

**ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СИГНАЛА
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА**

**Докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т.¹⁾,
асп. КУХОРЕНКО А. Н.²⁾, канд. техн. наук, доц. ГОЛИНКО И. М.³⁾**

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь,

³⁾Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»

E-mail: ANK@yandex.ru

Цифровые микропроцессорные средства автоматизации позволяют гораздо шире использовать приемы конструирования систем автоматического регулирования, а также применять в них оптимальные способы регулирования, например можно объединить метод структурно-параметрической оптимизации и теории инвариантности. Метод структурно-параметрической оптимизации позволяет существенно повысить быстродействие системы при отработке скачка задания и сократить время отработки крайнего внешнего возмущения до двух величин запаздывания по каналу регулирующего воздействия. Использование принципа инвариантности основано на дополнительном измерении наиболее опасного возмущающего воздействия, по отношению к которому и достигается улучшение качества регулирования.

В данном исследовании для существенного улучшения отработки внешнего возмущения расходом перегретого пара применен принцип инвариантности. Компенсация влияния возмущения на регулируемую величину достигается за счет введения дополнительного сигнала на вход корректирующего регулятора с выхода устройства компенсации соответствующей структуры. При этом внешнее возмущение измерено расходом перегретого пара.

Результаты моделирования переходных процессов каскадной системы автоматического регулирования, на базе которой было реализовано объединение указанных методов, показали, что при отработке внешнего возмущения расходом пара происходит уменьшение максимальной динамической ошибки регулирования в шесть раз и сокращение времени регулирования на 30 % по сравнению с каскадной системой без устройства компенсации внешнего возмущения. При этом уменьшение заданной постоянной времени критерия оптимальности отработки задания по основной регулируемой величине ведет к дальнейшему уменьшению максимальной динамической ошибки регулирования при отработке внешнего возмущения расходом пара, что и далее позволяет повысить качество регулирования.

Ключевые слова: автоматическое регулирование, метод структурно-параметрической оптимизации, теория инвариантности.

Ил. 6. Библиогр.: 11 назв.

**INVARIAN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM,
USING THE INTERMEDIATE-FREQUENCY SIGNALS
OF HEAT POWER PARAMETERS**

KULAKOV G. T.¹⁾, KUKHORENKO A. N.²⁾, GOLINKO I. M.³⁾

¹⁾Belarusian National Technical University,

²⁾Command-engineering institute of MES of the Republic of Belarus,

³⁾National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute"

The usage of digital micro-processing automatic means allow to use design methods (technique) of automatic control systems more wider, and also to apply optimal ways of con-

trol, for example, it is possible to combine the Method of structural-parameter optimization and invariance theory. This method allow to increase essential system speed in processing of task jump and to reduce operation time of outside external disturbance up to two values of regulated influence, and the usage of invariance principle is based on an additional measuring of the most dangerous perturbation influence and in connection with it the improvement of regulation quality is achieved.

In this article the principle of invariance is applied in order to improve greatly external disturbance attack by consumption of over-heated steam. Compensation of disturbance influence on regulated value is achieving by introduction of additional signal on input of correction regulator from output of compensation device ,measuring the external disturbance by consumption of over-heated steam.

Modeling results of transient processes of cascade system of automatic control (CSAC), on the base of which were realized the unity of these methods, demonstrated the fact that, in processing of external disturbance by consumption of steam, the reduction of maximal dynamic regulation error is six times and cutting of regulation time by 30 % in comparison with CSAC without compensation device of external disturbance. And that is why it leads to the further reduction of maximal dynamic regulation error in processing of external disturbance by consumption of steam, and this allows to improve the quality of control.

Keywords: automatic control, method of structural-parameter optimization, theory of invariance.

Fig. 6. Ref.: 11 titles.

Двухконтурные системы автоматического регулирования (САР) получили широкое распространение в области автоматизации теплоэнергетических процессов (каскадные системы автоматического регулирования (КСАР) и САР с дифференцированием промежуточного сигнала) [1]. Методы параметрической оптимизации таких систем приведены в [2, 3].

Структурные схемы двухконтурных САР базировались на возможностях аналоговой техники и использовании типовых алгоритмов регулирования, полученных из передаточной функции пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора). Вместе с тем возможности современных микропроцессорных средств автоматизации гораздо шире ПИД-алгоритмов регулирования.

