



УДК 681.5.01:658.512

© 2015 г. Д.А. Теличенко, канд. техн. наук  
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

## АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В БАРАБАНЕ ПАРОВОГО КОТЛА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ\*

В работе рассмотрены особенности построения и реализации системы управления уровнем воды в барабане котла. Показано, что объект может считаться астатическим с входным запаздыванием и иметь в числителе передаточной функции правый корень. Применение адаптивных законов управления обеспечивает требуемое качество работы системы.

**Ключевые слова:** уровень в барабане котла, неминимально-фазовый объект, запаздывание по управлению, астатизм второго порядка, адаптивные алгоритмы.

### Введение

Реальные условия функционирования систем управления достаточно часто осложнены присутствием запаздывания в управлении, изменением динамики и режимов работы основного и вспомогательного оборудования, наличием неконтролируемых возмущений [1, 2]. Из всего разнообразия технических задач регулирования, например, в энергетике, отдельно выделяется случай, когда, помимо всего вышеперечисленного, имеет место отсутствие так называемого «самовыравнивания», что в большинстве своем означает наличие у технического объекта астатизма [2 – 5]. При этом, если учесть, что регулирующим органом является задвижка или клапан, перемещаемые исполнительным механизмом с постоянной скоростью, порядок астатизма объекта возрастет до второго [6].

Система с астатическим объектом (имеющим запаздывание по управлению), предназначенная для поддержания уровня жидкости (пароводяной смеси или других сред), является достаточно распространенной на практике. Например, в теплоэнергетике к таким участкам регулирования относят [4]: технологический процесс обеспечения питания котла водой, процессы в системе химводоочистки,

---

\* Работа выполнена по государственному заданию МОН РФ высшим учебным заведениям в рамках проекта «Управление и автоматизация сложных систем в условиях неопределенности», код проекта: 110, а также поддержана грантом на получение стипендии Президента СП-1363.2015.1 «Проектирование систем управления объектами теплоэнергетики в условиях практической эксплуатации».

функционирование деаэраторных установок, работа теплофикационных установок вспомогательного оборудования (типа РОУ, БРОУ, всевозможных подогревателей сетевой воды), а также процесс обеспечения надежной работы турбоагрегата (в частности, задачи обеспечения работы конденсаторов турбин, подогревателей низкого и высокого давлений) и т.п. Необходимо отметить, что в большинстве случаев проблема управления астатическими объектами имеет успешное решение. Однако если объект обладает запаздыванием по управлению [7], функционирует в условиях параметрической неопределенности и подвержен действию внешних помех, то для построения системы управления, обеспечивающей желаемое качество регулирования, кроме обычного ПИД-регулятора [8], как правило, требуется привлекать специальные подходы, использующие робастную [9], адаптивную [10] или нечеткую [11] организации контура управления.

В данной работе рассматривается один из вариантов построения адаптивной системы регулирования астатическими неминимально-фазовыми объектами с запаздыванием по управлению.

### Технологический процесс регулирования

Всеми описанными выше особенностями и сложностями организации системы автоматического управления обладает технологический процесс поддержания уровня в котлоагрегате высокого давления [3 – 5]. Технологическая схема регулирования, классически рекомендуемая к использованию на производстве, представлена на рис. 1, где 1 – барабан котла; 2 – водяной экономайзер; 3 – пароперегреватель; 4 – датчик уровня; 5 – задающее устройство; 6 – регулятор; 7 – клапан;  $Q$  – теплота;  $G_{п.в.}$  – расход питательной воды;  $G_{п.п.}$  – расход перегретого пара.

На рис. 2 показана теоретическая кривая переходного процесса (два вида) при разных типах отклонений [12].

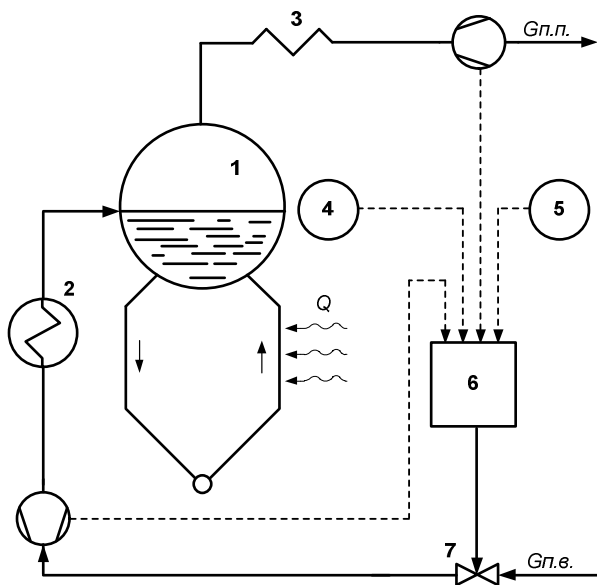


Рис. 1. Структурная схема.

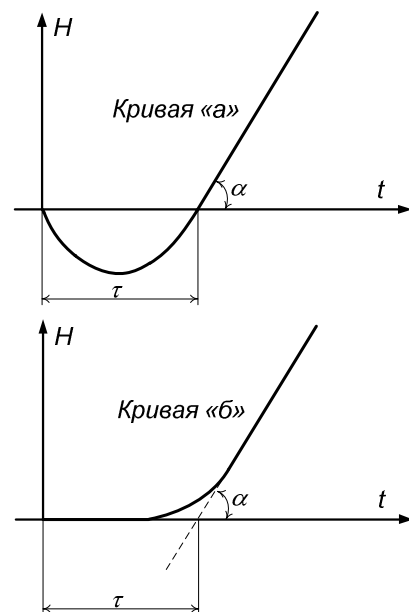


Рис. 2. Переходный процесс системы.

