

УДК 681.5

## Исследование эффективности адаптивных алгоритмов для настройки регуляторов в системах управления, подверженных влиянию случайных возмущений

А.М. Прохоренков<sup>1</sup>, Н.М. Качала<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Политехнический факультет МГТУ, кафедра автоматики и вычислительной техники

<sup>2</sup> Экономический факультет МГТУ, кафедра информационных систем и прикладной математики

**Аннотация.** В работе исследовалась эффективность использования адаптивной подсистемы для настройки различных структур регуляторов, осуществляющих компенсацию влияния возмущающих воздействий в контурах управления паровых котлов тепловой станции, вырабатывающей тепловую энергию на нужды теплоснабжения города.

**Abstract.** Application efficiency of adaptive subsystem for tuning various structures of regulators has been studied. These regulators provide compensation of disturbing factors' influence in control contours of steam boilers in a thermal power station producing thermal power for heat supply of a city.

**Ключевые слова:** адаптивное управление, регулятор, случайный процесс, паровой котел

**Key words:** adaptive control, regulator, random process, steam boiler

### 1. Введение

В настоящее время одним из основных направлений совершенствования систем автоматического управления (САУ) является повышение точности управления и стабилизации технологических параметров в достаточно узких пределах.

Обеспечение заданного качества управления является важной проблемой как при проектировании систем управления, так и при их промышленной эксплуатации. Проектирование систем управления технологическими объектами требует решения задач, связанных с разработкой структуры системы управления, оптимизирующей динамические и статические режимы работы объектов и реализующей законы управления относительно принятых критериев качества. Широко используемые методы расчета параметров регулятора по математической модели объекта, полученной при идентификации параметров модели в разомкнутой системе регулирования, дают только начальную настройку регуляторов. С целью обеспечения устойчивого функционирования систем управления с заданными показателями качества в процессе промышленной эксплуатации средств автоматизации возникает необходимость периодической перенастройки параметров регуляторов. Перенастройка регуляторов является следствием дрейфа параметров объекта управления, случайным характером возмущающих и управляющих воздействий, а также различными режимами работы объектов. Кроме того, в многомерных системах имеет место взаимное влияние контуров регулирования.

Несвоевременная настройка регуляторов в соответствии с эксплуатационной ситуацией на объекте управления приводит к экономическим потерям в промышленности и энергетике. В связи с этим возникает задача построения алгоритмов настройки регуляторов и исследования эффективности их использования при изменяющихся характеристиках объектов управления, случайных задающих и возмущающих воздействий.

В работе исследовалась эффективность использования регуляторов в контурах управления котлоагрегатом тепловой станции, вырабатывающей пар на нужды теплоснабжения города.

### 2. Обоснование выбора критерия и структуры системы оптимального управления

Случайный характер задающих и возмущающих воздействий, которым подвержены объекты, функционирующие в составе автоматизированных технологических процессов, требует реализации стратегии управления с учетом вероятностных характеристик измеряемых величин.

Качество работы любой системы управления определяется величиной ошибки, равной разности между заданным  $g(t)$  и текущим  $x(t)$  значениями регулируемой величины:

$$e(t) = g(t) - x(t). \quad (1)$$

Ошибка системы, определяемая формулой (1), является также случайной величиной. В подобных системах точность управления характеризуется математическим ожиданием квадрата ошибки (Основы..., 1968) и условие оптимальности системы записывается в виде:

$$\eta = M[e^2(t)] = \min. \quad (2)$$

Величина  $\eta$ , как начальный момент второго порядка ошибки системы, может быть выражена через математическое ожидание и дисперсию ошибки. Обобщением критерия (2) является критерий экстремума заданной функции математического ожидания и дисперсии ошибки (Основы..., 1968):

$$f(M(e), D(e)) = \text{extremum}. \quad (3)$$

В системах стабилизации параметров необходимо обеспечить регулирование по минимуму математического ожидания и дисперсии ошибки, а, следовательно, требуется обеспечить минимум функции (3). В этом случае математическое ожидание ошибки можно представить в следующем виде:

$$M[e(t)] = M[g'(t) - x(t)] = M[g(t) + \zeta(t)] - M[x(t)] = g(t) - M[x(t)] = M_3(t) - M_T(t), \quad (4)$$

где  $\zeta(t)$  – стационарная помеха с нулевым математическим ожиданием,  $g(t) = \text{const}$ ,  $M_3(t)$ ,  $M_T(t)$  – заданное и текущее значения математического ожидания регулируемого параметра.

