

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

## DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

УДК 531.741

doi:10.21685/2307-5538-2022-2-14

### ТРЕХКАНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А. А. Трофимов<sup>1</sup>, А. В. Гладков<sup>2</sup>, С. А. Здобнов<sup>3</sup>, Д. М. Марков<sup>4</sup>, Н. В. Недопекин<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1,4,5</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>2</sup> alexey.gladkov.1@yandex.ru, <sup>3</sup> sa\_zdobnov@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Актуальной задачей при отработке новых типов изделий авиационной техники является создание датчиков угловых перемещений, обладающих высокой стабильностью, точностью измерений и надежностью. *Материалы и методы.* При решении поставленных задач использованы методы интегрального и дифференциального исчисления, теории электрических цепей и электромагнитного поля. При проектировании конструкций датчиков применялась система автоматизированного проектирования КОМПАС. *Результаты.* В результате проведенной работы разработан трехканальный датчик угловых перемещений и два варианта исполнения вторичного преобразователя. Составлена схема замещения трансформаторного датчика угловых перемещений на основе которой получено выражение, определяющее зависимость значения выходной ЭДС от углового перемещения ротора датчика.

**Ключевые слова:** датчик перемещений, статор, ротор, схема замещения, обмотка, вторичный преобразователь

**Для цитирования:** Трофимов А. А., Гладков А. В., Здобнов С. А., Марков Д. М., Недопекин Н. В. Трехканальный датчик угловых перемещений // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 120–126. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-14

### THREE-CHANNEL ANGULAR DISPLACEMENT SENSOR

A.A. Trofimov<sup>1</sup>, A.V. Gladkov<sup>2</sup>, S.A. Zdobnov<sup>3</sup>, D.M. Markov<sup>4</sup>, N.V. Nedopekin<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1,4,5</sup> iit@pnzgu.ru, <sup>2</sup> alexey.gladkov.1@yandex.ru, <sup>3</sup> sa\_zdobnov@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The actual problem in the development of new types of aviation products is the creation of angular displacement sensors with high stability, measurement accuracy and reliability. *Materials and methods.* The methods of integral and differential calculus, the theory of electric circuits and electromagnetic field were used to solve the problems. The computer-aided design system KOMPAS was used in the design of sensor structures. *Results.* As a result of this work, a three-channel angular displacement sensor and two versions of the secondary converter have been developed. The substitution diagram of transformer angular displacement sensor on the basis of which the expression defining dependence of output EMF value on angular displacement of the sensor rotor is obtained.

**Keywords:** displacement sensor, stator, rotor, substitution diagram, winding, secondary converter

**For citation:** Trofimov A.A., Gladkov A.V., Zdobnov S.A., Markov D.M., Nedopekin N.V. Three-channel angular displacement sensor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):120–126. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-14

При оснащении изделий авиационной техники актуальной задачей является разработка датчиков угловых перемещений, которые входят в состав систем управления самолета, в том числе в систему контроля параметров шасси, для измерения значения перемещения штока амортизатора передней и основных опор шасси [1–4].

Основным недостатком датчиков угловых перемещений, используемых в системах самолета, является недостаточная надежность, так как съем информации осуществляется с единственного канала.

Разрабатываемый датчик угловых перемещений имеет три информационных канала. Каждый канал датчика разделен по электрической схеме и выполнен конструктивно независимым.

Конструктивная схема датчика представлена на рис. 1.

