

(иногда)

## К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЦИФРОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ ПРЯМОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ

Вопросы погрешностей цифровых вольтметров прямого уравнивания (ЦВПУ) ранее рассматривались в [1, 2]. Однако результаты указанных работ относятся только к электромеханическим ЦВПУ, а полученные общие формулы неудобны для применения в инженерных расчетах (невозможно определить требования к нестабильности коэффициента передачи измерительного усилителя и пороговых элементов). Данная работа является попыткой создания методики инженерного проектирования ЦВПУ, которая в одинаковой степени может быть применима как для электромеханических, так и для бесконтактных вариантов приборов.

Работа ЦВПУ при измерении в каждом разряде измеряемого напряжения состоит из двух этапов:\* 1) предварительной оценки измеряемого напряжения или некомпенсированного его остатка декадой сравнивающих элементов и ввода соответствующего компенсирующего напряжения  $U_k$ ; 2) проверки правильности введенного компенсирующего напряжения и в случае необходимости ввода поправки в результат предварительной оценки.

Структурная схема ЦВПУ приведена на рис. 1. Здесь  $G_{в.д.}$ ,  $G_{у.р.}$ ,  $G_{д.сэ}$ ,  $G_{к.с}$ ,  $G_{э.п}$  — соответственно коэффициенты передачи входного делителя для расширения пределов измерения прибора, усилителя при оценке  $p$ -го разряда измеряемого напряжения, декады сравнивающих элементов, компенсационной схемы и элемента поправки.

Основной узел структурной схемы — декада сравнивающих элементов (СЭ). Здесь происходит предварительная оценка измеряемого напряжения. Рассмотрим этот узел подробнее.

Пусть недокомпенсированный остаток измеряемого напряжения при приведении его ко входу  $p$ -й декады сравнивающих элементов попадает в зону между напряжениями срабатывания  $i$ -го и  $i+1$ -го пороговых элементов, где  $i=1, 2, \dots, 9$ . При односторонней поправке требуется сдвиг порогов настройки СЭ, который обозначим через  $\beta$ . Оптимальная величина  $\beta$  сдвига порогов равна половине дискретности декады СЭ [1].

\* Теоретически возможно произвести измерение в каждом разряде за один этап, но при этом существенно повышаются требования к стабильности функциональных элементов ЦВПУ.

В ЦВПУ используются однотипные декады СЭ или одна декада для оценки всех разрядов измеряемого напряжения. Тогда изменяется только коэффициент передачи измерительного усилителя, увеличиваясь при переходе от одного разряда к другому в отношении 1 : 10. При этом дискретность декад СЭ — величина постоянная. Связь между дискретностью декады и дискретностью компенсационной схемы определяется выражением

$$\Delta p = \frac{\Delta}{G_{y.p}}, \quad (1)$$

где  $\Delta p$  — дискретность  $p$ -го разряда компенсационной схемы;  $\Delta$  — дискретность декады СЭ.

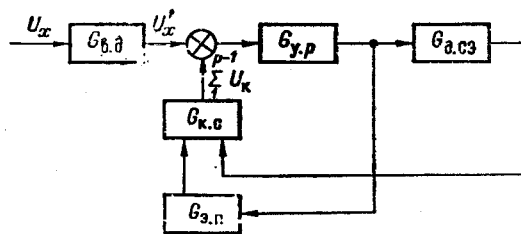


Рис. 1.

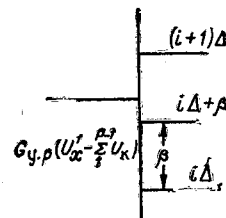


Рис. 2.

Как видно из рис. 2, при оценке  $p$ -го разряда измеряемого напряжения возможны два случая приведения недокомпенсированного остатка измеряемого напряжения  $U_x$  к порогу настройки СЭ. Запишем их в виде неравенств:

$$(i \Delta + \beta) > G_{y.p} \left( U'_x - \sum_1^{p-1} U_k \right) > i \Delta; \quad (2)$$

$$(i + 1) \Delta > G_{y.p} \left( U'_x - \sum_1^{p-1} U_k \right) > (i \Delta + \beta), \quad (3)$$

где  $U'_x = U_x G_{в.д}$  — измеряемое напряжение после входного делителя;  $\sum_1^{p-1} U_k$  — компенсирующее напряжение, введенное в  $p-1$  первых разрядах отсчета.

