



УДК 681.5.01:658.512

© 2013 г. Д.А. Теличенко, канд. тех. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ОБЪЕКТАМИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ*

Рассмотрены особенности построения систем автоматического управления для распространенного класса объектов теплоэнергетики. На основании оценки эффективности реализации систем на промышленных контроллерах, сформулированы рекомендации по применению современных подходов к управлению объектами на ТЭЦ.

Ключевые слова: априорная неопределенность, запаздывание, адаптивное управление, нечеткий регулятор, программная реализация, исполнительный механизм, ШИМ, дискретизация.

Введение

Исторически сложилось так, что теплоэнергетика является отраслью промышленности, в которой сложность протекающих процессов и способов их контроля неразрывно связана с требованиями к качеству вырабатываемой тепловой и электрической энергии. В отличие от других производств здесь невозможна даже кратковременная остановка или снижение выработки. Тепловые электрические станции являются одними из самых распространенных предприятий данной отрасли, причем большая часть работает на угольном сырье, и, конечно же, здесь имеет место всеобъемлющая автоматизация, в рамках которой непрерывно приходится контролировать и регулировать свыше 1000 параметров [1].

Специфика работы ТЭС и ТЭЦ постсоветского пространства такова, что большая часть мощностей и, соответственно, подходов к управлению была спроектирована и реализована в прошлом веке [2]. Непрерывные модернизации, ремонты, введение новых методов контроля и управления, а также технических средств, привело в настоящее время к парадоксальной ситуации. Так, например, на одной станции могут быть использованы новейшие датчики и контроллеры, при этом остаться без изменения подходы к управлению. Сложность ситуации заключается и в том, что разработчики современных АСУ ТП и программного обеспечения для них фактически не готовы к использованию современных достижений

* Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки РФ в рамках проекта 7.7911.2013 «Проблемы автоматического управления техническими системами в условиях неопределенности».

в области автоматизации [3]. Более того, как показывают исследования, проведенные за рубежом, даже при всеобщей автоматизации производства настройка систем управления и качество их работы оставляют желать лучшего, что, кстати, имеет место и в нашей стране [4]. При этом теоретически достаточно полно проработаны вопросы применения различных современных подходов к управлению [5, 6].

Настоящая работа связана с исследованием того, какой из современных подходов к управлению в теплоэнергетике окажется наиболее эффективным как с точки зрения качества работы, так и с точки зрения простоты реализации. На основании проведенных исследований для типичного представителя рассматриваемого типа объектов формулируются общие рекомендации по эффективному использованию достижений современной теории управления для систем автоматического регулирования котла и турбины пылеугольной ТЭЦ.

Объект теплоэнергетики

Одной из типичных задач управления в теплоэнергетике является поддержание температуры воды или пара в условиях действия внешней среды [1, 2, 8]. Система в этом случае имеет параметры, зависящие от режима работы оборудования, срока его эксплуатации, времени года, а в контуре управления присутствует запаздывание. Чаще всего в качестве исполнительного устройства используется клапан или задвижка (математическая модель которого является свободным интегратором). Динамика датчика обычно учитывается совместно с объектом, а для управления системой используется промышленный контроллер, в котором реализован широтно-импульсный модулятор (рис. 1).

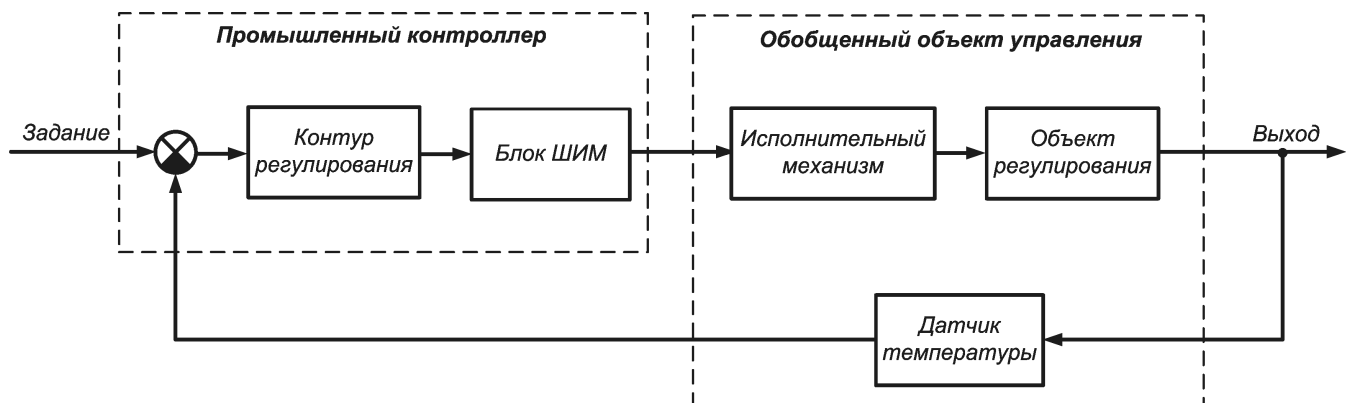


Рис. 1. Система управления объектом теплоэнергетики.

В качестве примера для рассматриваемого класса объектов возьмем пароводяной теплообменник, установленный в контуре химводоочистки ТЭЦ [9].

Для восполнения неизбежных материальных потерь пара, конденсата и питательной воды в процессе выработки электроэнергии на ТЭЦ требуется вода высокого качества [1]. Добавочная вода, восполняющая потери теплоносителя по тракту, должна пройти ряд устройств химводоочистки (ХВО). Нерастворимые примеси и растворенные в воде соли должны быть удалены из нее для предотвращения накипи на внутренних поверхностях котлов и других теплообменников.

