

Приложение принципов адаптивного моделирования к задачам управления динамическими объектами типа «чёрный ящик»

Наталья Гудкова (Ростовская обл.)

В статье рассматривается способ управления динамическими объектами с неизвестными математическими моделями, основанный на принципах прямого и обратного адаптивного моделирования объекта. При этом адаптивные модели в системе управления реализуются в виде трансверсальных фильтров с весовыми коэффициентами, перестраиваемыми по алгоритму наименьших квадратов в режиме реального времени. Результаты имитационного моделирования системы свидетельствуют об эффективности использования предложенных алгоритмов для адаптивного управления объектами с параметрической и структурной неопределённостью.

ВВЕДЕНИЕ

В современных системах управления технологическими процессами всё более широкое применение находят цифровые адаптивные фильтры (АФ). Одним из возможных приложений АФ в таких системах является их использование в качестве адаптивных моделей управляемых объектов со структурной и/или параметрической неопределённостью, другими словами, неизвестных объектов (НО) или объектов типа «чёрный ящик» [1–4]. Все эти определения относятся к динамическим объектам, математическое описание которых по каким-либо причинам отсутствует, что делает невозможным синтез управляющего устройства стан-

дартными методами теории автоматического управления.

Необходимым условием функционирования систем данного класса являются динамические, т.е. в режиме реального времени, идентификация и синтез управляющих воздействий на объект.

В статье рассматривается способ управления НО, основанный на прямом и обратном адаптивном моделировании объекта. При этом адаптивные модели в системе управления реализуются в виде адаптивных трансверсальных фильтров (АТФ) с весовыми коэффициентами, перестраиваемыми по методу наименьших квадратов (LMS).

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Структурная схема адаптивной системы показана на рисунке 1. Назначение системы – подавление колебаний в объекте и минимизация сигнала рассогласования (ошибки) между временными отсчётами задающего (входного) воздействия системы и выходного сигнала управляемого объекта x_k ($k = 0, 1, 2, \dots$).

Для этой цели в системе формируются два одновременно протекающих адаптивных процесса: процесс адаптивной идентификации (прямого моделирования) НО и процесс обратного адаптивного моделирования НО.

Подсистема адаптивной идентификации (прямого моделирования) НО предназначена для получения адаптивной модели (АМ) с перестраиваемыми весовыми коэффициентами, минимизирующими ошибку идентификации объекта $СКО_1 = E[\epsilon_k^2]$, где

$$\epsilon_k = x_k - y_k, \quad (1)$$

y_k – выходной сигнал АМ.

Уравнение адаптивной модели имеет вид:

$$y_k = \sum_{l=0}^L w_{lk} u_{k-l}, \quad (2)$$

где u_k – управляющее воздействие, L – длина АТФ, w_{lk} – временные отсчёты l -го весового коэффициента фильтра.

Алгоритм LMS, перестраивающий параметры АМ, представляет собой рекуррентное выражение:

$$w_{l(k+1)} = w_{lk} + 2\mu u_k - \epsilon_k, \quad (3)$$

где μ – параметр (шаг) сходимости алгоритма идентификации.

Подсистема адаптивного обратного моделирования НО предназначена для формирования управляющего воздействия u_k , которое минимизирует ошибку управления $СКО_2 = E[\epsilon_k^2]$, где

