

В. С. Волков, Н. В. Волкова, М. С. Конкина

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ
РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЧАСТОТУ**

V. S. Volkov, N. V. Volkova, M. S. Konkina

**THE ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES
OF USING SEMICONDUCTOR STRAIN GAGES
TO BUILD FREQUENCY INTEGRATING UNFOLDING
CONVERTERS OF MECHANICAL VALUES INTO FREQUENCY**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью исследования является анализ возможностей применения мостовых схем с полупроводниковыми тензорезисторами совместно с частотными интегрирующими и развертывающими преобразователями для создания чувствительных элементов датчиков, работоспособных в условиях повышенных температур. **Материалы и методы.** Применены классические методы физики полупроводников, полупроводниковой тензометрии и электрических цепей постоянного и переменного тока для расчета зависимости сопротивления полупроводникового тензорезистора от деформации и температуры и частоты напряжения на выходе ЧИРП. **Результаты.** Получено выражение для выходного сигнала частотного интегрирующего развертывающего преобразователя с полупроводниковой мостовой схемой, доказывающее, что учет температурной зависимости тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов приводит к появлению зависимости выходной частоты от температуры, а также проведены расчеты численных характеристик выходного сигнала ЧИРП и его температурной погрешности с учетом числовых значений параметров мостовой схемы с полупроводниковыми тензорезисторами. **Выводы.** На основании проведенных расчетов сделан вывод, что вследствие температурной зависимости тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов возникает дополнительная мультипликативная составляющая погрешности выходной частоты ЧИРП, и, как следствие, требуется разработка дополнительных методов и средств температурной компенсации с учетом особенностей полупроводниковых тензорезисторов.

A b s t r a c t. Background. The object of the research is analyzing the possibilities of using bridge circuits with semiconductor strain gages in conjunction with frequency integrating and deploying converters to create sensitive sensor elements that work under high temperatures. **Materials and methods.** Methods of semiconductor physics, semiconductor tensometry, and DC and AC electrical circuits for calculating the dependence of the resistance of a semiconducting resistive-strain gauge on the strain and temperature and frequency of the voltage at the output of the FIUC. **Results.** The resulting expression for the output signal frequency integrating deployer converter with a semiconductor rectifier circuit, proving that accounting for the

temperature dependence of the stress sensitivity of semiconducting resistive-strain leads to a dependence of the output frequency of the temperature, and the calculations of numerical characteristics of the output FIUC signal and temperature error taking into account the typical parameters of the bridge circuit with semiconducting resistive-strain gauges. **Conclusions.** Based on the calculations made, it is concluded that due to the temperature dependence of the strain sensitivity of semiconductor strain gages, an additional multiplicative component of the error of the output frequency of the FIUC occurs, and, as a result, it is necessary to develop additional methods and means of temperature compensation, taking into account the features of semiconductor strain gages.

К л ю ч е в ы е с л о в а: чувствительный элемент, МЭМС-технологии, полупроводниковый тензорезистор, мостовая схема, тензочувствительность, частотный интегрирующий развертывающий преобразователь (ЧИРП).

К e y w o r d s: sensitive element, MEMS technologies, semiconducting resistive-strain gauge, bridge circuit, strain sensitivity, frequency integrating unfolding converter (FIUC).

Введение

К современным средствам измерений механических величин предъявляются высокие требования по точности и чувствительности одновременно с уменьшением массы и габаритных размеров. Поскольку основной вклад в характеристики датчика вносят характеристики чувствительно элемента (ЧЭ), то наиболее перспективной тенденцией совершенствования средств измерений представляется использование МЭМС-технологий для изготовления датчиков для измерения давления, перемещения, деформации, крутящего момента и т.д. В то же время в последние десятилетия электронная компонентная база измерительных приборов и систем была значительно усовершенствована, что открывает новые возможности по созданию средств измерений с цифровым выходным сигналом. Таким образом, сочетание перспективных МЭМС-технологий и цифровых методов преобразования и обработки измерительных сигналов позволит совершить качественный скачок в научно-технической сфере Российской Федерации, что напрямую позволяет решить задачи по внедрению и развитию цифровой экономики, поставленные, в частности, в Указе президента РФ от 7 мая 2018 г. [1].

