

КОРРЕКЦИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ АНАЛОГОВОГО ТРАКТА ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Основными задачами цифровой осциллографии являются воспроизведение формы измеряемого процесса и измерение отдельных параметров регистрируемых сигналов с заданной точностью. Суммарная погрешность измерения в цифровых запоминающих осциллографах (ЦЗО) определяется, в основном, двумя составляющими: погрешностью дискретизацией сигнала по времени и погрешностью цифрового измерения значения сигнала в точках отсчета.

Основными составляющими погрешности дискретизации во времени являются погрешности оцифровки, связанные с нестабильностью частоты времязадающего генератора, и апертурной неопределенностью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Их можно минимизировать за счет использования кварцевых синтезаторов частоты со стабильностью на уровне $10^{-7} \dots 10^{-9}$ и АЦП с малой апертурной неопределенностью [1].

Первой важной составляющей погрешности цифрового измерения значения сигнала в точках отсчета является погрешность квантования, значение которой тесно связано с интервалом квантования и разрядностью используемого АЦП:

$$\varepsilon_{\text{кв}} = \pm q/2 = \pm U_{\text{вх}}/2^n$$

где q – минимальный шаг квантования; $U_{\text{вх}}$ – амплитудное значение входного диапазона АЦП; n – разрядность АЦП. Погрешность квантования можно отнести к разряду методических погрешностей, так как она присуща выбранному методу измерения [2].

Второй существенной составляющей погрешности измерения напряжения в ЦЗО является инструментальная погрешность входного аналогового тракта, которая, в свою очередь, делится на динамическую и статическую погрешности преобразования [3].

Динамическая погрешность обусловлена, в основном, инерционностью измерительных элементов аналогового тракта и АЦП. Она определяется конечной длительностью переходных процессов тракта и изменением сигнала в процессе квантования. В этой связи, важным вопросом для ЦЗО является выбор обоснованного соотношения частоты дискретизации и верхней частоты полосы пропускания аналогового тракта.

Для случая линейной интерполяции, когда сигнал на участке дискретизации $t_{\text{д}}$ заменяется прямой линией, можно считать, что аналоговый тракт имеет частотную характеристику идеального фильтра с частотой

среза $\Delta_c = 2\Delta/t_d$. Тогда при подаче единичной функции на его вход переходная функция на выходе будет равна

$$H(t) = \frac{1}{2} + \frac{2\text{Si}\{w_c(t\Delta t_a)\}}{\Delta}$$

где t_a – время запаздывания, определяемое фазочастотной характеристикой фильтра; Si – интегральный синус. Время переходного процесса для такого случая $t_n = \Delta/\Delta_c$ [3]. Следовательно, для того, чтобы линейная интерполяция сигнала на участке t_d не приводила к существенным ошибкам, необходимо выполнение условия:

$$t_d \Delta t_n = \Delta/\Delta_c, \\ f_d \Delta 2f_c.$$

Отсюда следует, что если значение граничной частоты ЦЗО в два и более раза меньше максимальной частоты дискретизации, то инструментальной динамической ошибкой амплитудных измерений можно пренебречь, по сравнению с методической погрешностью дискретизации во времени.

Статическая погрешность при неизменном входном сигнале обуславливается неточностью настройки, изменением в процессе эксплуатации коэффициентов усиления входного тракта, смещением нулевого уровня прибора, влиянием внешних условий на параметры аналогового тракта и АЦП. Схемотехнический и технологический способы уменьшения этой погрешности [3] при разработке осциллографа дают положительный результат, но уступают по эффективности применению автоматической коррекции статической погрешности аналогового тракта.

Считая шаг квантования по уровню малым, по сравнению со статической погрешностью, передаточную характеристику измерительного устройства можно представить в виде непрерывной линейной функции:

$$x_{\Delta} = x(1 + \Delta) + V_{\text{см}},$$

где Δ – мультипликативная составляющая погрешности, обусловленная отклонением коэффициента чувствительности прибора от номинального значения; $V_{\text{см}}$ – абсолютная аддитивная составляющая погрешности, определяющая смещение нулевого уровня прибора; x_{Δ} – измеренный результат; x – истинное значение измеряемой величины.

Для исключения аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности при коррекции амплитудной характеристики аналогового тракта ЦЗО необходимо проводить контрольные измерения не менее, чем по двум различным образцовым мерам, причем одну из них удобно принимать равной нулю [4].

