

УДК 681.513.6

ПРИЛОЖЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ЦИФРОВОЙ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ К ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С НЕИЗВЕСТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ

*Гудкова Н.В., канд. техн. наук, доцент каф. САУ Южного федерального университета,
e-mail: tala_gud@rambler.ru*

Ключевые слова: динамический объект, адаптивная модель, функциональная обратная связь, адаптивный трансверсальный фильтр, метод наименьших квадратов, нерегулярные колебания, дрейф выходного сигнала.

Введение

Известно, что большинство традиционных методов синтеза автоматических систем управления базируется на использовании математических моделей управляемых объектов. Однако эти методы применимы далеко не всегда, т.к. на практике получить адекватное математическое описание динамических свойств сложного технологического процесса зачастую трудно, а иногда и невозможно.

В подобных случаях выходом из положения может стать применение адаптивных регуляторов, предназначенных для управления так называемыми неизвестными объектами (НО), то есть объектами с неизвестной математической моделью, иначе, объектами типа «черный ящик» [1–4].

Статья посвящена исследованию одного из способов управления НО, который базируется на принципах прямого и обратного адаптивного моделирования динамического объекта в процессе его функционирования [1]. Предполагается, что объект обладает колебательными свойствами, имеет детерминированные параметры и структуру, а его адаптивные модели реализуются в виде трансверсальных фильтров (АТФ) с весовыми коэффициентами, перестраиваемыми по методу наименьших квадратов (LMS).

Алгоритм функционирования системы управления

На рис. 1 показана одна из возможных структур адаптивной системы, которая предназначена для подавления колебаний в управляемом объекте и минимизации установившейся ошибки между временными отсчетами задающего (входного) воздействия g_k и выходного сигнала системы x_k , где $k = 0, 1, 2, \dots$

Для управления объектом в системе формируются два одновременно протекающих адаптивных процесса: процесс адаптивной идентификации (прямое моделирование НО) и процесс формирования управляющего воздействия (обратное адаптивное моделирование НО). Строго говоря, эти процессы не являются независимы

Рассматривается один из способов управления непрерывными колебательными объектами с неизвестной математической моделью, базирующийся на принципах прямого и обратного адаптивного моделирования. Для целей управления в исследуемой системе формируются два одновременно протекающих адаптивных процесса: процесс адаптивной идентификации (прямое моделирование объекта) и процесс формирования управляющего воздействия (обратное моделирование). Адаптивные модели объекта реализуются в виде адаптивных трансверсальных фильтров с весовыми коэффициентами, перестраиваемыми по методу наименьших квадратов в режиме реального времени. В отличие от традиционных замкнутых систем автоматического управления в рассматриваемой адаптивной структуре отсутствует физическая отрицательная обратная связь между выходом и входом. Ее роль играет функциональная обратная связь, замыкающаяся через адаптивный процесс. Показано, что предлагаемая методика синтеза такой системы позволяет минимизировать ошибки управления и демпфировать колебания, а также компенсировать случайный низкочастотный дрейф выходного сигнала в управляемом объекте. Результаты имитационного моделирования системы подтверждают эффективность предложенных решений.

ми, но при достаточно медленной адаптации можно считать, что они протекают независимо.

I. Подсистема адаптивной идентификации НО предназначена для реализации адаптивной модели (АМ), которая перестраивает свои весовые коэффициенты таким образом, чтобы минимизировать среднеквадратическую ошибку идентификации объекта $СКО_1 = E[\varepsilon_k^2]$.

В схеме $\varepsilon_k = x_k - y_k$, где y_k – выходной сигнал АМ.

Дискретное уравнение адаптивной модели имеет вид

$$y_k = \sum_{l=0}^L w_{lk}^{AM} u_{k-l}, \quad (1)$$

где u_k – управляющее воздействие, L – длина АТФ,

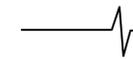
w_{lk}^{AM} – временные отсчеты l -го весового коэффициента фильтра на k -й итерации обучения.

