

# Приложение принципов адаптивной фильтрации сигналов к задаче синтеза инвариантных систем управления неизвестными динамическими объектами

Н.В. Гудкова<sup>1</sup>, К.В. Бесклубова<sup>2</sup>, А.Е. Кульченко<sup>3</sup>

Южный Федеральный Университет,

<sup>1</sup>talagudkova@gmail.com,

<sup>2</sup>kvbesklubova@gmail.com,

<sup>3</sup>liandal@rambler.ru

**Аннотация** — Рассматривается способ управления динамическим объектом 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 идентификации (прямое моделирование объекта) и процесс формирования управляющего воздействия (обратное моделирование объекта). Прямая и обратная адаптивные модели объекта реализуются в виде трансверсальных фильтров с весовыми коэффициентами, перестраиваемыми по методу наименьшего квадрата. 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 системы позволяет демпфировать колебания, обеспечивает инвариантность к типовым воздействиям, а также компенсирует случайный низкочастотный дрейф выходного сигнала в управляемом объекте. Результаты моделирования адаптивной системы подтверждают эффективность предложенных решений.

**Ключевые слова** — динамический объект, адаптивная модель, функциональная обратная связь, адаптивный трансверсальный фильтр, метод наименьшего квадрата, случайный дрейф выходного сигнала, инвариантная система.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что большинство традиционных методов синтеза автоматических систем управления техническими объектами базируется на использовании их математических моделей. Однако на практике априорно получить адекватное математическое описание динамических свойств сложного объекта

зачастую трудно, а иногда просто невозможно. В подобных случаях выходом из положения может служить применение систем, предназначенных для адаптивного управления неизвестными объектами, иначе, неопределенными объектами, т.е. объектами типа «черный ящик» [1–5].

Центральной темой статьи является исследование одного из вариантов построения адаптивной системы, который базируется на принципах прямого и обратного адаптивного моделирования динамического объекта в процессе его функционирования.

## II. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ

На рис. 1 показана структурная схема цифровой адаптивной системы с адаптивными моделями неизвестного объекта (НО), реализуемых программно в виде адаптивных трансверсальных фильтров, весовые коэффициенты которых перестраиваются по методу наименьшего квадрата (Least Mean Square, LMS).

Целью управления является минимизация ошибки  $e_k = g_k - x_k$  между временными отсчетами задающего воздействия (уставки)  $g_k$  и выходного сигнала объекта  $x_k$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$  – индекс дискретного времени. Для ее реализации в системе формируются два одновременно протекающих адаптивных процесса: процесс адаптивной идентификации (прямое моделирование неизвестного объекта) и процесс формирования управляющего воздействия (обратное адаптивное моделирование неизвестного объекта).

Подсистема адаптивной идентификации неизвестного объекта (контур I) предназначена для реализации прямой адаптивной модели (АМ), которая

должна перестраивать свои весовые коэффициенты таким образом, чтобы минимизировать среднеквадратическую ошибку идентификации  $СКО_1 = E[\varepsilon_k^2]$ . В схеме  $\varepsilon_k = x_k - y_k$ , где  $y_k$  – выходной сигнал прямой адаптивной модели, дискретное уравнение которой имеет вид

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

где  $u_k$  – временные отсчеты управляющего воздействия,  $L$  – длина адаптивного фильтра,  $w_{lk}^{AM}$  – отсчеты  $l$ -го весового коэффициента фильтра. Алгоритм  $LMS_1$ , перестраивающий параметры адаптивной модели, представляет собой рекуррентное выражение

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

где  $\mu^{AM}$  – параметр (шаг) сходимости алгоритма.

Подсистема адаптивного обратного моделирования неизвестного объекта (контур II) предназначена для формирования управляющего воздействия  $y_{mk}$ , которое должно минимизировать среднеквадратическую ошибку  $e_k = x_{\varepsilon k} - x_k$ . Здесь сигнал  $x_{\varepsilon k}$  является эталонным сигналом для выхода управляемого объекта  $x_k$ . В рассматриваемой системе он представляет собой задержанный на  $m$  тактов сигнал  $g_k$ , т.е.  $x_{\varepsilon k} = g_{k-m}$ .

