

## Источники постоянного тока на операционных усилителях

В. Ф. БОРИСОВ, С. П. ДАШУК, О. А. КОМШИЛОВ, Д. Н. ЮРКИН

Приведены результаты анализа схем источников постоянного тока на операционных усилителях с точки зрения их внутреннего сопротивления и погрешности формирования выходного тока.

The results of the analysis of the circuits of a constant-current sources on operational amplifiers from the point of view of an error of formation of an output current and value of internal resistance are given.

В источниках постоянного тока (ИТ) для проверки электрометрической аппаратуры, как правило, применяют два метода формирования тока с заданными метрологическими характеристиками: резистивный и метод интегратора-дифференциатора (ИД) [1]. Для токов не менее  $10^{-8}$  А, как правило, используют резистивный метод, а для меньших токов — метод ИД.

Указанное деление вызвано тем, что минимальная сила тока для резистивного метода в основном ограничена максимальным сопротивлением токозадающего точного резистора. Так, для отечественной промышленности это резистор типа С5-50 —  $500 \text{ МОм} \pm 0,2\%$  и температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), равным  $\pm 25 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ; параметры некоторых зарубежных высокоомных прецизионных резисторов приведены в табл. 1. Кроме того, формирование выходного тока заданной силы ограничено напряжением опорного источника, которое по ряду конструктивных и технических причин находится в диапазоне 0,1—100 В. В свою очередь, метод ИД требует сравнительно сложного устройства как с конструктивной, так и со схемотехнической точек зрения. Поэтому представляет практический интерес реализация ИТ на операционных усилителях (ОУ), что позволяет устранить перечисленные выше противоречия, а именно: совместить требования высокого выходного сопротивления ИТ и относительно низкоомных резисторов в схеме.

В табл. 2 приведены результаты анализа некоторых схем ИТ на операционных усилителях [2—6], где

$$\delta_{I_1} = \frac{I_H(\delta) - I_H(0)}{I_H(0)} = \frac{1}{I_H(0)} \sum_j \left| \frac{\partial I_H}{\partial R_j} \right| \Delta R_j \quad \text{— относительная погрешность установки тока; } I_H(\delta) \text{ — ток в нагрузке для}$$

случая, когда отклонения значений сопротивлений резисторов рассматриваемой схемы  $\delta_{R_j} = \frac{\Delta R_j}{R_j} \neq 0$ ;  $R_j$  — номинальное значение сопротивления  $j$ -го резистора и  $\Delta R_j$  — отклонение от его номинального значения;  $I_H(0) \equiv I_H$  при  $\delta_{R_j} = 0$ ;

$$R_i = \left| R_H / \delta_{I_2} \right| \quad \text{— внутреннее сопротивление источника тока; } R_H \text{ — сопротивление нагрузки; } \delta_{I_2} = \frac{I_{H1} - I_{H2}}{I_{H2}} =$$

$$= \delta_{I_1} - \delta_{I_1} \Big|_{R_H=0}; \quad I_{H1} \text{ — ток в нагрузке при } R_H \neq 0; \quad I_{H2} \text{ — ток в нагрузке при } R_H = 0.$$

Приведенные в табл. 2 соотношения были получены без учета влияния на выходные характеристики ИТ параметров ОУ и внутреннего сопротивления источника  $U_0$ . Поэтому для проверки приемлемости принятых допущений и возможности практического осуществления ИТ с характеристиками  $I_H = 10^{-8}, 10^{-7}, \dots, 10^{-3}$  А и  $R_j = 10^{10}, 10^9, \dots, 10^5$  Ом (на соответствующих поддиапазонах) был разработан и изготовлен макет второй схемы ИТ (см. табл. 2). Данная схема содержит минимальное количество радиокомпонентов, обеспечивающих заданные технические требования. В схеме использованы: ОУ1, ОУ2 — 140УД24;  $R_1 = R_2 = 80 \text{ кОм} \pm 0,03\%$ ;  $R_3 = R_4 = 50 \text{ кОм} \pm 0,03\%$ ; сопротивление резисторов  $R_5$  в зависимости от поддиапазонов установки тока указано в табл. 3; все резисторы типа С5-50;  $U_0 = 0,008 \dots 8 \text{ В}$ .

