го центра (примерная ориентировка БК на район появления КО) компенсируется широким полем зрения объектива и возможностью ручной доводки прибора на объект по данным визуального наблюдения. Фотографирование звезд и КО одновременно на одну фотопластинку является достаточным условием надежного определения (уточнения) координат оптического центра.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Брандин, А. А. Васильев, С. Т. Худяков. Основы экспериментальной космической баллистики. М., «Машиностроение», 1974.
2. Л. А. Воронцова, Г. П. Чейдо. Алгоритм автоматического отождествления звезд снимка с каталогом.— «Автометрия», 1974, № 4, с. 103—111.
3. М. К. Вентцель. Сферическая астрономия. М., Геодезиздат, 1952.
4. В. В. Подобед. Фундаментальная астрономия. М., «Наука», 1968.
5. Е. Я. Бугославская. Фотографическая астрономия. М., Гостехиздат, 1947.

Поступила в редакцию 24 февраля 1975 г.:
окончательный вариант — 3 октября 1975 г.

УДК 621.317.7.085.36 : 621.317.7.088

В. П. ПОПОВ

(Москва)

ОБ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Вопрос обеспечения необходимой точности преобразования в различных условиях эксплуатации аналого-цифровых преобразователей (АЦП) — основной вопрос измерительной техники. Перспективными оказываются структурные методы повышения точности, основанные на введении в проектируемые АЦП дополнительной корректирующей аппаратуры, среди которых особое место занимают методы автоматической коррекции погрешности (АКП).

Несмотря на появление большого количества работ (например, [1—9]), посвященных методам АКП, в литературе не установился определенный подход к этой проблеме. Описанные методы практически не связаны друг с другом. Отсутствие оценок методических ошибок делает некоторые методы [3—4] узкоспецифичными. Все это не позволяет оценить возможности методов АКП.

В настоящей работе предпринята попытка алгоритмического подхода к автоматической коррекции систематической и сильно коррелированной во времени случайной погрешности результатов преобразования АЦП. Оценивается возможность применения некоторых методов АКП, исследуется итерационный метод АКП [5], вопросы устранения его абсолютной методической ошибки и погрешности ЦАП.

Аналого-цифровое преобразование можно представить как отображение некоторой функцией $f(x)$ множества X значений аналоговой величины в цифровое множество Y.

Реальная функция АЦП $f(x)$ обычно отлична от теоретической $f_т(x)$, по которой производится градуировка АЦП,

$$f(x) \equiv f_т(x) + \delta f(x), \tag{1}$$

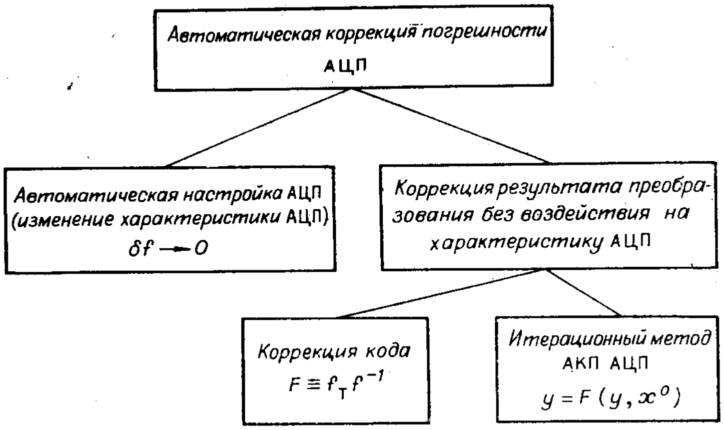

Рис. 1.

и получаемый результат преобразования $y_1=f(x^0)$ аналоговой величины x^0 отличается от истинного $y^0=f_т(x^0)$.

Цель АКП — устранение возникшей погрешности, что может быть достигнуто двумя путями (рис. 1).

Первый, наиболее распространенный путь — сведение к нулю δf воздействием на характеристику АЦП (автоматическая настройка АЦП) — описан во многих работах [1, 2].

Более детального рассмотрения требует второй путь АКП.

Коррекция результата аналого-цифрового преобразования без воздействия на характеристику АЦП $f(x)$ описывается оператором F, называемым далее корректирующим, сводящим y_1 к y^0. Его можно задать либо на множестве Y, либо на обоих множествах Y и X.

