

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ РАСТРОВЫЙ ДАТЧИК ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А. А. Трофимов¹, Е. А. Фокина², Д. М. Марков³, И. Е. Смирнов⁴

^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ alex.t1978@mail.ru, ^{2,3,4} iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные датчики как источники информации определяют уровень качества информационно-измерительных и управляющих систем сложных производственно-технологических объектов, особенно в таких наукоемких областях, как энергетика, авиация, ракетно-космическая техника, вооружение и военная техника и др. Одной из задач при отработке ракетно-космических комплексов является измерение и контроль перемещений блоков механических систем. Существующие датчики перемещений неспособны одновременно измерять угловые и линейные перемещения. Для решения этой задачи разработан датчик перемещений, обладающий расширенными функциональными возможностями и способный одновременно измерять линейные и угловые перемещения. *Материалы и методы.* В работе был использован амплитудно-логический метод обработки модулированных сигналов с растрового датчика перемещений. В ходе выполнения работы были разработаны конструктивная схема многофункционального датчика перемещений и структурная схема вторичного преобразователя. *Результаты.* В результате проведенных исследований подтверждена возможность создания многофункционального датчика перемещений, работоспособного в широком в интервале температур 20 ÷ 600 °С, способного одновременно измерять линейные и угловые перемещения.

Ключевые слова: растровый датчик, угловое перемещение, вторичный преобразователь, шток, двоичный код

Для цитирования: Трофимов А. А., Фокина Е. А., Марков Д. М., Смирнов И. Е. Многофункциональный растровый датчик перемещений // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1. С. 24–30. doi:10.21685/2307-5538-2023-1-3

MULTIFUNCTIONAL RASTER MOTION SENSOR

A.A. Trofimov¹, E.A. Fokina², D.M. Markov³, I.E. Smirnov⁴

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

¹ alex.t1978@mail.ru, ^{2,3,4} iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* Modern sensors as sources of information determine the level of quality of information-measuring and control systems of complex industrial-technological objects, especially in such science-intensive fields as power engineering, aviation, rocket-space technology, weapons and military equipment, etc. One of the tasks in the development of rocket-space systems is the measurement and control of movements of mechanical systems. The existing displacement sensors are not capable of simultaneous measurement of angular and linear movements. To solve this problem a displacement sensor was developed, which has extended functionality and is able to measure linear and angular movements simultaneously. *Materials and methods.* The amplitude-logic method of processing modulated signals from a raster displacement sensor was used in this work. In the course of the work, a design diagram of a multifunctional displacement sensor and a schematic diagram of the secondary converter were developed. *Results.* As a result of the conducted research, the possibility of creating a multifunctional displacement sensor capable of working in a wide temperature range of 20 ÷ 600 °C, capable of simultaneously measuring linear and angular movements was confirmed.

Keywords: raster sensor, angular motion, secondary transducer, rod, binary code

For citation: Trofimov A.A., Fokina E.A., Markov D.M., Smirnov I.E. Multifunctional raster motion sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(1):24–30. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2023-1-3

Основная часть

Актуальной задачей при отработке новых типов изделий ракетно-космической и военной техники, создании систем автоматики и контроля технологических процессов в металлур-

гии, химической промышленности и других областях народного хозяйства является создание унифицированных датчиков перемещений, работоспособных при температурах окружающей среды от минус 60 до 200 °С, обладающих высокой стабильностью, точностью измерений и надежностью [1–3].

Важное место в общей номенклатуре первичных преобразователей перемещений занимают электромагнитные, а именно взаимоиндуктивные (трансформаторные), датчики перемещений [4–6]. Они отличаются такими достоинствами, как высокая надежность в жестких условиях эксплуатации, относительно малый вес, широкий диапазон измеряемых перемещений, линейность функции преобразования, отсутствие гальванической связи между цепями питания и измерительными цепями, достаточно высокая точность измерений, простота в изготовлении и эксплуатации.

