

В. С. Волков, Е. В. Кучумов, В. В. Кикот, М. В. Французов

ПРИМЕНЕНИЕ СХЕМЫ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

V. S. Volkov, E. V. Kuchumov, V. V. Kikot, M. V. Frantsuzov

APPLICATION CIRCUITS BASED ON OPERATIONAL AMPLIFIERS FOR TEMPERATURE COMPENSATION TENSORESISTIVE SEMICONDUCTOR PRESSURE SENSOR

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Объектами исследования являются температурная погрешность чувствительности полупроводниковых тензорезистивных датчиков давления. Предметом исследования являются методы ее снижения, основанные на применении активных схем температурной компенсации и методы ее снижения. Цель работы – разработка схемы температурной компенсации чувствительности на основе операционного усилителя и методики расчета параметров цепи обратной связи усилителя. *Материалы и методы.* Для разработки схемы температурной компенсации и методики расчета ее параметров использовалось математическое и имитационное моделирование с применением программы MathCad. *Результаты.* Предложена принципиальная электрическая схема температурной компенсации, включающая повторитель напряжения и усилительный каскад на основе неинвертирующего включения операционного усилителя с температурно-зависимой цепью отрицательной обратной связи, позволяющая одновременно усилить выходное напряжение и снизить его температурную зависимость. Предложена методика определения параметров цепи отрицательной обратной связи. Проведено имитационное моделирование предложенной схемы и рассчитана температурная погрешность выходного сигнала. *Выводы.* Применение предложенной схемы и методики ее расчета позволяет снизить температурную погрешность чувствительности почти в четыре раза.

A b s t r a c t. *Background.* The object of the research is temperature error of sensitivity for semiconductor piezoresistive pressure sensors. The subject of the research is methods of temperature error decreasing based on application of active electronic circuits. The article is aimed at the design of temperature compensation circuit based on operational amplifier and the design of method for determining negative feedback loop parameters. *Materials and methods.* For the development of temperature compensation circuit and the method of its determining MathCad software is used. *Results.* The circuit containing the voltage repeater and amplifier based on non-inverting operational amplifier with temperature-dependent circuit of negative feedback and allows to increase output voltage and to decrease the output temperature dependence simultaneously is proposed. The method of determining the parameters of the negative feedback loop is proposed. A simulation of the proposed circuit is done and output temperature error is calculated. A simulation of the proposed circuit is done and output temperature error is calculated. *Conclusions.* Application of the proposed circuit and methods of its design allows to decrease temperature error of sensitivity almost four times.

К л ю ч е в ы е с л о в а: полупроводниковый тензорезистор, температурная погрешность чувствительности, операционный усилитель, температурная компенсация, терморезистор.

К е у w o r d s: semiconductor strain gauge, temperature error of sensitivity, operational amplifier, temperature compensation, thermistor.

Введение

Получившие в настоящее время широкое распространение полупроводниковые датчики давления для систем управления и контроля наряду с несомненными достоинствами (высокая чувствительность, малые габариты, возможность изготовления в интегральном исполнении и т.д.) обладают одним существенным недостатком, заключающимся в значительной температурной погрешности выходного сигнала [1, 2]. Причем, если у металлических тонкопленочных тензорезисторов наибольший вклад в температурную погрешность вносит аддитивная составляющая (погрешность начального выходного сигнала), то у полупроводниковых тензорезисторов величины температурного коэффициента сопротивления (ТКС) и температурного коэффициента чувствительности (ТКЧ) сравнимы между собой [1]. Это вызывает значительную мультипликативную составляющую температурной погрешности, которая особенно велика при эксплуатации датчиков в широком диапазоне повышенных температур [3–9].

