

Алгоритмы адаптивной линейаризации характеристик датчиков в АСУ ТП

Наталья Гудкова (Ростовская обл.)

Рассматривается метод цифровой линейаризации датчиков, основанный на адаптивном обратном моделировании неопределённых динамических объектов. Модель датчика представляет собой весовой коэффициент, перестраиваемый по методу наименьших квадратов в режиме реального времени. Показано, что предлагаемая адаптивная структура проста в реализации и обеспечивает высокую точность линейаризации. Приведены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие эффективность предложенных алгоритмов.

ВВЕДЕНИЕ

В производственных процессах для слежения за физическими параметрами используют измерительные преобразователи физических величин – датчики. В качестве примеров измеряемых параметров можно назвать температуру в печи, давление в камере, влажность, расход протекающих по трубопроводам жидкостей и газов, токи в обмотках электродвигателя и т.п. В большинстве случаев датчики преобразуют неэлектрическую величину в электрическую.

Развитие интегральной схемотехники привело к созданию принципиально новых измерительных устройств – интеллектуальных датчиков (ИД), содержащих в одном корпусе (или кристалле) преобразователь и микропроцессор. Кроме обычных функций восприятия искомой величины и преобразования сигнала, современные интеллектуальные датчики выполняют ряд других функций, существенно расширяющих их возможности и улучшающих их технические характеристики.

В интеллектуальных датчиках производятся преобразования измерительной информации, такие как усиление и нормализация аналоговых сигналов, фильтрация, расчёт выходных значений по заданным алгоритмам, оцифровка измеряемых величин

и т.д. Большинство преобразователей физических величин имеют нелинейные статические характеристики, поэтому одной из важнейших функций ИД является повышение линейности преобразования.

В современных ИД в основном используют два способа линейаризации датчиков – аналитический и табличный. Оба способа основаны на использовании цифровой модели с характеристикой, обратной характеристике чувствительного элемента, которая хранится в памяти микропроцессора.

Основной трудностью при построении табличной модели является необходимость предварительного испытания датчика в различных режимах. Как правило, для этого требуется дорогостоящее оборудование, специальные методики и наличие подготовленных специалистов. Что касается аналитических зависимостей, то их получение, даже без учёта всех факторов, влияющих на характеристики датчика, зачастую проблематично.

В статье описан способ цифровой адаптивной линейаризации передаточных характеристик датчиков, который, по мнению автора, может служить дополнением к общепринятым подходам.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Предлагаемое решение базируется на адаптивном обратном моделировании неопределённых динамических объектов типа «чёрный ящик» [1–6]. Смысл такого моделирования состоит в создании цифровой адаптивной обратной модели (АОМ) некоторого объекта с неизвестными параметрами, которая должна служить наилучшим приближением коэффициента передачи, обратного коэффициенту пере-

дачи этого объекта в процессе его функционирования.

На рисунке 1 показана одна из возможных структур системы управления «чёрным ящиком» [6], который в данном случае представляет собой технический объект (ТО) с подключенным к нему датчиком (Д) с неизвестной (и/или изменяющейся во времени) характеристикой.

При медленно протекающих технологических процессах инерционностью ТО и Д можно пренебречь. Это позволяет рассматривать систему ТО–Д как единый объект с нелинейной зависимостью выход–вход $x = f(u)$.

Роль управляющего устройства (адаптивного регулятора) в данной системе играет АОМ, реализованная в виде адаптивного трансверсального фильтра (АТФ) [1], дискретное уравнение которого в общем случае имеет вид:

$$u_k = \sum_{l=1}^{L+1} w_{lk} g_{k-l}, \quad (1)$$

где g_k – временные отсчеты входного сигнала системы; u_k – отсчёты управляющего сигнала на выходе АОМ; $L + 1$ – число весовых коэффициентов АТФ w_{lk} , которые в процессе адаптации перестраиваются по методу наименьших квадратов (Least Mean Square, LMS) в соответствии с рекуррентным соотношением:

$$w_{l(k+1)} = w_{lk} + 2\mu g_k - \varepsilon_k. \quad (2)$$

В выражении (2) функция $\varepsilon_k = Kg_k - x_k$ представляет собой ошибку адаптации, где x_k – оцифрованные показания датчика, K – желаемое значение коэффициента передачи системы ТО–Д, μ – параметр сходимости адаптивного алгоритма.

