

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-142-159>

УДК 621.373.1

Анализ возможностей двухпроводного способа подключения резистивного датчика температуры

О. Г. Бондарь¹✉, Е. О. Брежнева¹, С. С. Демченко¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: b.og@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Широкое применение в промышленности средств измерения температуры с резистивными датчиками, подключаемыми по трёхпроводной или четырёхпроводной схемам, в системах управления технологическими процессами приводит к усложнению кабельных сетей, коммутаторов и существенно ограничивает количество измерительных каналов единичного модуля аналогового ввода. Двухпроводная схема подключения, минимизирующая эти недостатки, вносит в результаты измерения значительные погрешности за счёт дополнительного нестабильного вносимого сопротивления проводников соединительной линии. Исследуется предложенный авторами способ уменьшения вносимой соединительной линией погрешности, основанный на оценке сопротивления по результатам интегрирования переходного процесса разряда шунтирующего датчик конденсатора. Оценивается степень влияния эффекта квантования, шумов и интервалов интегрирования реакции измерительной цепи на погрешность определения сопротивления.

Методы. Оценка влияния факторов проведена моделированием в среде MATLAB и экспериментальной апробацией предложенного решения на макетном образце.

Результаты. Показано существенное преимущество интегрирования методом трапеций, позволяющим получить в условиях эксперимента погрешности более чем в 300 раз меньшие, чем методом левых прямоугольников. Определено оптимальное время интегрирования, уменьшающее влияние шумов квантования и помех на погрешность измерения в диапазоне изменения сопротивления датчика. Выявлено, что оптимальные значения времени интегрирования изменяются пропорционально величине сопротивления резистивного датчика, а отклонение от оптимального значения до 50% не критично увеличивает погрешность оценки его сопротивления.

Заключение. Погрешность измерения сопротивления резистивного датчика предложенным способом в одинаковых условиях сопоставима с погрешностями способа, базирующегося на интегрировании всего переходного процесса разряда конденсатора. Максимальная погрешность в условиях эксперимента не превышает 0,12% при измерении сопротивления, равного 2 кОм, а при остальных значениях – существенно меньше. При этом применение предложенного решения позволяет существенно повысить быстродействие за счёт уменьшения времени интегрирования и уменьшить объём оборудования за счёт исключения сложного коммутатора в сканирующих системах.

Ключевые слова: резистивный датчик; температура; микроконтроллер; математическая модель; погрешности измерения; двухпроводная схема; интервал интегрирования; метод трапеций; вычислительные алгоритмы.

© Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Демченко С. С., 2025

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Для цитирования: Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Демченко С. С. Анализ возможностей двухпроводного способа подключения резистивного датчика температуры // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 3. С. 142–159. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-142-159>

Поступила в редакцию 05.07.2025

Подписана в печать 03.08.2025

Опубликована 30.09.2025

Analysis of the possibilities of a two-wire connection method for a resistive temperature sensor

Oleg G. Bondar¹✉, Ekaterina O. Brezhneva, Sergey S. Demchenko

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: b.og@mail.ru

Abstract

Purpose of research. The widespread use of temperature measurement devices with resistive sensors connected via three-wire or four-wire configurations in industrial process control systems leads to increased complexity of cabling networks and switching components, and significantly limits the number of measurement channels per analog input module. A two-wire connection scheme, which minimizes these drawbacks, introduces significant measurement errors due to additional and unstable resistance from the connecting wires. This work investigates a method proposed by the authors for reducing the error introduced by the connecting line, based on estimating resistance from the integration of the capacitor discharge transient process across the sensor. The study evaluates the impact of quantization effects, noise, and integration intervals of the measurement circuit's response on the accuracy of resistance determination.

Methods. The assessment of the factors was carried out through simulation in MATLAB and experimental validation of the proposed solution on a prototype model.

Results. A significant advantage of trapezoidal integration has been demonstrated, allowing for measurement errors more than 300 times smaller under experimental conditions compared to the left rectangle method. The optimal integration time was determined, which minimizes the influence of quantization noise and interference on measurement error across the sensor's resistance range. It was found that the optimal integration time is proportional to the resistance value of the sensor, and deviations from the optimal value by up to 50% result in only a minor increase in estimation error.

Conclusion. The measurement error of the resistive sensor's resistance using the proposed method under identical conditions is comparable to that of the method based on integrating the entire capacitor discharge transient process. The maximum error under experimental conditions does not exceed 0.12% when measuring a resistance of 2 k Ω , and is significantly lower for other values. At the same time, the proposed solution allows for a substantial increase in speed due to reduced integration time, and a reduction in equipment size by eliminating the need for a complex switch matrix in scanning systems.

Keywords: resistive sensor; temperature; microcontroller; mathematical model; measurement errors; two-wire configuration; integration interval; trapezoidal method; computational algorithms.

Conflict of interest: The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

For citation: Bondar O.G., Brezhneva E.O., Demchenko S.S. Analysis of the possibilities of a two-wire connection method for a resistive temperature sensor. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(3):153–168. (In Russ.) [https://doi.org/ 10.21869/2223-1536-2025-15-3-142-159](https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-3-142-159)

Received 05.07.2025

Accepted 03.08.2025

Published 30.09.2025

Введение

Направленное на повышение точности измерения совершенствование методов измерения температуры при применении их в различных областях науки, техники и производстве является актуальной научно-технической задачей, решению которой посвящено значительное количество научных работ. Исследование температурных полей вихревых потоков важно для систем термостатирования и аэрокосмической техники [1], а изучение тепловых свойств материалов необходимо, например, для проектирования энергоэффективных зданий [2]. Изучение распределения температуры вдоль волокна при работе волоконных лазеров позволяет решать вопросы их надежного функционирования уже на этапе проектирования [3]. Термометрия со сверхвысоким разрешением востребована в болометрах при зондировании биологических объектов, электронных и оптоэлектронных устройств [4]. Основная область применения средств измерения температуры – промышленное производство.

В качестве датчиков температуры широко используются резистивные датчики (РД), отвечающие требованиям надежности и точности измерений в широком диапазоне изменения температур.