Если корректирующий оператор действует только на множестве Y, то из тривиального условия $y^0=Fy_1$, как нетрудно видеть, однозначно следует, что в этом случае он должен иметь вид

$$F\equiv f_т f^{-1}. \tag{2}$$

Таким образом, если корректирующий оператор задан только на множестве Y, то устранить погрешность можно, лишь зная реальную функцию АЦП. Алгоритмы функционирования корректирующего оператора F, определенного на обоих множествах Y и X, можно разбить на два класса: алгоритмы, определяющие функцию $f(x)$ (условно можно записать в виде (2)), и алгоритмы, определяющие некоторую точку (или точки), известным образом связанную с измеряемой x^0.

Алгоритмы определения $f(x)$ можно разбить на две группы.

Алгоритмы первой группы основаны на способе кусочной аппроксимации $f(x)$ [3—4], по результатам которой определяется точка, в окрестности которой она производится. Возможность применения этого способа сильно затруднена ввиду определяющего влияния на результат коррекции локальной нелинейности функции $f(x)$. Такой способ оправдывает себя лишь в случае достаточно точного знания типа локальной нелинейности.

В окрестности неизвестной точки x^0 функция f представляется в виде

$$f(x^0+\xi_i)=f(x^0)+R(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m, \xi_i);\ R(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m, 0)=0, \tag{3}$$

где R — известная функция параметров $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m$ и эталонных приращений ξ_i.

Как нетрудно заметить, для определения x^0 необходимо, чтобы по меньшей мере одно из приращений ξ_i было известным образом связано с x^0. Положим $\xi_1 = S(x^0)$. Производя $M \geqslant m$ измерений, получим систему уравнений

$$\eta_i - y_1 = R(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m, \xi_i); \; \eta_i = f(x^0 + \xi_i), \; i = 1, 2, \ldots, M, \tag{4}$$

из которой с определенной степенью точности находится ξ_1. Можно показать, что относительная погрешность в определении x^0 связана с погрешностью определения ξ_1 так:

$$\delta x^0 = \left|\frac{\Delta x}{x^0}\right| \simeq \frac{\xi_1}{x^0}\left|\frac{dS}{dx^0}\right|^{-1}\left|\frac{\Delta \xi_1}{\xi_1}\right| \simeq \left|\frac{\Delta \xi_1}{\xi_1}\right| = \delta \xi_1. \tag{5}$$

Точность определения ξ_1 зависит от точности восстановления функции f в заданной окрестности, которая в общем случае растет с увеличением числа учитываемых параметров. Однако требование однозначности определения ξ_1 ограничивает это число. Даже при $m = 2$ определение ξ_1 не всегда однозначно.

Рассмотрим случай кусочно-линейной аппроксимации. С учетом погрешности аппроксимации можно записать

$$\begin{aligned} &\eta_1 - y_1 = \alpha \xi_1; \\ &\eta_2 - y_1 = \alpha \xi + f''(\xi_0)\xi(\xi - \xi_1), \quad \xi_0 \in [\xi, \xi_1]. \end{aligned} \tag{6}$$

Отсюда легко получить значение ξ_1^0 (значение ξ_1 при отсутствии погрешности аппроксимации) и относительную погрешность $\delta\xi_1$ в определении ξ_1:

$$\xi_1^0 = [(\eta_1 - y_1)/(\eta_2 - y_1)]\,\xi; \quad \delta\xi_1 \simeq |(\xi - \xi_1)[\ln f'(\xi_0)]'|. \tag{7}$$