В ряде случаев задача снижения температурной погрешности может быть решена при питании мостовой схемы постоянным током, но для этого необходимы определенные соотношения между ТКС и ТКЧ тензорезисторов, что выполняется далеко не всегда [1]. Кроме того, в этом случае требуется высокостабильный источник тока, обладающий повышенной сложностью и стоимостью по сравнению с источником напряжения. По этой причине представляется актуальной задача исследования возможностей использования схемотехнических методов для компенсации температурной погрешности [10, 11]. Применение усилителей с температурно-зависимыми элементами было предложено еще во второй половине XX в., однако в литературе рассмотрена компенсация температурной погрешности чувствительности лишь для традиционных полупроводниковых резистивных структур, в которых изоляция тензорезисторов от подложки (мембраны) осуществлялась посредством обратного смещенного p - n -перехода, ограничивающего верхнюю границу диапазона рабочих температур значением порядка 120 °C [1, 5, 9]. Кроме того, большая часть рассмотренных схем предполагает использование биполярных транзисторов, которые должны размещаться в тех же температурных условиях, что и тензорезисторы, но это не всегда возможно из конструктивно-технологических соображений.

В настоящее время широкое распространение получили усилительные схемы на основе операционных усилителей, позволяющие реализовать различные математические операции с выходным сигналом. Традиционно схемы на основе операционных усилителей используются для построения инструментальных усилителей. Такие усилители могут быть дополнены каскадами с температурно-зависимыми элементами во входных цепях и/или цепях обратной связи. Достоинством такого подхода являются высокие технические характеристики операционных усилителей и необходимость размещения на чувствительном элементе датчика только одного термозависимого элемента, в качестве которого, как правило, вступает полупроводниковый терморезистор.

Постановка задачи

Уменьшение температурной погрешности чувствительности мостовой схемы можно осуществлять включением компенсационного термозависимого элемента во входную или выходную диагонали моста, например, как показано на рис. 1. В данной схеме термозависимый элемент (терморезистор) включен на входе моста последовательно с источником питания. Резисторы R_1 , R_2 , и R_d , соединенные параллельно-последовательно с терморезистором R_t , обеспечивают выбор необходимого значения ТКС компенсационной цепи.

Температурная компенсация чувствительности мостовой схемы достигается в случае, когда питающее напряжение моста U_m изменяется под воздействием температуры с температурным коэффициентом, равным по величине, но противоположным по знаку ТКЧ. Схемы на основе терморезистора позволяют в отдельных случаях снизить температурный дрейф чувствительности в 18 раз в диапазоне температур ± 60 °C при исходном значении ТКЧ = 0,3 % на 1 °C.

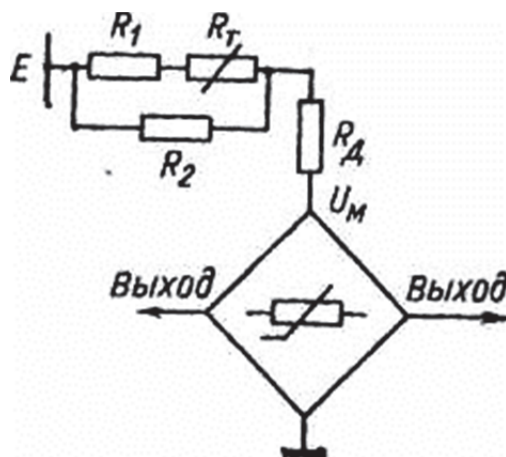


Рис. 1. Схема компенсации температурной погрешности чувствительности

Основным недостатком таких схем температурной компенсации является снижение выходного сигнала мостовой схемы вследствие уменьшения напряжения питания, так как в схеме на рис. 1 часть напряжения падает на резисторах компенсационной цепи.

