АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

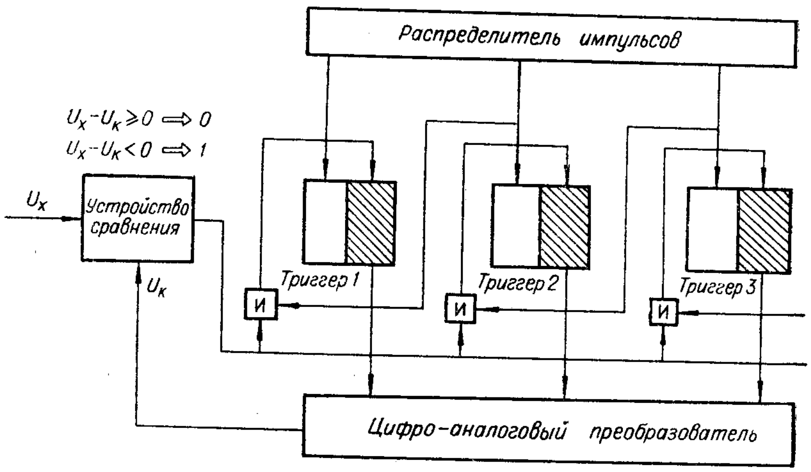
№ 1 1970

УДК 621.374.088

В. Н. БОЙКОВ, Ю. М. КРЕНДЕЛЬ,
В. И. РАБИНОВИЧ, О. Е. ТРОФИМОВ
(Новосибирск)

О ВЛИЯНИИ НЕПРАВИЛЬНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА НА ЕГО ПОГРЕШНОСТЬ

В настоящей работе рассматривается влияние неправильной работы триггеров и устройства сравнения на точность прибора, основанного на методе двоичного поразрядного уравновешивания. Блок-схема прибора приведена на рисунке. Анализ влияния этих элементов прибора



проводится раздельно. Например, при исследовании влияния неправильной работы триггеров устройство сравнения предполагается идеальным. Это делается с тем, чтобы «в чистом виде» выявить характер влияния указанных элементов на точность работы прибора.

В качестве критерия точности прибора используется средний модуль погрешности измерения. Приводимые ниже рассуждения почти не меняются при использовании многих других метрологических критериев (дисперсии ошибки, математического ожидания ошибки и т. п.).

Распределение измеряемой величины x в большинстве случаев для определенности предполагается равномерным; почти все получаемые результаты могут быть записаны в общем виде либо получены для конкретного распределения по аналогии с равномерным.

СБОИ ТРИГГЕРОВ

Будем предполагать, что сигналы подаются на счетные входы триггеров. Кроме полезных сигналов, на каждый из триггеров поступают помехи, которые переводят триггер в состояние, противоположное тому, в котором он находился.

Потоки помех, поступающие на различные триггеры, в настоящем рассмотрении предполагаются пуассоновскими, независимыми и с одним и тем же параметром λ. Время измерения разбито на n тактов (n — число двоичных разрядов результата измерения). Под тактом понимается промежуток времени между двумя импульсами тактового генератора. Поскольку потоки помех являются пуассоновскими и не зависящими друг от друга, то P_{ik} — вероятность того, что в результате помех k-й триггер сменит свое состояние на i-м такте, не зависит от k и i и равна

$$P_{ik} = P = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda\tau} (\lambda\tau)^{2r+1}}{(2r+1)!}, \qquad (1)$$

где τ — длительность такта. Следовательно, P — вероятность того, что число заявок, распределенных по пуассоновскому закону, пришедших за время τ,— нечетно. В большинстве практических ситуаций λ мало, и можно считать, что $P \approx e^{-\lambda\tau}\lambda\tau$ — вероятность прихода одной заявки за время τ.