Одним из наиболее простых методов создания датчиков механических величин с цифровым выходным сигналом является преобразование параметров датчиков в частоту, обладающее рядом достоинств. Во-первых, при использовании частотных преобразователей открывается возможность достижения более высокой точности измерения, чем в преобразователях амплитуд сигналов. Во-вторых, частотный сигнал обладает высокой помехоустойчивостью и малой чувствительностью к изменению параметров линий связи. В-третьих, обработка частотных сигналов и их точное интегрирование по времени выполняются достаточно просто. Одним из наиболее перспективных направлений создания частотных преобразователей параметров датчиков резистивного типа является построение их на основе метода интегрирующего развертывающего преобразования. Достоинствами таких преобразователей являются широкие функциональные возможности, помехоустойчивость, относительная простота реализации и настройки схем, технологичность изготовления [2, 3].

При этом одним из наиболее распространенных и технически отработанных принципов действия ЧЭ является использование тензорезистивной мостовой схемы. Со второй половины 20 века в мостовых схемах широко применяются полупроводниковые тензорезисторы, обладающие значительно более высокой тензочувствительностью, чем металлические. Применение для их изготовления МЭМС-технологий позволило получать ЧЭ размером не более единиц миллиметров с минимальным энергопотреблением и высокой чувствительностью. Следовательно, перспективным направлением совершенствования датчиков механических величин представляется сочетание полупроводниковых тензорезистивных мостовых схем и методов преобразования выходного напряжения мостовой схемы в частоту [2, 6–12]. Известным недостатком полупроводниковых тензорезисторов является значительная температурная зависимость характеристик (сопротивления и тензочувствительности), которая требует примене-

ния методов температурной компенсации при создании ЧЭ датчиков, работоспособных в условиях повышенных температур [4, 5].

Частотные измерительные преобразователи параметров резистивных датчиков с использованием методов интегрирующего развертывающего преобразования (ЧИРП) в настоящее время являются перспективными средствами построения систем измерения и управления благодаря высокой помехозащищенности выходного сигнала, а также простому преобразованию его в цифровой код [2, 6–12].

Большинство технических решений частотных преобразователей сигналов содержат на входе мостовые измерительные схемы с металлическими тонкопленочными тензо- и терморезисторами, служащие для преобразования давления, действующего на упругий элемент в виде круглой жесткозашемленной мембраны, в электрическое напряжение, при этом выход мостовой схемы подключен к СИРП на основе операционных усилителей (рис. 1) [2]. Основным недостатком данных частотных преобразователей является повышение температуры резисторов мостовой схемы, в том числе вследствие саморазогрева, что приводит к появлению дополнительной температурной погрешности выходного сигнала [2].

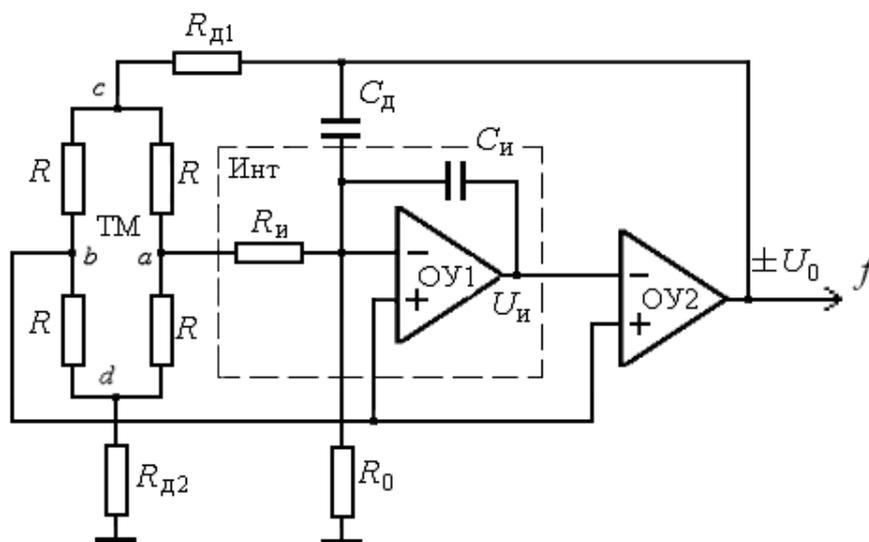


Рис. 1. Функциональная схема ЧИРП с мостовой тензорезистивной схемой [1]

Учеными Пензенского государственного университета разработано и запатентовано несколько технических решений, направленных на снижение дополнительной температурной погрешности ЧИРП с мостовой резистивной схемой [6–12]. Однако данные технические решения посвящены ЧИРП с тензомостами на основе металлопленочных тензорезисторов, которые характеризуются относительно низкой тензочувствительностью (приблизительной равной 2), а также преобладанием аддитивной составляющей температурной погрешности выходного сигнала тензомоста, вызванной зависимостью номинального сопротивления металлического тензорезистора от температуры. В то же время для полупроводниковых тензорезисторов характерна высокая тензочувствительность (100 и выше), а также наличие существенной зависимости тензочувствительности от температуры, что является причиной появления значительной мультипликативной составляющей выходного сигнала мостовой схемы. Поэтому известные схемы ЧИРП мостовых тензосхем не учитывают особенностей полупроводниковых тензорезисторов и не могут обеспечить заданную точность при их работе в условиях повышенных температур.

