

ОБ ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА*

Рассматривается существующее определение класса точности. Предлагается оценку точности проводить по средневзвешенной допустимой относительной погрешности. Анализируется вопрос о выборе рабочего диапазона.

Метрологические свойства измерительных приборов определяются главным образом нормированным значением основной погрешности.

Как известно [1], основная допустимая относительная погрешность δ может быть выражена формулой

$$\delta = \alpha + \beta \frac{X_B}{x} + \gamma \frac{x}{X_B}, \quad (1)$$

где α, β, γ — безразмерные коэффициенты;

x, X_B — показание и верхний предел показания прибора.

Как правило, третий член формулы (1) достаточно мал, и выбор способа нормирования точности прибора определяется соотношением между первым и вторым членами. Если α и β соизмеримы, допустимую относительную погрешность задают двучленной формулой

$$\delta = \alpha + \beta \frac{X_B}{x}. \quad (2)$$

Если $\alpha \ll \beta$, погрешность задают одночленной формулой

$$\delta = \beta \frac{X_B}{x} \quad (3)$$

так называемой приведенной относительной погрешности. Если нормируется точность прибора в некотором диапазоне показаний, где $\alpha \gg \beta \frac{X_B}{x}$, погрешность задают одночленной формулой

$$\delta = \alpha. \quad (4)$$

* Материал доложен на VIII Всесоюзной конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений в сентябре 1966 года в Новосибирске. Статья печатается в порядке обсуждения.

Для оценки метрологических свойств прибора используются следующие способы численного обозначения класса точности.

Для аналоговых приборов, точность которых нормируют по формуле (3), обозначение класса точности A численно равно допустимому значению основной погрешности в процентах в точке $x = X_n$ [2]

$$A = \beta. \quad (5)$$

Как видно из (3), допустимая относительная погрешность существенно зависит от величины диапазона D , который определяется [1] как отношение верхнего предела диапазона X_n к его нижнему пределу X_n . Так, в точке $x = X_n$ δ возрастает в D раз. В то же время способ обозначения класса точности (5) совершенно не учитывает этого возрастания допустимой погрешности. Кроме того, многопредельные приборы одного класса точности с разными D (рис. 1) имеют в одном и том же рабочем диапазоне существенно различные характеристики $\delta(x)$ и, в частности, различные максимальные допустимые погрешности δ_{\max} .

Для приборов дискретного уравнивания с ручной наводкой, точность которых, как правило, нормируют по формуле (2), обозначение класса точности численно равно выраженному в процентах допустимому значению мультипликативной составляющей основной погрешности [3]

$$A = \alpha. \quad (6)$$

Обычно, но не всегда в этих приборах в широком диапазоне показаний $\alpha \gg \beta \frac{X_n}{x}$, и принятое определение класса точности позволяет делать метрологическую оценку приборов этой группы. Однако для приборов,

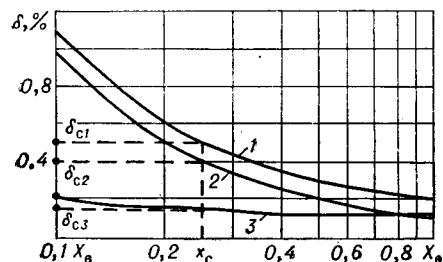


Рис. 2. Допустимая погрешность ЦИП класса точности 0,1, согласно (2) и (3): кривая 1: $\delta_1(x)$ при $\alpha=0,1\%$; $\beta=0,1\%$ (прибор типа Ш1311М); $\delta_{c1} = 0,5\%$; кривая 2: $\delta_2(x)$ при $\alpha=0,1\%$ (прибор типа Ш1451М); $\delta_{c2} = 0,4\%$; кривая 3: $\delta_3(x)$ при $\alpha=0,1\%$; $\beta=0,1\%$ (прибор типа В2-8); $\delta_{c3} = 0,15\%$.

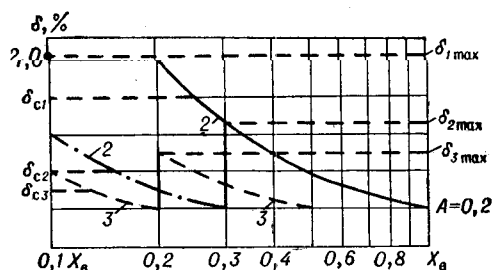


Рис. 1. Допустимая погрешность $\delta(x)$ в рабочем диапазоне показаний приборов класса точности 0,2, согласно (3), с разными диапазонами:

кривая 1: $\delta_1(x)$ при $A=0,2$ и $D=10$; $\delta_{1\max}=10A$; $\delta_{c1} = 0,8\%$; кривая 2: $\delta_2(x)$ при $A=0,2$ и $D=\sqrt{10}$; $\delta_{2\max} = 3,3A$; $\delta_{c2} = 0,4\%$; кривая 3: $\delta_3(x)$ при $A=0,2$ и $D=\sqrt[3]{10}$; $\delta_{3\max} = 2,5A$; $\delta_{c3} = 0,3\%$.

