

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЧАСТОТНОГО ИНТЕГРИРУЮЩЕГО РАЗВЕРТЫВАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРАМИ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**В. С. Волков¹, Н. В. Волкова²,
М. С. Конкина³, С. Н. Базыкин⁴**

^{1, 2, 3, 4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
^{1, 2} vadimv_1978@mail.ru, ³ myzochka@list.ru, ⁴ cbazykin@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью исследования является определение параметров схемы частотного интегрирующего развертывающего преобразователя на основе мостовой схемы с полупроводниковыми тензорезисторами для компенсации погрешности выходного напряжения, причиной которой является технологический разброс параметров тензорезисторов и воздействие повышенной температуры. *Материалы и методы.* В работе используются методы полупроводниковой тензометрии, расчета электрических цепей, математического моделирования с использованием специально разработанных программ для определения зависимости температурной и технологической погрешности выходного сигнала частотного интегрирующего развертывающего преобразователя на основе мостовой схемы с полупроводниковыми тензорезисторами. *Результаты.* Показано, что вследствие значительной температурной зависимости коэффициента тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов от температуры выходной сигнал схемы характеризуется значительной температурной погрешностью, имеющей как аддитивную, так и мультипликативную составляющую. Для снижения мультипликативной составляющей температурной погрешности выходного сигнала частотного интегрирующего развертывающего преобразователя предлагается использовать температурно-зависимый резистор интегратора, изготовленный из того же полупроводникового материала, что и тензорезисторы в составе мостовой схемы. Номинальное значение сопротивления и значение температурного коэффициента сопротивления резистора интегратора определяются итерационным путем по результатам моделирования преобразователя в условиях воздействия повышенной температуры и разброса значений сопротивлений и температурных коэффициентов сопротивления тензорезисторов, вызванных технологическими причинами. *Выводы.* На основе анализа результатов расчетов и моделирования сделан вывод о том, что предложенное техническое решение является эффективным, так как позволяет значительно снизить мультипликативную составляющую погрешности выходного сигнала частотного интегрирующего развертывающего преобразователя.

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

Для цитирования: Волков В. С., Волкова Н. В., Конкина М. С., Базыкин С. Н. Моделирование работы частотного интегрирующего развертывающего преобразователя с полупроводниковыми тензорезисторами для информационно-измерительных систем // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 4. С. 163–171. doi: 10.21685/2227-8486-2023-4-11

SIMULATION OF THE OPERATION OF A FREQUENCY INTEGRATING CONVERTER WITH A BRIDGE CIRCUIT BASED ON SEMICONDUCTOR STRAIN GAGES AT ELEVATED TEMPERATURE

V.S. Volkov¹, N.V. Volkova², M.S. Konkina³, S.N. Bazykin⁴

^{1, 2, 3, 4} Penza State University, Penza, Russia

^{1, 2} vadimv_1978@mail.ru, ³ myzochka@list.ru, ⁴ cbazykin@yandex.ru

Abstract. *Background.* The aim of the study is to determine a frequency integrating unfolding converter parameters based on a bridge circuit with semiconductor strain gages to compensate for the of the output signal error resulting from the strain gages parameter's technological spread and the effects of elevated temperature. *Materials and methods.* The work employs methods of semiconductor strain gauge analysis, electrical circuit calculations, mathematical modeling using specially developed programs to determine the temperature and process-induced error dependence of the output signal of a frequency integrating unfolding converter based on a bridge circuit with semiconductor strain gauges. *Results.* It is demonstrated that to reduce the multiplicative component of the temperature error in the output signal of the frequency integrating unfolding converter, it is proposed to use a temperature-dependent resistor for the integrator, made from the same semiconductor material as the strain gauges in the bridge circuit. The nominal resistance value and the temperature coefficient of resistance for the integrator resistor are determined iteratively based on the converter modeling results under the influence of elevated temperatures. *Conclusions.* Based on the calculations and modeling result's analysis, it is concluded that the proposed technical solution is effective, since it allows to significantly reduce the additive and multiplicative components of the output signal error for frequency integrating unfolding converter.