Таким образом, мы приходим к следующей модели: каждый из n триггеров независимо от других на любом из тактов может с вероятностью P под воздействием помех сменить свое состояние и с вероятностью $1-P$ остаться в прежнем состоянии. Смена состояний триггеров под воздействием полезных сигналов происходит в моменты времени $k\tau$ $(0<k\leqslant n)$.

Обозначим через P_α вероятность того, что за время измерения придет α помех:

$$P_\alpha = C_{n^2}^{\alpha} P^{\alpha} (1-P)^{n^2-\alpha} \; (0 \leqslant \alpha \leqslant n^2). \qquad (2)$$

Так как в реальных ситуациях вероятность безотказной работы P_0 достаточно велика, то из формулы (2) следует, что основную долю вероятности отказов $1-P_0$ составляет вероятность того, что придет одна помеха P_1. Поэтому подробно рассмотрим ситуацию, когда за время измерения приходит не более одной помехи.

Введем некоторые обозначения: $z_{ki}(x$ — результат измерения величины x при условии, что пришла помеха на k-й триггер на i-м такте. В настоящем рассмотрении удобно пользоваться двоичной записью измеряемых величин и результатов измерения:

$$x = x_1 \ldots x_n \ldots$$

$$x = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{x_i}{2^i}; \; x_i = 0{,}1 \quad (\text{предполагается, что } 0 \leqslant x \leqslant 1;)$$

$$z_{ki}(x) = z_1 \ldots z_n; \; z = \sum_{i=1}^{n} \frac{z_i}{2^i}; \; z_i = 0{,}1.$$

Рассмотрим следующие ситуации.

1. $k=i$. Помеха приходит на k-й триггер на i-м такте; в k-й триггер введена 1, но сигнал от устройства сравнения на ее подтверждение или снятие еще не поступал.

Если $x_k = 1$, то $z_{kk}(x) = x_1 \ldots x_{k-1} \bar{x}_k x_k \ldots x_k$.

Если $x_k = 0$, то $z_{kk}(x) = x_1 \ldots x_n$ $(1 \leqslant k \leqslant n)$. Заметим, что при $x_k = 0$ прибор работает безошибочно (с точностью до погрешности квантования).

2. $k < i$ $(2 \leqslant i \leqslant n)$, $(1 \leqslant k \leqslant i - 1)$. Номер триггера, на который пришла помеха, меньше номера такта, во время которого пришла помеха $z_{ki}(x) = x_1 x_2 \ldots x_{k-1} \bar{x}_k x_{k+1} \ldots x_{i-1} x_k \ldots x_k$.

3. $k > i$ $(1 \leqslant i \leqslant n-1)$, $(i+1 \leqslant k \leqslant n)$.

Если $x_k = 1$, то $z_{kl}(x) = x_1 \ldots x_{k-1} \bar{x}_k x_k \ldots x_k$. Случай $x_k = 0$ подразделяется на два варианта.

3а. Число x таково, что в его двоичной записи между $(i-1)$-м и k-м разрядами имеется хотя бы одна единица. Пусть r $(i-1 < r < k)$ таково, что $x_r = 1$ и $x_l = 0$ $(r < l < k)$. Тогда $z_{kl}(x) = x_1 \ldots x_i \bar{x}_r x_r \ldots x_r x_k x_r \ldots x_r$.

3б. Число x таково, что в его двоичной записи все x_l $(i < l < k)$. Тогда $z_{ki}(x) = x_1 \ldots x_n$.

Может оказаться полезной также иная запись результатов измерения. Например, вариант 3а $(k > i$ и $x_k = 0)$ можно записать в следующем виде: $z_{ki}(x) = x_1 \ldots x_k - \frac{1}{2^k} - \frac{1}{2^n}$.

Данные формулы показывают, что помеха приводит к тому, что производится квантование до некоторого разряда k $(k \leqslant n)$ с добавлением некоторых констант, зависящих лишь от значений разрядов в двоичной записи x, расположенных между $(i-1)$ и $(k+1)$-м разрядами.

