

Цифровая адаптивная линеаризация датчиков технологических процессов

Н.В. Гудкова

Технологический институт Южного федерального университета, tala_gud@rambler.ru

Аннотация — Рассматривается решение задачи адаптивной цифровой линеаризации датчиков физических параметров производственных процессов. Подход к решению базируется на принципах управления, использующих адаптивное обратное моделирование неопределенных динамических объектов типа «черный ящик». Адаптивная обратная модель «черного ящика» представляет собой трансверсальный фильтр с весовыми коэффициентами, перестраиваемыми по методу наименьших квадратов. Показано, что предлагаемые адаптивные структуры просты в реализации и обеспечивают высокую точность линеаризации. Приведены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие эффективность предложенных решений.

Ключевые слова — цифровая адаптивная линеаризация, интеллектуальный датчик, технический объект, алгоритм, характеристика, адаптивная обратная модель, управление, «черный ящик».

I. ВВЕДЕНИЕ

В производственных процессах для слежения за физическими параметрами используют измерительные преобразователи – датчики.

В качестве примеров измеряемых параметров можно назвать температуру в печи, давление в камере, влажность, расход протекающих по трубопроводам жидкостей и газов, вес ингредиентов, токи в обмотках электродвигателя и т.п. В большинстве случаев датчики преобразуют неэлектрическую величину в электрическую.

Бурное развитие интегральной схемотехники привело к созданию принципиально новых измерительных устройств – интеллектуальных датчиков (ИД), содержащих в одном корпусе 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 проводятся необходимые преобразования измерительной информации, такие как усиление и стандартизация диапазонов выходных аналоговых сигналов, фильтрация, расчет вы-

ходных значений по заданным алгоритмам, аналого-цифровое преобразование измеряемых величин и т.д.

Большинство датчиков имеет нелинейные статические характеристики, поэтому одной из важнейших функций ИД является существенное повышение их линейности.

В современных ИД в основном используются два способа линеаризации датчиков – аналитический и табличный. Оба способа основаны на включении последовательно с чувствительным элементом датчика цифровой модели с характеристикой, обратной характеристике этого элемента, которая хранится в памяти микропроцессора.

Основной трудностью при построении табличной модели является необходимость предварительного тестирования датчика в различных режимах, что обычно требует применения специального дорогостоящего оборудования, специальных методик и хорошо подготовленных для этой работы специалистов. Что касается аналитических зависимостей, то их получение даже без учета всех факторов, влияющих на характеристики датчика, зачастую проблематично.

С учетом сказанного можно констатировать, что традиционные способы линейной коррекции характеристик измерительных преобразователей не свободны от недостатков.

Ниже предлагается подход к цифровой адаптивной линеаризации передаточных характеристик датчиков, который, по мнению автора, может служить альтернативой или дополнением к общепринятым подходам.

II. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Предлагаемое решение базируется на принципах управления, использующих адаптивное обратное моделирование неопределенных динамических объектов типа «черный ящик» [1, 2, 3].

Смысл этого вида моделирования состоит в создании цифровой адаптивной обратной модели (АОМ) некоторого объекта с неизвестными параметрами, которая должна служить наилучшим приближением коэффициента передачи, обратного коэффициенту передачи этого объекта в процессе его функционирования.

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

При медленных адаптивных процессах инерционностью технического объекта и датчика зачастую можно пренебречь. Это позволяет рассматривать систему ТО-Д как единый объект с нелинейной зависимостью выход-вход $x = f(u)$.