$$\epsilon_k = x_{эk} - x_k. \quad (4)$$

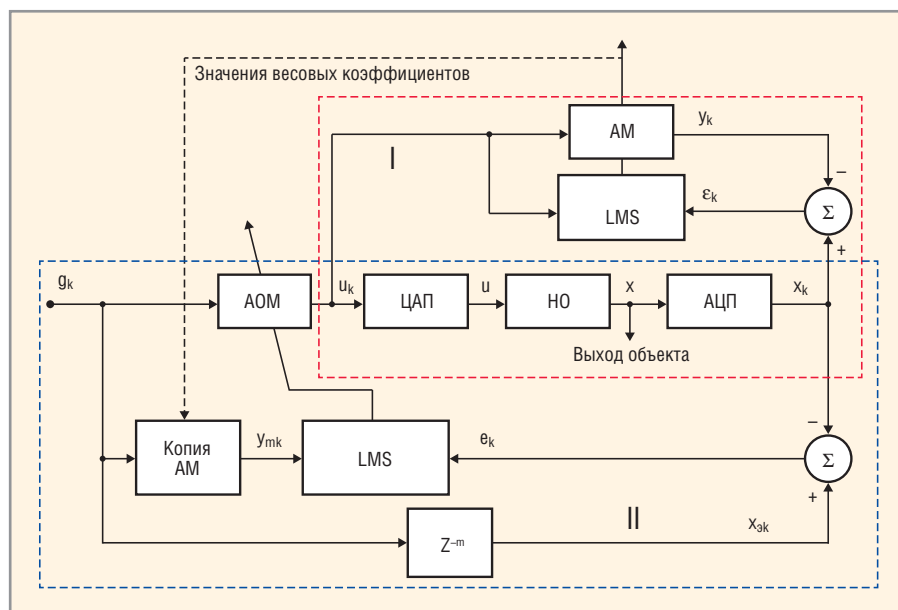


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления НО

Здесь сигнал $x_{эk}$, эталонный для выходного сигнала управляемого объекта, представляет собой задержанный на m временных тактов сигнал g_k , т.е. $x_{эk} = g_{k-m}$

Роль устройства, формирующего управляющее воздействие, играет адаптивная обратная модель неизвестного объекта (АОМ), уравнение которой имеет вид:

$$u_k = \sum_{l=0}^L w_{plk} g_{k-l}. \quad (5)$$

Весовые коэффициенты АОМ перестраиваются по аналогии с (3) по формуле:

$$w_{pl(k+1)} = w_{plk} + 2\mu y_{M,k-l} e_k. \quad (6)$$

Сигнал y_{Mk} , входящий в выражение (6), является выходным сигналом копии АМ управляемого объекта и вычисляется по формуле:

$$y_{Mk} = \sum_{l=0}^L w_{lk} g_{k-l}. \quad (7)$$

После завершения переходных процессов отклик системы на входное воздействие становится приблизительно

равным сигналу g_k , задержанному на m тактов.

МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ НАСТРОЙКИ АДАПТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ АМ и АОМ

Качество процессов в системе управления динамическим объектом принято оценивать по запасу устойчивости, быстродействию и точности отработки задающих воздействий. В этой связи, параметры настройки адаптивных моделей необходимо выбирать из условий обеспечения требуемых показателей качества.

Анализ показал, что в специальной литературе практически отсутствуют рекомендации по выбору параметров настройки адаптивных фильтров 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 объектами типа «чёрный ящик» при минимальной априорной информации о входных сигналах и динамике управляемого объекта. Эта методика не даёт оптимальных решений, но для большого класса систем она обеспечивает приемлемое качество адаптивных процессов.

Исходными данными для расчёта являются:

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

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

$$T_{алг} \leq T \leq (0,01 \dots 0,001) t_{уст}, \quad (8)$$

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

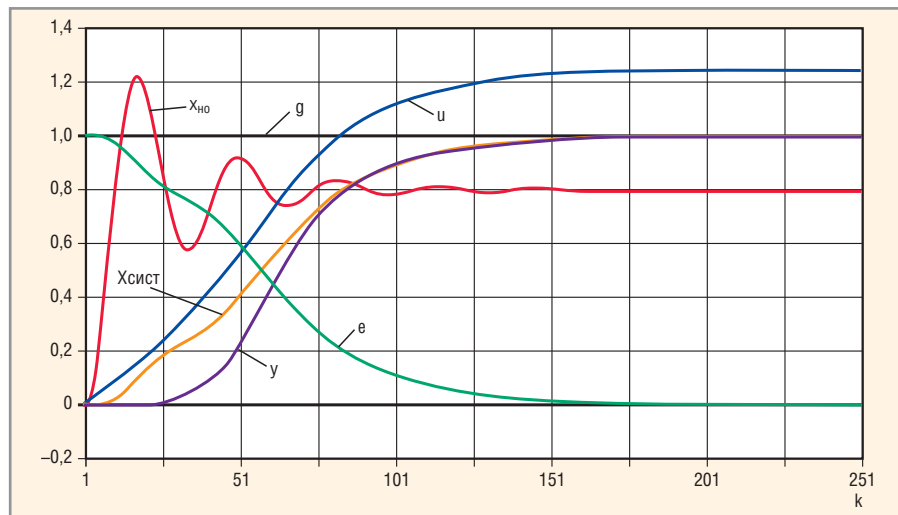


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования процессов управления НО

Из выражения (8) видно, что нижняя граница для интервала T определяется быстродействием используемой цифровой аппаратуры, а верхняя – быстродействием объекта управления. Поэтому выбор величины T носит компромиссный характер.