Из последнего выражения видно, что относительная погрешность сильно зависит от локальной нелинейности $f(x)$, но может быть уменьшена, если приращения ξ и ξ_1 будут одного знака. Интересно заметить, что погрешность в данном случае зависит не от интервала аппроксимации, а от разности $|\xi - \xi_1|$ и обращается в нуль при $\xi = \xi_1$ (только в этом случае измеряемая величина выражается известным образом через эталонную $x^0 = S^{-1}(\xi_1)$). Но в общем случае лишь достаточно точное знание локальной нелинейности может устранить методическую ошибку. Последняя же зависит не только от $\delta\xi_1$, но и от точности задания зависимости $\xi_1 = S(x^0)$. Если же зависимость S, в свою очередь, задана неточно (например, каким-либо способом связана с функцией $f(x)$, локальная нелинейность которой неизвестна), то методическая ошибка будет еще больше. Исходя из этого, нельзя считать вполне корректным, например, метод АКП с введением обратной связи [3], так как методическая ошибка этого метода

$$\delta x = \left|\frac{\Delta x}{x}\right| \simeq \left|x^2\left(\ln\frac{f}{x}\right)'\right| \tag{8}$$

равна нулю лишь для тривиального случая $f \equiv x$ const. При локальной нелинейности типа ax^n $\delta x \simeq |ax(n-1)|$.

Аналогично можно показать, что локальная нелинейность является определяющим фактором методической ошибки и в том случае, когда функция $f(x)$ в окрестности измеряемой точки x^0 представляется в виде

$$\eta_i = f(x_i) = R(\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_m, x_i); \; x_i = x^0 + \xi_i. \tag{9}$$

Например, при аппроксимации гиперболой [4] методическая ошибка

$$\delta x \simeq |1 + x(\ln f)'| \tag{10}$$

резко возрастает при незначительном отклонении локальной нелинейности от гиперболической.

Алгоритмы второй группы связаны с возможностью включения f^{-1} на Y в n-параметрическое семейство функций известного вида. В этом случае требование однозначности не накладывает столь жестких ограничений на число учитываемых параметров, как в случае кусочной аппроксимации. Этот метод изложен ниже при определении функции ЦАП в итерационном методе АКП.

Итерационный метод АКП является наиболее универсальным методом АКП, позволяющим устранить практически любую погрешность АЦП, не определяя реальной функции $f(x)$, путем нахождения некоторой точки, известным образом связанной с измеряемой x^0. Суть его состоит в следующем [5]:

Ищется неподвижная точка корректирующего оператора F. Процесс измерения является моделированием решения уравнения

$$y = F(y, x^0), \tag{11}$$

например, методом последовательных приближений. Задача теоретического исследования этого процесса несколько усложняется тем, что F — ступенчатая функция. Поэтому F представляют сложной функцией:

$$F(y, x^0) \equiv \Phi[\varphi(y, x^0)], \tag{12}$$

где $\varphi(y, x^0)$ — дифференцируемая функция, $\Phi(z)$ — ступенчатая функция, $\Phi(z) = z_i$ для $\forall z \in [z_i - h/2, z_i + h/2)$.

Вид функции $\varphi(y, x^0)$ выбирают таким, чтобы неподвижная точка отображения, осуществляемого ею, не зависела от изменения функции АЦП, была единственна и строго связана с измеряемой аналоговой величиной для $\forall x^0 \in X$.

Этому условию удовлетворяют, например, такие функции [6—8] (рис. 2):

$$f[x^0 - W(y)] - f(0) + y; \tag{13}$$

$$f(x^0) - f[W(y)] + y; \tag{14}$$

$$yf(x^0)/f[W(y)]. \tag{15}$$

На рис. 2 приняты следующие обозначения: X — замкнутое множество значений аналоговой величины; Y — множество значений результата преобразования; $f_т(x)$ — теоретическая функция АЦП; $f(x)$ — реальная функция АЦП; $W(y)$ — функция ЦАП; $И(y)$ — функция индикации; F — корректирующий оператор; x^0 — измеряемая аналоговая величина; y^0 — ее точное значение.

В работе [5] было показано, что решение уравнения (11) методом последовательных приближений приводит к методической ошибке, которая определяется значением $\min f'(x)$ для (13), (14) и $\min \ln f'(x)$ для (15). Это приводит к определенным ограничениям, налагаемым на $f(x)$.

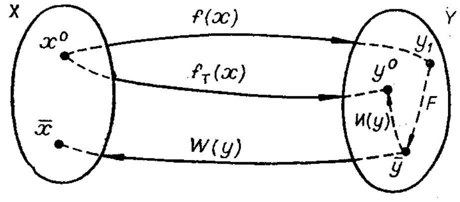

Рис. 2.