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

For citation: Volkov V.S., Volkova N.V., Konkina M.S., Bazykin S.N. Simulation of the operation of a frequency integrating converter with a bridge circuit based on semiconductor strain gages at elevated temperature. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(4):163–171. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2023-4-11

Введение

Современные тенденции производства и эксплуатации датчиковой аппаратуры предъявляют высокие требования к функциональным возможностям и техническим параметрам средств измерений, в частности возможность выполнения измерений с высокой помехоустойчивостью при обеспечении заданной точности в условиях воздействия внешних факторов, например повышенной температуры [1, 2].

При построении информационно-измерительных и управляющих систем используются частотные интегрирующие развертывающие преобразователи (ЧИРП) параметров, которые преобразуют выходные сигналы резистивных датчиков различных физических величин, в том числе датчиков давления, в частотный выходной сигнал, информативным параметром которого является частота следования прямоугольных импульсов, что позволяет повысить помехоустойчивость сигнала, а также упрощает его преобразование в цифровой код [1].

Серийно выпускаемые датчики с ЧИРП, в том числе датчики давления, содержат мостовые измерительные схемы с резистивными преобразователями на основе тонких металлических пленок [1].

Для повышения уровня чувствительности и значения выходного сигнала ЧИРП предлагается использовать полупроводниковые тензорезисторы [3], однако при этом возникает необходимость в уменьшении возникающей температурной погрешности вследствие значительной температурной зависимости сопротивления и тензочувствительности полупроводниковых материалов, а также разброса параметров тензорезисторов в составе мостовой схемы (МС), вызванного технологическими причинами.

Материалы и методы

Рассмотрим функциональную схему ЧИРП [1], построенного на основе мостовой схемы, содержащей полупроводниковые тензорезисторы, интегратор на базе операционного усилителя ОУ₁ с емкостной отрицательной обратной связью, сравнивающего устройства СУ на базе операционного усилителя ОУ₂ и дозирующего конденсатора C_d , представленную на рис. 1. Тензорезисторы изготавливаются из легированного кремния по стандартной микроэлектронной технологии, при этом резистор интегратора изготовлен также из монокристаллического кремния, аналогичного по своим свойствам материалу тензорезисторов.

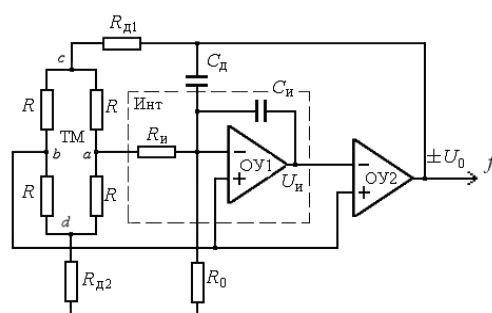


Рис. 1. Функциональная схема ЧИРП с МС на основе полупроводниковых тензорезисторов [1]

Для анализа влияния разброса параметров схемы на частоту выходного сигнала рассматривается наихудший случай, при котором у тензорезисторов с положительным приращением сопротивления параметры (значения номиналов тензорезисторов, температурные коэффициенты сопротивления (ТКС), температурные коэффициенты тензочувствительности (ТКЧ)) дополнительно увеличены на 1 %, а у тензорезисторов с отрицательным приращением значения соответствующих параметров уменьшены на 1 %.

Расчетные зависимости берутся на основе ранее выполненных исследований, в результате которых для полупроводниковых тензорезисторов были получены формулы, учитывающие не только температурную зависимость сопротивления, но и температурную зависимость тензочувствительности, а также разброс параметров резисторов при изготовлении [5]. Численные значения исходных данных и результаты расчетов приведены на рис. 2 [2, 3, 5, 6].

Учет технологического разброса параметров тензорезисторов

Исходные данные

Сопротивление R1 990 Сопротивление R2 1010 Сопротивление R3 1010 Сопротивление R4 990

Номинальное сопротивление Ri0 50000 Номинальное напряжение U0 10 ТКС резистора 100

Температура ΔT 100

Коэффициент тензочувствительности k0 100 Относительное изменение сопротивления тензомоста ε 0,0005

