



УДК 681.51

© *Е. Л. Еремин, Е. А. Шеленок, 2011*

УПРАВЛЕНИЕ ПО ВЫХОДУ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ГАРМОНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Еремин Е. Л. – д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе и информатизации, тел. (4212) 22-44-19, e-mail: ereminel@mail.ru; *Шеленок Е.А.* – асп. кафедры «Автоматика и системотехника», e-mail: cidorshell@rambler.ru (ТОГУ)

Рассматривается задача управления динамическими объектами с компенсацией внешних смещенных гармонических возмущений. В качестве решения предлагаются комбинированные адаптивные и робастные системы управления, контур управления которых содержит блок генератора периодических сигналов (ГПС). С помощью вычислительных экспериментов демонстрируются преимущества предложенных систем по сравнению с одним из существующих аналогов.

Control problem for dynamic objects with external biased harmonic noise compensation is considered. As a solution combined adaptive and robust control systems with a controller which includes periodic signal generator is proposed. By means of computing tests the advantages of the system proposed is documented.

Ключевые слова: компенсация возмущений, комбинированный алгоритм управления, смещенные гармонические помехи.

Введение

Управление динамическими объектами с компенсацией действующих на них неизмеряемых гармонических возмущений с неизвестными параметрами является весьма важной и актуальной задачей современной теории автоматических систем [1, 2].

Методы классической теории управления позволяют синтезировать системы лишь в предположении, что внешнее возмущение может быть представлено как выход конечномерной линейной динамической системы с заранее известными параметрами. Но в большинстве практических случаев разработчики управляющих систем сталкиваются с априорной неизвестностью и невозможностью непосредственного измерения внешних помех объекта. Данные обстоятельства обуславливают необходимость решения задач компенсации гармонических возмущений с помощью методов, отличных от

классической теории управления. В качестве таких подходов, в частности, хорошо зарекомендовали себя методы теории адаптивного и робастного управления.

Задача синтеза систем управления объектами, подверженными действию постоянно действующих внешних помех, не является новой и имеет ряд аналитических решений [1–5]. Так, в работе [1] для линейного стационарного объекта предложен алгоритм синтеза наблюдателя внешних квазигармонических возмущений, сигнал с выхода которого используется для построения алгоритмов их компенсации. Аналогичная задача применительно к нелинейному объекту управления решена в [2]. Здесь получены наблюдатель возмущения и алгоритмы управления меньшего порядка в сравнении с [1]. Работы [3, 4] посвящены разработке робастного алгоритма идентификации неизвестного значения частоты синусоидальной помехи [3], и его применению при управлении линейным неминимально-фазовым динамическим объектом [4]. В работе [5] предложен алгоритм адаптивного управления, позволяющий по измерениям выхода линейного стационарного объекта осуществить его стабилизацию за счет компенсации гармонического смещенного возмущения.

Отметим, что парирование внешних паразитных воздействий в условиях априорной неопределенности можно также осуществлять за счет законов нелинейного робастного управления [6], обеспечивающих высокое быстродействие и точность построенных на их основе систем. Более «тонкую» работу систем управления обеспечивает комбинированная структура регулятора, состоящего, например, из адаптивной настройки и блока генератора периодических сигналов (ГПС) [7].

В данной статье для компенсации внешних гармонических смещенных возмущений с неизвестными параметрами рассматривается возможность применения комбинированных адаптивного [7] и робастного алгоритмов управления с ГПС [8–12], имеющих относительно простую структуру и достаточно хорошие характеристики функционирования.

Описание существующего решения задачи

Рассмотрим задачу компенсации внешнего неизмеримого гармонического возмущения при управлении полностью управляемым и полностью наблюдаемым линейным стационарным динамическим объектом.

Пусть динамические свойства рассматриваемого объекта описываются с помощью операторной модели [5]:

$$a(p)y(t) = b(p)[u(t) + f(t)], \quad (1)$$

где: $p = d/dt$ – оператор дифференцирования; $y(t)$ – выход объекта управления; $u(t)$ – входной сигнал объекта (управляющее воздействие); $f(t)$ – внешнее возмущение, представимое в виде гармонической функции:

$$f(t) = \sigma_0 + \sigma \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$



с неизвестными амплитудой σ , частотой ω , смещением σ_0 , а также фазой φ ; $a(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0$, $b(s) = b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0$ – некоторые полиномы с неизвестными коэффициентами порядка n и m соответственно; $m = (n - 1)$; $b(s)$ – гурвицев.