Задача поддержания уровня относится к одной из основных, поскольку его снижение может привести к перегосу труб и выходу котла из строя, а повышение – к забросу воды в паропровод и выход из строя турбоагрегата. С точки зрения управления, на величину уровня оказывает влияние множество факторов: изменение расхода питательной воды, изменение нагрузки потребителя, изменение расхода топлива, изменение температуры питательной воды [12]. Все это вынуждает рекомендовать к использованию на практике «трехимпульсных схем», где, помимо сигнала задания, на вход регулятора подаются данные об уровне воды, расходе перегретого пара и питательной воды (рис. 3).

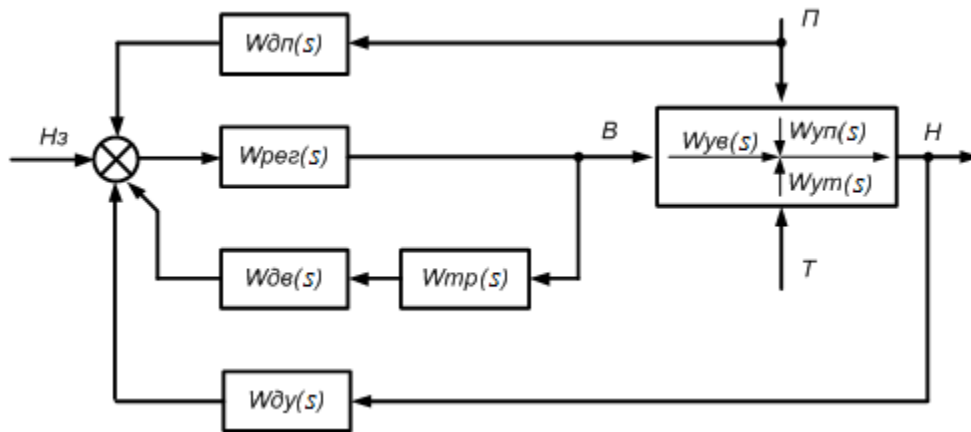


Рис. 3. Структура рассматриваемого класса систем.

На рис. 3 показаны соответствующие передаточные функции датчиков пара, воды и уровня –  $W_{дп}(s)$ ,  $W_{дв}(s)$ ,  $W_{дy}(s)$ ;  $W_{мп}(s)$  – передаточная функция участка трубопровода; передаточные функции по каналам «уровень-вода»  $W_{ув}(s)$ , «уровень-пар»  $W_{уп}(s)$ , «уровень-тепло»  $W_{дп}(s)$ ;  $H_z$  – задание по уровню;  $H$  – уровень в барабане;  $\Pi$  – расход пара;  $B$  – расход воды;  $T$  – тепловыделение.

Как следует из рис. 3, динамика изменения уровня  $H$  складывается из множества составляющих, зависящих от особенностей режимов работы оборудования. Так, например, реакция на отклонение уровня  $H$  по питательной воде  $B, W_{ув}(s)$  может быть аналогична либо кривой "а", либо кривой "б" (см. рис. 2) – все зависит от типа экономайзера. В первом случае имеется явление «набухания уровня» (изменение в сторону, противоположную изменению расхода), которое также проявляется при любых типах экономайзера и отклонении расхода пара  $P, W_{уп}(s)$ . Данное явление, но уже в меньшей степени отмечается при отклонении тепловыделения  $T, W_{ум}(s)$ .

Для проектирования регулятора  $W_{рег}(s)$  необходимо иметь либо строгое математическое описание всех составляющих (рис. 3), получение которого достаточно проблематично, либо огрублять математическую модель обобщенного объекта, определяя ее за счет обработки результатов практического эксперимента. Отметим, что существующая методика настройки трехимпульсной системы для регулятора уровня [3, 12] требует итерационной процедуры и основывается на практических испытаниях – это не лучший, но работоспособный вариант. Однако, с учетом современных требований к качеству работы и эксплуатации систем управления, можно не только отказаться от такого подхода, но и учесть ряд до-

пустимых отклонений в режимах работы системы.

### Математическое описание объекта

Математическое описание объекта было получено в результате проведения практических испытаний котлоагрегата БКЗ-420-140, имеющегося на Благовещенской ТЭЦ. Базовые параметры передаточной функции были вычислены при следующем режиме работы котла: расход перегретого пара  $G_{nn} = 340$  т/ч; давление перегретого пара  $P_{nn} = 129.7$  кгс/см<sup>2</sup>; давление в общей паровой магистрали  $P_m = 137.5$  кгс/см<sup>2</sup>.

В ходе различных испытаний и ступенчатого отклонения расхода питательной воды,  $G_{nv}$  (см. рис 4а) был получен отклик системы в виде изменения уровня в барабане  $H_{бар}$  (см. рис. 4б).