Пусть измеряемая величина распределена равномерно на отрезке [0, 1]. Обозначим через M/α средний модуль ошибки при условии, что пришло α помех. Тогда полный средний модуль равен

$$M = \sum_{\alpha=0}^{n^2} P_\alpha M/\alpha = \sum_{\alpha=0}^{n^2} M_\alpha; \quad M_\alpha = P_\alpha M/\alpha. \tag{3}$$

Средний модуль ошибки при условии, что за время измерения не было помех, равен:

$$M/0 = \frac{1}{2^{n+1}}; \quad M_0 = P_0 \frac{1}{2^{n+1}} = \frac{(1-p)^{n^2}}{2^{n+1}}. \tag{4}$$

При отсутствии помех погрешность возникает за счет квантования, отнесение производится к левой границе кванта.

Средний модуль ошибки при условии, что пришла одна помеха, равен:

$$M/1 = \sum_{k=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n^2} \int_0^1 |z_{ki}(x) - x| \, dx;$$

$$M_1 = n^2 P_1 M/1 = P(1-P)^{n^2-1} M/1. \tag{5}$$

Используя полученную выше зависимость между значениями измеряемой величины, результата измерения и номерами триггера и такта, на которых была помеха, из формулы (5) получаем

$$M_1 = P\,(1-P)^{n^2-1}\left(n-2+\frac{3\,n^2}{2^{n+2}}+\frac{5n}{2^{n+2}}+\frac{3}{2^{n+2}}-\frac{1}{2^{2n}}\right). \quad (6)$$

(Формула (6) справедлива при $n \geqslant 2$).

Таким образом, если за время измерения приходит не более одной помехи, средний модуль ошибки при равномерном распределении x на $[0,\ 1]$ равен

$$M = M_0 + M_1 = \frac{(1-P)^{n^2}}{2^{n+1}} + P\,(1-P)^{n^2-1}\times$$

$$\times\left(n-2+\frac{3\,n^2}{2^{n+2}}+\frac{5n}{2^{n+2}}+\frac{3}{2^{n+2}}-\frac{1}{2^{2n}}\right). \quad (7)$$

В тех случаях, когда необходимо учитывать возможность двух и более помех, выражение (7) является оценкой снизу для значения среднего модуля. Оценка сверху может быть получена весьма просто. Действительно,

$$M = \sum_{\alpha=0}^{n^2} P_\alpha M_\alpha < M_0 + M_1 + P \quad (\alpha \geqslant 2). \quad (8)$$

В рассмотренной выше схеме предполагалось, что сигналы подаются на счетный вход триггера. Если подавать сигналы на раздельные входы, то в случае одной помехи изменится лишь вариант 3 $(k>i)$. Если $x_k = 1$, то $z_{ki}(x) = x_1 \ldots x_n$; если $x_k = 0$ и $x_i = 0$, то $z_{ki}(x) = x_1 \ldots x_n$ (безошибочная работа); если $x_k=0$, $x_i=1$, то $z_{ki}(x) = x_1 \ldots x_k - \frac{1}{2^n}$.

Таким образом, подача сигналов на раздельные входы уменьшает погрешность. Это связано с тем, что в случае счетных входов в схеме имеется некоторая избыточность, а именно: имеются каналы, запрещенные для полезного сигнала и свободные для помех.

СБОИ УСТРОЙСТВА СРАВНЕНИЯ

Будем предполагать, что устройство сравнения реагирует не на разность между значениями измеряемой и компенсационной величин $(U_x - U_k)$, а на смесь этой величины со случайным мешающим воздействием $\xi(t)$. Таким образом, сбои устройства сравнения происходят в следующих ситуациях:

$$U_x - U_k > 0 \text{ и } U_x - U_k + \xi(t) < 0,$$

$$U_x - U_k < 0 \text{ и } U_x - U_k + \xi(t) > 0.$$

Следовательно, $P(y)$ — вероятность сбоя устройства сравнения при условии, что $U_x - U_k = y$, равна

$$P(y) = \begin{cases} P(\xi(t) < -y), \text{ если } y > 0; \\ P(\xi(t) > -y), \text{ если } y \leqslant 0. \end{cases} \quad (9)$$