Параметрами настройки адаптивного фильтра являются его длина L и шаг сходимости алгоритма адаптации μ . Для их выбора используются соотношения:

$$\mu(L+1) \approx \frac{M}{P} \quad (9)$$

и

$$L+1 \approx \lfloor MT_{\text{СКО}} \rfloor, \quad (10)$$

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.

Анализ показал, что для получения хорошего качества управления в рассматриваемой структуре значение $T_{\text{СКО}}$ АОМ должно подчиняться условию $T_{\text{СКО}} \leq t_{\text{уст}}/T$, а величина АМ должна быть примерно на порядок меньше $T_{\text{СКО}}$ АОМ. При этом хорошее качество идентификации и управления во многих случаях достигается при значении $M = 0,01 \dots 0,1$.

Отметим, что мощность сигналов на входах адаптивных моделей часто неизвестна заранее. В таких случаях в качестве расчётной величины можно принять значение предельно допустимой мощности постоянного входного сигнала. Это приведёт к затягиванию процессов адаптации, но по-

высит запас устойчивости системы управления. В ходе эксплуатации системы параметры настройки могут уточняться.

Радикальным решением проблемы выбора оптимальных значений параметра μ для каждого из адаптивных процессов является их расчёт в режиме реального времени, процедура которого предложена в [5]. Поясним эту процедуру на примере расчёта текущих значений параметра μ для подсистемы идентификации неизвестного объекта.

1. Вычисляем текущее среднее значение мощности сигнала на входе АМ по формуле $P_k = E[u_k^2]$. Для усреднения используем цифровой адаптивный фильтр низких частот (ФНЧ), реализуемый в виде дискретного уравнения [6]:

$$P_k = (1-\lambda)(u_k^2 - u_{k-1}^2) + (1-2\lambda)P_{k-1}, \quad (11)$$

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

2. Вычисляем текущее значение μ_k по формуле (9), которая в данном случае преобразуется к виду:

$$\mu_k = \frac{M}{(L+1)P_k}.$$

Аналогичным образом рассчитывается параметр μ_k для АОМ.

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

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ПК

На рисунке 2 приведены результаты компьютерного моделирования процессов управления объектом, который представлен нормированной переходной характеристикой $x_{\text{но}}(t)$ с временем установления $t_{\text{уст}} \approx 20$ с.

Имитационная модель задающего воздействия $g_k = 1$. Число тактов задержки эталонного сигнала $m = 0$. Интервал квантования сигналов по времени $T = 0,2$ с. 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 среднеквадратических ошибок идентификации и управления $M_1 = 0,1$ и $M_2 = 0,02$ соответственно.

Из графиков (см. рис. 2) видно, что переходная характеристика неуправляемого НО имеет колебательный характер, а его статическая ошибка равна 0,2. При выбранных настройках адаптивной управляющей системы, колебания в объекте полностью подавляются, а статическая ошибка регулирования равна нулю. При этом время регулирования процесса в системе несколько больше времени установления объекта и приблизительно равно 25 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования подтверждают эффективность использования предложенных алгоритмов для адаптивного управления динамическими объектами с неизвестной математической моделью.

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.
3. Гудкова Н.В. Цифровое управление техническими объектами с применением адаптивного обратного моделирования. Автоматизация и современные технологии. 2006. № 4.
4. Widrow B., Walach E. Adaptive Inverse Control. A Signal Processing Approach. NJ: Wiley, Hoboken, 2008.
5. Гудкова Н.В. Адаптивные алгоритмы регулирования уровня дискретных сигналов. Цифровая обработка сигналов. 2005. № 2.
6. Гудкова Н.В. Адаптивные цифровые фильтры в системах промышленной электроники. Автоматизация и современные технологии. 2005. № 7.

