

Б. А. ЗАХАРОВ, Б. А. МЕНДЕЛЕВ

(Москва)

О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ СЛАБЫХ ТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

При измерении слабых постоянных токов (менее 10^{-8} А) существенное значение имеет сопротивление тракта между датчиком и усилителем тока [1]. Это сопротивление обычно составляет сотни и более мегом, и поэтому обеспечить его стабильность весьма затруднительно. Нестабильность сопротивления входного тракта может привести к погрешности измерения, которая в этом случае носит случайный характер. Для устранения погрешности обычно снижают входное сопротивление усилителя с помощью параллельной отрицательной обратной связи (ОС); введение такой ОС при заданном коэффициенте передачи усилителя требует, однако, увеличения числа каскадов, что усложняет усилитель. Ниже рассматривается возможность повышения точности измерения слабых токов без увеличения числа каскадов — посредством включения на дополнительный вход усилителя цепи положительной обратной связи (можно показать, что включение такой ОС в суммирующую точку усилителя [2] не дает аналогичного результата).

Рассмотрим усилитель с отрицательной ОС (получил наибольшее распространение при усилении слабых токов), на дополнительный вход которого включена цепь положительной ОС (рис. 1). Через $R_{вх}$ обозначено сопротивление входного тракта, представляющее собой входное сопротивление усилителя $R_{вх}^0$, зашунтированное сопротивлением изоляции (или утечки) входного тракта R_y ($R_{вх} = R_{вх}^0 R_y / (R_{вх}^0 + R_y)$). Сопротивление R_1 на схеме рис. 1 в случае усиления тока следует полагать бесконечно большим. Для схемы на рис. 1 справедлива следующая система уравнений:

$$\begin{cases} U_{вх} = iR_1 + \varepsilon; \\ \varepsilon = i_2 R_2 + \beta_1 U_{вых}; \\ U_{вых} = -K\varepsilon + K\beta_2 U_{вых} + U_{др}; \\ i = i_1 + i_2; \\ i = \varepsilon / R_{вх}, \end{cases} \quad (1)$$

где $U_{др}$ — дрейф нуля выходного напряжения. Решая эту систему

и вводя обозначение $A = 1 + R_2/R_1 + R_2/R_{вх}$, находим

$$U_{вых} = - \frac{K}{1 - K\beta_2} \frac{R_2/R_1}{A + K\beta_1/(1 - K\beta_2)} U_{вх} + \frac{1}{1 - K\beta_2} \frac{A}{A + K\beta_1/(1 - K\beta_2)} U_{др}. \quad (2)$$

Максимальное значение β_2 (соответствует границе устойчивости усилителя), при котором справедлива формула (2):

$$\beta_2^{\max} = 1/K + \beta_1/(1 + R_2/R_1 + R_2/R_{вх}). \quad (2a)$$

Рассмотрим влияние положительной ОС на точность измерений. Пользуясь формулой (2), определим погрешности измерения, которые имеют на практике наибольшее значение: $\Delta_{др}$ — ошибку, связанную с дрейфом нуля усилителя; $\Delta_{R_{вх}}$ — ошибку, связанную с изменением

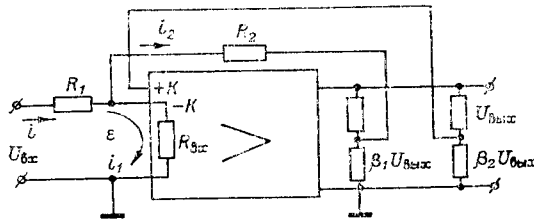


Рис. 1.

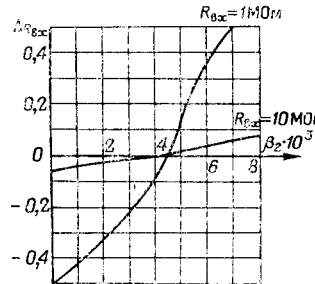


Рис. 2.

входного сопротивления от бесконечно большого значения до некоторой ограниченной величины $R_{вх}$; $\Delta_{\beta K}$ — ошибку, вызванную нестабильностью коэффициента усиления.

Из выражения (2) получаем, что

$$\Delta_{др} = \frac{U_{вх} - U_{вх}/U_{др=0}}{U_{вх}/U_{др=0}} = \frac{U_{др}/K}{U_{вх}/R_1} \frac{A}{R_2}, \quad (3)$$

т. е. относительная погрешность, связанная с дрейфом нуля усилителя, при введении рассматриваемой ОС не возрастает.