Рассмотрим влияние сбоев устройства сравнения на показания прибора. Пусть сбои происходят при подаче импульсов $k(1), k(2), \ldots, k(m)$ $(k(1) \geqslant 1,\ k(i+1) \geqslant k(i),\ i = 1, \ldots, m-1,\ k(m) \leqslant n)$. В рассматриваемой модели предполагается, что устройство сравнения работает лишь в моменты подачи импульсов. Пусть измеряемая величина x имеет вид $x = x_1 \ldots x_n \ldots$. Обозначим через $z(x) = z_1 \ldots z_n$ показание прибора. Тогда

$$z_i = \begin{cases} x_i, \text{ если } i < k(1); \\ \bar{x}_{k(1)}, \text{ если } i \geqslant k(1) \text{ и } i = k(j),\ j = 1, \ldots, m; \\ x_{k(1)}, \text{ если } i \geqslant k(1) \text{ и } i \neq k(j),\ j = 1, \ldots, m. \end{cases} \tag{10}$$

Из формулы (10) видно, что в рассматриваемой модели каждый дополнительный сбой устройства сравнения лишь «ухудшает» результат измерения. Этот факт может быть использован для получения оценок погрешности.

Введем некоторые обозначения: $[x]_0 = 0$, $[x]_i = x_1, \ldots, x_i$ — квантование до i-го разряда; $\{x\}_i = x - [x]_i$, $i > 0$.

Из формулы (10) следует, что если первый сбой устройства сравнения произошел при подаче импульса $k(1)$, то

при $x_{k(1)} = 1$

$$x - z(x) > \{x\}_{k(1)} + \frac{1}{2^n};$$

при $x_{k(1)} = 0$

$$z(x) - x \geqslant \{x\}_{k(1)} + \frac{1}{2^{k(1)}}. \tag{11}$$

Для сокращения записи введем функцию

$$\varphi_i(x) = \begin{cases} \{x\}_i + \frac{1}{2^n}, \text{ если } x_i = 1; \\ \{x\}_i + \frac{1}{2^i}, \text{ если } x_i = 0. \end{cases} \tag{12}$$

Тогда, обозначая через $Q_i(x)$ вероятность того, что первый сбой устройства сравнения при измерении величины x произойдет при подаче i-го импульса, получаем оценку для среднего модуля ошибки

$$M \geqslant \sum_{i=1}^{n} \int_0^1 Q_i(x)\, \varphi_i(x) f(x)\, dx, \tag{13}$$

где $f(x)$ — плотность распределения измеряемой величины.

Если случайные величины $\xi(t_1)$ и $\xi(t_1+\tau)$ независимы (τ — время длительности такта), процесс $\xi(t)$ стационарный и $\xi(t_0)$ имеет плотность, симметричную относительно нуля, то выражение для $Q_i(x)$ имеет вид

$$Q_i(x) = \prod_{r=1}^{i-1}\left(1 - P\left(\left|\{x\}_{r-1} - \frac{1}{2^r}\right|\right) P\left(\left|\{x\}_i - \frac{1}{2^i}\right|\right), \tag{14}$$

где $P(|y|) = P(\xi(t) < -|y|)$.

Формула (10) позволяет получить не только оценки, но и точные значения среднего модуля ошибки. Однако возникающие при этом довольно громоздкие выражения существенно затрудняют выяснение закономерностей формирования погрешности измерения. Кроме того, в практических ситуациях шум $\xi(t)$ является не произвольным случайным процессом, а подчиняется ряду довольно жестких условий. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть влияние сбоев устройства сравнения на точность измерения при различных предположениях относительно $\xi(t)$. Ниже подробно рассматривается ситуация, когда значения $\xi(t)$ не могут быть по абсолютной величине больше одного деления шкалы прибора. Предположим, что величина x распределена на отрезке $[0,2^n]$, а в окончательных формулах перейдем к величинам, распределенным на $[0, 1]$.

