсацию влияния возмущения на регулируемую величину осуществляют за счет введения дополнительного сигнала на вход регулятора с выхода устройства компенсации соответствующей структуры. Структурная схема моделирования предлагаемой инвариантной КСАР питания парогенератора приведена на рис. 3.

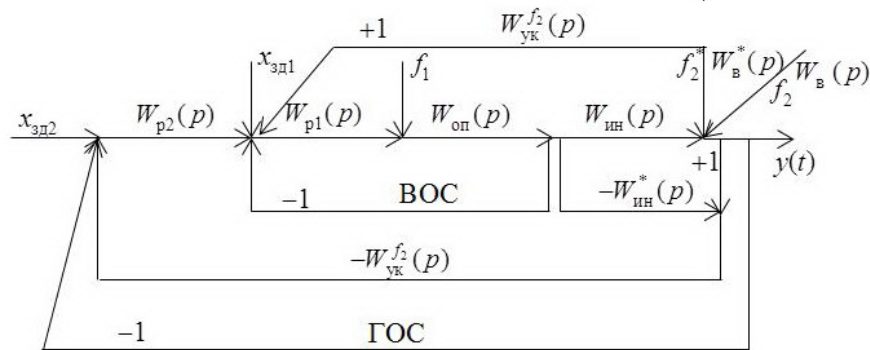


Рис. 3. Структурная схема моделирования инвариантной КСАР питания парогенератора:

$W_{ук}^{f2}(p)$ – передаточная функция устройства компенсации внешнего возмущения;

$W_{ин}^*(p)$ – то же модели инерционного участка объекта регулирования,
адекватная $W_{ин}(p)$ (остальные обозначения на рис. 1)

Выбор рациональной структуры и параметров оптимальной динамической настройки корректирующего регулятора производим на основе передаточной функции оптимального регулятора. Для этого определяем передаточную функцию эквивалентного объекта с учетом передаточных функций объекта (2) и заданной передаточной функции внутреннего контура (10)

$$W_{экв}(p) = W_{об}(p)W_{зд1}^{opt} = \frac{1}{T_1 p (\tau_1 p + 1) (T_{зд1} p + 1)^2}. \quad (14)$$

Динамику объектов регулирования с самовыравниванием описывают передаточными функциями инерционных звеньев, а динамику объектов регулирования без самовыравнивания, к которым относится уровень воды в барабане котла, – передаточными функциями интегрирующих звеньев. При этом графики переходных процессов у данных объектов при скачке регулирующего воздействия будут совпадать до момента времени, когда у объекта регулирования с самовыравниванием график не начнет стабилизироваться на установившемся значении. Исходя из этого свойства до определенного момента нет разницы, какой передаточной функцией описывают динамику объекта регулирования без самовыравнивания (пере-

даточнои функцией реального интегрирующего звена или передаточнои функцией инерционного звена второго порядка). Исходя из этого передаточнои функцию эквивалентного объекта представим в виде инерционного звена второго порядка, как для объекта регулирования с самовыравниванием:

$$W_1^*(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(\tau_1 p + 1)}. \quad (15)$$

В этом случае передаточнои функция эквивалентного объекта (14) примет следующий вид:

$$W_{\text{экв}}^*(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(\tau_1 p + 1)(T_{\text{зд1}} p + 1)^2}. \quad (16)$$

Так как передаточнои функция эквивалентного объекта (16) имеет четвертый порядок, то заданная передаточнои функция $W_{\text{зд2}}^{\text{opt}}(p)$ критерия оптимальности основной регулируемой величины при отработке скачка задания $x_{\text{зд2}}$ принимает следующий вид:

$$W_{\text{зд2}}^{\text{opt}}(p) = \frac{1}{(T_{\text{зд2}} p + 1)^4}, \quad (17)$$

где $T_{\text{зд2}}$ – заданная постоянная времени инерционного звена первой степени.

Подставив (16) и (17) в (9), получим передаточнои функцию корректирующего устройства с одним параметром динамической настройки $T_{\text{зд2}}$

$$W_{\text{р2}}(p) = W_{\text{ф}}(p) \frac{1}{1 - W_{\text{зд2}}^{\text{opt}}(p)} = [W_{\text{экв}}^*(p)]^{-1} W_{\text{зд2}}^{\text{pc}}(p), \quad (18)$$

где $W_{\text{ф}}(p)$ – передаточнои функция фильтра; $W_{\text{зд2}}^{\text{pc}}(p)$ – то же разомкнутой системы,

$$W_{\text{ф}}(p) = \frac{W_{\text{зд2}}^{\text{opt}}(p)}{W_{\text{экв}}^*(p)}. \quad (19)$$

