

УДК 621.317

АНАЛИЗ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОК-НАПРЯЖЕНИЕ С НУЛЕВЫМ ВХОДНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

В. А. КАРПОВ, О. М. РОСТОКИНА, А. В. КАРПОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Для измерения тока широко распространенной практикой является использование шунтов [1]–[3]. Однако недостатком такого способа измерения является конечное сопротивление шунта, вносящее в схему искажения, особенно при измерении малых токов. Альтернативой данному способу измерения тока является преобразователь ток-напряжение с использованием операционного усилителя (ОУ) с параллельной отрицательной обратной связью [3]–[5]. При этом падение напряжения на входе преобразователя определяется только напряжением смещения 10–1000 мкВ. Однако такой способ возможен только для измерения тока в заземленных ветвях измеряемой схемы. То есть при измерении уровень синфазной составляющей преобразователя ток-напряжение должен быть равен нулю. Известны схемы преобразователей ток-напряжение, лишенные отмеченных недостатков, т. е. обладающие нулевым входным напряжением и конечной синфазной составляющей [6], [7]. Данные схемы преобразователей представлены соответственно на рис. 1, а и б.

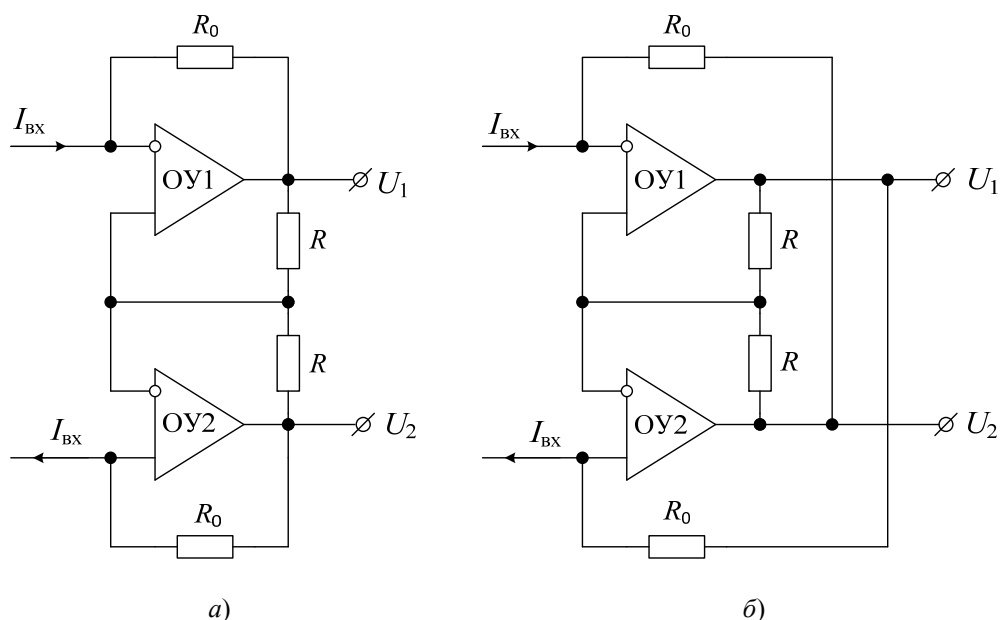


Рис. 1. Преобразователи ток-напряжение с нулевым входным напряжением:
а – [6]; б – [7]

Выходное напряжение схем, пропорциональное входному току, находится в виде $U_1 - U_2 = \Delta U$. В работах показано, что $\Delta U = 2I_{\text{вх}} R_0$ при соотношениях резисторов, показанных на схемах. При этом втекающий ток равен вытекающему, а падение на-

пряжения на входе преобразователя не превышает суммы напряжений смещения ОУ1 и ОУ2. Однако в упомянутых работах [6], [7] отсутствует вывод расчетных соотношений и не приведен анализ влияния погрешностей ОУ1 и ОУ2 на результат преобразования.

Целью работы является проведение анализа работы отмеченных схем с учетом несовершенств используемых элементов: напряжения смещения и входных токов операционных усилителей.

Постановка задачи

Анализ работы проведем для обобщенной схемы, представленной на рис. 2. Она отличается от схем, представленных на рис. 1, наличием входных напряжений $U_{\text{вх1}}$, $U_{\text{вх2}}$ и входных резисторов R_1 и R_2 . Будем полагать, что ОУ1 и ОУ2 идеальные.