Растворенный в воде кислород удаляется для предотвращения коррозии этих поверхностей.

Установка ХВО состоит из устройств предварительной очистки (рис. 2), где производится осветление воды путем удаления из нее грубодисперсных и коллоидных примесей, и устройств химического обессоливания, обеспечивающих удаление из воды растворенных солей и кремниевой кислоты. На рис. 2 введены следующие обозначения: 1 – осветлитель; 2 – механический фильтр; 3 – 8 – ионитные фильтры; ХВО – химводоочистка; ПО – установка предварительной очистки; ИО – ионообменная установка; БОВ – бак осветленной воды; БЧОВ – бак частично обессоленной воды; СВ – подогреватель; БХОВ – бак химически очищенной воды.

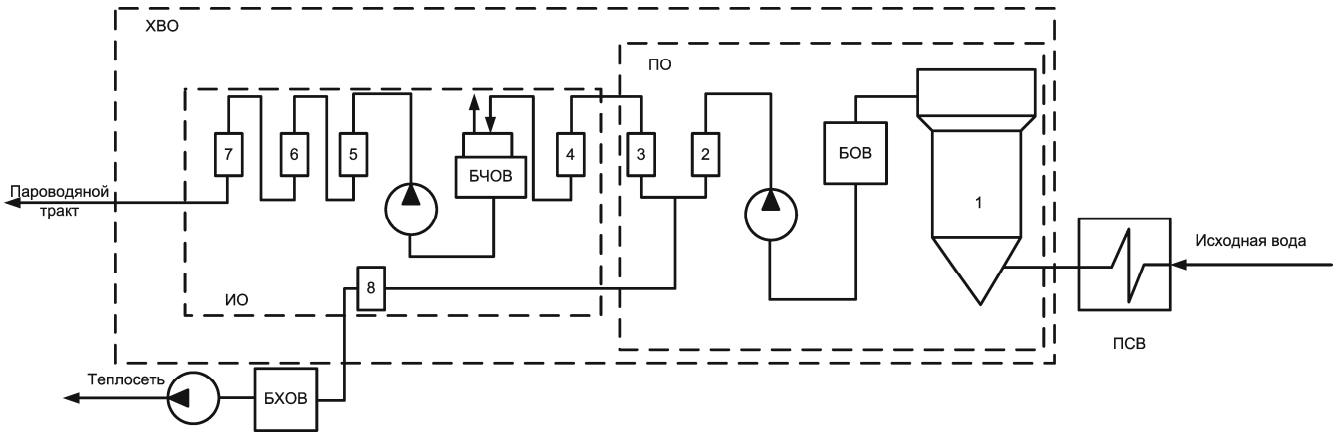


Рис. 2. Технологическая схема химводоочистки.

Оптимальное течение процессов в установке ХВО обеспечивается регулированием в заданных пределах ряда физических и химических параметров, в частности температуры, давления, величины рН-среды и некоторых других. Поддержание заданного значения температуры исходной воды необходимо по условиям

нормального протекания химических реакций в осветлителе и химических фильтрах [1] и является одним из процессов, для которого создаются системы автоматического регулирования. Точность поддержания температуры исходной воды составляет $\pm 1\%$ от номинального значения, равного $20-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9].

Подогрев исходной воды на ТЭЦ осуществляется в поверхностном пароводяном теплообменнике. Регулирование температуры в данной системе осуществляется с помощью изменения расхода пара, подаваемого в подогреватель. Одним из вариантов организации системы автоматического регулирования подогрева сырой воды является схема с промышленным регулятором [9], общий вид которой представлен на рис. 3. В

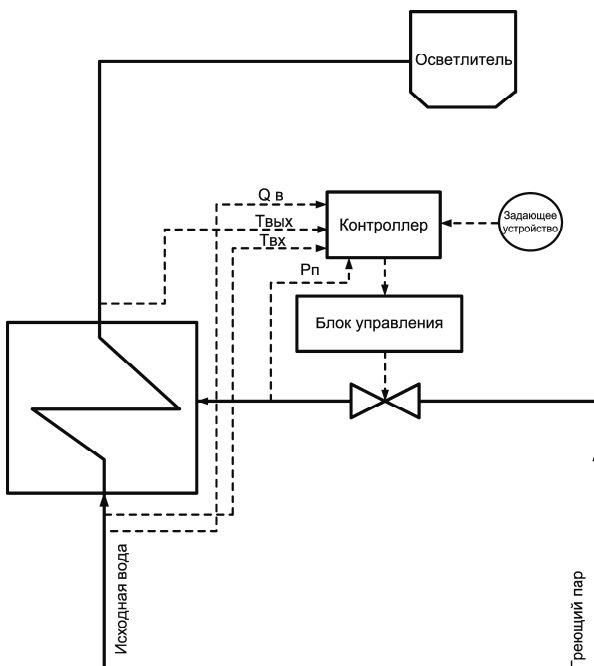


Рис. 3. Схема регулирования.

данной схеме регулятор получает основное входное воздействие по температуре воды за подогревателем (Твх) или перед ним (Твх) и дополнительное опережающее воздействие через дифференциатор по скорости изменения расхода воды (Qв), подаваемой на установку, и воздействует на регулирующий клапан на линии подвода пара к подогревателю.

Для компенсации изменения давления греющего пара (Рп) организовано дополнительное входное воздействие по скорости его изменения, подаваемое также через блок дифференцирования.

Проблемы функционирования данной системы детально рассмотрены в [9], поэтому позволим лишь кратко перечислить их: наличие дополнительных точек отбора параметров, плохая реакция на изменение параметров объекта и наличие неучтенных возмущений.

