

# ЧАСТОТНЫЙ АДАПТИВНЫЙ ПИД-РЕГУЛЯТОР: ЧАР-ПИД-W1

**А. Г. Александров, И. Г. Резков**

*Институт Проблем Управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва*

**М. В. Паленов**

*Электростальский Политехнический Институт филиал  
Московского Института Стали и Сплавов (технологический университет)*

## Аннотация

Приводятся результаты экспериментальных исследований частотного адаптивного регулятора ЧАР-ПИД-1, реализованного на промышленном контроллере WinCon W-8341 в виде программы на языке С#. Коэффициенты объекта неизвестны и могут изменяться через некоторые промежутки времени; на объект действует внешнее возмущение, которое является неизвестной функцией.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Самонастраивающиеся и адаптивные ПИ- и ПИД-регуляторы широко используются в управлении технологическими процессами [1], [2]. Их алгоритмы базируются на идентификации объекта управления. Часто используются различные вариации метода наименьших квадратов, работающие с тем предположением, что внешнее возмущение является случайным процессом типа «белый шум» [3]. Но на практике такое предположение редко выполняется, и регуляторы, использующие такой алгоритм идентификации, не работоспособны. За последнее десятилетие методы адаптации активно развивались. В настоящее время внешнее возмущение может представлять собой более широкий класс функций. Для этих случаев был предложен алгоритм конечно-частотной идентификации [4], [5]. В [6] алгоритм адаптивного управления базируется на методе конечно-частотной идентификации и синтезе регулятора [7]. Такой алгоритм адаптивного управления реализован на промышленном контроллере.

Статья посвящена экспериментальным исследованиям с использованием этого контроллера.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим систему управления, приведенную на рис. 1.

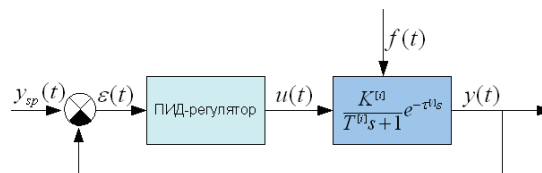


Рис. 1. Блок-схема системы управления с ПИД-регулятором

В ней  $y(t)$  – измеряемый выход объекта управления,  $u(t)$  – управление, формируемое ПИД-регулятором,  $y_{sp}(t)$  – задающее воздействие (уставка),  $f(t)$  – неизмеряемое внешнее возмущение, являющаяся неизвестной функцией,  $\varepsilon(t)$  – ошибка слежения, вычисляемая как:

$$\varepsilon(t) = y_{sp}(t) - y(t) \quad (1)$$

Коэффициенты объекта и регулятора – неизвестные числа,  $i$  – номер режима работы объекта.

Коэффициенты объекта изменяются в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_N$ , и постоянны внутри интервалов времени

$$t_{i-1} \leq t < t_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

Предполагается, что:

1) Моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_N$  находятся в процессе адаптации путем периодического включения идентификации, либо при превышении коэффициентом интенсивности внешнего возмущения некоторого заданного значения. Определение этого коэффициента вводится ниже;

2) длина интервалов (2) такова, что  $t_{i+1} - t_i > t_{ao}^{[i]}$  ( $i = \overline{2, N-1}$ ), где  $t_{ao}^{[i]}$  – время адаптации на  $i$ -м режиме работы объекта ( $i = \overline{1, N}$ );

3) система с ПИД-регулятором и объектом, работающем в первом режиме, устойчива, при этом известны параметры ПИД-регулятора;

4) коэффициенты объекта мало изменяются при переходе объекта с режима на режим так, что регулятор, построенный для  $i$ -го режима работы объекта, не нарушает устойчивость системы в  $(i+1)$ -ом режиме работы объекта.

