жительное напряжение, пропорциональное коду). Введение компенсирующего двухразрядного ПКН позволило уменьшить погрешность от изменения амплитуды до того же порядка, что и погрешность от искажения формы треугольного колебания. Линейность шкалы ухудшается от введения компенсирующего ПКЧ, однако для данного конкретного применения это оправдано.

Быстродействие ПКЧ определяется переходными процессами в узлах устройства. Новое значение частоты на выходе появится через время

$$t = t_1 + t_2 + t_3 \cong 600 \text{ нс},$$

где t_1 — время преобразования «код — ток» (~ 100 нс); t_2 — время прохождения сигнала по каскадам умножителя частоты (~ 100 нс); t_3 — время задержки в фильтре (~ 400 нс).

Разработанный ПКЧ был изготовлен в двух экземплярах и использовался в быстродействующем синтезаторе частот [4]. ПКЧ имеет следующие характеристики: диапазон частот 3,96—6,18 МГц; относительный уровень паразитных частот в полосе 4—6 МГц не превышает — 28 дБ; нелинейность шкалы частот 1,25%; время установления частоты выходного сигнала не более 1 мкс; стабильность частоты в лабораторных условиях 0,3% в диапазоне +5 ... +40°С.

ЛИТЕРАТУРА

1. О'Нейл. Микросхемы — генераторы сигналов.— «Электроника», 1972, № 24, с. 72—74.
2. Новицкий П. В., Кнорринг В. Г., Гутников В. С. Цифровые приборы с частотными датчиками. Л., «Энергия», 1970.
3. Клерк М., Лиманский С., Добек Й. Умножитель частоты.— Пат. Франции, № 2092839, кл. H03ь19/00, заявл. 24 июня 1970, опубл. 22 июля 1972.
4. Вьюхин В. Н., Ковалев Е. А., Курочкин В. В., Юношев В. П. Быстродействующий двухканальный синтезатор частот.— «Автометрия», 1976, № 3, с. 28—35.

Поступила в редакцию 14 февраля 1977 г.

УДК 681.325.3

В. И. АЛЕКСАНДРИН, М. А. ЧУБАРОВ

(Горький)

КОНТРОЛЬ ДИНАМИКИ АЦП МЕТОДОМ НАКОПЛЕНИЯ ОШИБКИ

В процессе проектирования, производства и эксплуатации аналого-цифровых преобразователей (АЦП) возникает задача контроля их характеристик в динамическом режиме.

Описанный в работе [1] метод, являясь достаточно универсальным, требует создания специальной аппаратуры, что в случае контроля АЦП с быстродействием выше 5—10 млн преобразований в секунду существенно снижает его технико-экономическую эффективность.

Обеспечить динамический режим работы АЦП и сравнительно простой способ регистрации результата можно и без использования специального быстродействующего запоминающего устройства, если учесть, что АЦП является звеном с запаздыванием. Для этой цели исследуемый АЦП и образцовый цифроаналоговый преобразователь

(ЦАП) соединяются в замкнутую систему с отрицательной обратной связью (рис. 1).

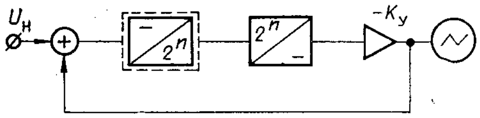

Рис. 1.

После окончания начального воздействия $U_н$ за счет запаздывания сигнала в тракте АЦП—ЦАП система будет работать в режиме автоколебаний. Характер колебательного процесса, зависящий от параметров звеньев, в случае образцовых ЦАП и инвертора будет зависеть главным образом от вида динамической квантующей характеристики АЦП.

Рассмотрим связь между видом динамической квантующей характеристики АЦП и формой огибающей колебаний в системе; при этом будем учитывать, что основную роль в образовании динамической ошибки АЦП играет аналоговое запоминающее устройство (АЗУ), являющееся входным узлом АЦП (ошибка недозаряда емкости в процессе записи и разряда — в процессе хранения).

Введем безразмерные величины:

$$t=\bar{t}/(rC);\ \tau=\bar{\tau}/(rC);\ \theta=T/(rC);\ d=\bar{d}/(rC);$$

$$U=\bar{U}/w;\ m=r/R;\ K=\bar{K}/w,$$

где C — величина запоминающей емкости в АЗУ; r — сопротивление замкнутого ключа; R — эквивалентное сопротивление разряда запоминающей емкости в режиме хранения; $\bar{d}$ — продолжительность замкнутого состояния ключа (время записи); T — период замыкания ключа; w — шаг квантования; $\bar{\tau}$ — время задержки от начала кодирования в АЦП до появления соответствующего сигнала на выходе ЦАП; $\bar{U}$ — напряжение, действующее на входе АЗУ в течение времени записи; K — коэффициент передачи ЦАП и инвертора.