Однако метод последовательных приближений не единственный ме-

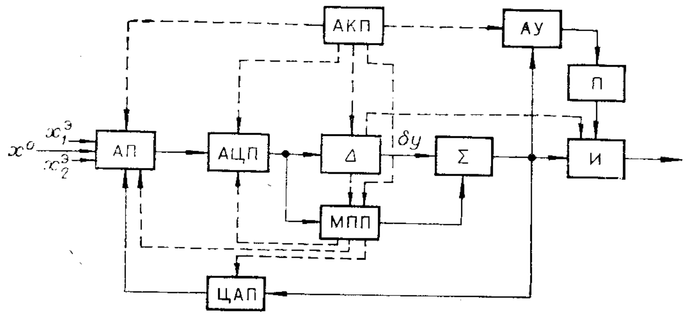

Рис. 3.

тод решения уравнения (11), хотя и наиболее быстродействующий. Достичь неподвижной точки можно, например, изменяя y таким образом, чтобы $\Delta(y)=|f[W(y)]-f(x^0)|\longrightarrow 0$ в случае (14), (15) или $\Delta(y)=|f[x^0-W(y)]-f(0)|\longrightarrow 0$ в случае (13). В этих случаях методическая ошибка не будет превышать погрешности дискретности.

Таким образом, на первом этапе решения уравнения (11) можно использовать метод последовательных приближений. Полученную же этим методом стационарную точку y_c нужно скорректировать так, чтобы $\Delta(\bar{y}=y_c+\delta y)\leqslant h$.

Структурная схема измерения приведена на рис. 3. Блок АП осуществляет аналоговое преобразование и коммутацию; блок АЦП — аналого-цифровое преобразование; блок ЦАП — цифроаналоговое преобразование; блок МПП реализует метод последовательных приближений; блок Δ осуществляет коррекцию стационарной точки метода последовательных приближений; АУ — арифметическое устройство, реализующее решение системы уравнений относительно параметров функции ЦАП; блок П запоминает значения найденных параметров; Σ — цифровой сумматор; И — блок индикации окончательного результата измерения; блок АКП управляет работой всех блоков (команды показаны штриховой линией). При совпадении i-го и $(i+2)$-го приближений блок Δ останавливает итерацию и, последовательно увеличивая или уменьшая входной код ЦАП, доводит разность $\Delta(y)$ до значения, меньшего h, после чего разрешает индикацию.

Такой метод решения уравнения (11) может устранить и двузначность характеристики АЦП. Если функция АЦП двузначна, то ветви однозначности функции АЦП различаются знаком производной, который можно установить, придавая измеряемой величине произвольное малое приращение ξ

$$\operatorname{sign} f'(x)=\operatorname{sign}\xi[f(x+\xi)-f(x)].$$

Для определенности рассмотрим случай, когда экстремумом функции является максимум. В этом случае при $f'(x)\geqslant 0$ измерение производится описанным выше способом. При $f'(x)\leqslant 0$ метод последовательных приближений с прежним ЦАП не применим. В таком случае на входе ЦАП устанавливается $y=y_{\max}$, блок Δ последовательно уменьшает входной код до значения, при котором $\Delta(\bar{y})\leqslant h$. Нетрудно показать (способом, изложенным в работе [5]), что и при $f'(x)<0$ можно применить метод последовательных приближений, если выбрать ЦАП с $W'(y)<0$.

Исходя из вышеизложенного, можно считать, что неподвижная точка $\bar{y}$ отображения φ с точностью до дискретности и есть результат измерения, и в дальнейшем будем исследовать ее.

Из (13)—(15) видно, что неподвижная точка $\bar{y}=W^{-1}(x^0)$, т. е. в окончательный результат измерения полностью входит погрешность ЦАП.

Нельзя ли найти такой оператор φ, неподвижная точка которого не зависела бы от изменения функции $W(y)$, например, делая какие-либо предположения относительно вида $W(y)$? Ответ на этот вопрос не столь очевиден, так как в ЦАП обязательно входят эталонные величины, а из постановки задачи (11) не следует невозможность сведения точности измерения к точности и стабильности эталонных величин ЦАП. Например, неподвижная точка оператора

$$\varphi(y,\ x^0)\equiv f[x^0+W(0)]-f[W(y)]+y \tag{16}$$

не зависит от аддитивной составляющей погрешности ЦАП.