В качестве компенсаторов, включаемых в питающую цепь моста, используются также схемы с прямосмещенными $p-n$ -переходами. Этот способ компенсации основан на том, что падение напряжения на прямо-смещенном $p-n$ -переходе уменьшается с температурой. Для температурной компенсации чувствительности необходимое число последовательно включенных прямосмещенных диодов подсоединяется в питающую цепь моста последовательно с источником напряжения. Такой метод компенсации позволяет снизить температурный дрейф чувствительности с 0,19 до 0,025 % на 1 °C в диапазоне температур 20–85 °C. Точность диодной компенсации ограничивается тем, что в схеме можно использовать только целое число диодов.

Диодную цепочку можно заменить биполярным транзистором, изготовленным в интегральном исполнении на мембране полупроводникового чувствительного элемента, как показано на рис. 2. Необходимый уровень компенсации достигается выбором значений постоянных резисторов R_1 и R_2 . При выполнении соотношений $R_1 = R_2$ такая схема эквивалентна n последовательно включенным эмиттерно-базовым переходам. Однако в этом случае число n может принимать любое значение, что снимает ограничения на точность компенсации, присущие диодной схеме. До компенсации значение ТКЧ преобразователя составляет около 0,2 % на 1 °C, а после компенсации оказывается незначительным и вносит ничтожно малый вклад в общую температурную погрешность, определяемую в основном дрейфом нуля.

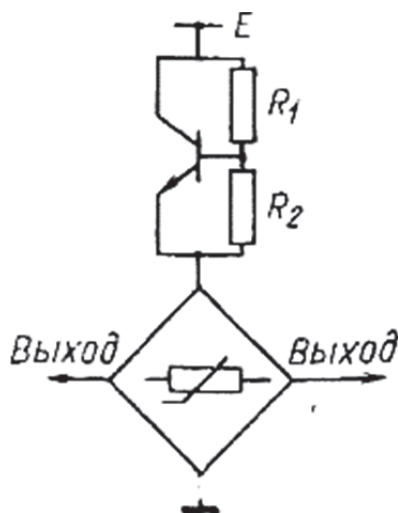


Рис. 2. Биполярный транзистор в цепи питания мостовой схемы

Основным недостатком такого способа компенсации является сложность изготовления транзистора и постоянных пленочных резисторов R_1 и R_2 на мембране ЧЭ, а также сложность обеспечения одинакового температурного воздействия на тензорезисторы и транзистор.

Активные схемы компенсации во входной цепи моста должны обеспечивать изменение питающего напряжения в соответствии с температурной зависимостью чувствительности. Таким образом, схема компенсации может представлять собой регулятор напряжения или тока с температурно-зависимым выходным параметром. Выходной электрический сигнал тензопреобразователя, как правило, усиливается до требуемого уровня с помощью усилителя. Сделав коэффициент усиления такого усилителя K_v зависимым от температуры, можно осуществить температурную компенсацию выходного сигнала [1].

На рис. 3 представлена активная схема температурной компенсации чувствительности на основе неинвертирующего включения операционного усилителя с температурно-зависимой цепью отрицательной обратной связи. Выходной сигнал мостовой схемы, объединяющей полупроводниковые тензорезисторы R_1 – R_4 , поступает на вход повторителя с высоким входным сопротивлением DA1.1, со входа повторителя сигнал поступает на вход неинвертирующего усилителя на микросхеме DA1.2.