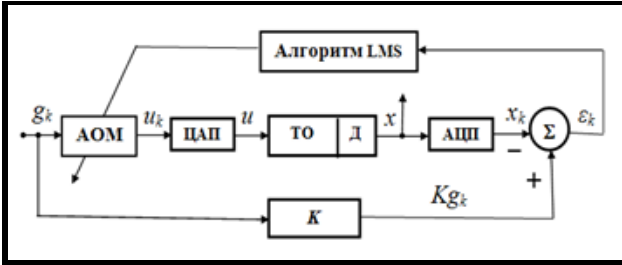


Рис. 1. Структурная схема системы линейризации ТО-Д

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

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

где g_k – временные отсчеты входного сигнала системы, u_k – отсчеты управляющего сигнала на выходе АОМ, L – число весовых коэффициентов фильтра w_{lk} , которые в процессе адаптации перестраиваются по методу наименьшего квадрата (Least Mean Square, LMS) в соответствии с рекуррентным соотношением

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

В выражении (2) функция $\varepsilon_k = K g_k - x_k$ 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 линейризации заключается в том, что после завершения процесса перестройки весовых коэффициентов среднеквадратическая ошибка СКО = $E[\varepsilon_k^2]$ становится равной своему минимальному значению, которое зависит от выбранной величины параметра M .

Этот параметр представляет собой относительную среднюю величину СКО адаптации, которая ограничена пределами [2]

$$0 < M < 1.$$

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

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

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 расчета параметра μ максимально допустимую для данной системы мощность. Это уменьшит скорость адаптации, но увеличит запас устойчивости системы.

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

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

$$T_{\text{СКО}} \cong \left[\frac{L}{M} \right]. \quad (4)$$

Вследствие того, что в рассматриваемом случае инерционные свойства объекта выражены слабо, адаптивная процедура упрощается, т.к. для линейризации характеристики $x = f(u)$ достаточно одного единственного весового коэффициента w_1 , т.е. $L = 1$.

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.

III. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Предлагаемый принцип адаптивной линейризации датчиков иллюстрируют результаты имитационного моделирования системы ТО-Д на ПК.

На рис. 2 показаны нелинейная характеристика объекта ТО-Д $x = f(u)$ и три варианта желаемых линейризованных характеристик при $K = 0.5$, $K = 0.8$ и $K = 1$.

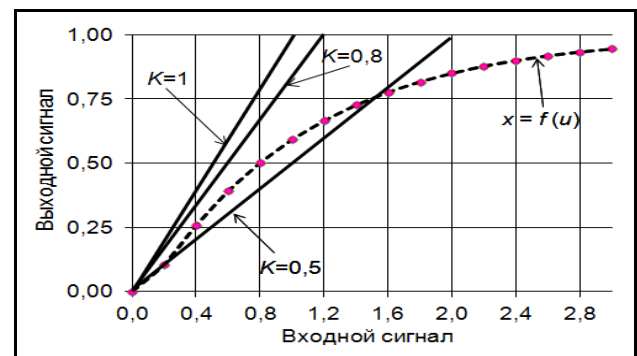


Рис. 2. Нелинейная и теоретические линейризованные характеристики ТО-Д

Для оценки точности и быстродействия процессов линейаризации этих характеристик исследуются два режима работы системы.

Режим 1. Выполняется моделирование процессов измерения постоянного входного сигнала со средней мощностью $E[g_k^2] = 1$ при допустимом относительном среднем значении СКО $M = 0.05$, которому соответствует параметр сходимости адаптивного алгоритма $\mu = 0.05$.

Графики процессов приведены на рис. 3, где линия 1 соответствует измеряемому сигналу g_k ; линия 2 отражает показания нелинейного датчика x ; кривые 3 и 4 отражают дискретные значения компенсированных показаний датчика x_k в процессе адаптации при заданных значениях коэффициентов линейаризации $K = 0.8$ и $K = 0.5$ соответственно.

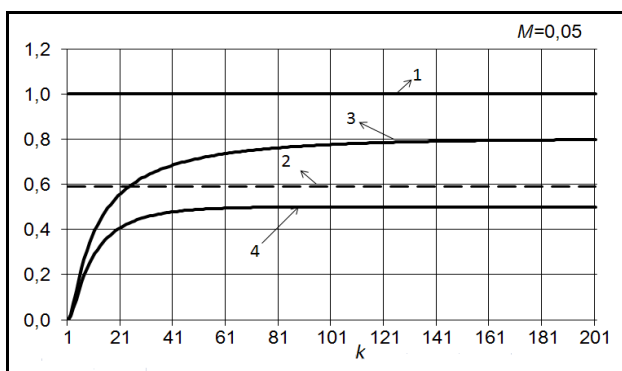


Рис. 3. Адаптивные процессы линейаризации ТО-Д при постоянном входном сигнале

Как видно из рис. 3, при выбранном значении M показания датчика после адаптации соответствуют линейаризованным характеристикам на рис. 2.

