

Г. П. ШЛЫКОВ

(Пенза)

О БЫСТРОДЕЙСТВИИ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНО- ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ УРАВНОВЕШИВАНИЕМ

В цифровых вольтметрах и аналого-цифровых преобразователях, построенных по замкнутой системе с преобразователем код — напряжение в цепи обратной связи, используются различные методы уравнивания, отличающиеся законом формирования компенсирующего напряжения. Для ускорения процесса уравнивания разность измеряемого U_x и компенсирующего U_k напряжений оценивается путем сравнения не с одной мерой, как в классическом методе последовательного уравнивания (уравнивания единичными ступенями), а с несколькими. Это делается для того, чтобы в каждом такте заносить в счетчик или регистр, управляющий преобразователем код — напряжение, число, как можно более близкое к величине разности $U_x - U_k$. Очевидно, чем больше используется мер, тем ближе заносимое в счетчик число к величине разности и тем быстрее закончится процесс уравнивания.

Представляет интерес рассмотрение вопроса о быстродействии в режиме разовых измерений и о динамической погрешности в режиме слежения за измеряемым напряжением приборов, в которых для сокращения процесса уравнивания применяется несколько мер. В литературе описаны приборы с двумя мерами на шкалу в десять двоичных разрядов или три десятичных (грубая и точная оценка) [1], с тремя мерами [2—6] и более трех мер [7—9]. Известны методы, которые используют количество мер больше, чем число двоичных разрядов счетчика [9, 10]. Последние представляют собой, как правило, комбинации метода совпадения внутри разрядов и методов уравнивания и здесь рассматриваться не будут.

На рис. 1 показана блок-схема прибора с несколькими параллельно включенными пороговыми элементами ПЭ. Пороги срабатывания ПЭ играют роль мер, с которыми производится сравнение разности $U_x - U_k$. Измеря-

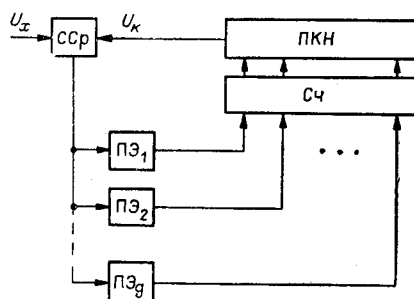


Рис. 1.

емое напряжение U_x и компенсирующее напряжение U_k , вырабатываемое преобразователем код — напряжение ПКН, сравниваются схемой сравнения ССр, которая выделяет напряжение, пропорциональное разности $U_x - U_k$. Это напряжение поступает на входы ПЭ. При превышении разностью $U_x - U_k$ порога срабатывания порогового элемента последний срабатывает и заносит единицу в соответствующий разряд счетчика Сч, управляющего преобразователем код — напряжением ПКН. Если сработал i -й элемент, очевидно, срабатывают и все элементы, имеющие меньший порог срабатывания. Тогда число в счетчик заносится параллельно от всех пороговых элементов с индексами от 1 до i .

Возможен вариант, когда при срабатывании i -го элемента элементы, имеющие меньший порог срабатывания, блокируются. Однако быстрое действие такого варианта остается таким же.

После занесения пороговыми элементами числа в счетчик преобразователь ПКН формирует ступень компенсирующего напряжения ΔU_k , которая вычитается из измеряемого напряжения U_x в схеме сравнения ССр. Пороговые элементы вновь производят оценку величины новой разности $U_x - U_k$ и заносят в счетчик число, соответствующее величине разности, и т. д. до полной компенсации.

Одновременно с параллельным занесением чисел в счетчик пороговыми элементами происходит последовательная передача чисел от младших разрядов счетчика к старшим во всех случаях, когда пороги срабатывания ПЭ отличаются, хотя бы на единицу дискретности, от чисел, заносимых в счетчик при их срабатывании, или же когда число пороговых элементов меньше числа разрядов счетчика. Поэтому рассматриваемый метод уравнивания можно назвать параллельно-последовательным [5].