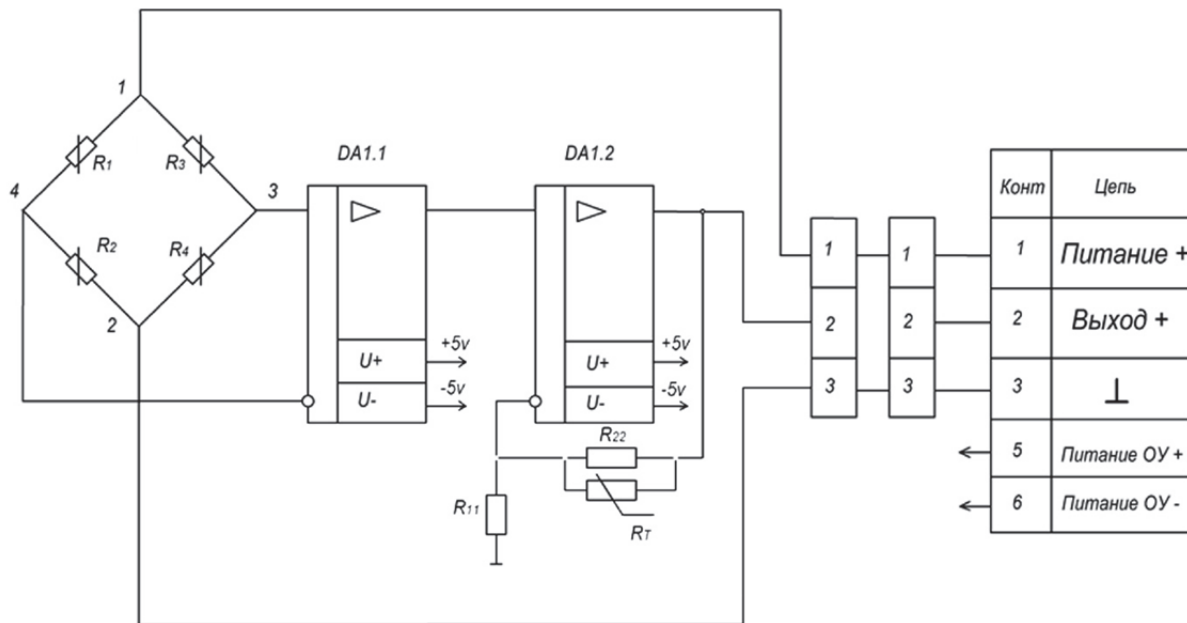


Рис. 3. Схема температурной компенсации погрешности чувствительности на базе операционного усилителя.

Сопротивление цепи обратной связи усилителя R_{fb} определяется выражением

$$R_{fb} = \frac{R_{22}R_t}{R_{22} + R_t}, \quad (1)$$

где R_{22} – постоянный резистор, включенный параллельно терморезистору R_t .

Сопротивление терморезистора R_t определяется выражением

$$R_t = R_{t0}(1 + \beta\Delta T), \quad (2)$$

где R_{t0} – номинал терморезистора при нормальной температуре; β – ТКС терморезистора.

Напряжение на выходе усилителя будет равно

$$U = U_m \left(1 + \frac{R_{fb}}{R_{11}} \right), \quad (3)$$

где U_m – выходное напряжение мостовой схемы; R_{11} – постоянный резистор в цепи отрицательной обратной связи.

Сопротивления тензорезисторов мостовой схемы будут равны

$$\begin{aligned} R_1 &= R_0 [(1 + \alpha \Delta T) + k_0 \varepsilon (1 + \gamma \Delta T)]; \\ R_2 &= R_0 [(1 + \alpha \Delta T) - k_0 \varepsilon (1 + \gamma \Delta T)]; \\ R_3 &= R_0 [(1 + \alpha \Delta T) - k_0 \varepsilon (1 + \gamma \Delta T)]; \\ R_4 &= R_0 [(1 + \alpha \Delta T) + k_0 \varepsilon (1 + \gamma \Delta T)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Выходное напряжение мостовой схемы определяется выражением

$$U_m = U_n \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (5)$$

С учетом (1), (2), (4) и (5) выражение (3) преобразуется к следующему виду:

$$U = \frac{U_n k_0 \varepsilon (1 + \gamma \Delta T) (R_{11} R_{22} + R_{11} R_{t0} + R_{22} R_{t0} + R_{11} R_{t0} \beta \Delta T + R_{22} R_{t0} \beta \Delta T)}{R_{11} (1 + \alpha \Delta T) (R_{22} + R_{t0} + R_{t0} \beta \Delta T)}, \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что в нем присутствуют два неизвестных сопротивления в цепи отрицательной обратной связи усилителя R_{11} и R_{22} . Одно из этих постоянных сопротивлений можно задать из условия упрощения конструкции и повышения технологичности изготовления, например, принять значение R_{11} равным номиналу тензорезисторов. Тогда значение R_{22} можно определить из условия равенства нулю температурной чувствительности схемы:

$$\frac{\partial U}{\partial T} = 0, \quad (7)$$

где U определяется согласно выражению (6).