Использование типовых двухконтурных САР не позволяет существенно улучшить качество регулирования теплоэнергетических процессов даже при их оптимальной динамической настройке. В [4–6] предложен метод структурно-параметрической оптимизации динамических систем с использованием ПИД-регуляторов на основе передаточной функции оптимального регулятора, учитывающий динамику объекта регулирования и заданную передаточную функцию системы в качестве критерия оптимальности. Метод структурно-параметрической оптимизации позволяет существенно повысить быстродействие системы при обработке скачка задания и сократить время отработки крайнего внешнего возмущения до двух величин запаздывания по каналу регулирующего воздействия. Дальнейшее улучшение качества регулирования и повышение динамической точности систем целесообразно на базе соединения метода структурно-параметрической оптимизации и теории инвариантности, т. е. теории компенсации влияния возмущения [7–10].

Одним из основных направлений развития теории инвариантности является создание систем, инвариантных до ε , приведенных первоначально в [8, 9]. Главное здесь – обеспечение условий устойчивости при приближении к состоянию абсолютной инвариантности.

Другое направление связано с использованием метода двухканальности комбинированных САР по отклонению и возмущению. Динамический смысл условия абсолютной инвариантности состоит в том, что регулятор осуществляет воздействие на объект, в точности равное внешнему воздействию, но противоположно направленное для полной компенсации возмущения. Критерий отбора физически осуществляемых абсолютно инвариантных систем впервые был предложен Б. Н. Петровым [10]: «Необходимым (но не достаточным) признаком физической реализуемости абсолютно инвариантных систем является наличие в схеме, по меньшей мере, двух каналов передачи возмущающего воздействия между точкой его приложения и точкой, относительно которой достигается инвариантность (принцип двухканальности)». При этом если передаточная функция устройства компенсации возмущения $W_{\text{ук}}(p)$ может быть представлена в виде рациональной дроби

$$W_{\text{ук}}(p) = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n}, \quad (1)$$

то для достижения условий инвариантности необходима проверка условия $m \leq n$, где m и n – старшие степени оператора Лапласа в числителе и знаменателе соотношения (1), т. е. физически реализуемое корректирующее устройство.

Пусть передаточная функция инерционного участка объекта САР температуры перегретого пара за котлом имеет вид

$$W_{\text{ин}}(p) = \frac{k_{\text{ин}}}{T_k p + 1} e^{-\tau_y p} = \frac{1,2}{140 p + 1} e^{-102 p}, \quad (2)$$

где $k_{\text{ин}}$ – коэффициент передачи инерционного участка; T_k – постоянная времени инерционного участка; τ_y – время запаздывания по каналу регулирующего воздействия; p – оператор Лапласа.

Передаточная функция опережающего участка объекта регулирования представлена в виде инерционного звена первого порядка

$$W_{\text{оп}}(p) = \frac{k_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}^* p + 1} = \frac{6}{25,3 p + 1}, \quad (3)$$

где $k_{\text{оп}}$ – коэффициент передачи опережающего участка; $T_{\text{оп}}^*$ – эквивалентная постоянная времени опережающего участка.

При этом передаточная функция внешнего возмущения расходом пара имеет вид

$$W_{\text{в}}(p) = \frac{k_{\text{в}}}{T_{\text{в}} p + 1} = \frac{5}{30 p + 1}, \quad (4)$$

где $k_{\text{в}}$ – коэффициент передачи внешнего возмущения; $T_{\text{в}}$ – постоянная времени.

Структурная схема моделирования каскадной САР приведена на рис. 1.

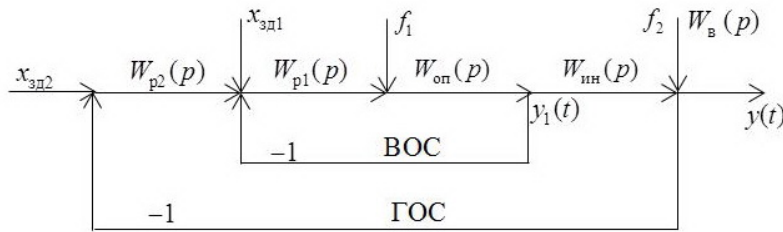


Рис. 1. Структурная схема моделирования каскадной САР (вариант 1):