Математическое описание обобщенного объекта, полученное путем проведения активного эксперимента на Благовещенской ТЭЦ, учитывающее априорную неопределенность объекта, действие внешних возмущений, наличие запаздывания и исполнительного механизма, может быть представлено в виде [9]:

$$W_{oy}(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{k \cdot e^{-h \cdot s}}{a_2 \cdot s^3 + a_1 \cdot s^2 + s} \cdot \frac{1}{T_{ум}}, \quad (1)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} = A \cdot x(t) + B \cdot u(t - h) + f(t), \quad (2)$$

$$y(t) = L^T \cdot x(t), \quad f(t)^T = (0, 0, \dots, \tilde{f}_0(t)),$$

где $y(s)$ и $u(s)$ – скалярные изображения функции входа и выхода теплообменника; k – относительный коэффициент передачи; a_1, a_2 – числовые коэффициенты; h – запаздывание; $T_{ум}$ – время хода исполнительного механизма от положения «открыто» до «закрыто».

Уровень априорной неопределенности объекта задан следующим образом:

$$\begin{aligned} 0 \leq \tilde{f}_0 \leq 20, \quad 0.14625 \leq k \leq 0.17875, \\ 78 \leq a_1 \leq 234, \quad 4854.4 \leq a_2 \leq 7888.4, \end{aligned} \quad (3)$$

где запаздывание в системе предполагается известным и в общем случае может изменяться в диапазоне от 72 сек. до 108 сек.; $T_{ум} = 100$ сек.

Подходы к организации контуров управления

Отметим, что важнейшим критерием при организации систем управления является возможность реализации на используемых в отрасли промышленных контроллерах и средствах автоматизации, поэтому для нашей страны нейросетевой подход пока мало приемлем, и мы его исключаем из анализа. Роль же базового решения вместо ПИД регулятора будет играть адаптивный регулятор со стабилизирующим устройством, который достаточно прост при реализации, но по сравнению с ПИД обладает большим функционалом [10].

Первый вариант (адаптивный регулятор со стабилизирующим устройством). Для рассматриваемого класса объектов можно предложить структуру [11], состоящую из стабилизирующего устройства

$$W_{CV}(s) = \frac{k_c}{(T_c \cdot s + 1)}, \quad (4)$$

и адаптивного ПИД-регулятора

$$u(s) = \frac{k_p \cdot g(s) \cdot s}{(T_p \cdot s + 1)}, \quad g(t) = \chi(t) \cdot r(t), \quad (5)$$

где k_c, T_c – параметры стабилизирующего устройства; k_p, T_p – параметры линейной части адаптивного регулятора; $u(t)$ – управление; $g(t)$ – выход нелинейной части адаптивного регулятора; $r(t)$ – задание; $\chi(t)$ – настраиваемый параметр регулятора, который можно синтезировать в виде:

$$\chi(s) = \frac{\alpha + \beta \cdot s}{s} \cdot \mathcal{G}(s), \quad \mathcal{G}(t) = \begin{cases} e(t) \cdot r(t), & \forall |e(t)| > \sigma, \\ 0, & \forall |e(t)| \leq \sigma, \end{cases} \quad (6)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) - q(t), \quad \alpha, \beta, \sigma = \text{const} > 0.$$

Второй вариант (система с эталонным упредителем). В случае, когда запаздывание в системе известно, для объекта (1) – (3) можно предложить структуру с эталонным упредителем [12]. Данный блок служит для компенсации запаздывания, содержит в своем математическом описании компоненты эталонной модели, и в нашем случае может быть описан в виде:

$$\frac{d\tilde{x}_m(t)}{dt} = \tilde{A}_m \cdot \tilde{x}_m(t) + \tilde{B}_m \cdot \psi(t), \quad (7)$$

$$\tilde{y}_m(t) = \tilde{L}_m^T \cdot \tilde{x}_m(t), \quad \psi(t) = [u(t-h) + \mathcal{G}(t)],$$

$$W_m(s) = \frac{\tilde{y}_m(s)}{\psi(s)} = \tilde{L}_m^T (s \cdot E - \tilde{A}_m)^{-1} \tilde{B}_m = \frac{k_m}{\tilde{a}_m(s)}, \quad (8)$$

где $\tilde{x}_m(t) \in R^3$ – переменные состояния; $\tilde{y}_m(t) \in R$ – выход эталонного упредителя; $\psi(t) \in R$ – обобщенный вход эталонного упредителя; $\mathcal{G}(t) \in R$ – настраиваемый параметр; $\tilde{A}_m, \tilde{B}_m, \tilde{L}_m^T$ – постоянные матрица и векторы соответствующих размерностей; $\tilde{a}_m(s)$ – гурвицев полином третьей степени; $k_m > 0$ – коэффициент усиления эталонного упредителя.

Адаптивный регулятор в системе задается в виде:

$$u(t) = r(t) - \mathcal{G}(t), \quad (9)$$

$$\mathcal{G}(t) = \chi_1^T(t) \cdot \bar{y}(t) + \chi_2(t) \cdot u(t-h),$$

где $r(t) \in R$ – задающее воздействие; $\chi_1(t), \chi_2(t)$ – параметры адаптивного регулятора; $\bar{y}(t)$ – оценки переменных состояния объекта управления, получаемые с помощью фильтров, подключаемых к выходу объекта

$$W_\phi(s) = \frac{g(s)}{c(s)}, \quad g(s) = c(s), \quad (10)$$

где $g(s), c(s)$ – гурвицевы полиномы степени.