Решение этого уравнения относительно R_{22} дает

$$\begin{aligned} R_{22} &= \frac{1}{2 \left(\gamma R_{t0} \alpha \beta \Delta T^2 + 2 \gamma R_{t0} \beta \Delta T + \gamma R_{11} + \gamma R_{t0} + R_{t0} \beta - R_{11} \alpha - R_{t0} \alpha \right)} \times \\ &\times \left((\beta \Delta T + 1) \left[R_{t0}^3 (\alpha - \gamma) (4 R_{11} \beta - \gamma R_{t0} + \alpha R_{t0} - \gamma R_{t0} \beta^2 \Delta T^2 + 4 \gamma R_{11} \beta \Delta T - \right. \right. \\ &- 2 \gamma R_{t0} \beta \Delta T + R_{t0} \beta^2 \alpha \Delta T^2 + 4 R_{11} \alpha \beta \Delta T + 2 R_{t0} \alpha \beta \Delta T + 4 \gamma R_{11} \alpha \beta \Delta T^2) \left. \right]^{\frac{1}{2}} + \\ &+ \left(-R_{t0}^2 \alpha + R_{t0}^2 \gamma + 2 \gamma R_{11} R_{t0} - 2 \alpha R_{11} R_{t0} + R_{t0}^2 \beta \gamma \Delta T - R_{t0}^2 \alpha \beta \Delta T \right) \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Выражение (8) показывает, что значение сопротивления R_{22} является температурно-зависимым, однако, как будет показано далее, эта зависимость в первом приближении близка к линейной, что позволит использовать выражение (8) на практике.

Методика расчета схемы температурной компенсации включает в себя следующие этапы:

1. На изготовленном чувствительном элементе измеряется сопротивление R_0 тензорезисторов при нормальных условиях.
2. Измеряется и усредняется ТКС α тензорезисторов.
3. Измеряется сопротивление терморезистора R_t при нормальных условиях.
4. Измеряется ТКС β терморезистора R_t .
5. Задается сопротивление в цепи отрицательной обратной связи усилителя R_{11} .
6. По формуле (8) определяется значение подстроечного резистора R_{22} для значения температуры, равного середине заданного температурного диапазона.
7. Строится зависимость напряжения на выходе усилителя от температуры.
8. Если значение выходного напряжения, соответствующее конечной точке температурного диапазона, меньше чем значение, соответствующее начальной точке, то значение сопротивления R_{22} , определенное в п. 4, необходимо уменьшать до значения, при котором значения выходного сигнала в начале и в конце температурного диапазона совпадут, в противном случае значение сопротивления R_{22} необходимо уменьшать.

Для проверки предложенной схемы и методики расчета ее параметров целесообразно выполнить математическое моделирование в специализированной программе [12, 13].

Исходные данные для моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Максимальная деформация тензорезисторов ε	$5 \cdot 10^{-4}$
ТКС тензорезисторов α , $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$8 \cdot 10^{-4}$
ТКС терморезистора β , $^{\circ}\text{C}^{-1}$	$16 \cdot 10^{-4}$
Номинал тензорезисторов R_0 , Ом	2500
Номинал терморезистора R_t , Ом	7500
Коэффициент тензочувствительности тензорезисторов k_0	80
Напряжение питания мостовой схемы U_n , В	3
Диапазон рабочих температур ΔT , $^{\circ}\text{C}$	20–200
Сопротивление R_{11} , Ом	2500

На рис. 4 представлено выходное напряжение мостовой схемы при деформации, соответствующей максимальному давлению, в заданном температурном диапазоне.