Известно, что зависимость сопротивления полупроводникового тензорезистора от деформации и температуры определяются выражением

$$R(\varepsilon, T) = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)(1 \pm k_0(1 + \gamma \cdot \Delta T)\varepsilon), \quad (1)$$

где R_0 – номинал тензорезистора при нормальной температуре, α – температурный коэффициент сопротивления, k_0 – коэффициент тензочувствительности тензорезистора при нормальной

температуре, ε – относительная деформация тензорезистора, γ – температурный коэффициент тензочувствительности, ΔT – диапазон изменения рабочей температуры тензорезистора [5].

Рассмотрим тензопреобразователь, состоящий из мостовой схемы (МС), содержащей полупроводниковые тензорезисторы, интегратор на базе операционного усилителя ОУ₁ с емкостной отрицательной обратной связью, сравнивающее устройство СУ на базе ОУ₂ и дозирующий конденсатор C_d (см. рис. 1) [2].

В установившемся режиме работы устройства с выхода сравнивающего устройства ОУ₂ следуют разнополярные импульсы амплитудой $\pm U_0$. Пусть в момент времени t_1 произошла смена полярности выходного напряжения с минус U_0 на $+U_0$. При этом напряжение на выходе интегратора обусловлено положительным «скачком» напряжения с одной из вершин измерительной диагонали тензометрического моста, равным $0,5U_0(1+\varepsilon_m)$, где $\varepsilon_m = \Delta R/R$ – относительное изменение сопротивления МС, и отрицательным «скачком» через дозирующий конденсатор C_d , равным $-2(C_d/C_n)U_0$, где C_n – значение емкости интегратора [2].

Под действием напряжения разбаланса МС, равного $-\varepsilon_m U_0$, напряжение на выходе интегратора будет увеличиваться до положительного порогового уровня блока сравнения ОУ₂, равного $\frac{U_0}{2}(1+\varepsilon_m)$.

В момент равенства порога срабатывания и напряжения на выходе интегратора вновь произойдет смена полярности выходного напряжения.

При этом напряжение на выходе интегратора будет равно

$$U_n(t_2) = \frac{U_0}{2}(1+\varepsilon_m) - 2\frac{C_d}{C_n}U_0 + \varepsilon_m U_0 \frac{t_2 - t_1}{\tau_n}, \quad (2)$$

где $\tau_n = R_n C_n$ – постоянная времени интегратора [2].

Для момента равенства напряжений на выходе интегратора и порогового уровня СУ справедливо выражение

$$\frac{U_0}{2}(1+\varepsilon_m) = \frac{U_0}{2}(1+\varepsilon_m) - 2\frac{C_d}{C_n}U_0 + \varepsilon_m U_0 \frac{T}{2R_n C_n}, \quad (3)$$

где T – период следования выходного напряжения.

Из выражения (3) определяем частоту выходного сигнала

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\varepsilon_m}{4R_n C_n}. \quad (4)$$

При учете температурной зависимости параметров полупроводникового тензорезистора в соответствии с уравнением (1) выражение для относительного изменения сопротивления первого тензорезистора будет иметь вид

$$\varepsilon_R = \frac{R_1 - R_0}{R_0} = \alpha \Delta T - k_0 \varepsilon - k_0 \varepsilon \gamma \Delta T - k_0 \varepsilon \alpha \Delta T - k_0 \varepsilon \alpha \gamma \Delta T^2. \quad (5)$$

Тогда относительные изменения сопротивления правого полумоста, состоящего из тензорезисторов R_1 и R_2 , будет равно

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2} + \frac{k_0 \varepsilon}{2} + \frac{k_0 \varepsilon \gamma \Delta T}{2} + \frac{k_0 \varepsilon}{2\alpha \Delta T} + \frac{k_0 \varepsilon \gamma}{2\alpha}. \quad (6)$$

С учетом выражения (1) формула (3) преобразуется следующим образом:

$$U_0(\varepsilon_{12}) = U_0(\varepsilon_{12}) - 2\frac{C_d}{C_n}U_0 + U_0 \left(\frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right) \frac{T}{2R_n C_n}. \quad (7)$$

Решение уравнения (7) с учетом уравнения (1) дает следующее выражение для выходного сигнала ЧИРП:

$$f = \frac{k_0 \varepsilon (1 + \gamma \Delta T)}{4C_d R_i} \quad (8)$$

Как видно из формулы (8), учет температурной зависимости тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов приводит к появлению зависимости выходной частоты от температуры, т.е. дополнительной мультипликативной составляющей погрешности.