С учетом действия на объект возмущения можно показать, что устойчивость системе обеспечат алгоритмы вида

$$\frac{d\chi_{1q}(t)}{dt} = \begin{cases} 0, & \forall t \geq 0, |\tilde{v}(t)| \leq \tilde{\pi}, \\ -\alpha_{1q} \cdot \hat{y}_q(t) \cdot (\tilde{v}(t) + \tilde{\pi}), & \forall t \geq 0, \tilde{v}(t) < -\tilde{\pi}, \\ -\alpha_{1q} \cdot \hat{y}_q(t) \cdot (\tilde{v}(t) - \tilde{\pi}), & \forall t \geq 0, \tilde{v}(t) > \tilde{\pi}, \end{cases} \quad (11)$$

$$\frac{d\chi_2(t)}{dt} = \begin{cases} 0, & \forall t \geq 0, |\tilde{v}(t)| \leq \tilde{\pi}, \\ -\alpha_2 \cdot \hat{u}(t-h) \cdot (\tilde{v}(t) + \tilde{\pi}), & \forall t \geq 0, \tilde{v}(t) < -\tilde{\pi}, \\ -\alpha_2 \cdot \hat{u}(t-h) \cdot (\tilde{v}(t) - \tilde{\pi}), & \forall t \geq 0, \tilde{v}(t) > \tilde{\pi}, \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha_{1q}, \alpha_2, \tilde{\pi} = const > 0, \quad q = \overline{1,3}, \quad (13)$$

где $\tilde{\pi}$ – величина зоны нечувствительности, а контур расширения формируется в соответствии со следующими уравнениями

$$\begin{cases} \hat{y}(t) = D^{-1}(p) \cdot \bar{y}(t), & \hat{u}(t-h) = D^{-1}(p) \cdot u(t-h), \\ \tilde{v}(t) = \bar{v}(t) + \overline{\bar{v}}(t), & \bar{v}(t) = \tilde{y}_m(t) - y(t), \\ \overline{\bar{v}}(t) = \frac{k_m}{s + a_{m0}} q(t), \\ q(t) = -D^{-1}(p) \cdot \chi_1^T(t) \cdot \bar{y}(t) + \chi_1^T(t) \cdot \hat{y}(t) - \\ \quad - D^{-1}(p) \cdot \chi_2(t) \cdot u(t-h) + \chi_2(t) \cdot \hat{u}(t-h), \end{cases} \quad (14)$$

где $D(p)$ выбирается из выполнения тождества

$$\tilde{a}_m(s) = D(s)(s + a_{m0}), \quad (15)$$

при $a_{m0} = const > 0$.

Третий вариант (система с нечетким регулятором). В случае наличия в системе запаздывания и исполнительного механизма можно воспользоваться нечетким фаззи-регулятором с ПД-правилами [8, 13].

Рассмотрим алгоритм работы системы более подробно. На вход регулятора поступает ошибка e и ее производная de (так называемые лингвистические переменные), на выходе формируется управление u . Система функционирует в соответствии с алгоритмом Мамдани и для нее определены следующие правила:

if (e is $ERROR_n$) and (de is $RATE_z$) then (y is $DERIV_N_S$)
if (e is $ERROR_z$) and (de is $RATE_n$) then (y is $DERIV_N_S$)
if (e is $ERROR_z$) and (de is $RATE_z$) then (y is $DERIV_Z$)
if (e is $ERROR_z$) and (de is $RATE_p$) then (y is $DERIV_P_S$)
if (e is $ERROR_p$) and (de is $RATE_z$) then (y is $DERIV_P_S$)
if (e is $ERROR_p$) and (de is $RATE_p$) then (y is $DERIV_P_L$)
if (e is $ERROR_n$) and (de is $RATE_p$) then (y is $DERIV_N_L$)
if (e is $ERROR_n$) and (de is $RATE_n$) then (y is $DERIV_N_S$)
if (e is $ERROR_p$) and (de is $RATE_n$) then (y is $DERIV_P_S$),

где нижние индексы « n », « z » и « p » означают соответственно – отрицательно, равно нулю, положительно, для ошибки ($ERROR$), ее производной ($RATE$) и выхода ($DERIVE$); индексы « S » и « L » обозначают соответственно малое и большое.

Таким образом, правила работы нечеткого регулятора используют нечеткие множества $ERROR_n$, $RATE_n$ и $DERIVE_N_S$, ..., которые задаются через соответствующие функции принадлежности. В нашем случае данные нечеткие множества описываются графически, на основе собственных оценок, и могут быть представлены в виде рис. 4.

