

УДК 621.317

АНАЛИЗ АКТИВНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ МОСТОВЫХ СХЕМ С НУЛЕВЫМ УРОВНЕМ СИНФАЗНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ДИАГОНАЛИ

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

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

Данная статья является продолжением работы [1] и посвящена анализу активных мостовых схем, отличающихся от рассмотренных ранее тем, что в измерительной диагонали резистивного моста практически отсутствует синфазная составляющая напряжения, наличие которой характерно для проанализированных в указанной ранее работе активных мостовых схем. Это достигается тем, что в схему вводится дополнительный операционный усилитель (ОУ), а нижняя вершина питающей диагонали моста запитывается инверсным напряжением. Как и в случае с простейшими мостовыми схемами, в литературе отсутствует систематический анализ выходного преобразования в зависимости от типа питания мостовой схемы (E_0 или I_0) и от различных комбинаций резистивных чувствительных элементов в мосте. Восстановить отмеченный пробел, по мнению авторов, и призвана данная работа.

Известны три активные мостовые схемы с нулевым уровнем синфазной составляющей в измерительной диагонали моста:

- активная мостовая схема на основе двух ОУ и выходным усилителем с последовательной отрицательной обратной связью [2]–[5];
- активная мостовая схема на основе двух ОУ и выходным усилителем с параллельной отрицательной обратной связью [2]–[5];
- активная мостовая схема на основе двух ОУ и выходным усилителем с комбинированной отрицательной обратной связью [2]–[5].

Активная мостовая схема на основе двух ОУ и выходным усилителем с последовательной отрицательной обратной связью представлена на рис. 1. Выражения для выходного напряжения в зависимости от питания моста напряжением E_0 или током I_0 будут выглядеть следующим образом:

$$U_E = E_0 K \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)}, \quad (1)$$

$$U_I = K I_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}, \quad (2)$$

где $K = \left(1 + \frac{R''}{R'}\right)$ – коэффициент усиления выходного усилителя.

Используя те же обозначения для изменения сопротивлений резистивных чувствительных элементов (ЧЭ), что и в [6] (R – начальное сопротивление ЧЭ, δ_R – приращение сопротивления вследствие изменения входной величины), можно получить

выходные напряжения схемы в зависимости от расположения ЧЭ в плечах моста и вида питания. Полученные выражения сведены в табл. 1.

Таблица 1

Выходные напряжения для активной мостовой схемы с двумя ОУ и выходным усилителем с последовательной ООС и одним ЧЭ

Выходные напряжения	Варианты установки ЧЭ			
	I	II	III	IV
U_E	$\frac{KE_0}{2} \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$	$-\frac{KE_0}{2} \delta_R$ [2]–[5]	$-\frac{KE_0}{2} \frac{\delta_R}{1+0,5\delta_R}$	$\frac{KE_0}{2} \frac{\delta_R}{1+0,5\delta_R}$
U_I	$-\frac{KI_0 R}{4} \frac{\delta_R}{1+0,5\delta_R}$	$\frac{KI_0 R}{4} \frac{\delta_R}{1+0,25\delta_R}$ [2]	$\frac{KI_0 R}{4} \frac{\delta_R}{1+0,25\delta_R}$	$-\frac{KI_0 R}{4} \frac{\delta_R}{1+0,25\delta_R}$

