

## ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

УДК 681.2.082+621.317.08

Б. И. ШВЕЦКИЙ  
(Львов)

### К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОГРЕШНОСТИ СЕРИЙНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

К числу наиболее важных параметров аналого-цифровых преобразователей относится их погрешность. Общепринятая форма выражения погрешности облегчает выбор и сравнение аналогичных приборов. Правильное определение и присвоение класса серийным приборам имеет значение не только с метрологической точки зрения, но и является важным экономическим фактором. Нередки случаи, когда предприятия в целях прикрытия низкого качества изготовления, сокращения некоторых важных технологических операций, использования неквалифицированных операторов для настройки приборов и других подобных «мероприятий», ведущих, якобы, к увеличению производительности и снижению себестоимости продукции, указывают гарантированные погрешности с большим запасом. Нетрудно убедиться, что такой подход ведет лишь к проигрышу по техническим и экономическим показателям и без всяких оснований снижает конкурентоспособность наших приборов на мировом рынке.

Погрешности цифровых измерительных приборов имеют относительную составляющую, величина которой выражается в долях от измеряемого сигнала, и абсолютную составляющую, величина которой определяется принципом построения аналого-цифрового преобразователя и его отдельных узлов.

Наиболее приемлемы следующие две формы выражения погрешности цифрового прибора. Первая форма определяет погрешность прибора в единицах измеряемого сигнала (например, в милливольтях):

$$\Delta_1 = \pm (a U_x + b \cdot 10^{p-1}) \text{ мв}, \quad (1)$$

где  $a$  — относительная погрешность;  
 $U_x$  — измеряемое напряжение в мв;  
 $b$  — абсолютная погрешность в мв;  
 $p$  — показатель пределов, имеющих декадное отношение (например, для пределов 10, 100 и 1000 в показатель  $p$  равен соответственно 1, 2 и 3).

Выражение (1) неприменимо, когда не используется декадное отношение пределов. В некоторых случаях коэффициенты  $a$  и  $b$  не остаются одинаковыми для всех пределов, что должно быть учтено при определении общей погрешности по формуле (1).

Вторую форму выражения погрешности можно представить как

$$\Delta_2 = \pm (a U_x + b' U_{\text{пред}}) m b, \quad (2)$$

где  $b'$  — эмпирическая величина (преобразование  $b' U_{\text{пред}}$  соответствует случаю, когда собственно прибора еще нет или изготовлено лишь несколько образцов, кратковременная эксплуатация и испытание которых не позволяют уточнить характеристики прибора, погрешность определяется расчетным путем.

Полагая, что систематические погрешности прибора учтены или исключены тем или иным путем, примем, что выражения (1) и (2) характеризуют лишь случайные погрешности. Для определения величин этих погрешностей ( $a$  и  $b$ ) следует провести соответствующий анализ применительно к типу прибора. Так, например, относительная составляющая погрешности цифрового вольтметра (аналога-цифрового преобразователя) определяется нестабильностью образцовых резисторов, нестабильностью напряжения калибровки, погрешностью поверочной установки и др.; в электронно-счетном частотомере относительная составляющая погрешности определяется главным образом нестабильностью частоты кварцевого генератора.

Общая относительная среднеквадратичная погрешность характеризуется суммой отдельных составляющих

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2}. \quad (3)$$

Следует отметить, что определение среднеквадратичной погрешности (составляющих) не всегда является очевидным. В ряде случаев приходится знакомиться с технологией изготовления комплектующих изделий и методикой нормирования их погрешностей с тем, чтобы обеспечить одинаковый подход при определении погрешности отдельных составляющих. Так, при изготовлении образцовых резисторов последние группируются по значениям предельных погрешностей  $\pm (\delta_i)$ . Внутри каждой группы резисторов погрешности, вероятно, распределяются по нормальному закону, и, следовательно, учитывая обычное соотношение между предельной и среднеквадратичной погрешностями, получим

$$\sigma_i = \frac{1}{3} \delta_i.$$

После нахождения величины  $\sigma$ , согласно выражению (3), остается решить вопрос о методике назначения величины относительной составляющей погрешности, присваиваемой серийному прибору. К сожалению,

этот, безусловно, важный вопрос не получил до сих пор четкого и однозначного толкования. Как правило, при обсуждении случайных погрешностей обычно ограничиваются рассмотрением способа определения среднего значения искомой величины (математического ожидания) по данным группы измерений, что следует отнести к методике повышения точности измерения путем проведения многократных измерений. Подобная ситуация неприменима к рассматриваемому вопросу. При серийном выпуске не проводят многократных измерений в одной точке или измерение большим количеством однотипных приборов с тем, чтобы решить вопрос о пригодности поверяемого прибора или партии приборов. Каждый экземпляр проходит всестороннюю проверку и достаточно лишь одного какого-либо несоответствия техническим условиям, чтобы прибор был забракован независимо от того, какую долю от выпускаемой партии он составляет.

Способ определения среднеквадратичной погрешности предусматривает возможность того, что у некоторой части приборов погрешность, определенная при заводских испытаниях, превысит значение  $\sigma$  [см. (3)]. Кроме того, возможно некоторое изменение погрешности в процессе эксплуатации из-за временной нестабильности параметров прибора. Следовательно, необходимо принять некоторый запас при определении гарантированной погрешности.