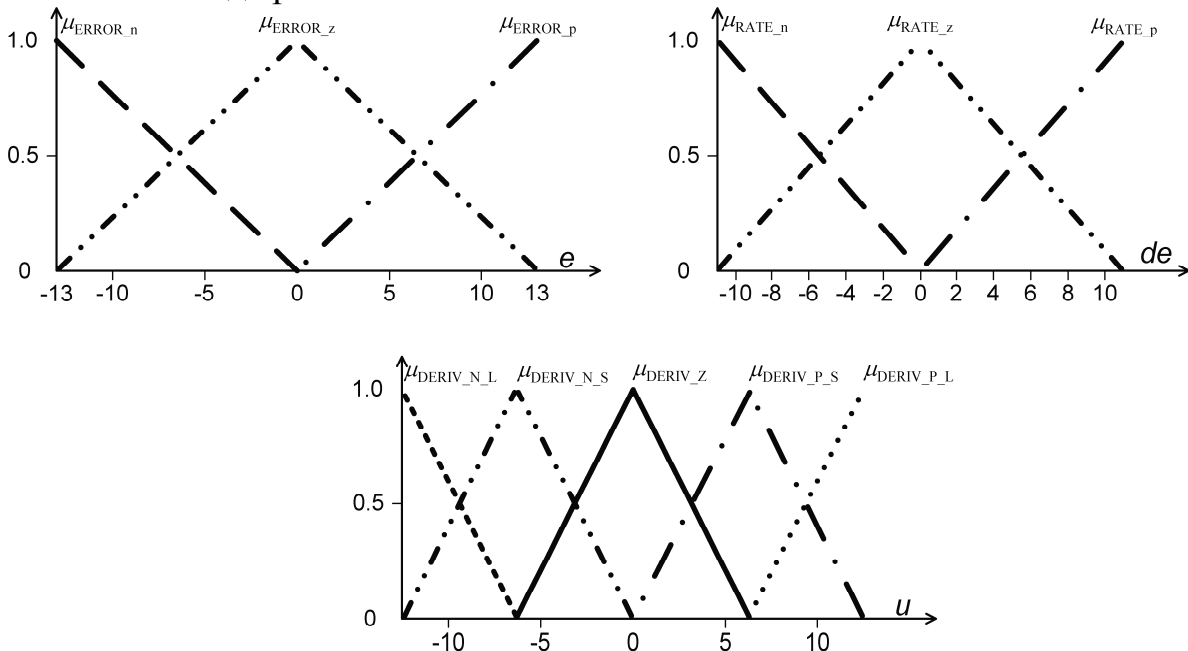


Рис. 4. Нечеткие множества (терм-множества или лингвистические величины) входов и выхода регулятора.

Для осуществления управления, последовательно для текущих значений e_0 и de_0 (измеренных в режиме работы) выполняются следующие шаги [8]:

1) проводится фаззификация (определение нечеткости). Здесь определяются степени истинности, т.е. вычисляются значения

$$\begin{aligned} &ERROR_z(e_0), \quad ERROR_p(e_0), \quad ERROR_n(e_0), \\ &RATE_z(de_0), \quad RATE_p(de_0), \quad RATE_n(de_0); \end{aligned} \quad (16)$$

2) осуществляется логический вывод. Для каждого из перечисленных выше наборов правил определяются уровни отсечения

$$\alpha_1 = ERROR_n(e_0) \wedge RATE_z(de_0), \quad \dots, \quad (17)$$

$$\alpha_9 = ERROR_p(e_0) \wedge RATE_n(de_0),$$

и находятся усеченные функции принадлежности (формируется логический вывод относительно управления u)

$$DERIV_N_S_1(u_0) = \alpha_1 \wedge DERIV_N_S, \quad \dots, \quad (18)$$

$$DERIV_P_S_9(u_0) = \alpha_9 \wedge DERIV_P_S;$$

3) производится композиция. Полученные нечеткие множества для u каждого правила, усеченные по высоте, объединяются вместе, формируя нечеткое множество управления

$$DERIV_{\Sigma}(u_0) = DERIV_N_S_1(u_0) \vee \dots \vee DERIV_P_S_9(u_0), \quad (19)$$

описывающееся также функцией принадлежности, $\mu_{\Sigma}(DERIV_{\Sigma})$;

4) осуществляется приведение к четкости и вычисляется числовое значение управления

$$u_0 = \frac{\int_{u_{\min}}^{u_{\max}} u \cdot \mu_{\Sigma}(DERIV_{\Sigma}) du}{\int_{u_{\min}}^{u_{\max}} \mu_{\Sigma}(DERIV_{\Sigma}) du}, \quad (20)$$

Где u_{\min} , u_{\max} – соответственно минимальное и максимальное значения определенные для управления u .

Особенности реализации и анализ качества работы систем

Принимая во внимание, что алгоритмы управления будут в конечном счете построены в виде управляющих программ для микроконтроллеров, при имитационном моделировании, как было отмечено ранее, необходимо не только учесть то, что формирователь управляющего воздействия это ШИМ (см. рис. 4 и [14]), но и то, что системы работают с определенным шагом дискретизации, который связан с частотой работы контроллера. Структура блока широтно-импульсной модуляции (ШИМ) представлена на рис. 5. Принцип работы блока: генератор импульсов (Pulse Generator) с заданной частотой f , зависящей от частоты контроллера, вырабатывает короткие импульсы единичной амплитуды. На вход x подается сигнал управления, модуль которого и определяет время длительности выходного импульса ШИМ, а полярность указывает на направление движения механизма («больше»/«меньше»). В момент прихода тактового импульса интеграторы сбрасывают свое состояние и загружаются начальным значением, считанным с управляющего входа (выход первого интегратора уменьшается, а второго увеличивается).