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

$$u_k = \sum_{l=0}^L w_{lk}^P g_{k-l}. \quad (3)$$

Алгоритм  $LMS_2$  по аналогии с (2) перестраивает весовые коэффициенты адаптивной обратной модели  $w_{lk}^P$  по формуле

$$w_{l(k+1)}^P = w_{lk}^P + 2\mu^P y_{m(k-l)} e_k, \quad (4)$$

где  $\mu^P$  – шаг сходимости алгоритма. Сигнал  $y_{mk}$ , входящий в выражение (4), является выходным сигналом копии АМ управляемого объекта и вычисляется по формуле

$$y_{mk} = \sum_{l=0}^L w_{lk}^{AM} g_{k-l}. \quad (5)$$

Для подавления возможного низкочастотного дрейфа сигнала  $x$ , а также в целях повышения запаса устойчивости и быстродействия системы, в обратную модель объекта дополнительно вводится весовой коэффициент смещения  $w'_k$ , адаптивная перестройка

которого также осуществляется с помощью алгоритма LMS по формуле [1, 5]

$$w'_{k+1} = w'_k + 2\mu^P e_k. \quad (6)$$

Закон управления (3) в этом случае принимает вид

$$u_k = w'_k + \sum_{l=0}^L w_{lk}^P g_{k-l}. \quad (7)$$

При правильно выбранных параметрах адаптивных моделей величина  $СКО_2$  после завершения переходных процессов в системе становится равной своему минимальному значению, а отклик объекта  $x_k$  на задающее входное воздействие  $g_k$  приближается к эталонному сигналу  $x_{\varepsilon k}$ .

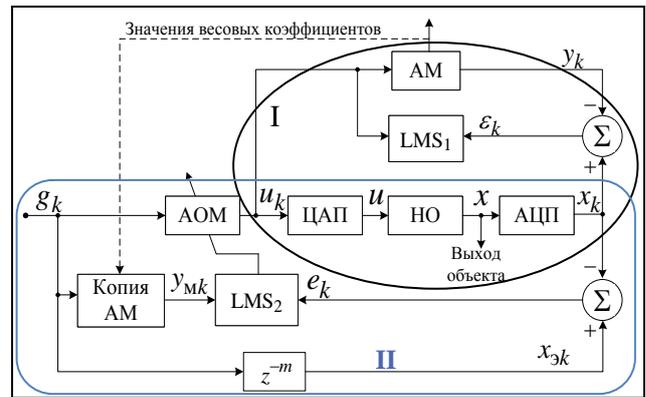


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления неизвестным объектом

### III. МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТА

Параметрами настройки адаптивных моделей в рассматриваемой системе являются число коэффициентов адаптивного фильтра и параметры сходимости алгоритмов LMS  $\mu^{AM}$  и  $\mu^P$ . Они должны выбираться из условий обеспечения требуемых показателей качества переходных процессов (допустимых значений перерегулирования и времени регулирования) и допустимых величин ошибок управления в установившихся режимах. Принято считать, что если установившаяся ошибка  $e_k$  между задающим воздействием и выходом управляемого объекта равна нулю, система является селективно инвариантной по отношению к этому воздействию [6].

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 невозможностью во многих случаях строгого математического обоснования их решения.

В работах [2, 3, 5] предложена методика синтеза программируемых адаптивных фильтров, 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 технических систем она обеспечивает приемлемое качество процессов управления.

Исходными данными для расчета являются:

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

Поскольку процессы в управляющей системе носят дискретный характер, в первую очередь необходимо выбрать интервал дискретизации сигналов по времени. Для систем автоматического управления он обычно определяется соотношением

$$T_a \leq T \leq (0,01 - 0,001)t_{уст}, \quad (8)$$

где  $T_a$  – время обработки информации в управляющем компьютере и в аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователях (ЦАП и АЦП).

Из выражения (8) видно, что нижняя граница для интервала  $T$  определяется быстродействием используемой цифровой аппаратуры, а верхняя граница – инерционностью объекта управления. Поэтому выбор этой величины обычно является результатом компромиссного решения.