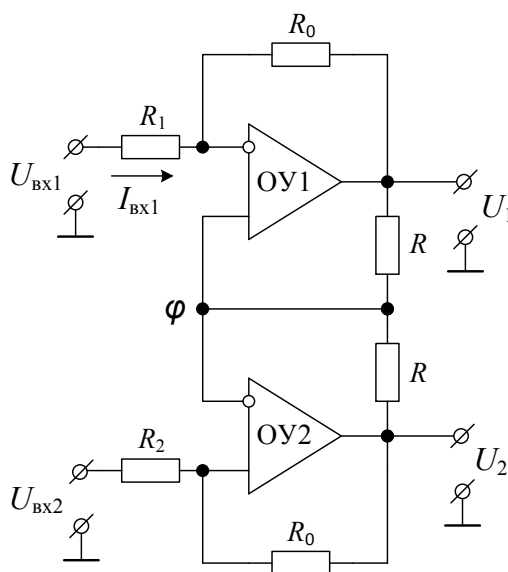


Рис. 2. Обобщенная схема преобразователя [6]

Для данной схемы можно записать следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{U_1 + U_2}{2}; \\ U_{\text{вх1}} \frac{R_0}{R_1 + R_0} + U_1 \frac{R_1}{R_1 + R_0} &= \varphi; \\ U_{\text{вх2}} \frac{R_0}{R_2 + R_0} + U_2 \frac{R_2}{R_2 + R_0} &= \varphi. \end{aligned} \right\}$$

Решая полученную систему относительно U_1 , U_2 и φ , получаем:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= -U_{\text{вх1}} \frac{R_0 - R_2}{R_1 + R_2} + U_{\text{вх2}} \frac{R_0 + R_1}{R_1 + R_2}; \\ U_2 &= U_{\text{вх1}} \frac{R_0 + R_2}{R_1 + R_2} - U_{\text{вх2}} \frac{R_0 - R_1}{R_1 + R_2}; \\ \varphi &= U_{\text{вх1}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_{\text{вх2}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Выходное напряжение ΔU равно

$$\Delta U = U_1 - U_2 = -(U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}) \frac{2R_0}{R_1 + R_2}. \quad (2)$$

Из последнего выражения видно, что обобщенная схема является дифференциальным усилителем. Проведя аналогичный анализ для схемы [7], можно получить выражение для ΔU , отличающееся от (1) только знаком.

Из полученных соотношений (1) можно получить уравнение преобразователя ток-напряжение. Для этого положим, что $U_{\text{вх2}} = 0$, и выразим ток, протекающий через резистор R_1 , который и будем считать входным (рис. 3).

$$I_{\text{вх1}} = \frac{U_{\text{вх1}} - \varphi}{R_1} = \frac{1}{R_1} \left(U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх1}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = \frac{U_{\text{вх1}}}{R_1 + R_2}.$$

Тогда, используя (1) и (2), можно записать:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= -I_{\text{вх1}}(R_0 - R_2); \\ U_2 &= I_{\text{вх1}}(R_0 + R_2); \\ \varphi &= I_{\text{вх1}}R_2; \\ \Delta U &= -I_{\text{вх1}} \cdot 2R_0. \quad (*) \end{aligned} \right\}$$

Откуда очевидно, что ток, протекающий по резистору R_2 , в точности будет равен входному току $I_{R_2} = \frac{\varphi}{R_2} = I_{\text{вх1}}$. То есть в идеальном случае падение напряжения на преобразователе будет равно нулю, а уровень синфазной составляющей $\varphi = I_{\text{вх1}}R_2$. Результат преобразования не зависит от сопротивления резистора R_2 , т. е. от уровня синфазной составляющей.

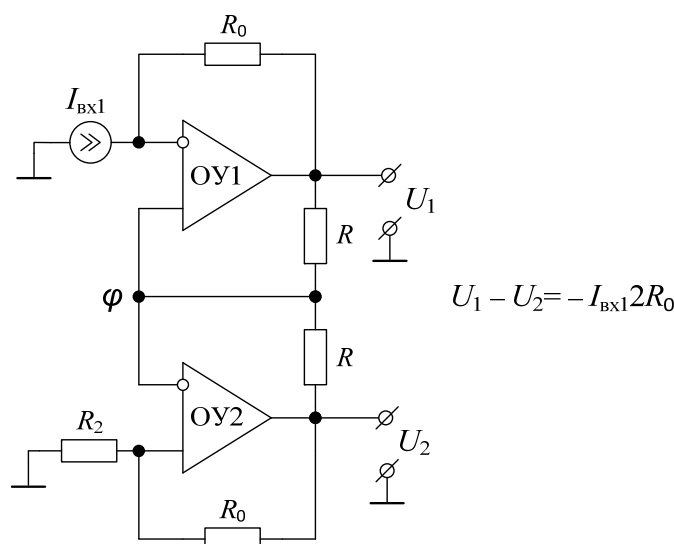


Рис. 3. Преобразователь ток-напряжение

Анализ влияния погрешностей ОУ1, ОУ2 на результат преобразования, проявляющихся в виде напряжений смещения и входных токов, ввиду нелинейности схе-

мы проведем методом наложения. Анализ проведем для обобщенной схемы, представленной на рис. 4, на которой введены обозначения $E_{см1}$, $E_{см2}$ – напряжения смещения, I_1^- , I_1^+ и I_2^- , I_2^+ – входные токи соответственно для ОУ1 и ОУ2.