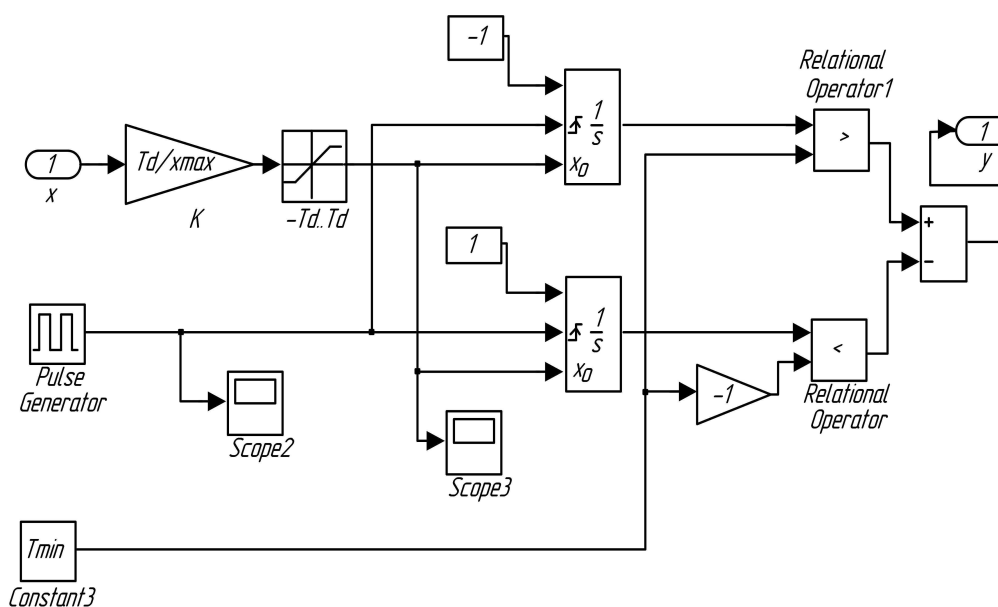


Рис. 5. Модель блока ШИМ в среде MatLab.

Блоки сравнения сравнивают выходы интеграторов с нулем (или минимальным временем импульса T_{min}), формируя единицы (истина) или нули (ложь) на своих выходах. На выходе y формируется результирующий импульс. Так, например, если интеграторы были загружены положительным начальным значением, то на выходе первого блока сравнения в течение заданного времени будет удерживаться единица, а на выходе второго – ноль в течение всего периода модуляции. Таким образом, импульс на выходе y будет иметь заданную длительность.

Учет ШИМ необходим для получения корректной модели системы, которая является гибридной. При моделировании контуры управления (4)-(20) были дискретизированы с помощью средств MatLab (функция `c2d`) с шагом дискретизации 0.4 сек., при этом были выбраны следующие значения настроек.

Адаптивный регулятор со стабилизирующим устройством (непрерывная модель) вида (4) – (6):

$$k_c = 0.9, \quad T_c = 300, \quad k_p = 10, \quad T_p = 10, \quad \alpha = 2, \quad \beta = 1, \quad \sigma = 0.27. \quad (21)$$

Система с эталонным упредителем (непрерывная модель) (7) – (15):

$$W_m(s) = \frac{4 \cdot 10^{-8}}{s^3 + 0.0011 \cdot s^2 + 3.8 \cdot 10^{-5} \cdot s + 4 \cdot 10^{-8}}, \quad (22)$$

$$W_\phi(s) = \frac{s^2 + 0.02 \cdot s + 0.0001}{s^2 + 0.02 \cdot s + 0.0001}, \quad D(s) = s^2 + 0.006 \cdot s + 0.000008,$$

с настройками контура адаптации

$$\alpha_{11} = 0.002, \quad \alpha_{12} = 0.005, \quad \alpha_{13} = 0.0001, \quad \alpha_2 = 0.00001, \quad \pi = 0.000001. \quad (23)$$

Системе с нечетким регулятором вида (16) – (20) соответствует рис. 4, при коэффициенте усиления по ошибке $e = 1$, а по производной от ошибки $de/dt = 2$.

Сравнение работы систем проводилось для всего уровня (2) априорной неопределенности объекта (1). Из всех исследуемых случаев моделирования выбраны два (см. рис. 6 и 7).

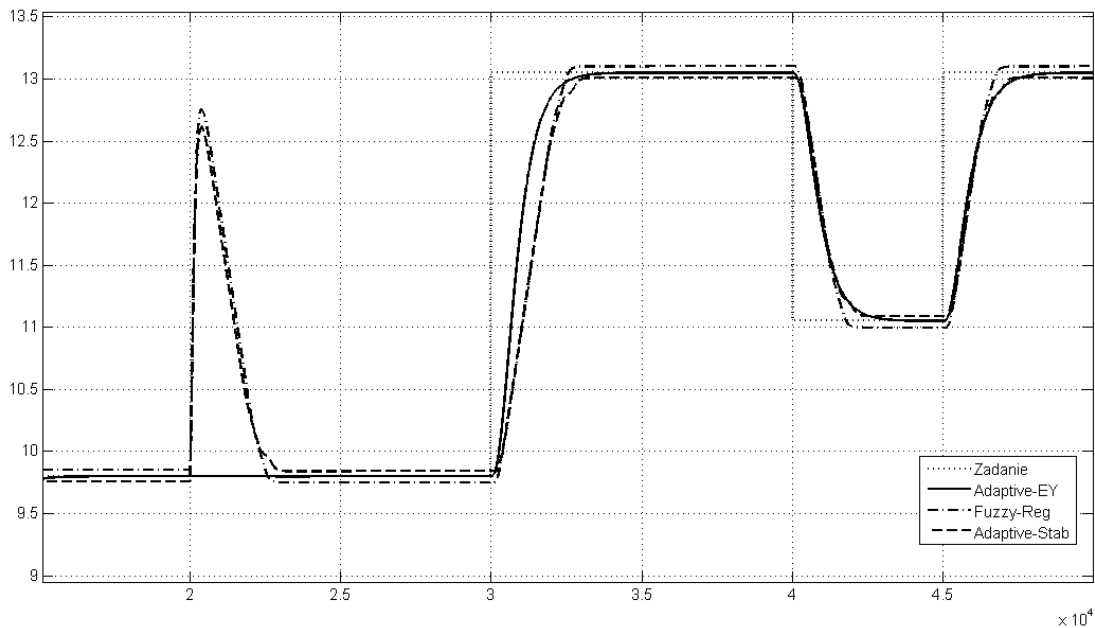


Рис. 6. Переходные процессы в системе при параметрах объекта:
 $k = 0.161; a_1 = 150; a_2 = 5000.4; \tau = 100.$

