

УДК 681.5

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ
УРОВНЯ В БАРАБАНЕ ПАРОВОГО КОТЛА**

Р.А. Зражевский, В.И. Коновалов, В.В. Курганов,
Д.Г. Бурмантов

Томский политехнический университет
E-mail: vk@aics.ru

**Зражевский Роман Алексан-
дрович**, магистрант кафедры
автоматики и компьютерных
систем Института кибернетики
ТПУ.

E-mail: zrazhevskiy.roman@
sibmail.com

Область научных интересов:
имитационное моделирование
систем автоматического
управления.

Коновалов Виктор Ива-нович,
канд. техн. наук, доцент
кафедры автоматки и
компьютерных систем
Института кибернетики ТПУ.

E-mail: vk@aics.ru

Область научных интересов:
управление технологическими
процессами, идентификация
систем, алгоритмы обработки
информации.

**Курганов Василий Василь-
евич**, канд. техн. наук, доцент
кафедры автоматки и
компьютерных систем
Института кибернетики ТПУ.

E-mail: akko@aics.ru

Область научных интересов:
управление технологическими
процессами, отказоустойчивые
системы.

**Бурмантов Дмитрий Генна-
дьевич**, с.н.с. кафедры авто-
матики и компьютерных систем
Института кибернетики ТПУ,
главный инженер проектов ОАО
«НТК АККО».

E-mail: bd@aics.ru

Область научных интересов:
системы передачи информации,
программное и техническое
обеспечение АСУ ТП.

Путем моделирования сравнивается качество функционирования цифровых регуляторов двух типов. Первый построен на базе функциональных блоков и реализует пропорционально-дифференциальный в квадрате – закон регулирования, второй использует пропорционально-интегрально-дифференциальный – закон в цифровой форме. Параметром регулирования является уровень в барабане парового котла. Исполнительный механизм – клапан, управляемый реверсивным электродвигателем.

Ключевые слова:

Автоматическое регулирование, цифровые регуляторы, показатели качества.

Keywords:

Automatic control, digital regulators, quality indices.

Нормальная эксплуатация энергоустановок требует достаточно точного поддержания технологических параметров, что зависит от качества работы автоматических регуляторов, применяемых в системах автоматического регулирования (САР), выполняющих эту задачу. Несомненно, важным фактором при проектировании САР является выбор и настройка автоматических регуляторов. В связи с этим, актуальным является создание математических моделей технологических объектов управления, пригодных для синтеза и настройки автоматических регуляторов.

В данной статье рассматривается влияние типа и структуры автоматического регулятора на качество управления технологическим процессом.

В промышленности распространены 2 типа САР. Первый использует в качестве исполнительного органа клапан, который открывается (либо закрывается) пропорционально управляющему сигналу, выдаваемому системой управления. Если пренебречь некоторой инерционностью клапана, при моделировании можно заменить его некоторым

масштабирующим коэффициентом, устанавливающим соответствие между выходом алгоритма регулирования и управляющим потоком, проходящим через клапан в соответствии с его текущим положением.

Второй вариант – использование в качестве исполнительных органов клапанов, управляемых реверсивными электродвигателями, например, механизмом электрическим

однооборотным (МЭО). В этом случае управляющий сигнал от системы управления будет импульсом, направленным на открытие или закрытие клапана с помощью МЭО. Такими исполнительными механизмами удобно и просто управлять вручную – путем нажатия кнопки «закрыть» или «открыть». Время, в течение которого нажата кнопка, соответствует времени работы электродвигателя и движению штока клапана в направлении «открыть» или «закрыть». Точность исполнения команды от алгоритма регулирования в этом случае ниже, чем при использовании непрерывной САУ. Но эта система более устойчива – при отключении алгоритма регулирования ничего не происходит, система остается в том же состоянии, в каком была до этого.

Далее будем рассматривать варианты построения САР на основе импульсного регулятора. В качестве объекта управления используется паровой котел, и основным технологическим параметром регулирования является уровень пароводяной смеси в его барабане. Общая структурная схема системы представлена на рис. 1.

