

Т. М. АЛИЕВ, Л. Р. СЕЙДЕЛЬ, А. А. ТЕР-ХАЧАТУРОВ
(Сумгаит)

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЦИФРОВОГО ИЗМЕРЕНИЯ АНАЛОГОВЫХ ВЕЛИЧИН

Цифровые измерительные приборы благодаря таким хорошо известным преимуществам, как удобство индикации и регистрации, передачи измерительной информации по каналу связи, ввода ее в вычислительную машину и т. д., находят все более широкое применение в лабораторной и производственной практике. Поэтому проблема повышения точности цифрового измерения аналоговых величин весьма актуальна.

Попытки решить эту проблему путем повышения требований к точности, чувствительности элементов и узлов измерительной цепи в целом ряде случаев успеха не имеют, однако во всех случаях приводят к резкому усложнению, снижению надежности и повышению стоимости измерительного устройства. Поэтому весьма перспективными в настоящее время являются кибернетические способы повышения точности, в частности путем автоматической коррекции погрешностей измерительного устройства [1, 2]. В [3, 4] изложены способы автоматической коррекции погрешностей измерения путем соответственно ступенчатой и кусочно-линейной аппроксимации передаточной характеристики измерительного устройства. Наряду с очевидными достоинствами эти способы обладают тем недостатком, что эффективность их применения резко снижается в случае значительной погрешности измерительной цепи. Кроме того, погрешности измерительного устройства исключаются не полностью, так как результирующая погрешность зависит от разности между измеряемым и образцовым напряжениями [3] или между двумя значениями образцовых напряжений, большим и меньшим измеряемой величины [4].

В [5] описан цифровой вольтметр, в котором цифровой результат измерения с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) преобразуется в напряжение, которое включается встречно с измеряемым напряжением, результат цифрового измерения разности напряжений алгебраически складывается с результатом грубого измерения определяемого напряжения и, таким образом, производится автоматическая коррекция погрешности. Существенными недостатками такого способа повышения точности являются полное отсутствие коррекции аддитивных погрешностей и неприменимость его при измерении таких аналоговых величин, для которых принципиально невозможно (электрическое сопротивление, индуктивность, емкость, световой поток и др.) или технически достаточно сложно получение разности между измеряемой и образцовой величинами.

В настоящей статье изложен способ повышения точности цифрового измерения, позволяющий осуществить автоматическое исключение суммарной систематической и сравнительно медленно прогрессирующей погрешности измерительной цепи. Данный алгоритм автоматической коррекции условно назван «итерационным», поскольку в нем реализуется последовательное приближение результатов цифрового измерения к истинному значению измеряемой величины.

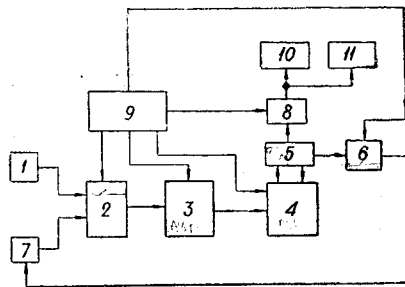


Рис. 1.

Блок-схема системы цифрового измерения, реализующей итерационный алгоритм автоматической коррекции погрешностей, представлена на рис. 1. Процесс измерения строится следующим образом: первоначально ко входу цифрового измерительного устройства 3 с помощью переключателя 2 подключается источник измеряемой величины 1 и производится ее цифровое измерение. Результат измерения, выраженный в определенном коде, поступает в блок памяти 5 вычислительного устройства 4 и затем через электронный ключ 6 подается на вход ЦАП 7, на выходе которого получается соответствующая аналоговая величина. Затем эта вспомогательная аналоговая величина подается через переключатель 2 на измерительную цепь 3 и измеряется. Результат цифрового измерения вычитается с помощью вычислительного устройства 4 из хранящегося в блоке памяти 5 результата предыдущего цифрового измерения определяемой величины. Разность, которую мы условно обозначим через Δ_1 , остается в блоке памяти 5. Далее вновь на вход измерительной цепи 3 через переключатель 2 подается измеряемая величина, результат цифрового измерения которой складывается с разностью Δ_1 . Получившийся первый скорректированный результат измерения переписывается в блоке памяти 5 и через ключ 6 поступает на вход ЦАП 7, выходная величина которого подается на вход измерительной цепи 3, и результат измерения вычитается из первого скорректированного результата измерения. Получившаяся разность Δ_2 переписывается в блоке памяти 5, а через переключатель 2 вновь подается на вход измерительной цепи измеряемая величина; результат ее цифрового измерения складывается в вычислительном устройстве с разностью Δ_2 , и получается второй скорректированный результат измерения. Далее система работает аналогично.

