

УДК 504.064.36
doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-8

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ ЧЕЛОВЕКА

О. Е. Безбородова¹, О. Н. Бодин², Н. С. Коваль³, А. А. Трофимов⁴, А. В. Григорьев⁵

^{1,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

³ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ ot@pnzgu.ru, ² bodin_o@inbox.ru, ³ koval-nc@mail.ru, ⁴ iit@pnzgu.ru, ⁵ a_grigorev@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В основе обеспечения экологического благополучия человека в территориальной техносфере лежит проведение многопараметрического анализа состояния элементов территориальной техносферы. Качество проведения измерительного контроля факторов риска определяет результативность управляющих воздействий, направленных на обеспечение экологического благополучия человека. Целью данной работы является метрологический анализ измерительного канала многоканальной информационно-измерительной системы. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: представить структуру измерительного канала; установить, какие компоненты измерительного канала влияют на относительную погрешность измеряемой величины; рассчитать относительную погрешность контролируемого параметра, используя ее случайную и методическую погрешности. *Материалы и методы.* Приведены структурные схемы информационно-измерительной системы обеспечения экологического благополучия человека и ее измерительного канала, рассмотрена методика расчета суммарной относительной погрешности измерения, приведены зависимости для определения относительной погрешности для каждого компонента измерительного канала. *Результаты.* Проведены расчет и анализ суммарной относительной погрешности измерительного канала для аммиака в атмосфере, установлен «вклад» каждого компонента измерительного канала. *Выводы.* В результате проведенного метрологического анализа измерительного канала информационно-измерительной системы для определения экологического благополучия человека установлено, что суммарная относительная погрешность составляет не более 0,4 %, что является приемлемым значением для измерительного контроля.

Ключевые слова: измерительный канал, информационно-измерительная система, экологическое благополучие человека, погрешность измерения

Для цитирования: Безбородова О. Е., Бодин О. Н., Коваль Н. С., Трофимов А. А., Григорьев А. В. Метрологический анализ измерительного канала информационно-измерительной системы для определения экологического благополучия человека // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 2. С. 70–76. doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-8

METROLOGICAL ANALYSIS OF THE MEASURING CHANNEL OF THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR DETERMINING THE ENVIRONMENTAL WELL-BEING OF HUMANS

O.E. Bezborodova¹, O.N. Bodin², N.S. Koval³, A.A. Trofimov⁴, A.V. Grigoriev⁵

^{1,4,5} Penza State University, Penza, Russia

² Penza State Technological University, Penza, Russia

³ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹ ot@pnzgu.ru, ² bodin_o@inbox.ru, ³ koval-nc@mail.ru, ⁴ iit@pnzgu.ru, ⁵ a_grigorev@mail.ru

Abstract. *Background* The basis for ensuring the ecological well-being of a person in the territorial technosphere is a multi-parameter analysis of the state of the elements of the territorial technosphere. The quality of the measurement control of risk factors determines the effectiveness of control actions aimed at ensuring the environmental well-being of a person. The purpose of this work is the metrological analysis of the measuring channel of a multichannel information-measuring system. To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks: to present the structure of the

measuring channel; establish which components of the measuring channel affect the relative error of the measured value; calculate the relative error of the controlled parameter using its random and methodological errors. *Materials and methods.* The article presents block diagrams of the information-measuring system for ensuring the ecological well-being of a person and its measuring channel, considers the method for calculating the total relative measurement error, and shows dependencies for determining the relative error for each component of the measuring channel. *Results.* The calculation and analysis of the total relative error of the measuring channel for ammonia in the atmosphere were carried out, and the «contribution» of each component of the measuring channel was established. *Conclusion.* As a result of the metrological analysis of the measuring channel of the information-measuring system for determining the environmental well-being of a person, it was found that the total relative error is no more than 0,4 %, which is an acceptable value for measuring control.