Выражение (4) есть смещение регулируемого параметра по математическому ожиданию, которое должно стремиться к минимально допустимому значению:

$$\varepsilon_M(t) = M_3(t) - M_T(t) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Смещение регулируемого параметра по дисперсии определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\sigma^2}(t) = \sigma_3^2(t) - \sigma_T^2(t) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $\sigma_3^2(t)$ ,  $\sigma_T^2(t)$  – заданное и текущее значения дисперсии регулируемого параметра.

Принимая во внимание возможность оценки качества по величине смещения математического ожидания  $\varepsilon_M(t)$  и дисперсии  $\varepsilon_{\sigma^2}(t)$ , обеспечивающих достижение заданных показателей качества процесса управления (величина перерегулирования, время регулирования, коэффициент успокоения), будем минимизировать следующий функционал (Прохоренков и др., 1992):

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \varepsilon_{M_i}^2 + \varepsilon_{\sigma_i^2} \right) \rightarrow \min. \quad (7)$$

Сформулированный критерий качества позволяет осуществить структурный синтез системы управления, с помощью которой возможно реализовать автоматическую настройку параметров регуляторов, функционирующих в условиях случайных возмущений. Задачу структурного синтеза системы управления сформулируем следующим образом: для объекта, заданного своей математической моделью, найти управление  $u(t) = f(x(t), g(t), V(t))$  как функцию от величины задания  $g(t)$ , регулируемой величины  $x(t)$  и возмущения  $V(t)$ , обеспечивающее движение замкнутой системы в соответствии с критерием качества (7).

В общем случае объект характеризуется структурной и параметрической неопределенностью. При априори заданной модели объекта управления имеет место только непараметрическая неопределенность. Обозначим за  $p$  множество параметров модели. Тогда параметрическую неопределенность зададим в виде совокупности соотношений:

$$p_i \leq p_i \leq p_i^+, \quad i = i, m,$$

где верхние индексы (+) и (-) – значения границ параметра  $p_i$  объекта. Границы значений параметров определяют допустимое множество  $\theta$  возможных состояний объекта управления. В любой момент времени объект управления описывается вектором неизвестных значений параметров  $\xi \in \theta$ , влияющих на поведение объекта в динамике. Кроме того, на поведение объекта в динамике влияют измеряемые возмущения  $r = r(t)$ , неизмеряемые возмущения  $\varphi = \varphi(t)$  и управляющее воздействие  $u = u(t)$ .

В условиях действия заранее неизвестных случайных возмущающих воздействий и изменяющихся с течением времени характеристик объекта для достижения цели управления САУ должна быть в классе адаптивных.

Таким образом, возникает задача разработки с учетом принятых выше допущений адаптивного алгоритма управления, который использует измеряемые величины, и для любого  $\xi \in \theta$  обеспечивает достижение заданной цели управления. Задача управления состоит в обеспечении с заданной точностью, согласно (5) и (6), значений регулируемой величины.

Предлагаемая структура системы управления входит в класс адаптивных самонастраивающихся систем. Контур самонастройки является замкнутым. Самонастройка производится по результатам измерения регулируемой величины  $x(t)$ , вспомогательной регулируемой величины  $z(t)$ , возмущающего воздействия  $r(t)$  и задающего воздействия  $g(t)$  (рис. 1).

Введение вспомогательной регулируемой величины  $z(t)$  обусловлено особенностями технологического процесса выработки пара. Информация о вспомогательных регулируемых величинах используется в ряде контуров управления котлоагрегатом. Так, например, в системе регулирования уровня в барабане котла такой величиной является расход питательной воды  $G_{пв}(t)$ . Назначение сигнала о расходе воды состоит в устранении влияния возмущений, идущих со стороны питательного клапана и

обусловленных изменением давления воды в питательной магистрали. В качестве второго примера можно привести систему регулирования температуры перегретого пара, в которой вспомогательной регулируемой величиной является температура пара за пароохладителем.

