

УДК 621.3.032
doi:10.21685/2307-5538-2022-1-4

КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЧАСТОТНЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МОСТОВЫХ ТЕНЗОСХЕМ

М. С. Конкина

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
myzochka@list.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью исследования является расчет параметров схемы частотного интегрирующего развертывающего преобразователя (ЧИРП) для компенсации температурной погрешности, возникающей вследствие разброса параметров тензорезисторов и воздействия повышенной температуры. *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, что для минимизации аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности выходного сигнала ЧИРП целесообразно применить оригинальное конструкторское решение для мостовой схемы, заключающееся в использовании тензорезистора с характеристиками, идентичными характеристикам полупроводниковых тензорезисторов, что позволит снизить аддитивную погрешность выходного сигнала более чем на 7 %. *Выводы.* На основании проведенных расчетов сделан вывод, что данное конструкторское решение является оптимальным средством температурной компенсации при разбросе номиналов полупроводниковых тензорезисторов мостовой схемы ЧИРП с учетом технологических особенностей полупроводниковых тензорезисторов.

Ключевые слова: погрешность, полупроводниковый тензорезистор, мостовая схема, тензочувствительность, ЧИРП

Благодарности. Автор выражает особую благодарность к.т.н., доценту Волкову Вадиму Сергеевичу за ценные советы и значимые замечания при проведении исследования и оформления данной статьи.

Для цитирования: Конкина М. С. Компенсация погрешностей частотных интегрирующих развертывающих преобразователей на основе полупроводниковых мостовых тензосхем // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1. С. 31–37. doi:10.21685/2307-5538-2022-1-4

ERROR COMPENSATION OF FREQUENCY INTEGRATING UNFOLDING CONVERTERS BASED ON SEMICONDUCTOR BRIDGE STRAIN CIRCUITS

M.S. Konkina

Penza State University, Penza, Russia
myzochka@list.ru

Abstract. *Background.* The purpose of the study is to calculate the parameters of the circuit of a frequency integrating unfolding converter to compensate for the temperature error resulting from the spread of the parameters of strain gages and the effects of elevated temperature. *Materials and methods.* Classical methods of semiconductor physics, semiconductor strain gauge and DC and AC electrical circuits are applied to calculate the dependence of the resistance of a semiconductor strain gauge on deformation and temperature and frequency of the voltage at the output of the FIUC. *Results.* It is found that in order to minimize the additive and multiplicative components of the error of the FIUC output signal, it is advisable to apply an original design solution for the bridge circuit, which consists in using a strain gauge with characteristics identical to those of semiconductor strain gauges, which will reduce the additive error of the output signal by more than 7 %. *Conclusions.* Based on the calculations carried out, it is concluded that this design solution is the optimal means of temperature compensation when the values of semiconductor strain gages of the FIUC bridge circuit are scattered, taking into account the technological features of semiconductor strain gages.

Keywords: error, semiconductor strain gauge, bridge circuit, strain sensitivity, FIUC

Acknowledgements. The author expresses special gratitude to candidate of technical sciences, associate professor Vadim S. Volkov, for valuable advice and significant comments during the research and design of this article.

For citation: Konkina M.S. Error compensation of frequency integrating unfolding converters based on semiconductor bridge strain circuits. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(1):31–37. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-1-4

Введение

Современные условия эксплуатации датчиков для измерения механических величин предполагают высокие требования к точности и помехозащищенности измерительного сигнала. Широкое распространение получили датчики тензорезистивного типа вследствие обширной области применения, относительно простой конструкции и удобства схемной реализации измерительной цепи (ИЦ) [1–4]. Для повышения помехозащищенности и упрощения интеграции таких датчиков в цифровые информационно-измерительные системы применяется включение тензомостов в состав частотных интегрирующих и развертывающих преобразователей (ЧИРП), обладающих высокой помехоустойчивостью и простотой преобразования выходного сигнала, представляющего собой последовательность прямоугольных импульсов, частота следования которых пропорциональна изменению сопротивлений мостовой схемы, в цифровой код [4].

