

Р. А. СИМСАРЬЯН
 (Москва)

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

При контроле и управлении автоматическими системами в условиях неполной априорной информации возникает ряд задач, которые можно решать как задачи восстановления функции [1]. Такие задачи при использовании адаптивного подхода [2] формируются следующим образом (рис. 1). Дано: реализации процессов $x(t)$, $y(t)$; критерий близости $I(\bar{c})$

характеристики $y(x)$ объекта (О) и характеристики $\hat{y}(x, \bar{c})$ функционального преобразователя (ФП) (критерий качества аппроксимации). Требуется определить структуру функционального преобразователя и алгоритм адаптации, реализуемый в блоке адаптации (БА) так, чтобы в процессе адаптации (настройки ФП) минимизировался критерий $I(\bar{c})$.

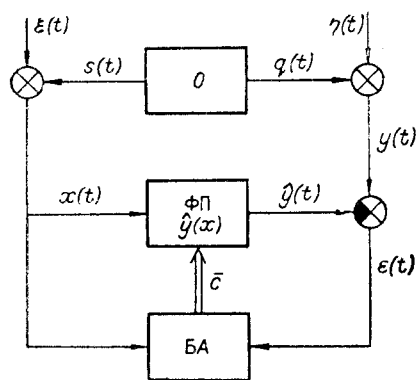


Рис. 1.

Методы построения алгоритмов адаптации при заранее выбранной структуре функционального преобразователя и критерия качества изложены в [2, 3]. В [4] получены оптимальные алгоритмы адаптации статических кусочно-непрерывных функциональных преобразователей для стационарно и нестационарно связанных процессов

$x(t)$ и $y(t)$. Кусочно-непрерывную функцию можно представить как

$$\hat{y}(x, \bar{c}) = \sum_{i=1}^N \varphi_i(x(t)) f_i(x(t), \bar{c}), \quad (1)$$

где $f_i(x(t), \bar{c})$ — непрерывные функции $x(t)$ и вектора настраиваемых параметров \bar{c} :

$$\varphi_i(x(t)) = \begin{cases} 1 & \text{при } x_i \geq x > x_{i-1}; \\ 0 & \text{при } x_i < x; x \leq x_{i-1}. \end{cases} \quad (2)$$

Для настройки параметров при аппроксимации кусочно-непрерывными функциями в каждый момент времени необходима информация о значениях $x(t)$ и $y(t)$ только в зоне i -го участка. Это позволяет упростить алгоритм настройки по сравнению с аппроксимацией ортогональными полиномами вида

$$\hat{y}(x, \bar{c}) = \sum_{i=1}^N c_i f_i(x), \quad (3)$$

где

$$c_i = \frac{\int_a^b y(x) f_i(x) dx}{\int_a^b f_i(x) f_i(x) dx}; \quad (4)$$

$[a, b]$ — область определения полинома.

Для отыскания коэффициента нужно иметь информацию о значениях $x(t)$ и $y(t)$ во всей области определения $x(t)$. Это требует либо проведения активного эксперимента, либо запоминания и многократного повторения значений $x(t)$ и $y(t)$ [5]. Использование кусочно-непрерывной аппроксимации позволяет производить настройку непосредственно в процессе нормальной работы объекта. При этом для настройки всех участков используются одни и те же устройства, реализующие алгоритм адаптации (рис. 2), которые в зависимости от $x(t)$ последовательно пе-

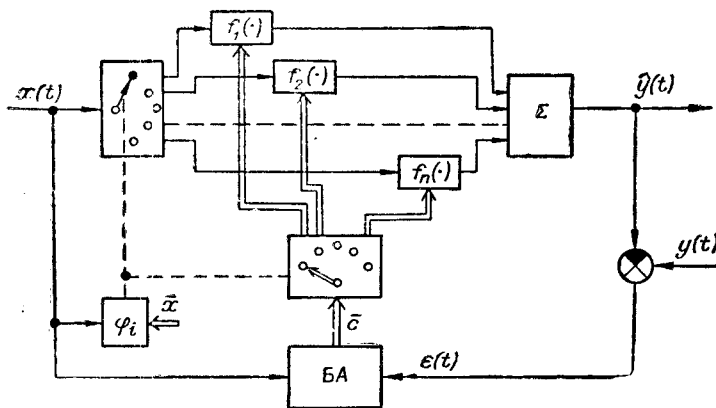


Рис. 2.