Таблица 1

Параметры некоторых зарубежных прецизионных резисторов

Фирма-изготовитель	Тип резистора	Диапазон сопротивлений, Ом	Допускаемое отклонение, %	ТКС, мкК <sup>-1</sup>	Диапазон температур, °С
CADDOCK	TF 656	$(10,01-125) \cdot 10^6$	$\pm (0,01-1)$	$\pm 5$	$-15 \dots +105$
	TG 1015	$6 \cdot 10^6-10^9$	$\pm 1; (\pm 0,1^*)$	$\pm 25$	$-55 \dots +125$
	MG 815	$10^3-10^{10}$	$\pm (0,1-1)$	$\pm 80$	$-15 \dots +105$
OHMCRAFT	HVRS	$200 \cdot 10^6$	$\pm 0,1$	$\pm 25$	$0-125$
	HVRS	$500 \cdot 10^6$	$\pm 0,1$	$\pm 25$	$0-125$
	HVRS	$1 \cdot 10^9$	$\pm 0,5$	$\pm 25$	$0-125$

\* Резисторы с допуском  $\pm 0,1\%$  изготавливают только по заказу.

## Анализ некоторых схем ИТ на операционных усилителях

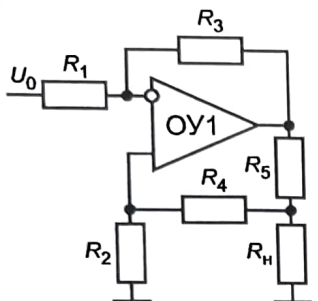
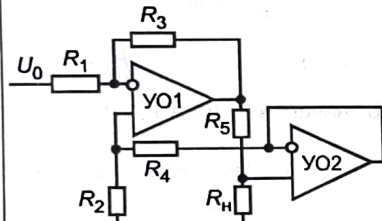
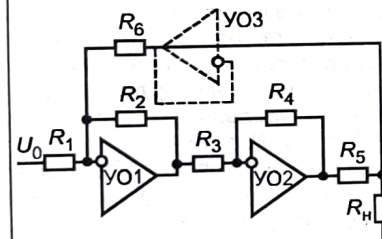
Схема источника тока (ИТ)	Выражение для $I_H$		$\delta I_1 = \left  \frac{I_H(\delta) - I_H(0)}{I_H(0)} \right $	$R_i = \left  \frac{R_H}{\delta I_1} \right $
	общее	частное		
<p>1.</p>  <p>[4, с. 70]</p>	$I_H = -U_0 R_3 (R_2 + R_4) \times [R_1 R_5 (R_2 + R_4) + R_H \times (R_1 R_4 + R_1 R_5 - R_2 R_3)]^{-1}$	$I_H = -U_0 \frac{R_3}{R_1 R_5}$ <p>при <math>R_2 R_3 = R_1 (R_4 + R_5)</math></p>	$\delta I_1 = \delta R_1 (1 + \alpha \beta) + \delta R_2 \alpha \beta + \delta R_3 (1 + \alpha \beta) + \delta R_4 \alpha \beta + \delta R_5 (1 + \alpha),$ <p>где <math>\alpha = \frac{R_H}{R_2 + R_4}</math>; <math>\beta = \frac{R_4}{R_5} + 1</math></p>	$R_i = \frac{R_2 + R_4}{\delta R (1 + 4\beta)},$ <p>где <math>\delta R_1 = \delta R_2 = \delta R_3 = \delta R_4 = \delta R_5 = \delta R</math></p>