Совершенствования технических характеристик трансформаторных датчиков перемещений удалось добиться при использовании в их конструкции растровых комбинационных сопряжений [7, 8].

Существующие датчики перемещений неспособны одновременно измерять угловые и линейные перемещения.

Разработанный растровый датчик перемещений не имеет указанного недостатка, обладает расширенными функциональными возможностями, способен одновременно измерять линейные и угловые перемещения. Конструктивная схема датчика приведена на рис. 1.

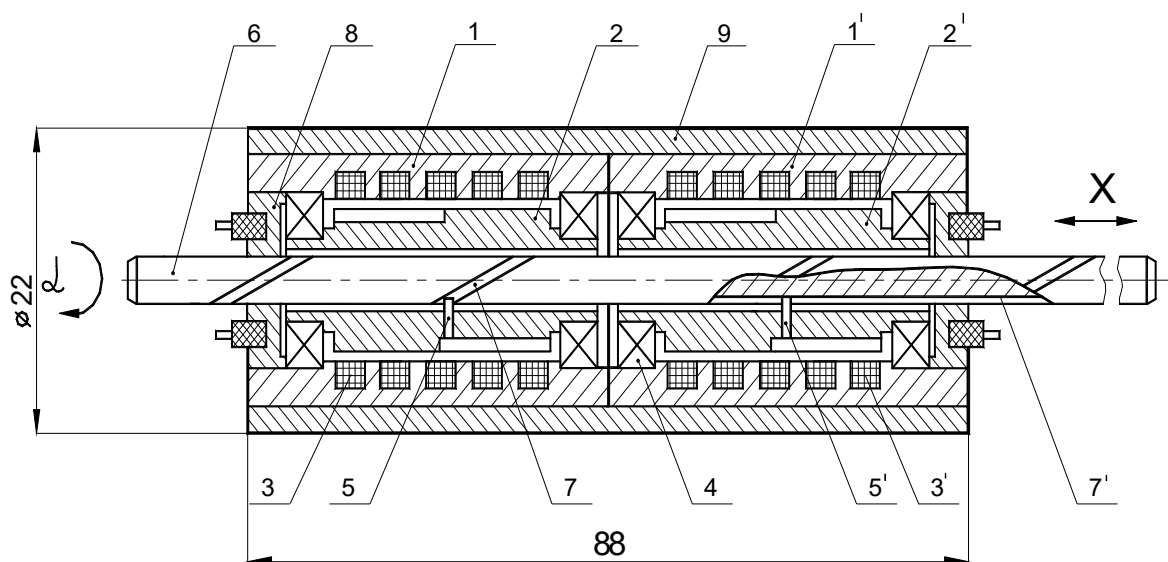


Рис. 1. Общий вид датчика перемещений

Датчик содержит две пары цилиндрических ферромагнитных зубчатых элементов 1; 2 и 1'; 2'. Во внешних зубчатых элементах расположены обмотки возбуждения и считывания 3 и 3'. Внутренние зубчатые элементы 2 и 2' установлены в подшипниках качения 4 и имеют жестко закрепленные на них щупы 5 и 5', противоположные концы которых входят в профилированные канавки, нарезанные на поверхности штока 6. Канавка 7, взаимодействующая со щупом 5, нарезана на штоке по винтовой линии, а канавка 7', взаимодействующая со щупами 5 и 5', нарезана по образующей штока. Шток закреплен в подшипниках скольжения 8. Внешние ферромагнитные зубчатые элементы крепятся в корпусе 9.

При наличии только углового перемещения объекта измерения шток поворачивает оба внутренних зубчатых элемента и в обмотках считывания обоих каналов формируются равные по величине выходные сигналы пропорциональные угловому перемещению. После вычитания $U_L - U_\alpha$ сигнал с канала линейных перемещений равен 0, где U_L – выходной сигнал с канала линейных перемещений; U_α – выходной сигнал с канала угловых перемещений.