При выполнении неравенства (2) срабатывает  $i$ -й СЭ, и навстречу измеряемому напряжению подается  $i$ -е значение  $p$ -го разряда компенсирующего напряжения. Измерение происходит без поправки. При выполнении неравенства (3) вводится  $(i+1)$ -е значение  $p$ -го разряда компенсирующего напряжения и за счет перекомпенсации вводится поправка: компенсирующее напряжение  $p$ -го разряда уменьшается на единицу.

Если  $p$ -й разряд оценки измеряемого напряжения считать последним, то погрешность в оценке  $p$ -го разряда будет погрешностью, определяющей класс точности ЦВПУ. Эту погрешность разделим на следующие составляющие: погрешность дискретности, схемную погрешность и погрешность от нестабильности порога настройки СЭ.

Погрешность дискретности характерна для всех цифровых приборов как результат квантования по уровню. Так как в ЦВПУ при оценке последнего разряда отсчета компенсирующее напряжение и поправка не вводятся, то при сдвиге  $\beta = 0,5 \Delta$  погрешность дискретности прибора, как указывалось ранее, не превосходит половины дискретности последнего знака отсчета.

Под схемной погрешностью, следуя М. Л. Быховскому [3], будем понимать погрешность от вариации коэффициентов передачи функциональных элементов ЦВПУ: входного делителя, измерительного усилителя и компенсационной схемы.

Остается рассмотреть погрешность от нестабильности расчетного порога настройки СЭ. СЭ ЦВПУ обычно конструируются на основе релейных усилителей или триггеров Шмитта, различная величина порогов настройки которых получается за счет применения индивидуального делителя опорного напряжения для каждого СЭ. Расчетный порог настройки  $i+1$ -го СЭ определяется выражением (при  $\beta = 0,5 \Delta$ )

$$U_{п, i+1} = (i+1) \Delta - \beta = i \Delta + \beta \quad (4)$$

и представляет собой сумму двух составляющих

$$U_{п, i+1} = U_{д, i+1} + U_{п. ч}, \quad (5)$$

где  $U_{д, i+1}$  — опорное напряжение, подаваемое с делителя на СЭ;  $U_{п. ч}$  — порог чувствительности, определяемый внутренней структурой СЭ и представляющий собой минимальную разницу приведенного ко входу СЭ измеряемого и опорного напряжений, необходимую для срабатывания СЭ. В первом приближении пороги чувствительности всех СЭ можно принять одинаковыми.

Составим выражение для погрешности, определяющей класс точности ЦВПУ. С учетом  $\delta(D)$  — погрешности дискретности и на основании выражений (2) и (3) получим

$$G_{y. p} (U_x G_{в. д} - \sum_1^{p-1} U_k) = i \Delta + \beta \pm \delta(D), \quad (6)$$

откуда

$$U_x = \frac{1}{G_{в. д}} \left[ \frac{i \Delta + \beta \pm \delta(D)}{G_{y. p}} + \sum_1^{p-1} U_k \right]. \quad (7)$$

С учетом (4) и (5) выражение (7) можно записать в виде

$$U_x = \frac{1}{G_{в. д}} \left[ \frac{U_{д, i+1} + U_{п. ч} \pm \delta(D)}{G_{y. p}} + \sum_1^{p-1} U_k \right]. \quad (8)$$

Для определения общей погрешности измерения найдем первые частные производные выражения (8). Затем, проделав необходимые преобразования для нахождения относительной погрешности измерения

$U_x$  и обозначив относительную погрешность коэффициента передачи  $G_i$  через  $\delta G_i = \frac{\Delta G_i}{G_i}$ , получим

$$\begin{aligned} \delta U_x = & \delta G_{в.д} + \delta G_{y.p} \left| \frac{1}{1 + \frac{\sum_{k=1}^{p-1} U_k G_{y.p}}{U_{п.ч} + U_{д,i+1}}} \right| + \delta U_k \left| \frac{1}{1 + \frac{U_{п.ч} + U_{д,i+1}}{\sum_{k=1}^{p-1} U_k G_{y.p}}} \right| + \\ & + \delta U_{д,i+1} \left| \frac{1}{1 + \frac{U_{п.ч} + \sum_{k=1}^{p-1} U_k G_{y.p}}{U_{д,i+1}}} \right| + \delta U_{п.ч} \left| \frac{1}{1 + \frac{\sum_{k=1}^{p-1} U_k G_{y.p} + U_{д,i+1}}{U_{п.ч}}} \right|. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь первые три составляющие представляют схемную погрешность прибора, а  $\delta U_{д,i+1}$  и  $\delta U_{п.ч}$  — соответственно относительные погрешности опорного напряжения делителя СЭ и порога его чувствительности.