Для расчета параметров настройки адаптивного фильтра используются соотношения вида

$$\mu(L+1) = M/P \quad \text{и} \quad (L+1) = MT_{ско}, \quad (9)$$

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;  $T_{ско}$  – число тактов переходного процесса в фильтре.

Анализ показал, что для получения хорошего качества управления в рассматриваемой структуре величины  $T_{ско}$  адаптивных моделей должны выбираться из условия  $T_{ско} \leq T_{уст}/T$  при значениях

$$M \approx 0,001 - 0,2.$$

Т.к. зачастую мощность сигналов на входах адаптивных фильтров заранее неизвестна, то для начала в качестве расчетной величины можно принять значение предельно допустимой для данной системы мощности 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  $\mu$  для каждой из адаптивных моделей является их расчет в режиме реального времени так, как это показано в [6].

Помимо параметров адаптивных моделей на качество управления влияет также число тактов задержки  $m$  эталонного сигнала  $x_{э_k}$  относительно задающего воздействия, которая учитывает инерционные свойства канала управления. Ее выбор носит эмпирический характер. Практика показывает, что эта величина не должна превышать половины длины адаптивного фильтра.

#### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ

С целью исследования свойств адаптивной системы в работе выполнено компьютерное моделирование некоторых процессов управления неизвестным динамическим объектом, имитационная модель которого задана в виде передаточной функции колебательного звена  $W(s) = \frac{0,8}{s^2 + 0,4s + 1}$  со временем установления переходной характеристики  $t_{уст} \approx 20$  с. Для повышения качества управления в системе использовался закон управления (7).

Были выбраны следующие значения параметров адаптивной системы: интервал дискретизации сигналов по времени  $T = 0,2$ с; нормированные параметры задающих воздействий:  $g_0 = 1$ ;  $\Omega = 0,008$ ; допустимые нормированные мощности входных воздействий  $E[g_k^2] = E[u_k^2] = 1$ ; длина фильтров, реализующих адаптивные модели,  $L=3$ ; допустимые величины относительных средних значений СКО идентификации и управления  $M_1 = 0,1$  и  $M_2 = 0,02$ ; число тактов задержки эталонного сигнала  $m = 0$ .

На рис. 2 и рис. 3 показаны результаты моделирования, иллюстрирующие поведение неуправляемого объекта и адаптивной системы в типовых режимах отработки задающих воздействий (постоянного воздействия  $g_k = g_0$  и воздействия, нарастающего с постоянной скоростью  $g_k = \Omega k T$ ).

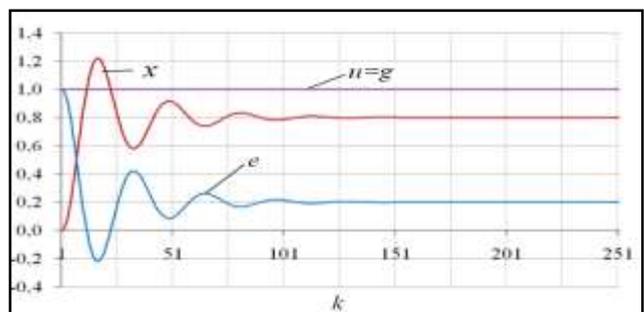
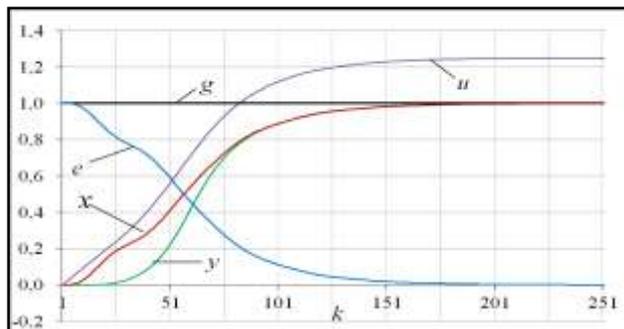


Рис. 2а. Процессы в неуправляемом объекте при  $g_k = g_0$

При сравнении рисунков видно, что в неуправляемом объекте переходные характеристики

при  $g_k = g_0$  (режим постоянного входного воздействия) имеют колебательный характер, а установившаяся статическая ошибка управления  $e_{ст}$  постоянна и не равна нулю; при  $g_k = \Omega k T$  (режим движения с постоянной скоростью  $\Omega$ ) установившаяся скоростная ошибка  $e_{ск}$  линейно возрастает во времени



с постоянной скоростью, равной величине  $\Omega e_{ст}$ .