Итак, $0 \leqslant x < 2^n$ и $-1 \leqslant \xi(t) \leqslant 1$. Каждое x, удовлетворяющее условиям $1 \leqslant x \leqslant 2^n - 1$, можно единственным образом представить в виде $x = x_1 \ldots x_{k-1} x_k \bar{x}_k \ldots \bar{x}_k x_{n+1} \ldots$. Пусть, например, $x_k = 1$, т. е. $x = x_1 \ldots x_{k-1}\ 10 \ldots 0\ x_{n+1} \ldots$ (x_k — последняя единица в двоичной записи $[x]_n = x_1 \ldots x_n$). Если измеряемая величина имеет вид $x = x_1 \ldots x_{k-1} x_k \bar{x}_k \ldots \bar{x}_k x_{n+1} \ldots$, то первый сбой устройства может произойти лишь при утверждении k-го разряда. При этом, если сбой произошел при утверждении k-го разряда, то больше сбоев быть не может; если же сбоя при утверждении k-го разряда не было, то сбой может произойти лишь при утверждении последнего разряда. Здесь существенным образом используется условие $-1 \leqslant \xi(t) < 1$, причем считается, что устройство сравнения работает без сбоя при подаче k-го импульса тогда и только тогда, когда оно выдает тот же знак, который имеет разность $U_x - U_k$ к моменту подачи k-го импульса, хотя в результате ошибок на предыдущих тактах величина U_k могла быть сформирована неправильно.

Обозначим значение шума в момент подачи i-го импульса $\xi(t_i)$. Пусть $x_k = 1$. Тогда

1. Если $\{x\}_n + \xi(t_k) > 0$ и $\{x\}_n + \xi(t_n) - 1 < 0$, то $z(x) = x_1 \ldots x_n$ и $x - z(x) = \{x\}_n$; нет сбоев.

2. Если $\{x\}_n + \xi(t_k) > 0$ и $\{x\}_n + \xi(t_n) - 1 > 0$, то $z(x) = x_1 \ldots x_{n-1} \bar{x}_n$ и $x - z(x) = -1 + \{x\}_n$; нет сбоя на k-м и есть сбой на n-м такте.

3. Если $\{x\}_n + \xi(t_k) < 0$, то $z(x) = x_1 \ldots x_{k-1} \bar{x}_k x_k \ldots x_k$ и $x - z(x) = 1 + \{x\}_n$; сбой на k-м такте.

Пусть $x_k = 0$. Тогда

1. Если $\{x\}_n - 1 + \xi(t_k) < 0$ и $\{x\}_n + \xi(t_n) > 0$, то $z(x) = x_1 \ldots x_n$ и $x - z(x) = \{x\}_n$; нет сбоев.

2. Если $\{x\}_n - 1 + \xi(t_k) < 0$ и $\{x\}_n + \xi(t_n) < 0$, то $z(x) = x_1 \ldots x_{n-1} \bar{x}_n$ и $x - z(x) = 1 + \{x\}_n$; нет сбоя на k-м и есть сбой на n-м такте.

3. Если $\{x\}_n - 1 + \xi(t_k) > 0$, то $z(x) = x_1 \ldots x_{k-1} \bar{x}_k x_k \ldots x_k$ и $x - z(x) = -1 + \{x\}_n$; сбой на k-м такте.

Рассмотрим случай, когда $x = 0 \ldots 0 x_{n+1} \ldots$, т. е. измеряемая величина находится в первом кванте; тогда сбой возможен лишь на последнем такте.

1. Если $\{x\}_n - 1 + \xi(t_n) < 0$, то $z(x) = x_1 \ldots x_n$ и $x - z(x) = \{x\}_n$; безошибочная работа.