Уравнения системы в безразмерной форме имеют вид

$$\begin{cases} \dot{U}+U=-Kf[U(t-\tau)], & q\theta<t\leqslant q\theta+d; \\ \dot{U}+mU=0, & q\theta+d<t\leqslant(q+1)\theta. \end{cases}$$

Здесь $f(U)=\bar{f}(wU)$, $U=\bar{U}/w$, $\bar{f}(\bar{U})$ — характеристики АЦП. Для идеального АЦП $f(U)=A(U)$, где $A(U)$ — ближайшее к U целое число.

Будем полагать, что $\operatorname{sgn}[Uf(U)]=1$, и запишем формулы двукратного точечного отображения [2]:

$$U_{q+1}=\Delta U_q-pf(U_q\alpha^{-1});$$

$$U_q=\Delta U_{q-1}+pf(U_{q-1}\alpha^{-1}), \qquad (1)$$

где $U_q=U(q\theta+d)$; $\Delta=e^{-d-m(\theta-d)}$; $p=K(1-e^{-d})$; $\alpha=e^{-m(\theta-\tau)}$. Возможное влияние неточности ЦАП и шумов входных цепей АЦП учтем введением малых коэффициентов μ и ε, причем $\mu=\frac{\partial f(U)}{\partial U}$ при U, лежащем внутри шага квантования (неточность ЦАП), и $\frac{1}{\varepsilon}=\frac{\partial f(U)}{\partial U}$ при U, лежащем в окрестностях уровня квантования (шум).

Если неподвижная точка точечного преобразования (1) соответствует движениям, попадающим дважды за период на участки характеристики с наклоном μ, то

$$\frac{\partial U_2}{\partial U_0}=(\Delta-p\mu\alpha^{-1})^2$$

и условие устойчивости неподвижной точки имеет вид $|\Delta - p\mu\alpha^{-1}| < 1$, при попадании же движения один раз на участок с большим наклоном это условие принимает вид

$$\frac{\partial U_2}{\partial U_0} = (\Delta - p\mu\alpha^{-1})(\Delta - p\varepsilon^{-1}\alpha^{-1}) < 1.$$

Пренебрегая апертурной ошибкой в АЗУ и считая характеристику $f(U)$ нечетной, можно привести точечное отображение (1) к виду

$$U_2 = Kf(Kf(U_0)). \tag{2}$$

Рассмотрим более подробно случай идеальной характеристики $f(U) = A(U)$. При $K=1$ отображение (2) имеет 2^n устойчивых неподвижных точек, которым соответствуют симметричные относительно нуля периодические движения. В случае $K \geqslant 1$ у функции (2) имеют место

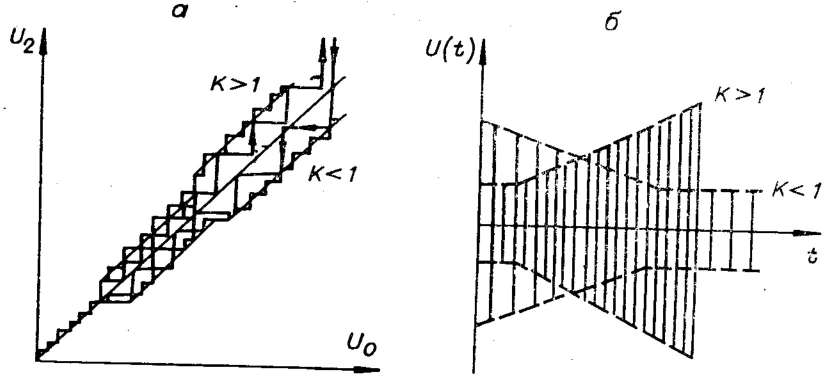

Рис. 2.

«перескоки» через уровни квантования в сторону увеличения амплитуды, а при $K \leqslant 1$ — перескоки в сторону уменьшения. На рис. 2, *а* представлена диафрагма Ламерея [3] для этого отображения и соответствующие ей расчетные осциллограммы (рис. 2, *б*). Очевидно, что соответствующие автоколебания либо нарастают ($K>1$), либо убывают ($K<1$), причем на осциллограммах должны присутствовать характерные линейные участки нарастания (убывания) амплитуды колебаний, хорошо наблюдаемые в эксперименте. На рис. 3 приведена экспериментальная осциллограмма (масштаб: по оси x 100 мкс/см, по оси y 0,2 В/см). Нетрудно проверить, что для $K = 1+\beta$ первый перескок через один уровень происходит при $U \simeq 1/(2\beta)$, а следующие — через $i \simeq 1/\beta$ уровней квантования.

