

В. Н. ВЬЮХИН, А. Н. КАСПЕРОВИЧ, Н. В. ЛИТВИНОВ
(Новосибирск)

ОБ ОШИБКАХ КВАНТОВАНИЯ АЦП С ЦИФРОВОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ДРЕЙФА

Одним из перспективных способов устранения систематических погрешностей аналого-цифровых преобразователей (АЦП) является использование автоматической коррекции результатов измерений. Известно, что для устранения аддитивных погрешностей (типа дрейфа нуля измерительного тракта АЦП) полезно применение цифровой коррекции, когда для получения результата производятся два измерения — известной величины, чаще всего напряжения, равного нулю, и измеряемой величины, а затем выполняется автоматическая обработка, заключающаяся в вычитании этих промежуточных результатов [1, 2]. При цифровой автокоррекции в приборах поразрядного уравнивания изменяется характер распределения погрешности квантования АЦП, в связи с чем возникает задача анализа этой погрешности.

Для осуществления коррекции ранее использовались довольно сложные устройства типа сумматоров вычислительных машин. После того, как была предложена схема, позволяющая осуществить такую коррекцию в приборах поразрядного уравнивания в процессе измерения без существенного увеличения объема оборудования, задача анализа погрешности квантования таких приборов стала еще актуальней.

В литературе имеются краткие сведения о погрешности квантования в АЦП с цифровой коррекцией. Ниже эта погрешность будет изучена подробно, будет найден закон распределения ее для различных условий работы прибора. Следует заметить, что существенный результат в этом направлении был получен в [3] для приборов с заполнением интервала времени импульсами известной частоты.

Будем считать, что исследуемый АЦП не имеет никаких погрешностей, кроме систематической аддитивной, а порог чувствительности и порог срабатывания нуль-органа равны нулю. В этом случае погрешность квантования промежуточного напряжения находится в интервале $[0, q]$, где q — шаг квантования. Как это обычно принято, все дрейфы измерительного тракта приведем ко входу АЦП и тем самым будем считать, что ко входу приложено напряжение . Заметим, что и при других способах округления, когда погрешность квантования лежит в интервале $[-q/2, q/2]$, $[-q, 0]$, нижеследующие рассуждения будут справедливы.

В процессе первого измерения известного напряжения на вход поступает $U_0 + U_d$, а в результате преобразования получим $N_0 = U_0 + U_x - \Delta_{\text{кв.э}}$. В процессе второго преобразования на вход уже будет поступать неизвестное напряжение и дрейф $U_x + U_d$, и на выходе АЦП будем иметь $N_x = U_x + U_d - \Delta_{\text{кв.х}}$. Истинное значение измеряемой величины получается в сумматоре, где образуется разность

$$N = N_x - N_0 = U_x - U_0 - \Delta_{\text{кв.э}} + \Delta_{\text{кв.х}}$$

В дальнейшем примем $U_0 = 0$; измерение U_d и $U_x + U_d$ назовем вспомогательным. Очевидно, что в случае отсутствия шумов при любых, но фиксированных значениях U_x и U_d и проведении большого числа измерений будет всегда получаться одно значение N и одно значение погрешности квантования $\Delta_{\text{кв.х}} - \Delta_{\text{кв.э}}$.

Рассмотрим поведение этой погрешности. Пусть $U_x = \text{const}$, а U_d изменяется, но так, что при проведении каждой пары измерений оно имеет одно и то же значение. Изменение U_d не изменяет погрешности результата N до тех пор, пока U_x или $U_x + U_d$ не перейдет границы кванта. При

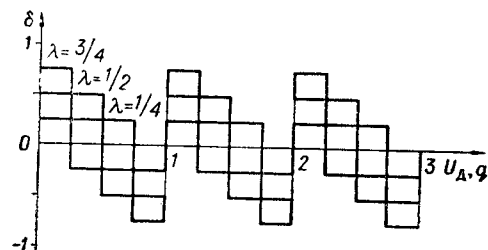


Рис. 1.

переходе границы кванта происходит скачкообразное изменение величины погрешности. Погрешность результата N при изменении U_x принимает два значения и имеет периодический характер с периодом, равным шагу квантования по уровню q . На рис. 1 приведены графики изменения погрешности δ при различных фиксированных значениях дробной части λ величины U_x . Значение дробной части U_x определяет момент скачкообразного изменения δ и само значение погрешности.

Таким образом, при указанных условиях результат обработки может принимать два значения, отличающихся друг от друга на q .

При равномерном распределении U_d в кванте и фиксированном значении λ условная плотность погрешности $P_\lambda(\delta)$ имеет вид, представленный на рис. 2, а. Если $D\{U_x\} \gg q$, то значение λ распределено в кванте равномерно, и поэтому осреднение по λ условных плотностей $P_\lambda(\delta)$ дает треугольный закон распределения погрешности результата обработки N (см. рис. 2, б).