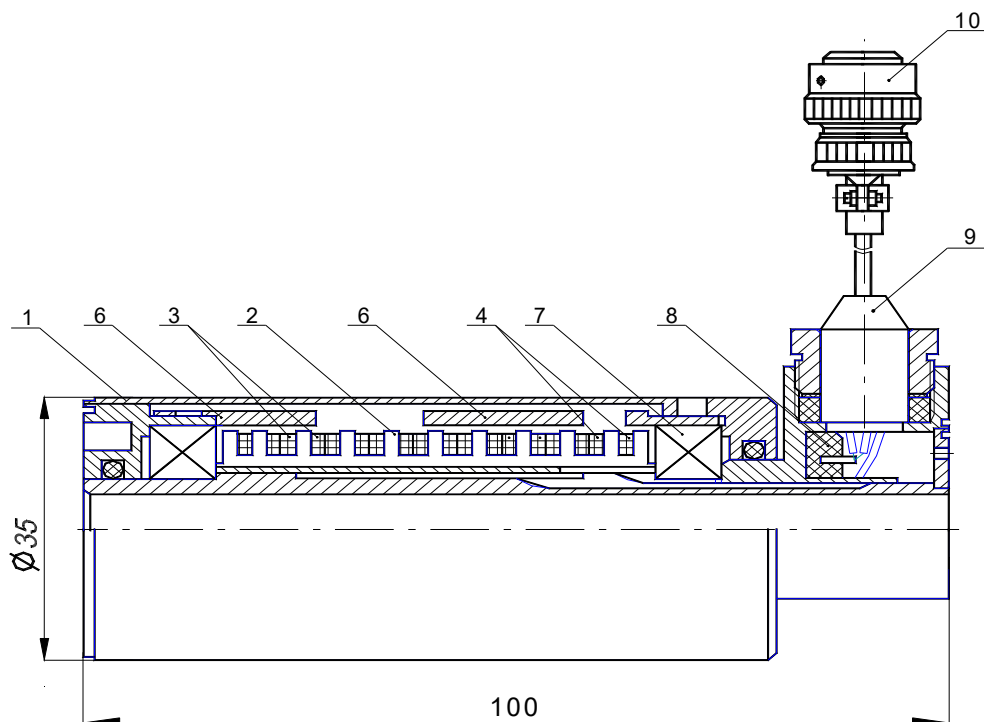


Рис. 1. Конструктивная схема датчика угловых перемещений

Основными элементами конструкции датчика угловых перемещений являются: корпус датчика 1, статор 2, на котором располагаются три секции питающих обмоток 3 и шесть секций измерительных обмоток 4, ротор 6, подшипники качения 7, контактная колодка 8, кабельная перемычка 9, заканчивающаяся разъемом типа СНЦ, обеспечивающим съем информации с датчика и подачу напряжения питания. Датчик жестко крепится на валу с помощью зубцового соединения.

По принципу преобразования датчик является дифференциальным трансформатором. В нем измерительные и питающие обмотки располагаются в кольцевых проточках статора. Снаружи статора располагается ротор с перфорированными окнами. Датчик работает следующим образом: при подаче на обмотки питания переменного тока в секциях измерительной обмотки индуцируется переменная ЭДС (E), амплитуда которой зависит от положения ротора относительно полюсов статора.

Так как для авиационной техники требуются датчики, работоспособные в жестких условиях эксплуатации (широкий диапазон воздействующих температур, вибрация, удары, линейные ускорения, влажность и т.д.), необходимо найти функцию преобразования датчика и определить параметры, которые могут повлиять на метрологические и надежность характеристики датчика в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов. Для решения поставленной задачи составим схему замещения трансформаторного датчика угловых перемещений, приведенную на рис. 2 [5].

