

В. А. АЛЕКСЕЕВ, А. Н. КАСПЕРОВИЧ, Н. В. ЛИТВИНОВ

(Новосибирск)

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ
АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
С УСТРОЙСТВОМ ФИКСАЦИИ УРОВНЯ
ИЗМЕРЯЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

В работе рассмотрены причины возникновения динамических составляющих погрешности устройства фиксации, связи между его параметрами, погрешностью преобразования и предельной частотой измеряемого напряжения синусоидальной формы. Выявлены минимально достижимые погрешности устройства фиксации в зависимости от параметров используемого в нем ключа. Определен выигрыш в предельной частоте измеряемого напряжения при использовании устройства фиксации.

При измерении изменяющихся величин аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) имеет место динамическая ошибка [1—3]. Максимальное значение этой ошибки в первом приближении можно оценивать следующим выражением [3]:

$$\delta_{\text{пр}} \leq U'_x(t) T_{\text{и}}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{пр}}$ — динамическая ошибка АЦП;
 $U'_x(t)$ — скорость изменения измеряемого напряжения;
 $T_{\text{и}}$ — время одного измерения.

Исходя из условия (1), можно определить максимальную частоту входного напряжения синусоидальной формы, при измерении которого динамическая погрешность не превышает заданного значения. При этом амплитуда входной величины принимается равной половине диапазона измерения B :

$$f_0 \leq \frac{\delta_{\text{пр}}}{\pi B T_{\text{и}}}. \quad (2)$$

Для уменьшения погрешности измерения при больших скоростях изменения измеряемой величины АЦП используются совместно с устройством фиксации уровня измеряемой величины на время измерения. Однако их применение ограничивается тем, что они вносят дополнительные погрешности как статические, так и динамические. В данной работе исследуется динамическая составляющая дополнительной погрешности и отыскивается связь между характеристиками измеряемого напряжения синусоидальной формы и параметрами преобразователя.

Обычно устройство фиксации уровня состоит из ключа и запоминающего конденсатора. Эквивалентная схема такого устройства представлена на рис. 1*. На рис. 2 показана форма входного и выходного

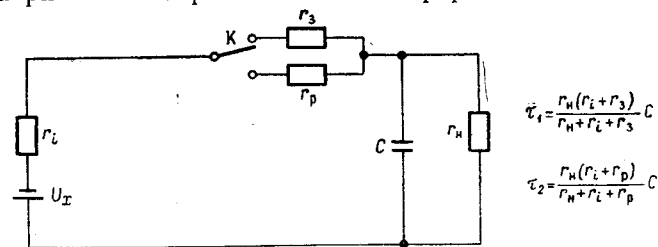


Рис. 1. Эквивалентная схема устройства фиксации:
 U_x — фиксируемое напряжение; r_i — сопротивление источника; r_3 — сопротивление ключа в состоянии «замкнуто»; r_p — сопротивление ключа в состоянии «разомкнуто»; C — фиксирующий конденсатор; r_n — входное сопротивление АЦП.

напряжений устройства фиксации. Работу устройства фиксации можно разделить на четыре последовательных во времени этапа, длительность которых соответственно равна T_1, T_2, T_3, T_4 . I этап — процесс перехода ключа в состояние «замкнуто». II этап — процесс заряда конденсатора напряжением $U_x \frac{r_n}{r_n + r_i + r_3}$ с малой постоянной времени τ_1 . III этап —

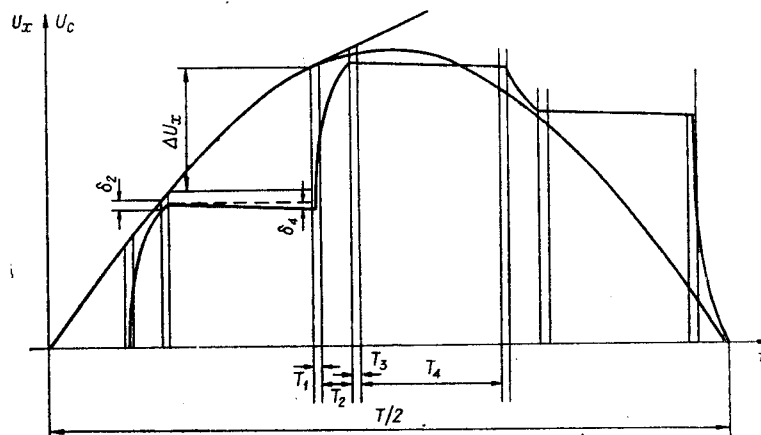


Рис. 2. Форма входного и выходного напряжений устройства фиксации.

процесс перехода ключа в состояние «разомкнуто». И, наконец, IV этап — процесс разряда конденсатора с большой постоянной времени напряжением $U_x \frac{r_n}{r_n + r_i + r_p}$, в течение которого АЦП производит измерение «зафиксированного» напряжения.

Будем относить результат измерения к моменту окончания процесса заряда. Это даст возможность не учитывать задержку в выдаче результата измерения на время измерения, что иногда трактуется как появление фазовой ошибки [4].