Задача состоит в том, чтобы адаптировать ПИД-регулятор к изменяющемуся объекту так, чтобы ошибка слежения на каждом интервале была ограниченной:

$$|\varepsilon^{[i]}| = |\varepsilon^{[i]*}| + \xi, \quad t \geq t_{ao}^{[i]} \quad (3)$$

где  $\varepsilon^{[i]*}$  – достижимая ошибка слежения на  $i$ -ом режиме при известных коэффициентах объекта,  $\xi$  – достаточно малое положительное число.

Длительность адаптации  $t_{ao}^{[i]}$  на  $i$ -м режиме работы объекта зависит от коэффициента интенсивности внешнего возмущения, который определяется как:

$$K_y^{[i]} = \frac{\frac{1}{a_i} \int_{t_i}^{t_i+a_i} |y(t) - y_{sp}(t)| dt}{y_{sp}(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

где  $K_y^{[i]}$  – коэффициент интенсивности внешнего возмущения на  $i$ -ом режиме,  $a_i$  – некое положительное число, удовлетворяющее неравенству  $t_i + a_i < t_{i+1}$ . Коэффициент  $K_y^{[i]}$  имеет смысл ошибки, которую вносит внешнее возмущение в выходной сигнал, отнесенную к задающему воздействию. Эта ошибка вычисляется на протяжении интервала времени  $a_i$ .

При нулевом задающем воздействии ( $y_{sp} = 0$ ) коэффициент интенсивности внешнего возмущения вычисляется как:

$$K_y^{[i]} = \frac{1}{a_i} \int_{t_i}^{t_i+a_i} |y(t)| dt, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

Для адаптивного управления используется испытательный (идентифицирующий) сигнал; длительность адаптации зависит и от коэффициента влияния испытательного сигнала, который находится по формуле

$$K_v^{[i]} = \frac{\int_{t_i}^{t_i+2a_i} |y_v(t) - y_{sp}(t)| dt}{\int_{t_i}^{t_i+a_i} |y(t) - y_{sp}(t)| dt}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

где  $K_v^{[i]}$  – коэффициент влияния испытательного сигнала,  $y_v(t)$  – выход объекта при подаче на вход системы испытательного сигнала. В числителе вычисляется ошибка, обусловлен-

ная внешним возмущением и испытательным сигналом, а в знаменателе – только внешним возмущением. Коэффициент  $K_v^{[i]}$  показывает, во сколько раз испытательный сигнал «портит» выходной сигнал по сравнению с внешним возмущением.

Представляется интересным исследовать зависимость длительности идентификации от коэффициента влияния испытательного сигнала.

В процессе экспериментов исследовалась, в частности, зависимость времени адаптации от коэффициента влияния испытательного сигнала для различных интенсивностей возмущений.

### 3. БЛОК-СХЕМА ЧАР-ПИД-1

Блок-схема системы с частотным адаптивным ПИД-регулятором приведена на рис. 2 (называемым ЧАР-ПИД-1).

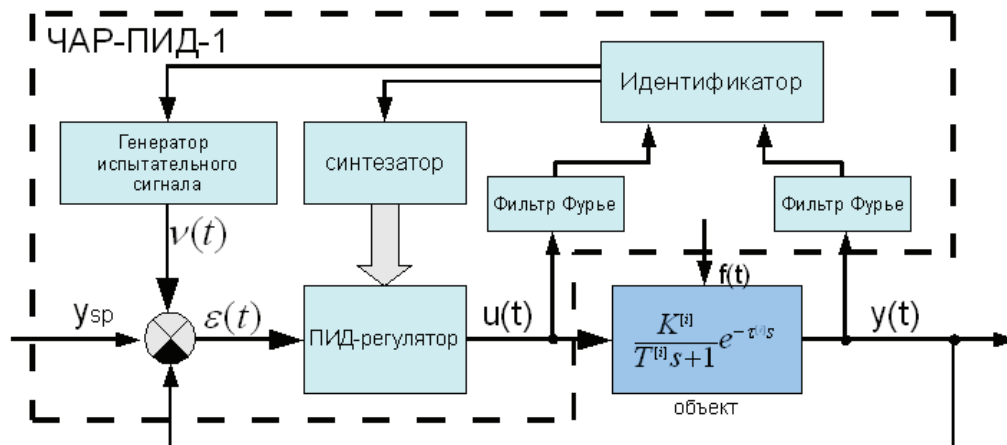


Рис. 2. Блок-схема система с частотным адаптивным ПИД-регулятором

ЧАР-ПИД-1 включает в себя несколько блоков. Основу регулятора составляет ПИД-регулятор. Его коэффициенты вычисляет синтезатор. Идентификатор вычисляет оценки коэффициентов объекта, передаваемые синтезатору, и управляет генератором испытательного сигнала.