имеющих значительную величину второго члена в формуле (2), из-за отсутствия связи численного обозначения класса с величиной этого члена, класс точности, так же как для аналоговых приборов, уже недостаточен для оценки точности.

Кроме того, как это следует из (5) и (6), числовое значение класса точности имеет разный смысл: в одном случае это относительная погрешность, в другом — приведенная относительная погрешность. Поэтому два прибора, имеющие коренное различие в метрологических характеристиках, могут оказаться обозначенными одним и тем же классом точности.

Таким образом, принятые определения классов точности приборов не могут служить однозначной оценкой их метрологических свойств. Это объясняется тем, что как в аналоговых приборах, так и в приборах дискретного уравнивания при определении численного значения класса точности совершенно не принимается во внимание рабочий диапазон показаний (для многих приборов этот диапазон даже не оговаривается); в то же время из формулы (2) следует явная зависимость нормируемой погрешности от диапазона.

Для цифровых приборов это положение усугубляется отсутствием в настоящее время общепринятого способа определения класса точности, причем использование для этой цели одного из указанных выше способов, по-видимому, исключается, так как аддитивная и мультипликативная составляющие основной погрешности ЦИП соизмеримы и пренебречь одной из них для определения класса точности по сравнению с другой невозможно без существенного и технически неоправданного завышения класса точности прибора. Имеющиеся в этом отношении попытки можно оправдать только рекламными соображениями.

Следует заметить, что при метрологической оценке приборов по допустимой относительной погрешности невозможно одним числом полностью охарактеризовать точность прибора в некотором диапазоне показаний, так как нельзя охарактеризовать кривую одной точкой. Тем не менее такая упрощенная оценка одним числом необходима, особенно для цифровых приборов, когда оба члена формулы нормирования (2), как правило, соизмеримы (в отличие от аналоговых приборов и большинства дискретных приборов с ручным уравниванием). Так, из рис. 2 видно, насколько существенно могут отличаться кривые $\delta(x)$ для цифровых приборов как при численном определении класса точности по мультипликативной составляющей (кривые 1—3), так и по минимальной допустимой погрешности в точке X_n (кривые 2—3).

Укрупненная оценка метрологических свойств измерительных приборов предлагается не вместо формулы нормирования, а в дополнение к ней как критерий для сравнения и первой оценки. Представляется, что эта оценка должна отражать характер допустимой относительной погрешности и плотность распределения показаний в рабочем диапазоне.

Предлагается использовать для этого средневзвешенное значение допустимой погрешности в рабочем диапазоне показаний

$$\delta_c = \int_{X_n}^{X_B} \delta(x) p(X) dx, \quad (7)$$

где $p(X)$ — дифференциальная плотность распределения показания, удовлетворяющая условию

$$\int_{X_n}^{X_B} p(X) dx = 1. \quad (8)$$

Анализ распределения измеряемых величин, проведенный П. В. Новицким [1], показал, что плотность распределения x в общем случае обратно пропорциональна x . При этом из (8) следует, что

$$p(X) = \frac{1}{\ln D} \frac{1}{x}. \quad (9)$$

Соотношение (9) отражает общеизвестное стремление при измерениях получать результаты с постоянной относительной погрешностью независимо от абсолютного значения измеряемой величины*. В некоторых случаях (например, при использовании прибора только на узком участке шкалы или для прибора «номинального значения») $p(X)$ может принимать и другие значения, но оценка точности совокупности приборов должна проводиться с учетом выражения (9), соответствующего общему случаю использования приборов. Подставляя выражения (2) и (9) в (7), получим

$$\delta_c = \alpha + \beta \frac{D-1}{\ln D}. \quad (10)$$

Подставляя выражение (10) в (2), найдем показание X_c , нормированная погрешность в котором численно равна средневзвешенной допустимой относительной погрешности