РД используются и для измерения других величин, например давления или влажности [5].

В последние годы разрабатываются новые решения, направленные на совершенствование средств измерения температуры с использованием РД.

При умеренных требованиях к погрешности измерений используются так называемые прямые цифровые интерфейсы. В [6] предложена универсальная мостовая схема, позволяющая на основе промежуточного преобразования во временной интервал определить неизвестное сопротивление или ёмкость.

Преобразование сопротивления во временной интервал с подавлением влияния сопротивления соединительной линии может быть реализовано при трёхпроводном подключении РД [7].

Усложнение измерительной схемы за счёт введения операционных усилителей, компараторов и аналоговых ключей позволяет повысить точность измерения. Способ измерения температуры в заданном диапазоне температур нулевым методом основан на компенсации вольт-секундной площади импульса постоянной длительности с амплитудой, пропорциональной сопротивлению РД, разностью площадей широтно-модулированных импульсов с амплитудами,

соответствующими максимальной и минимальной границам температурного диапазона [8].

Линеаризованная неуравновешенная мостовая схема измерения с подавлением влияния сопротивления соединительной линии при трёхпроводном подключении РД описана в [9].

Удаленное размещение РД, характерное для распределенных измерительных систем, приводит к погрешностям измерения температуры, вызванным влиянием сопротивления соединительных проводов на результаты измерений. Широко используемым техническим решением, направленным на снижение погрешностей измерения температуры за счет компенсации или исключения сопротивления проводников, является применение трех- и четырехпроводных схем подключения РД, удорожающих систему как за счёт увеличения стоимости присоединительных линий, так и коммутаторов в многоканальных системах.

Реализовать простоту двухпроводных подключений позволяет применение различных вариантов модернизации измерительных схем, требующих усложнения алгоритмов измерения и обработки измерительной информации, базирующихся на применении микроконтроллеров (МК). Модернизация измерительных схем сопряжена с введением дополнительных элементов (стабилитронов, диодов, источников тока, коммутаторов и т. п.).

В [10] это достигается при использовании пары согласованных по характеристикам диодов, один из которых включается последовательно с РД, а другой шунтирует эту цепь при смене полярности питающего её напряжения. При одной полярности тока падение напряжения определяется падением напряжения на диоде, сопротивлением проводов и РД, а при другой – падением напряжения на диоде и сопротивлением проводов. Вычитание этих величин позволяет определить падение напряжения на РД. Реально падения напряжения даже на согласованной паре диодов отличаются.

В [11] для учёта действительных падений напряжений на согласованных диодах питание цепи осуществляется трёхступенчатым током положительной и отрицательной полярности, а по измеренным напряжениям вычисляется сопротивление РД. Измерительная схема характерна сложностью источника питания.

Сопротивление линии может быть определено при питании известным током измерительной цепи в виде РД, шунтированного прецизионным стабилитроном [12]. Суммарное сопротивление РД и линии определяются при питании измерительной цепи от источника, гарантирующего напряжение на её зажимах, меньшее напряжения пробоя стабилитрона. Малое значение падения напряжения на сопротивлении линии в сравнении с напряжением пробоя

прецизионного стабилизатора существенно снижает точность его определения.

В [13] предложен способ измерения РД, базирующийся на использовании прямого цифрового интерфейса с промежуточным преобразованием во временной интервал и подавлением влияния сопротивления линии. Для обеспечения приемлемой точности при ограничении времени измерения предложено использовать ПЛИС.

Авторами предложены решения, исключаящие влияние сопротивления соединительной линии при двухпроводном подключении датчика за счет введения одного дополнительного элемента схемы – конденсатора, шунтирующего РД, и импульсного питания измерительной цепи. При этом сопротивление РД определяется через напряжение на нём, ток, протекающий в измерительной цепи, – при полностью заряженном конденсаторе. Напряжение на РД при заряженном конденсаторе в соответствии с законом коммутации равно напряжению на нём после отключения питания измерительной цепи. Для определения напряжения может использоваться его непосредственное измерение [14], но более точные результаты достигаются при обработке результатов измерения напряжения во время переходного процесса разряда конденсатора на РД [15]. Результаты экспериментальных исследований способа измерения представлены в [16]. Поскольку интегрирование осуществляется на всём интервале

переходного процесса, то это приводит к увеличению времени измерения и увеличению влияния апериодических помех, возникающих на заключительном участке интервала интегрирования.

Материалы и методы

Предложен способ измерения температуры, позволяющий снизить погрешности измерения при двухпроводном подключении датчика при сокращении времени измерения, заключающийся в вычислении падения напряжения на РД по результатам интегрирования переходного процесса разряда конденсатора на некотором временном интервале с сохранением результатов в середине t_1 и конце интервала $t_2 = 2t_1$ соответственно. На рисунке 1 представлена структура измерительного устройства, реализующая предложенный способ измерения.

Цепь РД питается прямоугольными импульсами заданной скважности. За время импульса конденсатор полностью заряжается. В установившемся режиме по окончании процесса заряда конденсатора измеряется напряжение на опорном резисторе. По завершении импульса диод смещается в обратном направлении и разрывает цепь питания РД. С заданным шагом дискретизации напряжение на РД, поддерживаемое разряжающимся конденсатором, преобразуется в цифровой код и осуществляется численное интегрирование. Значения интегралов S_1 и S_2 сохраняются в середине и конце интервала интегрирования в

моменты времени t_1 и t_2 соответственно. Ограничение длительности интервала интегрирования $t_2 = 2t_1$ позволяет повысить быстродействие и уменьшить

погрешность интегрирования, связанную с эффектом уменьшения напряжения на РД в конце переходного процесса до величин сопоставимых с шагом квантования.