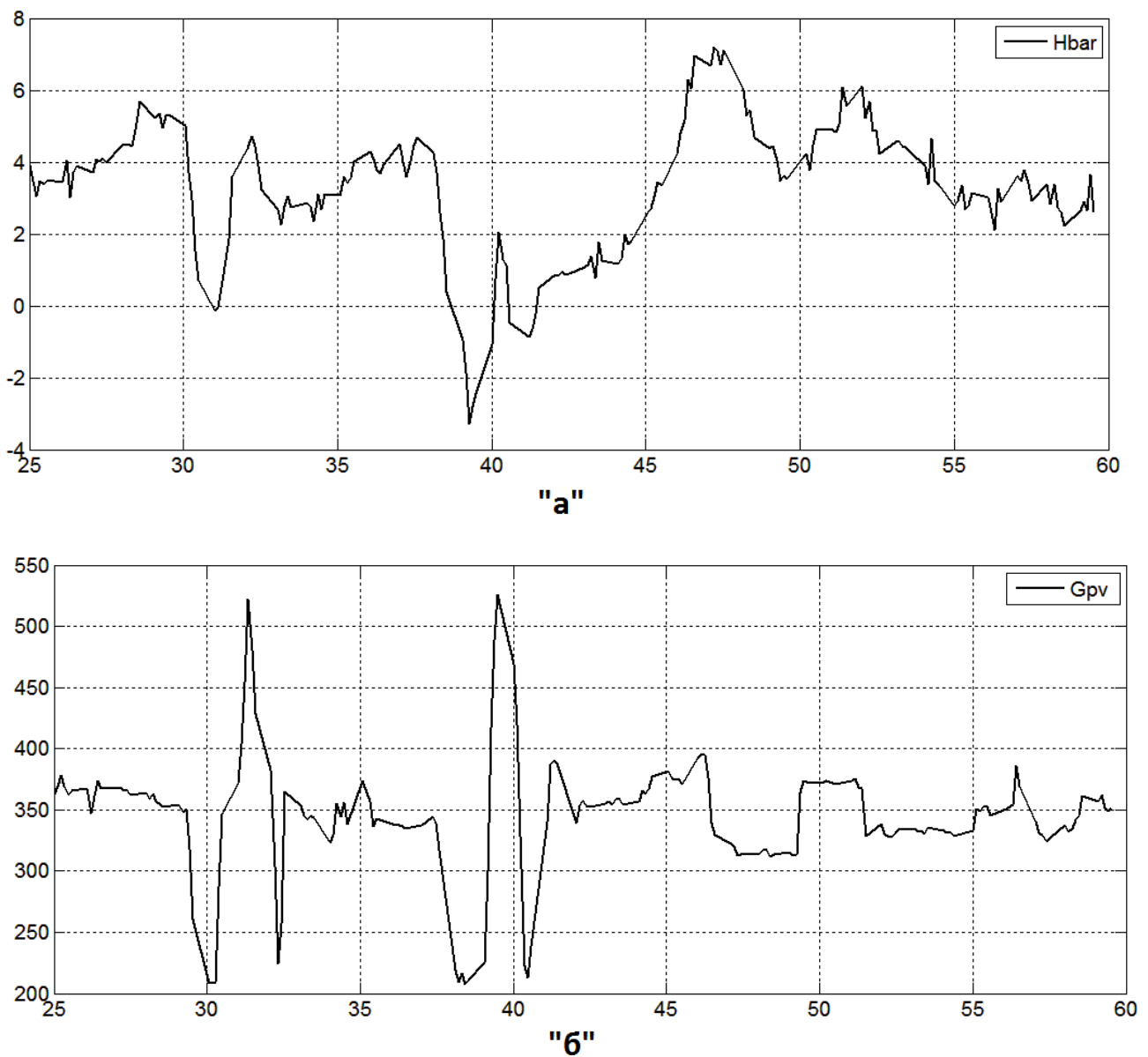


Рис. 4. Кривые разгона объекта.

В результате было определено, что обобщенный объект управления (совместно с исполнительным механизмом) достаточно точно может быть описан передаточной функцией:

$$W_{ООУ}(s) = \frac{K(1 - b_0 \cdot s) \cdot e^{-h \cdot s}}{s^2 \cdot (1 + a_0 \cdot s)}, \quad (1)$$

где  $K$  – обобщенный коэффициент усиления;  $h$  – среднее значение запаздывания;  $a_0$  и  $b_0$  – положительные числа.

Априорная неопределенность параметров модели (1) получена в виде

$$\begin{aligned} K^- \leq K \leq K^+, \quad K &= 0.001, \quad K^- = 0.00015, \quad K^+ = 0.0013; \\ b_0^- \leq b_0 \leq b_0^+, \quad b_0 &= 10.8, \quad b_0^- = 7.3, \quad b_0^+ = 11.2; \\ a_0^- \leq a_0 \leq a_0^+, \quad a_0 &= 0.09, \quad a_0^- = 0.05, \quad a_0^+ = 0.13; \\ h^- \leq h \leq h^+, \quad h &= 10, \quad h^- = 5, \quad h^+ = 15; \end{aligned} \quad (2)$$

где верхние индексы «+» и «-» указывают на соответствующие крайние правые (максимальные) и левые (минимальные) значения.

Учитывая, что значения параметров объекта (1) априорно неизвестны и в режиме работы могут изменяться (2), будем использовать подход, основанный на принципах адаптации.