В случае линейного перемещения объекта измерения шток воспринимает контролируемое перемещение объекта и с помощью щупа, взаимодействующего с винтовой канавкой, по-

ворачивает внутренний зубчатый элемент канала линейных перемещений, при вращении которого в обмотках формируется сигнал пропорциональный линейному перемещению штока; при этом внутренний ферромагнитный элемент канала угловых перемещений остается неподвижным, так как шуп скользит по канавке, направление нарезки которой совпадает с направлением движения штока.

Когда одновременно происходит линейное и угловое перемещение объекта измерения, в обмотках считывания канала линейных перемещений формируется выходной сигнал (рис. 2), величина которого зависит от линейного и углового перемещений, а в обмотках канала углового перемещения выходной сигнал зависит только от углового перемещения штока. Для определения линейного перемещения необходимо из сигнала с канала линейных перемещений вычесть сигнал с канала угловых перемещений.

При использовании амплитудно-логического метода обработки может быть осуществлено «опознание» участков D_1 , D_2 , D_i , внутри периода соответствующего шагу зубцового сопряжения. Например, на участке D_3 :

$$U_1 > U_2 > U_4 > U_3,$$

где U_1 , U_2 , U_4 , U_3 – выходные напряжения с обмоток канала линейных перемещений.

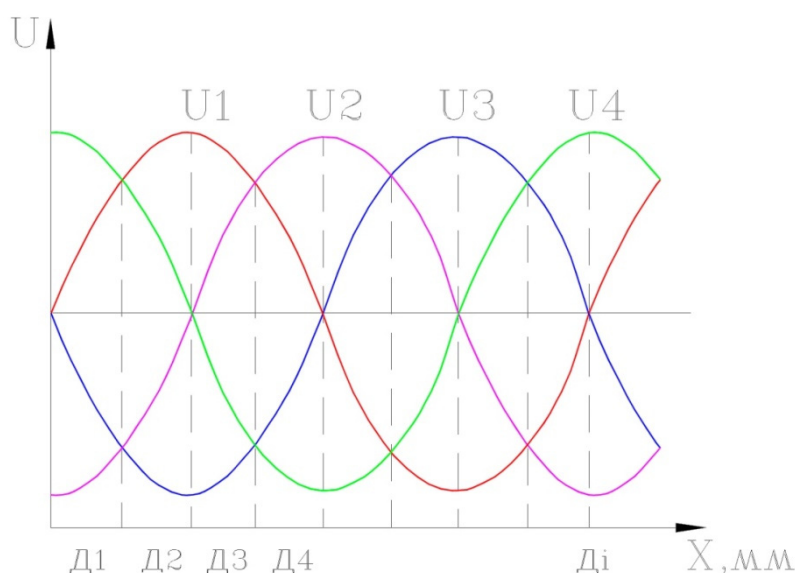


Рис. 2. Выходные напряжения с обмоток канала линейных перемещений

Далее происходит последовательный счет периодов. Вид выходных сигналов и метод их обработки с канала угловых перемещений аналогичны вышеприведенному по каналу линейных перемещений.

Отличительной особенностью всех разработанных растровых трансформаторных датчиков перемещений независимо от типа сопряжения (спиральный или цилиндрический растр), конструктивного исполнения и диапазонов измерений является идентичность выходных сигналов, что позволило разработать для всех конструктивных исполнений растровых датчиков линейных и угловых перемещений унифицированный вторичный преобразователь (ВП) на отечественной элементной базе.

ВП предназначен для преобразования сигналов, поступающих с чувствительного элемента в четырнадцатиразрядный цифровой код: три разряда – позиционные, остальные – накапливающие.

Преобразователь конструктивно выполнен на трех платах. Монтаж плат печатный. Платы помещены в общий герметичный корпус, заполненный сухим азотом. На одной плате расположен канал измерительный (КИ); на второй – устройство питания датчика (УПД), формирователь импульса синхронизации (ФСИ), формирователь импульса сопровождения информации (ФИСИ); на третьей – блок питания (БП).