Метод параллельно-последовательного уравнивания существенно отличается от методов, которые также используют несколько мер для оценки разности $U_x - U_k$, но осуществляют эту оценку с помощью одного порогового элемента путем поочередного опроса зафиксированного программирующим устройством. Так, например, в приборах, построенных на основе использования метода поразрядного уравнивания, разность $U_x - U_k$ оценивается одним пороговым элементом (нуль-органом) путем поочередного сравнения с мерами, которые соответствуют весам разрядов, а количество их равно числу разрядов.

Параллельно-последовательный метод не предусматривает программирующего устройства, а количество пороговых элементов всегда равно количеству мер. В каждый такт времени, задаваемый, например, длительностью переходного процесса при срабатывании порогового элемента, триггера счетчика и ключей ПКН или же частотой модуляции, которая может быть применена в тракте сравнения, величина ступени компенсирующего напряжения определяется только величиной разности $U_x - U_k$ и мерами, используемыми для оценки этой разности. Такой алгоритм работы дает возможность осуществить следящий вариант, если использовать реверсивный счетчик и схему, определяющую полярность разности, например фазочувствительное устройство при использовании амплитудной модуляции.

Прежде чем перейти к анализу быстрого действия приборов, работающих на основе метода параллельно-последовательного уравнивания, отметим, что если прибор предназначен для использования в многоканальной системе, то основной характеристикой является время измерения, или время формирования компенсирующего напряжения. Динамическая погрешность, возникающая в процессе измерения в одном канале, как правило, не имеет существенного значения, так как период

опроса каналов во много раз превышает время измерения. В одноканальной системе прибор должен следить за измеряемым напряжением и поэтому основной характеристикой является величина отставания компенсирующего напряжения от измеряемого, или динамическая погрешность.

Определим время измерения через число тактов формирования компенсирующего напряжения. Одно и то же количество мер может обеспечить существенно разное быстродействие [8] в зависимости от величин этих мер. Например, при объеме регистра (или счетчика) в десять двоичных разрядов две меры могут уменьшить число тактов с 1023 при последовательном уравнивании до 512, если вторая мера будет соответствовать двум единицам дискретности (первая мера всегда соответствует одной единице дискретности или ее части), и до 64, если вторая мера будет соответствовать 32 единицам, т. е. шестому двоичному разряду.

Количество пороговых элементов может быть различным, а номер i -го разряда счетчика, на который поступают сигналы с порогового элемента, связан с порядковым номером элемента j определенной зависимости для каждого конкретного случая распределения пороговых элементов по разрядам счетчика. Могут быть реализованы такие зависимости: $i=j$ — число пороговых элементов равно числу разрядов; $i=2j-1$ — занесение с пороговых элементов производится на каждый второй разряд; $i=3j-2$; $i=4j-3$ и т. д.

Суммарный вес числа, заносимого в счетчик при срабатывании k -го порогового элемента с учетом того, что элементы от первого до $(k-1)$ -го не блокируются, определится при двоичном основании счетчика выражением

$$B_k = \sum_{j=1}^k 2^{i(j)-1}, \quad (1)$$

где $i(j)$ — зависимость номера разряда от номера порогового элемента. Число B_k представляет собой сумму весов разрядов, в которые были занесены единицы при срабатывании k -го порогового элемента, а вместе с ним всех, имеющих меньший порог.

Так как величина порога срабатывания $\Delta_{прj}$ порогового элемента должна быть не меньше напряжения, соответствующего суммарному весу B_j , то можно записать

$$A_{прj} \geq \frac{1}{m_v} B_j, \quad (2)$$

где m_v — масштабный коэффициент.

Число N , записанное в счетчике после окончания уравнивания, можно представить в виде следующего ряда:

$$N = a_1 B_1 + a_2 B_2 + \dots + a_g B_g = \sum_{j=1}^g a_j B_j,$$

где g — количество пороговых элементов; a_j — число срабатываний j -го порогового элемента при условии, что $(j+1)$ -й элемент не работал.