$$X_c = X_B \frac{\ln D}{D-1}. \quad (11)$$

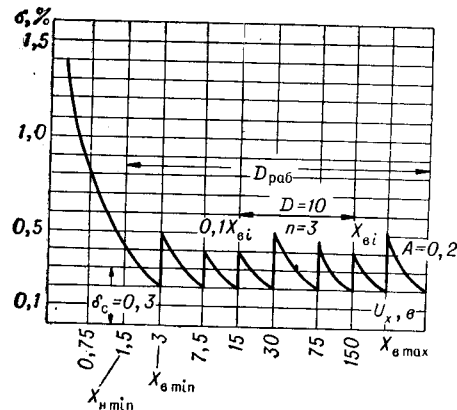
Можно заметить, что для многопредельных приборов $D \leq 10$; причем, если в диапазоне от $0,1X_B$ до X_B имеется n пределов, то величина диапазона D связана с числом пределов зависимостью

$$D = \sqrt[n]{10}. \quad (12)$$

Для $n=1$ получим $D=10$ (например, большинство цифровых приборов), для $n=2$ — $D=3,16$ и систему пределов 1—3—10, для $n=3$ — $D=2,15$ и систему пределов 1—2—5—10 или 1—2—4—10, для $n=4$ — $D=1,78$ и систему пределов 1—2—3—5—10.

Системы пределов с $n \geq 4$ обычно не применяются. На рис. 3 в полулогарифмическом масштабе построена зависимость $\delta(x)$ для многопредельного вольтметра с пределами измерения от 3 до 750 в и с $n=3$.

Рис. 3. Допустимая погрешность $\delta(x)$ прибора с пределами измерения 3—7,5—15—30—70—150—300—750 в класса точности 0,2, согласно (3).



* В этом смысле «идеальный» прибор следует нормировать, согласно формулам (4) и (6); шкала такого прибора должна иметь логарифмический характер.

Таблица 1

Тип прибора	Верхние пределы измерения, σ	Основная допустимая относительная погрешность (δ , %)	Рабочий диапазон, σ	Оценка диапазона D	Средневзвешенная погрешность (σ , %)	X_c (приближенно)
Щ1511 (цифровой вольтметр)	$\left. \begin{matrix} 9,9999 \\ 99,999 \\ 999,99 \end{matrix} \right\}$	$\pm (0,02 + 0,002 U_B/U)$	1—1000	10	0,03	$0,25 X_B$
Щ1451М (цифровой вольтметр)	$\left. \begin{matrix} 0,9999 \\ 9,999 \\ 99,99 \\ 999,9 \end{matrix} \right\}$	$\pm 0,1 U_B/U$	0,1—1000	10	0,4	$0,25 X_B$
Щ1311М (цифровой вольтметр)	$\left. \begin{matrix} 0,999 \\ 9,99 \\ 99,9 \\ 999,0 \end{matrix} \right\}$	$\pm (0,1 + 0,1 U_B/U)$	0,1—1000	10	0,5	$0,25 X_B$
В2-8 (цифровой вольтметр)	$\left. \begin{matrix} 19,999 \\ 199,99 \\ 1000,0 \end{matrix} \right\}$	$\pm (0,15 + 0,005 U_B/U)$ $\pm (0,15 + 0,01 U_B/U)$	2—200 200—1000	10 5	0,15 0,15 0,15	$0,25 X_B$ $0,4 X_B$
В7-8 (цифровой вольтметр)	$\left. \begin{matrix} 9,999 \\ 99,99 \\ 999,9 \end{matrix} \right\}$	$\pm (0,1 + 0,01 U_B/U)$ $\pm (0,3 + 0,01 U_B/U)$	1—10 10—1000	10 10	0,15 0,3	$0,25 X_B$ $0,25 X_B$
М106 (аналоговый вольтметр)	$\left. \begin{matrix} 3-7,5-15-30-75- \\ 150-300-600 \end{matrix} \right\}$	$\pm 0,2 U_B/U$	1,5—600	$\sqrt[3]{10}$ (2,5—2—2)	0,3	$0,7 X_B$
(аналоговый вольтметр)	1—3—10—30—100—300	$\pm 0,2 U_B/U$	0,3—300	$\sqrt{10}$ (3—3,3)	0,4	$0,5 X_B$
Р307 (потенциометр)	1,911110	$\pm (0,015 + 0,000025 U_B/U)$	$\left. \begin{matrix} 0,019-1,9 \\ 0,0019-1,9 \\ 0,00019-1,9 \end{matrix} \right\}$	100 1000 10000	0,016 0,019 0,04	$0,05 X_B$ $0,007 X_B$ $0,0009 X_B$

Примечание. Для приборов типа Щ1451М, В7-8 и М106 указана только часть пределов измерения; U и U_B — показание и выбранный верхний предел измерения.