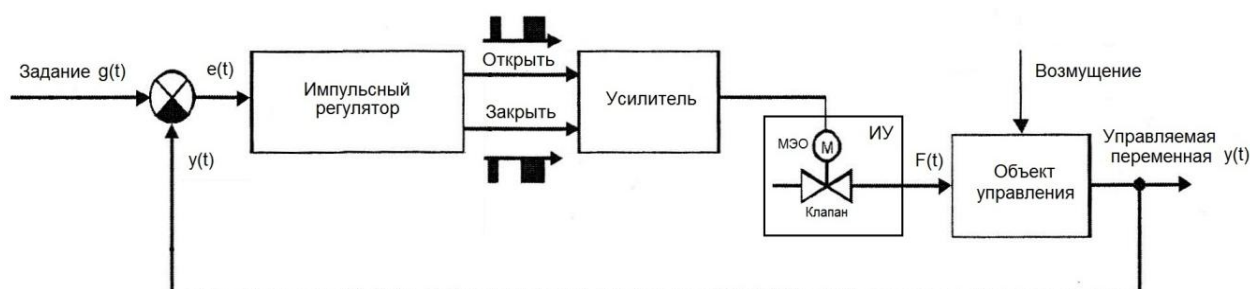


Рис. 1. Структурная схема САР на основе импульсного регулятора

Модель объекта управления учитывает эффект «вскипания уровня»: увеличение потока питательной воды приводит сначала к понижению уровня пара, а затем уровень постепенно повышается [1, 2]. Следовательно, передаточная функция по каналу управления уровнем за счет расхода питательной воды имеет вид:

$$W_{\text{ОУ}}(p) = \frac{1 + (T_2 - kT_1)p}{T_1 p(T_2 p + 1)},$$

где T_1, T_2 и k определяют по графику зависимости уровня пара от расхода питательной воды конкретного парового котла; p – оператор дифференцирования. В САР используется исполнительный механизм типа МЭО. Передаточная функция исполнительного механизма

$$W_{\text{Исп}}(p) = \frac{1}{T_M p},$$

где T_M – электромеханическая постоянная времени, равная времени полного движения исполнительного механизма, от положения «закрыто» до положения «открыто полностью».

Исполнительный механизм, таким образом, с точки зрения теории автоматического регулирования, является идеальным интегрирующим звеном.

Рассмотрим первый вариант построения цифровой САР, структурная схема которой представлена на рис. 2.

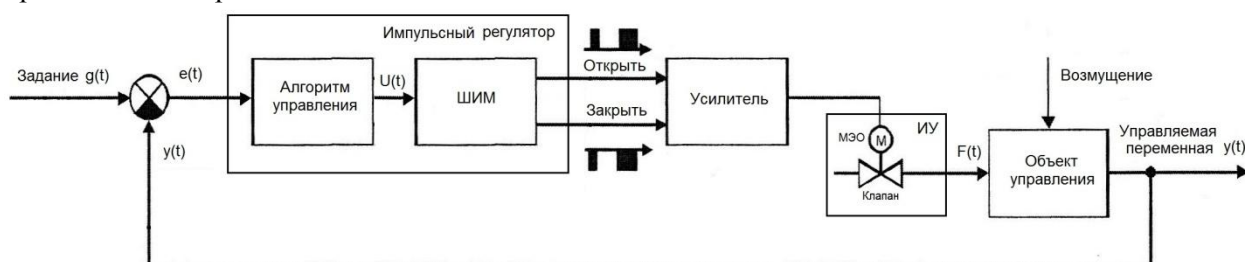


Рис. 2. Структурная схема первого варианта цифровой САР

В данной системе используется импульсный регулятор, состоящий из блока формирования управляющего сигнала и блока широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Следовательно, управляющий сигнал, поступающий на исполнительное устройство (ИУ), представляет собой последовательность импульсов.

Пусть в качестве алгоритма в системе управления используется обычный пропорционально-интегрально-дифференциальный алгоритм (ПИД-алгоритм). Тогда управляющий сигнал на выходе алгоритма будет таким (в операторной форме):

$$U(t) = K_{\Pi} (e(t) + \frac{1}{T_{\text{И}} p} e(t) + T_{\text{Д}} p e(t)),$$

где $e(t) = g(t) - y(t)$, $p = d/dt$ (оператор дифференцирования), K_{Π} – коэффициент пропорциональности регулятора, $T_{\text{И}}$ – постоянная интегрирования, $T_{\text{Д}}$ – постоянная дифференцирования, $e(t)$ – ошибка рассогласования, $g(t)$ – задающее воздействие, $y(t)$ – регулируемая переменная.

