

ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
Теоретические вопросы

УДК 681.142.621—506

Э. И. ГИТИС, Г. В. МАРКУС
(Москва)

**МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ НАПРЯЖЕНИЯ В КОД**

Преобразователи напряжения в код (ПНК) широко применяются в промышленности и при исследованиях, причем очень часто от них требуется весьма высокая точность. Независимо от типа преобразователя очевидно, что его точность будет повышаться с уменьшением погрешности каждого отдельного преобразования. Последняя может быть представлена в виде двух составляющих: погрешности, связанной с наличием квантования по уровню, и инструментальной погрешности.

Инструментальная погрешность возникает вследствие собственных шумов в элементах системы ПНК и внешних возмущений и в общем случае содержит стационарную и нестационарную составляющие. Стационарная составляющая инструментальной погрешности может быть уменьшена путем обработки выборки преобразований, однако такой метод уменьшения общей погрешности будет эффективным лишь при одновременном уменьшении нестационарной составляющей и систематических погрешностей. Таким образом, весьма актуальной задачей является отыскание методов уменьшения нестационарной составляющей инструментальной погрешности и систематических погрешностей ПНК. Внедрение этих методов позволит: 1) поднять точность преобразования как при обычном преобразовании, так и при обработке выборки преобразований (использовании статистических методов); 2) расширить допустимый диапазон изменения внешних условий, в которых применяется ПНК; 3) использовать в ПНК детали с кратковременной стабильностью; 4) поднять эксплуатационную надежность ПНК.

Практически единственным реальным методом уничтожения или уменьшения этих погрешностей является периодическая калибровка ПНК или настройка его характеристик по эталонному напряжению [1, 2].

Целью настоящей статьи является описание и сравнительный анализ методов выполнения калибровки и самонастройки в ПНК.

ВИДЫ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ПНК

Любой вид ПНК можно представить в виде соединения двух аналоговых элементов: датчика уравнивающего напряжения и схемы сравнения. Датчик уравнивающего напряжения создает набор эталонных напряжений или линейно изменяющееся напряжение (ЛИН), а

схема сравнения определяет момент приблизительного равенства входного и уравнивающего напряжений. Оба эти элемента могут создавать следующие виды погрешностей:

1) ошибку неуравнивания, возникающую в результате изменения начального уровня уравнивающего напряжения и неточного определения момента равенства входного и уравнивающего напряжений. Эта систематическая погрешность может быть записана в виде

$$N_0 = N_0(\xi, U_x), \quad (1)$$

где N_0 — ошибка в выходном коде вследствие указанной причины; ξ — некоторое общее возмущающее действие, приводящее к появлению погрешности; U_x — величина входного напряжения;

2) изменение масштабного коэффициента, связывающего уравнивающее напряжение с выходным кодом. Погрешность в коде, вызываемая этой причиной, равна

$$N_m = [\beta(\xi) - \beta_0] U_x, \quad (2)$$

где $\beta(\xi)$ — фактическое значение, а β_0 — точное значение коэффициента преобразования;

3) отклонение уравнивающего напряжения от линейного закона, т. е. появление местных нарушений масштабного коэффициента. Этот вид погрешности может быть выражен в виде

$$N_\Delta = \Delta\beta(\xi, U_x) U_x, \quad (3)$$

где $\Delta\beta(\xi, U_x)$ — местное изменение коэффициента преобразования.

В результате суммарного воздействия всех трех указанных причин в реальном ПНК связь между входным напряжением и выходным кодом будет характеризоваться уравнением

$$N = \beta(\xi) U_x + \Delta\beta(\xi, U_x) U_x + N_0(\xi, U_x), \quad (4)$$

в то время как в идеальном ПНК эта зависимость будет равна

$$N = \beta_0 U_x. \quad (5)$$

Для учета или ликвидации систематических погрешностей могут быть использованы цифровая калибровка, аналоговая самонастройка и их комбинации. Под калибровкой понимается определение погрешностей или поправок для совокупности возможных значений преобразуемой величины на основе результатов преобразования эталонного напряжения, а под самонастройкой — процесс изменения характеристик ПНК по результатам преобразования эталонного напряжения, приводящий к ликвидации систематических погрешностей.