Принцип действия блока основан на сравнении по амплитуде сигналов с четырех измерительных обмоток датчика, величина которых в зависимости от перемещения изменяется по закону:

$$\begin{aligned} U1(X) &= n_1 U_{\pi} (1 + m_m \cos(2\pi X / q)), \\ U2(X) &= n_2 U_{\pi} (1 + m_m \sin(2\pi X / q)), \\ U3(X) &= n_3 U_{\pi} (1 - m_m \cos(2\pi X / q)), \\ U4(X) &= n_4 U_{\pi} (1 - m_m \sin(2\pi X / q)), \end{aligned} \quad (1)$$

где X – величина перемещения в физических величинах; U_{π} – падение напряжения в питающей обмотке; n_i – коэффициент трансформации обмотки; m_m – глубина модуляции; $U1 \div U4$ – амплитуда выходных сигналов; q – шаг зубцового сопряжения.

Сигналы с датчика периодические, их период равен шагу зубцового сопряжения датчика. ВП сравнивает между собой аналоговые сигналы с датчика внутри шага q и формирует трехразрядный двоичный (позиционный) код в зависимости от результата сравнения. Последующие 8 разрядов кода формируются путем подсчета числа интервалов, пройденных от точки, принятой за начало отсчета.

Функциональная схема ВП представлена на рис. 3. В ее состав входят: четыре сравнивающих устройства (СУ1÷СУ4); четыре запоминающих устройства (ЗУ1÷ЗУ4); дешифратор позиционного кода (ДПК); формирователь импульса счета (ФИС); формирователь импульса синхронизации (ФСИ), идентификатор направления перемещения (ИНП); формирователь импульса сопровождения информации (ФИСИ); реверсивный счетчик (РС); схема формирования контрольного разряда (СФКР); выходные формирователи уровней (ВФУ); генератор тактовой частоты (ГТЧ); цифроаналоговый преобразователь (ЦАП); фильтр низкой частоты (ФНЧ); преобразователь «напряжение–ток» (ПНТ); предварительный стабилизатор напряжения (ПСН); регулирующий транзистор (РТ); двухтактный преобразователь напряжения (ДПН); выпрямители напряжения (ВН1, ВН2); каналные стабилизаторы напряжения (КСН1, КСН2).

ВП работает следующим образом. Ток синусоидальной формы поступает на обмотку питания датчика, создавая в его магнитопроводе магнитный поток, изменение которого вызывает ЭДС в измерительных обмотках датчика. Сигналы с четырех измерительных обмоток датчика ($U1 \div U4$) поступают на вход ВП. Напряжения ($U1 \div U4$) сравниваются между собой по амплитуде СУ1÷СУ4. На выходах СУ формируются логические уровни «1», если разность входных сигналов положительна, или «0», если разность входных сигналов отрицательна.

Логические уровни с СУ переписываются в ЗУ1÷ЗУ4 по переднему фронту импульса синхронизации (СИ) и хранятся там до прихода следующего СИ.

ДПК преобразует четырехразрядный двоичный код с ЗУ1÷ЗУ4 в 3-разрядный двоичный (позиционный) код.

Сигналы с ДПК поступают на ФИС. ФИС выдает импульсы счета на РС при переходе от одного интервала к другому, т.е. когда код в ДПК меняется с 111 на 000 или с 000 на 111.