Коэффициенты приращения ΔT

α_1 0,001485 α_2 0,001515 α_3 0,001515 α_4 0,001485

ТКЧ

γ_1 0,00119 γ_2 0,00121 γ_3 0,00121 γ_4 0,00119 γ 0,0012

Емкость конденсатора 1

Импульс 1

Частота f0, кГц 2,8

Сопротивление тензорезисторов

R1(ΔT) 1,073399 R2(ΔT) 1,228202 R3(ΔT) 1,228202 R4(ΔT) 1,073399

Изменение сопротивления

R1 0,084241414141414 U(ΔT) -0,06725883417673

R2 0,216041584158416 $\varepsilon_{12}(\Delta T)$ 0,71945992740721

R3 0,216041584158416 Ri(ΔT) 56000

R4 0,084241414141414 U0($\varepsilon_{12}(\Delta T)$) 7,19459326681908

Вычислить

Очистить

Рис. 2. Результаты расчета МС ЧИРП с учетом технологического разброса параметров тензорезисторов

Частота выходного сигнала ЧИРП, определенная вышеописанным способом, принимает значение $f_0 = 2,8$ кГц, тогда как номинальное значение выходной частоты при отсутствии разброса равно 2,5 кГц [5, 6]. Следовательно, погрешность начального выходного сигнала от технологического разброса составляет 12 %.

Наличие данной погрешности объясняется тем, что технологический разброс номинальных сопротивлений кремниевых тензорезисторов вызывает появление начального разбаланса МС, эквивалентного наличию входного сигнала при отсутствии измеряемой величины.

Кроме разброса номинальных сопротивлений в полупроводниковой МС наблюдается также разброс значений ТКС и ТКЧ тензорезисторов, что вызывает появление дополнительной погрешности выходного сигнала при эксплуатации устройства в условиях повышенных температур.

Моделирование зависимости частоты выходного сигнала ЧИРП от температуры и деформации тензорезисторов с учетом технологического разброса параметров выполняется по следующей формуле [4, 5, 7]:

$$f(\Delta T) = \frac{R_1(\Delta T) \cdot R_4(\Delta T) - R_2(\Delta T) \cdot R_3(\Delta T)}{4 \cdot C_d \cdot R_{i0} \cdot (R_1(\Delta T) - R_2(\Delta T)) \cdot (R_3(\Delta T) - R_4(\Delta T)) \cdot (\gamma \cdot \Delta T + 1)} \quad (1)$$

Для моделирования зависимости частоты выходного сигнала от температуры и деформации тензорезисторов с учетом технологического разброса номинальных сопротивлений тензорезисторов и значений ТКС была разработана программа, позволяющая задавать значения характеристик каждого

тензорезистора в схеме, значение деформации, диапазон и шаг изменения температуры, а также параметры резистора интегратора [8].

При изменении температуры ΔT от 0°C до 100°C с шагом, равным 1°C , получены значения зависимости частоты выходного сигнала от температуры и деформации с учетом разброса параметров полупроводниковых тензорезисторов $f(\Delta T)$ в интервале от $2,9985 \cdot 10^3$ Гц до $3,0027 \cdot 10^3$ Гц [4, 5, 8]. Исходные данные и результаты расчета приведены на рис. 3.

Аналитическая зависимость частоты от температуры и деформации тензорезисторов с учетом разброса параметров

Исходные данные

Сопротивление R1: 990 Сопротивление R2: 1010 Сопротивление R3: 1010 Сопротивление R4: 990

Номинальное сопротивление R0: 50000 Номинальное напряжение U0: 10 ТКР резистора: 100

$\Delta T(\text{min})$: 0 $\Delta T(\text{max})$: 100 Шаг: 1

Коэффициент усиления k0: 100 Относительное изменение сопротивления тензомоста ε : 0,0005

Коэффициенты приращения ΔT

α_1 : 0,001485 α_2 : 0,001515 α_3 : 0,001515 α_4 : 0,001485

Температурные коэффициенты частоты

γ_1 : 0,00119 γ_2 : 0,00121 γ_3 : 0,00121 γ_4 : 0,00119 γ : 0,0012

Частота f_0 , кГц: 2,8

ΔT :

$f(\Delta T)$, кГц:

Вычислить Очистить

Рис. 3. Результаты расчета параметров выходного сигнала ЧИРП с учетом влияния температуры и технологического разброса параметров

Графическая зависимость, полученная на основе выражения (1), представлена на рис. 4.