$y(t)$ – основная регулируемая величина; $y_1(t)$ – промежуточная регулируемая величина;
 $x_{зд1}$ – заданное значение промежуточной регулируемой величины; $x_{зд2}$ – заданное значение основной регулируемой величины; f_1 – внутреннее возмущение; f_2 – внешнее возмущение расходом пара; $W_{p1}(p)$ – передаточная функция стабилизирующего регулятора;
 $W_{p2}(p)$ – передаточная функция корректирующего регулятора;
 $W_{оп}(p)$ – передаточная функция опережающего участка объекта регулирования;
 $W_{инн}(p)$ – передаточная функция инерционного участка объекта регулирования;
 $W_{в}(p)$ – передаточная функция внешнего возмущения расходом пара;
 ВОС – внутренняя обратная связь; ГОС – главная обратная связь

Передаточную функцию стабилизирующего регулятора $W_{p1}(p)$ выбираем с помощью метода структурно-параметрической оптимизации. Запишем передаточную функцию внутреннего контура замкнутой системы $W_{y,x_{зд1}}(p)$ по задающему воздействию промежуточной регулируемой величины

$$W_{y,x_{зд1}}(p) = \frac{W_{p1}(p)W_{оп}(p)}{1 + W_{p1}(p)W_{оп}(p)}. \quad (5)$$

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

$$W_{y,x_{зд1}}(p) = W_{зд1}^{opt}(p), \quad (6)$$

где $W_{зд1}^{opt}(p)$ – оптимальная передаточная функция внутреннего контура по задающему воздействию.

С учетом (6) передаточная функция (5) примет следующий вид:

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

Из передаточной функции (7) находим передаточную функцию оптимального стабилизирующего регулятора

$$W_{p1}(p) = \frac{1}{W_{оп}(p)} \frac{W_{зд1}^{opt}(p)}{1 - W_{зд1}^{opt}(p)}. \quad (8)$$

Так как передаточная функция опережающего участка (3) имеет первый порядок, то $W_{зд1}^{opt}$ принимаем в следующем виде:

$$W_{зд1}^{opt}(p) = \frac{1}{T_{зд1}p + 1}, \quad (9)$$

где $T_{зд1}$ – заданная постоянная времени инерционного звена первого порядка.

Подставив (3) и (9) в (8), получим (для стабилизирующего регулятора) передаточную функцию ПИ-регулятора с одним параметром динамической настройки $T_{зл1}$

$$W_{p1}(p) = \frac{T_{оп}^* p + 1}{k_{оп} T_{зл1} p} = \frac{25,3p + 1}{6T_{зл1} p}. \quad (10)$$

Определение численного значения $T_{зл1}$ осуществляем с использованием ряда чисел правила золотого сечения [11], приняв за целое $T_{оп}^*$. Выбираем следующее значение постоянной времени критерия оптимальной обработки задания внутренним контуром

$$T_{зл1} = 0,382T_{оп}^* = 9,66 \text{ с}. \quad (11)$$

Передаточную функцию корректирующего регулятора $W_{p2}(p)$ выбираем также с помощью метода структурно-параметрической оптимизации. Для этого определяем передаточную функцию эквивалентного объекта с учетом передаточных функций объекта (2) и заданной передаточной функции внутреннего контура (9)

$$\begin{aligned} W_{эkv}(p) &= W_{об}(p)W_{зл1}^{opt} = \frac{k_{ин}}{(T_k p + 1)(T_{зл1} p + 1)} e^{-\tau_y p} = \\ &= \frac{1,2}{(140p + 1)(T_{зл1} p + 1)} e^{-102p}. \end{aligned} \quad (12)$$

Так как передаточная функция эквивалентного объекта (12) имеет второй порядок с запаздыванием, заданная передаточная функция $W_{зл2}^{opt}(p)$ критерия оптимальности основной регулируемой величины при обработке скачка задания $x_{зл2}$ принимает следующий вид:

$$W_{зл2}^{opt}(p) = \frac{e^{-\tau_y p}}{(T_{зл2} p + 1)^2}, \quad (13)$$

где $T_{зл2}$ – заданная постоянная времени критерия оптимальности обработки задания по основной регулируемой величине, выбираемая по правилу золотого сечения [11] с учетом максимальной величины регулирующего воздействия, приняв за целое условное запаздывание τ_y по каналу регулирующего воздействия.