Учтем передаточную функцию исполнительного механизма. В итоге на объект действует следующее управление:

$$U(t) = K_{\Pi} (e(t) + \frac{1}{T_{\text{И}} p} e(t) + T_{\text{Д}} p e(t)) \frac{1}{T_{\text{М}} p} = \frac{K_{\Pi}}{T_{\text{М}}} (\frac{e(t)}{p} + \frac{1}{T_{\text{И}} p^2} e(t) + T_{\text{Д}} e(t)).$$

Получили, что регулятор содержит: И – составляющую, И^2 – составляющую и П – составляющую, т. е. это уже не система с ПИД-регулятором. Поэтому в составе программного обеспечения промышленных контроллеров при импульсном регулировании вместо ПИД-алгоритма используется пропорционально-дифференциальный в квадрате алгоритм (ПДД²-алгоритм) (например, контроллер Р-130 производства ЗЭИМ, г. Чебоксары, Россия). Для ПДД²-алгоритма:

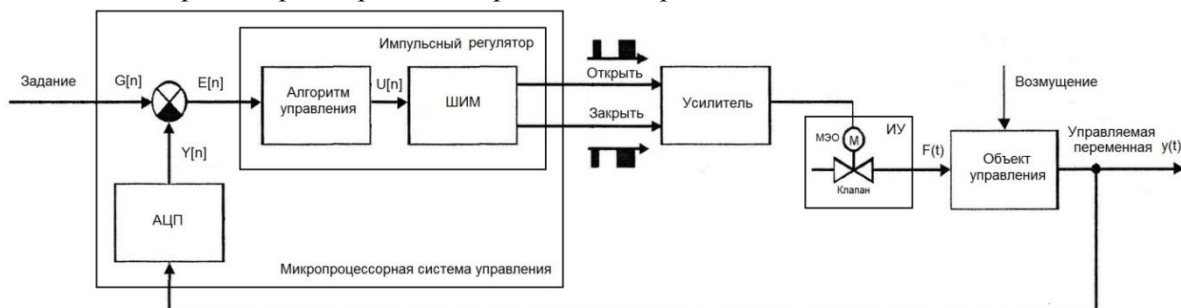
$$U(t) = K_{\Pi} (p e(t) + \frac{1}{T_{\text{И}}} e(t) + T_{\text{Д}} p^2 e(t)) T_{\text{М}}.$$

Как видно из вышеприведенной формулы, при настройке алгоритма используется электромеханическая постоянная $T_{\text{М}}$. Учтем снова передаточную функцию исполнительного механизма:

$$U(t) = K_{\Pi} (p e(t) + \frac{1}{T_{\text{И}}} e(t) + T_{\text{Д}} p^2 e(t)) T_{\text{М}} \cdot \frac{1}{T_{\text{М}} p} = K_{\Pi} (e(t) + \frac{1}{T_{\text{И}} p} e(t) + T_{\text{Д}} p e(t)).$$

Как видно, получили ПИД-регулятор, что и требовалось выяснить. Таким образом, в разработанной модели используется ПДД²-алгоритм формирования управляющего сигнала.

Рассмотрим второй вариант построения САР, рис. 3.

**Рис. 3.** Структурная схема второго варианта цифровой САР

В данной модели импульсный регулятор построен по принципу построения регуляторов на базе программно-логических контроллеров, когда при программировании используются

разностные уравнения и не используются язык функциональных блоков, модели которых описаны на языке непрерывной математики (в форме передаточных функций).

Для цифровой системы значение управления $u[n]$ на n -ом такте времени на выходе ПИД-алгоритма определится следующим выражением [3]:

$$u[n] = K_{\Pi} \left(e[n] + \frac{1}{T_{\text{И}}} \sum_{i=1}^{n-1} e[i] \Delta t + T_{\text{Д}} \frac{e[n] - e[n-1]}{\Delta t} \right).$$

Здесь Δt – интервал дискретизации.

Приведенную выше формулу нельзя напрямую использовать при программировании из-за наличия суммы. Поэтому всегда применяют рекуррентную формулу:

$$u[n] = u[n-1] + \Delta u[n].$$

Здесь $\Delta u[n]$ – приращение управления на n -ом шаге:

$$\Delta u[n] = ae[n] + be[n-1] + de[n-2]. \quad (1)$$

Коэффициенты разностного уравнения a , b , d зависят от настроечных параметров регулятора K_{Π} , $T_{\text{И}}$, $T_{\text{Д}}$ и интервала дискретизации Δt . Интервал дискретизации может задаваться отдельно для расчета задачи автоматического регулирования и не совпадать с тактом работы цифрового контроллера.