Для оценки численных характеристик ЧИРП МС с полупроводниковыми тензорезисторами рассмотрим типичные параметры МС: номинальное сопротивление тензорезистора $R_0 = 1000$ Ом, коэффициент тензочувствительности $k_0 = 100$, деформация тензорезисторов $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$, емкость дозирующего конденсатора $C_d = 100$ пкФ, сопротивление интегратора $R_i = 50 R_0$, ТКЧ тензорезисторов $\gamma = 0,0012 \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, диапазон рабочих температур $\Delta T = 100$ °С.

Тогда рассчитанное по формуле (2) номинальное значение частоты выходного сигнала будет оставлять $2,5 \cdot 10^3$ Гц, а значение частоты при разности температур $\Delta T = 100$ °С, определенное по формуле (4), будет составлять $2,8 \cdot 10^3$ Гц. При этом погрешность выходной частоты составит 12 %, что не соответствует требованиям по точности, предъявляемым к современным датчикам физических величин.

Таким образом, применение ЧИРП для преобразования разбаланса мостовой схемы с полупроводниковыми тензорезисторами является перспективным направлением развития измерительной техники благодаря миниатюрности, высоким массогабаритным показателям и низкому энергопотреблению, но в то же время требует разработки дополнительных методов и средств компенсации температурной погрешности выходной частоты.

Заключение

Применение полупроводниковых тензорезисторов для создания чувствительных элементов датчиков механических величин совместно с частотными интегрирующими и развертывающими преобразователями позволяет создавать современные датчики с цифровым выходным сигналом, отличающиеся высокой чувствительностью, малой массой и габаритами, относительно невысоким энергопотреблением. Однако наличие температурной зависимости тензочувствительности полупроводниковых материалов требует разработки новых технических решений, направленных на повышение точности в условиях воздействия повышенных температур.

Библиографический список

1. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года : указ Президента от 7 мая 2018 г.
2. Громков, Н. В. Интегрирующие развертывающие преобразователи параметров датчиков систем измерения, контроля и управления : монография / Н. В. Громков. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009. – 244 с.
3. Волков, В. С. Современные направления развития преобразователей давления с частотным выходным сигналом / В. С. Волков, Д. А. Кудрявцева, И. Р. Вергазов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4 (10). – С. 20–29.
4. Кучумов, Е. В. Струнный автогенераторный измерительный преобразователь на основе пьезоструктуры / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринев, В. С. Волков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2 (8). – С. 58–65.
5. Волков, В. С. Исследование влияния концентрации легирующей примеси на температурную зависимость тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов / В. С. Волков, Е. А. Рыблова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 40–47.
6. А.с. СССР № 828406. Преобразователь сигнала разбаланса тензомоста в частоту / Громков Н. В., Михотин В. Д., Шахов Э. К., Шлядин В. М. ; Б.И.; 1981, № 17.
7. А.с. СССР № 828097 Интегрирующий преобразователь разбаланса тензомоста в частоту следования импульсов / Громков Н. В., Шахов С. Б., Шахов Э. К., Шлядин В. М. ; опубл. в Б.И., 1981, № 13.
8. А.с. СССР по заявке № 2918747/21 Частотный преобразователь для тензодатчиков / Громков Н. В. Михотин В. Д., Шахов С. Б., Шахов Э. К., Шлядин В. М.

9. Патент RU 2398196 Устройство для измерения давления на основе нано- и микроэлектромеханической системы с частотным выходным сигналом / Васильев В. А., Громков Н. В. ; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24.
10. Патент RU 2395060 Частотный преобразователь сигнала разбаланса тензомоста с уменьшенной температурной погрешностью / Васильев В. А., Громков Н. В. ; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20.
11. Патент RU 2430342 Полупроводниковый датчик давления с частотным выходным сигналом / Васильев В. А., Громков Н. В., Москалев С. А. ; опубл. 27.09.2011, Бюл. № 27.
12. Патент RU 2631494 Универсальный модуль частотного интегрирующего развертывающего преобразователя для датчиков физических величин / Васильев В. А., Громков Н. В., Жоао А. Ж. ; опубл. 20.09.2017, Бюл. № 27.