*Представляется целесообразным определять значение допустимой погрешности прибора так, чтобы в течение всего гарантийного срока только по небольшой части приборов заводу-изготовителю могли быть предъявлены рекламации вследствие выхода приборов из класса.* При такой постановке задачи отпадает, в частности, надобность в поиске других параметров, характеризующих измерительные устройства, типа «метрологической надежности» и т. п.

Поскольку общая случайная относительная составляющая погрешности прибора вызывается большим количеством случайных факторов, можно распространить нормальный закон на распределение общей случайной погрешности во времени. Далее, выбрав определенное соотношение  $a/\sigma$ , определим, у какой части приборов погрешность не превысит установленного значения ( $a$ ) в течение гарантийного срока. Для этого воспользуемся известным выражением:

$$P\{-a < x < +a\} = 2\Phi\left(\frac{a}{\sigma}\right), \quad (4)$$

где  $\Phi$  — функция Лапласа  $\Phi\left(\frac{\eta}{\sigma}\right)$ .

Так, для  $a/\sigma = 1,5$   $P = 0,8664$ , и, следовательно, только 14% приборов будут забракованы по метрологическим параметрам на этапах от выпуска приборов до окончания гарантийного срока.

Абсолютная составляющая погрешности определяется в основном ошибкой дискретности. У некоторых приборов в абсолютную составляющую входит также погрешность из-за дрейфа нуля усилителя и устройств сравнения, возникающего в промежутке между двумя последовательными регулировками («установка нуля»). По своей природе ошибка дискретности подчиняется равномерному закону распределения: все случайные погрешности в пределах  $\pm c$  равновероятны. Предельное значение погрешности дискретности ( $c$ ) имеет, как уже отмечалось, методический характер и не зависит от времени эксплуатации прибора. Среднеквадратичное значение этой погрешности при равномерном зако-

не распределения случайных погрешностей, как известно\*, равно

$$\sigma_1 = \frac{c}{\sqrt{3}}.$$

При определении значения  $b$  выбирают обычно такой запас (превышение над  $\sigma_1$ ), чтобы получилась величина, равная или кратная единице младшего разряда цифрового отсчетного устройства. Очень часто в качестве абсолютной погрешности ( $b$ ) принимают предельное значение ошибки дискретности ( $c$ ).

Имеется еще одно обстоятельство, заставляющее иногда присваивать выпускаемым приборам допустимые значения погрешности с очень большим запасом. В некоторых ГОСТах и инструкциях по поверке указывается допустимое соотношение погрешностей поверяемого и образцового приборов. Так, например, в ГОСТе 1845—59 (Приборы электроизмерительные) допускаемое соотношение колеблется в пределах 2,5—5, а в ГОСТе 6746—53 (Магазины емкости измерительные) 3—4; в ГОСТе 9763—61 (Приборы радиоизмерительные) соответствующий пункт сформулирован следующим образом: «Допускаемая погрешность образцового прибора или измерительного устройства должна быть, по крайней мере, в три раза меньше допускаемой погрешности испытуемого прибора».

Подобные указания истолковываются в некоторых учреждениях Комитета стандартов так, что погрешность поверяемого прибора указывается не меньшей трехкратной погрешности поверочной установки независимо от результатов поверки (даже в случае, когда зафиксирована «нулевая» погрешность при поверке). К сожалению, многочисленные ГОСТы и инструкции по поверке не препятствуют таким совершенно неправомерным выводам. В действительности указанные выше соотношения могут иметь лишь такой смысл: если погрешность поверяемого прибора в 3—4 раза больше погрешности поверочной установки, то при определении общей среднеквадратичной погрешности системы можно не учитывать погрешность поверочной установки, так как ее вклад на порядок меньше погрешности прибора.

Само собой разумеется, что наличие поверочной установки более высокого класса по сравнению с поверяемым прибором решает рассматриваемую задачу, но такое условие не всегда выполнимо. При производстве некоторых типов цифровых приборов погрешности поверочной установки и поверяемых приборов могут оказаться сравнимыми, что тем не менее не должно закрыть путь для серийного производства приборов повышенной точности. С достаточным запасом погрешность поверяемого прибора ( $\sigma_{пр}$ ) должна в подобных случаях определяться как среднеквадратичная сумма погрешностей поверочной установки ( $\sigma_y$ ) и результата поверки ( $\sigma_{пов}$ )

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_{пов}^2}. \quad (5)$$

Погрешность цифровых приборов, назначенная в соответствии с изложенными выше соображениями, на стадии разработки будет иметь достаточный (но не чрезмерный) запас, необходимый для нормального производства. В процессе серийного выпуска гарантированная погреш-

\* В. Д. Малинский, Д. Н. Ошер, Л. Я. Теплицкий. Испытания радиоаппаратуры. М.—Л., «Энергия», 1965.

ность цифровых приборов должна быть обязательно скорректирована по результатам обработки статистических данных, собранных во время заводской поверки, в течение эксплуатации приборов и по результатам длительных испытаний, проводимых в лабораториях надежности. Настоятельная необходимость в периодической коррекции гарантируемой заводом погрешности цифровых приборов вызывается тем, что действительные законы распределения погрешностей неизвестны; комплектующие изделия, определяющие погрешность прибора, могут быть существенно изменены и модернизированы со временем; условия эксплуатации, если не всех, то значительной части приборов, могут быть также изменены и т. д.

*Поступила в редакцию  
5 ноября 1966 г.*

---