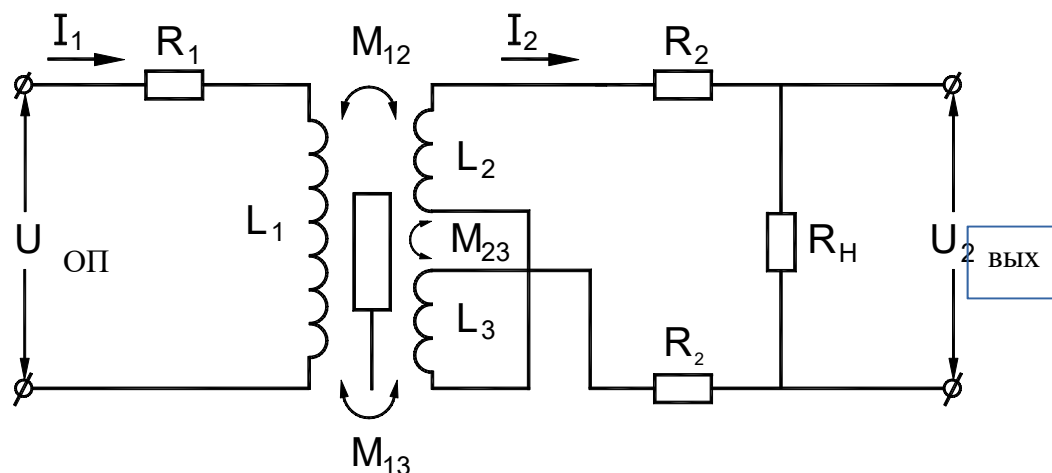


Рис. 2. Схема замещения трансформаторного датчика угловых перемещений

На схеме замещения приняты следующие обозначения:  $R_1$  – сопротивление обмотки питания;  $U_{\text{оп}}$  – напряжение, поступающее на обмотку питания;  $L_1$  – индуктивность первичной обмотки;  $M_{12}$  и  $M_{13}$  – взаимные индуктивности соответственно верхней и нижней секций вторичной обмотки;  $M_{23}$  – взаимные индуктивности секций вторичной обмотки;  $L_2$  и  $L_3$  – индуктивности соответственно, верхней и нижней секций вторичной обмотки;  $R_H$  – сопротивление нагрузки,  $U_{\text{вых}}$  – выходное напряжение.

Уравнения Кирхгофа для цепи первичной обмотки:

$$U_{\text{оп}} = (R_1 + j\omega L_1)I_1 - j\omega (M_{12} - M_{13})I_2, \quad (1)$$

где  $M_{12} = k\sqrt{L_1 \cdot L_2}$ ;  $M_{13} = k\sqrt{L_1 \cdot L_3}$ ;  $k$  – коэффициент связи катушек, показывающий, какая доля потока, созданного током в контуре, пронизывает соседний контур.

Для цепи вторичной обмотки:

$$[2R_2 + R_H + j\omega (L_2 + L_3 - 2M_{23})]I_2 - j\omega (M_{12} - M_{13})I_1 = 0, \quad (2)$$

где  $M_{23} = k\sqrt{L_2 \cdot L_3}$

Выражение для тока нагрузки имеет следующий вид:

$$I_2 = \frac{j\omega U_{\text{оп}} (M_{12} - M_{13})}{\omega^2 (M_{12} - M_{13})^2 + (R_1 + j\omega L_1) \cdot [2R_2 + R_H + j\omega (L_2 + L_3 - 2M_{23})]}. \quad (3)$$

Выходное напряжение трансформаторного датчика угловых перемещений:

$$U_{\text{вых}} = I_2 R_H = \frac{j\omega U_{\text{оп}} R_H (M_{12} - M_{13})}{\omega^2 \cdot (M_{12} - M_{13})^2 + (R_1 + j\omega L_1) \cdot [2R_2 + R_H + j\omega (L_2 + L_3 - 2M_{23})]}. \quad (4)$$

Угол сдвига фазы выходного напряжения относительно напряжения питания:

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{\omega [R_1 \cdot (L_2 + L_3 - 2M_{23}) + L_1 (2R_2 + R_H)]}{R_1 (2R_2 + R_H) + \omega^2 (M_{12} - M_{13})^2 - \omega^2 L_1 [L_2 + L_3 - 2M_{23}]} \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) характеризуют выходное напряжение трансформаторного датчика угловых перемещений для определенного положения сердечника. Из уравнения (4) видно, что для достижения линейного выходного напряжения датчика необходимо, чтобы при перемещении якоря индуктивность первичной обмотки  $L_1$  и величина  $(L_2 + L_3 - 2M_{23})$  оставались неизменными, а разность взаимных индуктивностей  $(M_{12} - M_{13})$  изменялась линейно в зависимости от значения величины перемещения якоря.