Можно показать, что в общем случае невозможно устранить влияние изменения $W(y)$ на положение неподвижной точки $\bar{y}$ оператора φ (см. приложение).

Зависимость неподвижной точки $\bar{y}$ от погрешности ЦАП не исключает возможность выявления функции W при некоторых предположениях относительно ее вида.

Включим W в n-параметрическое семейство функций, т. е. положим, что W зависит от n параметров:

$$W\equiv W(a_1,\ a_2,\ \ldots,\ a_n,\ y). \tag{17}$$

Это предположение не лишено основания, так как цифроаналоговый преобразователь состоит из конечного числа элементов, которые собственно и реализуют функцию W.

Рассмотрим оператор следующего вида:

$$\varphi(y,\ x^0)\equiv f(x^0)-f[s_\alpha W(y)]+y, \tag{18}$$

где s_α — некоторое число *. Неподвижной точкой этого оператора будет

$$\bar{y}_\alpha=W^{-1}(x^0/s_\alpha). \tag{19}$$

Не предполагая наличия точного делителя, производим измерения эталонных аналоговых величин $x_1^э$ и $x_2^э$ при различных значениях s_α. Получаем

$$\begin{gathered} W\left(a_1, a_2, \ldots, a_n, \bar{y}_\alpha^1\right)=\frac{x_1^э}{s_\alpha}; \\ W\left(a_1, a_2, \ldots, a_n, \bar{y}_\alpha^2\right)=\frac{x_2^э}{s_\alpha}, \quad \alpha=1, 2, \ldots, N. \end{gathered} \tag{20}$$

Полагая $s_1=1$ и исключая неизвестные s_α, получим систему уравнений

$$\begin{gathered} \frac{1}{x_1^э} W\left(a_1, a_2, \ldots, a_n, \bar{y}_\alpha^1\right)-\frac{1}{x_2^э} W\left(a_1, a_2, \ldots, a_n, \bar{y}_\alpha^2\right)=0, \quad \alpha=2, 3, \ldots, N; \\ W\left(a_1, a_2, \ldots, a_n, \bar{y}_\alpha^1\right)=x_1^э; \\ W\left(a_1, a_2, \ldots, a_n, \bar{y}_\alpha^2\right)=x_2^э, \end{gathered} \tag{21}$$

* Физически s_α — коэффициент ослабления значения выходной аналоговой величины ЦАП в точке измерения. Например, в случае магнитного (или электростатического) поля такое ослабление может осуществляться куском магнитного (электростатического) экрана, от ее размеров и положения которого зависит значение s_α в точке измерения. В случае измерения напряжения s_α — коэффициент передачи резисторного делителя.

из которой можно определить неизвестные параметры. Сделать это однозначно можно, например, в случае линейности W относительно параметров:

$$W(a_1, a_2, \ldots, a_n, y) \equiv \sum_{i=1}^{n} a_i W_i(y). \tag{22}$$

Тогда система примет вид

$$\begin{gathered}\sum_{i=1}^{n} a_i \left[\frac{1}{x_1^{\circ}} W_i(\bar{y}_\alpha^1) - \frac{1}{x_2^{\circ}} W_i(\bar{y}_\alpha^2)\right] = 0, \quad \alpha = 2, 3, \ldots, N; \\ \sum_{i=1}^{n} a_i W_i(\bar{y}_1^1) = x_1^{\circ}; \\ \sum_{i=1}^{n} a_i W_i(\bar{y}_1^2) = x_2^{\circ}.\end{gathered} \tag{23}$$

Решая полученную систему линейных уравнений, с определенной степенью точности можно определить неизвестные параметры *.

Необходимость корректировки результата измерения по параметрам функции ЦАП может возникнуть при длительной работе измерительного прибора без калибровки и подстройки в неизвестных условиях окружающей среды.

Система (23) или (21) периодически решается в арифметическом устройстве (АУ) (см. рис. 3). Найденные параметры запоминаются в блоке памяти (П) и учитываются при индикации.

Коррекцию ЦАП удобно производить при работе измерительного прибора совместно с вычислительной системой, когда для решения системы уравнений можно использовать ЭВМ.