Подставив (12) и (13) в передаточную функцию оптимального регулятора, получим передаточную функцию корректирующего устройства с одним параметром динамической настройки $T_{зл2}$

$$W_{p2}(p) = \frac{(140p + 1)(T_{зл1} p + 1)}{1,2(T_{зл2} p + 1)^2} \frac{1}{1 - \frac{e^{-\tau_y p}}{(T_{зл2} p + 1)^2}}. \quad (14)$$

Выбор численных значений $T_{зд2}$ осуществляем с использованием ряда чисел правила золотого сечения [11], приняв за целое τ_y . Выбираем следующие значения заданной постоянной времени:

$$T_{зд2} = 0,09\tau_y = 9,18 \text{ с}; T_{зд2} = 0,146\tau_y = 14,89 \text{ с}; T_{зд2} = 0,236\tau_y = 24,07 \text{ с}. \quad (15)$$

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

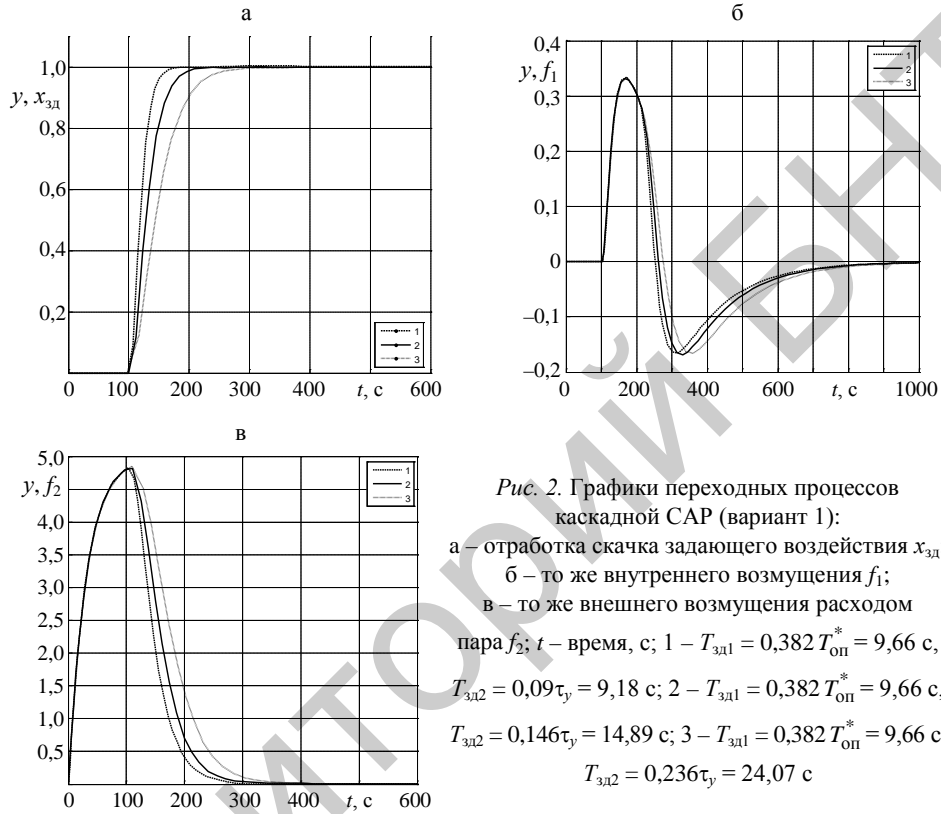


Рис. 2. Графики переходных процессов каскадной САР (вариант 1):

- а – отработка скачка задающего воздействия $x_{зд}$;
- б – то же внутреннего возмущения f_1 ;
- в – то же внешнего возмущения расходом пара f_2 ; t – время, с; 1 – $T_{зд1} = 0,382 T_{оп}^* = 9,66 \text{ с}$,
 $T_{зд2} = 0,09\tau_y = 9,18 \text{ с}$; 2 – $T_{зд1} = 0,382 T_{оп}^* = 9,66 \text{ с}$,
 $T_{зд2} = 0,146\tau_y = 14,89 \text{ с}$; 3 – $T_{зд1} = 0,382 T_{оп}^* = 9,66 \text{ с}$,
 $T_{зд2} = 0,236\tau_y = 24,07 \text{ с}$

Из графиков переходных процессов видно, что отработка скачка задания происходит без перерегулирования, причем с уменьшением величины $T_{зд2}$ время регулирования сокращается, отработка внутреннего и внешнего возмущений также улучшается с уменьшением $T_{зд2}$.