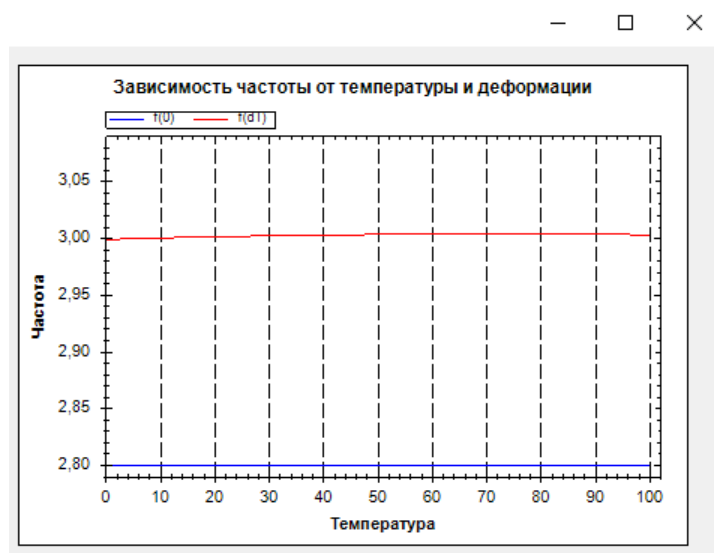


Рис. 4. Зависимость частоты выходного сигнала ЧИРП от температуры и деформации с учетом разброса параметров полупроводниковых тензорезисторов

На основании результатов расчетов и моделирования получены значения аддитивной составляющей погрешности выходного сигнала $\Delta_1 = 7,258 \%$ и мультипликативной составляющей погрешности выходного сигнала, равной $\Delta_0 = 0,157 \%$. Преимущественно аддитивный характер погрешности выходного сигнала является следствием начального разбаланса МС вследствие технологического разброса параметров.

Для компенсации температурной составляющей погрешности предлагается использование дополнительного полупроводникового резистора, изготовленного по тому же технологическому процессу, что и тензорезисторы, и имеющего аналогичную температурную характеристику, что при работе ЧИРП приводит к перераспределению токов и потенциалов в схеме и, следовательно, позволяет скорректировать частоту выходного сигнала. В качестве такого резистора предлагается использовать резистор интегратора.

В данной работе значение ТКС резистора интегратора при заданном начальном значении его сопротивления R_{i0} было оптимизировано на основе критерия минимальной температурной погрешности выходного сигнала ЧИРП. Значение было определено итерационным методом, начальное значение ТКС резистора интегратора определялось на основе значений ТКС тензорезисторов МС. Оптимизированное значение ТКС резисторов составило $\gamma = 1,1216 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. На основе найденного значения ТКС было пересчитано сопротивление резистора интегратора, равное $R_{i0} = 5,355 \cdot 10^4 \text{ Ом}$.

Проведен расчет составляющих погрешности частоты выходного сигнала ЧИРП с учетом разброса параметров тензорезисторов и воздействия повышенной температуры при наличии в схеме ЧИРП температурно-зависимого резистора интегратора с параметрами, определенными выше. Результаты расчета представлены на рис. 5.

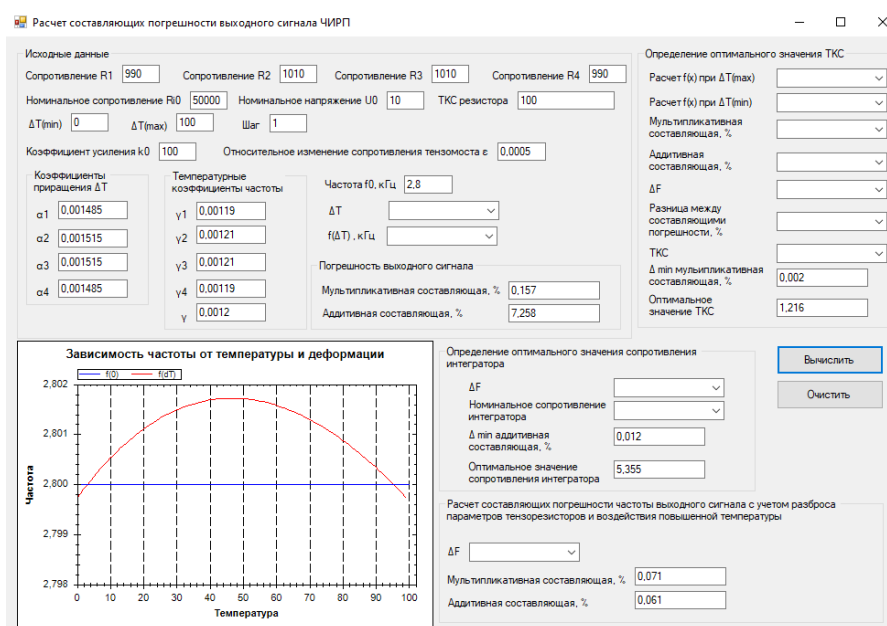


Рис. 5. Расчет составляющих погрешности частоты выходного сигнала ЧИРП с учетом разброса параметров тензорезисторов и воздействия повышенной температуры