Генератор испытательного сигнала формирует сумму гармоник следующего вида:

$$v(t) = \rho_1 \sin \omega_1 t + \rho_2 \sin \omega_2 t, \quad (7)$$

где  $\rho_i$  – амплитуды и  $\omega_i$  – частоты ( $i=1,2$ ) испытательного сигнала, настраиваемые в процессе адаптации.

Амплитуды  $\rho_1$  и  $\rho_2$  настраиваются так, чтобы коэффициент влияния испытательного сигнала  $K_v^{[i]}$  не превышал некоторого значения, или испытательный сигнал оказывал малое влияние на ошибку слежения.

## 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 4.1. Экспериментальный стенд

Для экспериментального исследования ЧАР-ПИД-1 был разработан стенд ФМ-2. Он состоит из промышленного контроллера WinCon W-8341 [8] содержащего 12-битные ЦАП и АЦП, и IBM-совместимого одноплатного промышленного компьютера Athena со встроенными ЦАП и АЦП. ЧАР-ПИД-1 работает на промышленном контроллере WinCon, а объект имитируется промышленным компьютером Athena [9].

#### 4.1.1. Имитатор объекта

Имитатор объекта – это программа на языке C++ для промышленного компьютера Athena, имитирующая объект с коэффициентами, приведенными в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры объекта

Режим работы	К	T, с	$\tau$ , с
I	3	5	1
II	3	4	1.5
III	4	5.84	1.7
IV	5	5	2
V	5	4	1.5
VI	5.6	3	1
VII	7.9	2.84	1.2

В качестве внешнего возмущения  $f(t)$  для простоты использовался случайный процесс типа «белый шум», однако следует заметить, что ЧАР-ПИД-1 работоспособен и при любых других внешних ограниченных возмущениях. Задающее воздействие выбрано  $y_{sp}(t) = 5 B$ .

#### 4.1.2. Регулятор

ЧАР-ПИД-1 реализован в виде программы на языке C# (платформа .NET) для контроллера WinCon W-8341.

### 4.2. Результаты экспериментов

Коэффициенты объекта, работающего в первом режиме, известны, по ним строится ПИД-регулятор.

#### 4.2.1. Потеря устойчивости системы без адаптации

Объект, работая последовательно, сменяет режимы с I по IV, замкнут с ПИД-регулятором, коэффициенты которого не изменяются в ходе эксперимента. Результаты приведены на рис. 3.

На рис. 3 режимы объекта обозначены как I, II, III, IV.

Нетрудно видеть, что на IV режиме система теряет устойчивость.

#### 4.2.2. Адаптивное управление

Во втором эксперименте объект работает в режимах с I по VII (в соответствии с Таблицей 1). Результаты эксперимента приведены на рис. 4, 5.

На рис. 4. показан выход системы при работе регулятора последовательно во всех режимах работы объекта.