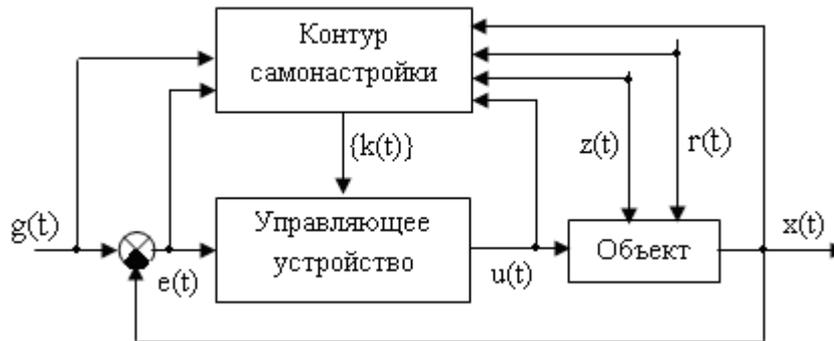


Рис. 1. Общая структура системы управления

Управляющее устройство состоит из регулятора, который при известном  $\xi \in \theta$  обеспечивает достижение цели управления. Контур самонастройки настраивает вектор параметров  $\{k(t)\}$  регулятора при изменении ситуации на объекте управления при неизвестных возмущениях параметров объекта  $\xi \in \theta$ .

Самонастройка выполняется путем анализа естественного хода процесса управления и поиска экстремального значения показателя качества (7).

### 3. Моделирование системы управления питания котла

В качестве примера на рис. 2 приведены графики изменения паровой нагрузки котла, расхода питательной воды и уровня воды в барабане парового котла, которые иллюстрируют случайный характер отмеченных выше процессов, а, следовательно, подтверждают необходимость управления процессами с учетом их вероятностных характеристик.

Для проверки работоспособности предложенного подхода при решении задачи регулирования уровня воды была разработана модель системы в среде MATLAB 6.5 с помощью средств Simulink. С целью учета взаимовлияния контуров регулирования в модель был включен также контур регулирования давления в котле. Структурная схема моделируемой системы управления представлена на рис. 3.

Разработанная модель использовалась для исследования эффективности функционирования различных типов регуляторов по одноимпульсной, двухимпульсной и трехимпульсной схеме подключения. В одноимпульсной схеме регулирование уровня выполняется по отклонению уровня от заданного значения. В двухимпульсной схеме используется информация по отклонению уровня в барабане котла и по отбору пара из него. В трехимпульсной схеме регулирование осуществляется по отклонению уровня, по возмущению отбором пара и по изменению расхода питательной воды.

В блоке вычислений (рис. 3) реализуются алгоритмы вычисления таких показателей качества управления, как величина перерегулирования, время регулирования, коэффициент успокоения, а также вычисления по формулам (5-7) и расчет коэффициентов настройки регуляторов.

В работе выполнено моделирование системы управления с типовыми ПИ- и ПИД-регуляторами, нечеткими регуляторами, а также нейрорегулятором.

Исследовалась эффективность использования двух структур нечетких регуляторов. В одной из них моделировался алгоритм нечеткого управления, в котором принималась совокупность управляющих правил вида (Прохоренков и др., 2006):

$$P_i: \text{Если } V_i, \text{ то } U_i, i = 1, \dots, n,$$

описывающих процесс управления, где  $V_i$  – составное высказывание, задающее лингвистические значения входных переменных, а  $U_i$  – простое высказывание, задающее в качестве управляющего воздействия один из термов выходной лингвистической переменной. По указанному принципу построено два регулятора. Первый из них имеет базу из трех правил:

- if (level is okay) then (valve is no change);
- if (level is low) then (valve is open fast);
- if (level is high) then (valve is close fast).

Во втором нечетком регуляторе база состоит из пяти правил:

- if (level is okay) then (valve is no change);
- if (level is low) then (valve is open fast);
- if (level is high) then (valve is close fast);
- if (level is okay) and (rate is positive) then (valve is close slow);
- if (level is okay) and (rate is negative) then (valve is open slow).

Функции принадлежности входных переменных – гауссовские, выходной переменной – треугольные. В качестве алгоритма нечеткого вывода используется алгоритм Mamdani.

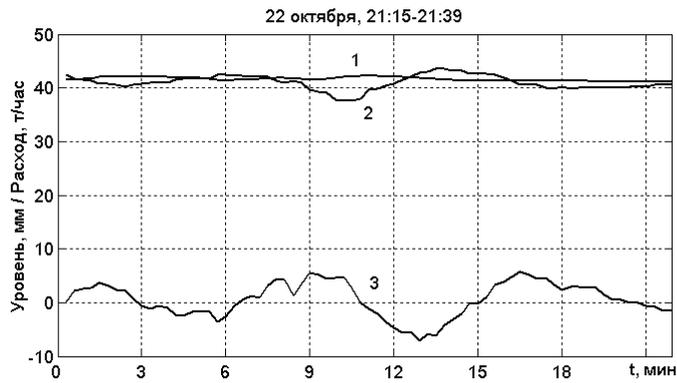


Рис. 2. Тренды измеряемых параметров объекта управления: 1 – расход пара, 2 – расход воды, 3 – уровень воды в барабане котла