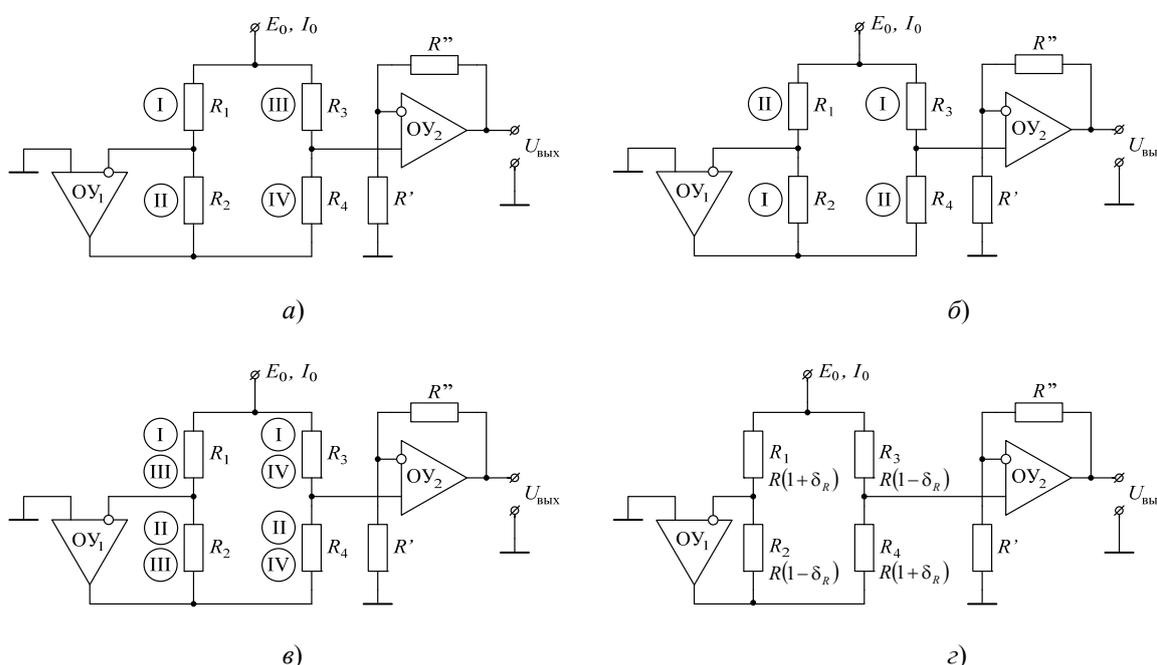


Рис. 1. Активная мостовая схема на основе двух ОУ и выходным усилителем с последовательной ООС: а – с одним ЧЭ; б – с двумя синфазными ЧЭ; в – с двумя дифференциальными ЧЭ; г – с двумя парами дифференциальных ЧЭ. (Римскими цифрами отмечены варианты установки ЧЭ в мостовую схему)

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что при установке ЧЭ в обратную связь ОУ₁ и питания схемы от источника напряжения E_0 изменение сопротивления ЧЭ линейно связано с выходным напряжением. Однако это рационально тогда, когда ОУ₁ находится в непосредственной близости от ЧЭ, что не всегда возможно. Питание схемы током I_0 , по сравнению с питанием напряжением дает вдвое меньшую погрешность от нелинейности в случаях, когда ЧЭ установлен в третьем или четвертом плечах моста.

Два синфазных ЧЭ могут быть установлены в плечи моста двумя способами так, как это представлено на рис. 1, б. Выходные напряжения, полученные с использованием выражений (1), (2), представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Выходные напряжения активной мостовой схемы с двумя ОУ
и выходным усилителем с последовательной ООС и двумя синфазными ЧЭ**

Выходные напряжения	Варианты установки ЧЭ	
	I	II
U_E	$-E_0 K \delta_R$	$E_0 K \frac{\delta_R}{1 + \delta_R} [3]$
U_I	$-\frac{I_0 R}{2} \delta_R$	$\frac{I_0 R}{2} \delta_R$

Из полученных данных видно, что первый вариант установки ЧЭ обладает линейностью преобразования при питании схемы как током I_0 , так и напряжением E_0 . Однако второй вариант установки (при питании током) более предпочтителен, поскольку ЧЭ не попадает в обратную связь ОУ.

Дифференциальные ЧЭ можно расположить в мосте так, как это показано на рис. 1, в. Используя выражения (1), (2), получаем выходные напряжения, которые сведены в табл. 3.

Таблица 3

**Выходные напряжения активной мостовой схемы с двумя ОУ
и выходным усилителем с последовательной ООС и двумя дифференциальными ЧЭ**

Выходные напряжения	Варианты установки ЧЭ			
	I	II	III	IV
U_E	$KE_0 \frac{\delta_R}{1 + 0,5\delta_R}$	$-KE_0 \frac{\delta_R}{1 - 0,5\delta_R}$	$KE_0 \frac{\delta_R}{1 + \delta_R}$	$-KE_0 \delta_R$
U_I	$K \frac{I_0 R}{2} \delta_R$	$-K \frac{I_0 R}{2} \delta_R$	$K \frac{I_0 R}{2} \delta_R$	$-K \frac{I_0 R}{2} \delta_R$

Из табл. 3 видно, что при любом расположении ЧЭ и питании током I_0 выходные напряжения линейно связаны с изменением сопротивления ЧЭ. В случае питания схемы напряжением линейным является только четвертый вариант установки ЧЭ. Следует отметить, что в этом случае ЧЭ не установлен в ООС ОУ₁.

