

УДК 681.51

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ АДАПТИВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ

А.А. Сидорова, А.М. Малышенко

Томский политехнический университет
E-mail: sidorova@tpu.ru

Предположено, что автоматически настраивающийся адаптивный ПИД-регулятор промышленного назначения, разработанный в Институте проблем управления РАН, г. Москва, может быть использован при управлении динамическими процессами с изменяющимися параметрами и подверженными воздействию неконтролируемых возмущений. Установлено, что ошибка адаптации ПИД-регулятора к изменениям параметров объектов при функционировании системы управления варьируется в пределах 10 %. Сделан вывод об эффективности использования данного метода адаптивной настройки.

Ключевые слова:

Анализ, ПИД-регулятор, объект управления, адаптивная настройка, коэффициент, передаточная функция, переходный процесс.

Key words:

Analysis, PID-controller, control object, adaptive tuning, parameter, transfer function, transient.

Трудно представить любое современное производство без использования систем автоматизации и промышленных регуляторов. В настоящее время наиболее часто встречающимся регулятором на технологическом производстве является пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор). Существует достаточно методик настройки ПИД-регулятора на технологический процесс, однако, традиционный метод ПИД-регулирования не может обеспечить приемлемое качество управления при меняющихся характеристиках сырья и материалов, дефиците обслуживающего персонала и среднем качестве используемого оборудования [1]. Поэтому возникает потребность в разработке новых алгоритмов адаптивных ПИД-регуляторов.

Анализ литературных источников показывает, что проблема адаптивного регулирования привлекает все большее внимание не только у отечественных и зарубежных специалистов, разработчиков средств и систем автоматизации, но и у потребителей этих средств и систем на промышленных предприятиях [2].

Данную проблему могли бы решить надежные адаптивные автоматически настраивающиеся ПИД-регуляторы, обеспечивающие качественную работу контуров регулирования при изменениях в динамике объекта без вмешательства и контроля со стороны обслуживающего персонала.

Исследуемый метод настройки положен в основу автоматически настраивающегося адаптивного промышленного регулятора (АНАП-регулятора), синтезированного на основе ПИД-закона регулирования для управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности. Внешний вид и технические характеристики устройства представлены в [3].

Исследуемый АНАП-регулятор работает в одном из трех режимов [4]:

- в разомкнутом контуре регулирования с целью получения начальной автоматической настройки его параметров подачей на вход объекта ступенчатого управляющего воздействия;
- в замкнутом контуре регулирования с адаптацией настроек регулятора к изменению стати-

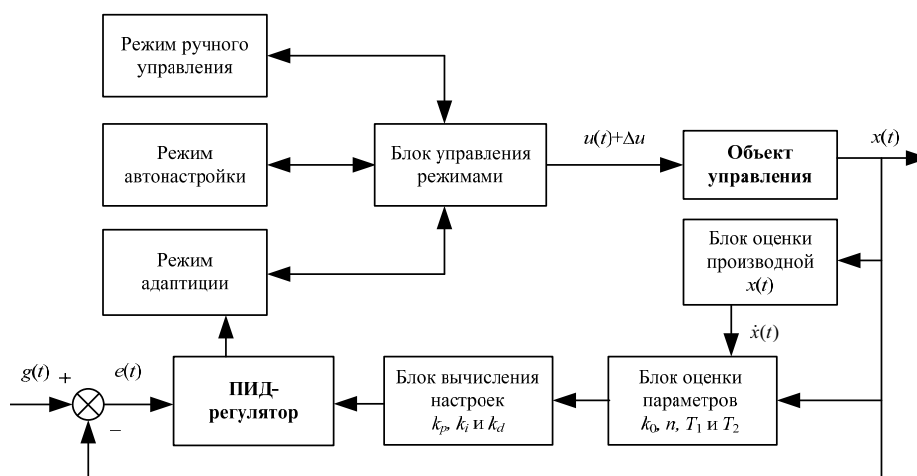


Рис. 1. Блок-схема исследуемого адаптивного промышленного ПИД-регулятора

ческого коэффициента передачи объекта без подачи каких-либо идентифицирующих воздействий;

- в замкнутом контуре регулирования с адаптацией настроек регулятора к изменению динамических параметров объекта с помощью относительно короткого импульсного воздействия.