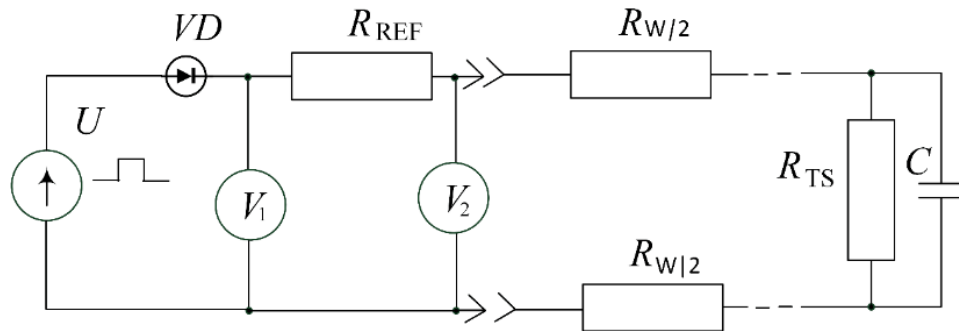


Рис. 1. Схема измерения сопротивления РД при двухпроводном подключении интегрирующим методом: U – источник импульсного напряжения питания измерительной цепи; V_1, V_2 – вольтметры; VD – диод; R_{REF} – опорный резистор, $R_{W/2}$ – сопротивление соединительных проводов; R_{TS} – резистивный датчик (Thermosensor); C – шунтирующий конденсатор

Fig. 1. Measurement scheme of the resistance of R_{TS} using an integrating method with a two-wire connection: U – power supply voltage source for the measurement circuit; V_1, V_2 – voltmeters; VD – diode; R_{REF} – reference resistor; $R_{W/2}$ – resistance of the connecting wires; R_{TS} – resistive sensor (Thermosensor); C – shunting capacitor

Напряжение на РД в конце заряда конденсатора (U_{TS0}) определяется в соответствии со следующим выражением:

$$U_{TS0} = U_{POW} \cdot R_{TS} / (R_{REF} + R_W + R_{TS}), \quad (1)$$

где U_{POW} – напряжение питания, измеренное вольтметром V_1 ; R_{REF} – сопротивление опорного резистора; R_W – сопротивление соединительных проводников; R_{TS} – сопротивление РД.

Напряжение на опорном резисторе U_{REF} , которое может быть определено как разность показаний вольтметров V_1 и V_2 , рассчитывается как

$$U_{REF} = U_{POW} \cdot R_{REF} / (R_{REF} + R_W + R_{TS}). \quad (2)$$

При завершении импульса напряжение на конденсаторе РД уменьшается по экспоненциальному закону:

$$U_{TS} = U_{TS0} \cdot \exp(-t / \tau) = U_{TS0} \cdot \exp(-n \cdot \Delta t / \tau), \quad (3)$$

где $t = n \cdot \Delta t$ – время от начала переходного процесса разряда конденсатора; Δt – интервал дискретизации; n – количество интервалов дискретизации, укладываемых во временной интервал t ; $\tau = R_{TS}C$ – постоянная времени цепи разряда конденсатора.

Интеграл напряжения переходного процесса разряда конденсатора на резистивный датчик температуры на интервале времени t_1 :

$$S_1 = \tau U_{TS0} [1 - \exp(-t_1 / \tau)]. \quad (4)$$

Интеграл напряжения переходного процесса разряда конденсатора на резистивный датчик температуры на интервале времени t_2 :

$$S_2 = \tau U_{TS0} [1 - \exp(-t_2/\tau)]. \quad (5)$$

Отношение интегралов (S_2/S_1) может быть определено в соответствии со следующим выражением:

$$S_2 / S_1 = \frac{(\exp(t_1/\tau) + 1)(\exp(t_1/\tau) - 1)}{(\exp(t_1/\tau) - 1)} \times \frac{1}{\exp(t_1/\tau)} = 1 + \exp(-t_1/\tau). \quad (6)$$

Определяя отсюда постоянную времени и подставляя её в (4), получим

$$U_{TS} = -S_1 \frac{\ln(S_2 / S_1 - 1)}{t_1 (2 - S_2 / S_1)}. \quad (7)$$

Так как напряжения на опорном резисторе и РД в конце процесса заряда конденсатора в соответствии с (1) и (2) пропорциональны их сопротивлениям, то

$$R_{TS} = R_{REF} U_{TS} / U_{REF}. \quad (8)$$

Поскольку применяемые в промышленности решения обычно опираются на использование модулей аналогового ввода, подключаемых к программируемым логическим контроллерам, то неотъемлемыми элементами подобных систем являются аналого-цифровые преобразователи (АЦП), мультиплексоры, микроконтроллеры, источники опорного напряжения или тока, опорные резисторы. Предлагаемый способ подразумевает применение перечисленных устройств, однако при этом исключается необходимость в сложных мультиплексорах, поскольку для реализации многоканальности требуются лишь два аналоговых входа АЦП и двунаправленные цифровые выводы по числу

коммутируемых измерительных каналов, а также снижаются требования к точности опорных источников [16].

Исследование способа измерения

Для оценки потенциальных возможностей способа использовалась математическая модель устройства, реализованная в MATLAB. С её помощью оценивалось влияние на погрешность определения РД интервала дискретизации, способа интегрирования, интервала интегрирования, эффектов квантования и шумов. Исследования проводились для диапазона изменения сопротивления РД равного 4, что в случае применения платиновых термометров сопротивления позволяет перекрыть диапазон температур в 800°C. Питание цепи РД может осуществляться как от источника тока, так и от источника напряжения через опорный резистор (в модели и стенде использовался последний вариант).

Напряжение на РД вычисляется в дискретные моменты времени по выражению (3), а интегрирование осуществляется численным методом. Важным параметром, влияющим на погрешность измерения, является отношение интервала дискретизации к постоянному времени разряда конденсатора. На рисунке 2 приведена зависимость относительной погрешности определения РД от величины интервала интегрирования для различных отношений интервала дискретизации к постоянному времени при методе интегрирования левых прямоугольников.