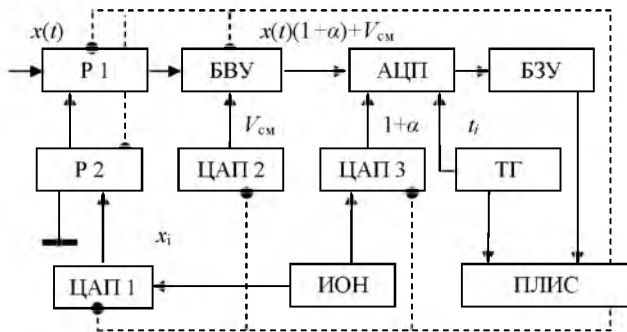


Рис. 1. Структурная схема узла коррекции амплитудной характеристики ЦЗО

На рис. 1 приведена структурная схема разработанного узла автоматической коррекции амплитудной характеристики тракта цифрового осциллографа. Исследуемый сигнал $x(t)$ поступает на блок входных усилителей БВУ, где приводится к входному диапазону аналого-цифрового преобразователя АЦП. Последний, в моменты времени t_i , задаваемые тактовым генератором ТГ, преобразует сигнал в цифровой код, который записывается в буферное запоминающее устройство БЗУ и анализируется в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС).

В режиме калибровки на ВУ через реле Р 1 подаются образцовые калибровочные сигналы. В первом такте производится цифровое измерение образцовой меры x_1 , сформированной с помощью температурно-стабилизированного источника опорного напряжения ИОН и цифро-аналогового преобразователя ЦАП 1. Результат непосредственного измерения может быть представлен в виде

$$x_1^{\square} = x_1(1 + \alpha) + V_{см} \pm \varepsilon,$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{цп1} + \varepsilon_{ион} + \varepsilon_{ацп} + \varepsilon_{изм}.$$

где x_1^{\square} — измеренный результат; x_1 — истинное значение образцовой меры; $\varepsilon_{цп1}$ — погрешность ЦАП 1; $\varepsilon_{ион}$ — погрешность ИОН, включая его температурную стабильность; $\varepsilon_{ацп}$ — погрешность квантования АЦП; $\varepsilon_{изм}$ — погрешность измерения образцовой меры.

Чтобы исключить влияние на результат измерения составляющих $\varepsilon_{цп1}$ и $\varepsilon_{ион}$ используется ЦАП с разрядностью, большей, чем разрядность АЦП, а также внешний ИОН с высокой температурной и долговременной стабильностью. Так как среднеквадратическая погрешность ряда измерений ε_N связана с числом измерений N и погрешностью отдельного

измерения σ_i соотношением $\sigma_N = \sigma_i / \sqrt{N}$, то для снижения случайной погрешности измерения образцовой меры $\sigma_{\text{изм}}$ до уровня погрешности квантования АЦП применяется усреднение результата измерения образцовой меры. По многократным результатам измерений двух опорных уровней x_1 и x_2 аддитивная составляющая погрешности компенсируется:

$$x_1 \square x_2 = (x_1 \square x_2)(1 + \alpha) \pm \varepsilon_{\text{инст}}.$$

Минимизация мультипликативной составляющей инструментальной погрешности ЦЗО достигается путем изменения коэффициента преобразования с помощью изменения опорного напряжения АЦП источником корректирующего напряжения ЦАП 3. Используя в качестве эталонной меры прямоугольный сигнал с уровнями x_1 и x_2 , процесс автоматической коррекции мультипликативной составляющей может быть ускорен. По результатам оцифровки нескольких периодов прямоугольного сигнала строится гистограмма кодов АЦП и выделяются уровни $x_1 \square$ и $x_2 \square$. Далее, изменяя уровень корректирующего напряжения с выхода ЦАП 3, минимизируют погрешность σ .

Во второй стадии автоматической калибровки осуществляется минимизация аддитивной составляющей погрешности тракта. В этом случае на вход ВУ через реле Р 1 и Р 2 подключается уровень нуля и, с помощью ЦАП 2, подается такое смещение $V_{\text{см}}$, при котором цифровой код на выходе АЦП соответствует середине диапазона выходных кодов.

Использование описанной схемы автоматической калибровки аналогового тракта ЦЗО обеспечивает высокую точность измерений в течение длительного времени в рабочих условиях эксплуатации, упрощает процедуру предварительной настройки входных аттенуаторов и коэффициентов усиления аналогового тракта. Такое решение обеспечивает в ЦЗО «Унипро В-121» с 8-разрядным АЦП максимальную погрешность измерения входных напряжений 1% в диапазоне температуры от 10 до 40 °С.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Тарковский Д. Ф., Ястребов А. С.* Метрология, стандартизация и технические средства измерений. М.: Высшая школа, 2001. С. 113–120.
2. *Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н.* Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие для вузов. 2-изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1990. 256 с.
3. Цифровая осциллография / А. М. Беркутов, И. П. Гиривенко, Е. М. Прошин, В. И. Рязанов // М.: Энергоатомиздат, 1983. 232 с.
4. *Алиев Т. М., Сейдель Л. Р.* Автоматическая коррекция погрешностей цифровых измерительных приборов. М.: Энергия, 1975. 216 с.