На рис. 1 представлена блок-схема автоматически настраивающегося адаптивного промышленного ПИД-регулятора, где $g(t)$ – задающее воздействие, $x(t)$ – выходной сигнал и его производная $\dot{x}(t)$, $e(t)$ – ошибка рассогласования, k_0, n, T_1 и T_2 – параметры объекта управления, k_p, k_i и k_d – параметры регулятора.

В АНАП-регуляторе реализуется способ нахождения оптимальных параметров регулятора по критерию максимальной степени устойчивости.

Исследование для проверки работы режимов адаптивного ПИД-регулятора проводилось авторами статьи при изменении параметров объекта управления (ОУ), что приводит к несоответствию между параметрами настройками регулятора и требуемыми точностными и динамическими свойствами систем автоматического регулирования.

Для более основательного исследования алгоритма настройки адаптивного ПИД-регулятора выберем следующие ОУ:

- сушильная камера «Термостат № 3» с передаточной функцией вида:

$$W_{\text{Oy1}}(p) = \frac{k_0}{(T_1 p + 1)^n (T_2 p + 1)}, \quad (1)$$

где $k_0=80,25, T_1=340$ с, $T_2=935$ с и $n=2$;

- объект четвертого порядка, с большим разбросом постоянных времени инерционных звеньев и параметрами $k_0=185, T_1=8$ с, $T_2=450$ с и $n=3$ из формулы (1);
- динамический объект с запаздыванием и передаточной функцией вида:

$$W_{\text{Oy3}}(p) = \frac{k_0 e^{-\tau p}}{(T p + 1)^n},$$

где $k_0=100, T=15$ с, $n=3$ и $\tau=10$ с.

В первом режиме работы ПИД-регулятора – предварительная идентификация динамических свойств ОУ, исследуемые объекты выводились на границу колебательной устойчивости (автоколебания) по методу Циглера–Никольса.

В табл. 1 представлены ориентировочные коэффициенты настройки ПИД-регулятора, рассчитанные по методу А.М. Шубладзе [5] и методу Циглера–Никольса [6].

На рис. 2 приведено сравнение реакций замкнутой системы с первым объектом на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях.

Моделирование показало, что при настройке ПИД-регулятора в режиме предварительной идентификации переходный процесс в замкнутых системах с первым и вторым объектом носит автоколебательный характер (кривая 1 на рис. 2). Для си-

стем с ОУ, имеющими постоянные времени инерционных звеньев, не удовлетворяющих условию $T_2 \gg T_1$, переходный процесс при настройке ПИД-регулятора по методу А.М. Шубладзе является расходящимся.

Таблица 1. Ориентировочные настройки ПИД-регулятора для замкнутой системы

Объект	Метод расчета настроечных коэффициентов ПИД-регулятора					
	А.М. Шубладзе			Циглера–Никольса		
	k_p	k_i	k_d	k_p	k_i	k_d
ОУ1	0,48	$5,79 \cdot 10^{-4}$	98,50	0,08	$9,29 \cdot 10^{-5}$	15,77
ОУ2	0,44	0,01	4,64	0,17	$3,95 \cdot 10^{-3}$	1,78
ОУ3	0,55	0,01	5,46	0,03	$6,60 \cdot 10^{-4}$	0,26

Кроме того, при выведении замкнутой системы на границу колебательной устойчивости амплитуда колебаний может превысить допустимое значение, что в свою очередь приведет к возникновению аварийной ситуации на объекте или выпуску бракованной продукции. Поэтому при настройке промышленных ПИД-регуляторов методом А.М. Шубладзе необходимо проводить дополнительный анализ ОУ.

Второй режим настройки исследуемого адаптивного ПИД-регулятора – (режим идентификации ОУ) проводился в разомкнутом контуре регулирования системы формированием ступенчатого воздействия, добавляемого к выходному сигналу ПИД-регулятора.