Задача: требуется для объекта (1) обеспечить стабилизацию положения равновесия за счет синтеза алгоритма управления, компенсирующего действие внешнего гармонического смещенного сигнала (2).

Одно из решений указанной задачи представлено, как было упомянуто выше, в работе [5], где постановка цели управления как решения задачи синтеза адаптивного алгоритма, обеспечивающего при любых начальных состояниях объекта (1) выполнение целевого условия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0, \quad (3)$$

позволила синтезировать закон адаптивного управления вида:

$$u(t) = 3s^2 \xi(t) + 3s \xi(t) + \xi(t) - \hat{\theta}(t) s \xi(t) - \gamma(t) y(t), \quad (4)$$

$$\frac{d\hat{\theta}(t)}{dt} = k_a \xi(t) y(t) - \bar{k}_a \hat{\theta}(t), \quad \frac{d\gamma(t)}{dt} = \gamma_0 y^2(t) - \bar{\gamma}_0 \gamma(t). \quad (5)$$

Здесь $k_a, \gamma_0 = const > 0$; $\xi(t)$ – линейный фильтр третьего порядка:

$$\xi(t) = \frac{1}{(s+1)^3} u(t), \quad (6)$$

параметры \bar{k}_a и $\bar{\gamma}_0$ определены в соответствии с выражениями:

$$\bar{k}_a = \bar{k}_a(\hat{\theta}(t)) = \begin{cases} 0, & |\hat{\theta}(t)| < \theta_0, \\ \left[\frac{|\hat{\theta}(t)|}{\theta_0} - 1 \right], & \theta_0 \leq |\hat{\theta}(t)| \leq 2\theta_0, \\ 1, & |\hat{\theta}(t)| > 2\theta_0, \end{cases} \quad (7)$$

$$\bar{\gamma}_0 = \bar{\gamma}_0(\gamma(t)) = \begin{cases} 0, & |\gamma(t)| < \gamma_*, \\ \left[\frac{|\gamma(t)|}{\gamma_*} - 1 \right], & \gamma_* \leq |\gamma(t)| \leq 2\gamma_*, \\ 1, & |\gamma(t)| > 2\gamma_*, \end{cases} \quad (8)$$

Схему имитационного моделирования системы управления (1), (2), (4), построенную с помощью среды Simulink пакета MatLab, можно представить в соответствии с рис. 1 (элементы K_i – логические ключи).

Использование предложенного адаптивного закона управления (4)-(8) позволило осуществить компенсацию внешнего возмущения (2) и обеспечить устойчивость положения равновесия управляемого объекта (1) за счет выполнения целевого условия (3). Однако рассматриваемая задача может иметь более простое решение.

