

**МЕТОД ЭТАЛОНИРОВАНИЯ  
АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

В. Н. Будко

*Воронежский государственный университет*

В статье представлен способ, названный методом приведения к эталонному напряжению, уменьшения статических погрешностей измерения цифровых отсчетов сигналов напряжения при вводе их в персональный компьютер (ПК) IBM PC через COM-порт.

**ВВЕДЕНИЕ**

Интерфейсы цифрового ввода аналоговых сигналов напряжения, сконструированные как на базе стандартных микросхем аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [1], так и разработанные в лабораториях [2], не лишены известных недостатков.

На аппаратную часть интерфейса влияют изменения температуры окружающей среды, старение элементов схемы интерфейса, нестабильность источников питания и др., что приводит со временем к неучитываемым погрешностям работы интерфейса.

В связи с этим, необходимо уменьшить аппаратные погрешности нестабильности цифровых отсчетов путем добавления в алгоритм работы интерфейса шагов сравнения с эталоном напряжения. Таких шагов, чтобы программа привязывала вычисление измеряемой величины  $U_x$  к эталону  $U_e$  по формуле

$$U_x = U_e \cdot F,$$

где  $F$  — функция независящая от разброса и флюктуаций параметров интерфейса.

Эталонное напряжение можно задавать любым способом, измеряя источник  $U_e$  эталонным вольтметром, и вводя эту величину в программу.

Возможные способы формирования функции  $F$  предлагаются на двух примерах разработанных интерфейсов.

**ИНТЕРФЕЙС АЦП  
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ**

На рис. 1 показана функциональная схема идеи интерфейса для прецизионного ввода в ПК

через COM-порт цифровых отсчетов аналогового напряжения  $U_x$ , реализованная на базе импортной (дорогой) микросхемы 8-разрядного АЦП TLC549.

На рис. 1: DB9S — разъем для подключения COM-порта; DC — дешифратор команд DTR, RTS, TxD, формирующий выходными триггерами памяти сигналы управления Scl, Scs, Sd, Sx.

По команде Scs АЦП TLC549 (5 на рис. 1) преобразует величину входного аналогового напряжения  $U_{in}$  в двоичное 8-разрядное число. Оно последовательно побитно выводится тактовой командой Scl на выход Data, читается программой ПК с линии CTS и преобразуется в десятичное число  $N$  в диапазоне 0...255. Так как этот АЦП измеряет только однополярные (положительные) напряжения в диапазоне 0... $U_{ref}$  ( $U_{ref}$  — опорное напряжение АЦП), то для измерения двуполярных сигналов  $U_x$  необходимо подать на вход  $I_n$  сумму смещения  $U_d = U_{ref} / 2$  с входным сигналом  $U_x$ .

Для этого служат следующие элементы интерфейса (по номерам):

1 — делитель опорного напряжения с коэффициентом передачи  $K_r = 0,5$ , который формирует напряжение смещения  $U_d$ ; 2, 3 — электронные переключатели аналоговых сигналов. Команды переключения — двоичные {0,1} сигналы Sd и Sx; 4 — блок суммирования, состоящий из двух последовательных операционных усилителей (ОУ); собственно сумматора с коэффициентами передачи  $K_d$  и  $K_x$  и инвертора суммы с коэффициентом передачи  $K_p$ .

В качестве эталонного напряжения удобно использовать напряжение смещения  $U_d$ . Для его измерения эталонным цифровым вольтмет-

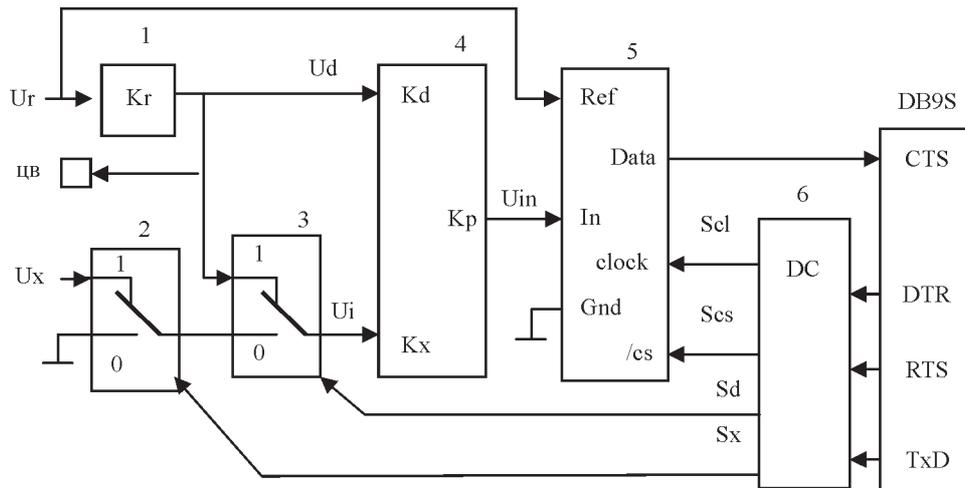


Рис. 1. Функциональная схема интерфейса АЦП TLC549

ром предусмотрено гнездо подключения, обозначенное на рисунке символом «цв».