По экспериментальным графикам и следующим формулам довольно грубо можно оценить искомые параметры k_0, n, T_1 и T_2 [7]:

$$n = [1,3 t_{\text{max}} / (t_{\text{max}} - 1)], k_0 = \Delta x / \Delta u,$$

$$T_1 = (t_{\text{max}} - t_1) / n, T_2 = 1,2 |\Delta x| / A_{\text{max}},$$

где $[1,3 t_{\text{max}} / (t_{\text{max}} - 1)]$ – целая часть числа $(1,3 t_{\text{max}} / (t_{\text{max}} - 1))$; $t_{\text{max}}, A_{\text{max}}$ – значения, найденные из анализа производной выходного сигнала $x(t)$.

Ниже представлены идентифицированные модели трех исследуемых объектов:

$$W_{\text{M1}}(p) = \frac{80}{(380 p + 1)^2 (1138 p + 1)};$$

$$W_{\text{M2}}(p) = \frac{185}{(24 p + 1)^2 (490 p + 1)};$$

$$W_{\text{M3}}(p) = \frac{100}{(14,5 p + 1)^2 (36 p + 1)}.$$

Для адекватности проведенной идентификации построим реакции ОУ и их идентифицированных моделей на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях, рис. 3.

Исследование переходных процессов на выходе первого объекта (1) и его модели (2), показало, что оценка параметров идентифицируемого объекта проведена достаточно грубо, поскольку параметры передаточной функции первого объекта отличаются от рекомендованных А.М. Шубладзе для иден-

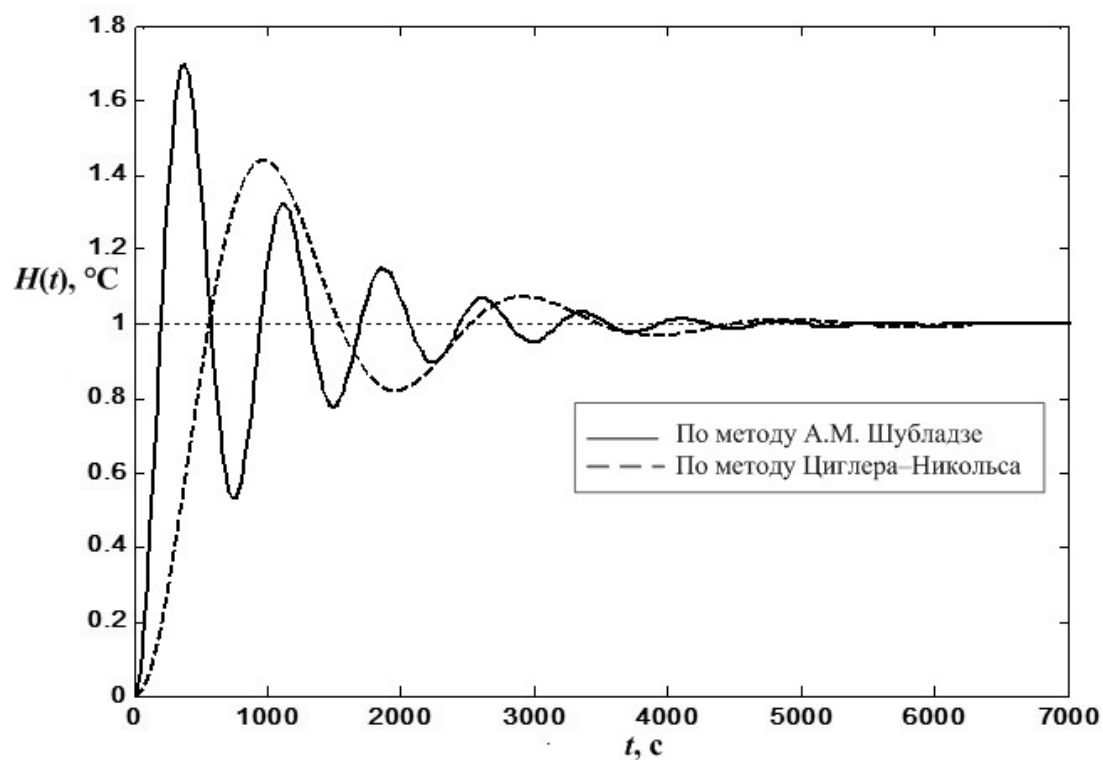


Рис. 2. Переходные процессы в замкнутой системе с первым объектом при настройке ПИД-регулятора