Режим 2. Выполняется моделирование процессов измерения входного сигнала, который представляет собой случайную последовательность отсчетов белого шума со средней мощностью $E[g_k^2] \approx 0.336$. Желаемый коэффициент линейаризации $K = 1$.

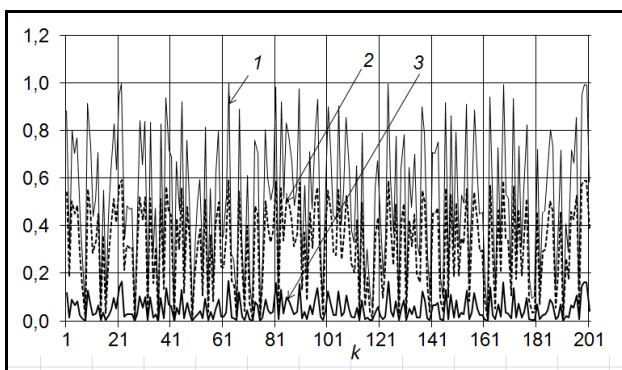


Рис. 4. Процессы в ТО-Д с нелинейным датчиком при случайном входном сигнале ($u \approx g$; СКО ≈ 0.046)

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

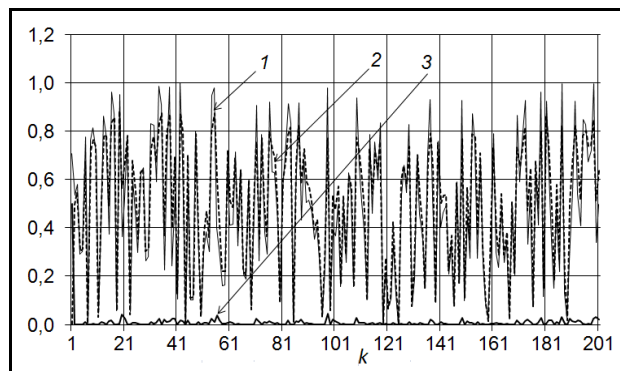


Рис. 5. Процессы в ТО-Д с линейаризованным датчиком при случайном входном сигнале (СКО ≈ 0.007 ; $T_{\text{N}Et} \approx 2$)

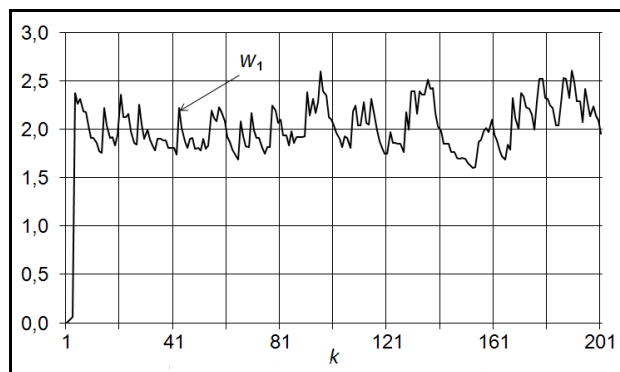


Рис. 6. Процессы перестройки весового коэффициента w_1 АОМ при случайном входном сигнале ($M = 0.5$)

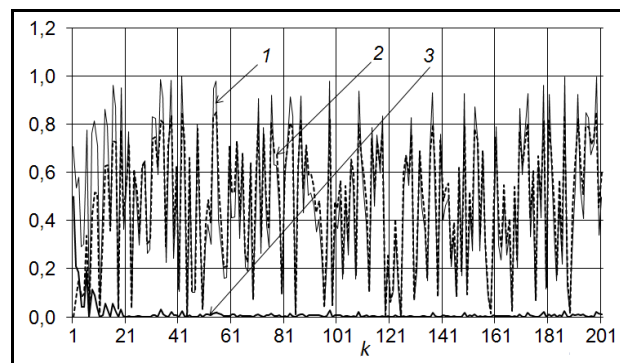


Рис. 7. Процессы в ТО-Д с линейаризованным датчиком при случайном входном сигнале ($u = gw_1$; СКО ≈ 0.006 ; $M = 0.1$; $T_{\text{N}Et} \approx 10$)