<p>2.</p>  <p>[4, с. 72]</p>	$I_H = -U_0 R_3 (R_2 + R_4) \times [R_1 R_5 (R_2 + R_4) + R_H (R_1 R_4 - R_2 R_3)]^{-1}$	$I_H = -U_0 \frac{R_3}{R_1 R_5}$ <p>при <math>R_1 R_4 = R_2 R_3</math></p>	$\delta I_1 = \delta R_1 (1 + \alpha \beta) + \delta R_2 \alpha \beta + \delta R_3 (1 + \alpha \beta) + \delta R_4 \alpha \beta + \delta R_5$ <p>при <math>\alpha = \frac{R_H}{R_2 + R_4}</math>, <math>\beta = \frac{R_4}{R_5}</math></p>	$R_i = \frac{R_2 + R_4}{\delta R 4\beta},$ <p>где <math>\delta R_1 = \delta R_2 = \delta R_3 = \delta R_4 = \delta R_5 = \delta R</math></p>
<p>3.</p>  <p>[3, с. 249; 6, с. 172]</p>	$I_H = U_0 k_1 k_2 R_6 \times [R_5 R_6 + R_H (R_5 + R_6 - k_2 R_2)]^{-1},$ <p>где <math>k_1 = R_2 / R_1</math>; <math>k_2 = R_4 / R_3</math></p>	$I_H = U_0 \frac{k_1 k_2}{R_5}$ <p>при <math>R_2 R_4 = R_3 (R_5 + R_6)</math></p>	$\delta I_1 = \delta R_1 + \delta R_2 \left(1 - \frac{R_H}{Z}\right) + \delta R_3 \left(1 + \frac{R_H}{Z}\right) + \delta R_4 \left(1 - \frac{R_H}{Z}\right) + \delta R_5 \left(1 + \frac{R_H}{R_6}\right) + \delta R_6 \frac{R_H}{R_5},$ <p>где <math>Z = \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}</math></p>	$R_i = \frac{Z}{4\delta R},$ <p>где <math>\delta R_2 = \delta R_3 = \delta R_4 = \delta R_5 = \delta R_6 = \delta R</math></p>
<p>4.</p> <p>Схема 3 + YO3 [5, с. 76]</p>	$I_H = U_0 k_1 k_2 R_6 \times [R_5 R_6 + R_H (R_6 - k_2 R_2)]^{-1},$ <p>где <math>k_1 = R_2 / R_1</math>; <math>k_2 = R_4 / R_3</math></p>	$I_H = U_0 \frac{k_1 k_2}{R_5}$ <p>при <math>R_2 R_4 = R_3 R_6</math>, <math>R_6 = k_2 R_2</math></p>	$\delta I_1 = \delta R_1 + \delta R_2 \left(1 - \frac{R_H}{R_5}\right) + \delta R_3 \left(1 + \frac{R_H}{R_5}\right) + \delta R_4 \left(1 - \frac{R_H}{R_5}\right) + \delta R_5 + \delta R_6 \frac{R_H}{R_5}$	$R_i = \frac{R_5}{4\delta R},$ <p>где <math>\delta R_2 = \delta R_3 = \delta R_4 = \delta R_5 = \delta R_6 = \delta R</math></p>