Для дифференциального трансформатора, имеющего линейную характеристику преобразования, при  $R_H \rightarrow \infty$  большинством членов уравнений (4) и (5) можно пренебречь.

Выходное напряжение с датчика будет определяться выражением

$$U_{\text{вых}} = \frac{j\omega U_{\text{он}}(M_{12} - M_{13})}{R_1 + j\omega L_1}. \quad (6)$$

Значение угла сдвига фазы будет определяться как

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{\omega L_1}{R_1}. \quad (7)$$

ЭДС секций вторичной обмотки трансформаторного датчика в соответствии с работой [7] определяется выражениями

$$E_1 = \omega M_o \frac{U_{\text{он}}}{Z_{\text{он}}} \left(1 - \frac{mx}{M_o}\right); \quad (8)$$

$$E_2 = \omega M_o \frac{U_{\text{он}}}{Z_{\text{он}}} \left(1 - \frac{mx}{M_o}\right), \quad (9)$$

где  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  – частота напряжения питания;  $M_o$  – взаимная индуктивность секции вторичной обмотки и первичной обмотки при расположении сердечника на нейтрали трансформаторного датчика;  $Z_{\text{он}}$  – полное сопротивление первичной обмотки (обмотки питания);  $x$  – перемещение сердечника относительно электрической нейтрали датчика;  $m$  – изменение взаимной индуктивности секции вторичной обмотки и первичной обмотки.

Выражая величины  $E_1$  и  $E_2$  в долях выходной ЭДС, приходящейся на единицу перемещения якоря, получим

$$E_1 = a U_{\text{он}} \left(1 - \frac{ex}{a}\right) = E_o \left(1 - \frac{ex}{a}\right); \quad (10)$$

$$E_2 = a U_{\text{он}} \left(1 + \frac{ex}{a}\right) = E_o \left(1 + \frac{ex}{a}\right), \quad (11)$$

где  $E_o$  – ЭДС на зажимах секций вторичной обмотки при расположении якоря в электрической нейтрали датчика;  $e$  – изменение вторичной ЭДС, приходящееся на единицу перемещения сердечника;

$$a = \frac{\omega_o M_o}{z_{\text{он}}} = \frac{E_o}{E_{\text{он}}} \quad (12)$$

Значение выходной ЭДС датчика при встречном включении вторичной обмотки определяется выражением

$$E_2 - E_1 = 2E_o \frac{e}{a} x. \quad (13)$$

В полученном выражении, в отличие от выражения (7), значение выходной ЭДС датчика непосредственно связано с перемещением сердечника.

Для дальнейшей обработки выходной сигнал с трех каналов через кабельную перемычку поступает во вторичный преобразователь.

На рис. 3 приведена структурная схема одного канала вторичного преобразователя, предназначенного для обработки сигналов с чувствительного элемента (ЧЭ) датчика.

