

АНАЛИЗ ПРОСТЕЙШИХ АКТИВНЫХ МОСТОВЫХ СХЕМ ДЛЯ РЕЗИСТИВНЫХ ДАТЧИКОВ

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

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

Резистивный датчик (РД) является одним из самых распространенных датчиков физических величин, в котором происходит преобразование физической величины в изменение электрического сопротивления. В различных вариантах конструктивного исполнения РД используется различное сочетание резистивных чувствительных элементов (ЧЭ), как правило, один, два, четыре. Кроме того, под действием физической величины изменение электрического сопротивления ЧЭ в этих сочетаниях может иметь как положительный, так и отрицательный знак. В связи с отмеченным принято классифицировать РД со следующими комбинациями ЧЭ [1], [2]:

- РД с одним ЧЭ;
- РД с двумя ЧЭ, сопротивление которых изменяется одинаково, или РД с двумя синфазными ЧЭ;
- РД с двумя ЧЭ, сопротивление которых изменяется противоположно, или РД с двумя дифференциальными ЧЭ;
- РД с двумя парами дифференциальных ЧЭ.

Полагают [1]–[3], что начальное сопротивление ЧЭ – R , его изменение под действием той или иной физической величины ΔR , а его относительное изменение $\delta_R = \frac{\Delta R}{R}$.

Наиболее простой и изученной схемой для преобразования изменения сопротивления ЧЭ в напряжение является мостовая схема [2]–[4]. Однако мостовым схемам присущ ряд недостатков: низкая чувствительность, значительный уровень синфазной составляющей в выходном напряжении, конечное выходное сопротивление.

Для устранения отмеченных недостатков используются активные мостовые схемы, где в качестве активных элементов применяются операционные усилители (ОУ). К простейшим из этих схем следует отнести схемы с использованием одного ОУ. Это активная мостовая схема с минимальным числом элементов (АМСМЧЭ) и активная мостовая схема повышенной чувствительности (АМСПЧ) [1]–[3], [5], [6]. В перечисленных работах анализируются АМСМЧЭ и АМСПЧ на основе РД с различными комбинациями ЧЭ при питании схем от источника напряжением E_0 . Однако в данных работах неполно представлен анализ различных сочетаний ЧЭ в РД, хотя их число, как будет показано ниже, ограничено, а также отсутствует анализ этих схем при питании их от источника тока I_0 .

Целью данной работы является восполнение отмеченных пробелов и тем самым предоставление возможности рационального выбора активной мостовой схемы в зависимости от конструктивного исполнения РД.

Активная мостовая схема с минимальным числом элементов представлена на рис. 1. Для данной схемы нетрудно получить значение выходного напряжения при питании схемы напряжением E_0 и током I_0 :

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

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

Используя выражения (1), (2), можно получить выражения выходных напряжений для схемы с одним ЧЭ (рис. 1, а), представленные в табл. 1. Далее в таблицах известный результат будем обозначать соответствующей ссылкой.

Таблица 1

Выходные напряжения для активной мостовой схемы с минимальным числом элементов и одним ЧЭ