Алгоритм LMS₁, перестраивающий параметры АМ, представляет собой рекуррентное выражение

$$w_{l(k+1)}^{AM} = w_{lk}^{AM} + 2\mu^{AM} u_{k-l} \varepsilon_k, \quad (2)$$

где μ^{AM} – параметр (шаг) сходимости алгоритма идентификации.

II. Подсистема адаптивного обратного моделирования НО предназначена для формирования управ-



ляющего воздействия u_k , которое минимизирует среднеквадратическую ошибку управления $СКО_2 = E[e_k^2]$, где

$$e_k = x_{\text{э}k} - x_k. \quad (3)$$

Здесь $x_{\text{э}k}$ – сигнал, который является эталонным для выходного сигнала управляемого объекта. В рассматриваемой системе он представляет собой задержанный на m тактов сигнал g_k , т.е. $x_{\text{э}k} = g_{k-m}$.

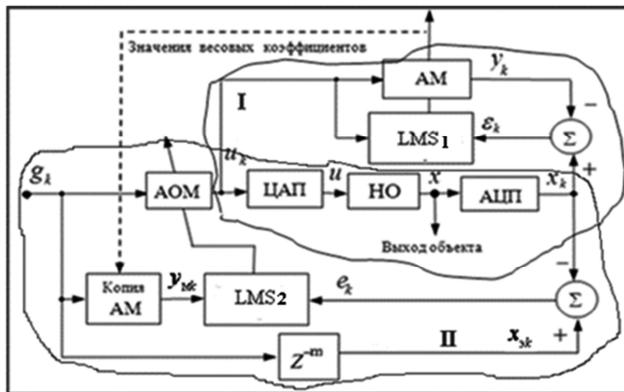


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления НО

Роль регулятора, формирующего управляющее воздействие, играет адаптивная обратная модель объекта (АОМ), дискретное уравнение которой имеет вид

$$u_k = \sum_{l=0}^L w_{lk}^p g_{k-l}. \quad (4)$$

Алгоритм LMS₂ по аналогии с (2) перестраивает весовые коэффициенты w_{lk}^p по формуле

$$w_{l(k+1)}^p = w_{lk}^p + 2\mu^p y_{m(k-l)} e_k, \quad (5)$$

где μ^p – шаг сходимости алгоритма управления. Сигнал y_{mk} , входящий в выражение (5), является выходным сигналом копии АМ управляемого объекта и вычисляется по формуле

$$y_{mk} = \sum_{l=0}^L w_{lk} g_{k-l}. \quad (6)$$

Для подавления низкочастотного дрейфа сигнала x_k , а также в целях повышения запаса устойчивости и быстродействия системы в АОМ вводится весовой коэффициент смещения w'_k , адаптивная перестройка которого также осуществляется с помощью алгоритма LMS по формуле

$$w'_{k+1} = w'_k + 2\mu^p e_k. \quad (7)$$

Закон управления (4) в этом случае принимает вид

$$u_k = w'_k + \sum_{l=0}^L w_{lk}^p g_{k-l}. \quad (8)$$

После завершения переходных процессов в системе величина СКО₂ стремится к своему минимальному значению, а отклик объекта x_k на задающее воздействие g_k становится приблизительно равным эталонному сигналу $x_{\text{э}k}$.

Методика выбора параметров настройки адаптивных фильтров АМ и АОМ

Обычно качество систем управления динамическими объектами принято оценивать по запасу устойчивости, быстродействию и точности обработки так называемых медленных (по сравнению с переходными процессами) детерминированных задающих воздействий (уставок) вида:

1. $g(t) = g_0 1(t)$ (управление положением);
2. $g(t) = \Omega t$ (управление движением с постоянной скоростью);
3. $g(t) = at^2$ (управление движением с постоянным ускорением);
4. $g(t) = A_0 \cos(\omega t + \varphi)$ или $g(t) = A_0 \sin(\omega t + \varphi)$ (гармонические колебания или регулярная качка).