Известно, что погрешности технологического процесса при изготовлении полупроводниковых тензорезисторов приводят к возникновению отклонений их номинальных сопротивлений, а также температурного коэффициента сопротивления (ТКС) и температурного коэффициента тензочувствительности (ТКЧ) от заданных значений и, как следствие, к начальному разбалансу мостовой схемы (МС), эквивалентному наличию ненулевого входного сигнала [2].

Большинство технических решений ЧИРП с мостовыми схемами 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 ЧИРП на основе операционных усилителей (рис. 1) [1]. Данным схемам присущ недостаток мостовых резистивных преобразователей в виде дополнительной температурной погрешности выходного сигнала, возникающей при эксплуатации преобразователей в области повышенных температур [1].

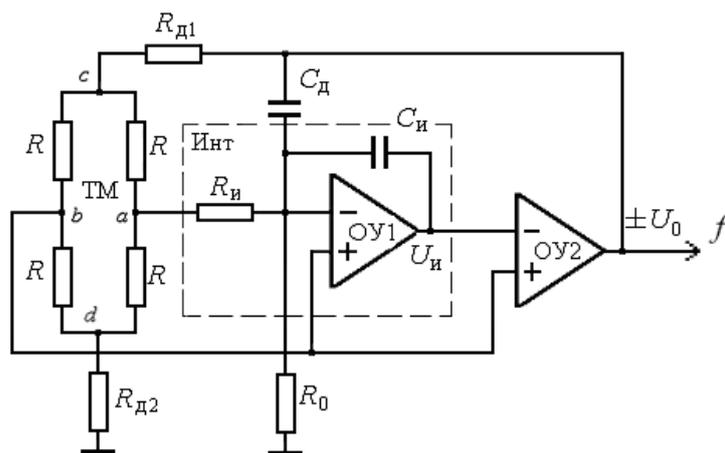


Рис. 1. Функциональная схема ЧИРП с мостовой тензорезистивной схемой [1]

Ранее решения данной проблемы были предложены преимущественно для МС с металлическими тонкопленочными тензо- и терморезисторами [3]. Однако при этом не учитывались особенности полупроводниковых тензорезисторов, имеющих значительный ТКС и сравнимый с ним по величине ТКЧ, что приводит к возникновению погрешности частоты следования импульсов на выходе ЧИРП, имеющей как аддитивную, так и мультипликативную составляющую [4].

Проведен расчет зависимости частоты от температуры и деформации с учетом разброса параметров по формуле (1) при изменении ΔT от 0 °С до 100 °С с шагом, равным 1°С [4, 5, 9].

Расчет показал, что значения аналитической зависимости частоты от температуры и деформации с учетом разброса параметров полупроводниковых тензорезисторов $f(\Delta T)$ в интервале от $2,9985 \cdot 10^3$ до $3,0027 \cdot 10^3$ Гц [4, 5, 8].

На основании полученных данных построен график аналитической зависимости частоты от температуры и деформации с учетом разброса параметров полупроводниковых тензорезисторов [8], представленный на рис. 3.

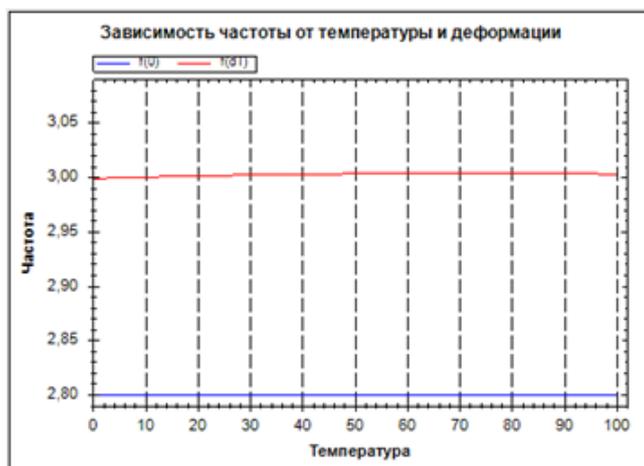


Рис. 3. График аналитической зависимости частоты от температуры и деформации с учетом разброса параметров полупроводниковых тензорезисторов

Таким образом, на основе результатов вычислений [4, 5, 8] с учетом разбаланса МС ЧИРП и зависимости частоты от температуры определена погрешность выходного сигнала ЧИРП, которая составляет 12 %, что не соответствует требованиям по точности, предъявляемым к современным датчикам физических величин.