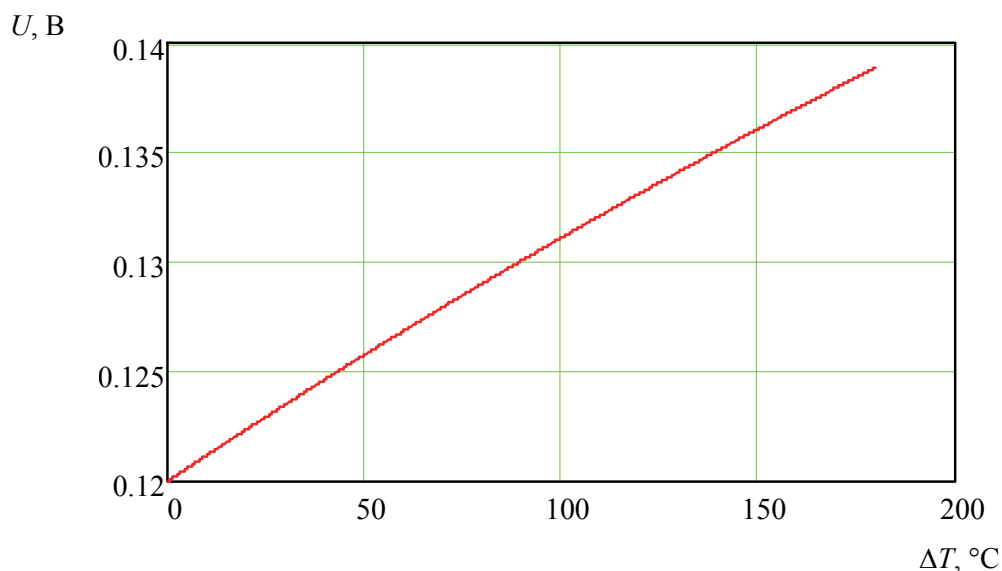
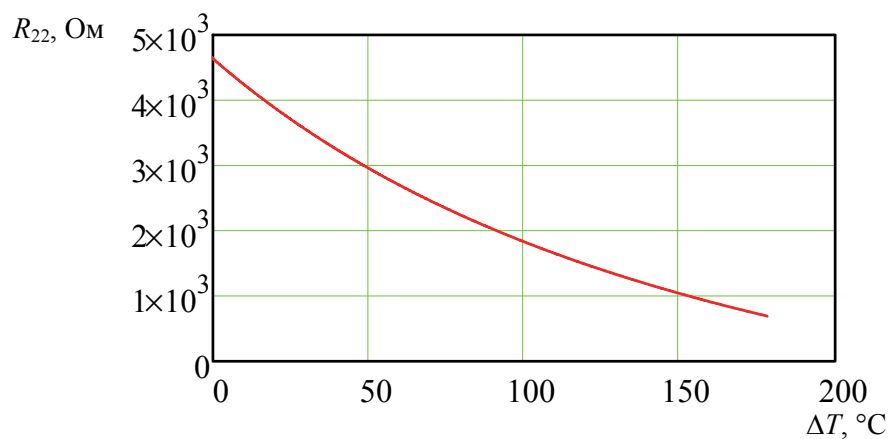


Рис. 4. Выходное напряжение мостовой схемы

Как видно из рис. 4, температурная грешность выходного сигнала, обусловленная температурной зависимостью тензочувствительности, составляет более 12,5 %, или 0,07 % на 1°C , что не удовлетворяет современным требованиям к датчикам давления.

По формуле (8) определяется значение сопротивления R_{22} (рис. 5).

Рис. 5. Зависимость сопротивления подстроечного резистора R_{22} от температуры

В соответствии с предложенной методикой выбирается значение сопротивления, соответствующее середине температурного диапазона, т.е. $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для заданных исходных данных это значение равно $2502\text{ }\Omega$.