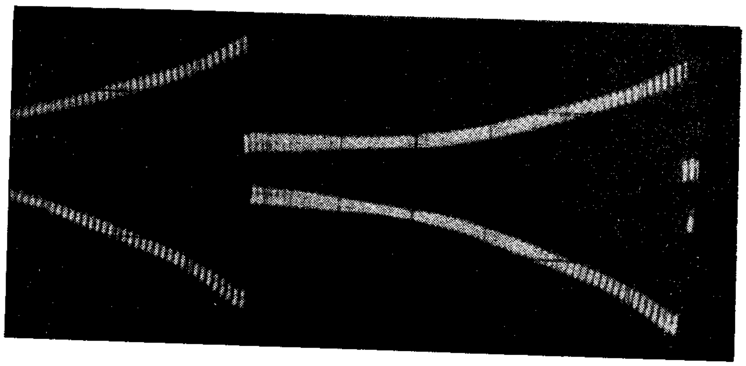

Рис. 3.

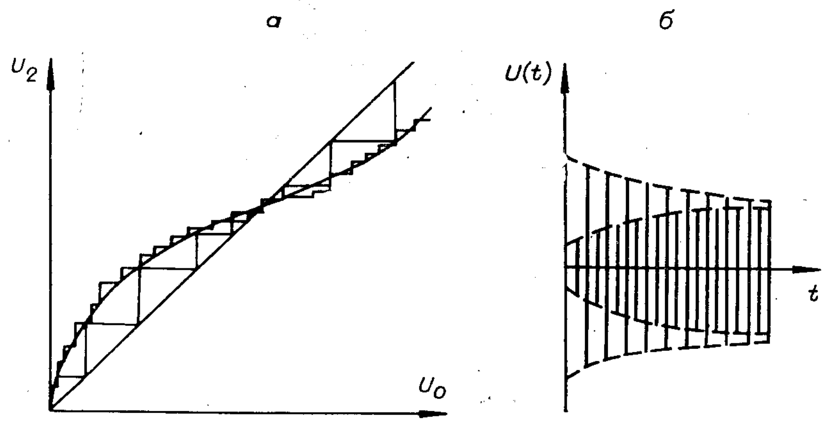

Рис. 4.

С помощью диаграмм Ламерея несложно построить осциллограммы автоколебаний и при нелинейных искажениях квантующей характеристики. Так, например, на рис. 4, *а* показана диаграмма Ламерея для случая плавной (интегральной) нелинейности, когда форма огибающей колебания зависит от начального воздействия. Рис. 4, *б* изображает соответствующую этому случаю расчетную осциллограмму.

На основании диаграмм Ламерея может быть составлен каталог типовых осциллограмм, классифицированных для ускорения поиска по определенным признакам. Сравнивая получаемую осциллограмму с наиболее близкой из каталога, можно в большинстве случаев определить характер погрешности АЦП и локализовать ее. Имея математическое описание характерных особенностей получаемой осциллограммы, поиск наиболее близкой теоретической осциллограммы можно автоматизировать.

Заметим, что качественный характер осциллограмм автоколебаний, получаемый в результате исследования отображения (2), сохраняется также при малых Δ и $1-\alpha$. Следует лишь учитывать, что на горизонтальных участках функции $U_2(U_0)$ нулевой наклон меняется на отрицательный, а вместо K следует брать

$$K' = p\alpha - \Delta.$$

Описанный метод опробован экспериментально (см. рис. 3). Благодаря тому, что от цикла к циклу ошибка накапливается, для регистрации ее нет необходимости в быстродействующих ЗУ, достаточно обычного осциллографа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смолов В. Б., Чернявский Е. А., Полянская Т. И., Курдиков Б. А. Универсальные кодирующие и декодирующие преобразователи. Л., «Энергия», 1971.
2. Алексеев А. С. Применение метода точечных преобразований к исследованию динамики нелинейных импульсных систем.— «Изв. высш. учеб. завед. Радиофизика», 1966, т. 96, с. 1217.
3. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М., ГИФМЛ, 1959.

Поступила в редакцию 20 июля 1976 г.;
окончательный вариант — 1 марта 1977 г.