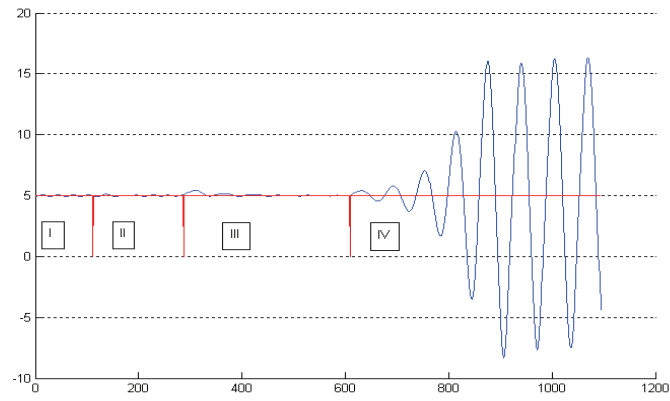


Рис. 3. Результаты эксперимента 1

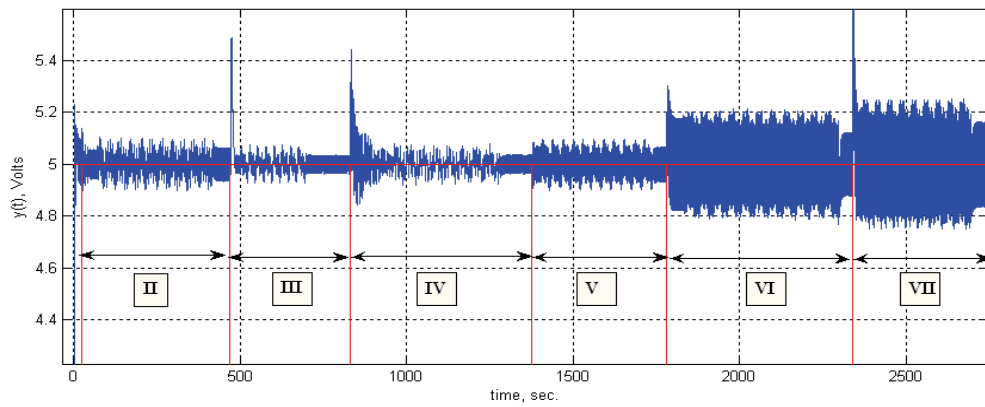
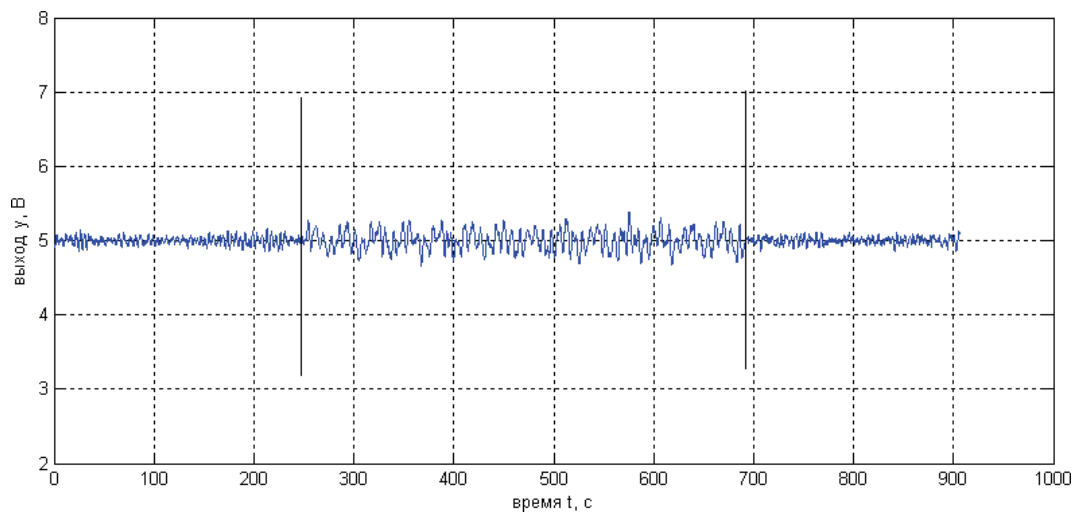


Рис. 4. Выход системы при работе объекта последовательно в режимах с I по VII

Рис. 5.  $K_y = 0.028$ ,  $K_v = 2.68$ ,  $t_{ad} = 439c$  ( $T = 4$ )

Нетрудно видеть, что после введения адаптации на всех семи режимах объекта сохраняется устойчивость замкнутой системы.