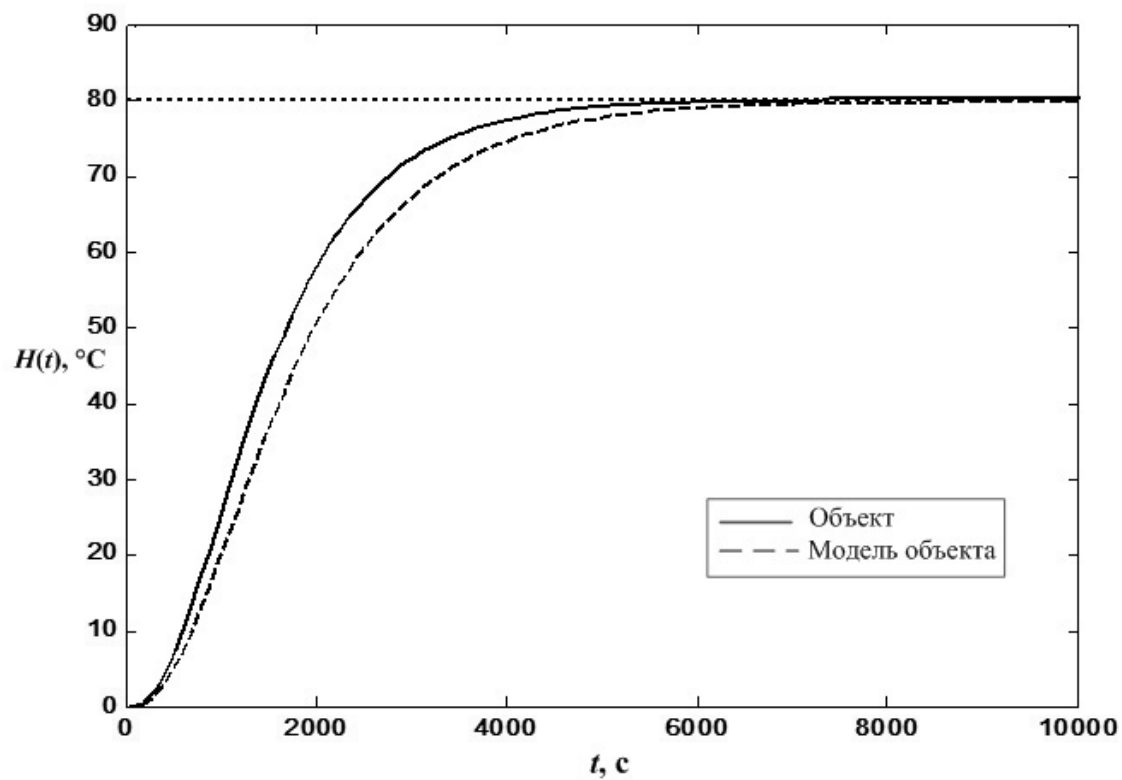


Рис. 3. Переходные процессы на выходе первого объекта и его идентифицированной модели

тификации ($T_2 \gg T_1$). Время переходного процесса найденной модели первого объекта ($t_{м1}=7000$ с) значительно отличается от времени переходного процесса исследуемого объекта ($t_{о1}=5000$ с). Ошибка идентификации составляет 10 %, что в целом представляет неплохие результаты при идентификации теплового объекта.

Сравнение переходных процессов на выходе второго и третьего исследуемых объектов и их моделей позволяет утверждать, что оценка параметров идентифицируемых объектов проведена достаточно точно, поскольку характер и время исследуемых переходных процессов практически совпадает ($t_{о2}=2400$ с, $t_{м2}=2450$ с и $t_{о3}=150$ с, $t_{м3}=170$ с). Ошибка идентификации второго и третьего объекта составляет около 5 %.