При использовании любого из этих методов перед рабочим циклом преобразования должен быть произведен предварительный эксперимент, в общем случае состоящий из значительного числа циклов, каждый из которых осуществляется в два такта.

В первом такте производится калибровка или настройка нуля. На вход ПНК подается напряжение $U_{x1} = U_0 = 0$. В идеальном случае в результате преобразования на выходе ПНК должно быть зафиксировано число $N_{x1} = N_0 = 0$. В реальном случае получаем $\Delta N_1 = N_0(\xi)$. Начальное рассогласование (ошибка неуравнивания) оказывается равным

$$\Delta N_1 = N_0(\xi). \quad (6)$$

Во втором такте происходит определение ошибки масштаба. При этом на вход ПНК подается напряжение $U_{x2} = U_3$, в результате преобразования которого должен быть получен заранее известный эталонный код числа $N_{x2} = N_3 = \beta_0 U_3$, а получается $N_{x2} = N_3(\xi)$. Величина цифрового рассогласования в этом случае характеризуется значением

$$\Delta N_2 = N_3(\xi) - N_3, \quad (7)$$

а ошибка масштаба —

$$N_m = N_3(\xi) - N_3 - N_0(\xi). \quad (8)$$

АНАЛОГОВАЯ САМОНАСТРОЙКА ПНК

В этом случае в ПНК вводятся дополнительные регулируемые аналоговые элементы $\gamma_a, \gamma_b, \dots, \gamma_q$, обеспечивающие такое воздействие на передаточные характеристики отдельных элементов преобразователя, при котором происходит уменьшение погрешностей нуля и масштаба до сколь угодно малой, наперед заданной величины при любом виде возмущающего воздействия и любом значении входного напряжения. Иными словами, введение цепей самонастройки позволяет с заданной точностью обеспечить тождественное выполнение следующих соотношений:

$$\beta(\xi, \gamma_a, \dots, \gamma_k) \equiv \beta_0; \quad (9a)$$

$$N_0(\xi, U_x, \gamma_l, \dots, \gamma_m) \equiv 0; \quad (9б)$$

$$\Delta \beta(\xi, U_x, \gamma_n, \dots, \gamma_q) \equiv 0. \quad (9в)$$

Написанные тождества предполагают наличие k элементов, влияющих на коэффициент преобразования ПНК, $m - k$ элементов, характеризующих неточность уравнивания напряжения (ошибка нуля), и $q - m$ элементов, определяющих нелинейность коэффициента преобразования. Естественно предположить, что самонастройку преобразователя можно осуществить не только путем введения в него всех q регулируемых параметров, но и меньшего их числа, очевидно, зависящего от индивидуальных свойств исследуемой системы, в том числе и от применяемого метода преобразования. Следует заметить, что параметры самонастройки ($\gamma_a, \gamma_b, \dots, \gamma_k$), входящие в тождество (9а), обеспечивают лишь постоянство коэффициента преобразования β_0 , в то время как параметры ($\gamma_l, \gamma_m, \dots, \gamma_q$), входящие в тождество (9б) и (9в), оказывают более сложное воздействие: они линеаризуют преобразователь как систему, т. е. создают независимость его параметров от величины преобразуемого напряжения U_x .

Таким образом, самонастройка, в принципе, позволяет уменьшить все три составляющие погрешности. Однако легко показать, что для уменьшения влияния местных изменений коэффициента преобразования необходимо выполнять настройку по эталону, весьма близкому к текущему значению входного напряжения, что делает систему настройки чрезвычайно сложной и поэтому малоэффективной.