Параметрами настройки адаптивных моделей в рассматриваемой системе являются число коэффициентов АТФ и параметры сходимости алгоритмов LMS μ^{AM} и μ^p . Они должны выбираться из условий обеспечения требуемых показателей качества переходных процессов (колебательности и времени регулирования) и допустимых величин ошибок управления в установившихся режимах [5].

В настоящее время в специальной литературе практически отсутствуют рекомендации по выбору параметров настройки адаптивных фильтров, применяемых в системах управления, а приводимые примеры носят частный характер. Это обусловлено большим разнообразием задач, а также отсутствием во многих случаях строгого математического обоснования их решения.

В работах [2, 3] предложена методика синтеза программируемых АТФ, предназначенных для идентификации и управления непрерывными объектами типа «черный ящик» при минимальной априорной информации о входных сигналах и динамике объекта. Эта методика не дает оптимальных решений, но, как показала практика, для большого класса систем она обеспечивает приемлемое качество процессов управления.

Исходными данными для расчета являются:

- 1) время установления $t_{\text{уст}}$ и, по возможности, вид переходной характеристики неизвестного объекта;
- 2) приблизительный частотный диапазон и предельная мощность входных сигналов адаптивных фильтров.

Поскольку процессы в управляющей системе носят дискретный характер, в первую очередь необходимо выбрать интервал квантования сигналов по времени T . Для систем автоматического управления обычно он выбирается из соотношения

$$T_{\text{алг}} \leq T \leq (0,01 \div 0,001) t_{\text{уст}}, \quad (9)$$

где $T_{\text{алг}}$ – время обработки информации в управляющем компьютере и преобразователях ЦАП/АЦП.

Из выражения (9) видно, что нижняя граница для интервала T определяется быстродействием используемой цифровой аппаратуры, а верхняя – инерционностью объекта управления. Поэтому выбор величины T обычно является результатом компромиссного решения.

Для выбора параметров настройки адаптивного фильтра используются соотношения вида

$$\mu(L+1) \approx \frac{M}{P} \quad (10)$$

и

$$(L+1) \cong \left\lceil MT_{\text{ско}} \right\rceil, \quad (11)$$

где P – средняя мощность сигнала на входе АТФ; M ($0 < M < 1$) – допустимое относительное среднее значение СКО, от которого зависит устойчивость, точность и скорость адаптации фильтра; $T_{\text{ско}}$ – число итераций адаптивного процесса в фильтре.

Анализ показал, что для получения хорошего качества управления в рассматриваемой структуре величины $T_{\text{ско}}$ АМ и АОМ должны выбираться из условия $T_{\text{ско}} \leq t_{\text{уст}} / T$ при значениях $M \approx 0,001 - 0,2$.

Следует отметить, что зачастую мощность сигналов на входах адаптивных фильтров заранее не известна. В таких случаях для начала в качестве расчетной величины можно принять значение предельно допустимой мощности постоянного входного сигнала. Это приведет к затягиванию процессов адаптации, но повысит запас устойчивости системы управления. В ходе эксплуатации системы параметры настройки могут уточняться.

Радикальным решением проблемы выбора оптимальных значений параметра μ для каждой из адаптивных моделей является их расчет в режиме реального времени, процедура которого предложена в [6].

Поясним эту процедуру на примере расчета текущих значений параметра μ для подсистемы идентификации неизвестного объекта.

1. Вычисляется текущее среднее значение мощности сигнала на входе АМ по формуле $P_k = E[u_k^2]$. Для усреднения можно использовать цифровой адаптивный фильтр низких частот (ФНЧ), реализуемый в виде дискретного уравнения [7]

$$P_k = (1 - \lambda)(u_k^2 - u_{k-1}^2) + (1 - 2\lambda)P_{k-1}, \quad (12)$$

где $0 < \lambda < 0,5$ – параметр, отвечающий за точность и скорость сходимости этого алгоритма.