Результаты и обсуждение

Анализ результатов моделирования показывает, что значения аддитивной и мультипликативной составляющих приведенной погрешности выходного сигнала составляют $\Delta_1 = 0,061 \%$ и $\Delta_0 = 0,071 \%$ [8].

Заключение

На основании результатов расчетов и проведенного моделирования сделан вывод о том, что предложенное техническое решение для компенсации воздействия повышенной температуры с одновременным учетом технологического разброса параметров МС на основе полупроводниковых тензорезисторов является эффективным, так как позволяет снизить вдвое мультипликативную составляющую и на порядок уменьшить аддитивную составляющую погрешности выходного сигнала.

Список литературы

1. Громков Н. В. Интегрирующие развертывающие преобразователи параметров датчиков систем измерения, контроля и управления : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. 244 с.
2. Volkov V. S., Konkina M. S. Modeling frequency integrating unfolding converter with a semiconductor strain gauge bridge taking into account temperature effect // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. Vol. 1679. P. 042066. doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042066
3. 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
4. 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.
5. Volkov V. S., Konkina M. S. Modeling frequency integrating unfolding converter operation taking into account technological variation in parameters // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2020. Vol. 1679. P. 042081. doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042081
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., Конкина М. С. Анализ конструктивных решений частотных преобразователей разбаланса мостовой схемы в частоту для полупроводниковых тензорезистивных датчиков // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шлядинские чтения – 2020») : материалы XII Международ. науч.-техн. конф. с элементами науч. шк. и конкурсом науч.-исслед. работ для студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Пенза, 16–18 марта 2020 г.) / под ред. д-ра техн. наук Е. А. Печерской. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. С. 250–253.
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.

References

1. Gromkov N.V. *Integriruyushchie razvertyvayushchie preobrazovateli parametrov datchikov sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya: monografiya = Integrating deploying converters of sensor parameters of measurement, control and control systems : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2009:244. (In Russ.)
2. Volkov V.S., Konkina M.S. Modeling frequency integrating unfolding converter with a semiconductor strain gauge bridge taking into account temperature effect. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2020;1679:042066. doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042066
3. Volkov V.S., Volkova N.V., Konkina M.S. Analysis of the possibilities of using semiconductor strain gages to build 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
4. 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.)
5. Volkov V.S., Konkina M.S. Modeling frequency integrating unfolding converter operation taking into account technological variation in parameters. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2020;1679:042081. doi: 10.1088/1742-6596/1679/4/042081
6. Certificate of registration of the computer program RU 2021660207. A software module for accounting for the technological variation 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., Konkina M.S. Analysis of constructive solutions for frequency converters of bridge circuit unbalance to frequency for semiconductor strain–resistive sensors. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii («Shlyandinskie chteniya – 2020»): materialy XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. s elementami nauch. shk. i konkursom nauch.-issled. rabot dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (g. Penza, 16–18 marta 2020 g.) = Methods, tools and technologies for obtaining and processing measuring information ("Shlyandinsky readings – 2020") : materials of the XII International Scientific and Technical Journal. a conference with elements of a scientific school and a scientific research competition. works for students, postgraduates and young scientists (Penza, March 16-18, 2020)*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:250–253. (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 CHIRP strain gauges, 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.)

Информация об авторах / Information about the authors

Вадим Сергеевич Волков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vadimv_1978@mail.ru

Vadim S. Volkov

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

Наталья Валентиновна Волкова

кандидат биологических наук, доцент,
заведующий кафедрой химии
и методики обучения химии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vadimv_1978@mail.ru

Natalia V. Volkova

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

Мария Сергеевна Конкина

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

Maria S. Konkina

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

Сергей Николаевич Базыкин

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cbazykin@yandex.ru

Sergey N. Bazykin

Doctor of technical sciences, associate
professor, head of the sub-department
of instrument making,
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 31.03.2023

Поступила после рецензирования/Revised 20.09.2023

Принята к публикации/Accepted 05.10.2023