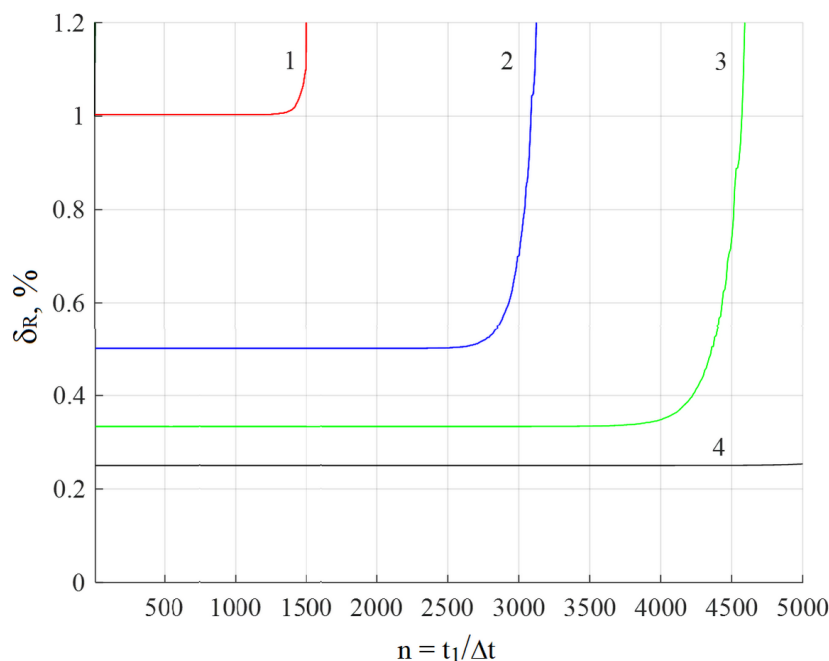


Рис. 2. Зависимость погрешности определения сопротивления РД от времени интегрирования методом левых прямоугольников при различных отношениях $\Delta t/\tau$: 1 – 1/50; 2 – 1/100; 3 – 1/150; 4 – 1/200

Fig. 2. Dependence of the error in determining the resistance of the RTS on the integration time using the left rectangle method at various $\Delta t/\tau$ ratios: 1 – 1/50; 2 – 1/100; 3 – 1/150; 4 – 1/200

Графики на рисунке 2 демонстрируют пропорциональную зависимость погрешности от отношения $\Delta t/\tau$. При этом

$$\delta_R = 50 \frac{\Delta t}{R_{TS}}, \% \quad (9)$$

Погрешность определения сопротивления резко возрастает при приближении интервала интегрирования к концу переходного процесса разряда конденсатора и отношения $S2/S1$ к 1, что сопровождается с стремлением абсолютной величины числителя выражения (7) к $-\infty$.

На рисунке 3 приведены аналогичные зависимости для интегрирования методом трапеций.

При этом погрешность определения сопротивления РД (%) подчиняется квадратичной зависимости:

$$\delta_R = 8,3(3) \left(\frac{\Delta t}{R_{TS}} \right)^2. \quad (10)$$

При постоянной времени превышающей интервал дискретизации в 100 раз относительная погрешность становится меньше $10^{-3}\%$, а для метода левых прямоугольников – 0,5%. Такое существенное отличие в величине погрешности при практически одинаковой вычислительной сложности приводит к целесообразности интегрирования методом трапеций.

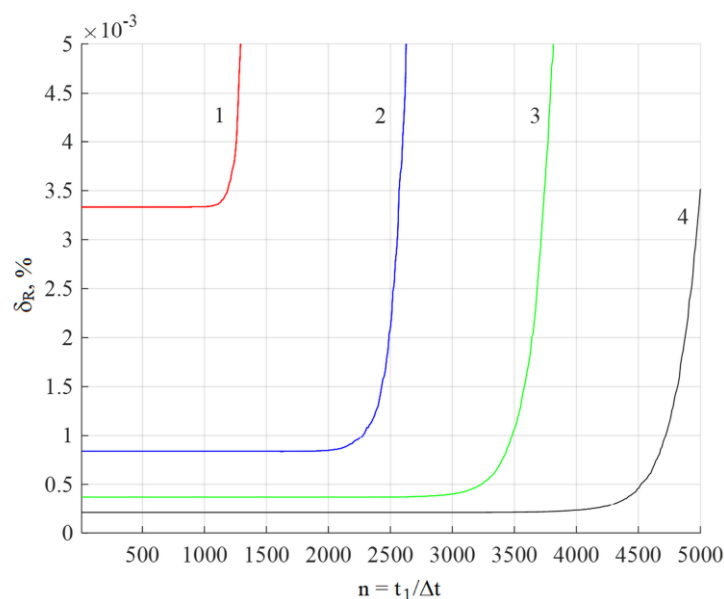


Рис. 3. Зависимость погрешности определения сопротивления РД от времени интегрирования методом трапеций при различных отношениях $\Delta t/\tau$:
1 – 1/50; 2 – 1/100; 3 – 1/150; 4 – 1/200

Fig. 3. Dependence of the error in determining the resistance of RTS on the integration time using the trapezoidal method at various $\Delta t/\tau$ ratios:
1 – 1/50; 2 – 1/100; 3 – 1/150; 4 – 1/200

При реализации стенда номинальное значение сопротивления РД принято равным 1 кОм, а ёмкость шунтирующего конденсатора – 6,8 мкФ. При этом увеличение частоты дискретизации от рекомендованных производителем МК 10 кГц до 40 кГц не привело к увеличению погрешности однократного измерения напряжения на начальном участке переходного процесса. Это позволило выбрать интервал дискретизации равным 26 мкс. Дальнейшее моделирование осуществлялось при выбранных параметрах измерительной цепи и использовании микроконтроллера ATmega328 с встроенным 10-битовым АЦП. При этом необходимости в применении диода для разрыва цепи питания датчика нет, т. к. разрыв цепи осуществляется переводом вывода порта МК в режим ввода.

Результат оценки погрешности определения сопротивления РД,

обусловленной интегрированием переходного процесса методом трапеций для значений сопротивлений в диапазоне 1–4 кОм, представлен ниже (рис. 4).

Согласно полученным результатам, погрешностями алгоритма вычислений в выбранных условиях можно пренебречь (менее 0,00013%).