Учитывая, что результат измерения N связан с измеряемым напряжением масштабным коэффициентом $N = m_v U_x$, получим

$$U_x = \frac{1}{m_v} \sum_{j=1}^g a_j B_j.$$

Величины a_j можно определить последовательно, начиная с a_g до a_1 :

$$a_g \leq \frac{U_x - \left(\Delta_{\text{пр } g} - \frac{B_g}{m_v} \right)}{\frac{B_g}{m_v}};$$

$$a_{g-1} \leq \frac{U_x - a_g \frac{B_g}{m_v} - \left(\Delta_{\text{пр } (g-1)} - \frac{B_{g-1}}{m_v} \right)}{\frac{B_{g-1}}{m_v}}$$

и т. д.

Разность $\Delta_{\text{пр } j} - \frac{B_j}{m_v}$ учитывает отклонение порога срабатывания порогового элемента от ступени компенсирующего напряжения, формируемого при срабатывании элемента.

Приведенные выше выражения можно использовать для нахождения всех значений a_j для любого U_x . Сумма $\sum a_j = P$ представляет собой число тактов уравнивания, которое характеризует быстродействие прибора.

На рис. 2 показан график зависимости $P = P(U_x)$, рассчитанный для шкалы с верхним пределом $U_{x \text{ max}} = \frac{1}{m_v} 64$ через единицу дискретности при распределении пороговых элементов по разрядам вида $i=j$ и идеально установленных порогах ($\Delta_{\text{пр } j} = \frac{1}{m_v} B_j$). Максимальное число тактов оказалось равным $P=6$ при напряжении $U_x = \frac{1}{m_v} 58$, т. е. оно

определилось числом двоичных разрядов, как и при использовании поразрядного метода уравнивания. Если строить график $P = P(U_x)$ по точкам, как показано на рис. 2, то это окажется очень трудоемкой работой при большом числе разрядов в счетчике. Для оценки быстродействия прибора достаточно иметь значения характерных экстремальных точек графика (см. на рис. 2 отмеченные кружками точки).

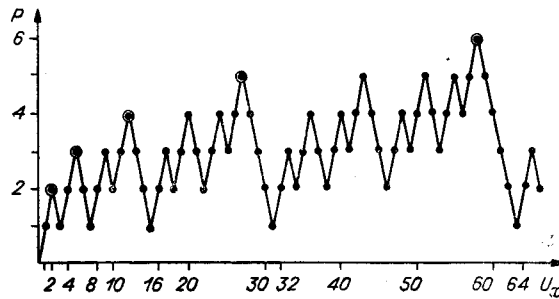


Рис. 2.

Очевидно, что в диапазоне не измеряемого напряжения $0 < U_x < \Delta_{\text{пр } 2}$, т. е. до того момента, когда начинает работать второй пороговый элемент, число тактов P прямо пропорционально измеряемому напряжению и будет максимальным для напряжения (округляя до единицы дискретности):

$$U_{x \text{ m1}} = \Delta_{\text{пр } 2} - 1 \frac{1}{m_v}.$$

В диапазоне $0 < U_x < \Delta_{\text{пр } 3}$ напряжение, для которого потребуется максимальное число тактов, будет равно сумме суммарного веса B_2 ,

умноженного на число срабатываний второго порогового элемента a_2 , и напряжения U_{xm1} :

$$\begin{cases} U_{xm2} = U_{xm1} + \frac{1}{m_v} a_2 B_2; \\ U_{xm2} < \Delta_{пр3}. \end{cases} \quad (3)$$

Обобщая систему уравнений (3), получим:

$$\begin{cases} U_{xm1} = \Delta_{пр2} - \frac{1}{m_v}; \\ U_{xmj} = U_{xm(j-1)} + \frac{1}{m_v} a_j B_j; \\ U_{xmj} < \Delta_{пр(j+1)}. \end{cases} \quad (4)$$