Для резистивного датчика с двумя парами дифференциальных ЧЭ (рис. 1, з) выходные напряжения, полученные с использованием (1), (2), выглядят следующим образом:

$$U_E = 2KE_0 \frac{\delta_R}{1 - \delta_R} [3];$$

$$U_I = KI_0 R \delta_R [3].$$

И в этом резистивном датчике питание моста током I_0 дает линейное преобразование.

Активная мостовая схема на основе двух ОУ и с выходным ОУ с параллельной ООС [3] представлена на рис. 2. Выходные напряжения при питании моста напряжением и током имеют вид:

$$U_E = -E_0 R_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 R_3 R_4}; \quad (3)$$

$$U_I = -I_0 R_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_4 (R_1 + R_3)} \quad (4)$$

С помощью данных выражений для схемы, представленной на рис. 2, а, можно получить значения выходных напряжений, которые даны в табл. 4.

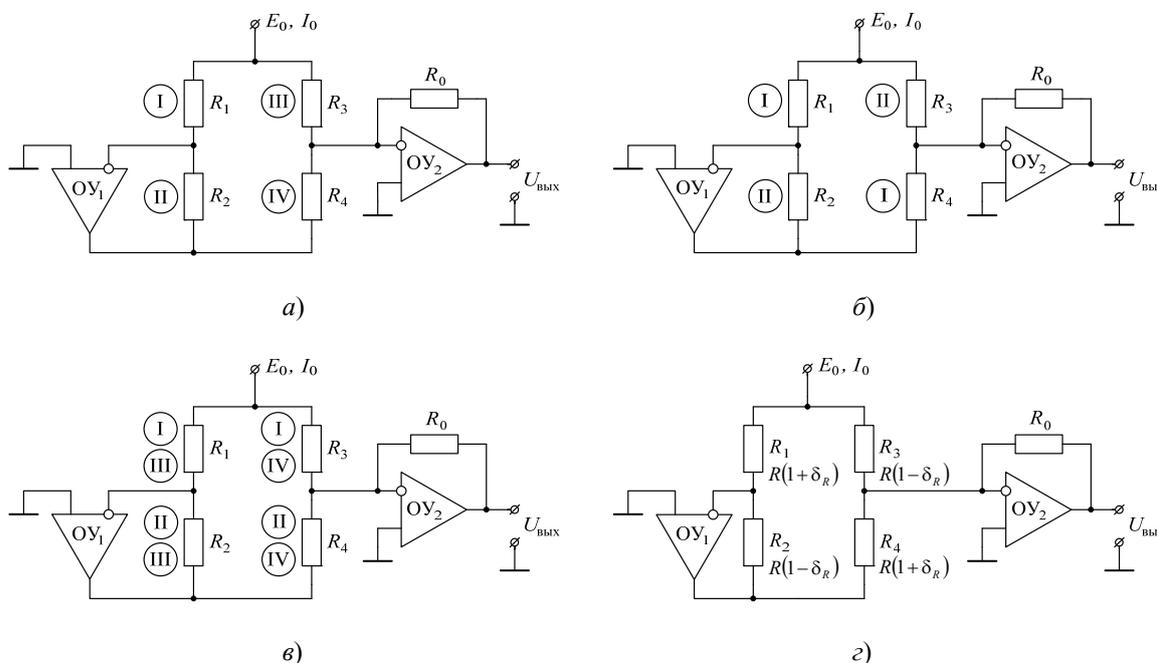


Рис. 2. Активная мостовая схема на основе двух ОУ с выходным усилителем с параллельной ООС: а – с одним ЧЭ; б – с двумя синфазными ЧЭ; в – с двумя дифференциальными ЧЭ; г – с двумя парами дифференциальных ЧЭ. (Римскими цифрами отмечены варианты установки ЧЭ в мостовую схему)