Пусть теперь $U_d = \text{const}$, а U_x изменяется. При равномерном распределении U_x в кванте и фиксированном значении дробной части γ величины U_x условная плотность погрешности $P_\gamma(\delta)$ будет равномерной с математическим ожиданием γ (см. рис. 2, в).

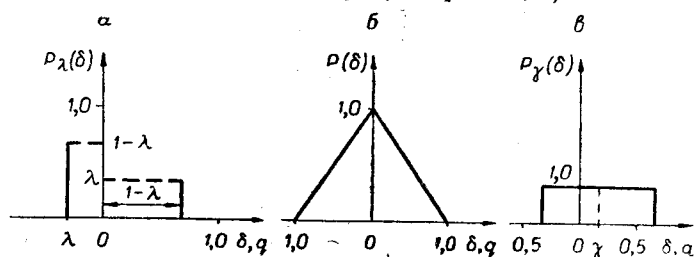


Рис. 2.

Присутствие шума на входе АЦП приводит к многозначности результатов вспомогательных измерений и тем самым увеличивает разброс показаний результата обработки N . Пусть при измерении U_d и суммы $U_x + U_d$ шум не действовал и при этом соответственно были получены результаты i и j . Действие шума может вызвать показания:

$$i - k, i - k + 1, \dots, i + k - 1, i + k \text{ и } j - k, j - k + 1, \dots, j + k - 1, j + k.$$

Численное значение k равно наибольшей целой части максимальной амплитуды шума $U_{ш}$, выраженной в единицах шага дискретности q . Пары показаний вспомогательных измерений (состояний АЦП) составляют матрицу $(2k+1)$ -го порядка

$$\begin{matrix} (i - k, j - k) & (i - k, j - k + 1) & \dots & (i - k, j + k) \\ (i - k + 1, j - k) & (i - k + 1, j - k + 1) & \dots & (i - k + 1, j + k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (i + k, j - k) & (i + k, j - k + 1) & \dots & (i + k, j + k) \end{matrix} \quad (1')$$

Главная диагональ матрицы с элементами $(i - k, j - k)$, $(i - k + 1, j - k + 1)$, \dots , $(i + k, j + k)$ соответствует результатам вычитания $N = j - i$. Кратность такого отсчета равна числу элементов, лежащих на главной диагонали. Элементы матрицы других диагоналей, параллельных главной, определяют показания $N = j - i + l$ ($l = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm 2k$), кратность которых $2k + 1 - |l|$. Эти свойства матрицы позволяют заключить, что число различных значений N равно числу диагоналей матрицы, т. е. $4k + 1$. В частном, важном для практики, случае, когда на входе АЦП действует шум, а U_x фиксировано, количество показаний результата обработки не превышает $2\lfloor 2|U_{ш}| \rfloor + 1$, где $\lfloor \cdot \rfloor$ — наибольшая целая часть величины $2|U_{ш}|$, выраженной в единицах шага дискретности по уровню.

Для нахождения распределения погрешности АЦП с цифровой коррекцией при действии на его входе шума с заданным распределением необходимо найти вероятности состояний АЦП и условный закон распределения погрешности для произвольного состояния. В целях сокращения запишем матрицу (1) в виде $\{m, n\}$, а состояние АЦП определим элементом mn ($m, n = -k, -k + 1, \dots, +k$).

Если шум при измерении U_d и $U_x + U_d$ действует независимо то вероятность состояния АЦП $P(mn)$ можно записать так:

$$P(mn) = P(i + m) P(j + n),$$

где $P(i + m)$, $P(j + n)$ — вероятности появления численных значений отсчета $i + m$ и $j + n$ при измерениях U_d и $U_x + U_d$.

Нетрудно показать, что закон распределения погрешности при условии, что АЦП находится в состоянии mn , имеет треугольный вид с математическим ожиданием $l = U_{ш2} - U_{ш1} \cong n - m$ (рис. 3). Действительно, если $D\{U_d + U_{ш1}\} \gg q$ и $D\{U_x + U_d + U_{ш2}\} \gg q$, то величины $U_d + U_{ш1}$, $U_x + U_d + U_{ш2}$ распределены равномерно в $(i + m)$ и $(j + n)$ -м квантах. Но аналогичная ситуация, когда шум не действовал, а случайными были величины U_d и U_x , рассмотрена ранее.