Число a_j может принимать различные значения в зависимости от вида распределения $i(j)$ и отклонения порога $\Delta_{прj}$ от величины $\frac{1}{m_v} B_j$. Поэтому при расчете характерных экстремальных точек (U_{xmj}) следует учесть, что каждому индексу j соответствует несколько значений U_{xmj} а при нахождении U_{xmj} в уравнение (4) необходимо подставить $U_{xm(j-1)}$, имеющее наибольшее значение. Пользуясь полученной системой уравнений, удалось вычислить зависимости $P = P(U_x)$ в характерных экстремальных точках для различного числа пороговых элементов. На рис. 3 представлены графики для полной шкалы в десять двоичных разрядов. Эти графики наглядно иллюстрируют, как изменяется число тактов уравнивания с изменением количества пороговых элементов (g). Из графиков вновь можно сделать вывод о необходимости оптимального распределения $i(j)$. Так, при распределении вида $i = 3j - 2$ и $i = \{1, 3, 6, 9\}$, т. е. при занесении чисел в 1, 3, 6, 9-й разряды, количество пороговых элементов оказывается одинаковым ($g = 4$), но при первом

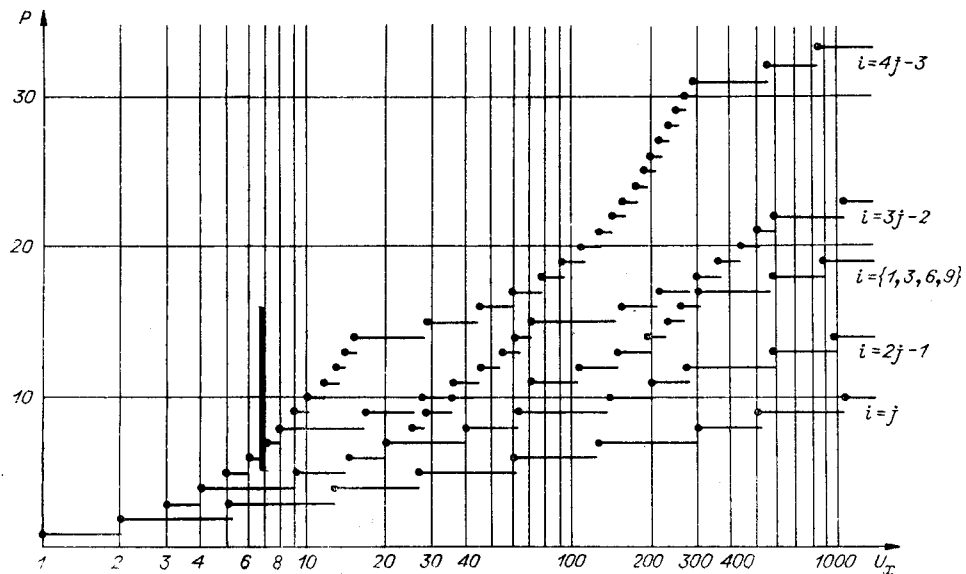


Рис. 3.

распределении максимальное число тактов $P=22$, а при втором — $P=19$.

Системой уравнений (4) можно воспользоваться и для выявления влияния нестабильности порогов срабатывания пороговых элементов на число тактов, так как она учитывает отклонение величины порога от номинального значения ($\Delta_{прj} = \frac{1}{m_v} B_j$). В таблице приведены расчетные данные для двух видов распределения $i(j)$ при отклонении одновременно всех порогов срабатывания (кроме первого) вверх на 20, 30, 40 и 50%.

$\Delta_{прj}$	$\frac{B_j}{m_v}$	$1,2 \frac{B_j}{m_v}$	$1,3 \frac{B_j}{m_v}$	$1,4 \frac{B_j}{m_v}$	$1,5 \frac{B_j}{m_v}$
$i(j)$					
$i=j$	10	11	11	12	13
$i=2j-1$	14	16	19	19	20

Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о том, что нет необходимости предъявлять высокие требования к стабильности пороговых элементов. К тому же отклонение порогов от номинального значения способствует некоторому облегчению работы самого чувствительного порогового элемента в смысле перегрузки, так как к моменту равновесия компенсирующее напряжение подходит малыми ступенями,

определяемыми разностью $\Delta_{прj} = \frac{1}{m_v} B_j$.

При отклонении величин порогов срабатывания вниз от номинального значения может произойти перекомпенсация в процессе уравнивания. Тогда необходим реверсивный счетчик для осуществления подхода к равновесию. В этом случае число тактов уравнивания не только не увеличится, но может значительно (до двух раз) сократиться при определенном выборе порогов срабатывания ниже номинального значения [7].