Воспользовавшись пакетом MathCAD, по формулам из [8] были вычислены оптимальные по степени устойчивости настроечные параметры ПИД-регулятора для системы с моделью (коэффициенты представлены в относительных параметрах):

- первого объекта: $k_p=0,016$, $k_i=1,229 \cdot 10^{-5}$ и $k_d=4,285$;
- второго объекта: $k_p=0,090$, $k_i=1,014 \cdot 10^{-3}$ и $k_d=0,886$;
- третьего объекта: $k_p=6,875 \cdot 10^{-3}$, $k_i=2,109 \cdot 10^{-4}$ и $k_d=0,056$.

На рис. 4 представлены реакции замкнутой системы автоматического регулирования с найденной моделью первого объекта и ПИД-регулятором, настроенным по критерию максимальной степени

устойчивости, на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях.

На основании моделирования переходных процессов в замкнутых системах регулирования с ПИД-регуляторами произведем сравнение прямых показателей качества:

- время переходных процессов систем с исследуемыми объектами ($t_{о1}=5000$ с, $t_{о2}=230$ с, $t_{о3}=150$ с) и их найденными моделями ($t_{м1}=5500$ с, $t_{м2}=210$ с и $t_{м3}=200$ с) практически совпадает;
- в переходных процессах систем с моделями объектов появилось незначительное перерегулирование в пределах 10...13 %.

Ошибка нормы расстояния между переходными процессами систем с объектами и их моделями при одном и том же входном сигнале составляет около 5 %, что в целом представляет положительные результаты при автоматической настройке ПИД-регуляторов на технологический процесс.

Проанализировав переходные процессы систем с ПИД-регуляторами (рис. 4), можно сделать вывод о том, что при настройке последних по критерию максимальной степени устойчивости переходные процессы имеют неплохие показатели качества.

Таким образом, можно сделать общий вывод о том, что в режиме предварительной идентификации по методу Шубладзе, определение ориентировочных настроек ПИД-регулятора не позволяет осуществить стабилизацию выходного сигнала системы, поэтому эффективнее настройку ПИД-регулятора проводить по методу Циглера–Никольса.

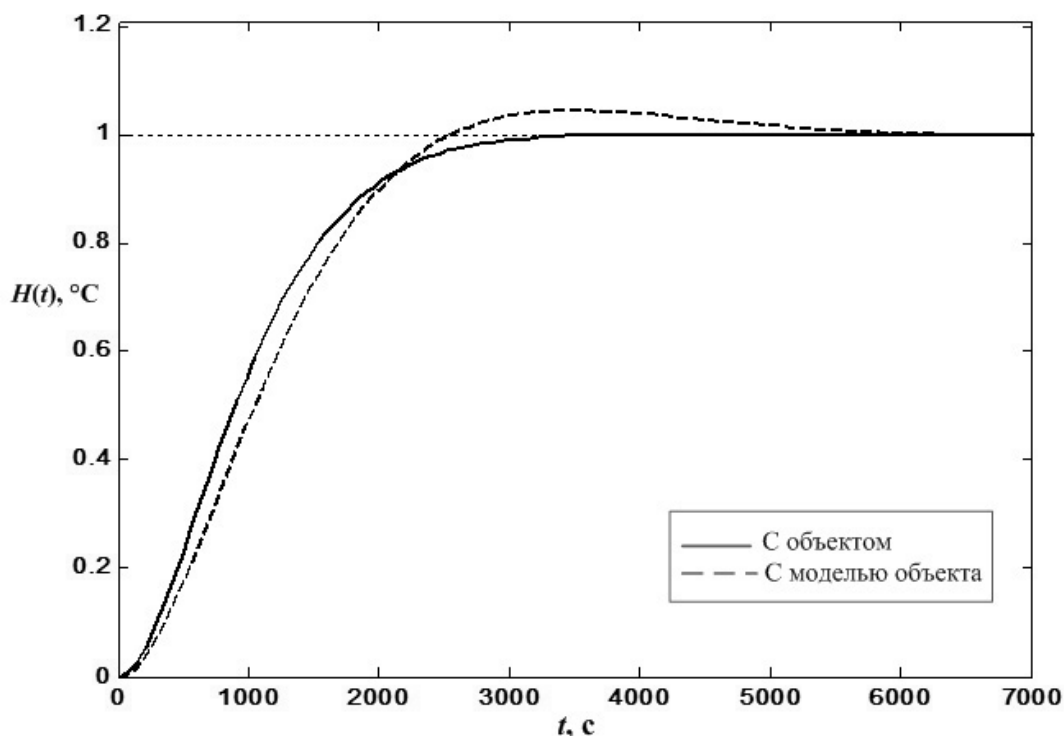


Рис. 4. Переходные процессы на выходе замкнутой системы с первым ОУ и с его идентифицированной моделью