Погрешность измерения, связанная с ограниченностью (и нестабильностью) входного сопротивления усилителя,

$$\Delta_{R_{вх}} = \frac{U_{вх} - U_{вх}/R_{вх \rightarrow \infty}}{U_{вх}/R_{вх \rightarrow \infty}}$$

при отсутствии положительной ОС ($\beta_2 = 0$) определяется выражением

$$\Delta_{R_{вх}} = -R_2/R_{вх} (A + K\beta_1), \quad (4)$$

а при наличии положительной ОС формулой

$$\Delta_{R_{вх}} = -R_2/R_{вх} [A + K\beta_1/(1 - K\beta_2)]. \quad (5)$$

Сравнение формул (4) и (5) показывает, что введение положительной ОС уменьшает ошибку $\Delta_{R_{вх}}$: $\Delta_{R_{вх}} \rightarrow 0$, если $\beta_2 \rightarrow 1/K$. Это иллюстрируется экспериментальными данными рис. 2 (приводимые результаты были получены при использовании усилителя, в котором

$$R_1 = 470 \text{ МОм}, R_2 = 10 \text{ МОм}, \beta_1 = 8 \cdot 10^{-2}, K \approx 2 \cdot 10^2.$$

Уменьшение влияния неустойчивости сопротивления входного тракта при введении положительной ОС можно пояснить, в частности, следующим образом. Очевидно, что если собственное входное сопротивление усилителя $R_{вх}^0$ значительно меньше сопротивления изоляции входного тракта R_y , то неустойчивость последнего не оказывает влияния на работу усилителя. Это и имеет место при введении положительной ОС. Нетрудно показать, что эквивалентное входное сопротивление усилителя $R_{вх}^{эКВ} = \varepsilon/i$ при введении ОС определяется соотношением

$$R_{вх}^{эКВ} = \frac{R_{вх}^0 R_2 / [1 + K\beta_1 / (1 - K\beta_2)]}{R_{вх}^0 + R_2 / [1 + K\beta_1 / (1 - K\beta_2)]}.$$

Отсюда следует, что если $\beta_2 \rightarrow 1/K$, то $R_{вх}^{эКВ} \rightarrow 0$.

При введении положительной ОС возрастает погрешность $\Delta_{\delta K}$, связанная с неустойчивостью коэффициента усиления K . Из формулы (2) находим, что

$$\Delta_{\delta K} = \frac{U_{вых} - U_{вых}/\delta K=0}{U_{вых}/\delta K=0} = A \frac{\delta K/K}{A[1 - (1 + \delta K/K)K\beta_2] + (1 + \delta K/K)K\beta_1}, \quad (6)$$

тогда как при отсутствии положительной ОС

$$\Delta_{\delta K} = A \frac{\delta K/K}{A + (1 + \delta K/K)K\beta_1}. \quad (7)$$

Отметим, что если для уменьшения $\Delta_{R_{вх}}$ ввести дополнительный каскад с коэффициентом усиления $K_d = 1/(1 - K\beta_2)$ (при охвате отрицательной ОС всего усилителя), то

$$\Delta_{\delta K} = A \frac{(2 + \delta K/K)\delta K/K}{A + (1 + \delta K/K)^2 \beta_1 K K_d}, \quad (8)$$

т. е. в этом случае неустойчивость K проявляется слабее.

На основании приведенных выше формул (4)–(8) можно сделать вывод, что использование рассмотренной положительной ОС целесообразно в тех случаях, когда основная погрешность усилителя обусловлена неустойчивостью сопротивления входных цепей. На практике такие случаи встречаются наиболее часто.

При измерении слабых токов большое значение, кроме стабильности усилителя, имеет также его быстродействие. Определим влияние положительной ОС на быстродействие усилителя с учетом емкости входного тракта C (на схеме рис. 1 может рассматриваться включенной параллельно резистору $R_{вх}$). Добавляя в правую часть предпоследнего соотношения исходной системы (1) выражение для емкостного тока $i_C = Cde/dt$, получаем следующее дифференциальное уравнение, связывающее напряжение на входе и выходе усилителя (при $U_{др} = 0$):

$$\frac{dU_{вых}}{dt} + \frac{1}{\tau} U_{вых} = -\frac{1}{R_1 C} \frac{K}{1 - K\beta_2} U_{вх}, \quad (9)$$

где

$$\tau = CR_2 / [A + K\beta_1 / (1 - K\beta_2)].$$

Как видно из формулы (9), введение положительной ОС позволяет снизить инерционность усилителя (при $\beta_2 = 0$ постоянная времени τ больше, чем при $\beta_2 \rightarrow 1/\tau$).

Введение положительной ОС несколько ухудшает нагрузочную характеристику усилителя, однако это обстоятельство в практически интересных случаях обычно оказывается несущественным.

В заключение отметим, что при расчете усилителя тока в приведенных общих соотношениях следует положить $R_1 \rightarrow \infty$, $U_{вх}/R_1 = i_{вх}$, где $i_{вх}$ — входной измеряемый ток.

Приведенные в статье результаты позволяют сделать вывод, что при измерении слабых постоянных токов введение положительной обратной связи на дополнительный вход усилителя позволяет существенно повысить его стабильность и снизить инерционность.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Бонч-Бруевич. Применение электронных ламп в экспериментальной физике. М., Гостехиздат, 1954.
2. Б. А. Захаров, Б. А. Менделев, Б. В. Юданов. К анализу схем безламповых емкостных интеграторов.— Автоматика и телемеханика, 1967, № 3.

*Поступила в редакцию
2 декабря 1970 г.,
окончательный вариант —
11 марта 1971 г.*