Таблица 4

Выходные напряжения активной мостовой схемы на основе двух ОУ с выходным ОУ с параллельной ООС и одним ЧЭ

Выходные напряжения	Варианты установки ЧЭ			
	I	II	III	IV
U_E	$-\frac{E_0 R_0}{R} \frac{\delta_R}{1 + \delta_R}$	$E_0 \frac{R_0}{R} \delta_R [3]$	$E_0 \frac{R_0}{R} \frac{\delta_R}{1 + \delta_R}$	$-E_0 \frac{R_0}{R} \frac{\delta_R}{1 + \delta_R}$
U_I	$-\frac{I_0 R_0}{2} \frac{\delta_R}{1 + 0,5\delta_R}$	$\frac{I_0 R_0}{2} \delta_R$	$\frac{I_0 R_0}{2} \frac{\delta_R}{1 + 0,5\delta_R}$	$-\frac{I_0 R_0}{2} \frac{\delta_R}{1 + \delta_R}$

Анализ полученных выражений показывает, что при расположении ЧЭ в обратной связи ОУ₁ схема дает линейное преобразование как при питании моста током, так и при питании моста напряжением, однако, как было отмечено выше, это не всегда приемлемо. В среднем же при токовом питании схема имеет вдвое меньшую нелинейность (расположение ЧЭ в первом или третьем плечах).

При использовании этой схемы для резистивного датчика с синфазным ЧЭ, способы его установки в мост представлены на рис. 2, б. Выходные напряжения схемы, полученные описанным выше способом, представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Выходные напряжения активной мостовой схемы на основе двух ОУ
с выходным усилителем с параллельной ООС и синфазным ЧЭ**

Выходные напряжения	Варианты установки ЧЭ	
	I	II
U_E	$-E_0 \frac{2R_0}{R} \frac{\delta_R}{1+2\delta_R}$	$E_0 \frac{2R_0}{R} \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$
U_I	$-I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$	$I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$

Анализ данных табл. 5 показывает, что в данной активной мостовой схеме при использовании резистивного датчика с синфазным ЧЭ отсутствует линейность преобразования, а наибольшая нелинейность проявляется в случае установки ЧЭ в первое и четвертое плечи моста.

В случае использования резистивного датчика с дифференциальным ЧЭ его в схему можно установить способами, показанными на рис. 2, в. Используя выражения (3), (4), нетрудно получить выходные напряжения, сведенные в табл. 6. Анализ полученных выражений показывает, что при любом питании мостовой схемы выходные напряжения линейно связаны с изменением сопротивления ЧЭ, если резистивный датчик установлен в первое и второе плечи моста. Если резистивный датчик установлен в третье и четвертое плечи, то линейным выходное напряжение становится только в случае питания моста от источника напряжения. Важно отметить, что при линейном преобразовании ЧЭ не попадают в обратную связь ОУ₁.

Таблица 6

**Выходные напряжения активной мостовой схемы на основе двух ОУ
с выходным усилителем с параллельной ООС и дифференциальным ЧЭ**

Выходные напряжения	Варианты установки ЧЭ			
	I	II	III	IV
U_E	$-E_0 \frac{2R_0}{R} \delta_R$	$E_0 \frac{2R_0}{R} \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$	$-E_0 \frac{2R_0}{R} \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$	$E_0 \frac{2R_0}{R} \delta_R$
U_I	$-I_0 R_0 \delta_R$	$I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1-\delta_R}$	$-I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1+0,5\delta_R}$	$I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1-0,5\delta_R}$

Выходные напряжения для резистивного датчика с двумя парами дифференциальных ЧЭ, полученные с использованием (3), (4), имеют вид:

$$U_E = -E_0 \frac{4R_0}{R} \frac{\delta_R}{1+\delta_R};$$

$$U_I = -I_0 2R_0 \frac{\delta_R}{1+\delta_R}.$$

Из этих выражений видно, что при использовании резистивного датчика с двумя парами дифференциальных ЧЭ в данной схеме преобразование нелинейно.