2. Далее вычисляется текущее значение μ_k^{AM} по формуле (10), которая в данном случае модифицируется

$$\mu_k^{\text{AM}} \approx \frac{M}{(L+1)P_k}.$$

Аналогичным образом рассчитывается параметр $\mu_k^{\text{АОМ}}$ для АОМ.

Помимо параметров адаптивных моделей на качество управления влияет также число тактов задержки m эталонного сигнала $x_{\text{э}k}$, которая учитывает инерционные свойства канала управления. Ее выбор носит эмпирический характер. Практика показала, что эта задержка не должна превышать половины длины АОМ.

Необходимо подчеркнуть, что в отличие от традиционной замкнутой системы автоматического управления в рассматриваемой схеме отсутствует физическая отрицательная обратная связь между выходом и входом. Ее роль играет функциональная (алгоритмическая) обратная связь, замыкающаяся через адаптивный процесс.

Имитационное моделирование адаптивной системы управления на ПК

Ниже приводятся результаты компьютерного моделирования процессов в системе адаптивного управления НО, имитационная модель которого представлена передаточной функцией колебательного звена

$$W(s) \approx \frac{0,8}{(s^2 + 0,4s + 1)}$$

с временем установления переходной характеристики $t_{\text{уст}} \approx 20$ с.

Выбраны следующие параметры адаптивной системы.

Число тактов задержки эталонного сигнала $m = 0$. Интервал квантования сигналов по времени $T = 0,2$ с. Нормированные параметры типовых входных воздействий: $g_0 = 1$; $\Omega = 0,008$; $a = 0,000028$; $A_0 = 1$; $\omega = 0,4$.

Предельные нормированные мощности входного и управляющего воздействий $E[g_k^2] = E[u_k^2] = 1$. Длина фильтров, реализующих АМ и АОМ, $L = 3$. Допустимые относительные средние значения СКО идентификации и управления $M_1 = 0,1$ и $M_2 = 0,02$, соответственно. Используется алгоритм управления (8). На рис. 2-7 показаны для сравнения некоторые характерные процессы в неуправляемом объекте и в адаптивной системе (в качестве типовых воздействий использовались их дискретные модели).

Полученные данные можно прокомментировать следующим образом.

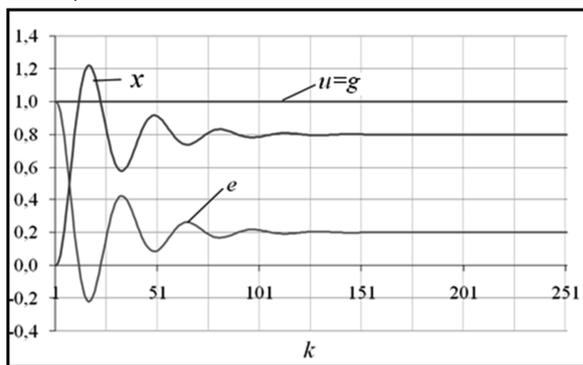
В неуправляемом объекте:

1) переходные характеристики при $g_k = 1$ имеют колебательный характер, а статическая ошибка управления $e_{\text{ст}} = g_0 - x_0$ постоянна и не равна нулю (рис. 2а);