References

1. *O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda: ukaz Prezidenta ot 7 maya 2018 g.* [On national goals and strategic development goals of the Russian Federation for the period up to 2024: presidential decree of may 7, 2018]. [In Russian]
2. Gromkov N. V. *Integriruyushchie razvertyvayushchie preobrazovateli parametrov datchikov sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya: monografiya* [Integrating deployable converters of sensor parameters of measurement, control and control systems: monograph]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2009, 244 p. [In Russian]
3. Volkov V. S., Kudryavtseva D. A., Vergazov I. R. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 4 (10), pp. 20–29. [In Russian]
4. Kuchumov E. V., Barinov I. N., Volkov V. S. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 2 (8), pp. 58–65. [In Russian]
5. Volkov V. S., Ryblova E. A. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 2 (20), pp. 40–47. [In Russian]
6. A.s. SSSR № 828406. *Preobrazovatel' signala razbalansa tenzomosta v chastotu* [A. S. USSR No. 828406. Converter of the load cell unbalance signal to frequency]. Gromkov N. V., Mikhotin V. D., Shakhov E. K., Shlyandin V. M.; bull.; 1981, no. 17. [In Russian]
7. A.s. SSSR № 828097 *Integriruyushchiy preobrazovatel' razbalansa tenzomosta v chastotu sledovaniya impul'sov* [A. S. USSR no 828097 Integrating Converter of the strain bridge unbalance into the pulse repetition frequency]. Gromkov N. V., Shakhov S. B., Shakhov E. K., Shlyandin V. M.; publ. in bull., 1981, no. 13. [In Russian]
8. A.s. SSSR po zayavke № 2918747/21 *Chastotnyy preobrazovatel' dlya tenzodatchikov* [A. S. USSR on request No. 2918747/21 Frequency Converter for load cells]. Gromkov H. B. Mikhotin V. D., Shakhov S. B., Shakhov E. K., Shlyandin B. M. [In Russian]
9. Patent RU 2398196 *Ustroystvo dlya izmereniya davleniya na osnove nano- i mikroelektromekhanicheskoy sistemy s chastotnym vykhodnym signalom* [Patent RU 2398196 pressure measuring Device based on a nano - and microelectromechanical system with a frequency output signal]. Vasil'ev V. A., Gromkov N. V.; publ. 27.08.2010, bull. no. 24. [In Russian]
10. Patent RU 2395060 *Chastotnyy preobrazovatel' signala razbalansa tenzomosta s umen'shennoy temperaturnoy pogreshnost'yu* [Patent RU 2395060 Frequency Converter of the load cell unbalance signal with reduced temperature error]. Vasil'ev V. A., Gromkov N. V.; publ. 20.07.2010, bull. no. 20. [In Russian]
11. Patent RU 2430342 *Poluprovodnikovyy datchik davleniya s chastotnym vykhodnym signalom* [Patent RU 2430342 solid State pressure sensor with frequency output signal]. Vasil'ev V. A., Gromkov N. V., Moskalev S. A.; publ. 27.09.2011, bull. no. 27. [In Russian]
12. Patent RU 2631494 *Universal'nyy modul' chastotnogo integriruyushchego razvertyvayushchego preobrazovatelya dlya datchikov fizicheskikh velichin* [Patent RU 2631494 Universal module of frequency integrating unfolding Converter for physical quantity sensors]. Vasil'ev V. A., Gromkov N. V., Zhoao A. Zh.; publ. 20.09.2017, bull. no. 27. [In Russian]

Волков Вадим Сергеевич

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

Volkov Vadim Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of instrument making,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Волкова Наталия Валентиновна

кандидат биологических наук, доцент,
заведующий кафедрой химии, теории
и методики обучения химии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: distorsion@rambler.ru

Конкина Мария Сергеевна

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: distorsion@rambler.ru

Volkova Nataliya Valentinovna

candidate of biological sciences, associate professor,
head of sub-department of chemistry, theory
and methods of teaching chemistry,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Konkina Maria Sergeevna

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

Образец цитирования:

Волков, В. С. Анализ возможностей применения полупроводниковых тензорезисторов для построения частотных интегрирующих развертывающих преобразователей механических величин в частоту / В. С. Волков, Н. В. Волкова, М. С. Конкина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 2 (32). – С. 58–64. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-2-7.