* Здесь и ниже не учитывается влияние на работу устройства фиксации обратного тока ключа и входного тока каскада, стоящего за устройством фиксации.

Динамическая погрешность устройства фиксации имеет ряд составляющих. На II этапе возникает погрешность недозаряда δ_2 . (Изменение длительности I этапа T_1 лишь несколько изменяет эту погрешность). Погрешность δ_3 возникает из-за неопределенности момента окончания процесса заряда. Эта погрешность, называемая апертурной, анализируется в [5] и здесь не рассматривается. На IV этапе возникает погрешность δ_4 , вызываемая изменением «зафиксированного» напряжения.

Пренебрегая апертурной погрешностью, можно считать, что максимальная погрешность измерения АЦП с устройством фиксации записывается в виде

$$\delta_{\text{пр}} = \delta_2 + \delta_4. \quad (3)$$

Как и раньше, если $\delta_4 < \delta_{\text{диск}}$, то в (3) δ_4 необходимо заменить $\delta_{\text{диск}}$.

Рассмотрим подробнее составляющую динамической погрешности δ_2 для входного напряжения синусоидальной формы. Так как продолжительность времени заряда T_2 обычно много меньше периода измеряемого напряжения T , то действующее при заряде напряжение можно записать в следующем виде

$$U_x(t^*) = \Delta U_x(t) 1(t^*) + U_x'(t) t^*, \quad (4)$$

где $\Delta U_x(t)$ — изменение измеряемого напряжения от момента конца предыдущего процесса заряда до начала следующего;
 t^* — текущее значение времени заряда; $0 < t^* \leq T_2$.

Нетрудно показать, что напряжение на конденсаторе $U_c(t^*)$ в момент окончания заряда выражается

$$U_c(T_2) = \Delta U_x(t) (1 - e^{-\frac{T_2}{\tau_1}}) + U_x'(t) \tau_2 - U_x'(t) \tau_1 (1 - e^{-\frac{T_2}{\tau_1}}),$$

а ошибка δ_2 равна

$$\delta_2 = U_x(T_2) - U_c(T_2) = \Delta U_x(t) e^{-\frac{T_2}{\tau_1}} + U_x'(t) \tau_1 (1 - e^{-\frac{T_2}{\tau_1}}). \quad (5)$$

Значение $\Delta U_x(t)$ и $U_x'(t)$ для произвольного момента времени можно выразить через диапазон измеряемого напряжения B , интервал времени T_4 и частоту измеряемого напряжения:

$$\Delta U_x(t) = B \sin \frac{\omega T_4}{2} \cos \left(\omega t - \frac{\omega T_4}{2} \right);$$

$$U_x'(t) = \frac{B}{2} \omega \cos \omega t.$$

Тогда, заменив в (4) $\Delta U_x(t)$ и $U_x'(t)$ их значениями, после несложных преобразований ошибку δ_2 можно представить следующим образом:

$$\delta_2 = B \sqrt{\sin^2 \frac{\omega T_4}{2} e^{-2 \frac{T_2}{\tau_1}} + \frac{1}{4} \omega^2 \tau_1^2 (1 - e^{-\frac{T_2}{\tau_1}})^2 + \frac{1}{2} \omega \tau_1 e^{-\frac{T_2}{\tau_1}} (1 - e^{-\frac{T_2}{\tau_1}}) \sin \omega T_4 \sin(\omega t + \varphi)}, \quad (6)$$

где φ — некоторая фаза.

Формула (6) показывает, что погрешность δ_2 меняется по синусоидальному закону. При большом количестве отсчетов на период синусоиды, т. е. при выполнении условия $2\pi \frac{T_4}{T} \ll 1$, можно получить следующее выражение для максимальной погрешности:

$$\delta_{2m} \approx \frac{B}{2} \omega [T_4 e^{-\frac{T_2}{\tau_1}} + \tau_1 (1 - e^{-\frac{T_2}{\tau_1}})]. \quad (7)$$

Отсюда можно определить зависимость между предельной частотой f_Φ входного напряжения при измерении АЦП с устройством фиксации и погрешностью недозаряда δ_2 :

$$f_\Phi = \frac{\delta_{2m}}{\pi B [T_4 e^{-\frac{T_2}{\tau_1}} + \tau_1 (1 - e^{-\frac{T_2}{\tau_1}})]}. \quad (8)$$

Используя формулы (3) и (8), можно получить зависимость, связывающую предельную частоту входного напряжения, полную погрешность измерения $\delta_{пр}$ и шаг дискретности $\delta_{диск}$, для тех случаев, когда параметры устройства фиксации выбраны такими, что $\delta_{диск} \approx \delta_4$:

$$f_\Phi = \frac{\delta_{пр} - \delta_{диск}}{\pi B [T_4 e^{-\frac{T_2}{\tau_1}} + \tau_1 (1 - e^{-\frac{T_2}{\tau_1}})]}. \quad (9)$$

Чтобы сравнить частотные диапазоны измеряемых напряжений для преобразователей с устройством фиксации и без него, возьмем отношение предельных частот (2) и (9) для случаев, когда погрешности преобразования имеют одинаковые значения:

$$\frac{f_\Phi}{f_0} = \left(1 - \frac{\delta_{диск}}{\delta_{пр}}\right) \frac{1}{(1 - k) e^{-\frac{T_2}{\tau_1}} + k}, \quad (10)$$

где $k = \frac{\tau_1}{T_4}$.