Результаты и обсуждение

Рассмотрена методика компенсации температурной погрешности для высокочувствительных полупроводниковых датчиков [7, 11], согласно которой оптимальным решением является последовательное включение в схему тензомоста полупроводникового терморезистора с отрицательной температурной характеристикой. Данная методика была уточнена применительно для МС ЧИРП на основе полупроводниковых тензорезисторов, где роль терморезистора выполняет резистор интегратора в схеме ЧИРП.

Проведены расчеты и моделирование для МС ЧИРП, у которой в качестве термозависимого резистора используется резистор интегратора R_i , выполненный по тому же технологическому процессу, что и тензорезисторы МС с номинальным значением $R_i = R_{i0}$, и ТКС, равным $\gamma = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Определены составляющие погрешности частоты выходного сигнала с учетом разброса параметров полупроводниковых тензорезисторов при воздействии повышенной температуры ΔT , изменяющейся от 0 °С до 100 °С с шагом, равным 1 °С.

С учетом изменения температуры ΔT получены значения аддитивной составляющей погрешности выходного сигнала $\Delta_1 = 7,258 \%$ и мультипликативной составляющей погрешности выходного сигнала, равной $\Delta_0 = 0,157 \%$ [4, 5, 9].

Таким образом, сделан вывод [5], что, поскольку мультипликативная составляющая погрешности выходного сигнала менее 0,2 %, т.е. в 5 раз меньше, чем погрешность одного полупроводникового тензорезистора, погрешность частоты выходного сигнала является преимущественно аддитивной и составляет почти 8 %. Это вызвано разбросом номиналов полупроводниковых тензорезисторов, т.е. свидетельствует о несбалансированности тензомоста в начальный момент работы ЧИРП.

Исходя из критерия минимального значения температурной погрешности, произведем перерасчет значения ТКС при заданном начальном значении терморезистора R_i . Для обеспечения минимальной температурной погрешности задано начальное значение ТКС терморезистора R_i , равное ТКЧ полупроводниковых резисторов тензомоста при заданном начальном значении R_{i0} , чтобы определить оптимальное в данном случае значение ТКС.

На выходе получим оптимизированное значение $\gamma = 1,216 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ из расчета по формуле (1). Получив оптимизированное значение ТКС сопротивления интегратора, подставив данные в формулу (1), найдем оптимизированное номинальное значение сопротивления интегратора, равное $R_{i0} = 5,355 \cdot 10^4 \text{ Ом}$.

С учетом полученных оптимизированных значений ТКС сопротивления интегратора и номинального сопротивления интегратора, подставив значения в формулу (1), произведем перерасчет частоты выходного сигнала.

На рис. 4 представлен расчет составляющих погрешности выходного сигнала ЧИРП с учетом оптимизированных параметров резистора интегратора [10].