### 4.2.3. Исследование зависимости времени адаптации от коэффициента влияния $K_v$ испытательного сигнала

Исследовался объект во II-м режиме с регулятором, рассчитанным для объекта первого режима объекта. На рис. 5-8 приведены графики процессов адаптации для двух значений коэффициентов влияния испытательного сигнала  $K_v = 2.6$  и  $3.5$ , и двух коэффициентов интенсивности внешних возмущений  $K_y = 0.028$  и  $0.125$ , из которых следует, что длительность адаптации слабо зависит от коэффициента интенсивности внешнего возмущения  $K_y^{[i]}$  (при одном и том же коэффициенте влияния испытательного сигнала  $K_v^{[i]}$ ), но существенно зависит от коэффициента влияния испытательного сигнала  $K_v^{[i]}$ .

На рис. 9-11 приводятся процессы адаптации для объекта с параметрами  $K = 3$ ,  $T = 5$  при различных значениях запаздывания  $\tau$ .

Нетрудно видеть, что время идентификации слабо зависит от величины запаздывания  $\tau$ .

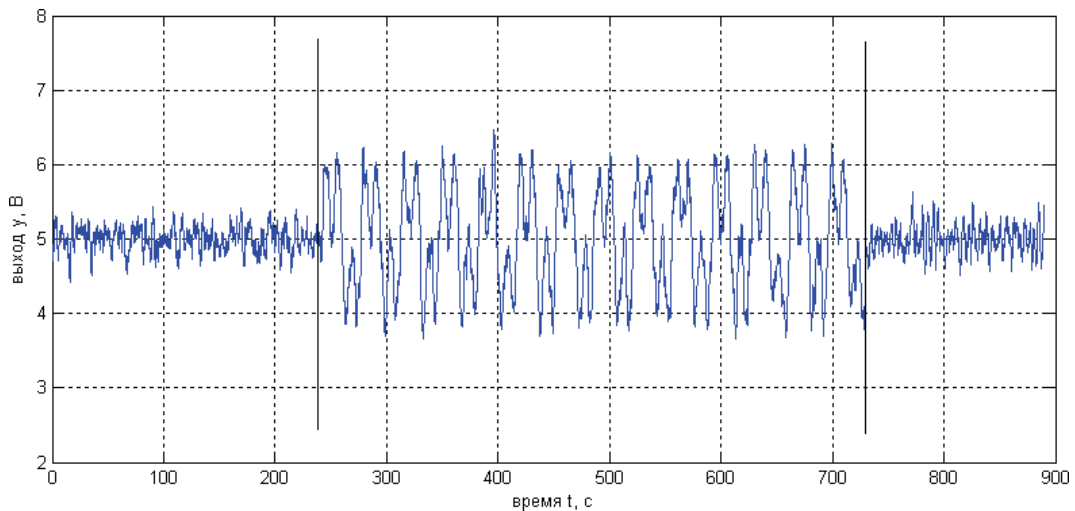


Рис. 6.  $K_y = 0.115$ ,  $K_v = 2.57$ ,  $t_{ad} = 488c$  ( $T = 4$ )