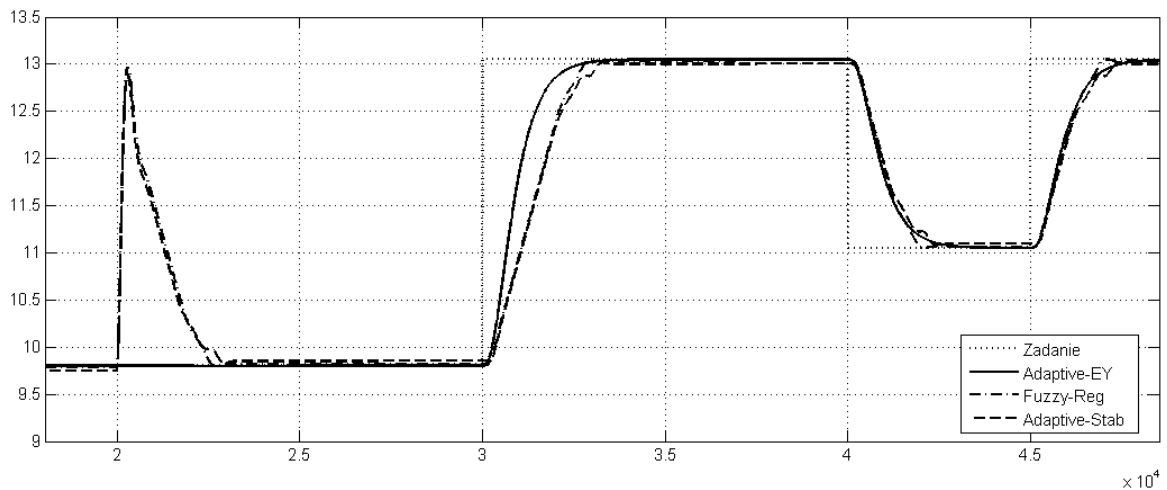


Рис. 7. Переходные процессы в системе при параметрах объекта:
 $k = 0.1412$; $a_1 = 87$; $a_2 = 7122$; $\tau = 103$.

Из представленных графиков видно, что при правильной настройке всех трех систем они примерно одинаково справляются с поставленной задачей как в базовом режиме работы, так и при изменении параметров объекта, подаче отклонений на объект. Заметим при этом, что такое исследование более эффективно использует преимущества адаптивных систем, тогда как нечеткое управление было бы эффективнее, если бы изменялась структура объекта или его математическое описание было бы невозможно получить.

Еще одним фактором, который необходимо учитывать при выборе того или иного подхода к управлению, является алгоритмическая сложность полученной в итоге программы. Рассмотрим вопрос реализуемости представленных выше решений на одном из распространенных типов контроллеров [15]. Принцип составления такой программы обсуждается в [12] и здесь не приводится; представлены лишь числовые значения, характеризующие сложность систем.

Адаптивный регулятор со стабилизирующим устройством. Реализация на ФАБЛ для контроллеров [15] обсуждалась в работе [12]. В данном случае нее необходимо 14 алгоблоков.

Система с эталонным упредителем. Структура программы для такой системы представлена в [12] и составляет 53 алгоблоков.

Система с нечетким регулятором. Такая система может быть составлена с учетом уравнений (16) – (20). Из-за ограниченности объема работы здесь такая структура не приводится. Однако без труда можно посчитать, что будет использовано:

5 алгоблоков на процедуру ввода и вывода данных в контроллер, фильтрацию и дифференцирование сигналов;

6 алгоблоков по заданию кусочной функции для правил по e и de ;

9 алгоблоков по нахождению минимума (отсечений);

9*11 алгоблоков по масштабированию (задание 9 расчетных точек для каждого из $3+3+5=11$ правил функций принадлежности для входов и выхода);

9*9 алгоблоков по нахождению минимума (формированию логического вывода для каждого из 9 правил и каждой из 9 точек);

9 алгоблоков по нахождению максимума (проведению композиции);

9 умножителей/делителей и 1 сумматор по нахождению четкого управления.

Видно, что для реализации нечеткой системы по самым минимальным подсчетам необходимо 219 алгоблока, а это почти четверть доступной памяти у самых мощных представителей из [15] и в четыре раза больше, чем требуется на адаптивную систему с упредителем.

Заметим, что схожий результат, с точки зрения затрат на реализацию и временные затраты на просчет алгоритма, можно получить и для большей части других промышленных контроллеров. При этом очевидно, что существуют решения, предлагаемые самими разработчиками систем, которые существенно снизят сложность реализации программы, – например, фаззи-регулятора [16]. Однако стоимость таких решений слишком велика, а эффективность не очевидна. Известно, что такие предложения касаются не только фаззи, но и классического, адаптивного и робастного подходов, а в настоящей работе ставилась задача сравнить эффективность реализации при прочих равных условиях.

Заключение

Преимущества и недостатки каждого из подходов – классического, адаптивного, нейро-нечеткого – хорошо известны.

Сравнительный анализ подходов к управлению априорно-неопределенными тепловыми объектами с запаздыванием при реализации систем на промышленных контроллерах представлен в табл. 1.