Коэффициенты при относительных величинах погрешностей функциональных элементов ЦВПУ имеют определенный физический смысл. Зная численные значения этих коэффициентов приведения и задавшись составляющими допустимой погрешности, можно определить требования к отдельным функциональным элементам ЦВПУ.

Из анализа выражения (9) видно, что увеличение дискретности  $\Delta$  декады СЭ приводит только к повышению допустимой нестабильности порога чувствительности сравнивающих элементов. Остальные коэффициенты приведения остаются без изменения, так как при изменении дискретности  $\Delta$  декады СЭ  $G_{y.p}$  и  $U_{д,i+1}$  изменяются пропорционально.

Для определения численных значений указанных коэффициентов необходимо подставить вместо  $\sum_{k=1}^{p-1} U_k$  максимальное значение компенсирующего напряжения, вместо  $U_{д,i+1}$  значение напряжения для старшего (девятого) СЭ. Это обусловлено тем, что у старшего СЭ максимален порог настройки и, следовательно, максимальна абсолютная вариация напряжения  $U_{д,9}$  делителя. Кроме того, на него в наибольшей степени действует изменение коэффициента передачи измерительного усилителя.

Для примера рассмотрим определение допустимых погрешностей функциональных элементов прибора ЦВ-1 [4]. ЦВ-1 имеет следующие технические характеристики: класс точности  $0,1\% \pm$  единица последнего знака отсчета, отсчет — трехзначный, пределы измерения: 1, 10, 100, 1000 в. Используемые СЭ имеют порог чувствительности  $U_{п.ч} = 0,2$  в;

$$U_{д,9} = 16,8 \text{ в}; \quad \sum_{k=1}^2 U_k = 9,9 \text{ в}; \quad \Delta = 2 \text{ в}.$$

Так как общая приведенная погрешность равна  $0,2\%$ , то при погрешности дискретности, не превышающей половины последнего знака отсчета, суммарная допустимая схемная погрешность и погрешность от нестабильности расчетных порогов настройки СЭ не должна превосходить  $0,15\%$  шкалы прибора. Разделим эту суммарную погрешность на составляющие: погрешность компенсационной схемы ( $0,05\%$ ), погрешность от вариации коэффициента передачи измерительного усилителя ( $0,01\%$ ), погрешность от нестабильности порога чувствительности и

напряжений опорных делителей СЭ (по 0,05%). На долю погрешности входного делителя остается 0,08%.

Разделив эти величины на соответствующие коэффициенты, взятые

Параметры рассмотренных функциональных элементов удовлетворяют требованиям, обусловленным допустимой погрешностью измерения. В дальнейшем, разложив эти погрешности на составляющие [2], можно провести окончательный расчет точности прибора.

В заключение следует отметить, что приведенное распределение погрешностей не является единственно возможным. Зная значения коэффициентов различных функциональных элементов ЦВПУ и перераспределив соотношение погрешностей, можно использовать элементы с различной нестабильностью для обеспечения требуемой точности прибора и найти лучшие варианты ЦВПУ, с точки зрения общей простоты схемного решения. При наличии функциональных элементов с известными нестабильностями можно сразу определить, какую максимально возможную точность прибора удастся получить при использовании данных узлов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. М. Кузьмичев. Вопросы проектирования цифровых вольтметров прямого уравновешивания.— Ученые записки Пенз. политехн. ин-та, вып. 2. Электроизмерительная техника, Пенза, Приволжское книжное изд-во, 1964.
2. Г. М. Кузьмичев. Погрешности цифровых вольтметров прямого уравновешивания.— Автоматический контроль и методы электрических измерений (Труды V конференции), т. I. Новосибирск, «Наука», 1965.
3. М. Л. Быховский. Основы динамической точности электрических и механических цепей. М., Изд-во АН СССР, 1958.
4. В. М. Шляндин, Е. А. Ломтев, Ю. В. Блишков. Простой цифровой вольтметр прямого уравновешивания.— Передовой научно-технический и производственный опыт, № 4—67—7/1. М., ГОСИНТИ, 1967.

*Поступила в редакцию  
26 ноября 1966 г.,  
окончательный вариант —  
4 мая 1967 г.*