ВЫВОДЫ

Погрешность, вносимая в окончательный результат измерения методами АКП, основанными на кусочной аппроксимации функции АЦП, сильно зависит от изменения ее локальной нелинейности.

Итерационный метод АКП дает возможность устранить любую однозначную и при наличии устройства аналогового сложения двузначную нелинейность АЦП, не внося методической ошибки. При отсутствии точного ЦАП возможно сведение точности преобразования аналоговой величины к точности двух эталонных аналоговых величин.

Приложение

Допустим, что существует оператор φ, неподвижная точка которого не зависит от изменений f и W. Выясним свойства такого оператора.

Сходящейся к $\bar{y}$ последовательности $\{y_i\}$ точек множества Y соответствует сходящаяся последовательность $\{x_i\}$ точек множества X. Соответствие дается функцией W:

$$x_i = W(y_i). \tag{П.1}$$

Неподвижные точки $\bar{x}$ и $\bar{y}$ связаны этим же соотношением

$$\bar{y} = W^{-1}(\bar{x}) = И^{-1}(y^0), \tag{П.2}$$

И (y) — известная функция индикации.

* Заметим, что аналогичным способом можно определить и вид f^{-1}, повторяя выкладки (20)—(23) с заменой W на f^{-1}.

Из того, что (П.2) должно выполняться для любой функции W, следует: величина $\bar{x}$ может принимать любые значения и, таким образом, строго не связана с x^0.

Учитывая, что i-е приближение в общем случае может являться также и функцией x^0, x_{i-1}, $y_1=f(x^0)$, величину y_i можно переписать в следующем виде:

$$y_i=\varphi(y_{i-1}, x^0)=\psi_{f,W}(y_1, y_{i-1}, x^0, x_{i-1}). \tag{П.3}$$

Нижние индексы f, W функции ψ показывают ее зависимость от этих функций.

Неподвижная точка $\bar{y}$ будет удовлетворять аналогичному соотношению

$$\bar{y}=\psi_{f,W}(y_1\ \bar{y},\ x^0,\ \bar{x}). \tag{П.4}$$

Удовлетворить этому условию при любом $\bar{x}$ можно лишь в том случае, если функция $\psi_{f,W}$ не зависит явно от $\bar{x}$, т. е.

$$\bar{y}=\psi_{f,W}(y_1\ \bar{y},\ x^0). \tag{П.5}$$

Но алгебраические операции, которые осуществляет эта функция, возможны лишь над точками одного и того же множества; следовательно $\psi_{f,W}$ зависит явно не от x^0, а от ее образа в множестве $Y-f(x^0)=y_1$; таким образом,

$$\bar{y}=\psi_{f,W}(y_1,\ \bar{y}). \tag{П.6}$$

Учитывая это, можно переписать (П.3) так:

$$y_i=\psi_{f,W}(y_1,\ y_{i-1})=\psi_{fW}(y_1,\ y_{i-1}). \tag{П.7}$$

Здесь запись индекса fW отражает тот факт, что функция ψ зависит не от f и W отдельно, а от сложной функции fW, ибо операции производятся только над точками множества Y. Последнее обстоятельство вместе с произвольностью функций f и W влечет за собой неоднозначность соответствия между x^0 и $\bar{y}$.

Действительно, положим, что для некоторых функций f_1 и f_2 выполняется условие

$$y_1=f_1(x_1^0)=f_2(x_2^0)=\xi_1. \tag{П.8}$$

Из произвольности функции W следует, что можно найти такие W_1 и W_2, что

$$f_1W_1=f_2W_2. \tag{П.9}$$

И тогда, согласно (П.7)—(П.8),

$$\begin{aligned}
y_2 &= \psi_{f_1W_1}(y_1,\ y_1)=\psi_{f_2W_2}(\xi_1,\ \xi_1)=\xi_2;\\
y_3 &= \psi_{f_1W_1}(y_1,\ y_2)=\psi_{f_2W_2}(\xi_1,\ \xi_2)=\xi_3;\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
y_i &= \psi_{f_1W_1}(y_1, y_{i-1})=\psi_{f_2W_2}(\xi_1, \xi_{i-1})=\xi_i\ \dots .
\end{aligned} \tag{П.10}$$

Таким образом, последовательности $\{y_i\}$ и $\{\xi_i\}$, представляющие различные точки x_1^0 и x_2^0, сходятся к одному и тому же пределу, что противоречит самому выбору оператора φ.