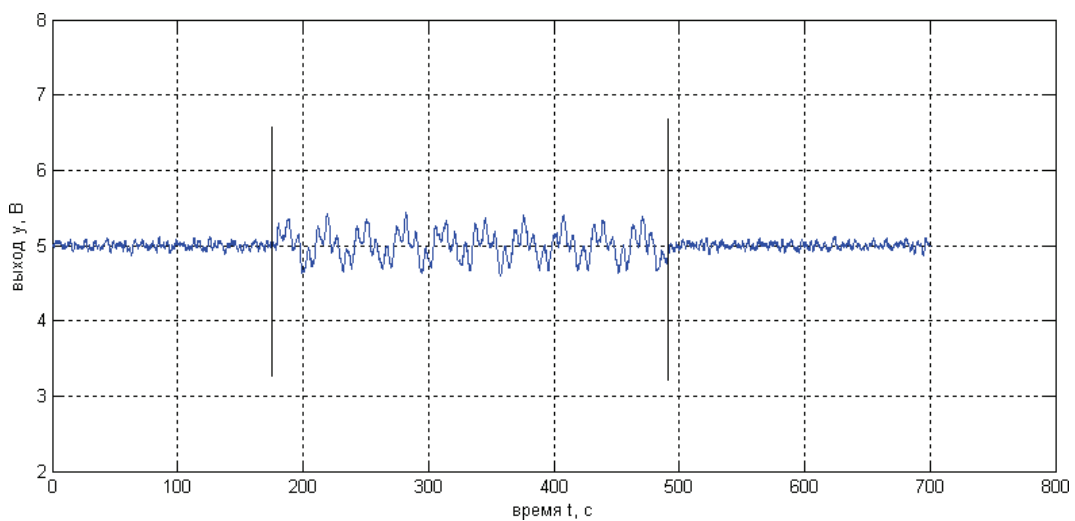


Рис. 7.  $K_y = 0.028$ ,  $K_v = 3.42$ ,  $t_{ad} = 313c$  ( $T = 4$ )

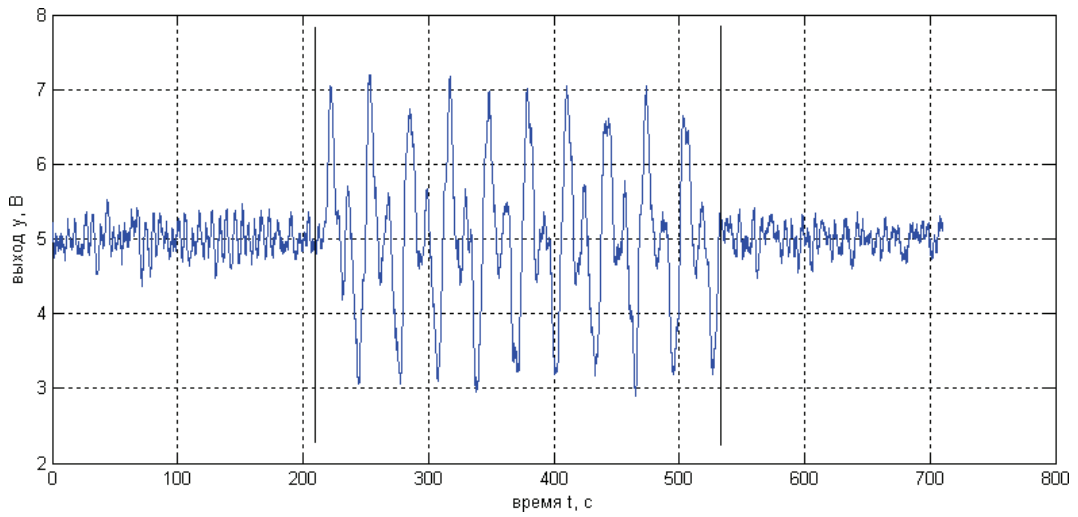


Рис. 8.  $K_y = 0.125$ ,  $K_v = 3.51$ ,  $t_{ad} = 313c$  ( $T = 4$ )