Преобразуем структурную схему каскадной САР, изображенную на рис. 1, в предлагаемую схему, представленную на рис. 3.

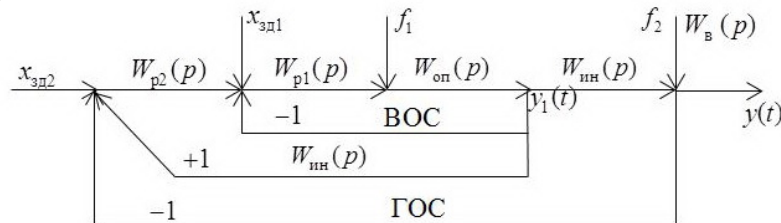


Рис. 3. Структурная схема моделирования каскадной САР (вариант 2) (обозначения те же, что на рис. 1)

Выход датчика промежуточной регулируемой величины $y_1(t)$ подаем на вход полной модели инерционного участка объекта регулирования, выход которой подаем в виде положительного сигнала на вход корректирующего регулятора для полной компенсации сигнала главной обратной связи при обработке задания по основной регулируемой величине. Затем выбираем структуру физически реализуемого корректирующего устройства как компенсатора динамики внутреннего контура системы и инерционного участка объекта регулирования

$$W_{p2}(p) = \frac{(T_{зд1}p + 1)(T_{кp} + 1)}{k_{ин} (T_{зд2}p + 1)^2}. \quad (16)$$

Анализ результатов моделирования переходных процессов САР, при основных возмущениях, приведенных на рис. 4, показывает, что обработка скачка задания и внешнего возмущения расходом пара идентична в обеих схемах на рис. 1 и 3. При этом уменьшилась максимальная динамическая ошибка регулирования при обработке внутреннего возмущения, и переходный процесс не меняет знак, что важно для теплоэнергетических объектов регулирования, так как способствует повышению надежности работы и увеличивает срок службы металла пароперегревателя.

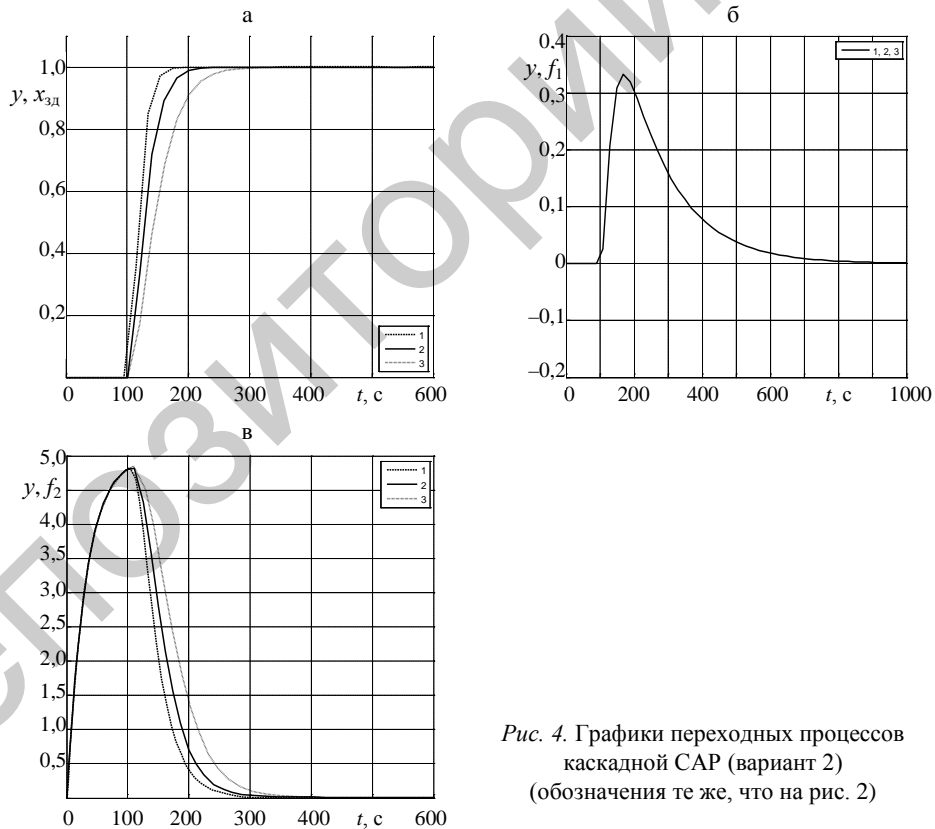


Рис. 4. Графики переходных процессов каскадной САР (вариант 2) (обозначения те же, что на рис. 2)