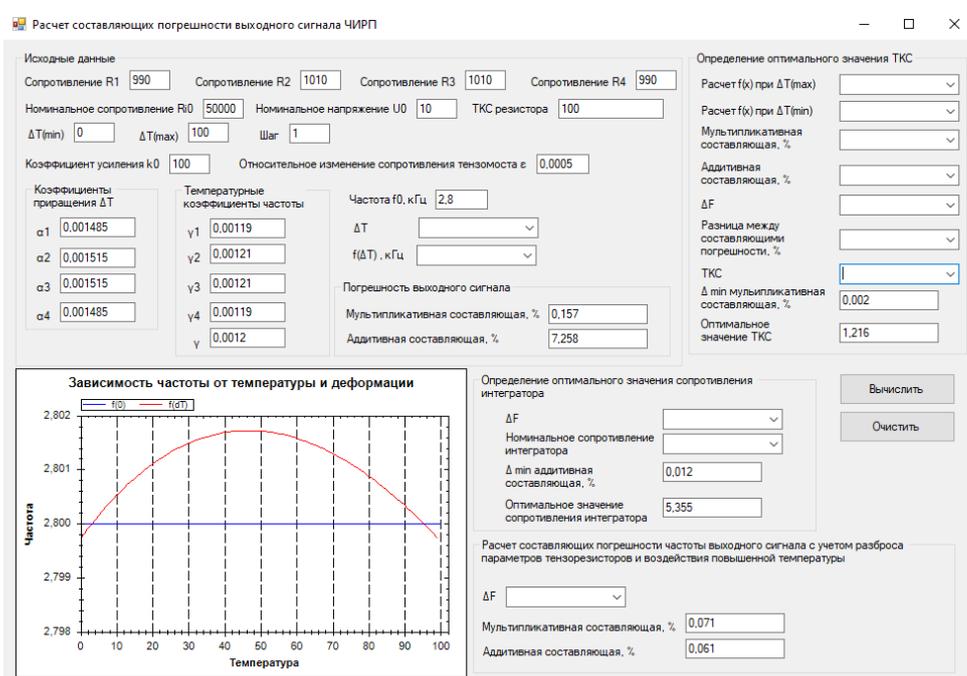


Рис. 4. Расчет составляющих погрешности выходного сигнала ЧИРП

С учетом изменения показателя ΔT и при оптимизированных значениях получим аддитивную составляющую погрешности выходного сигнала $\Delta_1 = 0,061 \text{ \%}$ и мультипликативную составляющую погрешности выходного сигнала, равную $\Delta_0 = 0,073 \text{ \%}$.

Заключение

Применение в составе ЧИРП мостового резистивного преобразователя полупроводникового резистора интегратора, имеющего температурные характеристики, идентичные характеристикам тензорезисторов, позволяет снизить аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности выходного сигнала до значений менее 0,1 %, что соответствует современным требованиям к датчикам физических величин.

Список литературы

1. Громков Н. В. Интегрирующие развертывающие преобразователи параметров датчиков систем измерения, контроля и управления : монография. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009. 244 с.
2. Волков В. С., Кудрявцева Д. А., Вергазов И. Р. Современные направления развития преобразователей давления с частотным выходным сигналом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2014. № 4. С. 20–29.

3. Волков В. С., Конкина М. С. Анализ частотных преобразователей полупроводниковых резистивных датчиков для эксплуатации при повышенных температурах // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. по материалам XXXIII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 55-летию образования кафедры «Автоматика и телемеханика» (г. Пенза, 22–23 мая 2019 г.) : в 2 т. / под ред. д.т.н., проф. М. А. Щербакова. Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. Т. 1. С. 121–123.
4. Volkov V. S., Konkina M. S. Modeling frequency integrating unfolding converter with a semiconductor strain gauge bridge taking into account temperature effect – APITECH-II – 2020 // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. Vol. 1679. P. 042066 (1-6). doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042066
5. Волков В. С., Волкова Н. В., Конкина М. С. Анализ возможностей применения полупроводниковых тензорезисторов для построения частотных интегрирующих развертывающих преобразователей механических величин в частоту // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 2. С. 58–64. doi: 10.21685/2307-5538-2020-2-7
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021660207. Программный модуль для учета технологического разброса параметров тензорезисторов ЧИРП / Волков В. С., Конкина М. С. ; № 2021619087 ; заявл. 09.06.2021 ; опубл. 23.06.2021.
7. Волков В. С., Баринов И. Н., Евдокимов С. П. Температурная компенсация полупроводникового датчика давления с нелинейной температурной зависимостью характеристик // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 4. С. 53–60.
8. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021619809. Программный модуль для расчета аналитической зависимости частоты от температуры и деформации тензорезисторов ЧИРП с учетом разброса параметров / Волков В. С., Конкина М. С. ; № 2021619086 ; заявл. 09.06.2021 ; опубл. 17.06.2021.
9. Volkov V. S., Konkina M. S. Modeling frequency integrating unfolding converter operation taking into account technological variation in parameters. APITECH-II 2020 // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. Vol. 1679. P. 042081 (1-6). doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042081
10. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021660420. Программный модуль для расчета составляющих погрешности частоты выходного сигнала ЧИРП с учетом разброса параметров тензорезисторов и воздействия повышенной температуры / Волков В. С., Конкина М. С. ; № 2021619411 ; заявл. 09.06.2021 ; опубл. 25.06.2021.
11. Волков В. С., Баринов И. Н. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 1. С. 30–36.