Следует отметить, что в настоящее время удается практически снизить значения местных нелинейностей в уравнивающем напряжении до весьма малой величины и система автоматической настройки становится линейной, если удастся обеспечить независимость величины погрешности, возникающей из-за неточного уравнивания напряжений

схемой сравнения ПНК, от величины напряжения U_x , т. е. реализовать условие

$$\frac{\partial N(\xi, U_x, \gamma_1, \dots, \gamma_m)}{\partial U_x} = 0. \quad (10)$$

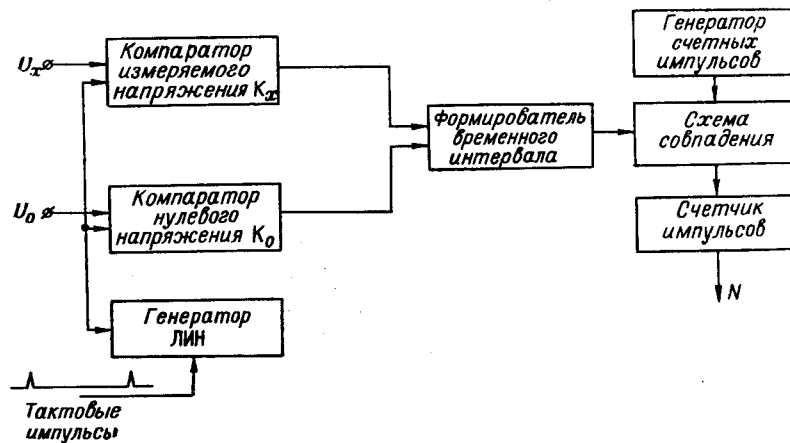
Таким образом, задачей, которую должны решать системы самонастройки, является сведение до минимума систематических погрешностей, возникающих из-за изменения масштаба и неточного уравнивания напряжений, что будет иметь место при выполнении лишь двух тождеств:

$$\beta(\xi, \gamma_a, \dots, \gamma_k) \equiv \beta_0; \quad (11a)$$

$$N_0(\xi, \gamma_1, \dots, \gamma_m) \equiv 0. \quad (11б)$$

Эти тождества в большинстве случаев могут быть реализованы путем введения двух регулируемых параметров: любого из $\gamma_a, \dots, \gamma_k$ в тождестве (11a) и любого из $\gamma_1, \dots, \gamma_m$ в тождестве (11б). Нетрудно видеть, что количество различных вариантов выбора пар параметров самонастройки может быть весьма большим. Выбор того или иного варианта должен основываться на ряде факторов, главным из которых является простота технической реализации и обеспечение наилучших характеристик регулирования, таких как точность, быстродействие, ширина динамического диапазона и др.

Для иллюстрации различных возможностей построения системы самонастройки рассмотрим последнюю применительно к ПНК последовательного счета, выполненному по схеме с двумя элементами сравнения (блок-схема представлена на рисунке).



Уравнение преобразования такого ПНК может быть записано в виде

$$N(\xi) = \beta(\xi) U_x + \beta(\xi) [\Delta U_x(\xi) - \Delta U_0(\xi) + \alpha(\xi) \Delta t(\xi)], \quad (12)$$

где $\beta(\xi) = \frac{1}{\alpha(\xi) T_{г.и}(\xi)}$ — масштабный коэффициент, в котором $\alpha(\xi)$ — наклон уравнивающего ЛИН; $T_{г.и}(\xi)$ — период повторения импульсов; $\Delta U_x(\xi)$ и $\Delta U_0(\xi)$ характеризуют порог чувствительности эле-

ментов сравнения соответственно напряжений U_x и U_0 с уравновешивающим ЛИН; $\Delta t(\xi) = \Delta t_b(\xi) + \Delta t_c(\xi)$ — временная задержка, обусловленная инерционностью блоков выделения пропорционального временного интервала $[\Delta t_b(\xi)]$ и схемы совпадения (временного квантования $[\Delta t_c(\xi)]$).