Таблица 1

Подход	Объект	Аппаратура	Примечание
Адаптивный регулятор со стабилизирующим устройством (4) – (6)	запаздывание может быть неизвестно; объект устойчивый	минимальная сложность	эффективен для простых задач стабилизации
Адаптивная система с эталонным упредителем (7) – (15)	запаздывание известно, объект может быть неустойчивым	средняя сложность	эффективна для сложных задач, для режима слежения
Система фаззи-управления (16) – (20)	требуется наличие эксперта/оценок	высокая сложность	используется для сложноформализуемых объектов

В целом, с учетом возможностей управляющей аппаратуры, для расстраиваемого класса объектов теплоэнергетики (априорно неопределенные, с медленной изменяющимися коэффициентами, структурно неизменные, обладающие запаздыванием и исполнительным механизмом постоянной скорости) в настоящее время более эффективно – применение адаптивного подхода. Рекомендации по применению современных подходов к управлению для различных вариантов реализации систем регулирования котлов и турбин представлены в табл. 2. Они составлены с учетом особенностей работы оборудования [1, 2] и исследований, проведенных как в настоящей работе, так и в [10 – 12], а также ориентированы в первую очередь на пылеугольные станции, работающие на общую паровую магистраль.

Заметим, что в табл. 2 представлены не все системы, а только основные, ко-

торых в общем случае на одном котле может быть несколько (разные ступени, газоходы, мельницы и т.п.).

Для некоторых из систем управления имеются другие решения [9 – 12], отличные от рекомендуемых, что является основанием к дальнейшему изучению данного вопроса.

Таблица 2

<i>Система управления</i>	<i>Отличительные особенности</i>	<i>Рекомендации</i>
Котлоагрегат и вспомогательное оборудование		
Главный регулятор	структура объекта меняется, имеются запаздывание и возмущения	нейро-нечеткий
Регулятор тепловой нагрузки	починенный режим работы, имеется запаздывание	адаптивный подход
Регулятор загрузки мельниц	подчиненный режима работы, аналоговое управление	адаптивный подход
Регулятор первичного воздуха	наличие возмущений и априорная неопределенность	адаптивный подход
Регулятор общего воздуха	имеется запаздывание, влияет на КПД	нейро-нечеткий подход
Регулятор разрежения	имеются нелинейность и нестационарность в динамике	робастный или адаптивный подход
Регулятор температуры за калорифером, температуры в мельнице, и т.п.	имеются запаздывание и изменение температуры в режиме работы	адаптивный подход
Регулятор питания котла	возмущения в динамике и астатический характер процесса	адаптивный или нечеткий подход
Регулятор температуры перегретого пара	наличие запаздывания и перекрестных связей	адаптивный или нечеткий подход
Турбоагрегат и вспомогательное оборудование		
Регулятор давления	быстрое изменение динамики, наличие нелинейности и нестационарности	робастный или адаптивный подход
Регулятор уровня	астатический характер объекта, действие возмущений	нечеткий или адаптивный подход

ЛИТЕРАТУРА

1. *Плетнев Г.П.* Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. –Изд. 4-е, стереотип. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007.
2. *Клюев А.С., Лебедев А.Т., Клюев С.А., Товарнов А.Г.* Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие / под ред. А. С. Клюева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. *Молодюк В.В., Исамухамедов Я.Ш., Баринов В.В.* Важная составляющая процесса формирования единой государственной технической политики в области создания и эксплуатации АСУ ТП ТЭС //Энергетик. – 2011. – №12. – С.33-36.
4. *Штейнберг Ш.Е., Серезин Л.П., Залуцкий И.Е., Варламов И.Г.* Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №7. – С.1-7.
5. *Astrom, K.J., Hagglund T.* Advanced PID control. – Research Triangle Park, NC: Instrum. Soc. Amer., 2006.
6. *Levine W.S.(ed)* The control handbook (second edition). Control system applications. – CRC Press,

2010. – NW: Taylor & Francis Group, 2011.
7. Методы классической и современной теории автоматического управления: В 5-ти т.; Изд. 2-е, перераб. и доп. – Т.5: Методы современной теории автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
 8. *Гостев В. И.* Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: Радиоаматор, 2008.
 9. *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.
 10. *Косицын В.Ю., Рыбалев А.Н., Теличенко Д.А.* Система управления тепловой нагрузкой котла // Теплоэнергетика. – 2013. – №2 – С.54-60.
 11. *Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Чепак Л.В.* Дискретно-непрерывная система адаптивного управления температурным режимом пароперегревателя // Информатика и системы управления. – 2004. – №1(7) – С.117-130.
 12. *Еремин Е.Л., Теличенко Д.А.* Адаптивное и робастное управление объектами теплоэнергетики. – Благовещенск : Амурский гос. ун-т, 2009.
 13. *Jantzen Jan.* Foundations of fuzzy control. – West Sussex: John Wiley & Sons, 2007.
 14. *Косицын В.Ю., Рыбалев А.Н., Теличенко Д.А.* Особенности моделирования систем регулирования с исполнительным механизмом постоянной скорости // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23: Сб. трудов XXIII Международ. науч. конф.: В 12 т. Т.10. Секция 11 /под общ. ред. В.С. Балакирева. – Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. – С.92-95.
 15. <http://volmag.ru/menuaboutcontroller/menutexхар> (дата обращения: 13.04.2013).
 11. <http://www.siemens.ru/iadt> (дата обращения: 13.04.2013).

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

E-mail:

Теличенко Денис Алексеевич – osa18@yandex.ru;

ICCAS 2013

2013 13th International Conference on Control, Automation and Systems

<http://2013.iccas.org>

Important Dates

April 12, 2013 : Submission of organized session proposals

April 30, 2013 : Submission of full papers (Extended!!)

June 14, 2013 : Notification of paper acceptance

July 19, 2013 : Submission of final camera-ready papers