References

1. Gromkov N.V. *Integriruyushchie razvertvyayushchie preobrazovateli parametrov datchikov sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya: monografiya = Integrating deploying converters of sensor parameters of measurement, control and control systems.* Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2009:244. (In Russ.)
2. Volkov V.S., Kudryavtseva D.A., Vergazov I.R. Modern trends in the development of pressure transducers with a frequency output signal. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2014;(4):20–29. (In Russ.)
3. Volkov V.S., Konkina M.S. Analysis of frequency converters of semiconductor resistive sensors for operation at elevated temperatures. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh : sb. st. po materialam XXXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 55-letiyu obrazovaniya kafedry «Avtomatika i telemekhanika» (g. Penza, 22–23 maya 2019 g.): v 2 t. = Problems of automation and control in technical systems : collection of articles based on materials of XXXIII International Scientific and Technical. conf., dedicated. 55th anniversary of the formation of the Department of Automation and Telemechanics (Penza, May 22–23 2019) : in 2 volumes.* Penza: Izd-vo PGU, 2019;1:121–123. (In Russ.)
4. Volkov V.S., Konkina M.S. Modeling frequency integrating unfolding converter with a semiconductor strain gauge bridge taking into account temperature effect – APITECH-II – 2020. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS).* 2020;1679:042066 (1-6). doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042066
5. Volkov V.S., Volkova N.V., Konkina M.S. Analysis of the possibilities of using semiconductor strain gages for constructing frequency integrating unfolding converters of mechanical quantities into frequency. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2020;(2):58–64. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2020-2-7
6. Certificate of registration of the computer program RU 2021660207. A software module for accounting for the technological spread of the parameters of CHIRP strain gauges. Volkov V.S., Konkina M.S.; No. 2021619087; appl. 09.06.2021; publ. 23.06.2021. (In Russ.)
7. Volkov V.S., Barinov I.N., Evdokimov S.P. Temperature compensation of a semiconductor pressure sensor with a nonlinear temperature dependence of characteristics. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control.* 2013;(4):53–60. (In Russ.)

8. Certificate of registration of the computer program RU 2021619809. A software module for calculating the analytical dependence of frequency on temperature and strain of strain gages of CHIRP taking into account the spread of parameters. Volkov V.S., Konkina M.S.; No. 2021619086; appl. 09.06.2021; publ. 17.06.2021. (In Russ.)
9. Volkov V.S, Konkina M.S. Modeling frequency integrating unfolding converter operation taking into account technological variation in parameters. APITECH-II 2020. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2020;1679:042081(1-6). doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/0 42081
10. Certificate of registration of the computer program RU 2021660420. A software module for calculating the error components of the CHIRP output signal frequency, taking into account the spread of strain gauge parameters and the effects of elevated temperature. Volkov V.S., Konkina M.S.; No. 2021619411; appl. 09.06.2021; publ. 25.06.2021. (In Russ.)
11. Volkov V.S., Barinov I.N. Compensation of temperature error of sensitivity of high-temperature semiconductor pressure sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2013;(1):30–36. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Мария Сергеевна Конкина

преподаватель кафедры приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: myzochka@list.ru

Mariya S. Konkina

Lecturer of the sub-department
of instrument engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 17.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.06.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021