Следовательно, не существует оператора φ, неподвижная точка которого строго связана с x^0 и не зависит от f и W одновременно.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Гельман, Г. Г. Шаповал. Автоматическая коррекция систематических погрешностей в преобразователях «напряжение — код». М., «Энергия», 1974.
2. А. Д. Ниженский, Ю. А. Юрченко. Методы автоматической коррекции погрешностей измерительных преобразователей фазы.— «Автометрия», 1973, № 4, с. 83.
3. Э. М. Бромберг. Автокорректирующиеся системы для измерения некоторых неэлектрических величин.— «Приборы и сист. упр.», 1973, № 10, с. 24.
4. Э. М. Бромберг, В. С. Гольдман. Автокорректирующийся индуктивно-частотный преобразователь линейных перемещений.— «Автометрия», 1971, № 2, с. 99.
5. В. П. Попов. О точности цифровых измерительных приборов с автоматической коррекцией погрешности.— «Автометрия», 1972, № 2, с. 69.
6. Б. Дж. Кэй. Правильный выбор цифрового вольтметра.— «Электроника» (пер. с англ.) ,1966, т. 39, № 7, с. 3.
7. Т. М. Алиев, Л. Р. Сейдель, Л. А. Тер-Хачатуров. Способ повышения точности цифрового измерения аналоговой величины.— «Автометрия», 1969, № 5, с. 91.
8. Т. М. Алиев, Л. Р. Сейдель. Мультипликативная итерационная коррекция погрешностей цифровых измерительных приборов.— «Приборы и сист. упр.», 1974, № 2, с. 28.
9. Л. И. Волгин. Итерационные алгоритмы повышения точности измерительных устройств.— «Автометрия», 1974, № 5, с. 84.

Поступила в редакцию 3 апреля 1975 г.;
окончательный вариант — 15 июля 1975 г.

УДК 681.142.6

П. Н. ДИМИТРАКИ

(Кишинев)

МНОГОУСТОЙЧИВЫЙ ЭЛЕМЕНТ С ТРЕХПЕТЛЕВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В последнее время значительный интерес проявляется к импульсным устройствам с многопетлевой обратной связью (МПОС) [1], обладающим весьма высоким быстродействием, и к многоустойчивым элементам фазоимпульсного типа. Достаточно отметить, что применение фазоимпульсных многоустойчивых элементов (ФИМЭ) в качестве пересчетных декад в счетчиках импульсов позволяет сократить количество деталей и потребляемую мощность почти в три раза [2]. Однако известные ФИМЭ [2 и др.] не обладают достаточным быстродействием и стабильностью, так как при перебросе состояний схемы действует лишь одна петля обратной связи. Параметры ФИМЭ могут быть в значительной мере улучшены, если в них сочетать одновременно преимущества режима перезаряда накопительного конденсатора, высокое быстродействие систем с многопетлевой обратной связью, бистабильных триггеров и регенеративных ключей (РК) на двух транзисторах разного типа проводимости [3], а также стабилизирующие свойства электрического моста [4]. Основное преимущество режима перезаряда конденсатора по сравнению с режимами его заряда или разряда — уменьшение влияния нестабильности постоянной времени конденсатора, обусловленное увеличением емкости (для большинства конденсаторов) и уменьшением сопротивления изоляции с ростом температуры. Схема ФИМЭ, в котором действуют перечисленные выше свойства отдельных импульсных устройств, приведена на рис. 1. Основные элементы схемы: линеаризующие зарядные каскады на транзисторах $T1$, $T6$ и диодах Д1, Д2; дозирующие конденсаторы $C1$ и $C2$; накопительный конденсатор $C3$; регенеративные ключи РК1 и РК2 на транзисторах $T2$, $T3$ и $T4$, $T5$ соответственно; интегральный бистабильный триггер на спаренных транзисторах $T3$ и $T4$ с соответствующими элементами $R1$, Rк, Rб и Cб.