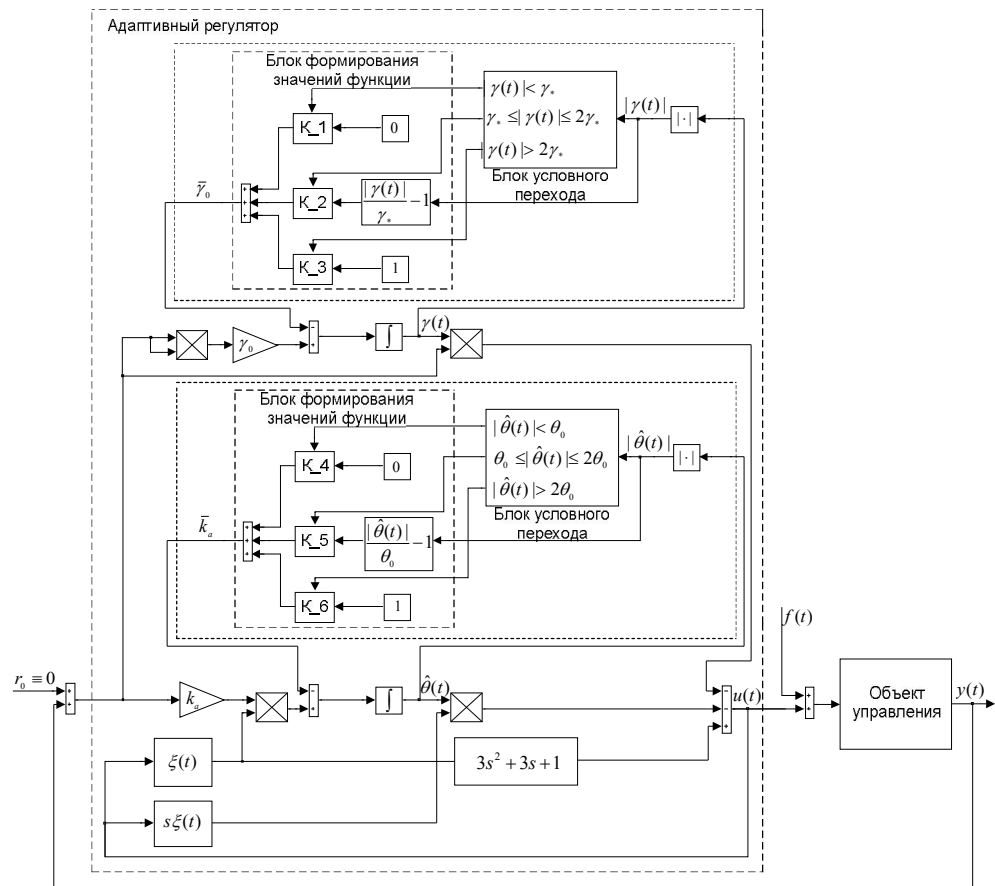


Рис. 1. Simulink-модель адаптивной системы управления (1), (2), (4)–(8)

Компенсация гармонического возмущения с помощью ГПС

Адаптивные алгоритмы с ГПС. Если рассматривать задачу компенсации различного рода внешних помех, имеющих циклический характер изменения, как частный случай управления периодическими режимами линейных стационарных объектов, то для ее решения могут быть использованы комбинированные адаптивно-периодические алгоритмы, полученные в [7].

С этой целью представим операторную модель объекта (1) в типовой векторно-матричной форме записи с априорно неизвестными параметрами:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(\xi)x(t) + b(\xi)u(t) + f(\xi, t), \quad y(t) = L^T(\xi)x(t), \quad (9)$$

где: $x(t) \in R^n$ – вектор переменных состояния объекта; $u(t) \in R$, $y(t) \in R$ – соответственно скалярные управляющее воздействие и выход объекта; $A(\xi) = A_0 + b_0 \chi_0(\xi) L^T(\xi)$ – стационарная матрица состояния в общем случае не-



устойчивая; $b = b_0 = [0, \dots, 0, 1]^T$ – вектор управления соответствующего размера; A_0 – гурвицева матрица; $\chi_0(\xi) = \chi_0$ – некоторая постоянная величина; $L(\xi) = L = [l_1, \dots, l_n]^T$ – стационарный вектор, формирующий выход объекта управления; при этом, полином $l(s) = l_n s^{n-1} + l_{n-1} s^{n-2} + \dots + l_2 s + l_1$, составленный относительно положительных коэффициентов l_i , является гурвицевым; $f(\xi, t) = b_0 f_n(\xi, t) = [0, \dots, 0, f_n(\xi, t)]^T$, $|f_n(\xi, t)| < f_0 = const > 0$ – вектор внешних постоянно действующих возмущений с ограниченным по величине элементом, являющимся гармонической функцией (2); $\xi \in \Xi$ – параметр, задающий уровень или класс априорной неопределенности.

Следуя результатам работы [7], можно показать, что построение работоспособной системы управления, компенсирующей гармонические внешние возмущения, возможно за счет комбинированного адаптивного регулятора:

$$u(t) = \zeta u_{nep}(t) + u_{инт}(t)y(t) \quad (10)$$

с алгоритмами настройки, синтезированными в рамках критерия гиперустойчивости:

$$\begin{aligned} u_{nep}(t) &= u_{nep}(t-T) + \alpha_0 z(t), \\ \frac{du_{инт}(t)}{dt} &= \alpha_1 y(t)z(t). \end{aligned} \quad (11)$$

В выражениях (10), (11) $\zeta = const > 0$; $u_{nep}(t)$, $u_{инт}(t)$ – соответственно периодическая настройка (ГПС), и интегральная часть; $\alpha_0, \alpha_1 = const > 0$; $z(t)$ – ошибка рассогласования между выходом объекта и некоторой неявной эталонной модели [7].