### ЗАМЕЧАТЕЛЬНАЯ ФОРМУЛА

Результаты работы АЦП выводятся на выход числом  $N$ , которое равно

$$N_{in} = U_{in} / H, \quad (1)$$

где  $H = U_{ref} / 2^8$ ;  $H$  — шаг квантования.

Программа производит три измерения, управляя состоянием переключателей 2 и 3. При  $S_d, S_x = \{0,0\}$  напряжение на входе In АЦП будет (обозначим)  $U_{ind}$  равно:

$$U_{ind} = (U_d \cdot K_d + U_{so}) \cdot K_p + U_{po} \quad (2)$$

(см. блок переключателей).

Здесь и далее учитываются побочные параметры работы ОУ:  $U_{so}$  — паразитное смещение нуля ОУ сумматора и  $U_{po}$  — смещение нуля ОУ инвертора.

Аналогично, при  $S_d, S_x = \{0,1\}$  имеем  $U_{inx}$ :

$$U_{inx} = (U_d \cdot K_d + U_x \cdot K_x + U_{so}) \cdot K_p + U_{po}. \quad (3)$$

При  $S_d, S_x = \{1,0\}$  имеем  $U_{ine}$ :

$$U_{ine} = (U_d \cdot K_d + U_e \cdot K_x + U_{so}) \cdot K_p + U_{po}. \quad (4)$$

Берем из (1...4)  $N_d = U_{ind} / H, N_x = U_{inx} / H, N_e = U_{ine} / H$  (при  $U_e = U_d$ ) и вычислив  $N_x - N_d$  и  $N_e - N_d$  находим замечательную формулу

$$U_x = U_d(N_x - N_d) / (N_e - N_d) \quad (5)$$

по которой программа вычисляет  $U_x$ .

### КРАТКИЙ АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ $U_x$

Перед серией измерений пользователь определяет эталонным цифровым вольтметром величину смещения  $U_d$  и вводит ее в программу ПК.

#### ПРОГРАММА ПК:

- переключая вход интерфейса, определяет величины  $N_d, N_e, N_x$ ;
- при фиксированной величине  $U_d$ , вычисляет  $U_x$  по формуле (5).

Эта формула замечательна тем, что параметры блока смещения и блока суммирования:  $K_r, K_d, K_x, K_p, U_{so}, U_{po}$  «спрятались» во взаимно связанных величинах  $N_d, N_e, N_x, U_d = U_e$  и вычисление  $U_x$  не зависит от их изменения по любым причинам.

Следовательно, не требуется прецизионный подбор величин комплектующих деталей интерфейса и режимов работы ОУ. Величина  $U_d / (N_e - N_d)$  реализует виртуальный шаг квантования, в котором автоматически учтены разбросы и флуктуации параметров  $K_r, K_d, K_x, K_p, U_{so}, U_{po}$ .

### ИНТЕРФЕЙС АЦП С ЛИНЕЙНЫМ РАЗРЯДОМ КОНДЕНСАТОРА

По рассмотренной методике можно также осуществить прецизионные измерения  $U_x$ , используя схему простейшего (и дешевого) интегрирующего АЦП с быстрым зарядом конденсатора до напряжений  $U_d, U_d + U_k, U_d + U_e$ , и последующим разрядом постоянным током. Длительность разряда до нуля, измеряемая

программой ПК, представляет результат работы такого АЦП.

На рис. 2 изображена принципиальная схема реализации интерфейса с сумматором-интегратором Da3 и компаратором Da4. На этом рисунке микросхемы Da1, Da2 — переключатели аналоговых и цифровых сигналов, а Dd1 — типовой цифровой дешифратор. При a1 = 1 Da1, Da2 — в верхнем положении.

ОУ Da3 при переключении Da2.2 в верхнее положение является сумматором с коэффициентами передачи для Ud и Ux равными  $Kd = -R_s / R_d$  и  $K_x = -R_s / R_x$ . При переключении Da2.2 в нижнее положение начинается разряд конденсатора постоянным током  $I = U_r / R_r = \text{const}$ .

Обозначим DR десятичный эквивалент двоичных команд DTR, RTS COM-порта  $DR = \{0, 1, 2, 3\}$  и символом A двоичное число на выходе дешифратора Dd1:  $A = \{a_0, a_1, a_2, a_3\}$ . На рисунке Ud и Ur — это внешние источники опорных напряжений. Ur — для разряда конденсатора и -Ud для заряда. Так как выбираем эталонное напряжение равным -Ud, то нижнее положение Da1.2 подключено ко входу источника -Ud. На рисунке символом «Ue» обозначено гнездо подключения калибрующего цифрового вольтметра для измерения -Ud.

Ниже представлена система уравнений заряда/разряда конденсатора для каждой команды DR COM-порта.