Схема источника тока (ИТ)	Выражение для $I_H$		$\delta I_1 = \left  \frac{I_H(\delta) - I_H(0)}{I_H(0)} \right $	$R_i = \left  \frac{R_H}{\delta I_2} \right $
	общее	частное		
<p>5.</p> <p>[4, с. 72]</p>	$I_H = U_0 k_1 R_6 \{R_5 R_6 + R_H \times [(R_5 R_6 / R_3 + R_6) - k_2 R_2]\}^{-1},$ <p>где <math>k_1 = R_2 / R_1</math>; <math>k_2 = R_4 / R_3</math></p>	$I_H = U_0 k_1 / R_5$ <p>при <math>R_2 R_4 = (R_3 + R_5) R_6</math></p>	$\delta I_1 = \delta R_1 + \delta R_2 \left(1 - \frac{R_H}{Z}\right) + \delta R_3 \frac{R_H}{R_5} + \delta R_4 \frac{R_H}{Z} + \delta R_5 \left(1 + \frac{R_H}{R_3}\right) + \delta R_6 \frac{R_H}{Z},$ <p>где <math>Z = \frac{R_3 R_5}{R_3 + R_5}</math></p>	$R_i = \frac{Z}{4\delta R},$ <p>где <math>\delta R_2 = \delta R_3 = \delta R_4 = \delta R_5 = \delta R_6 = \delta R</math></p>
<p>6.</p> <p>Схема 5 + YO3 [3, с. 249]</p>	$I_H = U_0 k_1 R_6 [R_5 R_6 + R_H \times (R_6 - k_2 R_2)],$ <p>где <math>k_1 = R_2 / R_1</math>; <math>k_2 = R_4 / R_3</math></p>	$I_H = U_0 k_1 / R_5$ <p>при <math>R_2 R_4 = R_3 R_6</math></p>	$\delta I_1 = \delta R_1 + \delta R_2 \left(1 - \frac{R_H}{R_5}\right) + \delta R_3 \frac{R_H}{R_5} + \delta R_4 \frac{R_H}{R_5} + \delta R_5 + \delta R_6 \frac{R_H}{R_5}$	$R_i = \frac{R_5}{4\delta R},$ <p>где <math>\delta R_2 = \delta R_3 = \delta R_4 = \delta R_6 = \delta R</math></p>
<p>7.</p> <p>[3, с. 249]</p>	$I_H = U_0 k_2 (1 + k_1) \frac{R_5}{R_6} \times \left[ R_5 + R_H \left(1 + \frac{R_5}{R_6} - k_1 k_2\right) \right]^{-1},$ <p>где <math>k_1 = R_2 / R_6</math>; <math>k_2 = R_4 / R_3</math></p>	$I_H = U_0 \frac{1 + k_2}{R_5}$ <p>при <math>k_1 k_2 = 1 + \frac{R_5}{R_6}</math></p>	$\delta I_1 = \delta k_2 \left[ \frac{k_2}{1 + k_2} - \left(1 + \frac{R_2}{R_6}\right) + \frac{R_H}{Z} \right] + \delta R_2 \left[ \frac{k_2}{1 + k_2} \frac{R_2}{R_6} + \frac{R_H}{Z} \right] + \delta R_5 \left[ \frac{k_2}{1 + k_2} \left(1 + \frac{R_2}{R_6}\right) + \frac{R_H}{R_6} \right] + \delta R_6 \left[ \frac{1}{1 + k_2} + \frac{R_H}{R_5} \right];$ <p><math>Z = \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}</math></p>	$R_i = \frac{Z}{3\delta R},$ <p>где <math>\delta k_2 = \delta R_2 = \delta R_5 = \delta R_6 = \delta R</math></p>
<p>8.</p> <p>Схема 7 + YO3</p>	$I_H = U_0 \frac{k_2 (1 + k_1)}{R_5 + R_H (1 - k_1 k_2)},$ <p>где <math>k_1 = R_2 / R_6</math>; <math>k_2 = R_4 / R_3</math></p>	$I_H = U_0 \frac{1 + k_2}{R_5}$ <p>при <math>k_1 k_2 = 1</math></p>	$\delta I_1 = \delta k_2 \left(1 + \frac{R_H}{R_5}\right) + \delta R_2 \left(\frac{1}{1 + k_2} + \frac{R_H}{R_5}\right) + \delta R_5 + \delta R_6 \left(\frac{1}{1 + k_2} + \frac{R_H}{R_5}\right)$	$R_i = \frac{R_5}{3\delta R},$ <p>где <math>\delta k_2 = \delta R_2 = \delta R_6 = \delta R</math></p>

Внутреннее сопротивление ИТ вычисляли по схеме рис. 1, где в качестве вольтметра использовали универсальный цифровой вольтметр В7-34 с диапазоном измерения 1 мкВ — 1000 В;  $R_{вк} = 2 \cdot 10^{10}$  Ом на пределах 0,1 и 1 В; сопротивления  $R_{61}$  и  $R_{62}$  для соответствующих поддиапазонов приведены в табл. 3. Выходное сопротивление ИТ вычисляли по формуле

$$R_i = \left| \frac{R_{61}}{\Delta U / U_1} \right|,$$

где  $\Delta U = U_1 - U_2$ ;  $U_1, U_2$  — показания вольтметра соответственно при замкнутом и разомкнутом ключе.