Имитационная модель построенной таким образом системы (9)–(11) (рис. 2) будет иметь более простую структуру в сравнении с рассмотренной ранее адаптивной системой (1), (2), (4)–(8) (рис. 1).

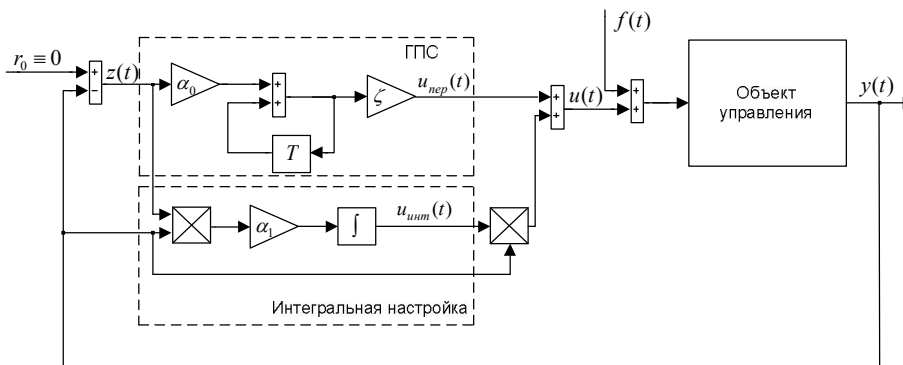


Рис. 2. Simulink-модель системы управления (9)–(11)

Робастные алгоритмы с ГПС. Рассмотренный выше метод компенсации внешних помех хоть и имеет простую реализацию, но в ряде случаев облада-

ет плохим качеством функционирования. Например, когда в управляемом объекте присутствуют параметры, имеющие непериодический характер изменения, в адаптивной системе (9)–(11) при модификации интегральной настройки, как правило, наблюдается большое отклонение выхода объекта от заданного значения.

В этом случае целесообразно использовать комбинированный робастный закон управления, содержащий блок ГПС. Тогда робастная часть регулятора будет отвечать за обеспечение устойчивости работы системы за счет парирования нестационарного поведения параметров объекта, а ГПС по-прежнему будет инструментом компенсации внешних гармонических возмущений. Подобные робастно-периодические алгоритмы были аналитически синтезированы в [8, 9], и нашли дальнейшее применение в работах [10–12].

Рассмотрим данный случай более подробно. Пусть поведение динамического нестационарного объекта описывается с помощью уравнений:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(\xi, t, x) + b(\xi)u(t) + f(\xi, t), \quad y(t) = L^T(\xi)x(t), \quad (12)$$

в которых $A(\xi, t, x) = A(\xi)x(t) + b_0\rho(t)y(t)$ – нестационарный вектор, содержащий некоторую неустойчивую матрицу $A(\xi)$, а также неизвестную ограниченную по величине непериодическую функцию $\rho(t)$. Остальные параметры объекта (12) обладают свойствами, аналогичными (9).

Потребуем, чтобы для рассматриваемого нестационарного априорно неопределенного объекта (12), подверженного действию гармонических внешних возмущений (2), был получен явный вид алгоритмов управления комбинированного робастно-периодического регулятора:

$$u(t) = \zeta[u_{nep}(t) + u_{роб}(t)], \quad (13)$$

где: $\zeta = const > 0$; $u_{nep}(t)$, $u_{роб}(t)$ – периодическая и робастная части; обеспечивающего для любых начальных условий $x(0)$ и любом уровне параметрической неопределенности $\xi \in \Xi$ сходимости выходной переменной объекта к заданному значению $r_0 = const$ за счет компенсации внутренних $\rho(t)$ и внешних $f(t)$ паразитных воздействий при выполнении предельных целевых условий:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |r_0 - y(t)| \leq \alpha_0^2 = const > 0, \quad (14)$$
$$\lim_{t \rightarrow \infty} u_{nep}(t) = u_{nep}(t + T),$$

где: r_0 задающее воздействие системы; $u_{nep}(t + T)$ – T -периодический сигнал; α_0^2 – некоторое относительно малое число.