При DR = 0, A = 0111 конденсатор быстро заряжается до напряжения Ucd

$$U_{cd} = U_d \cdot K_d + U_{co} \quad (6)$$

(Uco — смещение нуля ОУ Da3).

При DR=1, A=1011 конденсатор быстро заряжается до напряжения Ucx

$$U_{cx} = U_d \cdot K_d + U_x \cdot K_x + U_{co}. \quad (7)$$

При DR = 2, A = 1101 конденсатор быстро заряжается до напряжения Uce

$$U_{ce} = U_d \cdot K_d + U_e \cdot K_x + U_{co}. \quad (8)$$

При DR = 3, A = 1110 конденсатор разряжается постоянным током до нижнего порога Up петли гистерезиса компаратора Da4.

Разряд C:

$$|\Delta U_c| = U_r \cdot \Delta t / (R_r \cdot C). \quad (9)$$

$\Delta t$  — длительность разряда, измеряемая программой количеством опросов состояния линии CTS. Согласно заряду Uс,  $\Delta t = (T_d, T_e, T_x)$ ;  $|\Delta U_c|$  — величина разряда равная Uс (заряд) — Up.

Из уравнений (6)...(9) находим;

$$(U_{cd} - U_p) / T_d = U_r / (R_r \cdot C); \quad (10)$$

$$(U_{cx} - U_p) / T_x = U_r / (R_r \cdot C); \quad (11)$$

$$(U_{ce} - U_p) / T_e = U_r / (R_r \cdot C). \quad (12)$$

Из системы уравнений (6)...(12) находим для Ue = Ud

$$U_x = -|U_d| \cdot (T_x - T_d) / (T_e - T_d). \quad (5a)$$

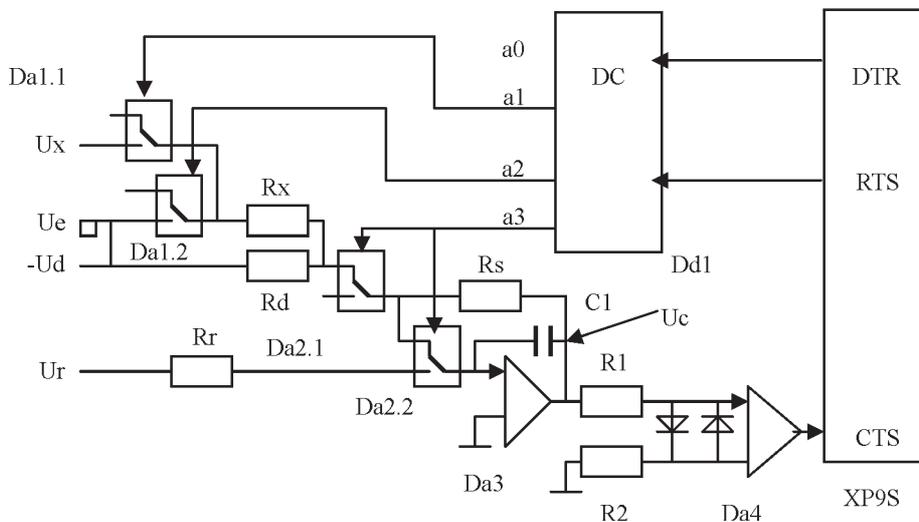


Рис. 2. Принципиальная схема интерфейса АЦП с линейным разрядом конденсатора

Имеем такое же замечательное выражение, что и формула (5).

Заметим, что отношения  $U_e / (N_e - N_d)$  или  $U_d / (T_e - T_d)$  есть по смыслу реальный шаг квантования  $H$ .

Абсолютная погрешность  $\theta(\text{АЦП})$  для  $U_x$ , вычисленная по формуле (5), будет определяться погрешностью цифрового вольтметра  $\theta(\text{ЦВ})$ , использованного для измерения  $U_e$  или  $U_d$ .

$$\theta(\text{АЦП}) = \theta(\text{ЦВ}) + H,$$

где  $H = U_d / (N_e - N_d)$ .

Малая погрешность измерения  $U_x$  достигается предварительным измерением  $U_d$ , т. е. фактически текущей калибровкой модуля АЦП интерфейса.

Так как изменение параметров модуля АЦП от времени эксплуатации, температуры, напряжений питания и других условий медленное, то

калибровку, т. е. измерение  $U_d$ , можно не производить перед каждым измерением  $U_x$ . Достаточно в начале работы один раз измерить  $U_d$ , ввести эти данные в программу. И затем некоторое время измерять только  $N_x$ , вычисляя  $U_x$  по формуле (5), полагая величины  $U_d$ ,  $N_d$ ,  $N_e$  временными константами.

Разумеется, в особо ответственных случаях измерений программа может производить калибровку автоматически для каждого измерения  $U_x$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гелль Патрик* Как превратить персональный компьютер в измерительный комплекс: пер. с фр. / Патрик Гелль. — М. : ДМК, 1999. — 140 с.
2. *Калинка Б.* АЦП на СОМ-порте ПК / Б. Калинка // Electronics. — 2001. № 3. С. 22—25.