### Постановка задачи

Ставится задача разработки контура адаптации системы адаптивного регулирования, структура которой представлена на рис.5, где  $y$  – выход объекта;  $r$  – задание;  $u$  – управляющее воздействие;  $f$  – возмущения, а контроллер, функционирующий дискретно во времени, включает: регулятор – реализуемый закон управления (классический или адаптивный); ШИМ – широтно-импульсный модулятор, формирующий сигналы «включить», «выключить», подаваемые на исполнительный механизм типа клапан; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

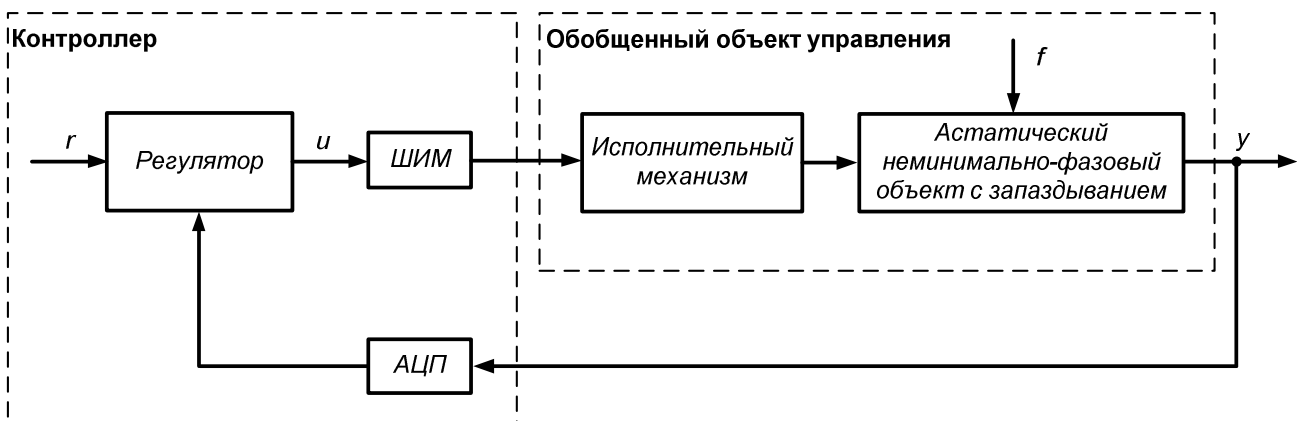


Рис. 5. Структура рассматриваемого класса систем.

В соответствии с известным подходом [2] сначала рассматривается задача построения непрерывной системы (без ШИМ), а затем осуществляется дискретная реализация системы управления соответственно для классического и адап-

тивного законов управления, с последующим сравнительным анализом их работоспособности.

*Постановка задачи.* Требуется для объекта управления (1), функционирующего при наличии ограниченных возмущений и в условиях априорной неопределенности (2), обеспечить выполнение целевого условия

$$\begin{aligned} \text{mod}(y(t) - r_*) \leq \delta = \text{const}, \\ \forall t > t_* \\ t \in [t_s, t_f], \quad t_s \leq t_* \leq t_f, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\delta$  – заданная величина;  $r_*$  – постоянная величина задающего воздействия, которое в общем случае может быть кусочно-постоянным на некотором известном временном интервале:

$$r(t) = r_{\tau^*} \cdot 1(t), \quad r_{\tau^*} = \text{const}, \quad t \in [t_{\tau_s}, t_{\tau_f}], \quad \tau = 1 \dots i, \quad (4)$$

где  $r_{\tau^*}$  – задание на  $\tau$ -м интервале времени;  $i$  – число интервалов времени;  $t_{\tau_s}, t_{\tau_f}$  – начало и конец соответствующего временного интервала.

### Адаптивная система управления

Принимая во внимание неминимально-фазовость объекта и изменение его параметров во времени, аналогично [6], введем в систему управления шунт [13] и последовательный корректор (рис. 6).

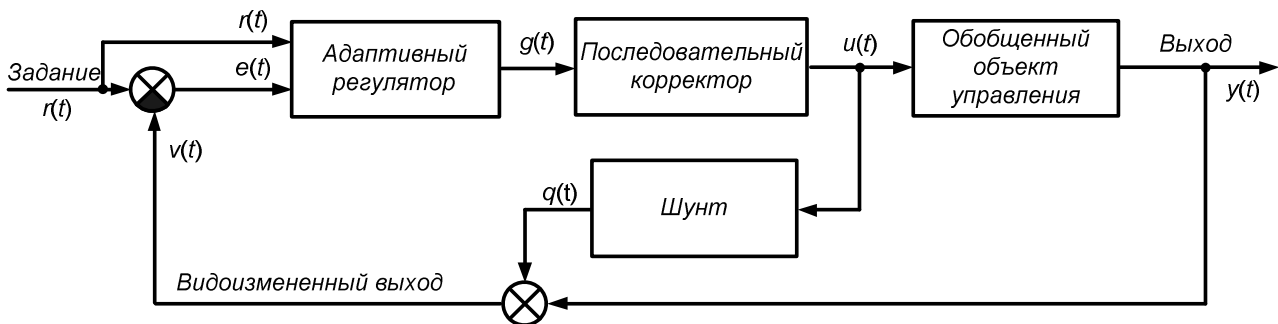


Рис. 6. Адаптивная система управления.

Описание адаптивного регулятора, последовательного корректора и шунта задано следующим образом:

$$\begin{aligned} g(t) &= \chi(t) \cdot r(t), \quad \chi(t) = f(r, e, t), \\ r(t) &= r_* = \text{const}, \quad e(t) = r_* - v(t) = r_* - y(t) - q(t), \end{aligned} \quad (5)$$

$$W_K(s) = \frac{u(s)}{g(s)} = \frac{K_K \cdot s^2}{(T_{K1} \cdot s + 1) \cdot (T_{K2} \cdot s + 1)}, \quad (6)$$

$$W_H(s) = \frac{q(s)}{u(s)} = \frac{K_H}{s}, \quad (7)$$

где  $g(t)$  – выход адаптивного регулятора;  $r(t)$  – задающее воздействие на определенных интервалах времени (3), равное  $r_*$ ;  $\chi(t)$  – параметр, алгоритм настройки, явный вид которого подлежит определению;  $e(t)$  – ошибка регулирования;  $v(t)$  – видоизмененный выход системы;  $q(t)$  – выход параллельного контура шунтирования.