Известен еще один тип активной мостовой схемы – это схема с использованием двух ОУ и выходным усилителем с комбинированной ООС [6], [7]. В этой схеме сигнал мостовой схемы подается как на неинвертирующий, так и на инвертирующий входы выходного ОУ, соответственно, по этим входам ОУ имеет последовательную и параллельную ООС. Схема представлена на рис. 3. В общем виде выходные напряжения схемы при питании моста напряжением E_0 и током I_0 имеют вид:

$$U_E = -E_0 R_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 R_2 R_3}; \tag{5}$$

$$U_I = -I_0 R_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_2 (R_1 + R_3)}. \tag{6}$$

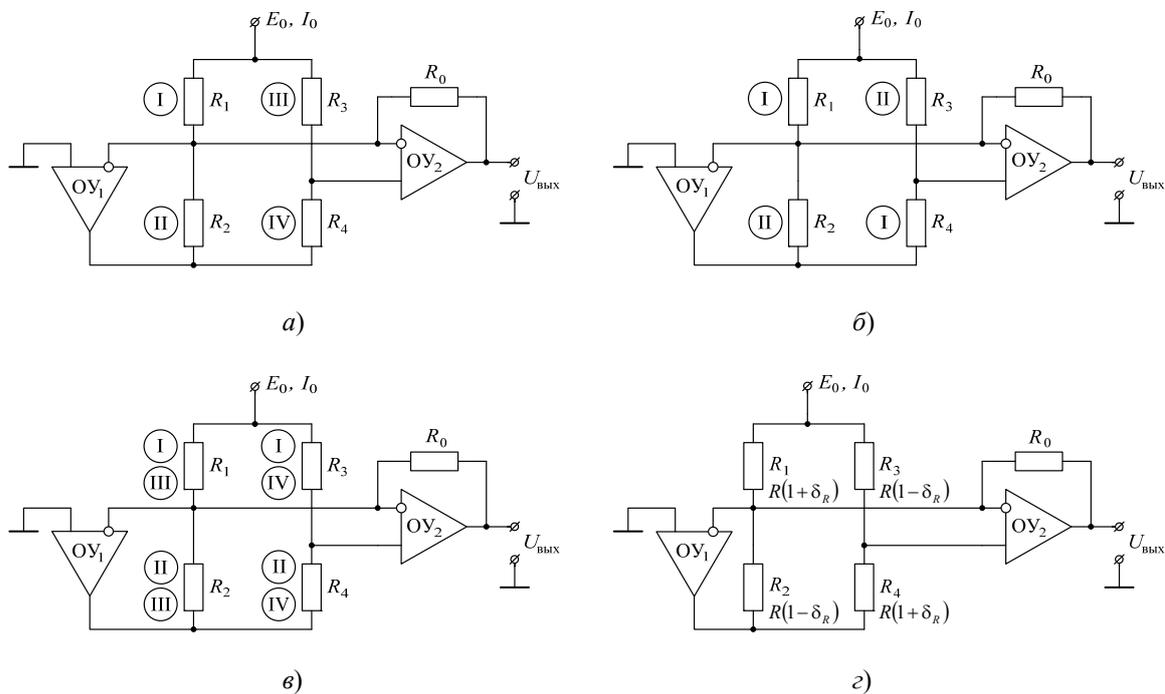


Рис. 3. Активная мостовая схема на основе двух ОУ с выходным усилителем с комбинированной ООС: а – с одним ЧЭ; б – с двумя синфазными ЧЭ; в – с двумя дифференциальными ЧЭ; г – с двумя парами дифференциальных ЧЭ. (Римскими цифрами отмечены варианты установки ЧЭ в мостовую схему)

Используя (5), (6), получаем выражения для выходных напряжений схемы с резистивным датчиком с одним ЧЭ. Эти выражения сведены в табл. 7, анализ выражений которой показывает, что если ЧЭ установлен в первое плечо моста, то в независимости от питания моста преобразование является линейным. При питании напряжением схема линейно преобразует сопротивление ЧЭ в напряжение, он установлен в третье плечо моста. В остальных случаях схема нелинейно преобразует изменение сопротивления ЧЭ в выходное напряжение. Важное отличие данной схемы от рассмотренных выше состоит в том, что при линейном преобразовании ЧЭ не расположен в обратной связи ОУ₁ (табл. 1, 4).