Таким образом, зная закон распределения шума и вычисляя затем $P(mn)$, можно получить безусловную плотность погрешности результата обработки путем осреднения $P_{mn}(\delta)$ по всем состояниям:

$$P(\delta) = \sum_{m, n = -k}^k P_{mn}(\delta) P(mn). \quad (2)$$

Вычисления по формуле (2) могут быть значительно упрощены, если воспользоваться свойствами матрицы (1). Для примера приведем расчет плотности распределения погрешности обработки при условии, что шум на входе АЦП распределен равномерно в пределах трех квантов и имеет математическое ожидание, равное нулю. Так как амплитуда шума равна $\pm 1,5$ кванта, то возможные значения отсчетов при измерении U_x и $U_x + U_n$ составляют следующую матрицу:

$$\begin{matrix} (i-2, j-2) & (i-2, j-1) & (i-2, j) & (i-2, j+1) & (i-2, j+2) \\ (i-1, j-2) & (i-1, j-1) & (i-1, j) & (i-1, j+1) & (i-1, j+2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (i+2, j-2) & (i+2, j-1) & (i+2, j) & (i+2, j+1) & (i+2, j+2) \end{matrix}$$

Для такой амплитуды шума $k=2$, и поэтому число диагоналей матрицы и различных показаний результата N равно 9.

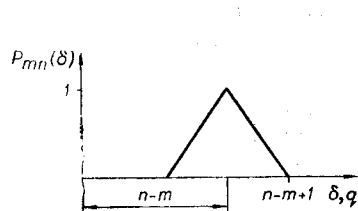


Рис. 3.

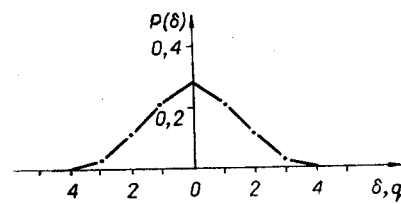


Рис. 4.

Вероятности появления значений отсчета $i-2, i-1, \dots$, и т. д. могут быть найдены обычными способами. Предварительно определяется совместный закон распределения величин U_n и дробной части U_x или U_x . Эти вероятности таковы:

$$P(i-2) = P(i+2) = P(j-2) = P(j+2) = \frac{1}{24};$$

$$P(i-1) = P(i+1) = P(j-1) = P(j+1) = \frac{7}{24};$$

$$P(i) = P(j) = \frac{8}{24}.$$

Вычисляем матрицу вероятностей состояний АЦП

1	7	8	7	1
7	49	56	49	7
8	56	64	56	8
7	49	56	49	7
1	7	8	7	1

Нормировочный коэффициент для этой матрицы равен $\frac{1}{576}$. Согласно (2), производя осреднение по всем состояниям АЦП, получим безусловный закон распределения погрешности обработки (рис. 4).

Сравнивая АЦП без коррекции и с коррекцией в одинаковых условиях действия помехи (шума), можно заключить, что АЦП с коррекцией имеет дисперсию погрешности примерно в 2 раза большую, чем

прибор без коррекции. Так, в рассмотренном примере дисперсия прибора с коррекцией составляла $1,84 q^2$, а без коррекции $0,83 q^2$.

Так как при $U_x = \text{const}$, $q > U_{\text{ш}} > 0$ возможен разброс показаний в три единицы, целесообразно выбирать размер кванта несколько большим амплитуды шума.

В заключение отметим, что влияние помехи на погрешность измерения несинхронизированным АЦП с преобразованием напряжения в интервал времени и АЦП поразрядного уравнивания с цифровой коррекцией одинаково, если эти приборы — идеальные квантователи. При более полном рассмотрении необходимо учитывать фильтрующие свойства АЦП.

Следует также указать, что однополярный АЦП с цифровой автокоррекцией нуля, помимо особенностей в погрешности квантования, имеет и некоторые другие особенности. Диапазон измерения у такого прибора меньше теоретически возможного ($2^n - 1$) квантов на величину смещения и дрейфа нуля. Смещение нуля вводится для исключения знакопеременности результата измерения нуля и выбирается больше максимально возможного дрейфа нуля.

Кроме того, при измерении входного напряжения, равного нулю, из-за наличия внешних и внутренних шумов возможно, что скорректированный результат будет меньше нуля. При этом АЦП выдает результат измерения в дополнительном коде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полупроводниковые кодирующие и декодирующие преобразователи. Под ред. В. Б. Смолова. Л., «Энергия», 1967.
2. Г. П. Шлыков, Ю. М. Крысин. Быстродействующий цифровой милливольтметр с цифровой коррекцией. — Ученые записки ППИ, вып. 3. Пенза, 1966.
3. Э. И. Вологдин. Об одном методе анализа несинхронизированных аналого-цифровых преобразователей. — Автоматический контроль и методы электрических измерений. Тезисы докладов и сообщений. Новосибирск, 1968.

*Поступила в редакцию
15 января 1969 г.*