2. Если $\{x\}_n - 1 + \xi(t_n) > 0$, то $z(x) = x_1 \ldots x_{n-1} \bar{x}_n$ и $x - z(x) = -1 + \{x\}_n$; сбой на n-м такте.

Случай $x = 11 \ldots 1 x_{n+1} \ldots$, т. е. измеряемая величина расположена в последнем кванте. Сбой возможен лишь на последнем такте.

1. Если $\{x\}_n + \xi(t_n) > 0$, то $z(x) = x_1 \ldots x_n$ и $x - z(x) = \{x\}_n$; нет сбоев

2. Если $\{x\}_n + \xi(t_n) < 0$, то $z(x) = x_1 \ldots x_{n-1} x_n$ и $x - z(x) = 1 + \{x\}_n$; сбой на n-м такте.

Определим вероятности сбоев при фиксированном значении измеряемой величины x. При этом оставим в силе те предположения, которые сделаны при выводе формулы (14) и будем обозначать функцию распределения величины $\xi(t_0)$ через $F(\xi)$.

Если $x_k = 1$, то $P_0'(x) = F(\{x\}_n) F(1 - \{x\}_n)$ — вероятность того, что нет сбоев; $P_k'(x) = [1 - F(\{x\}_n)]$ — вероятность сбоя на k-м такте; $P_n'(x) = F(\{x\}_n)[1 - F(1 - \{x\}_n)]$ — вероятность сбоя на n-м такте.

Если $x_k = 0$, то соответствующие вероятности равны:

$$P_0^0(x) = F(\{x\}_n) F(1 - \{x\}_n); \quad P_k^0(x) = [1 - F(1 - \{x\}_n)]; \quad P_n^0(x) = F(1 - \{x\}_n)[1 - F(\{x\}_n)]. \tag{15}$$

Учитывая выражения для разности $x - z(x)$, можно записать средний модуль ошибки при фиксированном x (осреднение производится по всем возможным реализациям помехи).

Если $x = x_1 \ldots x_{k-1} x_k \bar{x}_k \ldots \bar{x}_k x_{n+1} \ldots$ и $x_k = 1$, то

$$M'(x) = P_0'(x)\{x\}_n + P_k'(x)(1 + \{x\}_n) + P_n'(x)(1 - \{x\}_n). \tag{16}$$

Если $x = x_1 \ldots x_{k-1} x_k \bar{x}_k \ldots \bar{x}_k x_{n+1} \ldots$ и $x_k = 0$, то

$$M^0(x) = P_0^0(x)\{x\}_n + P_k^0(x)(1 - \{x\}_n) + P_n^0(x)(1 + \{x\}_n). \tag{17}$$

Для значений x, находящихся в первом и последнем квантах, средний модуль ошибки можно определить аналогично (16) и (17). Осреднение по x с учетом его равномерного распределения дает

$$M = \frac{2^{n-1} - 1}{2^{n-1}} \int_0^1 [y F(y) F(1 - y) + y F(1 - y) - y F(y) - F(y) F(1 - y) + 1]\, dy + \frac{1}{2^n} \int_0^1 [2 + 2y F(1 - y) - F(1 - y) - F(y)]\, dy, \tag{18}$$

где $y = \{x\}_n$.

Если случайная величина распределена равномерно на отрезке $[0, 1]$ и $\xi(t)$ распределена в пределах одного кванта, то средний модуль ошибки составляет $M^* = \dfrac{M}{2^n}$.

Предположим теперь, что за время измерения значения шума не изменяются, и сравним эту ситуацию с рассмотренной выше при одной и той же функции распределения величины $\xi(t_0)$. (В дальнейшем индексами «з» и «н» будут обозначены «зависимый» и «независимый» шумы).