Очевидно, ошибки нуля и масштаба в этом случае могут быть представлены в виде:

$$N_0(\xi) = [\Delta U_x(\xi) - \Delta U_0(\xi) + \alpha(\xi) \Delta t(\xi)] \beta(\xi); \quad (13a)$$

$$N_m(\xi) = \frac{U_0}{\alpha(\xi) T_{г.и}(\xi)} - N_0. \quad (13б)$$

Как указывалось выше, для осуществления самонастройки в систему должны быть введены параметры настройки, управляющие величинами ошибки нуля и масштаба.

Очевидно, что с точки зрения простоты технической реализации, а также для увеличения динамического диапазона регулирования наиболее удобными являются регулируемые параметры, величины которых могут изменяться с помощью напряжения. В связи с этим целесообразно осуществление регулировки ошибки нуля путем изменения порога срабатывания компаратора нулевого уровня $\Delta U(\xi, \gamma_1)$, а ошибки наклона — регулированием либо наклона $\alpha(\xi, \gamma_2)$ уравновешивающего ЛИН, либо периода повторения $T_{г.и}(\xi, \gamma_2)$ импульсов временного квантования.

Рассмотрим сначала случай, когда регулируемые параметры не коррелированы между собой. Этому случаю соответствует регулирование величин $\Delta U_0(\xi, \gamma_1)$ и $T_{г.и}(\xi, \gamma_2)$.

Поскольку в результате самонастройки $N_m = N_0 = 0$, оптимальные значения $\Delta U_{0 \text{ опт}}$ и $T_{г.и \text{ опт}}$, а из них оптимальные значения $\gamma_{1 \text{ опт}}$ и $\gamma_{2 \text{ опт}}$ определяются из соотношений:

$$\Delta U_{0 \text{ опт}}(\xi, \gamma_{1 \text{ опт}}) = \Delta U_x(\xi) + \alpha(\xi) \Delta t(\xi); \quad (14a)$$

$$T_{г.и \text{ опт}}(\xi, \gamma_{2 \text{ опт}}) = \frac{U_0}{\alpha(\xi) N_0}. \quad (14б)$$

В этом случае для любого n -го цикла самонастройки в первом такте выявляется ошибка $\Delta N_1[n]$, которая может быть записана как

$$\Delta N_1[n] = N_0[n] = \beta(\xi, \gamma_2[n]) [\alpha(\xi) \Delta t(\xi) + \Delta U_x(\xi) - \Delta U_0(\xi, \gamma_1[n])], \quad (15a)$$

а во втором — $\Delta N_2[n]$, равная

$$\Delta N_2[n] = \Delta N_1[n] + \frac{U_0}{\alpha(\xi) T_{г.и}(\xi, \gamma_2[n])} - N_0 = N_0[n] + N_m[n]. \quad (15б)$$

Совместное решение соотношений (14) и (15) позволяет получить для n -го цикла регулирования значения выбранных параметров подстройки:

$$\Delta U_0(\xi, \gamma_1[n]) = \Delta U_{0 \text{ опт}}(\xi, \gamma_{1 \text{ опт}}) - \frac{N_0[n]}{N_m[n] + N_0} U_0; \quad (16a)$$

$$T_{г.и}(\xi, \gamma_2[n]) = T_{г.и \text{ опт}}(\xi, \gamma_2 \text{ опт}) \frac{N_0}{N_m[n] + N_0}, \quad (166)$$

где $N_m[n] = \Delta N_2[n] - \Delta N_1[n]$.

Формулы (15) и (16) дают информацию о состоянии системы после каждого цикла настройки.

Если предположить, что при любых начальных условиях $N_0 + N_m(\xi, [0]) > 0$, то можно утверждать следующее.