Keywords: measuring channel, information-measuring system, human ecological well-being, measurement error

For citation: Bezborodova O.E., Bodin O.N., Koval N.S., Trofimov A.A., Grigoriev A.V. Metrological analysis of the measuring channel of the information-measuring system for determining the environmental well-being of humans. *Izmenenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(2):70–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-2-8

Постановка проблемы

В основе обеспечения экологического благополучия человека в территориальной техносфере лежит проведение многопараметрического анализа состояния элементов территориальной техносферы: функционального состояния организма человека, качества окружающей среды и объектов техносферы. Многопараметрический анализ основан на регулярном измерительном контроле значений факторов риска. Это специально разработанный комплекс инструментальных замеров и контроля функционального состояния здоровья человека, окружающей среды и объектов техносферы. Качество проведения многопараметрического измерительного контроля факторов риска определяет результативность управляющих воздействий, направленных на обеспечение экологического благополучия человека. Информация, полученная в рамках многопараметрического измерительного контроля должна удовлетворять принципам инвариантности, комплексности, наличия причинно-следственных связей, оперативности. Именно эти данные характеризуют сложившуюся под воздействием факторов риска ситуацию в территориальной техносфере и позволяют выявить причинно-следственные связи для составления прогноза ее изменения и осуществления корректирующих мероприятий.

В Российской Федерации специально уполномоченные органы (Росприроднадзор, Роспотребнадзор, Ростехнадзор) осуществляют измерительный контроль элементов территориальной техносферы. К основным недостаткам этого измерительного контроля относят: различие методик сбора и измерения данных; использование морально устаревших приборов в лабораториях и на постах наблюдения; большую долю ручного труда при измерении, передаче, обработке, накоплении результатов измерительного контроля; отсутствие алгоритмов и адекватных моделей комплексной обработки, оценки и прогнозирования разнородных данных: медицинских, экологических и технологических.

Во всем мире совершенствование приборной базы для повышения эффективности многопараметрического измерительного контроля основано на цифровизации и интеллектуализации при разработке и внедрении приборного и программного обеспечения; внедрении дистанционного измерительного контроля; разработке методов и моделей для оценки и прогноза изменения уровня экологического благополучия человека.

У созданных на этой основе информационно-измерительных систем (ИИС) возрастает количество измеряемых параметров и скорость измерительного контроля, что позволяет им проводить сбор, регистрацию и обработку данных в масштабе реального времени. При разработке таких ИИС особое внимание необходимо уделять взаимодействию компонентов друг с другом, особенно измерительным каналам, обеспечивающим точность, достоверность и оперативность получения данных для оценки уровня экологического благополучия человека.

Целью данной работы является метрологический анализ измерительного канала многоканальной ИИС параллельного действия (МК ИИС ПД) для определения экологического благополучия человека.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: представить структуру измерительного канала; установить составляющие компоненты измерительного канала, влияющие на относительную погрешность измеряемой величины; рассчитать относительную

погрешность контролируемого параметра с учетом ее случайной и методической погрешностей.

Материалы и методы

В ГОСТ Р 8.596 под измерительной системой (ИС) понимается совокупность измерительных, связующих, вычислительных компонентов, образующих измерительные каналы, и вспомогательных устройств (компонентов ИС), функционирующих как единое целое, предназначенных для: получения информации о состоянии объекта с помощью измерительных преобразований в общем случае множества изменяющихся во времени и распределенных в пространстве величин, характеризующих это состояние; обработки результатов измерений; регистрации и индикации результатов измерений и результатов их обработки; преобразования этих данных в выходные сигналы системы в разных целях¹.

Структурная схема МК ИИС ПД определения экологического благополучия человека, разработанная на основе требований ГОСТа, приведена на рис. 1.