реключаются от участка к участку с помощью переключателей. В дальнейшем рассмотрим алгоритмы и устройства, использующие кусочно-линейную аппроксимацию

$$f_i(x(t), \bar{c}) = a_i + b_i(x(t) - x_{i-1}). \quad (5)$$

Простота реализации при достаточной точности аппроксимации [6, 7] обусловила широкое распространение кусочно-линейных функциональных преобразователей [8, 9].

Рассмотренные в [4] оптимальные алгоритмы адаптации дают возможность получить ряд интересных применений адаптивных кусочно-линейных функциональных преобразователей.

1. **Идентификатор нелинейных статических объектов.** Алгоритмы адаптации [4] в каждый момент времени минимизируют критерий вида

$$I(\bar{c}) = \frac{1}{t} \int_0^t [y(\tau) - \hat{y}(x(\tau), \bar{c})]^2 d\tau. \quad (6)$$

Это позволяет получить в реальном масштабе времени кусочно-линейную аппроксимацию зависимости $y(x)$, наилучшую в смысле (6).

Блок-схема идентификатора представлена на рис. 3. Функциональный преобразователь ФП реализует зависимости (1), (2) с учетом (5). Блок адаптации реализует алгоритмы:

$$\frac{d a_i(t)}{d t} = \frac{\varepsilon(t) \varphi_i'(x(t))}{\int_0^t \varphi_i(x(\tau)) d\tau} - \frac{d b_i(t)}{d t} = \frac{\int_0^t \varphi_i(x(\tau)) (x(\tau) - x_{i-1}) d\tau}{\int_0^t \varphi_i(x(\tau)) d\tau} \varphi_i(x(t)); \quad (7)$$

$$\frac{d b_i(t)}{d t} = \frac{\varepsilon(t) \varphi_i(x(t)) (x(t) - x_{i-1})}{\int_0^t \varphi_i(x(\tau)) (x(\tau) - x_{i-1})^2 d\tau} - \frac{d a_i(t)}{d t} = \frac{\int_0^t \varphi_i(x(\tau)) (x(\tau) - x_{i-1}) d\tau}{\int_0^t \varphi_i(x(\tau)) (x(\tau) - x_{i-1})^2 d\tau} \varphi_i(x(t)), \quad (8)$$

где $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t)$. Аппроксимированная искомая зависимость представляется на панели индикатора (И).

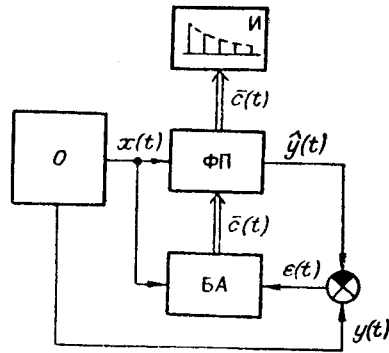


Рис. 3.

Идентификация и представление полученной зависимости в реальном масштабе времени имеют наибольшее значение в информационных системах для научных исследований [10, 11]. Сигналы $x(t)$ и $y(t)$ от исследуемого объекта O подаются на входы идентификатора, и исследователь получает возможность наблюдать поведение исследуемого объекта, характер зависи-

мости $\hat{y}(x, \bar{c})$ и изменения ее во времени, что значительно облегчает интерпретацию полученных зависимостей.

Функциональный преобразователь и блок адаптации могут быть реализованы на элементах аналоговых вычислительных устройств [4], или программно на ЦВМ. Индикатор целесообразно реализовать по способу [12] на электроннолучевой трубке или в виде панели из линейных газоразрядных индикаторов [13], установленных в точках переключения отрезков аппроксимации.

2. **Адаптивные датчики.** Под адаптивным датчиком будем понимать датчик, шкала которого автоматически меняется так, чтобы наилучшим

образом удовлетворялся критерий качества измерений. Шкалой считаем [14] упорядоченную тройку $\langle U, R, f \rangle$, где U — эмпирическая система с отношениями; R — полная числовая система с отношениями; f — функция, которая гомоморфно отображает U в подсистему R .