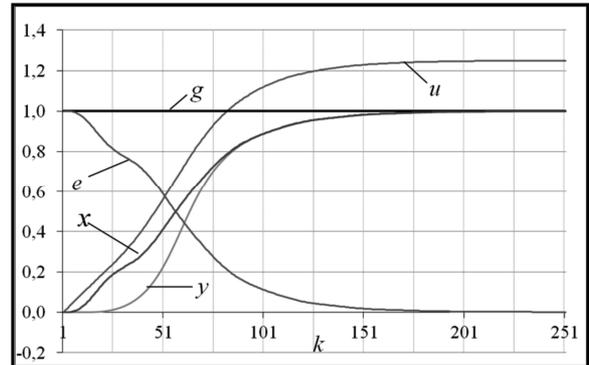
2) при $g_k = \Omega \cdot kT$ скоростная ошибка $e_{\text{ск}}$ линейно возрастает во времени с постоянной скоростью, равной величине $\Omega \cdot e_{\text{ст}}$. (рис. 3а);

3) при $g_k = a \cdot (kT)^2$ ошибка по ускорению $e_{\text{уск}}$ возрастает во времени с постоянным ускорением, равным величине $a \cdot e_{\text{ст}}$ (рис. 4а);

4) при $g_k = A_0 \cdot \text{Cos}(\omega kT + \varphi)$ ошибка установившегося режима изменяется по косинусоидальному закону с амплитудой, равной $e_{\text{ст}}$ неуправляемого объекта (рис. 5 а).

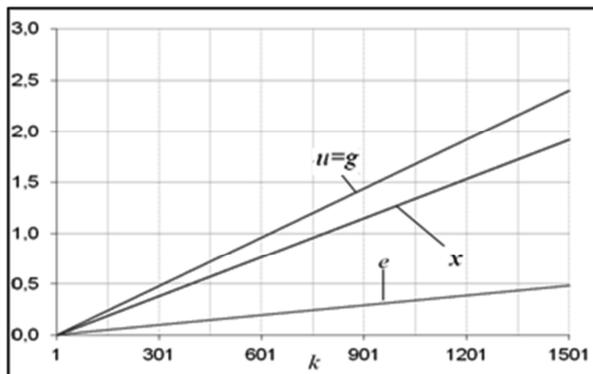


а)

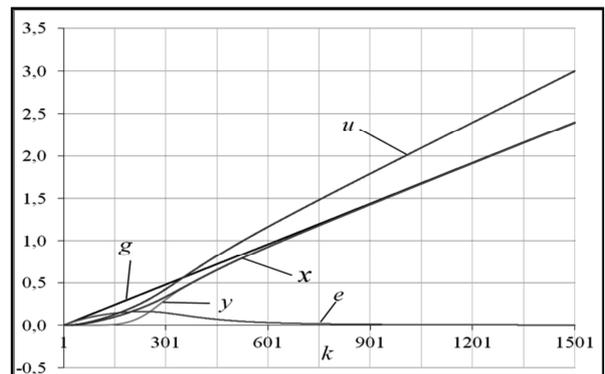


б)

Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования процессов в неуправляемом НО (а) и в адаптивной системе (б) при $g_k = 1$

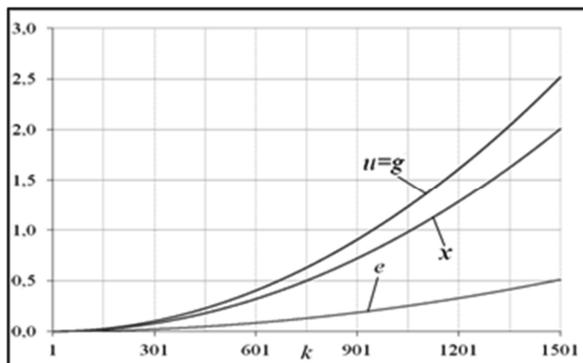


а)

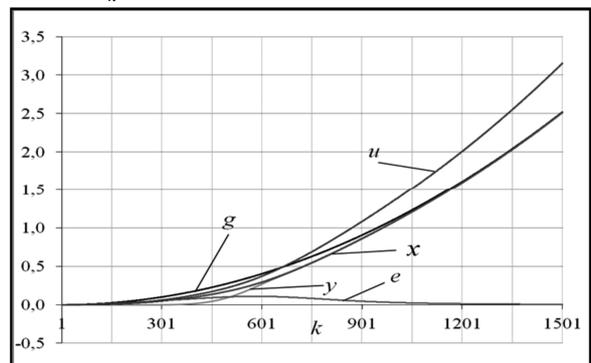


б)

Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования процессов в неуправляемом НО (а) и в адаптивной системе (б) при $g_k = \Omega kT$

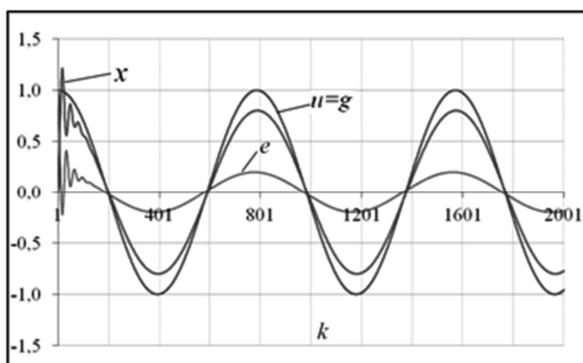


а)

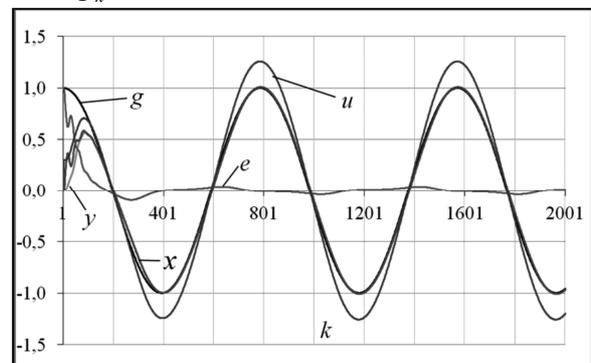


б)

Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования процессов в неуправляемом НО (а) и в адаптивной системе (б) при $g_k = a \cdot (kT)^2$



а)



б)

Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования процессов в неуправляемом НО (а) адаптивной системе (б) при $g_k = A_0 \cdot \cos(\omega kT + \varphi)$

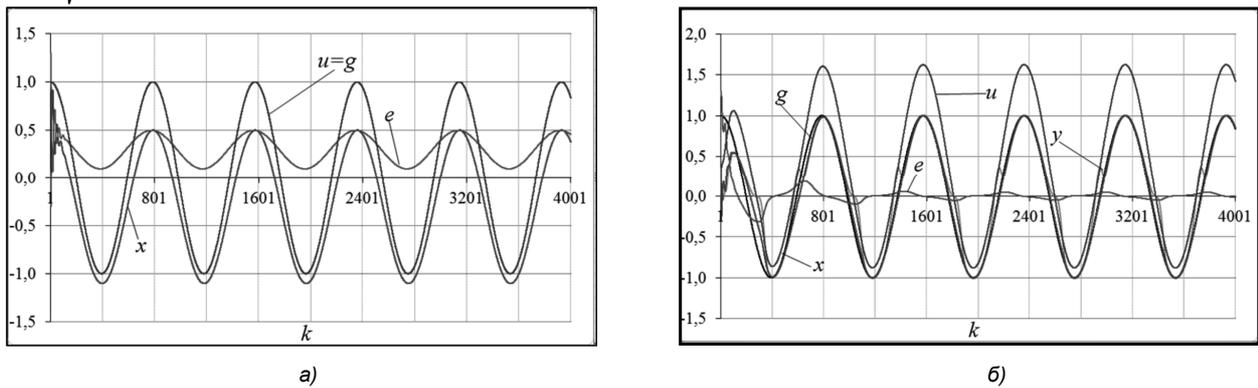


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования процессов в неуправляемом НО (а) и в адаптивной системе (б) при $g_k = A_0 \cos(\omega k T + \varphi)$ и постоянном дрейфе выходного сигнала $x_o(t)$