ния;  $W_K(p)$  – передаточная функция последовательного корректора;  $K_K$  и  $T_{K1}, T_{K2}$  – соответственно коэффициент усиления и постоянные времени;  $K_H$  – коэффициент усиления шунта.

Аналогично [13, 14] и согласно уравнениям (5) – (7), видоизмененный выход можно описать в виде:

$$\begin{aligned} v(s) = y(s) + q(s) &= \frac{K(1 - b_0 \cdot s) \cdot e^{-h \cdot s}}{s^2 \cdot (1 + a_0 \cdot s)} \cdot \frac{1}{s^2} \cdot u(s) + \frac{K_H}{s} \cdot u(s) = \\ &= \left[ \frac{K(1 - b_0 \cdot s) \cdot e^{-h \cdot s}}{s^2 \cdot (1 + a_0 \cdot s)} \cdot \frac{1}{s^2} + \frac{K_H}{s} \right] \cdot \frac{K_K \cdot s^2}{(T_{K1} \cdot s + 1) \cdot (T_{K2} \cdot s + 1)} \cdot g(s) = \\ &= \frac{K_K}{(T_{K1} \cdot s + 1)} \cdot \left[ \frac{K(1 - b_0 \cdot s) \cdot e^{-h \cdot s}}{(1 + a_0 \cdot s) \cdot (T_{K2} \cdot s + 1)} + \frac{K_H \cdot s}{(T_{K2} \cdot s + 1)} \right] \cdot g(s). \end{aligned} \quad (8)$$

Из уравнения (8), аналогично [13, 14], задаваясь параметрами последовательного корректора, исходя из выполнения условий  $K_K > 0$ ,  $T_{K1} > 0$ ,  $T_{K2} > 0$ , с учетом известных границ априорной неопределенности (2), можно вычислить минимальные значения частот, удовлетворяющие равенствам:

$$\arg W_1(j\omega_{\pi/2}) = -\frac{\pi}{2}, \quad \arg W_1(j\omega_{\pi}) = -\pi, \quad W_1(s) = \frac{K(1 - b_0 \cdot s) \cdot e^{-h \cdot s}}{(1 + a_0 \cdot s) \cdot (T_{K2} \cdot s + 1)}. \quad (9)$$

Действительно, определив величину

$$\max_{\xi \in \Xi} |W_1(j\omega_{\pi})|, \quad (10)$$

параметры параллельного корректора (7) можно вычислить из условия

$$\operatorname{Re}(W_2(j\omega_{\pi/2})) > \max |W_1(j\omega_{\pi})|, \quad W_2(s) = \frac{K_H \cdot s}{(T_{K2} \cdot s + 1)}. \quad (11)$$

Разрешение (9) – (11), аналогично [13, 14], позволяет обеспечить выполнение условия

$$\operatorname{Re}(W_{\text{ЛСЧ}}(j\omega)) > 0, \quad \forall \omega \geq 0, \quad (12)$$

где  $W_{\text{ЛСЧ}}(j\omega)$  – линейная стационарная часть эквивалентно преобразованной системы относительно ошибки  $e(t)$ .

Можно показать, аналогично [6, 7, 13, 14], что для достижения цели управления (3), при заданной структуре контура самонастройки

$$\chi(t) = \chi_I(t) + \chi_P(t), \quad (13)$$

где  $\chi_I(t)$  и  $\chi_P(t)$  – соответственно пропорциональная и интегральная составляющие, алгоритмы адаптации достаточно выбрать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\chi_I(t)}{dt} &= \begin{cases} \alpha_1 e(t) \cdot r(t), & \forall |e(t)| \geq \sigma, \\ 0, & \forall |e(t)| < \sigma, \end{cases} \\ \chi_P(t) &= \begin{cases} \alpha_2 e(t) \cdot r(t), & \forall |e(t)| \geq \sigma, \\ 0, & \forall |e(t)| < \sigma, \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) - q(t), \quad \alpha_1, \alpha_2 = \text{const} > 0,$$

где  $\sigma$  – заданная величина зоны нечувствительности, значение которой определяется на этапе имитационного моделирования.

### Пример моделирования

Для сравнительного анализа качества работы системы вместе с адаптивным вариантом (5) – (7) с параметрами

$$\begin{aligned} K_K &= 14, \\ T_{K1} &= T_{K2} = 0.38, \\ \alpha_1 &= 4, \\ \alpha_2 &= 0.004, \\ K_{SH} &= 0.029, \\ \sigma &= 0.01 \end{aligned} \tag{15}$$

рассматривался ПДД<sup>2</sup> регулятор вида

$$\begin{aligned} W_{\text{ПДД}^2}(s) &= \\ &= \frac{K_p \cdot T_{im}}{T_i} \cdot \left( 1 + T_i \cdot s + \frac{K_d \cdot T_i^2 \cdot s^2}{((0.125 \cdot T_d \cdot T_i)^2 \cdot s^2 + 0.25 \cdot T_d \cdot T_i \cdot s + 1)} \right), \end{aligned} \tag{16}$$

где  $K_p = 1.678$ ;  $T_{im} = 15$ ;  $T_i = 85$ ;  $T_d = 170$ ;  $K_d = T_d/T_i = 2$ .