Однако в целом автоматическая настройка промышленного ПИД-регулятора по методу А.М. Шубладзе дает лучшие результаты по сравнению с другими наиболее известными методами в режимах регулирования системы и в процессе ее работы [9].

При функционировании системы управления сушильной камерой «Термостат № 3» происходит естественное изменение параметров объекта, связанное с нестабильностью характеристик технологического процесса, что приводит к несоответствию между этими параметрами и параметрами настройки ПИД-регулятора.

Для исследования адаптивной работы ПИД-регулятора в режиме, обеспечивающем автоматическую настройку статического коэффициента усиления k_0 и динамических параметров T_1 и T_2 объекта управления, изменим параметры каждого исследуемого объекта в пределах $\pm 20\%$. В табл. 2 представлены изменения статического коэффициента усиления и динамических параметров исследуемых ОУ.

Таблица 2. Искусственное изменение параметров исследуемых объектов

Объект	Статический коэффициент усиления			Динамические параметры			
	исходный	измененный на -20 %	измененный на +20 %	исходные		измененные	
				T_1, c	T_2, c	T_1, c	T_2, c
ОУ1	80,3	-	96,3	340,0	935,0	408,0	1122,0
ОУ2	185,0	148,0	-	8,0	450,0	6,5	383,0
ОУ3	100,0	-	120,0	15,0		18,0	

Коррекцию параметров ПИД-регулятора в режиме адаптации осуществим в замкнутом контуре при известном значении $k_{0,тек}$ с помощью короткого импульсного управляющего воздействия уровня $u_{им}$ и длительностью $\Delta t_{им}$, которое формируется в определенные моменты времени и суммируется с текущим ПИД-управлением $u(t)$.

При этом текущее значение статического коэффициента усиления ОУ рассчитаем по следующей формуле:

$$k_{0,тек} = k_{0,уст}(u_{тек})x_{тек}/x_{уст}$$

На основании данного выражения коррекция значения статического коэффициента усиления k_0 в первом режиме адаптивного управления происходит в те моменты времени, когда модуль производной управления относительно мал, т. е. когда $|\dot{u}(t)| < \delta$, где $\delta > 0$ – достаточно малое положительное число.

По результатам идентификации были найдены параметры моделей исследуемых объектов, в частности, текущие статические коэффициенты усиления и динамические параметры, вычислены оптимальные по степени устойчивости настроечные коэффициенты регуляторов для найденных моделей объектов и произведена адаптация параметров ПИД-регуляторов к измененным при функционировании объектам.

В табл. 3 представлены коэффициенты настройки ПИД-регулятора в режиме коррекции параметров объектов.

На рис. 5 представлены переходные процессы в системе с первым ОУ.