Работа ФИС описывается следующими логическими уровнями:

$$S_1 = S_{\phi_1}(P1P2P3); S_2 = S_{\phi_2}(P1P2P3),$$

где S_{ϕ_1} – короткий импульс, сформированный по фронту импульса $P1P2P3$; S_{ϕ_2} – короткий импульс, сформированный по фронту импульса $P1P2P3$

ИНП указывает направление перемещения ротора датчика. При изменении штока в ДПК с 111 на 000, т.е. при прямом перемещении штока (ротора) датчика состояние ИНП соответствует логической «1». При изменении кода в ДПК с 000 на 111, т.е. при обратном перемещении штока (ротора) датчика состояние ИНП соответствует логическому «0». Пересчет импульсов с ФИС осуществляет РС. Причем в зависимости от сигнала с ИНП (логическая «1» или логический «0») РС работает в режиме сложения либо в режиме вычитания. Сигналы с выхода ДПК и РС (выходной код) поступают на вход СФКР. СФКР представляет собой схему сложения по модулю. Контрольный разряд (КР) равен «1» при четном количестве «1» в выходном коде и равен «0» при нечетном количестве «1» в выходном коде. УПД обеспечивает

питание датчика стабильным током синусоидальной формы и включает в свой состав генератор напряжения синусоидальной формы и преобразователь «напряжение–ток». Генератор синусоидального напряжения состоит из ГТЧ, 8-разрядного ЦАП и ФНЧ. ФСИ предназначен для формирования последовательности импульсов синхронизации (СИ), которая обеспечивает общей синхронизацией от УПД датчик и блок. ФИСИ формирует импульс сопровождения информации (ИСИ). ИСИ определяет момент времени, когда можно считывать выходное слово с выходных шин блока.

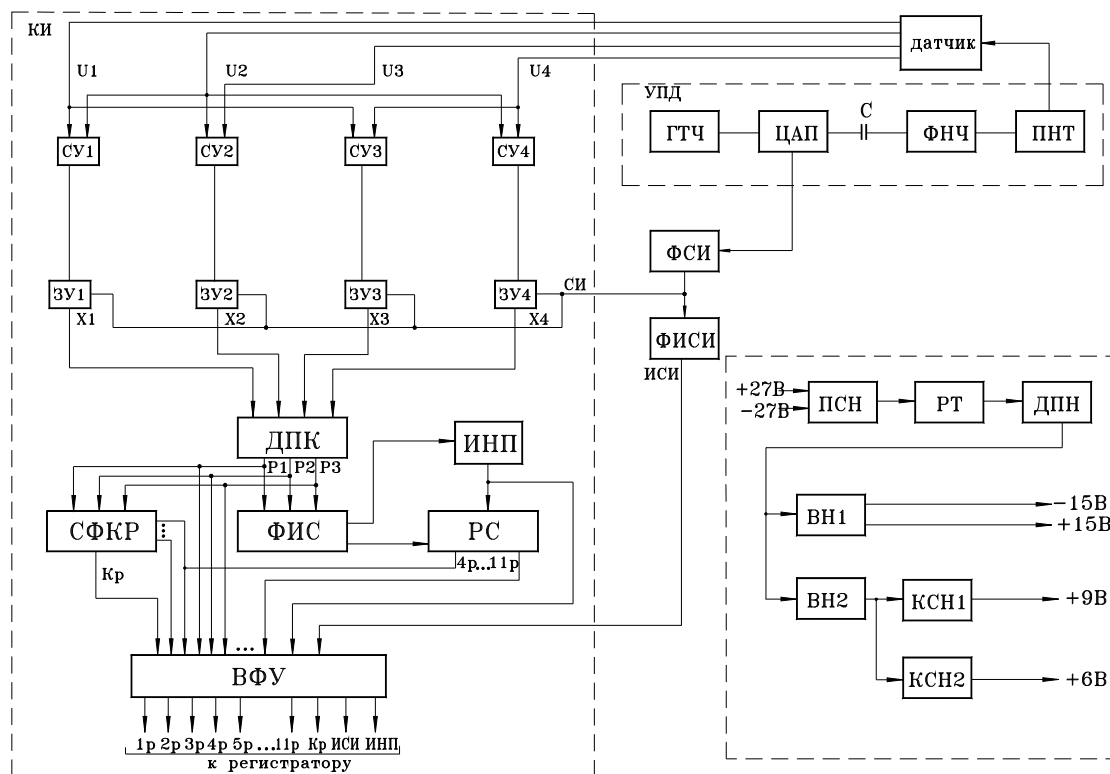


Рис. 3. Функциональная схема ВП для растровых взаимоиндуктивных датчиков перемещений