Таблица 3

## Экспериментальные значения выходных сопротивлений ИТ

Поддиапазон выходного тока, А	$R_3$ , Ом	$R_{61}$ , Ом	$R_{62}$ , Ом	$R_1$ , Ом
$10^{-8}$	$2 \cdot 10^8$	$3,6 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^{10}$
$10^{-7}$	$2 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^9$
$10^{-6}$	$2 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^8$
$10^{-5}$	$2 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^7$
$10^{-4}$	$2 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^6$
$10^{-3}$	$2 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^6$

Результаты испытания макета показали, что максимальная относительная погрешность установки выходного тока в указанных выше поддиапазонах составляет не более 0,2 %, а экспериментальные значения выходных сопротивлений ИТ для допускаемых отклонений применяемых резисторов приведены в табл. 3.

Кроме того, с целью проверки зависимости выходного сопротивления схемы ИТ от  $\delta R$  одного из резисторов  $R_1$ — $R_4$  (см. табл. 2) сопротивлению резистора  $R_1$  были даны приращения  $\Delta R$  и далее определены соответствующие значения  $R_1$ , при этом  $\delta R_2 = \delta R_3 = \delta R_4 = 0,0001$ . Результаты этих испытаний приведены на рис. 2. Из анализа данных результатов следует, что соответствующим подбором резисторов схемы в пределах чувствительности применяемого вольтметра, даже при использовании сравнительно низкоомных резисторов, можно получить высокое выходное сопротивление порядка  $10^9$ — $10^{10}$  Ом. При этом температурная нестабильность схемы составляет около 1 мкВ/К.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рождественская Т. Б., Антонова Д. И., Жутовский В. Л. Аппаратура для точного измерения больших сопротивлений, малых токов и методы ее проверки. — М.: Изд-во стандартов, 1973.

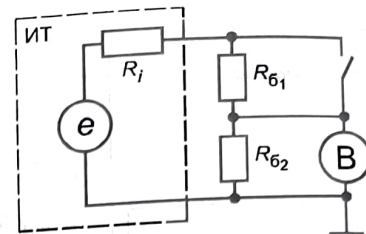


Рис. 1. Схема определения внутреннего сопротивления источника тока ИТ

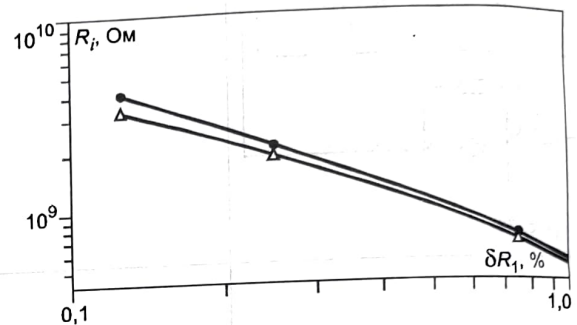


Рис. 2. Зависимость внутреннего сопротивления ИТ от отклонения сопротивления резистора:

• — расчет;  $\Delta$  — эксперимент

2. Алексенко А. Г., Коломбет Е. А., Стародуб Г. И. Применение прецизионных аналоговых микросхем. — М.: Радио и связь, 1985.

3. Грэм Дж., Тоби Дж., Хьюстон Л. Проектирование и применение ОУ / Пер. с англ. — М.: Мир, 1974.

4. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. — Л.: Энергоатомиздат, 1988.

5. Стабильный источник тока // Электроника. — 1979. — Т. 17. — С. 76.

6. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника / Пер. с англ. — М.: Мир, 1982.

Дата одобрения 19.10.2000 г.