Формула (10) показывает, что при неблагоприятном выборе k и T_2 можно получить не расширение, а сужение частотного диапазона.

На основании анализа, аналогичного предыдущему, можно показать, что, если выполняется условие $T_4 \gg \tau_2$, погрешность δ_4 может быть оценена выражением

$$\delta_4 \ll \frac{B}{2} \frac{T_4}{\tau_2}.$$

Значение погрешности δ_4 разумно выбрать равным шагу дискретности $\delta_{диск}$. Отсюда

$$T_4 \approx 2\tau_2 \frac{\delta_{диск}}{B}. \quad (11)$$

Пользуясь эквивалентной схемой рис. 1, можно записать, что при $r_i \ll r_p$, $r_i \ll r_n$, $r_3 \ll r_n$, $r_3 \ll r_p$

$$\tau_1 = \tau_2 \frac{r_i + r_3}{r_p} \frac{r_p + r_n}{r_n}. \quad (12)$$

Таким образом, задаваясь временем измерения и шагом дискретности, можно определить требуемое значение постоянной времени τ_2 .

В свою очередь, зная характеристики ключа r_3 и r_p , можно найти значение постоянной времени τ_1 , а зная τ_1 и допустимую погрешность недозаряда, можно из выражения (7) определить и минимально необходимое время заряда T_2 . Однако при любом значении T_2 погрешность δ_{2m} не может быть меньше

$$\delta_{2m} \geq \frac{B^2}{4} 2\pi \frac{T_4}{T} \frac{1}{\delta_{\text{диск}}} \frac{r_i + r_3}{r_p} \frac{r_p + r_n}{r_n}. \quad (13)$$

Аналогично можно оценить наибольший выигрыш в предельной частоте при использовании АЦП с фиксатором уровня по сравнению с АЦП без фиксатора. Будем считать, что $(1 - k) e^{-\frac{T_2}{\tau_1}} \ll k$. Тогда, используя (11) и (12), можно показать, что отношение $\frac{f_\Phi}{f_0}$ будет определяться выражением

$$\frac{f_\Phi}{f_0} \leq \left(1 - \frac{\delta_{\text{диск}}}{\delta_{\text{пр}}}\right) \frac{2\delta_{\text{диск}}}{B} \frac{r_p}{r_i + r_3} \frac{r_n}{r_p + r_n}. \quad (14)$$

Это отношение имеет максимум при $\delta_{\text{диск}} = \frac{1}{2} \delta_{\text{пр}}$, и поэтому

$$\frac{f_\Phi}{f_0} \leq \frac{\delta_{\text{пр}}}{2B} \frac{r_p}{r_i + r_3} \frac{r_n}{r_p + r_n}. \quad (15)$$

Как видно из (13) и (15), для устройств фиксации весьма важным является отношение сопротивлений ключа в состояниях «замкнуто» и «разомкнуто». Так, полагая, что это отношение имеет значение порядка 10^4 , при $\frac{\delta_{\text{пр}}}{2B}$ порядка 0,1% выигрыш в предельной частоте входного напряжения не будет превышать 10.

Полученные формулы позволяют связать параметры АЦП и устройства фиксации с параметрами измеряемого напряжения синусоидальной формы.

В заключение можно отметить, что подобный подход к анализу динамической ошибки устройства фиксации может быть использован и при измерении напряжения произвольной формы. Для этого необходимо в формуле (5) $\Delta U_x(t)$ и $\dot{U}_x(t)$ заменить их выражениями для исследуемого вида сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Хлистунов. Некоторые вопросы теории цифровых приборов и аналого-цифровых преобразователей.— Труды ВНИИЭП, вып. 3. М., ЦИТИЭлектропром, 1961.
2. А. Н. Касперович, Н. В. Литвинов. К анализу динамических ошибок, возникающих при измерениях цифровыми измерительными приборами поразрядного уравнивания.— Автометрия, 1966, № 1.
3. Б. Г. Доступов. Некоторые вопросы теории точности преобразователей.— Комбинированные вычислительные машины. М., Изд-во АН СССР, 1962.
4. И. Л. Медведев. Методы увеличения быстродействия «весового» преобразователя путем применения элементов дискретной техники.— Приборы и средства автоматизации, 1965, вып. 8.
5. P. Varr. Influence of Aperture-time and Conversion Rate on the Sampling Accuracy of Analog Digital Converters.— Data Systems Engineering, 1964, v. 19, № 5.

Поступила в редакцию
31 марта 1966 г.