Пусть x имеет вид $x = x_1 \ldots x_{k-1} x_k \bar{x}_k \ldots \bar{x}_k x_{n+1} \ldots$ и $x_k = 1$. Тогда вероятности сбоя на k-м такте при измерении величины x

$$P_{k\text{з}}'(x) = P_{k\text{н}}'(x). \tag{19}$$

Вероятности сбоя на k-м такте совпадают, так как k — это первый такт, на котором может проявиться шум, а его «зависимость» или «независимость» еще не имеет значения. Вероятность сбоя на n-м такте:

$$P_{n\text{з}}'(x) = 1 - F(1 - \{x\}_n) = P(\xi(t_k) > 1 - \{x\}_n);$$

$$P_{пн}(x) = (1 - F(1 - \{x\}_n)(1 - F(-\{x\}_n) = \\ = P(\xi(t_k) > -\{x\}, \xi(t_n) > 1 - \{x\}). \qquad (20)$$

Из (20) видно, что $P'_{пз} > P'_{пн}$. Поскольку вероятность безошибочной работы $P_0(x) = 1 - P_k(x) - P_n(x)$, то из (19) и (20) получаем, что $P'_{0з}(x) < P'_{0н}(x)$. Указанные соотношения справедливы и в случае $x_k = 0$:

$$P^0_{kз}(x) = P^0_{kн}(x);\ P^0_{пз}(x) = F(-\{x\}_n);$$

$$P^0_{пн}(x) = F(-\{x\}_n)F(1 - \{x\}_n);\ P^0_{0з}(x) < P^0_{0н}(x). \qquad (21)$$

Если величина x расположена в первом или последнем кванте, то результаты для «зависимого» и «независимого» шума совпадают.

Рассмотрим соотношения между средним модулем ошибки для «зависимого» и «независимого» шумов. Из (19)—(21) следует, что $P^0_{пз} = P_{kз}$ и $P'_{пз} = P^0_{kз}$; отсюда выражения для среднего модуля имеют одинаковый вид при $x_n = 1$ и $x_n = 0$:

$$\begin{aligned} M'_з(x) &= P'_{0з}\{x\}_n + P'_{kз}(1 + \{x\}_n) + P'_{пз}(1 - \{x\}_n); \\ M^0_з(x) &= P^0_{0з}\{x\}_n + P^0_{пз}(1 - \{x\}_n) + P^0_{пз}(1 + \{x\}_n). \end{aligned} \qquad (22)$$

Осреднение (22) по x с учетом его равномерного распределения дает

$$M_з = \frac{2^{n-1} - 1}{2^{n-1}} \int_0^1 [2yF(1-y) - F(y) - F(1-y) - y + 2]\, dy + \\ + \frac{1}{2^n}\int_0^1 [2 + 2y\, F(1-y) - F(1-y) - F(y)]\, dy. \qquad (23)$$

Сравнивая (18) и (23), получаем, что $M_з(x) > M_н(x)$. Отнесение результатов измерения к середине кванта дает то же соотношение средних модулей ошибки «зависимого» и «независимого» шумов. Отметим, что в приведенных здесь рассуждениях о соотношении ошибки в случаях «зависимого» и «независимого» шумов существенным образом используется условие, что шум по абсолютной величине не превышает размеров кванта.

Подход, применяемый в данной статье, может быть использован для исследования цифровых измерительных приборов не только поразрядного, но и других способов уравновешивания. Результаты работы показывают, что достаточно полное описание точностных свойств прибора может быть получено на основании сравнительно небольшого числа статистических характеристик его элементов, а также может быть выяснено, какие именно характеристики являются необходимыми. Точностные характеристики прибора могут быть определены и в предположении, что сбоям подвержены одновременно и устройство сравнения, и триггеры.

Следует отметить, что применяемый подход к исследованию работы прибора позволяет, независимо от конкретных значений вероятностных характеристик, предложить некоторые схемные методы улучшения метрологических свойств прибора и в ряде ситуаций оценить эффективность этих улучшений, а также производить сравнение различных приборов.

Поступила в редакцию
29 сентября 1969 г.