1. Знак $\Delta N_1[n]$ однозначно определяет направление движения параметра $\Delta U_0(\xi, \gamma_1[n])$ к своему оптимальному значению, а количественное изменение параметра $\Delta U_0(\xi, \gamma_1[n])$ обуславливается экспериментом в целом.

2. По знаку и величине $\Delta N_2[n]$ в общем случае нельзя определить направления движения $T_{г.и}(\xi, \gamma_2[n])$ к $T_{г.и \text{ опт}}(\xi, \gamma_2 \text{ опт})$. Об этом можно судить только по величине $N_m[n] = \Delta N_2[n] - \Delta N_1[n]$. Лишь после окончания подстройки параметра $\Delta U_0(\xi, \gamma_1)$, когда $\Delta N_1[n] = 0$, знак ошибки $\Delta N_2[n]$ будет однозначно определять направление изменения параметра к своему оптимальному значению.

3. Количественное изменение $T_{г.и}(\xi, \gamma_2[n])$ определяется как обоими изменениями $\Delta N_1[n]$ и $\Delta N_2[n]$, так и первоначальным состоянием системы, поскольку оптимальное значение параметра $T_{г.и \text{ опт}}(\xi, \gamma_2 \text{ опт})$ зависит от величины $\alpha(\xi)$.

4. Если предположить, что система самонастройки работает таким образом, что ошибка $\Delta N_2[n]$ одна определяет направление движения $T_{г.и}(\xi, \gamma_2[n])$ к своему оптимальному значению, то процесс подстройки $T_{г.и}(\xi, \gamma_2[n])$ в первых циклах может быть процессом расходящимся в случае, если $N_m[n] = \Delta N_2[n] - \Delta N_1[n] < 0$. Однако по мере подстройки при $\Delta U_0(\xi, \gamma_1[n]) \rightarrow \Delta U_{0 \text{ опт}}(\xi, \gamma_1)$ величина $\Delta N_1[n] = N_0[n]$ уменьшается и процесс регулирования становится сходящимся.

Таким образом, при выборе взаимонезависимых параметров регулирования процесс самонастройки будет сходящимся при любых начальных условиях.

Теперь рассмотрим другой случай, когда подстраиваемые параметры коррелированы между собой. При этом изменение одной регулируемой величины приводит к изменению оптимального значения другой. Для иллюстрации сказанного примем в качестве регулируемого параметра, воздействующего на изменение масштаба, параметр $\alpha(\xi, \gamma_2)$, а регулировку ошибки нуля будем, как и прежде, осуществлять путем изменения параметра $\Delta U_0(\xi, \gamma_1)$.

В этом случае для любого цикла регулирования можно записать:

$$N_0[n] = \Delta N_1[n] = \beta(\xi, \gamma_2[n]) [\alpha(\xi, \gamma_2[n]) \Delta t(\xi) + \Delta U_x(\xi) - \Delta U_0(\xi, \gamma_1[n])]; \quad (17a)$$

$$\Delta N_2[n] = \Delta N_1[n] + \frac{U_0}{\alpha(\xi, \gamma_2[n]) T_{г.и}(\xi)} - N_0. \quad (17b)$$

Оптимальные значения $\gamma_{1 \text{ опт}}$ и $\gamma_{2 \text{ опт}}$ определяются из соотношений:

$$\Delta U_{0 \text{ опт}}(\xi, \gamma_{1 \text{ опт}}) = \alpha_{0 \text{ опт}}(\xi, \gamma_{2 \text{ опт}}) \Delta t(\xi) + \Delta U_x(\xi); \quad (18a)$$

$$\alpha_{\text{опт}}(\xi, \gamma_{2 \text{ опт}}) = \frac{U_0}{T_{г.и}(\xi) N_0}. \quad (18b)$$