Суть адаптивной линейаризации заключается в том, что после завершения процесса перестройки весовых коэффициентов среднеквадратическая ошибка СКО = $\left[\varepsilon_k^2 \right]$ становится равной своему минимальному значению, которое зависит от выбранной величины параметра M . Этот параметр представляет собой относительную среднюю величину СКО адаптации [2], которая ограничена пределами $0 < M < 1$.

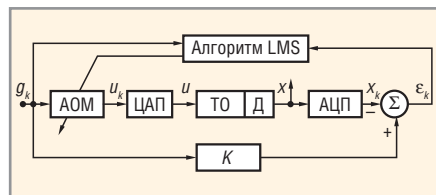


Рис. 1. Структурная схема адаптивной линейаризации системы технический объект – датчик (ТО–Д)

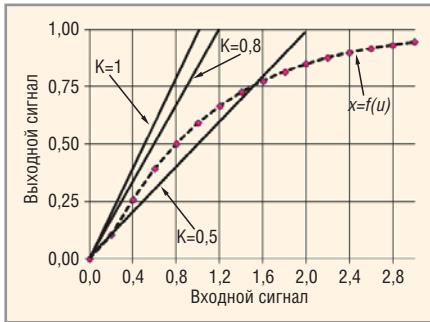


Рис. 2. Нелинейная и теоретические линейризованные характеристики системы ТО–Д

Как показано [2], для сходимости алгоритма (2) должно выполняться условие:

$$\mu \leq \frac{M}{E[g_k^2](L+1)}, \quad (3)$$

где $E[g_k^2]$ – средняя мощность сигнала g_k .

Поскольку в общем случае входной сигнал, а следовательно, и его мощность носят случайный характер, можно использовать для расчёта параметра μ максимально допустимую для данной системы мощность. Это уменьшит скорость адаптации, но увеличит запас устойчивости системы.

Оптимальную настройку обеспечит автоматический расчёт текущего значения μ в режиме реального времени, как это показано в работе [4].

Скорость сходимости алгоритма также зависит от заданного значения M , которое связано с числом итераций адаптивного процесса соотношением [2]:

$$T_{\text{СКО}} \cong \frac{L+1}{M}. \quad (4)$$

Вследствие того что в рассматриваемом случае инерционные свойства объекта выражены слабо, адаптивная процедура упрощается, поскольку для линейризации характеристики $x = f(u)$ достаточно одного единственного весового коэффициента w_1 , т.е. $L = 0$.

Желаемая величина коэффициента линейризации должна быть задана из условия [6, 7]:

$$K \leq \frac{x_{\text{max}}}{g_{\text{max}}},$$

где значения x_{max} и g_{max} определяются предельно допустимыми уровнями этих сигналов в системе.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Предлагаемый метод адаптивной линейризации датчиков иллюстрируют

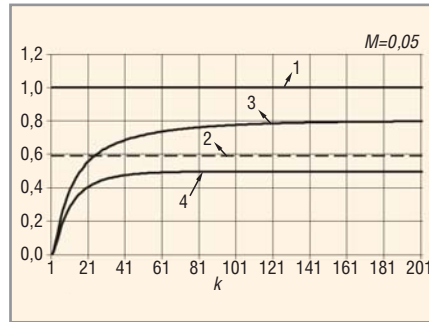


Рис. 3. Адаптивные процессы линейризации системы ТО–Д при постоянном входном сигнале

результаты имитационного моделирования системы ТО–Д на персональном компьютере.

На рисунке 2 показаны нелинейная характеристика объекта ТО–Д $x = f(u)$ и три варианта желаемых линейризованных характеристик при трёх значениях коэффициента линейризации $K = 0,5, K = 0,8$ и $K = 1$.

Для оценки точности и быстродействия процессов линейризации этих характеристик исследованы два режима работы системы. В режиме 1 выполняется моделирование процессов измерения постоянного входного сигнала со средней мощностью $E[g_k^2] = 1$ при допустимом относительном среднем значении среднеквадратической ошибки $M = 0,05$, которому соответствует параметр сходимости адаптивного алгоритма $\mu = 0,05$.