По формуле (8) определяется выходное напряжение усилителя, зависимость которого от температуры представлена на рис. 6.

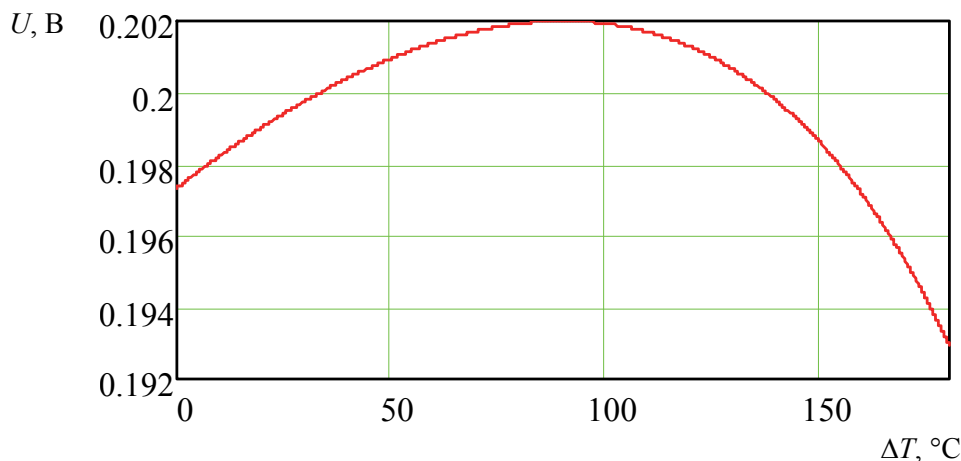


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения усилителя от температуры

Как видно из рис. 6, выходное напряжение усилительной цепи на 64% больше, чем выходное напряжение мостовой схемы, при этом температурная погрешность составляет $4,6\%$, или $0,026\%$ на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Далее в соответствии с п. 6 предложенной методики, сопротивление R_{22} было уменьшено до значения $1750\text{ }\Omega$, что позволило получить зависимость выходного напряжения усилителя от температуры, представленную на рис. 7. Из анализа рис. 7 видно, что погрешность выходного сигнала составляет $3,2\%$, или $0,018\%$ на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (почти в четыре раза меньше, чем без схемы температурной компенсации), при этом значения напряжения в начальной и конечной точках температурного диапазона совпадают.

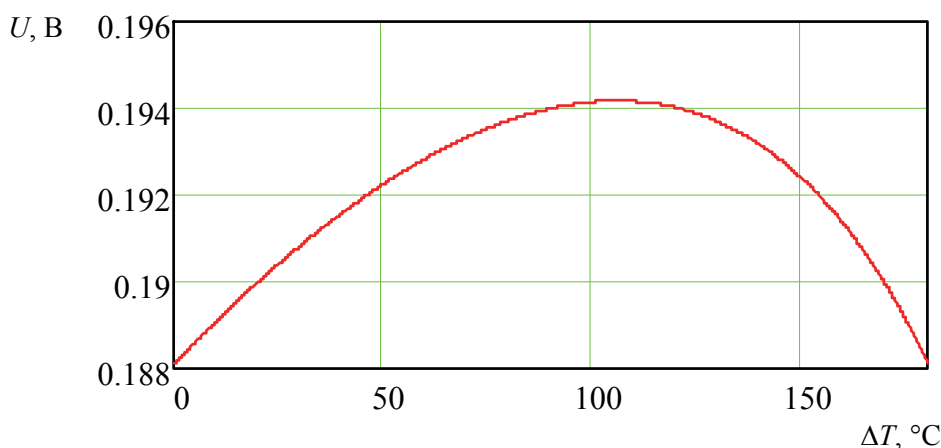


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения от температуры при уменьшении сопротивления подстроечного резистора R_{22}

Заключение

Предложенная схема и методика ее расчета позволяют снизить температурную погрешность чувствительности при одновременном усилении выходного напряжения мостовой схемы, что позволяет снизить напряжение питания мостовой схемы с целью уменьшения саморазогрева тензорезисторов, при этом схема использует простые электронные компоненты и сопрягается с типовыми схемами инструментальных усилителей, что позволяет использовать ее для повышения точности полупроводниковых датчиков давления.