Тогда, пользуясь понятием некоторой эталонной модели, заданной в неявном виде:

$$A_0x_0(t) + b_0r_0 = 0, \quad y_0(t) = L^T x_0(t) = r_0 = const,$$



а также исходя из результатов [8, 9], с помощью критерия гиперустойчивости В. М. Попова можно показать, что синтез алгоритмов комбинированного робастного регулятора (13) в виде:

$$\begin{aligned} u_{nep}(t) &= u_{nep}(t-T) + \beta_0 z(t), \\ u_{pob}(t) &= \beta_1 |y(t)| z(t), \end{aligned} \quad (15)$$

где: $\beta_0, \beta_1 = \text{const} > 0$; позволяет построить устойчивую замкнутую систему управления, в которой с течением времени будут выполнены условия (14), а, следовательно, осуществлена компенсация внутренних и внешних возмущений объекта (12).

Таким образом, в системе управления (12), (13), (15) будет обеспечена диссипативная устойчивость, а ее структура за счет конструкции регулятора будет проще структуры комбинированной адаптивной системы (9)–(11).

Иллюстративный пример

Для иллюстрации работы схем компенсации внешних возмущений рассмотрим вначале, аналогично [5], задачу управления динамическим объектом (1), (9) с передаточной функцией:

$$W_{OV}(s) = \frac{b_1 s + b_0}{1 + a_1 s + a_0}, \quad (16)$$

работающим при наличии неизвестного смещенного гармонического внешнего возмущения (2). Постоянные числовые коэффициенты объекта (16) и гармонической помехи (2) примем со значениями:

$$\begin{aligned} a_0 = a_1 = -1; \quad \sigma_0 = \sigma = \omega = 1; \\ b_0 = b_1 = 1; \quad \varphi = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Для управления описанным объектом воспользуемся комбинированным адаптивным регулятором (10), (11), параметры которого зададим как:

$$\begin{aligned} \zeta = 12; \quad \beta_0 = 1; \\ T = 0,05; \quad \beta_1 = 80; \end{aligned} \quad (18)$$

Результаты имитационного моделирования системы при заданных параметрах (17), (18) представлены на рис. 3 (графики 1).

Для наибольшей наглядности полученных временных характеристик представленный рисунок также отражает динамические процессы, имеющие место в системе управления с адаптивным законом (4)–(8) (графики 2), постоянные коэффициенты которого выбраны со следующими значениями:

$$\begin{aligned} \gamma_0 = 10; \quad \gamma_* = 1; \\ k_a = 450; \quad \theta_0 = 1. \end{aligned}$$

Представленные графики показывают, что, наряду с сохранением необходимого качества работы комбинированной системы (9)–(11), в ней имеет место более высокое быстродействие по сравнению с адаптивной системой (1), (2), (4)–(8).