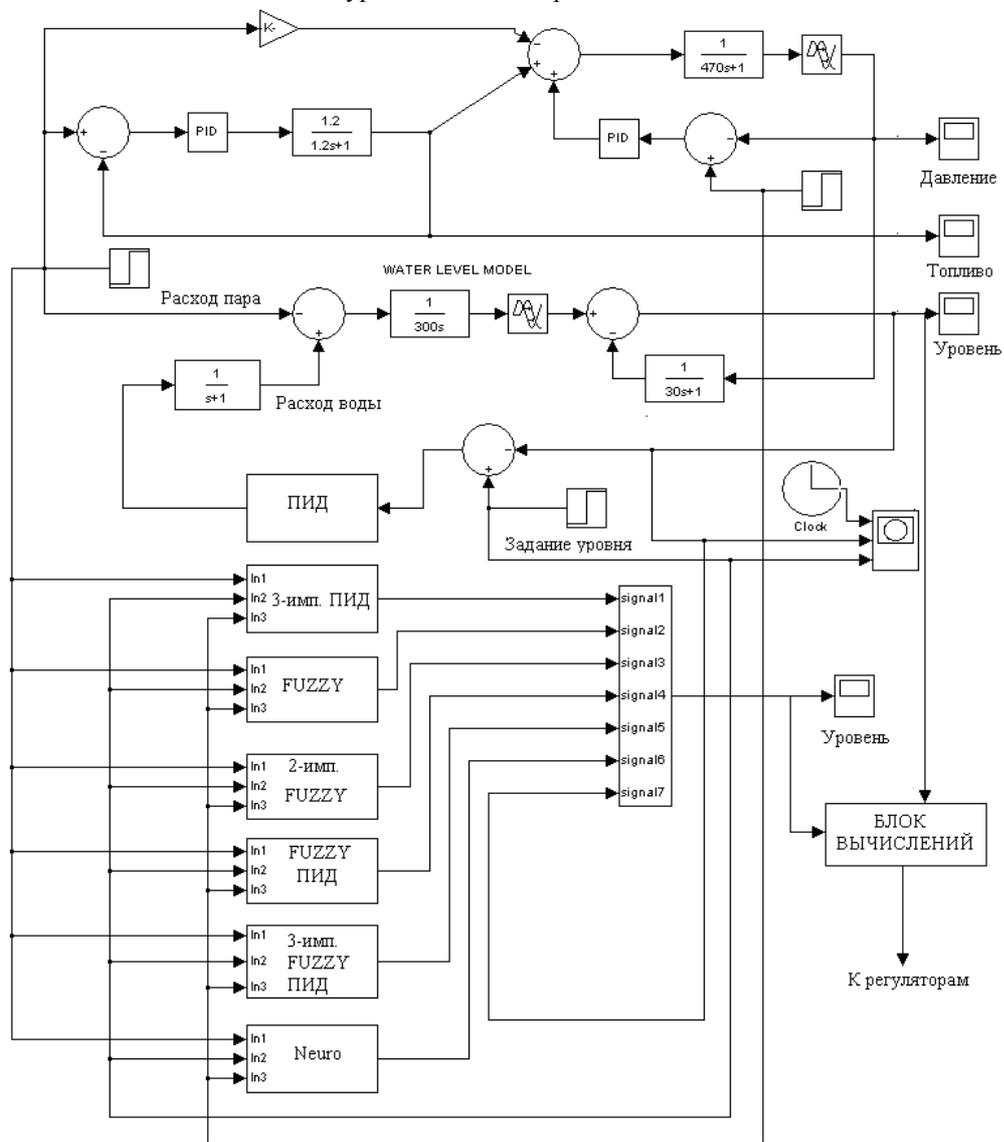


Рис. 3. Структурная схема САУ

В другой структуре реализован алгоритм нечеткой настройки коэффициентов ПИД-регулятора. Передаточная функция классического ПИД регулятора имеет вид:

$$W_{\text{рег}} = K_p e(t)dt + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt},$$

здесь  $K_p$  – коэффициент передачи регулятора,  $T_i$  – постоянная времени интегрирования,  $T_d$  – постоянная времени дифференцирования. База правил системы нечеткого вывода состоит из трех правил:

если модуль сигнала рассогласования "малый", то ( $K_p$  "малый") и ( $T_i$  "большой") и ( $T_d$  "малый");

если модуль сигнала рассогласования "средний", то ( $K_p$  "средний") и ( $T_i$  "средний") и ( $T_d$  "средний");

если модуль сигнала рассогласования "большой", то ( $K_p$  "большой") и ( $T_i$  "малый") и ( $T_d$  "большой").