Пусть в схеме действуют только напряжения смещения $E_{см1}$, $E_{см2}$. Тогда для этого случая можно записать следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \varphi + E_{см1} - U_1 \frac{R_1}{R_0 + R_1} &= 0; \\ \varphi - E_{см2} - U_2 \frac{R_2}{R_0 + R_2} &= 0; \\ \varphi &= 0,5(U_1 + U_2). \end{aligned} \right\}$$

Разрешая данную систему уравнений относительно U_1 , U_2 , φ , можно получить:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \left(E_{см1} \frac{R_0 - R_2}{R_0} + E_{см2} \frac{R_0 + R_2}{R_0} \right) \frac{R_0 + R_1}{R_1 + R_2}; \\ U_2 &= \left(E_{см1} \frac{R_0 + R_1}{R_0} + E_{см2} \frac{R_0 - R_1}{R_0} \right) \frac{R_0 + R_2}{R_1 + R_2}; \\ \Delta U &= 2E_{см1} \frac{R_0 + R_1}{R_1 + R_2} + 2E_{см2} \frac{R_0 + R_2}{R_1 + R_2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

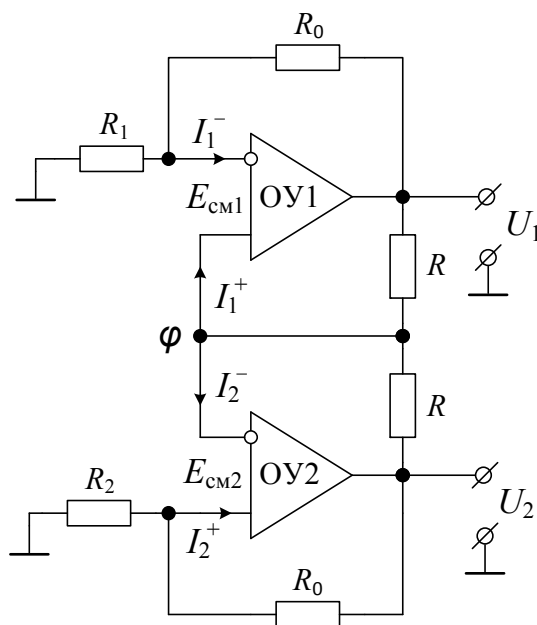


Рис. 4. Схема для анализа влияния погрешностей ОУ1, ОУ2 на результат преобразования

Положим, что $E_{см1} = E_{см2} = 0$, $I_2^+ = I_2^- = 0$, а действуют только входные токи ОУ1. Для этого случая можно записать:

$$\left. \begin{aligned} I_1^- \frac{R_1 R_0}{R_0 + R_1} - U_1 \frac{R_1}{R_0 + R_1} + \varphi &= 0; \\ I_1^+ &= \frac{U_1 - \varphi}{R} - \frac{\varphi - U_2}{R}; \\ \varphi &= U_2 \frac{R_2}{R_0 + R_2}. \end{aligned} \right\}$$

Разрешая полученную систему, можно получить:

$$\begin{aligned} U_1 &= I_1^+ R \frac{R_2}{R_0} \frac{R_0 + R_1}{R_1 + R_2} + I_1^- R_1 \frac{R_0 + R_1}{R_1 + R_2}; \\ U_2 &= I_1^+ R \frac{R_1}{R_0} \frac{R_0 + R_2}{R_1 + R_2} - I_1^- R_1 \frac{R_0 + R_2}{R_1 + R_2}; \\ \Delta U &= I_1^+ R \frac{R_2 - R_1}{R_1 + R_2} + 2I_1^- R_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Теперь положим, что $E_{см1} = E_{см2} = I_1^+ = I_1^- = 0$, т. е. действуют только входные токи ОУ2. Для этого случая можно записать:

$$\left. \begin{aligned} I_2^+ \frac{R_2 R_0}{R_0 + R_2} - U_2 \frac{R_2}{R_0 + R_2} + \varphi &= 0; \\ I_2^- &= \frac{U_1 - \varphi}{R} - \frac{\varphi - U_2}{R}; \\ \varphi &= U_1 \frac{R_1}{R_0 + R_1}. \end{aligned} \right\}$$