Уравнение (16) хорошо известно и является модификацией классического ПИД-регулятора [15], применяемого в тех случаях, когда в объекте управления присутствует исполнительный механизм.

На рис. 7 и 8 представлены полученные переходные характеристики как для базовых параметров объекта

$$W_{\text{ООУ1}}(s) = \frac{0.001(1 - 10.8 \cdot s) \cdot e^{-10 \cdot s}}{s^2 \cdot (1 + 0.09 \cdot s)}, \tag{17}$$

так и при их отклонении

$$W_{\text{ООУ2}}(s) = \frac{0.0013(1 - 11.2 \cdot s) \cdot e^{-15 \cdot s}}{s^2 \cdot (1 + 0.05 \cdot s)}. \tag{18}$$

Отметим, что классический регулятор (16) был настроен на оптимальное быстродействие и обеспечение (в случае изменения параметров объекта) максимально возможного запаса устойчивости.

Однако оказалась, что адаптивная систем обладает не только лучшим быстродействием, но и является более работоспособной при изменяющихся условиях функционирования объекта управления.

Имитационное моделирование показало, что данный факт имеет место и для дискретных реализаций рассматриваемых систем управления, т.е. при введении в их структуру (см. рис. 5) – ШИМ. Уместно отметить, что введение ШИМ целесообразно из условий практической реализации, поскольку преобразует непрерывный сигнал в импульсы «включить»/«выключить», подаваемые на исполнительный механизм.

На рис. 9 – 11 представлены графики переходных процессов для систем



управления с шагом дискретизации 0.24 (соответствует частоте работы контроллера P130, достаточно часто используемого на практике). При этом, помимо базовых значений объекта (17), исследовались следующие передаточные функции:

$$W_{ООУ3}(s) = \frac{0.00015(1 - 7.3 \cdot s) \cdot e^{-5 \cdot s}}{s^2 \cdot (1 + 0.05 \cdot s)}, \quad (19)$$

$$W_{ООУ4}(s) = \frac{0.0013(1 - 11.2 \cdot s) \cdot e^{-15 \cdot s}}{s^2 \cdot (1 + 0.13 \cdot s)}. \quad (20)$$

Как и в непрерывном случае, система с адаптивным регулятором показывает лучшее качество работы.

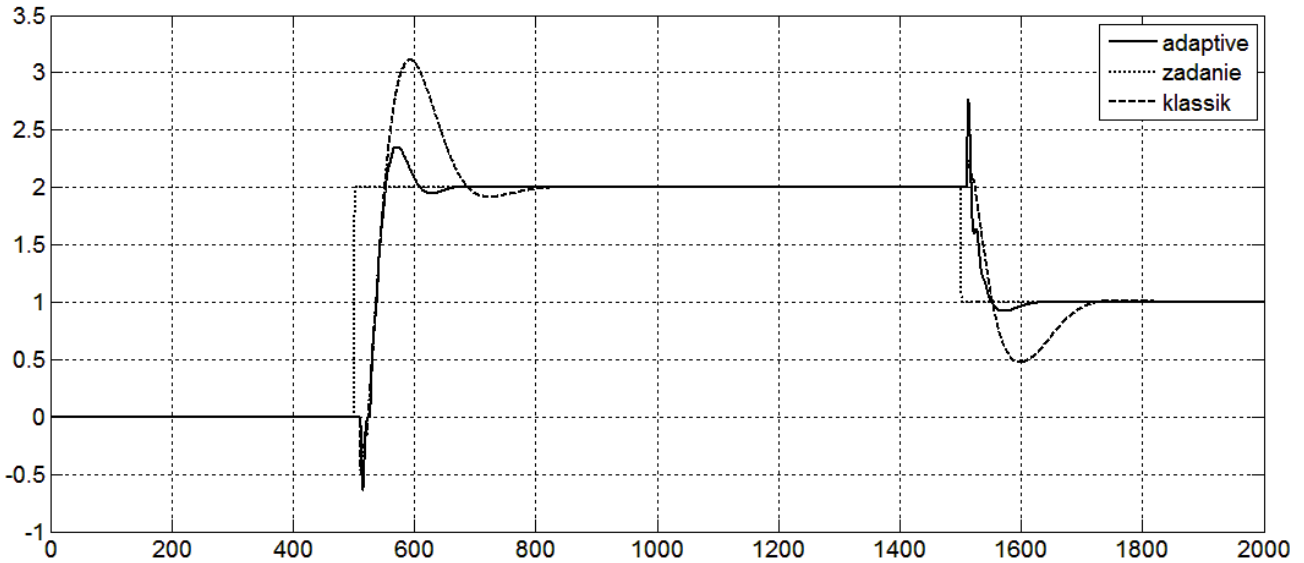


Рис. 7. Переходные процессы в системах для параметров (17).