Шток (ротор) датчика в процессе измерения перемещения осуществляет угловое перемещение. Выходной код блока то возрастает, то убывает. За начальную точку отсчета принимается значение трех младших разрядов выходного кода (позиционный код) после подачи напряжения питания и сигнала СБРОС на блок. Сигнал СБРОС подается нулевым уровнем. На вход ВФУ поступает позиционный код с выхода ДПК, 11-разрядный код с выхода РС, ИСИ, КР, ИНП. ВФУ обеспечивает согласование уровней выходных сигналов блока с регистрирующей аппаратурой. БП обеспечивает необходимыми питающими напряжениями. В его состав должны входить ПСН, РТ, ДПН, ВН1, ВН2, КСН1, КСН2 (табл. 1).

Таблица 1

Основные технические характеристики многофункционального датчика перемещений

Наименование	Значение
Диапазон измерений: угловое перемещение линейное перемещение	0–360° 0–30, 0–45, 0–60, 0–90, 0–125, 180, 0–250, 0–350, 0–700 мм
Основная приведенная погрешность, %, не более	0,2
Выходной сигнал	последовательный двоичный код
Рабочая температура, °С	от минус 60 до 200
Масса, кг	0,75 max (со штоком)
Вибрация, g	40
Частота, Гц	5...5000 Гц

В результате проведенных исследований подтверждена возможность создания многофункционального датчика перемещений, работоспособного в широком диапазоне температур, способного одновременно измерять линейные и угловые перемещения.

Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А.А. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 18–21.
2. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
3. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 18–25.
4. Гаврилов В. А., Трофимов А. А. Система измерения линейных перемещений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 44–46.
5. Трофимов А. А., Конаков Н. Д. Трансформаторные датчики перемещений с расширенным диапазоном измерений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 8–10.
6. Конюхов Н. Е., Медников Ф. М., Нечаевский М. Л. Электромагнитные датчики механических величин. М. : Машиностроение, 1987.
7. Трофимов А. Н., Блинов А. В., Трофимов А. А. Унифицированный ряд высокотемпературных растровых электромагнитных датчиков перемещений // Датчики и системы. 2007. № 7. С. 24–29.
8. Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Расширение температурного диапазона растровых трансформаторных датчиков перемещений // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 24–27.

References

1. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of development of unified sensor designs for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;(10):18–21. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, converters and on their basis measurement systems, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
3. Bastrygin K.I., Trofimov A.A. System of measurement, monitoring, control and diagnostics of rocket engine parameters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(3):18–25. (In Russ.)
4. Gavrilov V.A., Trofimov A.A. System for measuring linear displacements. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):44–46. (In Russ.)
5. Trofimov A.A., Konakov N.D. Transformer displacement sensors with an extended measurement range. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):8–10. (In Russ.)
6. Konyukhov N.E., Mednikov F.M., Nechaevskiy M.L. *Elektromagnitnye datchiki mekhanicheskikh velichin = Electromagnetic sensors of mechanical quantities*. Moscow: Mashinostroenie, 1987. (In Russ.)
7. Trofimov A.N., Blinov A.V., Trofimov A.A. Unified series of high-temperature raster electromagnetic displacement sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2007;(7):24–29. (In Russ.)
8. Trofimov A.N., Trofimov A.A. Rasshiren timeraturnogo diapazona rastroykh transformatornykh datchikov peremeshcheniy. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2009;(6):24–27. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Aleksey A. Trofimov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Александровна Фокина

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

Ekaterina A. Fokina

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

Дмитрий Максимович Марков
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Dmitry M. Markov
Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Иван Евгеньевич Смирнов
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Ivan E. Smirnov
Postgraduate student,
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 24.10.2022

Поступила после рецензирования/Revised 24.11.2022

Принята к публикации/Accepted 26.12.2022