Примером адаптивного датчика может служить датчик, измеряющий уровень ванны кислородного конвертера H_v по звуку, излучаемому горловиной конвертера [4]. Здесь элементами эмпирической системы являются значения звукового давления $P_{зв}$, элементами числовой системы R — значения показаний датчика; функция f представляет собой статическую зависимость

$$\hat{H}_v(t, \bar{c}) = \varphi(P_{зв}(t), \bar{c}),$$

где \hat{H}_v — оценка уровня ванны по шуму; \bar{c} — вектор параметров. Вид зависимости φ медленно меняется под действием различных неконтролируемых факторов. Параметры \bar{c} адаптивного датчика меняются так, чтобы минимизировать среднеквадратичное отклонение оценки уровня ванны, измеренного по шуму, от истинного значения уровня ванны. Оценка уровня ванны \hat{H}_v вычисляется непрерывно, а информация об истинном значении H_v поступает в отдельные отрезки времени — периоды обучения (калибровки) датчика.

Блок-схема адаптивного датчика представлена на рис. 4. Оценка измеряемой величины $\hat{y}(t)$ вычисляется непрерывно по измерениям $x(t)$. В период обучения замыкаются контакты калибровки и на вход блока адаптации подается сигнал $\tilde{y}(t)$, несущий информацию об истинном значении $y(t)$. Если функциональный преобразователь строится согласно (1), (2), (5), и критерий соответствует (6), алгоритмы адаптации имеют вид (7), (8). В другом важном случае функциональный преобразователь реализует интерполяционный полином Лагранжа [9]. При этом

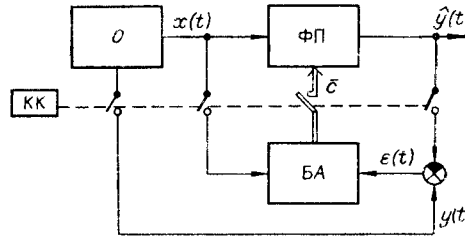


Рис. 4.

$$\hat{y}(t, \bar{a}) = \sum_{i=1}^N \left(a_{i-1} + \frac{a_i(t) - a_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} (x(t) - x_{i-1}) \right) \varphi_i(x), \quad (9)$$

где a_i — ордината i -го узла аппроксимации; x_i — абсцисса i -го узла аппроксимации.

На каждом участке аппроксимации настраивается один параметр $a_i(t)$. Тогда, пользуясь методикой [3], можно получить оптимальный в смысле (6) алгоритм адаптации

$$\frac{d a_i}{d t} = \frac{\left[y(t) - a_{i-1} - \frac{a_i(t) - a_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} (x(t) - x_{i-1}) \right] (x(t) - x_{i-1}) \varphi_i(x(t))}{\int_0^t \varphi_i(x(\tau)) (x(\tau) - x_{i-1})^2 d \tau} \quad (10)$$

3. Адаптивный дискретизатор. Блок-схема адаптивного дискретизатора представлена на рис. 5. На вход функционального преобразователя

ФП поступает линейно изменяющееся напряжение с выхода интегратора I_1 , на вход которого поступает постоянное напряжение U_0 . Выходной сигнал функционального преобразователя сравнивается с входным сигналом дискретизатора $x(t)$. Функциональный преобразователь реализует зависимость

$$\hat{x}(t) = a + b u(t). \quad (11)$$

Ошибка аппроксимации

$$\varepsilon(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (12)$$

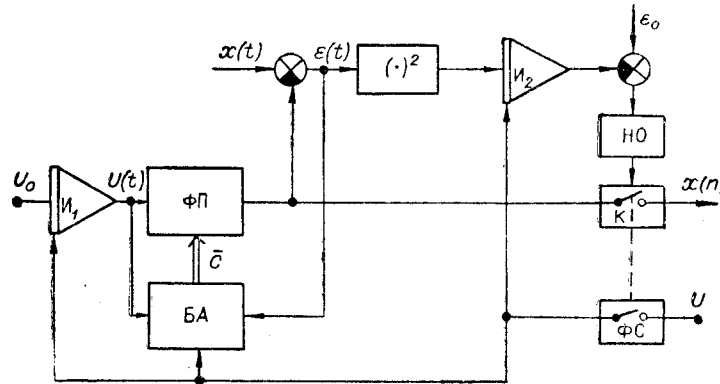


Рис. 5.

возводится в квадрат, интегрируется интегратором I_2 и сравнивается с порогом ε_0 . При выполнении условия

$$\int_0^t \varepsilon^2(\tau) d\tau \geq \varepsilon_0 \quad (13)$$

выходной сигнал нуль-органа (НО) замыкает ключ K и сигнал $\hat{x}(t)$ проходит на выход дискретизатора. В то же время после замыкания ключа срабатывает формирователь сброса (ФС), устанавливающего нулевые начальные условия в интеграторах I_1 , I_2 и в блоке адаптации. В каждый момент времени настраивается только один параметр b , так как ордината конца предыдущего отрезка является ординатой начала последующего отрезка.