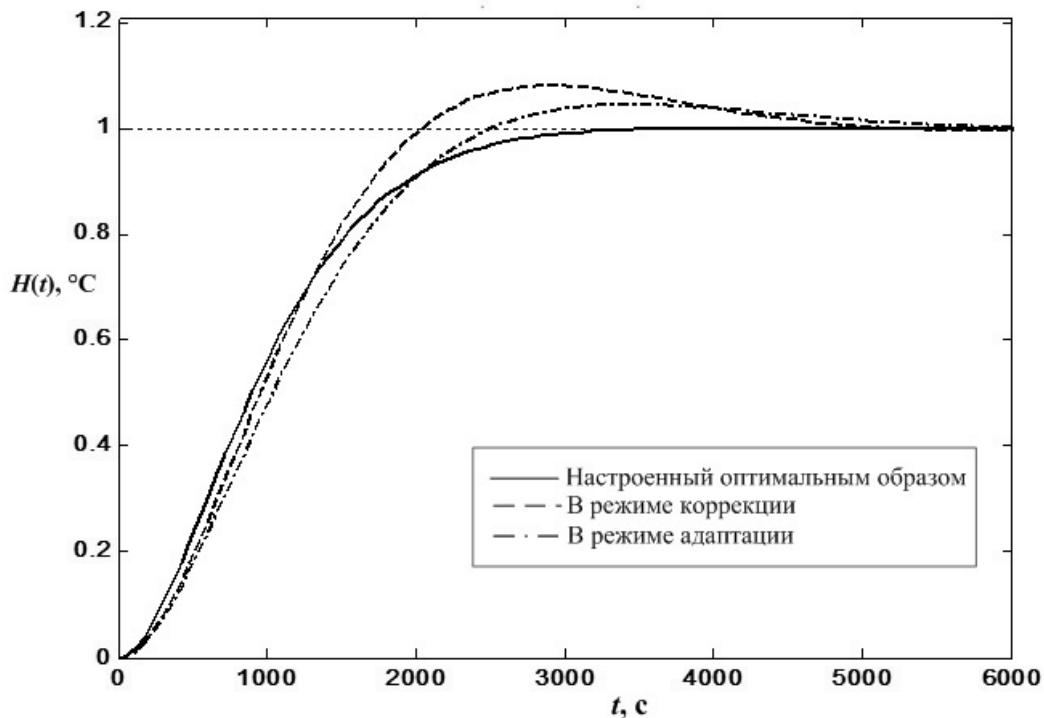


Рис. 5. Переходные процессы в замкнутой системе с ПИД-регулятором

Таблица 3. Настроечные коэффициенты исследуемого регулятора

Объект	Коэффициенты регулятора в режиме					
	коррекции			регулирования		
	k_p	k_i	k_d	k_p	k_i	k_d
ОУ1	0,01	$9,50 \cdot 10^{-6}$	4,12	0,16	$1,23 \cdot 10^{-5}$	4,28
ОУ2	0,12	$1,63 \cdot 10^{-3}$	0,94	0,09	$1,01 \cdot 10^{-3}$	0,89
ОУ3	0,01	$2,02 \cdot 10^{-4}$	0,12	$6,87 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^{-4}$	0,06

Процесс адаптации параметров ПИД-регулятора в режиме адаптации произведен с достаточной точностью. Ошибка адаптации для системы с первым объектом составляет 5 %, для системы со вторым объектом – 7 %, а для системы с третьим объектом – 10 %.

Выводы

Исследуемый метод автоматической настройки А.М. Шубладзе обладает высокой эффективностью

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штейнберг Ш.Е., Сережин Л.П., Залуцкий И.Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – № 7. – С. 1–7.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.
3. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Ольшванг Р.В., Шубладзе А.А. Автоматически настраивающийся адаптивный промышленный регулятор (АНАП) // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 3. – С. 32–35.
4. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Малахов В.А. Автоматически настраивающиеся адаптивные промышленные регуляторы // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. – № 7. – С. 12–17.
5. Пусев Д.В., Малышенко А.М. Сравнительный анализ методов настройки ПИД-регуляторов // Молодежь и современные ин-

формационные технологии: Труды V Всерос. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 70–71.

формационные технологии: Труды V Всерос. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 70–71.

формационные технологии: Труды V Всерос. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 70–71.

формационные технологии: Труды V Всерос. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 70–71.

6. Ziegler J.C., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. – USA: Research Triangle Park, 1992. – 759 p.
7. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Шубладзе А.А. Адаптивные промышленные ПИД-регуляторы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 7. – С. 24–26.
8. Способ оптимальной автоматической настройки системы управления: пат. 2243584 Рос. Федерация; заявл. 24.03.2003; опубл. 27.12.2004, Бюл. № 29. – 7 с.
9. Елисеева А.А., Малышенко А.М. Анализ методов настройки параметров ПИД-регулятора // Молодежь и современные информационные технологии: Труды VII Всерос. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 15–16.

Поступила 20.09.2010 г.