Через ключ 8 скорректированные результаты измерения выдаются из блока памяти 5 на цифровую индикацию 10 и регистрацию 11. Управление работой системы цифрового измерения осуществляется блоком управления 9.

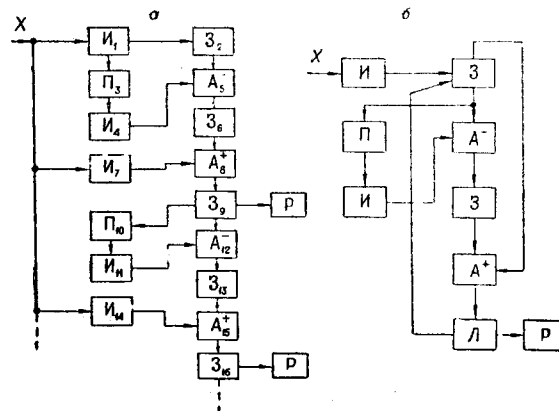


Рис. 2.

Система может работать в режиме непрерывного измерения и в режиме разового измерения, когда измерительный процесс заканчивается с получением скорректированного результата необходимой точности.

Функционально-операционная схема непрерывного итерационного алгоритма автоматической коррекции представлена на рис. 2, а. Соответствующая операционная формула может быть представлена выражением

$$I_1 Z_2 P_3 I_4 A_5^- Z_6 I_7 A_8^+ Z_9 P_{10} I_{11} A_{12}^- Z_{13} I_{14} A_{15}^+ Z_{16} \dots \quad (1)$$

$\downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow$
 $P \qquad \qquad \qquad P$

Здесь I — операция цифрового измерения; Z — операция запоминания; P — операция обратного цифро-аналогового преобразования; A^+ и A^- — арифметические операции соответственно сложения и вычитания; P — операция цифровой регистрации или индикации.

Поскольку, как будет показано ниже, суммарная статическая погрешность измерения с увеличением номера скорректированного результата резко уменьшается, снижаясь до уровня, определяемого практически точностью ЦАП и входного переключателя, то система цифрового измерения после нескольких вспомогательных операций выходит на режим точного измерения.

Функционально-операционная схема разового итерационного алгоритма автоматической коррекции представлена на рис. 2, б. Соответствующая операционная формула может быть представлена выражением

$$I A^+ L Z P I A^- Z I A^+ L P. \quad (2)$$

$\uparrow \qquad \qquad \qquad |$

Здесь L — вспомогательная логическая операция, осуществляющая прекращение в нужный момент измерительного процесса и выдачу окончательного результата на цифровую индикацию и регистрацию.

Произведем анализ результирующей систематической погрешности измерительного устройства по изложенному способу. Если пренебречь погрешностью от нелинейности, то для результата непосредственного измерения измерительной цепью Z получим

$$Y_0 = X(1 + \alpha) + v, \quad (3)$$

где Y_0 — результат непосредственного измерения; X — истинное значение измеряемой аналоговой величины; α — мультипликативная составляющая погрешности; v — аддитивная составляющая погрешности.