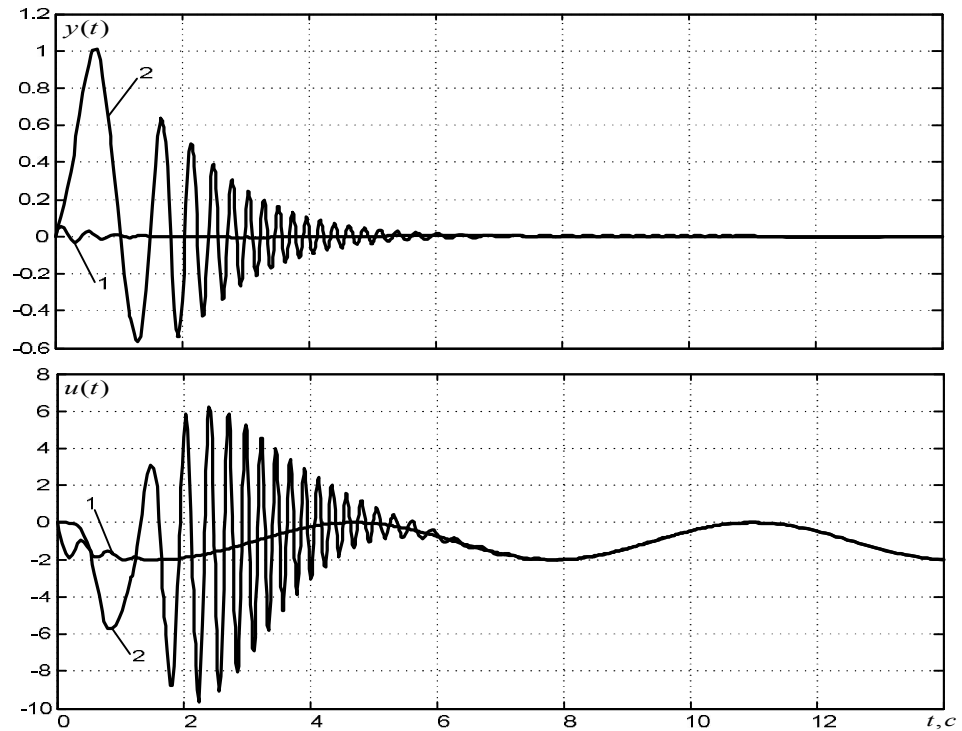


Рис. 3. Выход объекта $y(t)$, сигнал управления $u(t)$ в системе с адаптивным регулятором (10), (11) (графики 1) и в адаптивной системе с законом (4)–(8) (графики 2)

Введем в динамический объект (16) непериодическую нестационарность по внутренним переменным состояния, представив его модель соотношениями (12) с матрицами и векторами:

$$\begin{aligned}
 A(t, x) &= \left[\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & a_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \rho_1(t) & \rho_2(t) \end{pmatrix} \right] x(t); & \rho_1(t) &= l_1 \rho(t); \\
 & & \rho_2(t) &= l_2 \rho(t); \\
 L^T &= (l_1 \quad l_2); & b^T &= (0 \quad b_2); & f^T(t) &= (0 \quad f_2(t)); \\
 & & & & & a_1 = a_2 = 1; \quad l_1 = l_2 = 1; \quad b_2 = 1; \\
 & & & & & \rho(t) = 5 \sin((1,5 \sin(2,3t) e^{-0,23t} - 1)t); & f_2(t) = 1 + \sin t;
 \end{aligned} \tag{19}$$

и выполним имитационное моделирование системы с адаптивными алгоритмами (10), (11), (18), в которых интегральную настройку загрузим элементом с зоной нечувствительности:

$$\frac{du_{um}(t)}{dt} = \begin{cases} \alpha_1 y(t) [z(t) - \phi], & z(t) > \phi, \quad \forall t \geq 0, \\ \alpha_1 y(t) [z(t) + \phi], & z(t) < -\phi, \quad \forall t \geq 0, \\ 0, & |z(t)| \leq \phi, \quad \forall t \geq 0, \end{cases} \tag{20}$$

где: $\phi = 0,01$ – величина зоны нечувствительности; и системы с комбини-



ваным робастным регулятором (13), (15) при параметрах:

$$\zeta = 45; \beta_0 = 45; \beta_1 = 30; T = 0,001.$$

Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 4.