Выбор численных значений $T_{\text{зд2}}$ осуществляем с использованием ряда чисел правила золотого сечения [9], приняв за целое τ_1 . Выбираем следующие значения заданной постоянной времени:

$$T_{\text{зд2}} = 0,146\tau_1 = 3,06 \text{ с}; \quad T_{\text{зд2}} = 0,236\tau_1 = 4,96 \text{ с}. \quad (20)$$

Из условия компенсации f_2 с учетом передаточнои функции (17) находим передаточнои функцию устройства компенсации

$$W_{\text{ук}}^{f_2}(p) = \frac{(1 - W_{\text{зд2}}^{\text{opt}})}{W_{\text{зд2}}^{\text{opt}}} = [W_{\text{зд2}}^{\text{pc}}(p)]^{-1} =$$

$$= \frac{4T_{зд2}p \left(\frac{T_{зд2}^3 p^3}{4} + T_{зд2}^2 p^2 + 1,5T_{зд2}p + 1 \right)}{(T_{зд2}p + 1)^4}. \quad (21)$$

Графики переходных процессов предлагаемой инвариантной КСАР при основных воздействиях приведены на рис. 4.

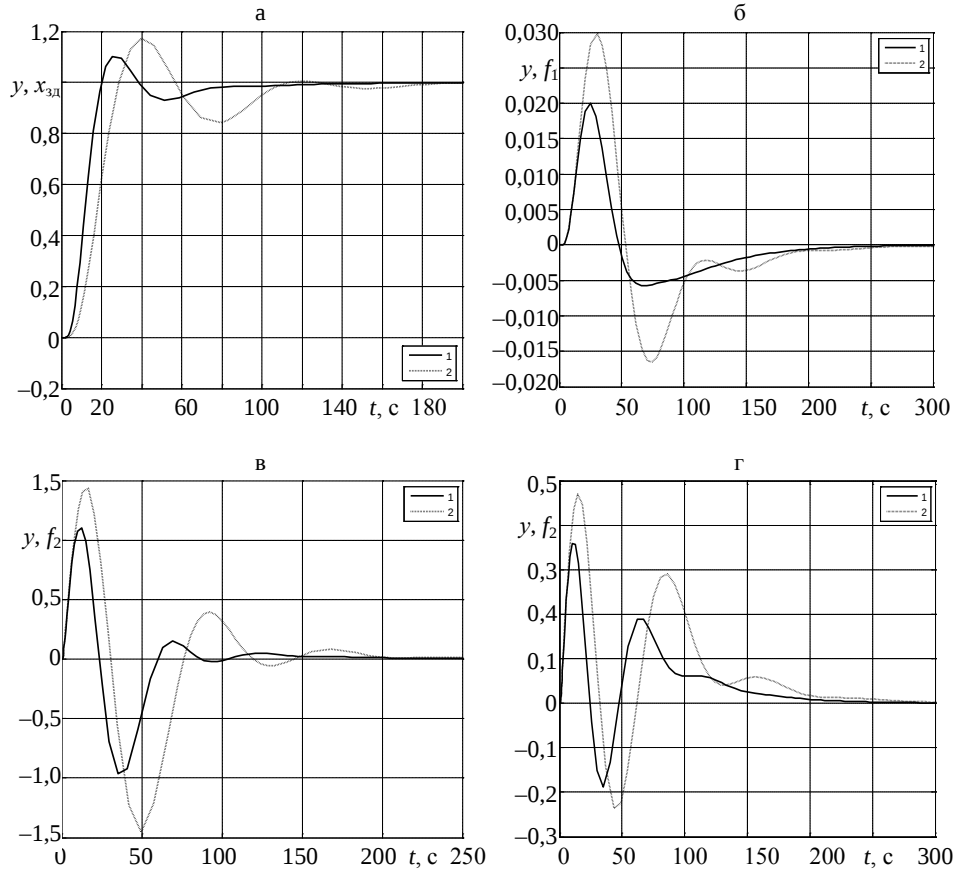


Рис. 4. Графики переходных процессов инвариантной КСАР при основных воздействиях: а-г – то же, что на рис. 1; t – время, с;

1 – $T_{зд1} = 0,146(T_{оп} + \sigma_{оп}) = 1,63$ с, $T_{зд2} = 0,146\tau_1 = 3,06$ с;

2 – $T_{зд1} = 0,146(T_{оп} + \sigma_{оп}) = 1,63$ с, $T_{зд2} = 0,236\tau_1 = 4,96$ с

Из графиков переходных процессов видно, что при отработке скачка задания происходит перерегулирование до 18 %, минимальное время регулирования составляет 160 с. При отработке внутреннего и внешнего возмущений статические ошибки регулирования отсутствуют, минимальное время регулирования 240 с. Минимальные величины максимальной динамической ошибки регулирования составляют: при отработке внутреннего возмущения от +2,00 до –0,52 %; при отработке внешнего топочного возмущения от +22 до –18 %; при отработке внешнего возмущения расходом пара от +35 до –18 %. Лучшие прямые показатели качества соответствуют численным значениям: $T_{зд1} = 0,146(T_{оп} + \sigma_{оп}) = 1,63$ с; $T_{зд2} = 0,146\tau_1 = 3,06$ с.