Рис. 26. Процессы в адаптивной системе при  $g_k = g_0$

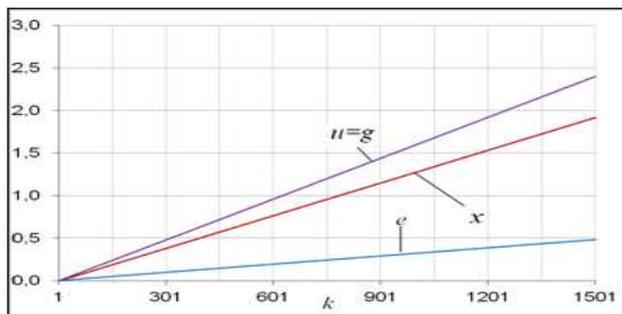


Рис. 3а. Процессы в неуправляемом объекте при  $g_k = \Omega k T$

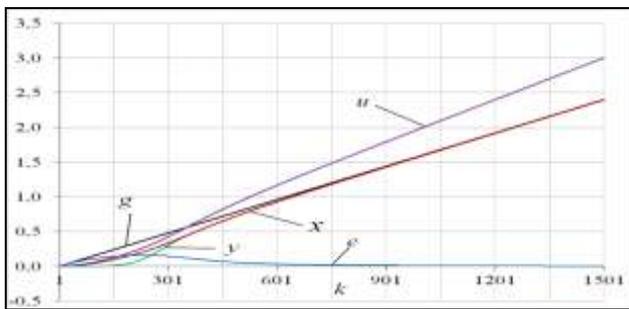


Рис. 3б. Процессы в адаптивной системе при  $g_k = \Omega k T$

В адаптивной системе в этих же режимах полностью подавляются собственные колебания объекта, при этом установившиеся ошибки управления практически равны нулю.

К недостаткам схемы можно отнести некоторое уменьшение быстродействия системы по сравнению с быстродействием управляемого объекта, что обусловлено инерционным запаздыванием процессов

идентификации. При этом остается открытым вопрос о гурости и устойчивости системы в целом.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ 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 цифровых адаптивных фильтров с переменными параметрами, для синтеза которых не требуется его математическое описание.

- Адаптивная система

1. обладает способностью демпфировать собственные колебания в объекте;
2. обладает свойством минимизировать установившиеся ошибки управления при типовых задающих воздействиях, что дает основание отнести данную структуру к классу селективно инвариантных систем [7].

Эти выводы означают, что рассмотренный способ управления динамическими объектами может в ряде случаев успешно конкурировать с традиционными инвариантными системами автоматического управления, особенно при неизвестном или недостаточно адекватном математическом описании объекта или технологического процесса.

## ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 13-08-00249).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. Радио и связь, 1989.
- [2] Гудкова Н.В. Алгоритмы адаптивной идентификации технических объектов // Автоматизация и современные технологии. 2005. № 8. С. 3-9.
- [3] Гудкова Н.В. Цифровое управление техническими объектами с применением адаптивного обратного моделирования // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 4. 24-29.
- [4] Widrow B., Walach E. Adaptive Inverse Control // A Signal Processing Approach. Wiley, Hoboken, NJ. 2008.
- [5] Гудкова Н.В. Приложение принципов цифровой адаптивной фильтрации к задаче управления динамическим объектом с неизвестной математической моделью // Цифровая обработка сигналов. 2013. № 1. С. 61-66.
- [6] Гудкова Н.В. Адаптивные алгоритмы регулирования уровня дискретных сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2005. № 2. С. 11-14.
- [7] Мисриханов М.Ш. Инвариантное управление многомерными системами: алгебраический подход. М.: Наука, 2007.