Графики процессов приведены на рисунке 3, где линия 1 соответствует измеряемому сигналу g_k , линия 2 отра-

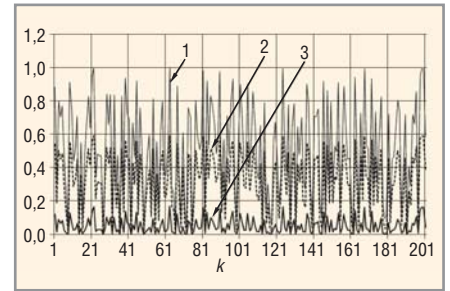


Рис. 4. Процессы в системе ТО–Д с нелинейным датчиком при случайном входном сигнале $u \approx g$; СКО $\approx 0,046$

жает показания нелинейного датчика x , кривые 3 и 4 отражают значения компенсированных показаний датчика x_k в процессе адаптации при заданных значениях коэффициентов линейризации $K = 0,8$ и $K = 0,5$ соответственно. Как видно на рисунке 3, при выбранном значении M показания датчика после адаптации соответствуют линейризованным характеристикам, приведённым на рисунке 2.

В режиме 2 выполняется моделирование процессов измерения входного сигнала, который представляет собой последовательность отсчётов белого шума со средней мощностью $E[g_k^2] \approx 0,336$. Желаемый коэффициент линейризации $K = 1$.

На рисунке 4 показаны сигналы в системе с нелинейным датчиком. Здесь график 1 соответствует измеряемому сигналу g_k , график 2 отражает показания нелинейного датчика x , график 3 отражает дискретные значения квад-

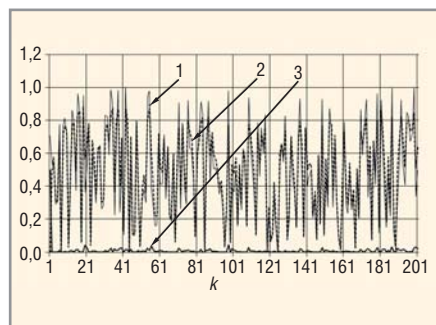


Рис. 5. Процессы в системе ТО–Д с линейризованным датчиком при случайном входном сигнале

$u = gw_1$; $CKO = 0,007$; $T_{CKO} \cong 2$; $M = 0,5$

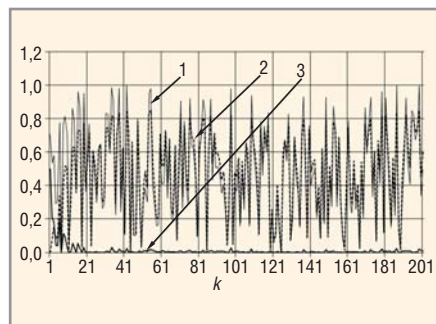


Рис. 7. Процессы в системе ТО–Д с линейризованным датчиком при случайном входном сигнале

$u = gw_1$; $CKO = 0,006$; $T_{CKO} \cong 10$; $M = 0,1$

ратичной ошибки ϵ_k^2 между показаниями нелинейного датчика и желаемой линейной характеристикой датчика при заданном значении коэффициента K .

На рисунках 5 – 8 показаны процессы адаптивной линейризации характеристики датчика при значениях $M = 0,5$ и $M = 0,11$ соответственно. На рисунках 5 и 7 графики под номерами 1 и 2 отражают входной дискретный сигнал g_k и показания линейризованного датчика x , а графики под номером 3 отражают дискретную форму квадратичной ошибки ϵ_k^2 между показаниями линейризованного датчика и его желаемой линейной характеристикой. Рисунки 6 и 8 отражают процессы перестройки весового коэффициента w_1 АОМ.

На приведённых рисунках видно, что СКО в системе с линейризованной характеристикой датчика при обоих значениях параметра M примерно на порядок меньше СКО в системе с нелинейризованной характеристикой $f(u)$. При этом число итераций адаптивных процессов приблизительно соответствует теоретическим значениям, рассчитанным по формуле (4).