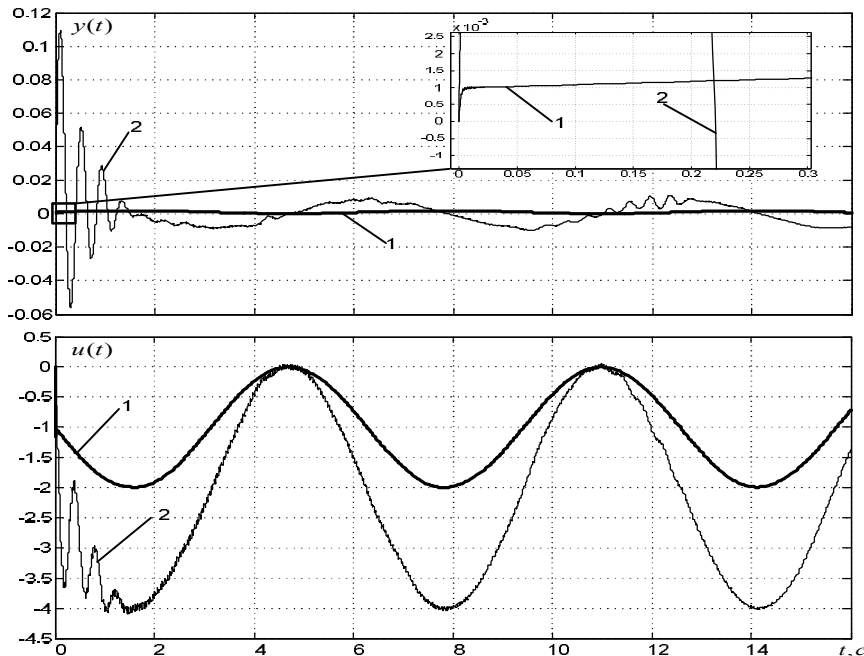


Рис. 4. Выход объекта $y(t)$, сигнал управления $u(t)$ в системе с робастным регулятором (13), (15) (графики 1) и в системе с адаптивным законом (10), (11) (графики 2)

Из рисунка видно, что комбинированная адаптивная система с алгоритмами настройки (11), (20) при управлении нестационарным динамическим объектом (12), (19) не обеспечивает требуемых показателей качества, что, в частности, обусловлено достаточно сильным отклонением выходной переменной от положения равновесия. Использование же в данной ситуации комбинированной робастной системы с контуром управления (13), (15) позволяет добиться как высокого быстродействия, так и достаточно хорошего качества функционирования – отклонение выхода объекта от заданного значения практически с первоначального момента времени не превышает 0,22 %.

Заключение

Предложен способ решения задачи компенсации гармонических смещенных возмущений. Построенные с использованием полученных комбинированных адаптивных и робастных алгоритмов системы управления являются альтернативой адаптивной системе, предложенной в [5], и в сравнении

с ней обладают более простой структурой, высоким быстродействием и хорошим качеством работы.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1 АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2010–2011 гг.)» по тематическому плану НИР ТОГУ на 2011 г. – проект «Робастное управление в периодических режимах динамическими объектами с запаздыванием».

Библиографические ссылки

1. *Бобцов А. А., Кремлев А. С.* Синтез наблюдателя в задаче компенсации конечномерного квазигармонического возмущения // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2005. – № 3.
2. *Арановский С. В., Бобцов А. А., Кремлев А. С.* Компенсация конечномерного квазигармонического возмущения для нелинейного объекта // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2006. – № 4.
3. *Арановский С. В., Бобцов А. А., Кремлев А. С., Лукьянова Г. В.* Робастный алгоритм идентификации частоты синусоидального сигнала // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2007. – № 3.
4. *Бобцов А. А., Кремлев А. С.* Алгоритм компенсации неизвестного синусоидального возмущения для линейного неминимально-фазового объекта // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 10.
5. *Бобцов А. А.* Адаптивное управление по выходу с компенсацией гармонического возмущения // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2009. – № 1.
6. *Семичевская Н. П.* Нелинейное робастное управление нестационарными объектами со стационарным наблюдателем // Информатика и системы управления. – 2006. – № 1 (11).
7. *Еремин Е. Л., Капитонова М. С.* Адаптивная система управления T -периодическими нелинейными объектами // Проблемы управления. – 2007. – № 1.
8. *Еремин Е. Л., Теличенко Д. А., Шеленок Е. А.* Комбинированные алгоритмы системы робастно-периодического управления нелинейным объектом с запаздыванием // Информатика и системы управления. – 2009. – № 3 (21).
9. *Лебянов Б. Н., Теличенко Д. А., Шеленок Е. А.* Комбинированная система управления априорно неопределенным нелинейным объектом с запаздыванием по состоянию // Информатика и системы управления. – 2010. – № 1 (23).
10. *Еремин Е. Л., Лебянов Б. Н., Шеленок Е. А.* Дискретные алгоритмы робастного управления нелинейно-нестационарным объектом в периодических режимах // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 1 (16).
11. *Шеленок Е. А.* Гибридная система управления нелинейным скалярным объектом в циклических режимах // Информатика и системы управления. – 2010. – № 3 (25).
12. *Еремин Е. Л., Теличенко Д. А., Шеленок Е. А.* Циклический режим работы в системе робастного управления манипулятором Барретта // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 3 (18).