Оценивая быстродействие метода, нельзя ограничиться определением числа тактов уравнивания, так как зачастую основной характеристикой может оказаться динамическая погрешность, особенно при использовании прибора в следящем режиме в одноканальной системе.

У приборов, основанных на поразрядном методе уравнивания, обеспечивающих примерно такое же время измерения, что и параллельно-последовательный метод, может возникнуть большая динамическая погрешность в силу того, что уравнивание ведется по жесткой программе [11]. Это означает, что независимо от того, как изменяется входное напряжение, опрос разрядов идет по очереди от старшего к младшему. Компенсирующее напряжение не «догоняет» измеряемое, отсюда отсутствие момента компенсации, что и приводит к погрешности измерения, которую можно учесть только приблизительно [12].

В приборах, основанных на параллельно-последовательном методе уравнивания, нет жесткой программы, так как величина ступени компенсирующего напряжения в каждом такте зависит от величины разности $U_x - U_k$.

При слежении за линейно изменяющимся входным напряжением компенсирующее напряжение периодически «догоняет» измеряемое и тем обеспечиваются моменты полного равновесия. Если производить

считывание в моменты равновесия и одновременно фиксировать их по времени, т. е. «привязывать» результат измерения к моменту равновесия, можно считать, что динамическая погрешность близка к нулю.

Можно показать, что при постоянной скорости изменения измеряемого напряжения, выборе величин порогов срабатывания $\Delta_{прj} = \frac{1}{m_v} B_j$, а также при количестве пороговых элементов, равном числу разрядов, динамическая погрешность на p -м такте после баланса будет иметь вид

$$\delta = U_x' p \tau - \frac{1}{m_v} [(p - r) B_j + r B_{j+1}], \quad (5)$$

где U_x' — скорость изменения измеряемого напряжения; τ — время между тактами; r — число, выбираемое из ряда $0, 1, 2, \dots, p-1$, пока не будет наименьшим; B_j — суммарный вес, определяемый из неравенства

$$\frac{B_j}{m_v \tau} \leq U_x' < \frac{B_{j+1}}{m_v \tau}.$$

Большой интерес представляет характер динамической погрешности при слежении за измеряемым напряжением, имеющим форму синусоиды. Получить достаточно простое выражение в общем виде для определения динамической погрешности при слежении за напряжением синусоидальной формы с учетом амплитуды, отношения периода синусоиды T и длительности такта τ не удается, поэтому остановимся на нескольких примерах.

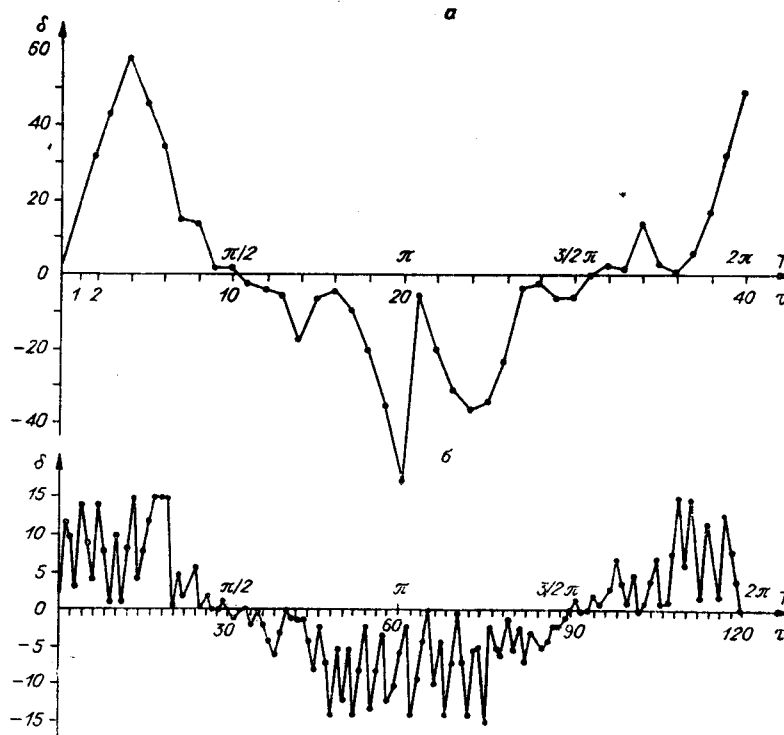


Рис. 4.