Для оценки влияния квантования измеряемого напряжения использовалась операция округления измеряемых напряжений до целых. При этом напряжение питания измерительной цепи, измеряемое в соответствии с рисунком 1 вольтметром V_1 , принималось равным максимальному коду АЦП (для n -разрядного АЦП – 2^n). Для десятиразрядного АЦП зависимости относительной погрешности определения РД от интервала интегрирования приведены на рисунке 5.

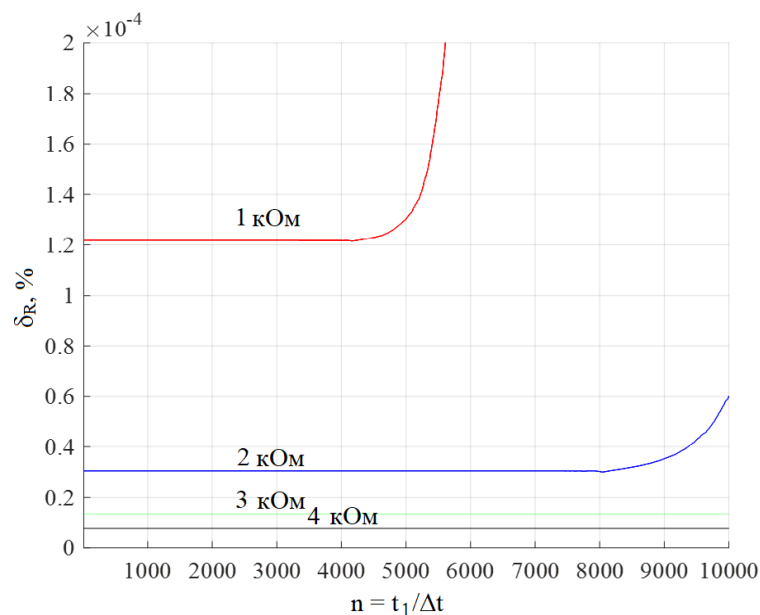


Рис. 4. Зависимость погрешности измерения от времени интегрирования методом трапеций

Fig. 4. Dependence of the measurement error on the integration time using the trapezoidal method

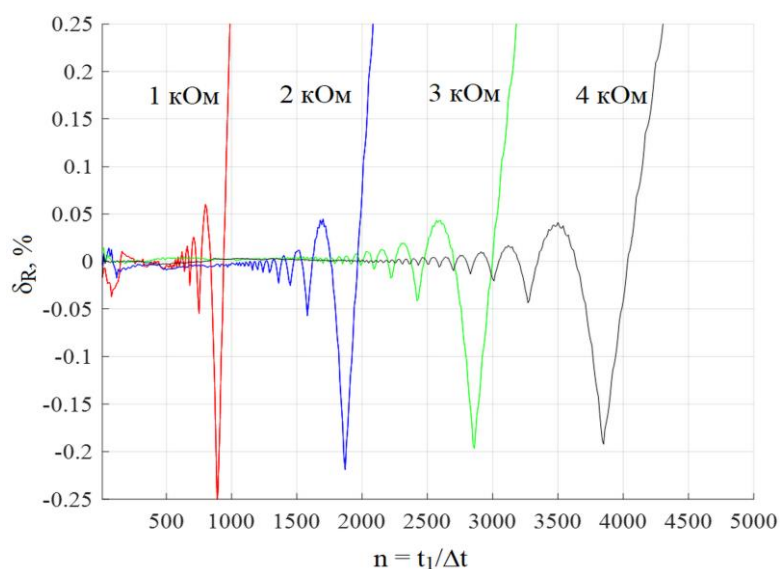


Рис. 5. Зависимость погрешности от времени интегрирования с учетом эффекта квантования 10-разрядным АЦП при известном токе питания цепи РД

Fig. 5. Dependence of the error on the integration time considering the quantization effect of a 10-bit ADC at a known circuit supply current

Анализ поведения этих зависимостей позволяет сделать вывод о существовании диапазонов интервалов интегрирования, в пределах которых погрешность минимальна. Влияние некоррелированных с сигналом шумов (они

могут специально подмешиваться), распределённых по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением (СКО), равным единице младшего разряда, рассмотрим ниже (рис. 6).

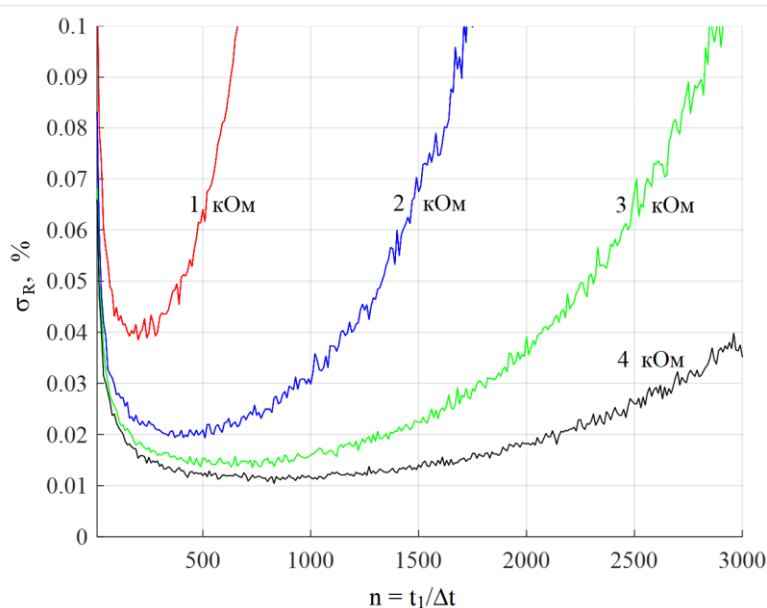


Рис. 6. Зависимость СКО вычисленных значений от номинальных значений сопротивлений РД от времени интегрирования с учетом эффекта квантования и влияния шумов при усреднении по 500 измерениям

Fig. 6. Dependence of the RMS deviation of computed resistance values from nominal RD values on integration time, considering quantization effects and noise influence when averaged over 500 measurements

Положение минимума СКО зависит от величины измеряемого сопротивления, т. е. для каждого значения сопротивления РД существует оптимальное время интегрирования. Величина оптимального времени интегрирования оказывается пропорциональной величине сопротивления РД, а отклонение от оптимального значения в пределах 50% не существенно влияет на σ . При этом $t_1 \approx 0,76\tau$.