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

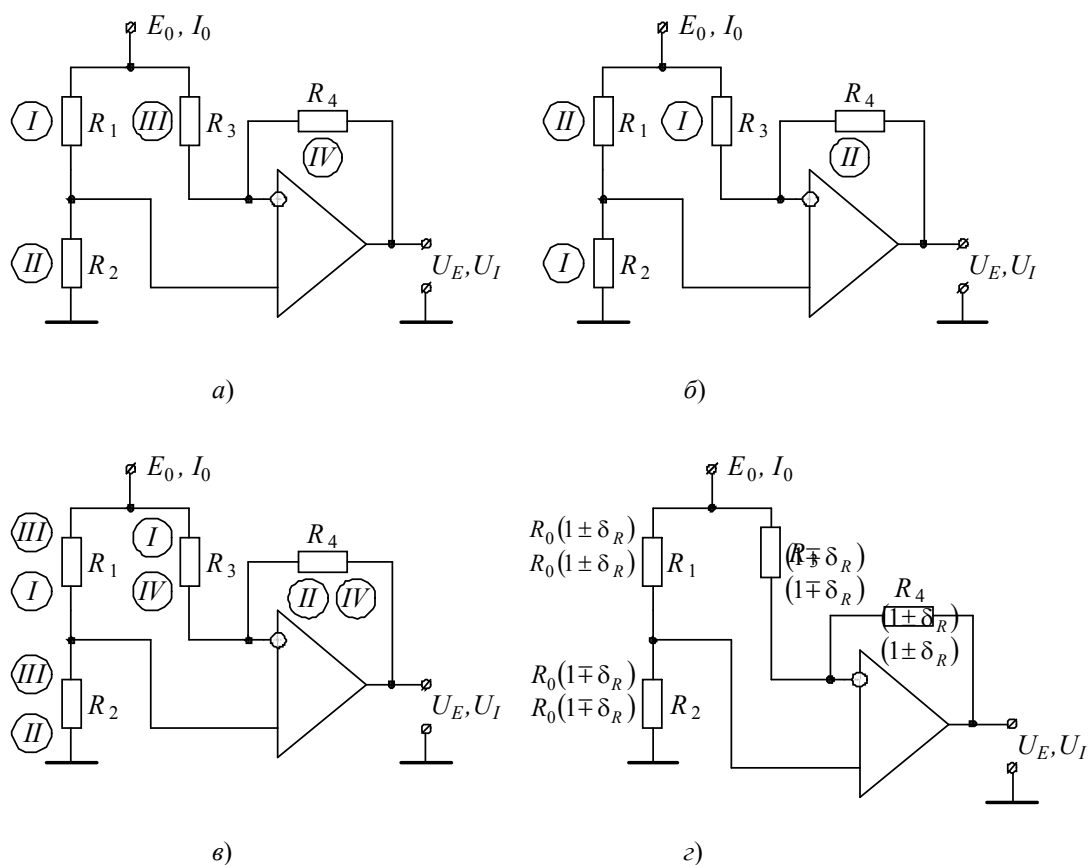


Рис. 1. Активная мостовая схема с минимальным числом элементов: а – с одним ЧЭ; б – с двумя синфазными ЧЭ; в – с двумя дифференциальными ЧЭ; г – с двумя парами дифференциальных ЧЭ. (Римскими цифрами отмечены варианты установки ЧЭ в мостовую схему)

Из полученных выражений видно, что при питании схемы напряжением E_0 и током I_0 сопротивление ЧЭ преобразуется линейно, если он расположен в обратной связи ОУ. Однако это не всегда приемлемо, поскольку паразитные параметры линий связи ЧЭ могут привести к потере устойчивости ОУ, что, как правило, требует дополнительных мероприятий по срыву автоколебаний.

Более предпочтительной является схема с питанием от источника тока, в которой ЧЭ расположен во втором плече моста. Достоинство в данном случае заключается в том, что один из зажимов ЧЭ заземлен, а это иногда является конструктивной особенностью РД, преимущественно в автомобильной технике.

Два синфазных ЧЭ в активную мостовую схему с минимальным числом элементов могут быть установлены только двумя способами (рис. 1, б). Используя выражения (1), (2), можно получить выходные напряжения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Выходные напряжения активной мостовой схемы с минимальным числом элементов и синфазным ЧЭ

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

Из табл. 2 видно, что при питании схемы током I_0 выходное напряжение пропорционально изменению электрического сопротивления ЧЭ. При питании схемы напряжением E_0 выходное напряжение пропорционально изменению сопротивления, когда ЧЭ расположены в первом и четвертом плечах моста, однако один из ЧЭ снова установлен в обратную связь ОУ.

Для дифференциальных ЧЭ (рис. 1, в) возможны четыре варианта их расположения в схеме. Получая выходные напряжения способом, аналогичным описанному выше, можно получить табл. 3.

Таблица 3

Выходные напряжения активной мостовой схемы с минимальным числом элементов и дифференциальным ЧЭ

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

Из табл. 3 видно, что с точки зрения линейности преобразования более предпочтительным является питание током I_0 (II и I варианты установки). При питании напряжением E_0 только один вариант – III – позволяет получить линейное преобразование. Для предотвращения установки ЧЭ в обратную связь ОУ следует отдать предпочтение первому варианту с питанием тока I_0 и третьему варианту при питании напряжением E_0 .

Для двух пар дифференциальных ЧЭ существует только один вариант их установки в схему, показанный на рис. 1, г. Используя выражения (1), (2), нетрудно получить выходные напряжения при питании схемы напряжением E_0 и током I_0 :

$$U_E = 2E_0 \frac{\delta_R}{1 - \delta_R}, [1], [2];$$

$$U_I = 2I_0 R \cdot \delta_R.$$

В данном случае также предпочтительнее питать схему от источника тока I_0 .

Общими недостатками активной мостовой схемы с минимальным числом элементов являются: значительное синфазное напряжение для ОУ ($\sim E/2$) и недостаточная чувствительность.