Сравнительный анализ результатов моделирования КСАР с ПИД-регулятором, настроенным по лучшему зарубежному методу (кривая 1), и предлагаемой инвариантной КСАР (кривая 2) представлен на рис. 5.

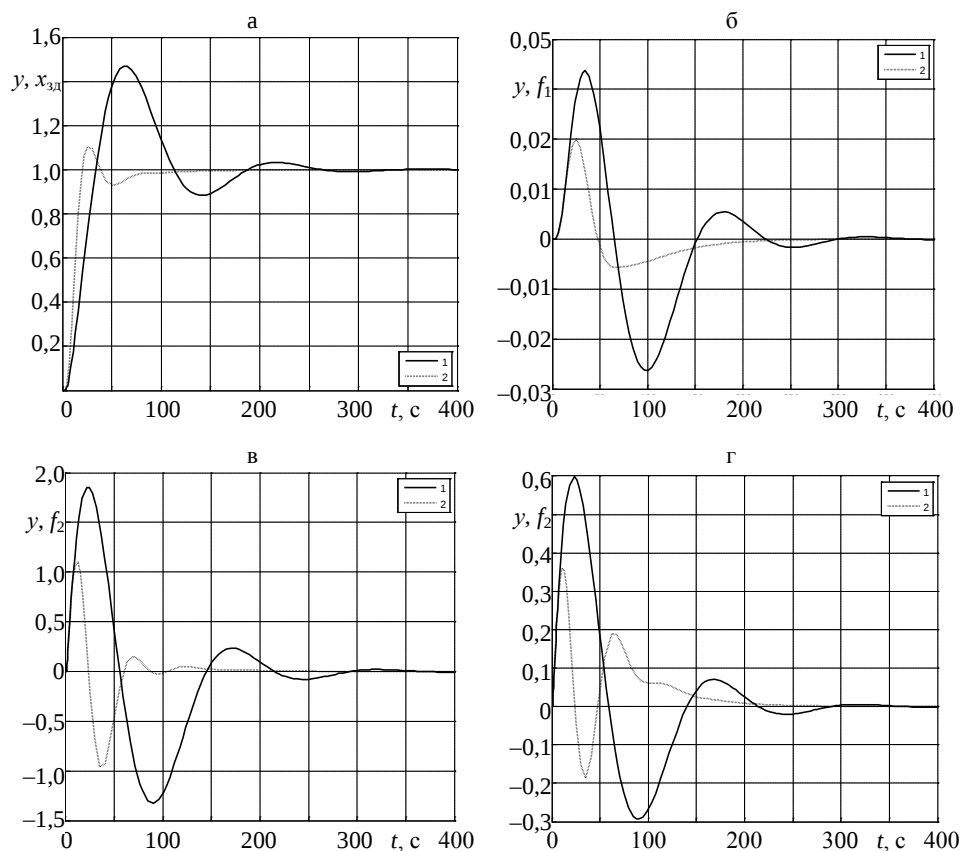


Рис. 5. Сравнительный анализ результатов моделирования КСАР с ПИД-регулятором и предлагаемой инвариантной КСАР: а–г – то же, что на рис. 1; t – время, с;
1 – КСАР (рис. 1), где корректирующий регулятор оптимизирован по лучшему зарубежному аналогу [10]; 2 – инвариантная КСАР

Из анализа графиков переходных процессов видно, что предлагаемая инвариантная КСАР повышает быстродействие при обработке скачка задания в 2,5 раза. При этом максимальная величина перерегулирования уменьшается с 42,5 до 10,0 % по сравнению с лучшим зарубежным аналогом. При обработке внутреннего возмущения время регулирования сокращается на 33 %, максимальная динамическая ошибка регулирования – на 65 %. При этом степень затухания переходного процесса увеличивается с 0,85 до 1,00. Время отработки внешнего топочного возмущения уменьшается в два раза, максимальная динамическая ошибка регулирования – на 63 %; максимальная динамическая ошибка регулирования при отработке внешнего возмущения расходом перегретого пара – на 71 %, время регулирования сокращается в 1,5 раза.