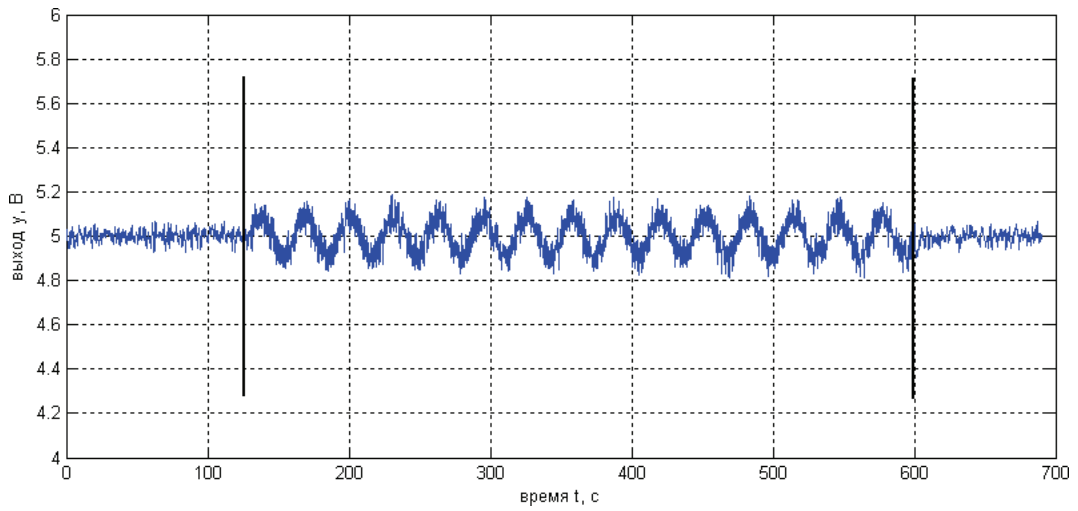


Рис. 9.  $K_y = 0.074$ ,  $K_v = 2.51$ ,  $t_{ad} = 470c$  ( $T = 0.5$ )

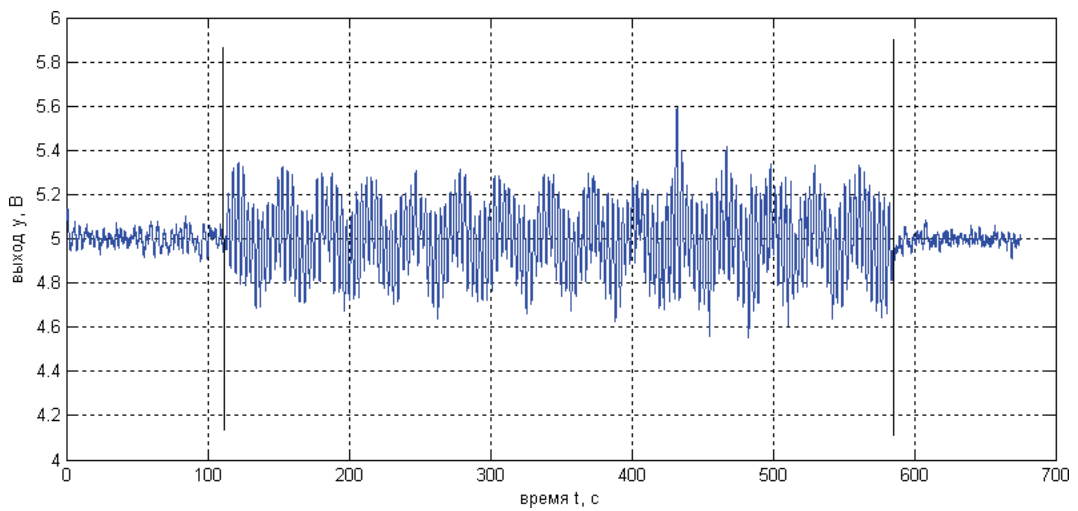


Рис. 10.  $K_y = 0.134$ ,  $K_v = 4.39$ ,  $t_{ad} = 470c$  ( $\tau = 1$ )