Функции принадлежности входных и выходных переменных – гауссовские. В качестве алгоритма нечеткого вывода используется алгоритм Mamdani.

С целью сравнительной оценки качества управления различных структур регуляторов был использован нейросетевой контроллер Model Reference Control, находящийся в библиотеке инструментов пакета MATLAB. Этот блок позволяет моделировать супервизорный режим работы многослойной нейросети в составе системы с динамическим объектом, заданным уравнениями состояния. Контроллер представляет собой структуру, которая включает две многослойные нейронные сети: управляющую и идентификационную. Каждая сеть блока содержит один скрытый слой, количество нейронов в котором выбирается в зависимости от сложности задачи управления (Медведев, Потемкин, 2002).

Результаты моделирования исследуемой системы для отмеченных выше структур регуляторов при возмущении расходом пара приведены на рис. 4.

Анализ представленных графиков (рис. 4) показал, что при возмущении объекта управления отбором (расходом) пара в системе с нечетким регулятором с пятью правилами (кривая 6) имеет место аperiodический переходный процесс и при этом обеспечивается наименьшее время регулирования  $t_p = 200$  с. Переходный процесс в системе управления с одноимпульсным регулятором, реализующим нечеткий алгоритм настройки коэффициентов (кривая 3), является колебательным. Коэффициент успокоения переходной характеристики  $k_p = 0,77$  и время регулирования  $t_p = 600$  с. В схеме регулирования с одноимпульсным ПИД-регулятором переходный процесс колебательный с временем регулирования  $t_p = 1200$  с. Трехимпульсные ПИД-регуляторы – классический и с алгоритмом нечеткой настройки коэффициентов – обеспечивают одинаковый аperiodический переходный процесс с временем регулирования  $t_p = 1200$  с. Качество управления в целом хуже в схемах с трехимпульсными регуляторами. Это объясняется переходным и передаточным запаздываниями между каналами расхода воды и расхода пара.

Кривые переходных процессов, характеризующие изменение регулируемой величины при формировании нового значения задающего воздействия для различных моделируемых структур регуляторов, представлены на рис. 5.

По результатам моделирования можно сделать ряд выводов. Качество работы САУ (кривая 7) с нейроконтроллером выше по сравнению с использованием других структур регуляторов. При этом следует отметить значительное время обучения нейроконтроллера и сложность его реализации. Переходный процесс с одноимпульсными ПИД-регуляторами, как и в ранее рассмотренном режиме работы, является колебательным. Время регулирования меньше в случае использования алгоритма нечеткой настройки коэффициентов одноимпульсного регулятора. В системах управления с трехимпульсными ПИД-регуляторами имеет место аperiodический переходный процесс и при этом также время регулирования меньше при нечеткой настройке коэффициентов регулятора.

#### 4. Заключение

Случайный характер процессов, имеющих место в системах управления технологическими процессами, требует реализации стратегии управления с учетом вероятностных характеристик измеряемых величин.

Наиболее широкое применение в промышленности и энергетике нашли ПИД-регуляторы. Настройка регуляторов является необходимым условием удовлетворительного функционирования систем управления. Все известные методы настройки регуляторов требуют априорной информации о свойствах регулируемого объекта. По причине отличия условий функционирования ПИД-регуляторов от принятых при их проектировании необходимо выполнять настройку коэффициентов регуляторов в соответствии с эксплуатационной ситуацией на объекте управления. Применение алгоритма нечеткой настройки коэффициентов ПИД-регуляторов показало улучшение качества переходных процессов.

Несмотря на полученные результаты моделирования, нельзя однозначно утверждать о преимуществе нечетких регуляторов перед классическими регуляторами. При синтезе нечетких регуляторов существуют проблемы с оценкой изменения диапазона базовых переменных, выбором

количества термов входных и выходных переменных, а также выбором вида функций принадлежности. Основной недостаток заключается в том, что нельзя описать все возможные ситуации и включить их в базу правил, поэтому система с нечетким регулятором может иметь гораздо худшие характеристики, чем при регулировании классическими регуляторами.