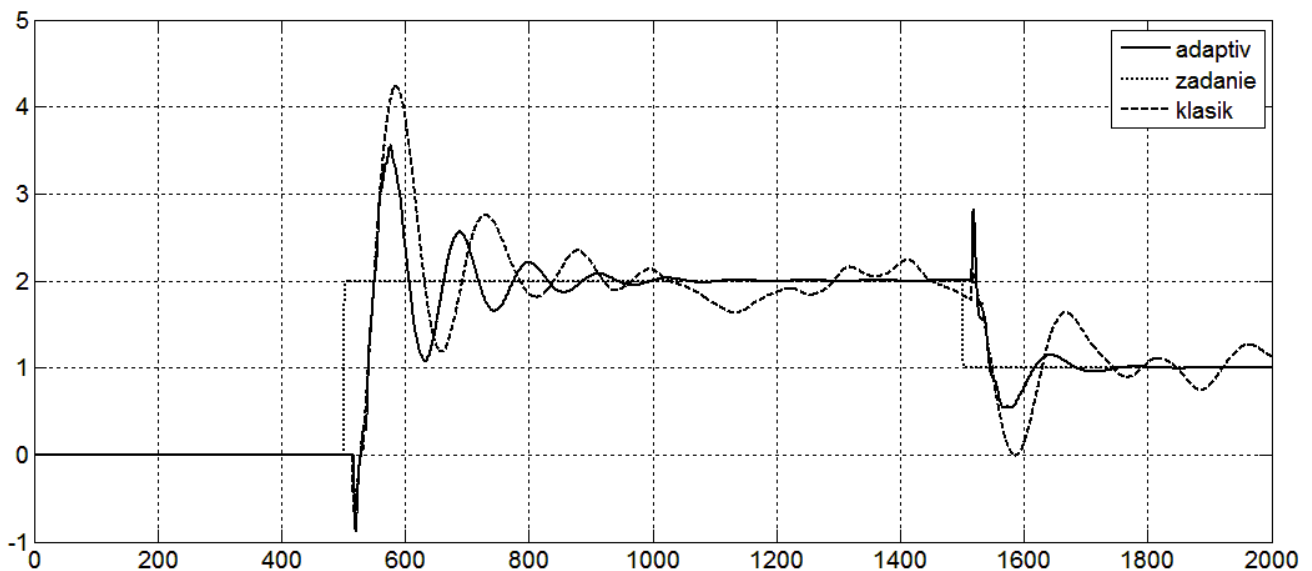


Рис. 8. Переходные процессы в системах для параметров (18).

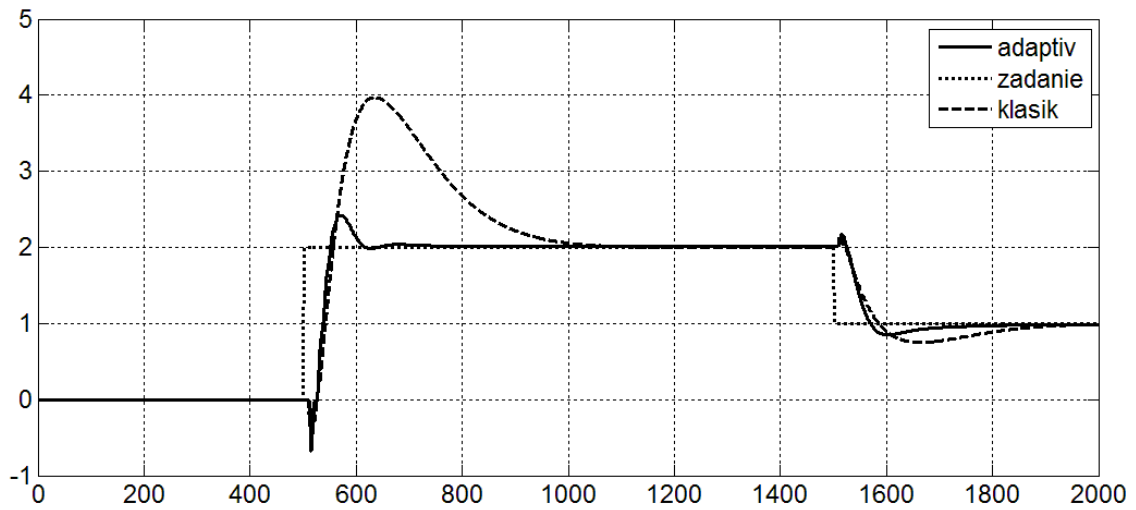


Рис. 9. Переходные процессы в системах для параметров (17).

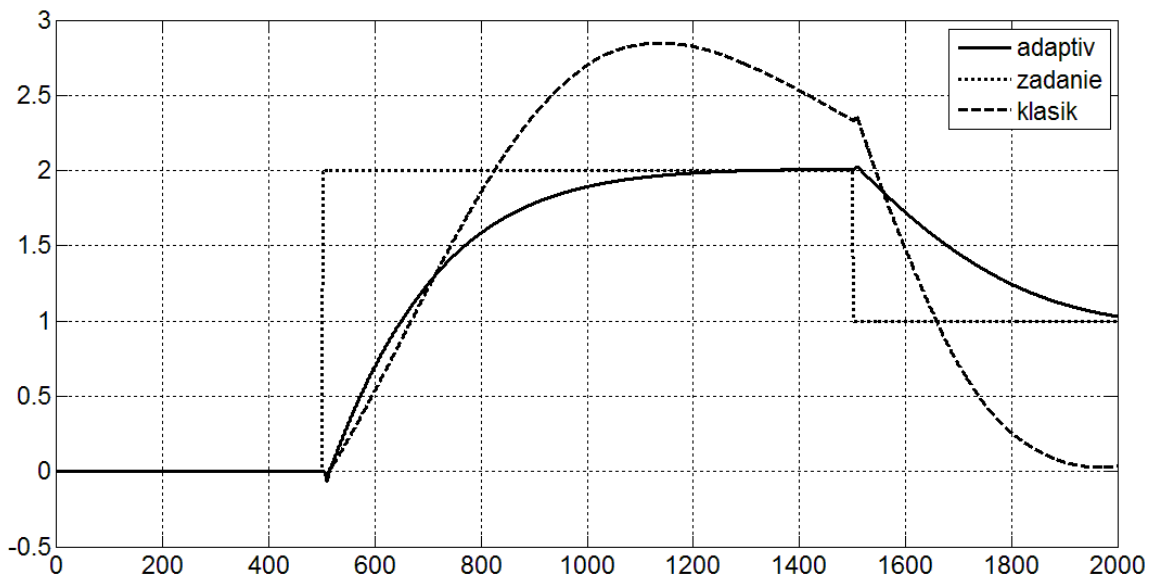


Рис. 10. Переходные процессы в системах для параметров (19).