Алгоритм работы дискретизатора имеет вид:

$$\frac{db}{dt} = \begin{cases} \frac{[x(t) - a - b u(t)] u t}{\int_0^t u^2(\tau) d\tau} & \text{при } \int_0^t \varepsilon^2(\tau) d\tau < \varepsilon_0; \\ 0 & \text{при } \int_0^t \varepsilon^2(\tau) d\tau \geq \varepsilon_0; \end{cases}$$

$$\hat{x}_i = \begin{cases} \hat{x}(t) & \text{при } \int_0^t \varepsilon^2(\tau) d\tau \geq \varepsilon_0; \\ 0 & \text{при } \int_0^t \varepsilon^2(\tau) d\tau < \varepsilon_0. \end{cases}$$

Если $\epsilon_0 = \text{const}$, то ϵ_0 — абсолютная среднеквадратичная ошибка дискретизации. В тех случаях, когда целесообразно задавать относительную ошибку, следует принять $\epsilon_0 = \psi(x(t))$, например, при

$\epsilon_0 = \frac{0,01}{t} \int_0^t x^2(\tau) d\tau$ относительная ошибка дискретизации будет равна 1%.

Для реализации рассмотренных устройств используются обычные элементы вычислительной техники (интеграторы, сумматоры, множительно-делительные и логические устройства) и адаптивные элементы, т. е. элементы, характеристика вход — выход которых меняется в зависимости от управляющего сигнала и остается неизменной (соответствующей последнему значению управляющего сигнала) при отсутствии управляющего сигнала.

Устройство и принцип работы различных адаптивных элементов подробно описаны в [15].

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Ли. Оптимальные оценки, определение характеристик и управление. М., «Наука», 1966.
2. Я. З. Цыпкин. Адаптация и обучение в автоматических системах. М., «Наука», 1968.
3. Я. З. Цыпкин. Оптимальные гибридные алгоритмы адаптации.— Автоматика и телемеханика, 1968, № 8.
4. Э. Д. Аведьян, Р. А. Симсарьян. Адаптивный функциональный преобразователь в задаче определения параметров технологического процесса по косвенным показателям.— Автоматика и телемеханика, 1969, № 11.
5. D. Gabog, W. P. L. Wilby, R. Woodcock. Универсальное нелинейное фильтрующее, упреждающее и моделирующее устройство с самонастройкой в процессе обучения.— Экспресс-информация. Приборы и элементы автоматки, 1961, № 47.
6. Эндрюс, Дэвис, Шварц. Адаптивное сжатие данных.— ТИИЭР, 1967, т. 55, № 3.
7. В. Н. Хлестунов. О применимости теоремы Котельникова к дискретной измерительной технике.— Измерительная техника, 1961, № 3.
8. В. Б. Смоллов. Диодные функциональные преобразователи. Л., «Энергия», 1967.
9. С. А. Гинзбург. Математическая непрерывная логика и изображение функций. М., «Энергия», 1968.
10. В. А. Львов. О путях автоматизации научных исследований.— В сб. «Вычислительные системы», вып. 6. Новосибирск, 1968.
11. В. И. Горохов, И. К. Левин, Р. А. Симсарьян. Построение системы сбора информации для исследования сложного технологического объекта.— Материалы IV Республиканской научной конференции молодых исследователей по системотехнике, т. II. Киев, 1969.
12. А. Ф. Бабушкина, Т. А. Валнев. Применение аналоговых ЭВМ для построения аксонометрических проекций.— В сб. «Вопросы кибернетики и вычислительной техники», вып. 22. Ташкент, 1968.
13. К. И. Диденко, В. Н. Ласковий, Л. Т. Лысый, А. К. Черепанова. Применение газоразрядных индикаторов в системах автоматического контроля и измерений.— Механизация и автоматизация управления, 1969, № 6.
14. П. Суппес, Дж. Зиннес. Основы теории измерений.— В сб. «Психологические измерения». М., «Мир», 1967.
15. М. А. Розенблаг, А. А. Ромашев, В. А. Семенов. Элементы с адаптируемым коэффициентом передачи (обзор).— Автоматика и телемеханика, 1967, № 10.

*Поступила в редакцию
8 июля 1970 г.*