Для повышения чувствительности, при незначительном усложнении схемы, используют активную мостовую схему повышенной чувствительности [2], [5], представленную на рис. 2. Здесь резисторы R_0 идентичные и, как правило, намного больше сопротивлений R .

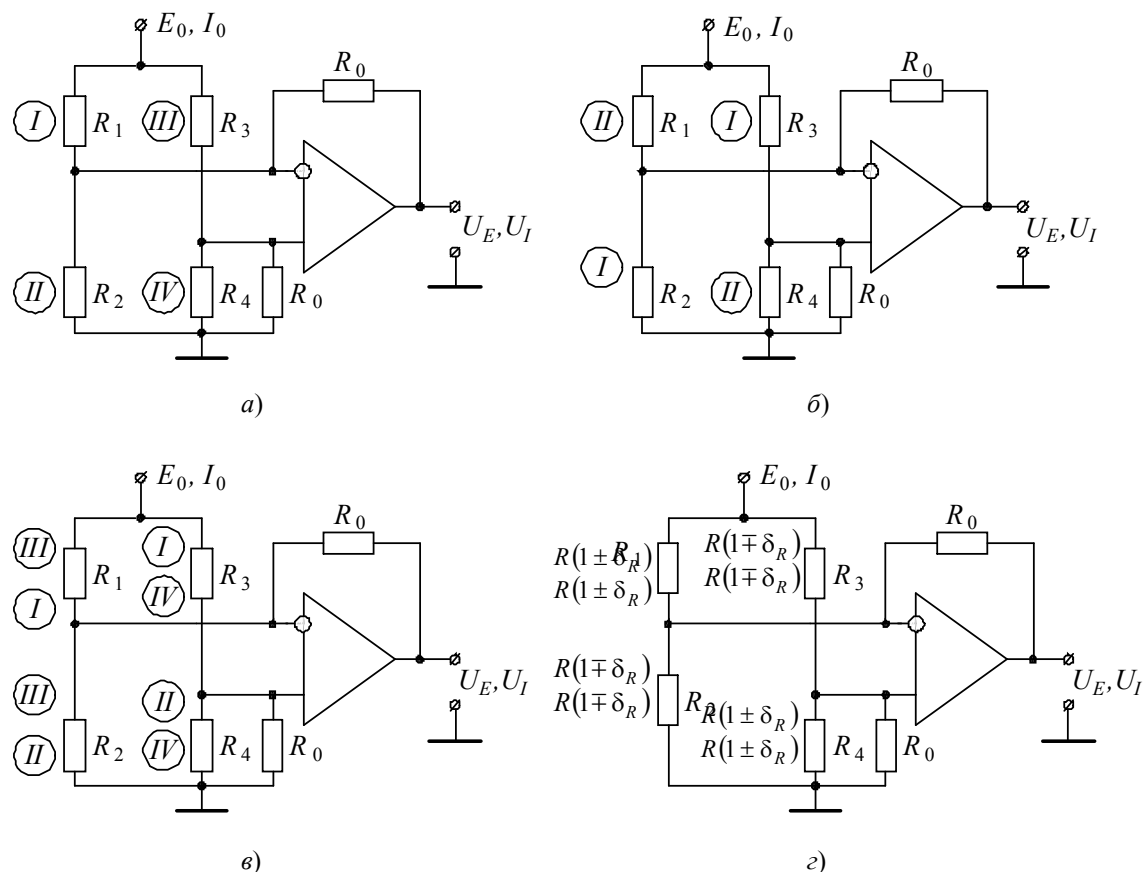


Рис. 2. Активная мостовая схема повышенной чувствительности: а – с одним ЧЭ; б – с двумя синфазными ЧЭ; в – с двумя дифференциальными ЧЭ; г – с двумя парами дифференциальных ЧЭ. (Римскими цифрами отмечены варианты установки ЧЭ в мостовую схему)

Далее находим выражения для выходного напряжения в общем виде и получим:

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

$$U_I = I_0 \frac{R_0}{2R_1 R_2} \frac{R_2 R_4 (R_1 - R_3) + R_0 (R_1 R_4 - R_2 R_3)}{R_0 + R_4}. \quad (4)$$

Варианты установки ЧЭ в схему представлены на рис. 2, а. Выходные напряжения для питания схемы напряжением E_0 и током I_0 представлены в табл. 4.