Будем считать, что погрешности, вносимые переключателем 2 и ЦАП 7, пренебрежимо малы. Точность, например, ЦАП напряжения постоянного тока, собранного по цифровой потенциометрической схеме на прецизионных сопротивлениях и релейно-контактных коммутирующих элементах, при использовании в качестве источников питания нормальных элементов или параметрических стабилизаторов на термостабилизированных кремниевых стабилитронах может быть доведена до 0,01% и в ряде случаев даже до 0,001%. Время работы такого ЦАП в данной системе измерения определяется временем одного срабатывания реле.

Поскольку быстродействие цифрового измерительного устройства Z может быть весьма большим (при невысоких требованиях к его точности оно может быть собрано на бесконтактных элементах), время между

циклами измерения определяется практически временем работы ЦАП. Полагая, что за время между несколькими циклами коррекции состояние измерительного устройства (величины α и v) и значение измеряемой величины остаются неизменными, получим для первого скорректированного результата измерения

$$Y_1 = X(1 + \alpha) + v - \{[X(1 + \alpha) + v](1 + \alpha) + v\} + X(1 + \alpha) + v = \\ = X(1 - \alpha^2) - \alpha v; \quad (4)$$

для второго —

$$Y_2 = X(1 - \alpha^2) - \alpha v - \{[X(1 - \alpha^2) - \alpha v](1 + \alpha) + v\} + X(1 + \alpha) + v = \\ = X(1 + \alpha^3) + \alpha^2 v. \quad (5)$$

В общем случае для n -го скорректированного результата измерения получим выражение

$$Y_n = X [1 - (-\alpha)^{n+1}] + (-\alpha)^n v. \quad (6)$$

Как видно из формулы (6), если скорость изменения измеряемой величины мала по сравнению с быстродействием системы измерения, то систематическая погрешность измерения, начиная с определенного номера скорректированного результата, практически не зависит от погрешности цифрового измерительного устройства Z . Так, например, если относительная погрешность измерительного устройства составляет 10%, то в этом случае $\alpha \leq 0,1$ и $v \leq 0,1 \cdot X$, и уже в третьем скорректированном результате измерения относительная погрешность не превысит 0,01% и далее будет все время снижаться до уровня, определяемого погрешностью ЦАП и входного переключателя.

Следует отметить, что в случае практического постоянства измеряемой величины X измерительный процесс можно упростить, сократив вдвое количество измерительных циклов путем исключения повторяющейся вновь и вновь операции измерения X . При этом один раз производится цифровое измерение X , результат измерения $Y_0 = X(1 + \alpha) + v$ вводится в блок памяти и в дальнейшем используется для соответствующих математических операций, что позволяет почти вдвое повысить результирующее быстродействие системы измерения.

Необходимо отметить, что в результате реализации изложенного итерационного алгоритма автоматической коррекции можно получить высокую точность результирующего измерения при очень низкой точности основной измерительной цепи. Если измеряемая величина X постоянна (или во всяком случае скорость ее изменения достаточно мала по сравнению с быстродействием системы измерения), то при относительной погрешности измерительного устройства в 60% скорректированные результаты измерения, начиная уже с восьмого, будут иметь относительную погрешность не выше 1%, а начиная с тринадцатого — 0,1%. Теоретически точные измерения данным способом можно получить при мультипликативной погрешности основной измерительной цепи вплоть до 100% (невключительно).