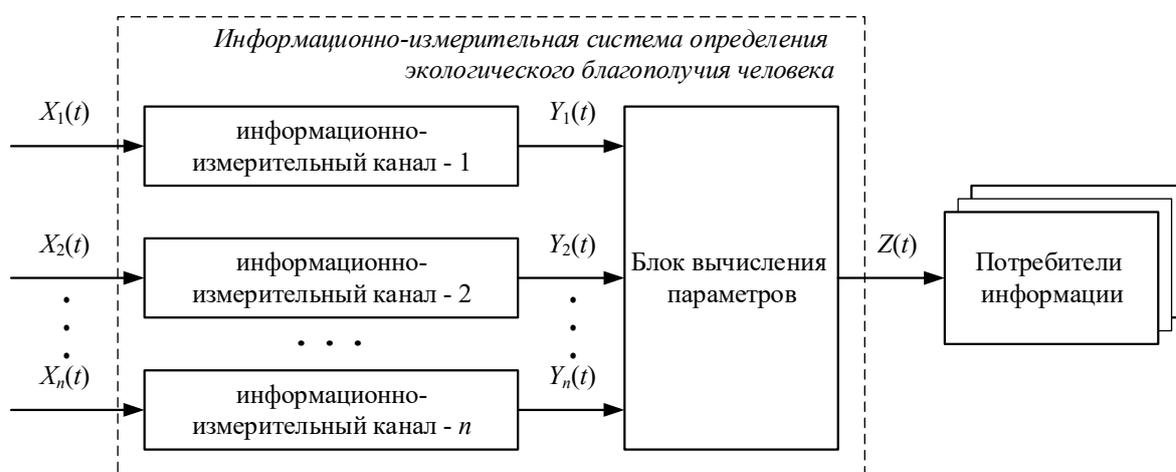


Рис. 1. Структурная схема МК ИИС ПД

Такие МК ИИС ПД обладают более высокими надежностью и быстродействием при параллельном получении данных в режиме реального времени, выбором средств измерений в зависимости от набора измеряемых величин, что исключает требование унификации сигналов – основное в одноканальных ИИС [1, 2]. Также неоспоримое достоинство МК ИИС ПД – параллельное измерение в режиме реального времени совокупности параметров различных по природе происхождения объектов (человека, окружающая среда, технологический процесс).

Основой МК ИИС ПД является измерительный канал. Под измерительным каналом (ИК) ИС [1] понимается конструктивно или функционально выделяемая часть ИС, выполняющая законченную функцию от восприятия измеряемой величины до получения результата ее измерений, выраженного числом или соответствующим ему кодом, или до получения аналогового сигнала, один из параметров которого – функция измеряемой величины. Структура типового измерительного канала МК ИИС ПД определения экологического благополучия человека приведена на рис. 2.

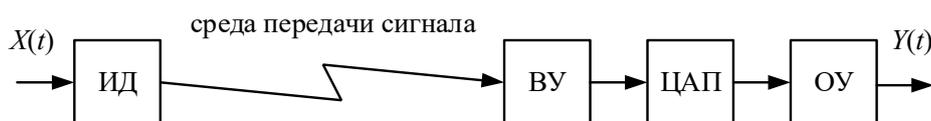


Рис. 2. Структурная схема измерительного канала:

$X(t)$ – функция измеряемого параметра; $Y(t)$ – функция выходного сигнала

¹ ГОСТ Р 8.596-2002. ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.

Измерительный канал состоит из интеллектуального датчика (ИД), среды передачи сигнала, вычислительного устройства (ВУ), цифроаналогового преобразователя (ЦАП), операционного усилителя (ОУ).

В качестве первичного преобразователя измеряемой величины выбран ИД [3], т.е. адаптируемый датчик с функцией метрологического самоконтроля. ИД имеет цифровой выход и может обеспечивать передачу информации о метрологической исправности через интерфейс. При этом, обладая вычислительными возможностями, ИД позволяет осуществлять автоматическую коррекцию погрешности, появившейся в результате воздействия влияющих величин и/или старения компонентов; самовосстановление при возникновении единичного дефекта в датчике; самообучение¹. Функции обработки, регистрации и индикации результатов измерений выполняет ВУ. ЦАП необходим для преобразования измерительной информации из цифровой формы в аналоговый сигнал для связи с аналоговыми элементами ИИС. ОУ выполняет функции усиления, фильтрации и смещения нуля, приведенное ко входу.