Для существенного улучшения обработки внешнего возмущения расходом перегретого пара применим принцип инвариантности для компенсации влияния возмущения на регулируемую величину за счет введения до-

полнительного сигнала на вход корректирующего регулятора с выхода устройства компенсации соответствующей структуры (рис. 5), измерив дополнительно внешнее возмущение расходом перегретого пара f_2 .

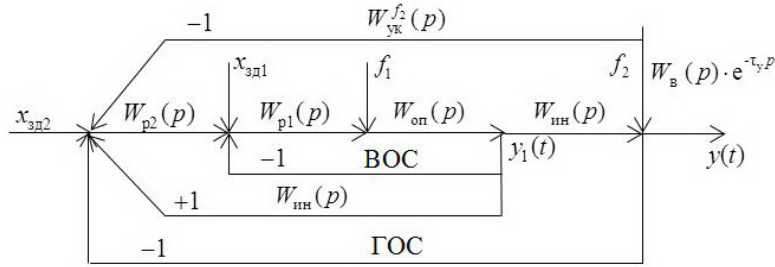


Рис. 5. Структурная схема моделирования инвариантной САР:

$W_{\text{ук}}^{f_2}(p)$ – передаточная функция устройства компенсации внешнего возмущения
(остальные обозначения те же, что на рис. 1)

Передаточную функцию устройства компенсации $W_{\text{ук}}^{f_2}(p)$ выбираем из условия

$$W_{\text{ук}}^{f_2}(p)W_{\text{зд2}}^{\text{opt}}(p) = [1 - W_{\text{зд2}}^{\text{opt}}(p)]W_{\text{в}}(p)e^{-\tau_y p}. \quad (17)$$

Из (17) находим передаточную функцию устройства компенсации

$$W_{\text{ук}}^{f_2}(p) = \frac{W_{\text{в}}(p)}{W_{\text{зд2}}^{\text{opt}}(p)} [1 - W_{\text{зд2}}^{\text{opt}}(p)]. \quad (18)$$

Для того чтобы в устройстве компенсации физически реализовать отношение $W_{\text{в}}(p)/W_{\text{зд2}}^{\text{opt}}(p)$, необходимо в передаточную функцию внешнего возмущения расходом пара добавить звено запаздывания со временем, равным запаздыванию по каналу регулирующего воздействия, т. е. при плановом изменении нагрузки котла вначале изменяют задание корректирующему регулятору, а затем в момент времени, равный запаздыванию по каналу регулирующего воздействия, осуществляют переход на новую нагрузку.

С учетом (13), приняв балластную постоянную времени знаменателя передаточной функции устройства компенсации $T_{\text{зд2}} = T_{\text{зд3}}$, искомая передаточная функция устройства компенсации примет следующий вид:

$$W_{\text{ук}}^{f_2}(p) = \frac{k_{\text{в}}(T_{\text{зд2}}p + 1)}{T_{\text{в}}p + 1} \left[1 - \frac{e^{-\tau_y p}}{(T_{\text{зд2}}p + 1)^2} \right] = \frac{5(T_{\text{зд2}}p + 1)}{30p + 1} \left[1 - \frac{e^{-\tau_y p}}{(T_{\text{зд2}}p + 1)^2} \right]. \quad (19)$$

Оптимальный выбор численного значения $T_{\text{зд2}}$ осуществляем с использованием ряда чисел правила золотого сечения [11], приняв за целое τ_y . Выбираем следующие значения заданной постоянной времени:

$$T_{\text{зд2}} = 0,09\tau_y = 9,18 \text{ с}; T_{\text{зд2}} = 0,146\tau_y = 14,89 \text{ с}; T_{\text{зд2}} = 0,236\tau_y = 24,07 \text{ с}. \quad (20)$$

Результаты моделирования переходных процессов инвариантной САР (рис. 5) представлены на рис. 6.