В общем случае с учетом изменения измеряемой величины и изменения состояния измерительного устройства за время между отдельными циклами коррекции для n -го скорректированного результата измерения получим выражение

$$Y_n = X [1 + (-1)^n \prod_{i=0}^n \alpha_i] + (-1)^n v_0 \prod_{i=1}^n \alpha_i +$$

$$+ \sum_{i=1}^n (-1)^{n-i} (\Delta X_i) \prod_{l=1}^n \alpha_l + \prod_{l=1}^n \alpha_l \sum_{i=1}^n \Delta X_i; \quad (7)$$

где X_0, X_1, \dots, X_n — истинные значения измеряемой величины соответственно в моменты окончания непосредственного измерения, первого цикла коррекции и n -го цикла коррекции; α_0 и ν_0, α_1 и ν_1, \dots, α_n и ν_n — значения относительной мультипликативной и аддитивной погрешностей измерительной цепи в вышеупомянутые моменты времени; $\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_n$ — изменения измеряемой величины за время между двумя соседними ее измерениями (т. е. $\Delta X_i = X_i - X_{i-1}; i = 1, 2, \dots, n$).

Как видно из формулы (7), систематическая погрешность скорректированных результатов измерения, начиная с определенного номера, будет определяться практически членом $\alpha_n \Delta X_n$ (для n -го скорректированного результата измерения). Из выражения для относительной погрешности $\epsilon_n = \frac{Y_n - X_n}{X_n} \approx \alpha_n \frac{\Delta X_n}{X_n}$ следует, что итерационный алгоритм автоматической коррекции остается эффективным, если относительное изменение измеряемой величины за время между двумя ее измерениями не превышает 100%. Так, например, при измерении постоянного напряжения и использовании в переключателе 2 и ЦАП 7 релейно-контактных коммутаторов время между двумя соседними измерениями будет порядка 8—10 мсек. Если за это время измеряемая величина изменяется не более чем на 1% (т. е. на 100% в секунду), то при погрешности цифровой измерительной цепи 3 в 10% погрешность скорректированных результатов измерения, начиная с третьего номера, будет порядка 0,1%.

Как уже отмечалось, данный способ может быть применен для повышения точности цифрового измерения любой аналоговой величины, для которой имеются точные ЦАП и входной переключатель. Построение точного ЦАП для большинства электрических величин, таких как постоянное и переменное напряжение и ток, электрическое сопротивление, индуктивность, емкость и т. д., технически несложно. В ряде случаев оказывается возможным и сравнительно несложным построение точных ЦАП для некоторых неэлектрических величин, таких как усилие, давление, световой поток и т. д. Интересно отметить, что реализация итерационного алгоритма автоматической коррекции путем введения образцовой аналоговой (в данном случае неэлектрической) величины в измерительную цепь до первичного датчика позволяет полностью исключить все систематические погрешности измерения, в том числе и погрешности за счет нестабильности передаточной характеристики первичного датчика, что позволит резко упростить конструкцию последнего.

Целесообразность изложенного способа повышения точности цифрового измерения неэлектрических величин, очевидно, определяется простотой и достижимой точностью воспроизведения образцовых значений измеряемой неэлектрической величины. Поэтому весьма актуальной сейчас является проблема создания простых и достаточно точных ЦАП для различных неэлектрических величин.

Таким образом, изложенный способ позволяет резко повысить точность цифрового измерения аналоговых величин, и цифровые измерительные устройства и системы, реализующие данный алгоритм проведения измерительно-вычислительного процесса, смогут найти широкое применение в практике научного эксперимента и промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. В. Новицкий. Возможности кибернетического пути повышения точности электроизмерительных приборов.— Измерительная техника, 1962, № 4.
2. С. М. Персин. Способы повышения точности кодирующих устройств посредством автоматической коррекции систематических ошибок.— Кибернетические пути совершенствования измерительной аппаратуры. Тезисы конференции. Л., 1962.
3. С. М. Персин и В. П. Петров. Преобразователь напряжения в цифровой код. Авторское свидетельство № 147107.— БИ, 1962, № 9.
4. С. М. Персин. Способ повышения точности кодирующих устройств. Авторское свидетельство № 147106.— БИ, 1962, № 9.
5. Б. Дж. Кэй. Правильный выбор цифрового вольтметра.— Электроника (перевод с англ.), 1966, т. 39, № 7.

*Поступила в редакцию
11 июня 1968 г.*