**Выходные напряжения активной мостовой схемы
повышенной чувствительности с одним ЧЭ**

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

В полученных выражениях нет линейности между изменением сопротивления ЧЭ и выходного напряжения. Поскольку схема является схемой повышенной чувствительности, то, как правило, $R_0 \gg R$. Например, пусть $E_0 = 4$ В, $I_0 = 20$ мА, $R = 200$ Ом, $\delta_R = 10^{-2}$, а выходное напряжение пусть будет равно 4 В. Тогда из

$$U_E = E_0 \frac{R_0}{R} \delta_R$$

можно получить значение сопротивления R_0 :

$$R_0 = \frac{U_E \cdot R}{E_0 \delta_R} = \frac{4 \cdot 200}{4 \cdot 10^{-2}} = 2 \cdot 10^4 = 20 \text{ кОм},$$

откуда видно, что $R/R_0 = 10^{-2}$.

Из табл. 4 видно, что при установке ЧЭ в четвертое плечо и при питании его током I_0 , имеем:

$$U_I = I_0 R_0 \frac{R_0}{R_0 + R} \frac{\delta_R}{1 + \frac{R}{R_0 + R} \delta_R} \approx I_0 R_0 \frac{\delta_R}{1 + 10^{-2} \cdot \delta_R},$$

т. е. нелинейность преобразования уменьшена в сто раз, и чем выше чувствительность схемы, тем меньше оказывает влияние нелинейность. Из изложенного выше следует, что данную схему целесообразно применять для ЧЭ типа тензорезистора, когда $\delta_R \ll 1$.

Синфазные ЧЭ в активной мостовой схеме можно расположить двумя способами (рис. 2, б). С использованием выражений (3), (4) нетрудно получить ее выходные напряжения при питании напряжением и током, которые сведены в табл. 5.

Таблица 5

**Выходные напряжения активной мостовой схемы
повышенной чувствительности с синфазным ЧЭ**

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

Последняя строка табл. 5 получена при условии, что $R_0 \gg R$ (как и в рассмотренном выше примере).

Из табл. 5 видно, что схема пригодна для преобразования небольших относительных изменений δ_R ЧЭ.

Дифференциальные ЧЭ в активной мостовой схеме можно расположить четырьмя способами (рис. 2, в). Используя выражения (3), (4) и полагая, что $R_0 \gg R$, можно получить выражения для выходных напряжений, которые сведены в табл. 6.

Таблица 6

Выходные напряжения активной мостовой схемы повышенной чувствительности дифференциальным ЧЭ

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

Из табл. 6 видно, что варианты установки III, IV более предпочтительны, поскольку $R/R_0 \ll 1$ и нелинейность преобразования существенно ниже.

Две пары дифференциальных ЧЭ можно установить в мостовую схему (рис. 2, з). Выходное напряжение схемы, с учетом выражений (3), (4), имеет вид (с точностью до δ_R^2):

$$U_E = E_0 \frac{2R_0}{R} \delta_R [1], [2];$$

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

Полученные формулы показывают, что выходные выражения при использовании двух пар ЧЭ линейно зависимы от относительного изменения сопротивления ЧЭ ($R/R_0 \ll 1$).

В отличие от мостовой схемы и активной мостовой схемы с минимальным числом элементов в рассмотренной схеме повышена чувствительность, определяемая отношением R/R_0 и числом ЧЭ.

К недостаткам схемы следует отнести значительный уровень синфазной составляющей для используемого ОУ, высокие требования к согласованности резисторов R_0 и сложность регулировки коэффициента усиления – необходимо изменять одновременно два сопротивления R_0 .

Полученные результаты (табл. 1–6) представляют все варианты преобразования изменения омического сопротивления РД в выходное напряжение для двух простейших активных мостовых схем АМСМЧЭ и АМСПЧ при питании их как от источника напряжения, так и от источника тока, и позволяют произвести рациональный выбор нормирующей схемы в зависимости от конструктивного устройства резистивного датчика.

Литература

1. Kester, W. Editor, 1992 Amplifier Applications Guide, Section 2, 3.

2. Кестер, У. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков. Раздел 2: мостовые схемы / У. Кестер, 2006. – URL: <http://www.autexspb.da.ru>. – Дата обращения: 08.11.2011 г.
3. Волович, Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. – М. : ДОДЕКА-XXI, 2007. – С. 147–149.
4. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 370 с.
5. Щербаков, В. И. Электрические схемы на операционных усилителях : справочник / В. И. Щербаков, Г. И. Грездов. – К. : Техника, 1983. – 213 с.
6. Гутников, В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – Л. : Энергия, 1980. – 248 с.

Получено 29.04.2011 г.