В соответствии с работами [3, 4], если погрешности вызываются несколькими (три и более) независимыми друг от друга случайными причинами, то складываются не сами погрешности, а их квадраты. Поэтому суммарная относительная погрешность измерения контролируемого параметра связана со случайной и методической погрешностями выражением

$$\delta_{\Pi} = k \sqrt{\delta_{\text{ВУ}}^2 + \delta_{\text{ЦАП}}^2 + \delta_{\text{Кс}}^2 + \delta_{\text{ОУ}}^2}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, определяемый доверительной вероятностью P . Для $P = 0,95$ коэффициент $k = 1,1$; $\delta_{\text{ВУ}}^2$ – относительная погрешность представления числа в вычислительном устройстве с плавающей запятой; $\delta_{\text{ЦАП}}^2$ – суммарная относительная погрешность ЦАП; $\delta_{\text{Кс}}^2$ – относительная погрешность вносимая каналом связи; $\delta_{\text{ОУ}}^2$ – относительная погрешность операционного усилителя, определяемая по формуле

$$\delta_{\text{ОУ}}^2 = \delta_{\text{ус}}^2 + \delta_{\text{ФНЧ}}^2 + \delta_{\text{см}}^2, \quad (2)$$

где $\delta_{\text{ус}}^2$ – относительная погрешность операции усиления; $\delta_{\text{ФНЧ}}^2$ – относительная погрешность фильтра низкой частоты; $\delta_{\text{см}}^2$ – относительная погрешность смещения.

В расчетах предполагаем, что для всех погрешностей приблизительно одинаковы доверительные вероятности. Анализ выражения (1) показывает: если погрешность одного из компонентов измерительного канала значительно меньше остальных, то ее вкладом в суммарную погрешность можно пренебречь. В ряде случаев при множественных измерениях получают одинаковые значения контролируемого параметра. Из этого следует, что погрешность не более чем минимальное значение, измеряемое прибором. И, следовательно, суммарная погрешность формируется допустимой методической погрешностью.

Уравнения (1) и (2) описывают суммарную погрешность как сумму погрешностей, формируемых выполняемыми измерительными преобразованиями [5].

Производители ЦАП обычно указывают характеристики, позволяющие оценить его суммарную погрешность. Но значительный вклад вносит инструментальная погрешность, связанная с нестабильностью источника опорного напряжения, выходных операционных усилителей и пр. К причинам появления погрешностей компонентов ИК можно отнести технологический разброс значений контролируемых параметров, влияние параметров внешней среды, старение средств измерений, возникновение шумов и помех (внешних и внутренних). Исходя из этого функции преобразования используемых ЦАП не совпадают с идеальными по целой совокупности параметров (форма, количество и уровень ступеней, расположение относительно координатных осей).

Суммарная относительная погрешность ЦАП зависит от аддитивной погрешности (ADD), интегральной нелинейности (INL), дифференциальной нелинейности (DNL), ошибки опорного напряжения (OP), ошибки квантования (KB) и определяется по формуле

¹ ГОСТ Р 8.673-2009. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.

$$\delta_{\text{ЦАП}} = \sqrt{\delta_{\text{ADD}}^2 + \delta_{\text{INL}}^2 + \delta_{\text{DNL}}^2 + \delta_{\text{ОП}}^2 + \delta_{\text{КВ}}^2}, \quad (3)$$

где $\delta_{\text{ADD}} = 0,011\%$ от общего диапазона входных значений ЦАП; $\delta_{\text{INL}} = \pm 0,08\%$ от общего диапазона входных значений ЦАП; $\delta_{\text{DNL}} = \pm 0,04\%$ от общего диапазона входных значений ЦАП; $\delta_{\text{ОП}} = \pm 0,019\%$ от общего диапазона входных значений ЦАП; $\delta_{\text{КВ}} \approx 0,011\%$ от общего диапазона входных значений ЦАП.