В результате совместного решения уравнений (17) и (18) получим:

$$\Delta U_0(\xi, \gamma_1[n]) = \Delta U_{0 \text{ опт}}(\xi, \gamma_{1 \text{ опт}}) - \frac{N_0[n] U_3}{N_m[n] + N_3} + \frac{N_m[n]}{N_m[n] + N_3} \alpha_{\text{опт}}(\xi, \gamma_{2 \text{ опт}}) \Delta t(\xi); \quad (19a)$$

$$\alpha(\xi, \gamma_2[n]) = \alpha_{\text{опт}}(\xi, \gamma_{2 \text{ опт}}) \frac{N_3}{N_m[n] + N_3}. \quad (19b)$$

Из сравнения формул (16b) и (19b) можно видеть, что характер движения параметров $T_{г.н}(\xi, \gamma_2[n])$ и $\alpha(\xi, \gamma_2[n])$ к своим оптимальным значениям идентичен, в то время как характер движения параметра $\Delta U_0(\xi, \gamma_1[n])$ к своему оптимальному значению в рассматриваемом случае будет другим, так как в формуле (19a) по сравнению с формулой (16a) имеется дополнительный член. Наличие последнего позволяет сделать следующие выводы:

1) ошибка $\Delta N_1[n]$ правильно отражает направление движения параметра $\Delta U_0(\xi, \gamma_1[n])$ к своему оптимальному значению только в том случае, если выполняется условие

$$N_0[n] > N_m[n] \frac{\Delta t(\xi)}{T_{г.н}(\xi)} \frac{1}{N_3}; \quad (20)$$

2) при рациональном выборе параметров ПНК и выполнении условия (20) можно утверждать, что в процессе настройки будет наблюдаться сходимость регулируемых параметров, поскольку при $\Delta N_1[n] < \Delta N_2[n]$ наблюдается сходимость подстройки параметра $\Delta U_0(\xi, \gamma_1[n])$, а при $\Delta N_2[n] < \Delta N_1[n]$ — сходимость подстройки параметра $\alpha(\xi, \gamma_2[n])$.

Таким образом, при сделанном допущении (20), выполняемом в большинстве практических случаев, возможно использование в качестве регулируемых как коррелированных, так и не коррелированных между собой параметров.

Система самонастройки может быть существенно упрощена, если осуществить регулирование не двух, а одного параметра, что может иметь место, если в ПНК применить цифровую калибровку ошибки нуля. При этом в первом такте каждого цикла регулирования выявляется ошибка в виде кода $N_0(\xi)$ (в том случае, когда ПНК основан на методе временного преобразования, код нуля $N_0(\xi)$ может быть введен в основной счетчик в зависимости от знака рассогласования в прямом или дополнительном коде, а при использовании метода поразрядного кодирования — в запоминающий регистр), а во втором такте, после подачи на вход эталонного напряжения U_3 , на выходе ПНК получится число

$$N_2[n] = \beta(\xi, \gamma[n]) U_3 + N_0(\xi), \quad (21)$$

где γ — параметр настройки масштаба.

В результате цифрового вычитания результатов преобразования нулевого и эталонного напряжений будет получен код числа

$$N[n] = \beta(\xi, \gamma[n]) U_3 = N_3 + N_m[n], \quad (22)$$

где

$$N_3 = \beta_0 U_3; \quad N_m[n] = [\beta(\xi, \gamma[n]) - \beta_0] U_3.$$

При этом параметр, регулирующий масштаб $M(\xi, \gamma [n])$, в процессе самонастройки будет изменяться в соответствии с соотношением

$$M = (\xi, \gamma [n]) = \frac{M_{\text{опт}}(\xi, \gamma_{\text{опт}})}{1 + \delta N [n]}, \quad (23)$$

где $\delta N [n] = \frac{N_m [n]}{N_s}$.

ЦИФРОВАЯ КАЛИБРОВКА МАСШТАБА

Рассмотрим методы цифровой калибровки показаний, полученных при преобразовании. В этом случае при проведении преобразования эталонных напряжений будут получены следующие величины: код $N_0(\xi)$, характеризующий изменение начального уровня уравнивающего напряжения и неточное определение момента равенства входного и уравнивающего напряжений, и код $N_m(\xi)$, характеризующий погрешность, связанную с изменением коэффициента преобразования.