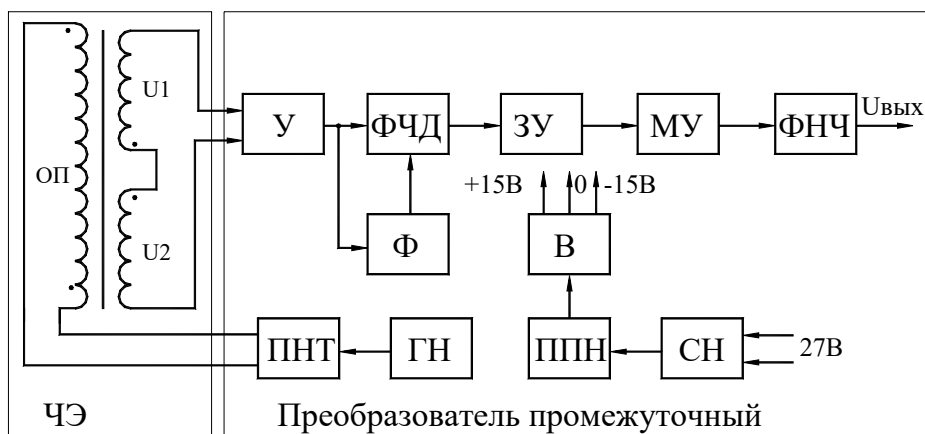


Рис. 3. Структурная схема одного канала вторичного преобразователя

Генератор напряжения (ГН) формирует напряжение переменного тока синусоидальной формы частотой  $\sim 7 \dots 10$  кГц. Это напряжение в преобразователе «напряжение-ток» (ПНТ) преобразуется в стабильный ток (8–12 мА), который подается в обмотку питания (ОП) чувствительного элемента (ЧЭ) датчика.

В измерительных обмотках, включенных встречно, индуцируются напряжения  $U_1$  и  $U_2$ . Разностный сигнал с измерительных обмоток ( $U_1 - U_2$ ) поступает на вход предварительного усилителя (У). Далее усиленное переменное напряжение подается на фазочувствительный детектор (ФЧД), управление которым осуществляется сигналом формирователя (Ф) синхронно с измеряемым напряжением. Выпрямленное напряжение сохраняется в запоминающем устройстве (ЗУ), далее нормируется по величине в масштабном усилителе (МУ). После фильтра нижних частот (ФНЧ) выходное напряжение равно

$$U_{\text{вых}} = K_y(U_1 - U_2), \quad (14)$$

где  $K_y$  – коэффициент преобразования.

Питание преобразователя осуществляется от источника напряжения постоянного тока 27 В. В преобразователе имеется блок питания, рассчитанный на напряжения  $\pm 15$  В и состоящий из стабилизатора напряжения (СН), преобразователя постоянного напряжения в переменное (ППН) и выпрямителя (В).

В настоящее время разрабатывается электронный модуль для датчика угловых перемещений с использованием микропроцессора, который позволит значительно снизить габаритно-весовые показатели вторичного преобразователя, повысить точность измерения, а также даст возможность совместить ЧЭ и электронный модуль в одном корпусе.

Электронный модуль (ЭМ) состоит из:

- устройства питания датчика, обеспечивающего питание датчика импульсами тока прямоугольной (сглаженной) формы;
- входных усилителей, выполненных на сдвоенном операционном усилителе AD823AR;
- устройства преобразования данных.

Условное графическое изображение электронного модуля приведено на рис. 4.

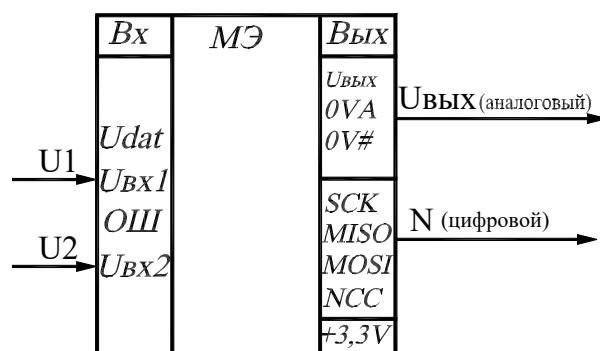


Рис. 4. Условное графическое изображение электронного модуля

В соответствии с заложенной программой микроконтроллер формирует последовательность импульсов на входе устройства питания датчика, которая преобразуется в импульсы тока. Длительность и количество импульсов в последовательности определяются электромагнитными процессами в датчике и формируются программным образом.

Выходные сигналы с датчика  $U1$  и  $U2$ , амплитуда которых зависит от угловых перемещений, поступают на входные усилители. Отрицательная часть импульсов срезается ограничительными диодами.