Исходя из полученной системы, U_1 , U_2 и ΔU можно записать:

$$\begin{aligned} U_1 &= I_2^- R \frac{R_2}{R_0} \frac{R_0 + R_1}{R_1 + R_2} - I_2^+ R_2 \frac{R_0 + R_1}{R_1 + R_2}; \\ U_2 &= I_2^+ R_2 \frac{R_0 - R_1}{R_1 + R_2} + I_2^- R \frac{R_1}{R_0} \frac{R_0 + R_2}{R_1 + R_2}; \\ \Delta U &= I_2^- R \frac{R_2 - R_1}{R_1 + R_2} - 2I_2^+ R_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом (3)–(5) суммарную погрешность от действия напряжений смещения и входных токов ОУ1 и ОУ2 можно записать в следующем виде:

$$\Delta U = 2E_{см1} \frac{R_0 + R_1}{R_1 + R_2} + 2E_{см2} \frac{R_0 + R_2}{R_1 + R_2} + (I_1^+ + I_2^-) R \frac{R_2 - R_1}{R_1 + R_2} + 2(I_1^- R_1 - I_2^+) \frac{R_0}{R_1 - R_2}. \quad (6)$$

Для преобразователя ток-напряжение следует положить, что $R_1 = \infty$, тогда выражение (6) можно записать в следующем виде:

$$\Delta U = 2E_{см1} + 2I_1^- R_0 - I_1^+ R - I_2^- R. \quad (7)$$

С учетом (7) и (*) приведенную погрешность преобразования δ можно записать в виде:

$$\delta = \frac{2E_{\text{см1}} + 2I_1^- R_0 - I_1^+ R - I_2^- R}{2I_{\text{вх}} R_0}$$

или

$$\delta = \frac{E_{\text{см1}}}{I_{\text{вх}} R_0} + \frac{I_1^-}{I_{\text{вх}}} - \frac{(I_1^+ + I_2^-)}{I_{\text{вх}}} \frac{R}{2R_0}.$$

Погрешность состоит из трех слагаемых. Первое слагаемое определяется напряжением смещения ОУ1 и диапазоном выходного напряжения преобразователя, т. е. при заданном входном токе значением сопротивления R_0 . Данное слагаемое, при наличии балансировки $E_{\text{см1}}$ в ОУ1, может быть скомпенсировано. Второе слагаемое определяется отношением входного тока ОУ1 к преобразуемому току $I_{\text{вх}}$. Данное слагаемое в погрешности является лимитирующим. Третье слагаемое, аналогично второму, но зависит от отношения резисторов $\frac{R}{2R_0}$, которое при выборе резистора R необходимо делать как можно меньше. При измерении малых токов это реализовано достаточно просто. Следует обратить особое внимание на то, что в выражение погрешности не входит напряжение смещения ОУ2. В связи с этим ОУ2 целесообразно выбирать с полевыми транзисторами во входном каскаде, т. е. обладающим заметным $E_{\text{см}}$ и очень низкими входными токами. Таким образом, с учетом балансировки ОУ1 и при правильном выборе сопротивления резистора R и ОУ2 погрешность преобразователя ток-напряжение можно оценить следующим образом:

$$\delta \cong \frac{I_1^-}{I_{\text{вх}}}.$$

Заключение

В работе получены аналитические соотношения, описывающие работу обобщенной схемы преобразователя.

На основе данных соотношений получено выражение погрешности схемы от влияния напряжения смещения и входных токов операционных усилителей.

Представлено выражение погрешности преобразования для преобразователя ток-напряжение.

Показано, что основная часть погрешности определяется соотношением входного тока ОУ1 к преобразуемому току, в то время как напряжение смещения ОУ2 не влияет на результат преобразования.

Литература

1. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин: (измерительные преобразователи) : учеб. пособие для вузов / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. – 380 с. : ил.
2. Данилов, А. Современные промышленные датчики тока / А. Данилов // Современ. электроника. – 2004. – № 10. – С. 24–35.

3. Дарен, Уэнн. Резистивные методы измерения тока для точного контроля в электронных схемах / Уэнн Дарен // Компоненты и технологии. – 2011. – № 7. – С. 156–159.
4. Достал, И. Операционные усилители : пер. с англ. / И. Достал. – М. : Мир, 1982. – 512 с. : ил.
5. Гусев, В. Г. Методы построения точных электронных устройств : учеб. пособие / В. Г. Гусев, Т. В. Мирина ; науч. ред. В. С. Фетисов. – 3-е изд., стер. – М. : ФЛИНТА, 2012. – 268 с.
6. Mugioin, F. W. Circuit allows multiple I/U converters / F. W. Mugioin // EDN. – 1983. – Vol. 28, № 20. – P. 201–202.
7. Kokot, Maciej. Компенсация падения напряжения на измерительном сопротивлении при измерении малых токов / Maciej Kokot. – Режим доступа: <http://www.rlocman.ru/shem/schematics.htm>. – Дата доступа: 20.01.2015.

Получено 20.05.2015 г.