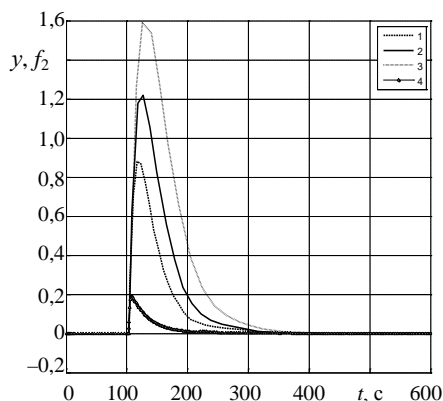


Рис. 6. График переходных процессов отработки внешнего возмущения расходом пара f_2 ; t – время, с; 1 – $T_{зд1} = 0,382 T_{оп}^* = 9,66$ с, $T_{зд2} = 0,09 \tau_y = 9,18$ с; 2 – $T_{зд1} = 0,382 T_{оп}^* = 9,66$ с, $T_{зд2} = 0,146 \tau_y = 14,89$ с; 3 – $T_{зд1} = 0,382 T_{оп}^* = 9,66$ с, $T_{зд2} = 0,236 \tau_y = 24,07$ с; 4 – $T_{зд1} = 0,382 T_{оп}^* = 9,66$ с, $T_{зд2} = 0,0131 \tau_y = 1,34$ с

Из графиков переходных процессов видно, что использование принципа инвариантности в предлагаемой каскадной САР на рис. 5 позволяет добиться с применением третьего варианта при отработке внешнего возмущения расходом пара уменьшения максимальной динамической ошибки регулирования в шесть раз и сократить время регулирования на 30 % по сравнению с каскадной САР без устройства компенсации внешнего возмущения. Снижение постоянной времени $T_{зд2}$ в схеме на рис. 5 ведет к дальнейшему уменьшению максимальной динамической ошибки регулирования при отработке внешнего возмущения расходом пара, существенно повысив при этом качество регулирования (кривая 4 на рис. 6).

ВЫВОДЫ

1. Предложена инвариантная система автоматического регулирования при плановом изменении нагрузки, структура которой выбирается на основе использования метода структурно-параметрической оптимизации динамических систем, отличающаяся тем, что:

- перед переходом на новую нагрузку котла вначале изменяют задание корректирующему регулятору с выхода устройства компенсации дополнительно измеренного внешнего возмущения, затем осуществляется переход на новую нагрузку котла;
- структуру и динамическую настройку стабилизирующего регулятора выбирают на основе передаточной функции оптимального регулятора на одновременную качественную отработку задающего сигнала по промежуточной регулируемой величине и внутреннего возмущения;
- для компенсации сигнала главной обратной связи при отработке задания по основной регулируемой величине выход промежуточной регулируемой величины подают на вход полной модели инерционного участка объекта регулирования, выход которой положительным сигналом подают на вход корректирующего регулятора;
- передаточную функцию корректирующего регулятора выбирают из условия компенсации динамики внутреннего контура системы и инерционного участка объекта регулирования.

2. Передаточную функцию устройства компенсации находят из условия инвариантности основной регулируемой величины по отношению к крайнему внешнему возмущению с учетом заданной передаточной функции системы по основной регулируемой величине.

3. Предлагаемая инвариантная каскадная система автоматического регулирования позволяет существенно улучшить качество регулирования при основных воздействиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. П л е т н е в, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учеб. для студентов вузов / Г. П. Плетнев. – 4-е изд., перераб. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с.

2. 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, 2010. – 396 с.

3. 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.

4. К у л а к о в, 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.

5. С т р у к т у р н о - п а р а м е т р и ч е с к а я 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.

6. К у л а к о в, Г. Т. Структурно-параметрическая оптимизация динамических систем как основа внедрения базисных инноваций в области автоматизации технологических процессов и производств / Г. Т. Кулаков // Трансфер технологий от науки к бизнесу: материалы V Междунар. симпозиума, Алушта, 15–20 сентября 2013 г. – Киев; Симферополь; Алушта: НАН Украины, Центр исслед. науч.-техн. потенциала и истории науки имени Г. М. Доброва, 2013. – С. 27–31.

7. К у х т е н к о, А. И. Проблема инвариантности в автоматике / А. И. Кухтенко. – Киев: Гостехиздат УССР, 1963. – 270 с.

8. Л у з и н, Н. Н. К абсолютной инвариантности и инвариантности по ϵ в теории дифференциальных уравнений. Ч. I / Н. Н. Лузин, П. И. Кузнецов // Доклады академии наук СССР. – 1946. – Т. 51, № 4. – С. 247–249.