Усилители обеспечивают усиление входных сигналов с датчика до уровня 2,4 В, необходимого для работы встроенного АЦП микропроцессора. За счет конденсаторов обеспечивается фильтрация и сглаживание импульсных сигналов до формы усеченной косинусоиды. Выборка амплитуды по максимуму сигнала обеспечивается программной задержкой относительно входных импульсов.

Устройство преобразователя данных выполнено на микропроцессоре фирмы Silicon Labs C8051F007, имеющего в своем составе: 12-разрядный АЦП с 4-входовым мультиплексором, 12-разрядный ЦАП, 8-разрядный цифровой порт и внутреннюю Flash-память программ. Доступ к памяти программ обеспечивается через контактные площадки 1–7 JTAG порта. Оцифрованные значения входных сигналов с полуобмоток датчика  $U1$ ,  $U2$  преобразуются в код в виде функции преобразования:

$$N = \left( \frac{U1 - U2}{U1 + U2} \cdot k_1 + k_2 \right) \cdot \theta_{\circ} + U_{\text{ПД}}, \quad (15)$$

где  $N$  – выходной код;  $k_1$ ,  $k_2$  – нормирующие коэффициенты;  $\theta_{\circ}$  – температурный коэффициент влияния;  $U_{\text{ПД}}$  – код оценки влияния амплитуды питания датчика.

Выходной код длиной три байта выдается по каналу SPI по запросу от внешнего устройства. Первые два байта – информация о перемещении, третий байт – информация диагностики состояния датчика.

Выходной код выдается через встроенный ЦАП в виде аналогового сигнала 0–2,4 В (для работы с аналоговыми регистраторами).

### Список литературы

1. Трофимов А. А., Гладков А. В., Трофимова Н. С. [и др.]. Датчик угловых перемещений для газотурбинного двигателя // Измерения. Мониторинг Управление. Контроль. 2021. № 2. С. 71–76.
2. 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.
3. 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.
4. Трофимов А. А. Датчик угловых перемещений // Датчики и системы. 2005. № 9. С. 13–14.
5. Шидлович Л. Х. Дифференциальные трансформаторы и их применение. М., 1966.
6. Ураксеев М. А., Кагарманов В. Н. Распределение магнитных потоков в электромагнитных датчиках перемещений // Датчики и системы. 2003. № 1. С. 33–36.
7. Трофимов А. А., Трофимов А. Н. Взаимоиндуктивные датчики перемещений : моногр. Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. 174 с.

### References

1. Trofimov A.A., Gladkov A.V., Trofimova N.S. [et al.]. Angular displacement sensor for a gas turbine engine. *Izmereniya. Monitoring Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring Management. Control.* 2021;(2):71–76. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of development of unified sensor structures for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment.* 2010;(10):18–21. (In Russ.)
3. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and measurement systems based on them, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems.* 2012;(9):4–6. (In Russ.)

4. Trofimov A.A. Angular displacement sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2005;(9):13–14. (In Russ.)
5. Shidlovich L.Kh. *Differentsial'nye transformatory i ikh primeneniye* = . Moscow, 1966. (In Russ.)
6. Urakseev M.A., Kagarmenov V.N. Distribution of magnetic fluxes in electromagnetic displacement sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2003;(1):33–36. (In Russ.)
7. Trofimov A.A., Trofimov A.N. *Vzaimoinduktivnye datchiki peremeshcheniy: monogr. = Mutually inductive displacement sensors : monogr.* Penza: Izd-vo PGU, 2009:174. (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: iit@pnzgu.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)

**Алексей Владимирович Гладков**

аспирант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: alexey.gladkov.1@yandex.ru

**Aleksey V. Gladkov**

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

**Сергей Александрович Здобнов**

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

**Sergey A. Zdobnov**

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

**Dmitriy M. Markov**

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

**Никита Вячеславович Недопекин**

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

**Nikita V. Nedopekin**

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 8.02.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 12.03.2022**

**Принята к публикации/Accepted 20.04.2022**