На рис. 4, а, б приведены графики изменения динамической погрешности δ за один период при слежении за напряжением вида

$$U_x = \frac{512}{m_v} \left(1 + \sin \frac{\pi}{20\tau} t \right) \text{ и } U_x = \frac{512}{m_v} \left(1 + \sin \frac{\pi}{60\tau} t \right),$$

рассчитанные для тех же условий, что и при выводе уравнения (5), как разность измеряемого напряжения U_x в начале такта и формируемого в этот момент компенсирующего напряжения. Отношение $\frac{T}{\tau}$ для примера а составляет 40, а для б — 120.

Оказалось, что на самых крутых участках синусоиды динамическая погрешность достигала в первом примере 58 единиц, во втором — 15. Чтобы обеспечить динамические погрешности, не превышающие 58 единиц при слежении единичными ступенями, необходимо иметь соотношение $\frac{T}{\tau} = 2800$ вместо 40 (для параллельно-последовательного уравновешивания), т. е. в 70 раз больше. Для второго примера ($\delta_m = 15 \frac{1}{m_v}$) соотношение оказывается в 25 раз больше (3000 вместо 120).

Таким образом, приборы, основанные на методе параллельно-последовательного уравновешивания, могут обеспечить время измерения такого же порядка, что и широко применяемый поразрядный метод. В то же время в силу того, что жесткая программа отсутствует, такие приборы могут работать в следящем режиме, обеспечивая слежение за относительно большими скоростями изменения.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. C. Platzek, H. F. Lewis, J. J. Mielke. A high-speed, electronic analog-to-digital encoder.—Proc. Nat. Electronics Conf., v. 15. Chicago, Ill, Nat. Electron. Conf., Inc., 1960, 182—194.
2. К. З. Махмутов. Основные принципы построения преобразователя напряжений в дискретную форму.—Труды ЦНИИМФ. Вып. 51, 1963.
3. G. G. Gorbatenko. High performance parallel-serial analog-to-digital converter with error correction.—IEEE Internat. Convent. Rec., 1966, v. 14, № 3. 39—43.
4. Г. П. Шлыков, Ю. М. Крысин, В. М. Шляндин. Быстродействующий цифровой милливольтметр на транзисторах.—Передовой научно-технический и производственный опыт, № 4—65—1665/43. М., ГОСИНТИ, 1965.
5. Г. П. Шлыков. Цифровой вольтметр с параллельно-последовательной обработкой.—Приборостроение, 1966, № 3.
6. И. Ф. Клисторин, Г. Г. Матушкин. О выборе порогов срабатывания устройства сравнения цифрового измерительного прибора неравномерного следящего уравновешивания.—Автометрия, 1967, № 2.
7. J. R. Cox, D. H. Glaser. A Quantizing Encoder.—IEEE Trans. on Electr. Computers, 1964, v. 13, № 3, 250—254.
8. Н. Г. Бабаев. Исследование вопросов повышения быстродействия цифровых следящих автокомпенсаторов. Автореф. канд. дисс. Баку, 1967.
9. K. Euler. Neue Prinzipien zur Analog-Digital-Umwandlung und deren optimale Auslegung.—Frequenz, 1963, v. 17, № 10, 364—370.
10. В. М. Шляндин. Электроизмерительные цифровые приборы прямого уравновешивания.—Измерительная техника, 1965, № 7.
11. Г. П. Шлыков, В. М. Шляндин. О логической связи различных методов обработки компенсирующего напряжения в цифровых вольтметрах.—Кибернетические пути совершенствования измерительной аппаратуры. Тезисы докладов. Л., 1967.
12. А. Н. Касперович, Н. В. Литвинов. К анализу динамических ошибок, возникающих при измерениях цифровыми измерительными приборами поразрядного уравновешивания.—Автометрия, 1966, № 1.

Поступила в редакцию
10 января 1967 г.,
окончательный вариант —
10 июля 1967 г.