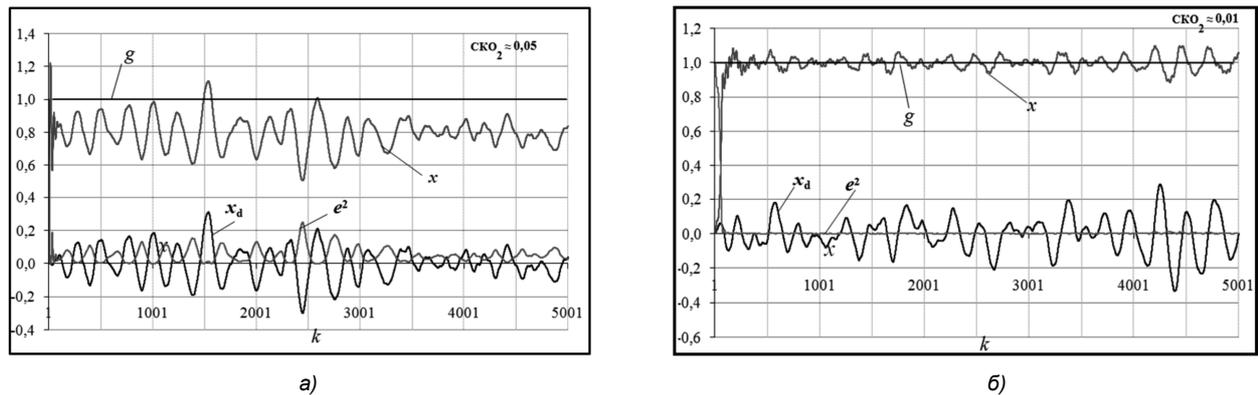


Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования процессов в неуправляемом НО (а) и в адаптивной системе (б) при $g_k = 1$ и дрейфе выходного сигнала $x_o(t)$ в виде низкочастотных нерегулярных колебаний

В адаптивной системе:

1) полностью подавляются собственные колебания объекта, при этом установившиеся ошибки при обработке типовых задающих воздействиях равны нулю (рис. 2б – рис. 5б);

2) рис. 6а и 6б иллюстрируют способность адаптивной системы подавлять постоянный дрейф выходного сигнала неуправляемого объекта;

3) на рис. 7а и 7б показаны процессы компенсации адаптивной системой случайного дрейфа выходного сигнала в виде низкочастотных нерегулярных колебаний в неуправляемом объекте (их имитационная модель получена автором путем фильтрации «дискретного белого шума» специальным алгоритмом).

Заключение

Анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- отличительной особенностью функционирования рассматриваемой системы является одновременное выполнение адаптивных процедур прямого и обратного моделирования управляемого объекта, предназначенных для формирования управляющих воздействий в режиме реального времени.

- адаптивные модели объекта реализуются в виде адаптивных трансверсальных фильтров, для синтеза которых не требуется его математическое описание.

- имитационное моделирование на ПК показывает, что адаптивная система:

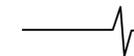
1) успешно демпфирует собственные колебания и компенсирует постоянный и низкочастотный дрейф выходного сигнала в виде нерегулярных колебаний;

2) обладает способностью приводить к нулю установившиеся ошибки управления объектом в режимах регулярной качки, а также в режимах управления по положению, по скорости и ускорению, что дает основание отнести данную структуру к классу астатических систем, по меньшей мере, третьего порядка.

Таким образом, можно считать, что рассмотренный способ управления колебательными объектами может успешно конкурировать с традиционными замкнутыми системами, особенно, при неизвестном или недостаточно адекватном математическом описании объекта и сложности реализации высокого порядка астатизма.