Таблица 7

**Выходные напряжения активной мостовой схемы на основе двух ОУ
с выходным усилителем с комбинированной ООС с одним ЧЭ**

Выходные напряжения	Варианты установки ЧЭ			
	I	II	III	IV
U_E	$-E_0 \frac{2R_0}{R} \delta_R$	$E_0 \frac{2R_0}{R} \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$	$-E_0 \frac{2R_0}{R} \delta_R$	$E_0 \frac{2R_0}{R} \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$
U_I	$-I_0 R_0 \delta_R$	$I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$	$-I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1-0,5\delta_R}$ [6]	$I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1+0,5\delta_R}$

В случае использования в рассматриваемой схеме резистивного датчика с двумя синфазными ЧЭ варианты их установки в мост показаны на рис. 3, б. Выходные напряжения, полученные с использованием (6), (7), даны в табл. 8.

Таблица 8

**Выходные напряжения активной мостовой схемы на основе двух ОУ
с выходным усилителем с комбинированной ООС с двумя синфазными ЧЭ**

Выходные напряжения	Варианты установки ЧЭ	
	I	II
U_E	$-E_0 \frac{2R_0}{R} \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$	$E_0 \frac{2R_0}{R} \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$
U_I	$-I_0 R_0 \delta_R$	$I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$

Из табл. 8 видно, что в случае расположения синфазных ЧЭ в первом и четвертом плечах моста и питания его током уравнение преобразования является линейным. В других случаях уравнение нелинейно.

При использовании в данной схеме резистивного датчика с дифференциальным ЧЭ можно расположить ЧЭ так, как это показано на рис. 3, в. Полученные с использованием (5), (6) выражения для выходных напряжений сведены в табл. 9.

Анализ выходных напряжений, представленных в табл. 9, показывает, что при установке ЧЭ в первое и третье плечи моста выходное напряжение линейно связано с изменением сопротивления датчика вне зависимости от питания током или напряжением. При установке ЧЭ в первое и второе плечи схема линейна при питании моста напряжением. Однако при этом ЧЭ попадает в обратную связь ОУ₁, что не всегда приемлемо.

При использовании двух дифференциальных ЧЭ в рассматриваемой схеме (рис. 3, з) можно получить следующие выходные напряжения:

$$U_E = -E_0 \frac{4R_0}{R} \frac{\delta_R}{1-\delta_R};$$

$$U_I = -2I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1-\delta_R} [6].$$

Из этих выражений видно, что данная схема преобразует изменение сопротивления резистивного датчика нелинейно.

Таблица 9

**Выходные напряжения активной мостовой схемы на основе двух ОУ
с выходным усилителем с комбинированной ООС с дифференциальным ЧЭ**

Выходные напряжения	Варианты установки ЧЭ			
	I	II	III	IV
U_E	$-E_0 \frac{2R_0}{R} \delta_R$	$E_0 \frac{2R_0}{R} \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$	$-E_0 \frac{2R_0}{R} \delta_R$	$E_0 \frac{2R_0}{R} \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$
U_I	$-I_0 R_0 \delta_R$	$I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1+\delta_R}$	$I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1-0,5\delta_R}$ [6]	$I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1+0,5\delta_R}$

Проведенный анализ позволяет провести рациональный выбор измерительной схемы для конкретного вида резистивного датчика. Пользуясь полученными таблицами, можно рассчитать чувствительность, оценить нелинейность преобразования и разместить ЧЭ датчика в мосте таким образом, чтобы избежать риска неустойчивой работы используемых активных элементов.

Литература

1. Карпов, В. А. Анализ простейших активных мостовых схем для резистивных датчиков / В. А. Карпов, А. В. Ковалев, О. М. Ростоккина // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2012. – № 1. – С. 34–40.
2. Щербаков, В. И. Электрические схемы на операционных усилителях : справочник / В. И. Щербаков, Г. И. Грездов. – К. : Техника, 1983. – 213 с.
3. Walt Kester, Editor, 1992 Amplifier Applications Guide, Section 2, 3. Analog Devices Inc., 1992.
4. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков. Материалы семинара фирмы AD. 2006 г. – URL: <http://www.autexspb.da.ru>. – Дата обращения: 08.11.2011.
5. Волович, Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – М. : ДОДЕКА-XXI, 2007. – С. 147–149.
6. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 370 с.
7. Гутников, В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – Л. : Энергия, 1980. – 248 с.

Получено 07.05.2012 г.