Рабочим диапазоном такого прибора целесообразно считать показания от 1,5 до 750 в, так как при дальнейшем уменьшении нижнего предела рабочего диапазона $\delta(x)$ начинает существенно возрастать. В общем случае рабочий диапазон многопредельного прибора, для которого справедлива одна формула нормирования точности во всем диапазоне показаний, целесообразно выбирать в пределах от $X_{н\ min}$ до $X_{в\ max}$, причем

$$X_{н\ min} = \frac{X_{в\ min}}{D}, \quad (13)$$

где $X_{в\ min}$ и $X_{в\ max}$ — верхние пределы измерения (3 и 750 в) младшего (0 ÷ 3 в) и старшего (300 ÷ 750 в) поддиапазонов.

Если основная погрешность многопредельного прибора нормируется различными формулами на разных пределах, то в приборе можно выделить соответственно несколько поддиапазонов со своими значениями средневзвешенной погрешности.

Очевидно также, что для определения средневзвешенной допустимой погрешности в рабочем диапазоне (см. рис. 3) достаточно по формуле (10) найти δ_c в диапазоне D , подсчитанном из выражения (12). Если выбор рабочего диапазона многопредельного прибора достаточно очевиден, то для однопредельных приборов такой выбор неоднозначен. Объясняется это тем, что для однопредельных приборов при уменьшении x погрешность $\delta(x)$ возрастает монотонно. Отсюда, задаваясь различными диапазонами, можно получить различные значения средневзвешенной погрешности. Так, например, в табл. 1 включен однопредельный прибор (потенциометр типа Р307), для которого подсчитана δ_c для разных D . Тем не менее и для однопредельных приборов можно обосновать выбор рабочего диапазона. Так, общеизвестно требование к начальнству аналоговых приборов, в том числе и однопредельных: начальная треть шкалы должна быть нерабочей. Это соответствует условию $D=3$. Для определенных дискретных приборов, погрешность которых нормируется, согласно формуле (2) или (3), когда обе ее составляющие соизмеримы (например, для цифровых измерительных преобразователей напряжения в код), целесообразно по аналогии с многопредельными цифровыми приборами принять $D=10$.

Для приборов, погрешность которых нормируется в некотором диапазоне показаний, согласно формуле (4), этот диапазон и следует принять в качестве рабочего.

Если же у однопредельного дискретного прибора, погрешность которого нормируется, согласно формуле (2), можно выделить диапазон, где $\alpha \gg \beta \frac{X_n}{x}$ (например, у большинства потенциометров), целесообразно этот диапазон принять за рабочий, а погрешность в нем нормировать по формуле (4).

таблица 2

D	1	$\sqrt[3]{10}$	$\sqrt{10}$	10	100	1000
δ_c	$\alpha + \beta$	$\alpha + 1,5\beta$	$\alpha + 2\beta$	$\alpha + 4\beta$	$\alpha + 20\beta$	$\alpha + 150\beta$
X_c	X_v	$0,7X_v$	$0,5X_v$	$0,25X_v$	$0,05X_v$	$0,007X_v$

В заключение в табл. 2 приведены наиболее типичные значения диапазонов и соответствующие им формулы для подсчета δ_c и X_c .

В табл. 1 приведены результаты расчетов средневзвешенной погрешности нескольких типов вольтметров.

ВЫВОДЫ

Показано, что принятое численное определение класса точности не является достаточной оценкой метрологических свойств прибора, так как оно не учитывает изменения допустимой относительной погрешности в рабочем диапазоне показаний.

Предложено оценку точности измерительных приборов производить по средневзвешенной допустимой относительной погрешности показаний прибора в рабочем диапазоне. Получены формулы для расчета этой погрешности и показания прибора, в котором средневзвешенная погрешность численно равна нормированному значению основной допустимой погрешности.

Рассмотрен вопрос о выборе рабочего диапазона показаний многопредельных и однопредельных приборов.

Предлагаемая оценка точности приборов по средневзвешенной допустимой погрешности позволяет однозначно сравнивать различные типы приборов по точности и стимулирует разработку приборов с улучшенными метрологическими характеристиками. Указанную оценку можно использовать и при разработке нормативных документов.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. В. Новицкий. Некоторые вопросы информационной теории измерительных устройств. Автореф. докт. дисс. Л., ЛПИ, 1965.
2. ГОСТ 1845—59. Приборы электроизмерительные. Общие технические требования.
3. ГОСТ 9245—59. Потенциометры постоянного тока измерительные.

*Поступила в редакцию
19 сентября 1966 г.*

**Z. I. Zelikovskiy,
V. R. Romanovskiy, Ye. F. Simkhovich**

ON ESTIMATION OF ACCURACY OF DIGITAL INSTRUMENT

Present-day determination of accuracy class is discussed. Accuracy is proposed to estimate by weighted mean relative tolerance. Operation range choice problem is analysed.