При рабочем цикле преобразования будет получен код, в котором содержатся обе эти погрешности. Как указывалось выше, первая из них ликвидируется сравнительно просто, и в результате будет получено исправленное значение кода, в котором будет содержаться только погрешность из-за изменения коэффициента преобразования.

Для получения точного значения выходного кода необходимо решить уравнение

$$N = \frac{N_s}{N_s(\xi)} N(\xi), \quad (24)$$

где N — исправленное значение кода, полученного при рабочем цикле преобразования; $N_s(\xi)$ и N_s — коды для эталонного напряжения, точное значение (N_s) и результат преобразования ($N_s(\xi)$). При этом погрешность $N_0(\xi)$ также предварительно исключается.

Решение уравнения (24) требует выполнения деления и умножения полноразрядных кодов, что приводит к большим затратам времени. Исходное уравнение (24) может быть преобразовано различными способами, причем наиболее рациональным преобразованием является

$$N = \left(1 + \frac{N_m}{N_s(\xi)}\right) N(\xi). \quad (25)$$

Уравнение (25) может быть подвергнуто дальнейшему преобразованию:

$$N = \left(1 + \frac{N_m}{N_s + N_m}\right) N(\xi) = \left[1 + \frac{N_m}{N_s} \left(1 + \frac{N_m}{N_s} (1 + \dots)\right)\right] N(\xi). \quad (26)$$

Уравнение (26) обладает, с точки зрения его решения, рядом достоинств:

1) величина $\frac{N_m}{N_s}$ легко определяется, так как N_m будет получена непосредственно при преобразовании эталонного напряжения, а деление на код N_s при рациональном выборе эталонного напряжения будет осуществляться с помощью сдвига N_m на соответствующее число разрядов;

2) все остальные операции сводятся к сложению единицы с малой величиной $\frac{N_m}{N_3}$ и к умножению полученной суммы на $\frac{N_m}{N_3}$; последней операцией является умножение кода $N(\xi)$ на поправочный коэффициент;

3) ряд (26) быстро сходится, особенно при $\frac{N_m}{N_3} < 0$, что позволяет ограничиться малым числом членов ряда.

Для вычисления истинного значения кода может быть использована ЦВМ, в которую для нахождения поправочного коэффициента должны быть введены код $N(\xi)$ и величины N_m и N_3 .

Следует отметить, что при применении любого вида калибровки в преобразователе со статистической обработкой выборок необходимо, чтобы при преобразовании эталонного напряжения также производилась статистическая обработка (осреднение) соответствующего числа преобразований. В этом случае влияние шума преобразователя будет уменьшено в $\sqrt{\omega}$ раз (ω — число преобразований в выборке), а точность определения систематической погрешности соответственно повышена.

В некоторых случаях рационально применять комбинированные системы калибровки, при которых с помощью системы самонастройки рассогласование N_m доводится до достаточно малого значения, а затем вычисляется точное значение поправочного коэффициента. Если благодаря самонастройке $\frac{N_m}{N_3} \ll 10^{-3}$, то для подавляющего большинства случаев поправочный коэффициент будет определяться с помощью уравнения

$$K_{\text{поп}} \cong 1 + \frac{N_m}{N_3}, \quad (27)$$

т. е. только с помощью операций сдвига и сложения.

Изложенные принципы самонастройки были практически реализованы в ПНК последовательного счета.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Земельман. Точный аналого-цифровой преобразователь на грубых элементах.— Измерительная техника, 1964, № 9.
2. М. А. Земельман, С. В. Рыпалев. Цифровой вольтметр. Авторское свидетельство № 160762.— Бюллетень изобретений, 1964, № 5.

*Поступила в редакцию
4 июля 1967 г.*