Оптимальное время интегрирования t_1 можно оценить в соответствии с выражением:

$$t_1 = t_{1N} \cdot R_{TS} / R_{TSN}, \quad (11)$$

где t_{1N} — оптимальное время интегрирования при номинальном значении сопротивления РД; R_{TSN} — номинальное значение сопротивления РД.

Однако для его определения необходимо знать величину сопротивления R_{TS} . Большое допустимое отклонение времени интегрирования от оптимального значения позволяет для его оценки воспользоваться однократным измерением напряжения на зажимах соединительной линии в конце импульса заряда конденсатора, или после отключения питания, с минимальной задержкой (5–10 мкс) после завершения колебательного переходного процесса, возникающего в длинной линии после отключения питания цепи РД.

Следует учитывать, что представленные результаты моделирования не учитывают погрешности, которые вызваны дифференциальной и интегральной нелинейностью АЦП.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 7 представлен исследовательский стенд на платформе ARDUINO с МК *ATmega328*, ресурсов и производительности которого достаточно для управления и обработки результатов измерения. В качестве измеряемого сопротивления используется магазин сопротивлений *P4831* с классом точности 0,02.

Для оценки способности к подавлению сопротивления линии её сопротивление искусственно завышено включением последовательно с проводниками резисторов по 120 Ом.

Программное обеспечение МК, разработанное авторами, позволяет задавать количество измерений, рассчитывает средние, максимальные и минимальные значения сопротивлений, обозначенных как *RTD_average*, *RTD_max* и *RTD_min*, соответственно. В ходе эксперимента сопротивление последовательно

устанавливалось равным 1, 2, 3 и 4 кОм, а для каждого его значения осуществлялось 100 измерений. Оптимальное время интегрирования t_{IN} уточнялось на основе экспериментальных данных и было принято равным $100 \cdot \Delta t$. Время интегрирования определяется в соответствии с (11) на основе однократного измерения после завершения заряда конденсатора и отключения питания цепи РД. Поскольку измеряемое напряжение запоминается встроенным устройством выборки-хранения, а затем осуществляется его преобразование АЦП в цифровой код, то это позволяет дозарядить конденсатор во время преобразования. Функция преобразования корректировалась в соответствии с линейной регрессионной моделью. На рисунке 8 представлен скриншот терминальной программы с результатами измерений сопротивления РД предложенным способом.