Следует отметить, что в описанных вычислительных экспериментах пара-

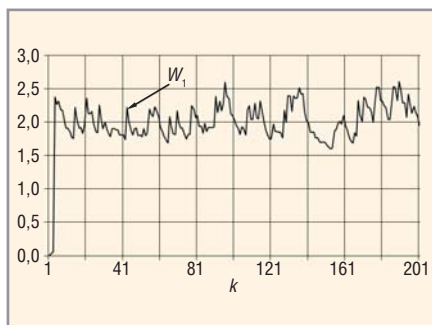


Рис. 6. Процессы перестройки весового коэффициента w_1 АОМ при случайном входном сигнале

$M = 0,5$

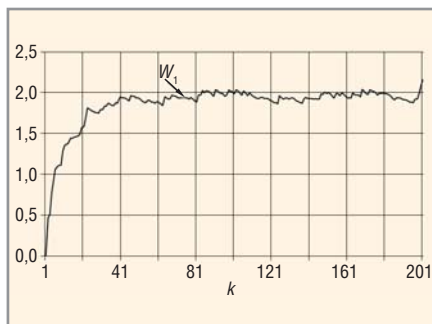


Рис. 8. Процессы перестройки весового коэффициента w_1 АОМ при случайном входном сигнале

$M = 0,1$

метр сходимости алгоритма адаптации определялся по заданной мощности входного сигнала. Однако, как отмечалось выше, в реальных системах и сам сигнал, и его мощность, как правило, неизвестны заранее либо известны только их приближенные средние значения, которые могут изменяться во времени случайным образом.

В таких ситуациях целесообразно использовать дополнительный канал, предназначенный для автоматического расчёта параметра μ в ходе адаптивного процесса. Он должен состоять из блока, выполняющего операцию возведения в квадрат входного сигнала, т.е. операцию расчёта текущей величины g_k^2 , фильтра низких частот (ФНЧ), вычисляющего среднюю мощность $P_k = E[g_k^2]$, и блока, в котором рассчитываются текущие значения величины по формуле:

$$\mu_k = \frac{M}{P_k}$$

Хорошее усреднение сигнала обеспечивает алгоритм ФНЧ [7]:

$$P_k = \lambda(g_k^2 + g_{k-1}^2) + (1 - 2\lambda)P_{k-1},$$

где λ – параметр сходимости алгоритма фильтрации ($0 < \lambda < 0,5$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемые решения могут служить эффективным и экономичным способом цифровой линейризации характеристик датчиков физических параметров безынерционных технических объектов. Практика показала, что при правильной настройке АОМ данный метод обеспечивает хорошие результаты и при линейризации характеристик инерционных систем ТО–Д.

Необходимо отметить, что описанные алгоритмы достаточно легко реализуются средствами современной цифровой микросхемотехники и могут найти широкое применение в системах адаптивной линейризации нелинейных характеристик разнообразных технических устройств, например, в усилительных устройствах базовых станций беспроводной связи [5, 6] и т.п.

Кроме того, представляется весьма перспективным приложение этого метода к задачам линейризации устройств с гистерезисными характеристиками. Проведённые эксперименты показали обнадеживающие результаты. Однако это направление требует дальнейших теоретических и практических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. Радио и связь, 1989.
2. Гудкова Н.В. Цифровое управление техническими объектами с применением адаптивного обратного моделирования. Автоматизация и современные технологии. 2006. № 4.
3. Widrow B., Walach E. Adaptive Inverse Control. A Signal Processing Approach. Wiley, Hoboken, NJ, 2008.
4. Гудкова Н.В. Адаптивные алгоритмы регулирования уровня дискретных сигналов. Цифровая обработка сигналов. 2005. № 2.
5. Гудкова Н.В. Адаптивное цифровое устройство компенсации нелинейности амплитудной характеристики усилителя мощности. Современная электроника. 2010. № 4.
6. Гудкова Н.В. Гудков В.И. Адаптивная цифровая линейризация передаточных характеристик электронных усилительных устройств. Цифровая обработка сигналов. 2011. № 4.
7. Гудкова Н.В. Адаптивные цифровые фильтры в системах промышленной электроники. Автоматизация и современные технологии. 2005. № 7.