Список литературы

1. Ваганов, В. И. Интегральные тензопреобразователи / В. И. Ваганов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
2. Баринов, И. Н. Повышение долговременной стабильности датчиков давления, эксплуатирующихся в особо жестких условиях ракетно-космической техники / И. Н. Баринов, В. С. Волков, Н. О. Голотенков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – Спецвыпуск. – С. 255–265.
3. Баринов, И. Н. Состояние разработок и тенденции развития высокотемпературных тензорезистивных датчиков давлений на основе карбида кремния / И. Н. Баринов, Б. В. Цыпин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 11. – С. 50–60.
4. Баринов, И. Н. Высокотемпературные тензорезистивные датчики давлений на основе карбида кремния. Состояние разработок и тенденции развития / И. Н. Баринов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 8. – С. 64–71.
5. Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий / С. А. Козин, А. В. Федулов, В. Е. Пауткин, И. Н. Баринов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 1. – С. 24–27.
6. Баринов, И. Н. Высокотемпературные чувствительные элементы датчиков давления со структурой «кремний на диэлектрике» / И. Н. Баринов // Датчики и системы. – 2007. – № 1. – С. 36–38.
7. Баринов, И. Н. Разработка и изготовление микроэлектронных датчиков давления для особо жестких условий эксплуатации / И. Н. Баринов, В. С. Волков, Б. В. Цыпин, С. П. Евдокимов // Датчики и системы. – 2014. – № 2. – С. 49–61.
8. Баринов, И. Н. Оптимизация чувствительного элемента датчика давления с поликремниевыми тензорезисторами / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы. – 2013. – № 2. – С. 1–5.
9. Баринов, И. Н. Полупроводниковые тензорезистивные датчики давления на основе КНД-структуры / И. Н. Баринов // Компоненты и технологии. – 2009. – № 5. – С. 12–15.
10. Волков, В. С. Снижение температурной зависимости начального выходного сигнала высокотемпературного полупроводникового датчика давления на структуре «поликремний – диэлектрик» / В. С. Волков // Надежность и качество – 2013 : тр. Междунар. симпозиума : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 1 т. – С. 75–77.
11. Волков, В. С. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 30–36.
12. Волков, В. С. Автоматизация разработки диагностического обеспечения интеллектуальных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Приборы. – 2009. – № 12. – С. 20–26.
13. Волков, В. С. Использование системы Simulink при имитационном моделировании высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Приборы. – 2011. – № 7. – С. 50–55.

Волков Вадим Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
помощник начальника центра,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/6)
E-mail: distortions@rambler.ru

Volkov Vadim Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor,
assistant of head of department,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Кучумов Евгений Владимирович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/6)
E-mail: mzungu@inbox.ru

Kuchumov Evgeniy Vladimirovich

candidate of technical sciences,
senior staff scientist,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/6 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Кикот Виктор Викторович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: inbox@post.su

Kikot Viktor Viktorovich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Французов Максим Владимирович

магистрант,
кафедра приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: distortions@rambler.ru

Frantsuzov Maksim Vladimirovich

master student,
sub-department of Instrument Making,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.3.032

Волков, В. С.

Применение схемы на основе операционного усилителя для температурной компенсации полупроводникового тензорезистивного датчика давления / В. С. Волков, Е. В. Кучумов, В. В. Кикот, М. В. Французов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 4 (14). – С. 42–50.