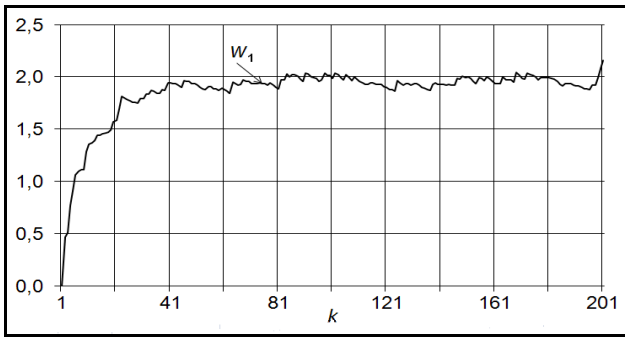


Рис. 8. Процессы перестройки весового коэффициента w_1 АОМ при случайном входном сигнале ($M = 0.1$)

На рис. 5 – рис. 8 показаны процессы адаптивной линейаризации характеристики датчика и процесс перестройки весового коэффициента w_1 АОМ при $M = 0.5$ и $M = 0.1$ соответственно.

Графики под номерами 1 и 2 отражают входной дискретный сигнал g_k и показания линейаризованного датчика x , а графики под номером 3 отражают дискретную форму квадратичной ошибки ε_k^2 между показаниями линейаризованного датчика и его желаемой линейной характеристикой.

Из приведенных рисунков видно, что СКО в системе с линейаризованной характеристикой датчика при обоих значениях параметра M примерно на порядок меньше СКО в системе с не линейаризованной характеристикой $f(u)$. При этом число итераций адаптивных процессов приблизительно соответствует теоретическим значениям, рассчитанным по формуле (4).

Следует отметить, что в описанных экспериментах параметр сходимости алгоритма адаптации вычислялся по заданной мощности входного сигнала. Однако, как отмечалось выше, в реальных системах зачастую и сам сигнал, и его мощность заранее не известны, либо известны только их приближенные средние значения, которые могут изменяться во времени случайным образом.

В таких ситуациях целесообразно использовать дополнительный канал, предназначенный для автоматического расчета параметра μ в ходе адаптивного процесса. Он должен состоять из блока, выполняющего операцию возведения в квадрат входного сигнала, т.е. операцию расчета 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 μ_k по формуле

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

Хорошее усреднение сигнала дает алгоритм ФНЧ [5]

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

где λ – параметр сходимости алгоритма фильтрации ($0 < \lambda < 0.5$).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в работе исследования позволяют сделать вывод о том, что предлагаемые решения могут служить эффективным и экономичным способом цифровой линейаризации характеристик датчиков физических параметров безынерционных технических объектов.

Практика показала, что при правильной настройке АОМ данный метод обеспечивает также хорошие результаты при линейаризации характеристик инерционных систем ТО-Д.

Необходимо подчеркнуть, что алгоритмы метода достаточно легко реализуются средствами современной цифровой микросхемотехники и могут найти широкое применение в системах адаптивной линейаризации нелинейных характеристик разнообразных технических устройств, например, таких как усилительные устройства базовых станций беспроводной связи [6, 7] и т.п.

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: 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. Адаптивные цифровые фильтры в системах промышленной электроники // Автоматизация и современные технологии. 2005. №7.
- [6] Гудкова Н.В. Цифровая линейаризация амплитудной характеристики усилителя мощности методом адаптивного обратного моделирования // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем» (МЭС-2010). Сборник трудов. М.: ИПИМ РАН, 2010. С. 462-465.
- [7] Гудкова Н.В. Гудков В.И. Адаптивная цифровая линейаризация передаточных характеристик электронных усилительных устройств // Цифровая обработка сигналов. 2011. №4.