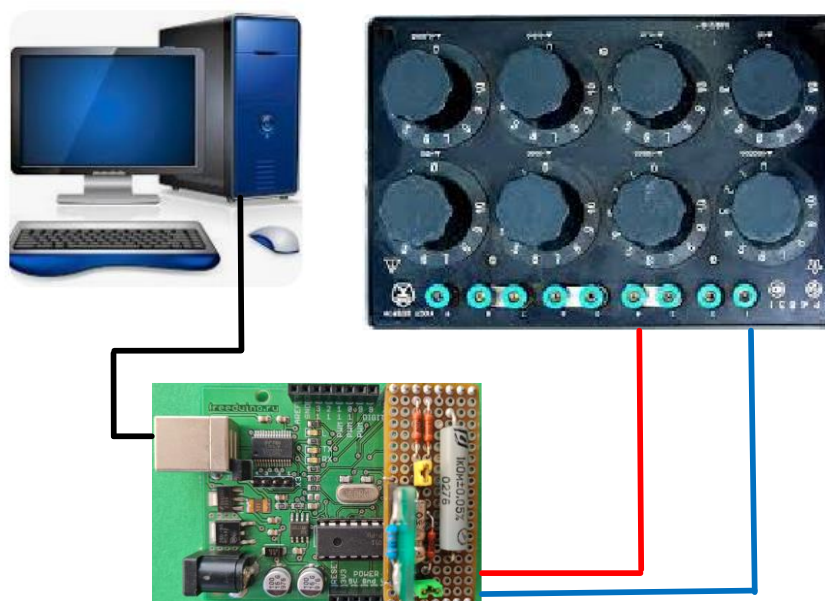


Рис. 7. Исследовательский стенд

Fig. 7. Research stand

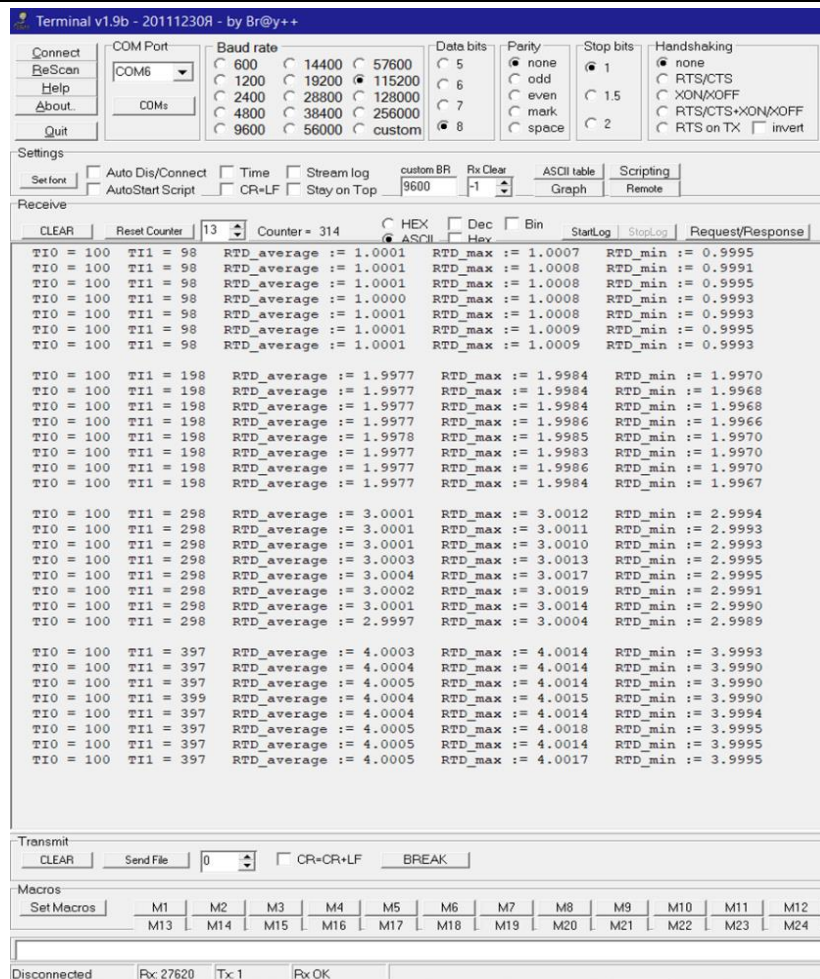


Рис. 8. Скриншот терминала с результатами измерений РД: TIO – оптимальное время интегрирования, соответствующее номинальному сопротивлению РД – 1 кОм; TII – оптимальное время интегрирования при измерении конкретного значения сопротивления

Fig. 8. Screenshot of the terminal with RTS measurement results: TIO – optimal integration time corresponding to the nominal resistance of the RTS – 1 kΩ; TII – optimal integration time for measuring a specific resistance value

В таблице 1 сопоставлены относительные погрешности измерения сопротивлений РД двумя способами: на основе обработки результатов интегрирования

на всём интервале переходного процесса разряда конденсатора на РД (В.1) и способом, рассмотренным в данной работе (В.2).

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований

Table 1. Results of experimental studies

$R_{\text{ном}}, \text{кОм}$	R_{cp}	R_{max}	R_{min}	$\delta, \%$	
				B.1	B.2
1	1,0001	1,0009	0,9991	0,11	0,01
2	1,9977	1,9977	1,9966	–0,0558	–0,115
3	3,0001	3,0019	2,9989	0,0768	0,003
4	4,0004	4,0018	3,9990	0,0201	0,01

Выводы

Проведено исследование метода измерения сопротивления резистивного датчика при его двух проводном подключении методом моделирования в среде MATLAB. Получены выражения, позволяющие оценить составляющую погрешности определения сопротивления датчика, вызванную применяемым методом численного интегрирования от соотношения интервала дискретизации и постоянной времени разряда конденсатора на резистивный датчик. Показано существенное преимущество интегрирования методом трапеций, позволяющим получить в условиях эксперимента погрешности, более чем в 300 раз меньшие, чем методом левых прямоугольников.

Исследовано влияние эффекта квантования и шумов на результаты измерений. Построены зависимости распределения погрешностей измерения от времени интегрирования, выраженного количеством интервалов дискретизации, позволяющие определить оптимальные временные интервалы t_1 для различных номинальных значений сопротивлений термистора. Выявлено наличие диапазонов времён интегрирования, в которых относительная

погрешность определения сопротивления РД достигает минимальных значений. При этом выявлено, что оптимальные значения времени интегрирования изменяются пропорционально величине сопротивления РД, а отклонение от оптимального значения до 50% несущественно увеличивает погрешность оценки сопротивления РД. Это позволяет проводить оценку оптимального времени интегрирования по результатам однократного измерения напряжения заряженного конденсатора.

Проведена апробация метода на экспериментальном стенде. Достигнутые значения погрешностей измерения сопротивлений предложенным способом сопоставимы с погрешностями способа, базирующегося на интегрировании всего переходного процесса разряда конденсатора. Максимальная погрешность в условиях эксперимента не превышает 0,12% при измерении сопротивления, равного 2 кОм, а при остальных значениях – существенно меньше. При этом применение предложенного решения позволяет существенно повысить быстродействие за счёт уменьшения времени интегрирования и уменьшить объём оборудования за счёт исключения сложного коммутатора в сканирующих системах.

Список литературы

1. Development of Method of Low-Perturbation Multichannel Temperature Diagnostics in Vortex Tube / I. K. Kabardin, M. K. Pravdina, M. R. Gordienko [et al.] // J. Engin. Thermophys. 2022. N 31. P. 309–314. <https://doi.org/10.1134/S1810232822020114>

2. Malinarič S. The Application of the Finite Elements Method in the Transient Measurements of Thermophysical Parameters // *Int. J. Thermophys.* 2024. N 45. P. 22. <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03311-1>
3. Распределенное измерение температуры в непрерывных гольмиевых волоконных лазерах / В. А. Камынин, А. А. Вольф, М. И. Скворцов, С. А. Филатова, М. С. Копьева, В. Б. Цветков, С. А. Бабин // *Фотон-экспресс*. 2021. № 6. С. 347–348. <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-347-348>
4. Reihani A., Meyhofer E., Reddy P. Nanokelvin-resolution thermometry with a photonic microscale sensor at room temperature // *Nat. Photon.* 2022. Vol. 16. P. 422–427. <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01011-0>
5. Скорик И. В., Иванченко Ю. А. Разработка резистивного датчика влажности почвы // *Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций*. 2021. № 4. С. 181.
6. José Antonio Hidalgo-López. A simple digital readout circuit for differential resistive or capacitive sensors // *Meas. Sci. Technol.* 2023. Vol. 34, N 8. P. 085117. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acd139>
7. Reverter F. A Microcontroller-Based Interface Circuit for Three-Wire Connected Resistive Sensors // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. N 71. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3219492>
8. Филатов А. В., Сердюков К. А., Новикова А. А. Перспективы использования модифицированного нулевого метода измерений температуры датчиками сопротивления // *Измерительная техника*. 2020. № 7. С. 51–55. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-7-51-55>
9. Piechowski L., Muc A., Iwaszkiewicz J. The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence // *Energies*. 2021. N 14(24). P. 8214. <https://doi.org/10.3390/en14248214>
10. Nagarajan P. R., George B., Kumar V. J. Improved Single-Element Resistive Sensor-to-Microcontroller Interface // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2017. N 66. P. 2736–2743. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2712918>
11. A Procedure for Precise Determination and Compensation of Lead-Wire Resistance of a Two-Wire Resistance Temperature Detector / A. Rerkratn, S. Prombut, T. Kamsri, V. Riewruja, W. Petchmaneelumka // *Sensors*. 2022. N 22(11). P. 4176. <https://doi.org/10.3390/s22114176>
12. Li W., Xiong S., Zhou X. Lead-Wire-Resistance Compensation Technique Using a Single Zener Diode for Two-Wire Resistance Temperature Detectors (RTDs) // *Sensors*. 2020. N 20(9). P. 2742. <https://doi.org/10.3390/s2009274>
13. Jos'e A. Hidalgo-Lopez. Direct interface circuits for resistive sensors affected by lead wire resistances // *Measurement*. 2023. N 218. P. 113250. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113250>

14. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Родионов П. С. Многоканальный преобразователь температуры // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. № 65(4). С. 254–261. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261>

15. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Ботиков К. А. Исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. № 28(1). С. 71–87. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87>

16. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Ботиков К. А. Автоматическая подстройка параметров алгоритма измерения температуры в широком диапазоне // Измерительная техника. 2024. № 4. С. 46–53. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-4-46-53>

References

1. Kabardin I.K., Pravdina M.K., Gordienko M.R., et al. Development of Method of Low-Perturbation Multichannel Temperature Diagnostics in Vortex Tube. *J. Engin. Thermophys.* 2022;(31):309–314. <https://doi.org/10.1134/S1810232822020114>

2. Malinarič S. The Application of the Finite Elements Method in the Transient Measurements of Thermophysical Parameters. *Int. J. Thermophys.* 2024;(45):22. <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03311-1>

3. Kamynin V.A., Wolf A.A., Skvortsov M.I., Filatova S.A., Kopyeva M.S., Tsvetkov V.B., Babin S.A. Rasprelennoe izmerenie temperatury v nepreryvnyh gol'mievyh volokonnyh lazerah. *Foton-ekspress = Foton-Jekspress.* 2021;(6):347–348. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-347-348>

4. Reihani A., Meyhofer E., Reddy P. Nanokelvin-resolution thermometry with a photonic microscale sensor at room temperature. *Nat. Photon.* 2022;16:422–427. <https://doi.org/10.1038/s41566-022-01011-0>

5. Skorik I.V., Ivanchenko Y.A. Razrabotka rezistivnogo datchika vlazhnosti pochvy. *Sovremennye problemy radioelektroniki i telekommunikacij = Modern Problems of Radio Electronics and Telecommunications.* 2021;(4):181. (In Russ.)

6. José Antonio Hidalgo-López. A simple digital readout circuit for differential resistive or capacitive sensors. *Meas. Sci. Technol.* 2023;34(8):085117. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acd139>

7. Reverter F. A Microcontroller-Based Interface Circuit for Three-Wire Connected Resistive Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* 2022;(71):1–4. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3219492>

8. Filatov A.V., Serdyukov K.A., Novikova A.A. Prospects of Using a Modified Null Method for Temperature Measurement with Resistance Sensors. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques.* 2020;(7):51–55. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01824-x>

9. Piechowski L., Muc A., Iwaszkiewicz J. The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence. *Energies*. 2021;(14):8214. <https://doi.org/10.3390/en14248214>
10. Nagarajan P.R., George B., Kumar V.J. Improved Single-Element Resistive Sensor-to-Microcontroller Interface. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2017;(66):2736–2743. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2712918>
11. Rerkratn A., Prombut S., Kamsri T., Riewruja V., Petchmaneelumka W. A Procedure for Precise Determination and Compensation of Lead-Wire Resistance of a Two-Wire Resistance Temperature Detector. *Sensors*. 2022;(22):4176. <https://doi.org/10.3390/s22114176>
12. Li W., Xiong S., Zhou X. Lead-Wire-Resistance Compensation Technique Using a Single Zener Diode for Two-Wire Resistance Temperature Detectors (RTDs). *Sensors*. 2020;20(9):2742. <https://doi.org/10.3390/s2009274>
13. Jos' e A. Hidalgo-Lopez. Direct interface circuits for resistive sensors affected by lead wire resistances. *Measurement*. 2023;(218):113250. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113250>
14. Bondar' O.G., Brezhneva E.O., Rodionov P.S. Mnogokanal'nyj preobrazovatel' temperatury. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2022;65(4):254–261. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-7-668-674>
15. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Botikov K.A. Research of the method for measuring temperature with a two-wire connection of a resistance thermometer. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. = Proceedings of the Southwest State University*. 2024;(28):71–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87>
16. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Botikov K.A. Automatic adjustment of the parameters of the temperature measurement algorithm in a wide range. *Izmeritel'naya Tekhnika = Measuring Equipment*. 2024;(4):46–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2024-4-46-53>

Информация об авторах / Information about the Authors

Бондарь Олег Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: b.og@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1876-4626

Oleg G. Bondar, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: b.og@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1876-4626

Брежнева Екатерина Олеговна,

кандидат технических наук, доцент кафедры
космического приборостроения и систем связи,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: bregnevaeo@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-0039-3425

Ekaterina O. Brezhneva, Candidate of Sciences

(Engineering), Associate Professor
of the Department of Space Instrumentation
and Communication Systems, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: bregnevaeo@mail.ru,
ORCID: 0000-0003-0039-3425

Демченко Сергей Сергеевич, студент кафедры
космического приборостроения и систем связи,
Юго-Западный государственный университет,
г. Курск, Российская Федерация,
e-mail: demchenko.sergey32@gmail.com,
ORCID: 0009-0004-4066-4650

Sergey S. Demchenko, Student
of the Department of Space Instrument Engineering
and Communication Systems, Southwest State
University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: demchenko.sergey32@gmail.com,
ORCID: 0009-0004-4066-4650