Литература

1. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / М: Радио и связь, 1989.
2. Гудкова Н.В. Алгоритмы адаптивной идентификации технических объектов. Автоматизация и современные технологии. М: Машиностроение. №8. 2005.
3. Гудкова Н.В. Цифровое управление техническими объектами с применением адаптивного обратного моделирования. Автоматизация и современные технологии. М: Машиностроение. №4, 2006.
4. Widrow B., Walach E. Adaptive Inverse Control. A Signal Processing Approach, Wiley, Hoboken, NJ, 2008.
5. Бесекинский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб, Изд-во «Профессия», 2004.
6. Гудкова Н.В. Адаптивные алгоритмы регулирования уровня дискретных сигналов. Цифровая обработка сигналов. № 2, 2005.



7. Гудкова Н.В. Адаптивные цифровые фильтры в системах промышленной электроники. Автоматизация и современные технологии. М: Машиностроение. №7, 2005.

APPLICATION THE PRINCIPLE DIGITAL ADAPTIVE FILTERING TO CONTROL DYNAMICAL PLANT WITH UNKNOWN MATHEMATICAL MODEL

Gudkova N.

The paper considers a method of control to the unknown plant based on the direct and inverse adaptive modeling.

Adaptive models are adaptive transversal filters with the weights, calculated by Least Mean Square algorithm. The control system is developed. The minimization of the error between system input and plant output is the target. There are two simultaneous adaptive processes in the system. The direct adaptive identification is used to build the plant adaptive model. The inverse model is a control device for the plant. The physical negative feedback between an output and an input of the adaptive system is absent. However, the adaptive system has a functional feedback. The results of computer simulation of an adaptive control system are presented.

ПОЗДРАВЛЕНИЯ ЮБИЛЯРУ



*21 февраля заведующему кафедрой ЭВМ,
доктору технических наук, профессору,
Заслуженному деятелю науки и техники РФ,
Почетному гражданину города Рязани*

**ЗЛОБИНУ
ВЛАДИМИРУ КОНСТАНТИНОВИЧУ**

исполнилось 75 лет

Вся деятельность Злобина В.К. тесным образом связана с Рязанским радиотехническим институтом-университетом. Свой трудовой путь, после окончания в 1960 году кафедры ЭВМ по специальности «Математические и счетно-решающие приборы и устройства», он начал на этой же кафедре в должности младшего научного сотрудника. Злобин В.К. более 45 лет проработал в РРТИ-РГРТА-РГРТУ в различных должностях, в том числе в 1983-2007 годах (почти 25 лет) в должности ректора, с 1980 года по настоящее время (более 30 лет) в должности заведующего кафедрой ЭВМ. Одновременно по совместительству и на общественных

началах исполнял обязанности зам. начальника и научного руководителя ОКБ «Спектр», научного руководителя НИИ «Фотон». Под его руководством подготовлено 15 кандидатов и докторов наук. Опубликовано 2 монографии, 4 учебно-методических пособия с грифом УМО, множество научных статей в российских и зарубежных изданиях по цифровой обработке изображений.

За многолетний добросовестный труд Злобин В.К. награжден правительственными наградами, среди которых Орден «Знак Почета». Ему присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники РФ». Успехи в области развития высшего профессионального образования и плодотворная научная деятельность отмечены многими ведомственными наградами, такими как знак Минобразования СССР «За отличные успехи в работе», медаль Роскосмоса «Звезда Циолковского», Золотая медаль им. академика В.Ф. Уткина, медаль им. С. Королева Федерации космонавтики России, медаль им. Альфреда Нобеля Российской академии естествознания. В 2007 году Злобину В.К. присвоено почетное звание «Почетный гражданин г. Рязани».

В 2009 году Злобину В.К. присвоено почетное звание основателя научной школы «Цифровая обработка изображений». За заслуги в области отечественного образования Злобин В.К. награжден нагрудным знаком Российской академии естествознания «Золотая кафедра России».

Желаем Владимиру Константиновичу доброго здоровья и дальнейших творческих успехов.

Редколлегия журнала «Цифровая обработка сигналов»