ВЫВОДЫ

1. Предложена инвариантная каскадная система автоматического регулирования уровня воды в барабане котла, отличающаяся от типовой тем, что:

- структуру и оптимальную динамическую настройку стабилизирующего регулятора выбирают на базе передаточной функции оптимального регулятора, при этом заданную постоянную времени критерия оптимальности по промежуточной регулируемой величине выбирают по правилу золотого сечения, приняв за целое эквивалентную постоянную времени опережающего участка;

- структуру и оптимальную динамическую настройку корректирующего устройства выбирают на базе передаточной функции оптимального регулятора с учетом передаточной функции эквивалентного объекта регулирования, включая внутренний контур стабилизирующего регулятора. При этом передаточная функция корректирующего устройства соответствует произведению инверсной передаточной функции эквивалентного объекта регулирования на заданную передаточную функцию разомкнутой системы по основной регулируемой величине;

- передаточная функция модели инерционного участка объекта регулирования на время отработки внешнего возмущения расходом перегретого пара представлена в динамике объектом регулирования с самовыравниванием;

- структура передаточной функции устройства компенсации внешнего возмущения соответствует инверсной заданной передаточной функции разомкнутой системы и выбрана таким образом, что нет необходимости дополнительно определять динамические параметры передаточной функции внешнего возмущения.

2. Результаты моделирования инвариантной каскадной системы автоматического регулирования по сравнению с КСАР, настроенной по лучшему зарубежному методу, показали существенное улучшение качества регулирования при всех основных возмущающих воздействиях.

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. К у л а к о в, Г. Т. Математическое моделирование переходных процессов трехимпульсной 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.
5. К у л а к о в, 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.
6. Р о т а ч, В. Я. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / В. Я. Ротач. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
7. К у з ь м и ц к и й, И. Ф. Теория автоматического управления: учеб. / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2010. – 574 с.
8. Ш и р о к и й, Д. К. Расчет параметров промышленных систем регулирования: справ. пособие / Д. К. Широкий, О. Д. Куриленко. – Киев: Техника, 1972. – 232 с.

9. С о р о к о, Э. М. Золотые сечения, процессы самоорганизации и эволюции систем: введение в общую теорию гармонизации систем / Э. М. Сороко. – М.: КомКнига, 2006. – 264 с.

10. A i d a n, O'D w y e r. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules / O'Dwyer Aidan. – 3rd Edition. – Dublin: Institute of Technology; Ireland, Imperial College Press, 2009. – 529 p.

REFERENCES

1. P l e t n e v, G. P. (2007) *Automation of Technological Processes and Productions in Heat-and-Power Engineering*. 4th Edition. Moscow: Publishing House Moscow Power Engineering Institute. 352 p. (in Russian).

2. D e m c h e n k o, V. A. (2001) *Automation and Modeling of Technological Processes in Atomic Power Plants and Thermal Power Plants*. Odessa, Astroprint. 308 p. (in Russian).

3. K l y u e v, A. S., Lebedev, A. T., & Novikov, S. I. (1985) *Adjustment of the Automatic Control Systems in Steam Boilers of the Drum-Type*. Moscow, Energoatomizdat. 280 p. (in Russian).

4. K u l a k o v, G. T., Kulakov, A. T., & Kuchorenko, A. N. (2014) Mathematical Modeling of Transient Processes in Three-Pulses Automatic Control System of Steam-Boiler Water Feed for Load Release. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 1, 57–64 (in Russian).

5. K u l a k o v, G. T., & Kuchorenko, A. N. (2014) Optimization of Transient Processes of Water Level Changing in the Steam Drum of the Boiler. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 4, 63–74 (in Russian).

6. R o t a c h, V. Ya. (2008) *The Theory of Automatic Control*. Moscow: Publishing House Moscow Power Engineering Institute. 396 p. (in Russian).

7. K u z' m i t s k i y, I. F., & Kulakov, G. T. (2010) *The Theory of Automatic Control*. Minsk: BSTU (Belarusian State Technological University). 574 p. (in Russian).

8. S h i r o k i y, D. K., & Kurilenko, O. D. (1972) *Parameter Computation of Industrial Controlling Systems*. Kiev, Technics. 232 p. (in Russian).

9. S o r o k o, E. M. (2006) *Golden Sections, Processes of Self-Organizing and Evolution in Systems: Introduction into the General Theory of System Harmonizing*. Moscow: KomKniga. 264 p. (in Russian).

10. A i d a n, O'D w y e r. (2009) Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. 3rd Edition. Dublin: Institute of Technology; Ireland, Imperial College Press. 529 p.

Представлена кафедрой ТЭС БНТУ

Поступила 07.07.2014

УДК 697.9

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Доктора техн. наук, профессора ОСИПОВ С. Н., ПИЛИПЕНКО В. М.

ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.»

E-mail: up-niptis@rambler.ru

Повышение комфортности и безопасности жилья – одно из основных требований при капитальном ремонте, реконструкции старых и строительстве новых жилых зданий. Существенным фактором этого является замена источников приготовления бытовой горячей воды с квартирных газовых водонагревателей на общедомовое горячее водо-