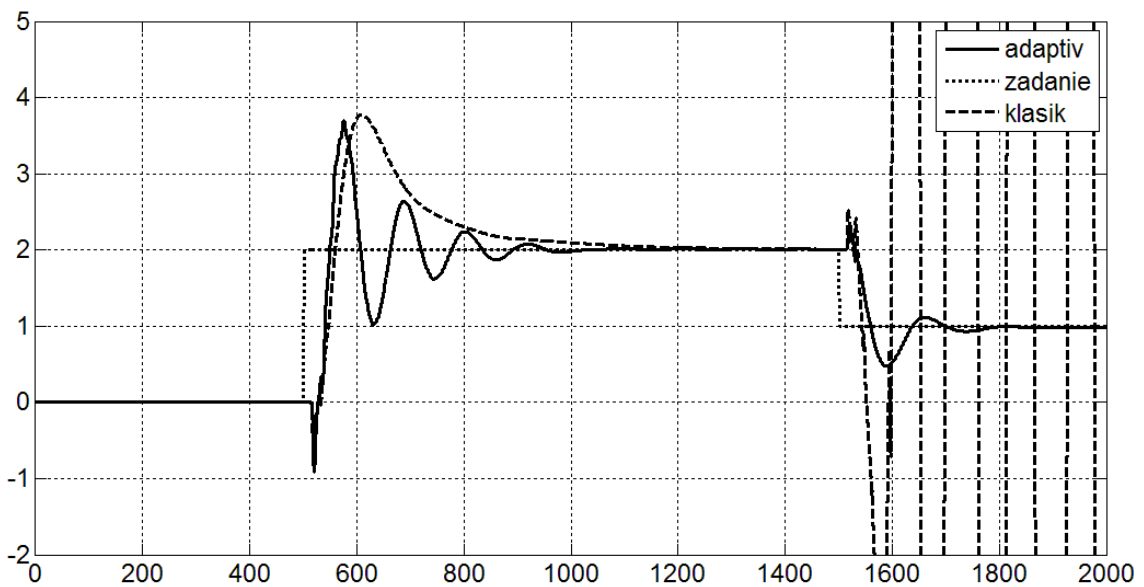


Рис. 11. Переходные процессы в системах для параметров (20).

## Заключение

Представлен подход к построению адаптивной системы управления, основанный на описании технологического процесса регулирования уровня в барабане парового котла, в виде математической модели – неминимально-фазового астатического звена с запаздыванием по управлению. Показано, что используемая математическая модель достаточно адекватна динамике реального объекта и весьма полно его характеризует во всем диапазоне изменений режимов работы промышленного оборудования.

Предложенные алгоритмы адаптивного управления обеспечивают хорошее качество работы системы и дают результат лучший, чем стандартный подход, основанный на применении типового ПИД-регулятора и его модификаций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. The control handbook (second edition). Part 2. Control Systems Application /edited William S. Levine. – CRC Press; Taylor & Francisc Group. – 2011.
2. *Еремин Е.Л., Теличенко Д.А.* Адаптивное и робастное управление в теплоэнергетике. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2009.
3. *Клюев А.С., Товарнов А.Г.* Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. – М.: Энергоатомиздат, 1970.
4. *Плетнев Г.П.* Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
5. *Демченко В.А.* Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. – Одесса: Астропринт, 2001.
6. *Еремин Е.Л., Косицын В.Ю., Теличенко Д.А.* Адаптивные алгоритмы для одного класса динамических объектов с запаздыванием по управлению // Информатика и системы управления. – 2010. – №4(26) – С. 137-149.
7. *Normey-Rico J.E., Camacho E.F.* Control of dead-time processes. – London: Springer-Verlag London Limited, 2007.
8. *Astrom K.J., Hagglund T.* Advanced PID control. – ResearchTriangle Park, NC: Instrum. Soc. Amer., 2006.
9. *Zhong, Qing-Chang* Robust control of time-delay systems. – London: Springer-Verlag London Limited, 2006.
10. *Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Чепак Л.В.* Синтез адаптивных систем для скалярных объектов с запаздыванием по управлению. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2006.
11. *Jantzen J.* Foundations of fuzzy control. – West Sussex: John Wiley & Sons, 2007.
12. *Клюев А.С., Лебедев А.Т., Новиков С.И.* Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
13. *Еремин Е.Л.* Адаптивное шунтирование в системах управления неминимально-фазовыми объектами // Информатика и системы управления. – 2001. – №1 – С. 74-82.
14. *Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Чепак Л.В.* Дискретно-непрерывная система адаптивного управления температурным режимом пароперегревателя // Информатика и системы управления. – 2004. – №1 – С. 117-129.
15. *Косицын В.Ю., Рыбалев А.Н., Теличенко Д.А.* Система управления тепловой нагрузкой котла // Теплоэнергетика. – 2013. – №2 – С. 54-60.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым.

E-mail:

Теличенко Денис Алексеевич – [telichenko@yandex.ru](mailto:telichenko@yandex.ru).