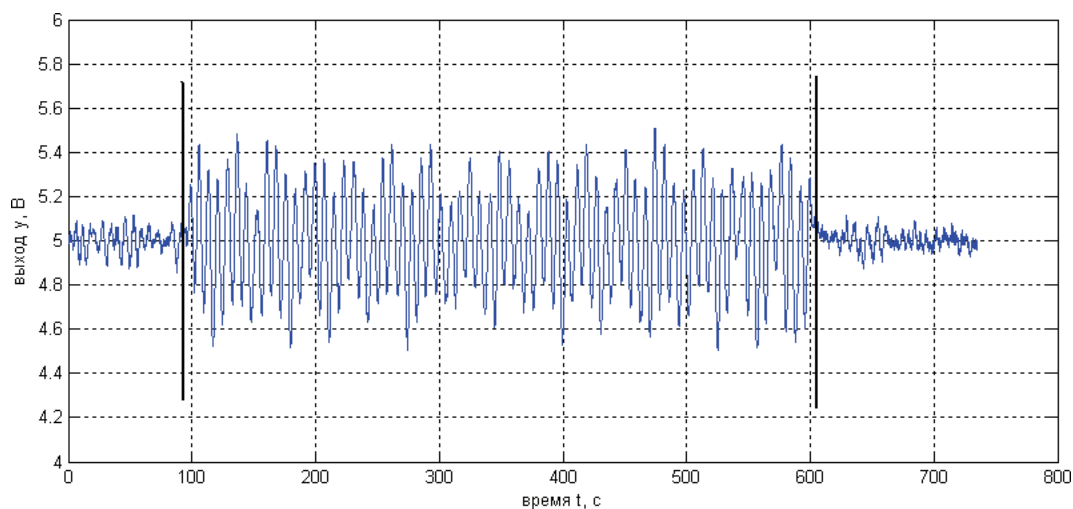


Рис. 11.  $K_y = 0.147$ ,  $K_v = 3.46$ ,  $t_{ad} = 502c$  ( $\tau = 2$ )

### Заключение

Из проведенных экспериментов следует, что длительность адаптации слабо зависит от коэффициента интенсивности внешнего возмущения  $K_y^{[i]}$  (при одном и том же коэффициенте влияния испытательного сигнала  $K_v^{[i]}$ ), но существенно зависит от коэффициента влияния испытательного сигнала  $K_v^{[i]}$ .

**Рекомендации.** Для того чтобы время адаптации было мало, необходимо, чтобы коэффициент влияния испытательного сигнала  $K_v^{[i]}$  был как можно больше и наоборот, если требуется минимум влияния испытательного сигнала на ошибку слежения, то в таком случае время адаптации может сильно увеличиться.

**Благодарности.** Авторы благодарят проф. Ицковича Э.Л. за обсуждение работы и полезные замечания.

### Список литературы

1. Voda A. A., Landau I. D. A method for the Auto-calibration of PID Controllers // Automatica. 1995. Vol. 31. No 1. P. 41-53.
2. Astrom K. J., Hagglund T. Advanced PID Control. – ISA, 2006.
3. Льюнг Л. Идентификация систем: Теория для пользователей. – М.: Наука, 1991.
4. Александров А. Г. Адаптивное управление на основе идентификации частотных характеристик // Известия РАН: Теория и системы управления. 1995. № 2. С. 63-71.
5. Alexandrov A. G., Vaukova N.G. Frequencial adaptive PDD-controller // Proceedings of the UKACC International Conference on Control. Cambridge, 2000.
6. Александров А.Г. Адаптивное управление объектом с запаздыванием // Труды IX Международной Четаевской конференции "Аналитическая механика, устойчивость и управление движением", посвященной 105-летию Н.Г. Четаева. Иркутск, 2007. Том 3: Управление и оптимизация. С. 6-13.
7. Visioli A. Improving the load disturbance rejection performance of IMC-tuned PID Controllers // Preprints of 15<sup>th</sup> Triennial Word Congress. Barcelona, Spain, 2002.
8. W-8x4x Hardware Specification, 2009. [online]. URL: [http://www.icpdas.com/products/PAC/wincon-8000/8x4x\\_hardware\\_specification.htm](http://www.icpdas.com/products/PAC/wincon-8000/8x4x_hardware_specification.htm). [Date visited: 01 February 2009].



9. DIAMOND SYSTEMS CORPORATION, 2009. [online]. URL: <http://www.diamondsystems.com/products/athena>. [Date visited: 01 February 2009].

*Александров Альберт Георгиевич, Резков Илья Геннадьевич – Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, e-mail: alex7@ipu.ru, fagoth@mail.ru.*

*Паленов М.В. – Электростальский Политехнический Институт филиал Московского Института Стали и Сплавов (технологический университет), e-mail: MAX\_ELEK@mail.ru.*