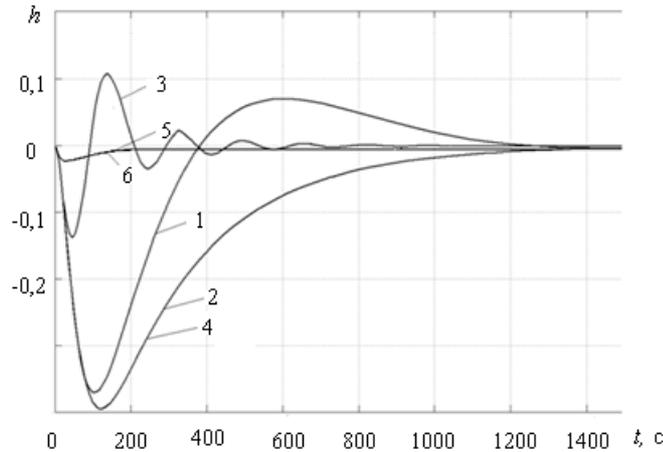


Рис. 4. Графики изменения уровня воды при возмущении расходом пара для различных структур регуляторов: 1 – одноимпульсный ПИД-регулятор; 2 – трехимпульсный ПИД-регулятор; 3 – одноимпульсный ПИД-регулятор с нечеткой настройкой коэффициентов; 4 – нечеткий ПИД-регулятор трехимпульсный; 5 – нечеткий регулятор одноимпульсный с тремя правилами; 6 – нечеткий регулятор двухимпульсный с пятью правилами

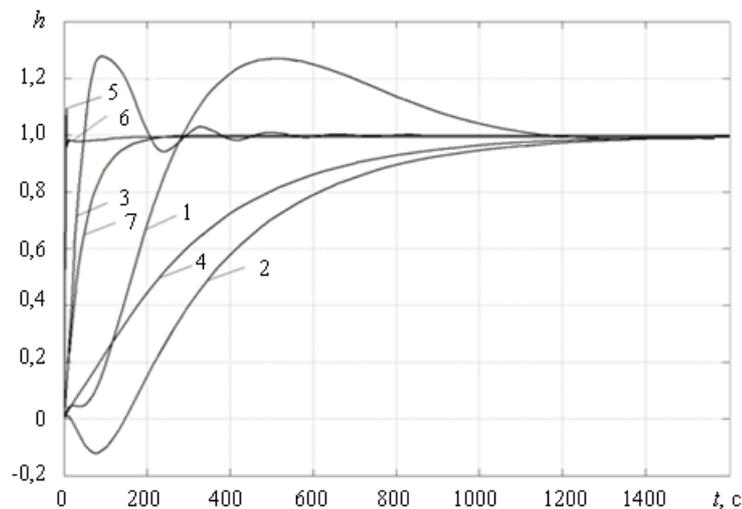


Рис. 5. Графики изменения уровня воды при формировании нового значения задающего воздействия для различных структур регуляторов: 1 – одноимпульсный ПИД-регулятор; 2 – трехимпульсный ПИД-регулятор; 3 – одноимпульсный ПИД-регулятор с нечеткой настройкой коэффициентов; 4 – трехимпульсный ПИД-регулятор с нечеткой настройкой коэффициентов; 5 – нечеткий регулятор одноимпульсный с тремя правилами; 6 – нечеткий регулятор двухимпульсный с пятью правилами; 7 – одноимпульсный нейрорегулятор

Нейроконтроллеры обеспечивают хорошие показатели качества регулирования. Этот тип регуляторов нельзя рекомендовать к применению в САУ с быстроизменяющимися режимами, так как время обучения нейроконтроллеров значительное. Нейроконтроллеры более сложны для реализации, чем традиционные регуляторы.

#### Литература

Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. Matlab 6. М., ДИАЛОГ-МИФИ, 496 с., 2002.  
 Основы автоматического управления. Под ред. В.С. Пугачева. М., Наука, 680 с., 1968.  
 Прохоренков А.М., Солодов В.С., Татьянченко Ю.Г. Судовая автоматика. М., Колос, 448 с., 1992.  
 Прохоренков А.М., Глухих В.Г., Совлуков А.С. Управление качеством горения контура котлоагрегата с помощью нечетких регуляторов. Вестник ЧГТУ, Спецвыпуск – Черкассы, ЧГТУ, с.228-230, 2006.