Операционный усилитель *TL074* (*Texas Instruments*) выполняет функции усиления, фильтрации и смещения сигнала. Им вносятся следующие погрешности: ошибка усиления равна $\delta_y = 0,01\%$ от общего диапазона входных значений, $\delta_T = 0,5 \text{ ppm} / ^\circ\text{C} = 0,00005\% / ^\circ\text{C}$; температурным смещением можно пренебречь, так как система работает в нормальных условиях:

$$\delta_{\text{yc}} = \sqrt{\delta_y^2 + \delta_T^2}. \quad (4)$$

Погрешность фильтра низкой частоты этого операционного усилителя определим по формуле

$$\delta_{\text{ФНЧ}} = \sqrt{\delta_{U_c}^2}, \quad (5)$$

где δ_{U_c} – погрешность, вызванная напряжением смещения, которую определим по формуле

$$\delta_{U_c} = \frac{U_c}{U_{\text{Вх.макс}}} 100\%. \quad (6)$$

Погрешность смещения сигнала, зависящую только от погрешности, вызванной напряжением смещения, определим по формуле

$$\delta_{\text{см}} = \sqrt{\delta_{U_c}^2}. \quad (7)$$

Если для передачи сигнала с датчика на ИИС использовать кабель с гнездом типа CP50, то в соответствии с руководством [6] и учитывая, что 1 дБ означает уменьшение амплитуды сигнала в $10^{0,05} \approx 1,122$ раза на 100 м (на 1 м затухание 0,001 дБ/м), относительная погрешность, вносимая каналом связи в результате затухания полезного сигнала, составит $\delta_{\text{кв}}^2 = 0,0005\%$ на каждый метр кабеля.

В качестве первичного преобразователя сигнала предлагается использовать датчик концентрации аммиака, характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики динамического преобразователя аналоговой измерительной информации датчика аммиака EnergoM-3001-NH3 [7]

Наименование	Значение
Регистрируемый газ	Аммиак (NH_3)
Метод измерения	Полупроводниковый сенсор
Диапазон измерений, ppm	0...500
Скорость передачи данных	2400, 4800, 9600
Порт связи	RS485 Modbus-RTU/ реле/ аналоговый выход
Точность измерения температуры	$\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$ ($25\text{ }^\circ\text{C}$)
Точность измерения влажности	0 % RH-100 % RH
Точность измерения концентрации	0,1ppm

Результаты и обсуждение

Авторами проведен метрологический анализ измерительного канала ИИС для определения экологического благополучия человека на примере определения относительной погрешности с первичного преобразователя – датчик концентрации аммиака, характеристики которого приведены в табл. 1.

Измерительный контроль, выполняемый ВУ, осуществляем в соответствии с руководством [7]. Исходя из этого относительная погрешность представления числа в ВУ с плавающей запятой типа *float* составит $\delta_{\text{ВУ}} \approx 1 \cdot 10^{-8} \%$.

Погрешность представления числа в ВУ с плавающей запятой в несколько раз меньше остальных погрешностей, поэтому ее влияние на суммарную погрешность не велико и ею можно пренебречь.

При расчете суммарной относительной погрешности ЦАП по формуле (3) получаем

$$\delta_{\text{ЦАП}} = \sqrt{(0,011)^2 + (0,08)^2 + (0,04)^2 + (0,019)^2 + (0,011)^2} = 0,31 \%$$

Погрешность операционного усилителя, рассчитанная по формуле (4), составит

$$\delta_{\text{ус}} = \pm 0,01 \%$$

Погрешность ФНЧ, учитывающая напряжение смещения, определим по формуле (5):

$$\delta_{\text{ФНЧ}} = \pm 0,1 \%$$

Погрешность, вызванная напряжением смещения:

$$\delta_{\text{см}} = 0,1 \%$$

Тогда суммарная относительная погрешность измерений:

$$\delta_{\text{и}} = 1,1 \sqrt{(0,31)^2 + (0,01)^2 + (0,1)^2 + (0,1)^2} = 0,374 \%$$

Заключение

В результате проведенного метрологического анализа измерительного канала информационно-измерительной системы для определения экологического благополучия человека установлено, что суммарная относительная погрешность составляет не более 0,4 %, что является приемлемым значением для измерительного контроля.