9. Л у з и н, Н. Н. К абсолютной инвариантности и инвариантности по ϵ в теории дифференциальных уравнений. Ч. III / Н. Н. Лузин, П. И. Кузнецов // Доклады академии наук СССР. – 1951. – Т. 80, № 3. – С. 325–327.

10. П е т р о в, Б. Н. О реализуемости условий инвариантности / Б. Н. Петров // Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах: труды конференции, 16–20 октября 1958 г. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – С. 59–80.

11. 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.

REFERENCES

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

2. R o t a c h, V. Ya. (2010) *Theory of Automatic Control*. 5th ed. Moscow, Publishing House, Moscow Power Engineering Institute. 396 p. (in Russian).

3. K u s m i t s k i y, I. F., & Kulakov, G. T. (2010) *Theory of Automatic Control*. Minsk: BSTU [Belarusian State Technological University]. 574 p. (in Russian).

4. K u l a k o v, G. T., Kulakov, A. T., & Kravchenko, V. V. (2012) Methodology of Structural-Parameter Optimization of Cascade Automatic Control Systems on the Base of Modified Predictor Smit. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Ener-*

getika [Proceedings of Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 2, 40–45 (in Russian).

5. K u l a k o v, G. T., Kulakov, A. T., Korzun, M. L., & Basalai, D. V. (2012) Structural & Parametric Optimization of Automatic Control Systems with Differentiated Intermediate – Frequency Signal. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika* [Proceedings of Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 3, 64–71 (in Russian).

6. K u l a k o v, G. T. (2013) Structural & Parametric Optimization of Dynamic Systems as the Foundation of Essential Innovations Implementation in the Field of Automation of Technological Processes and Industries. *Materialy V Mezhdunar. Simpoziuma “Transfert Tekhnologii ot Nauki k Biznesu”* [Works of the 5th International Academic “Transfer of Technologies From Science to Business”]. Kiev-Simferopol-Alushta: National Academy of Sciences of Ukraine, Investigation Center of Scientific – Technical Potential and History of Science Named after G. M. Dobrova, 27–31 (in Russian).

7. K u k h t e n k o, A. I. (1963) *Problems of Invariance in Automation Engineering*. Kiev, Gostehizdat of USSR. 270 p. (in Russian).

8. L u s i n, N. N., & Kusnetsov, P. I. (1946) To Absolute Invariance and Invariance Through ε in Differential Equations Theory. Part I. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Proceedings of the Academy of Science of USSR], 51 (4), 247–249 (in Russian).

9. L u s i n, N. N., & Kusnetsov, P. I. (1951) To Absolute Invariance and Invariance Through ε in Differential Equations Theory. Part III. *Doklady Akademii Nauk SSSR* [Proceedings of the Academy of Science of USSR], 80 (3), 325–327 (in Russian).

10. P e t r o v, B. N. (1959) About Realization of Invariance Conditions. *Invariance Theory and its Application in Automatic Devices. Proceedings of Conference. Kiev 16–20 October 1958*. Kiev: Publisher Academy of Sciences of the USSR, 59–80 (in Russian).

11. S o r o k o, E. M. (2006) *Golden Section, Self-Organization Processes and Evolution of Systems: Introduction in General Theory of System's Harmonization*. Moscow, KomKniga. 264 p. (in Russian).

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 07.07.2017

УДК 621.003.019

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Доктора техн. наук, профессора ПИИР А. Э.¹, КУНТЫШ В. Б.²,
инж. ВЕРЕЩАГИН А. Ю.²

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,

²Белорусский государственный технологический университет

E-mail: ado@piir.ru

Приведено сравнение расчетов топлива на приготовление горячей сетевой воды с помощью различных технологических установок, преобразующих теплоту высокого потенциала от продуктов сгорания топлива либо в процессе необратимого теплообмена с теплоносителем, либо с помощью тепловых двигателей, позволяющих снизить потери работоспособности и тем самым сэкономить топливо. Рассмотрены пять типов установок – от самой простой до самой сложной в двух вариантах, когда теплообменники и машины идеальны и когда оборудование имеет известную степень совершенства:

1) водогрейная котельная на органическом топливе;

2) электрокотельная, получающая энергию по линии электропередачи от конденсационной электростанции;