Выходной переменной алгоритма регулирования будет длительность импульса $T_{\text{ВЫХ}}$:

$$T_{\text{ВЫХ}}[n] = T_{\text{ШИМ}} \Delta u[n] \frac{1}{|\Delta u[n]_{\text{max}}|}. \quad (2)$$

Для применения данной формулы при импульсном регулировании необходимо задать наибольшее приращение $\Delta u[n]_{\text{max}}$, которое будет соответствовать максимальной длительности импульса на выходе системы управления $T_{\text{ШИМ}}$, (максимальной длительности импульса на выходе широтно-импульсного модулятора).

Значение $\Delta u[n]$ может быть получено как со знаком «плюс», так и со знаком «минус». Соответственно, $T_{\text{ВЫХ}}$ также может иметь разные знаки. Плюс будет соответствовать открытию клапана, минус – его закрытию.

Для качественного регулирования с применением формул (1, 2) необходимо либо уменьшать значение $T_{\text{ШИМ}}$, либо увеличивать значение $\Delta u[n]_{\text{max}}$. Исследование влияния этих параметров на качество регулирования и выбор наилучшего соотношения между ними выходит за рамки данной статьи.

Имитационное моделирование было проведено с помощью пакета прикладных программ MatLAB [4]. Моделирование должно было дать ответ на следующий вопрос: насколько сильно будут отличаться переходные процессы в случае, если один регулятор выполнен на функциональных блоках и представляет собой ПДД²-алгоритм, а другой основан на использовании разностного уравнения для ПИД-закона регулирования и ШИМ-преобразователя. Регулируемым параметром являлся уровень в барабане парового котла, управляющим воздействием – расход воды на его подпитку. Графики переходных процессов, соответствующих лучшим настроечным параметрам регуляторов для каждого из вариантов построения цифровых САР представлены на рис. 4.

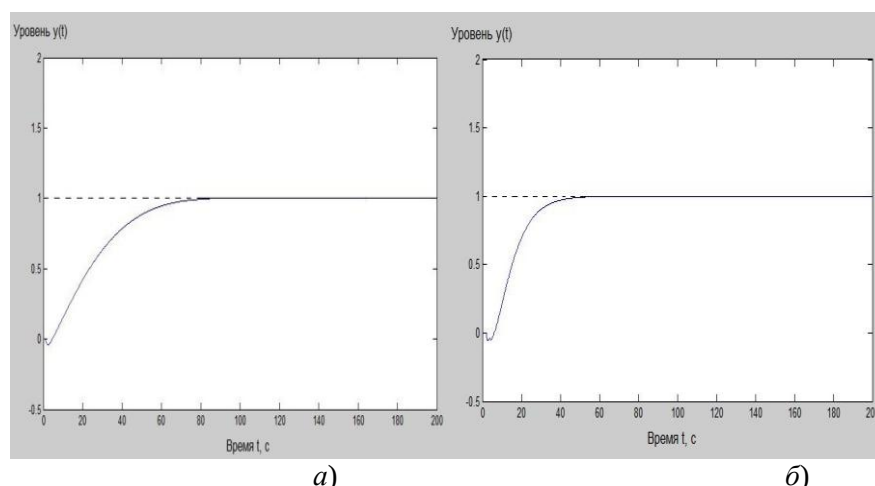


Рис. 4. Переходные процессы для САР, использующей ПДД²-регулятор (а) и использующей ПИД-регулятор в форме разностного уравнения (б)

Сравнение переходных процессов при лучших настройках регуляторов приведено в таблице.

Таблица. Показатели качества регулирования

Вариант САР	Параметры настройки регулятора	Показатели качества регулирования	
		Время регулирования, с	Перерегулирование, %
1	$K_p=0,835$, $T_i=35,5$, $T_d=0,0004$	61,20	0,5
2	$K_p=14,09$, $T_i=1,29$, $T_d=0,00355$	35,72	0

Выводы

В результате имитационного моделирования показано, что цифровая система регулирования с электрическим исполнительным однооборотным механизмом может быть построена либо с использованием ПДД²-алгоритма, либо с применением ПИД-алгоритма в форме разностного уравнения. Показатели переходных процессов применительно к выбранному в работе реальному промышленному объекту управления отличаются не существенно и вполне удовлетворяют требованиям к качеству САР. В то же время настроечные параметры систем отличаются весьма существенно. С практической точки зрения моделирование показало возможность использования простых промышленных контроллеров, не имеющих в составе программного обеспечения функциональных блоков импульсного регулирования, для управления объектами, в которых используются электрические однооборотные механизмы в качестве исполнительных органов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплотехническими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
2. Ключев А.С., Товарнов А.Г. Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. – М.: Энергия, 1970. – 280 с.
3. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2005. – V. 13. – № 4. – P. 559–576.
4. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.

Поступила 28.09.2011 г.