Список литературы

1. Юрков Н. К., Прошин А. А., Горячев Н. В. Синтез структуры многоканальной информационно-измерительной системы // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 64–71. doi: 10.21685/2307-4205-2020-3-8
2. Иващук О. А. Технология интеллектуального мониторинга экологической ситуации // Образование, наука и производство. 2013. № 1. С. 26–34.
3. Жулев В. И., Чернов Е. И. Практикум по метрологии : учеб. пособие. М. : Курс, 2021. 125 с.
4. Шустов Ю. С., Плеханова С. В., Виноградова Н. А. Стандартизация и метрология : учебное пособие. М. : РГУ им. А. Н. Косыгина, 2021. 167 с.
5. Ашанин В. Н., Исаев С. Г. Основы измерений в электрических цепях : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. 57 с.
6. Боккер П. Передача данных : Техника связи в системах телеобработки данных : в 2 т. / пер. с нем. С. М. Широкова ; под ред. Д. Д. Кловского. М. : Связь, 1980.
7. Руководство по эксплуатации датчика аммиака Energom-3001-NH3 // Компания ООО «Энергометрика». URL: <https://www.energometrika.ru/catalog/energom-3001-nh3-datchik-ammiaka.html> (дата обращения: 23.03.2023).

References

1. Yurkov N.K., Proshin A.A., Goryachev N.V. Synthesis of the structure of a multichannel information and measurement system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):64–71. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-3-8
2. Ivashchuk O.A. Technology of intelligent monitoring of the ecological situation. *Obrazovanie, nauka i proizvodstvo = Education, science and production*. 2013;(1):26–34. (In Russ.)
3. Zhulev V.I., Chernov E.I. *Praktikum po metrologii: ucheb. posobie = Practical training in metrology: textbook*. Moscow: Kurs, 2021:125. (In Russ.)
4. Shustov Yu.S., Plekhanova S.V., Vinogradova N.A. *Standartizatsiya i metrologiya: ucheb. posobie = Standardization and metrology: textbook*. Moscow: RGU im. A.N. Kosygina, 2021:167. (In Russ.)

5. Ashanin V.N., Isaev S.G. *Osnovy izmereniy v elektricheskikh tsepyakh: ucheb. posobie = Fundamentals of measurements in electrical circuits : textbook*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:57. (In Russ.)
6. Bokker P. *Peredacha dannykh: Tekhnika svyazi v sistemakh teleobrabotki dannykh: v 2 t. = Communication technology in data teleworking systems : in 2 vols*. Translated from German S.M. Shirokova. Moscow: Svyaz', 1980. (In Russ.)
7. Operating manual of the ammonia sensor EnergoM-3001-NH3. *Kompaniya OOO «Energometrika» = Energometrica LLC*. (In Russ.). Available at: <https://www.energometrika.ru/catalog/energom-3001-nh3-datchik-ammiaka.html> (accessed 23.03.2023).

Информация об авторах / Information about the authors

Оксана Евгеньевна Безбородова

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой техносферной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ot@pnzgu.ru

Oksana E. Bezborodova

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

Олег Николаевич Бодин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры технического
управления качеством,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: bodin_o@inbox.ru

Oleg N. Bodin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of technical quality management,
Penza State Technological University
(1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street,
Penza, Russia)

Николай Сергеевич Коваль

доцент кафедры приборостроения
и биомедицинской инженерии,
Донской государственный
технический университет
(Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)
E-mail: koval-nc@mail.ru

Nikolai S. Koval

Associate professor of the sub-department
of instrumentation and biomedical engineering,
Don State Technical University
(1 Gagarina square, Rostov-on-Don, Russia)

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 Валерьевич Григорьев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a_grigorev@mail.ru

Aleksey V. Grigoriev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
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 22.03.2023

Поступила после рецензирования / Revised 21.04.2023

Принята к публикации / Accepted 22.05.2023