

УДК 621.373.1

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-136-154>

Метод измерения температуры на основе интегрирования участка переходного процесса разряда конденсатора на термометр сопротивления

О. Г. Бондарь¹, Е. О. Брежнева¹ ✉, А. И. Калмыков¹

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

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Резюме

Цель работы: повышение быстродействия и точности измерения температуры резистивными датчиками (РДТ) при удаленном двухпроводном подключении в распределенных системах мониторинга. Разработка и реализация метода измерения температуры на основе обработки результатов интегрирования начального участка переходного процесса разряда конденсатора, шунтирующего термометр сопротивления, оценка параметров модели определения времени интегрирования и апробация метода на экспериментальном стенде. Определение погрешностей измерения сопротивления РДТ методом интегрирования начального участка переходного процесса с применением линейной модели определения времени интегрирования и оценка эффективности предложенного решения по сравнению с альтернативными методами.

Методы: в основе математического описания метода лежит теория электрических цепей. Оценка эффективности метода проводилась по результатам экспериментальных исследований. При разработке линейной модели определения времени интегрирования строилась линейная регрессионная модель, рассчитывались относительные погрешности по усредненным результатам многократных измерений.

Результаты: предложен и исследован метод определения сопротивлений резистивных датчиков температуры на основе обработки результатов интегрирования начального участка переходного процесса разряда конденсатора на РДТ при двухпроводном подключении в распределенных системах мониторинга. Приведено математическое описание метода, на основе которого разработан алгоритм вычисления сопротивления РДТ, исключаящий влияние сопротивления соединительных проводов на результаты измерений. В основе разработанного алгоритма лежит интегрирование переходного процесса разряда конденсатора (накопление и суммирование отсчетов) на ограниченном временном интервале с сохранением результатов в середине (t_1) и конце интервала (t_2) и расчет сопротивления РДТ по полученным параметрам. Определены параметры модели подстройки времени интегрирования, оценены погрешности измерения. Проведена апробация метода с помощью экспериментального стенда на базе микроконтроллера ATmega328 и магазина сопротивлений P4831 с классом точности 0,02.

Заключение: представленные в работе результаты исследования и апробации метода измерения температуры РД демонстрируют его эффективность для снижения погрешностей измерения, вызванных влиянием сопротивления соединительных проводов. Применение предложенных методов измерения и алгоритмов обработки позволяет использовать двухпроводное подключение датчиков в распределенных системах мониторинга при сохранении точности измерений на уровне более сложных и дорогостоящих трех- и четырехпроводных схем, исключив влияние сопротивления соединительных проводов. Применение описанного в работе метода интегрирования напряжения на начальном участке переходного процесса позволяет не только

повысить быстродействие, но и обеспечить требуемый уровень точности измерений. Проведенные экспериментальные исследования показали, что относительные погрешности измерения предложенным авторами методом при применении линейной модели определения времени интегрирования не превышают 0,07% в диапазоне изменения номинальных сопротивлений 1-4 кОм (соответствует диапазону температур, измеряемых платиновым термометром сопротивления, 0-600 °C) при искусственном увеличении суммарного сопротивления соединительных проводов до величины, превышающей 200 Ом.

Предложенный метод может быть применен в системах мониторинга, использующих РД, размещенных на значительном удалении от измерительного блока.

Ключевые слова: сопротивление; температура; резистивный датчик; погрешности измерения; двухпроводное подключение; быстродействие; микроконтроллер; метод интегрирования; интервал.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Калмыков А.И. Метод измерения температуры на основе интегрирования участка переходного процесса разряда конденсатора на термометр сопротивления // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(1): 136-154. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-136-154>.

Поступила в редакцию 10.12.2024

Подписана в печать 28.02.2025

Опубликована 14.04.2025

Method for temperature measurement based on integration of the transient process part of the condenser discharge on a resistance thermometer

Oleg G. Bondar ¹, Ekaterina O. Brezhneva ¹ ✉, Andrey I. Kalmykov ¹

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

✉ e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Abstract

Purpose: improving the speed and accuracy of temperature measurement by a resistive sensor (RTD) with remote two-wire connection in distributed monitoring systems. Development and implementation of a temperature measurement method based on the processing of the integration results of the initial phase of the transient discharge process of a capacitor shunting a resistance thermometer, evaluation of the parameters of the integration time determination model and testing of the method on an experimental bench. Determination of errors in measuring RTD resistance by integrating the initial phase of the transition process using a linear model for determining the integration time and evaluating the effectiveness of the proposed solution in comparison with alternative methods.

Methods. The mathematical description of the method is based on the theory of electrical circuits. The effectiveness of the method was evaluated based on the results of experimental studies. When developing a linear model for determining the integration time, a linear regression model was built, and relative errors were calculated based on the average results of multiple measurements.

Results. A method for determining the resistances of resistive temperature sensors based on the processing of the integration results of the initial phase of the transient capacitor discharge process on a two-wire connection in distributed monitoring systems is proposed and investigated.

A mathematical description of the method is given, on the basis of which an algorithm for calculating the resistance of the RTD has been developed, eliminating the influence of the resistance of the connecting wires on the measurement results. The developed algorithm is based on the integration of the transient process of capacitor discharge (accumulation and summation of samples) over a limited time interval, while preserving the results in the middle (t_1) and the end of the interval (t_2) and calculating the resistance of the RTD based on the obtained parameters.

The parameters of the integration time adjustment model are determined, and measurement errors are estimated. The method was tested using an experimental stand based on an ATmega328 microcontroller and a P4831 resistance store with an accuracy class of 0.02.

Discussion. The results of the research and testing of the RD temperature measurement method presented in the paper demonstrate its effectiveness in reducing measurement errors caused by the influence of the resistance of connecting wires. The application of the proposed measurement methods and processing algorithms makes it possible to use two-wire sensor connections in distributed monitoring systems while maintaining measurement accuracy at the level of more complex and expensive three- and four-wire circuits, eliminating the influence of the resistance of the connecting wires. The application of the voltage integration method described in the work at the initial stage of the transient process allows not only to increase performance, but also to ensure the required level of measurement accuracy. Experimental studies have shown that the relative measurement errors of the method proposed by the authors when using the linear model for determining the integration time do not exceed 0.07% in the range of nominal resistances of 1-4 kOhm (corresponds to the temperature range measured by a platinum resistance thermometer, 0-600 °C) with an artificial increase in the total resistance of the connecting wires to a value exceeding 200 ohms.

The proposed method can be applied in monitoring systems using taxiways located at a considerable distance from the measuring unit.

Keywords: resistance; temperature; resistive sensor; measurement errors; two-wire connection; performance; microcontroller; integration method; interval.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation. Bondar O. G., Brezhneva E. O., Kalmykov A. I. Method for temperature measurement based on integration of the transient process part of the condenser discharge on a resistance thermometer. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(1): 136-154 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-1-136-154>.

Received 10.12.2024

Accepted 28.02.2025

Published 14.04.2025

Введение

Современные системы мониторинга и контроля параметров воздушной среды, автоматизированные системы управления технологическими процессами и системы сбора данных содержат в своей структуре два основных блока: блок датчиков и измерительный блок [1-8]. При удаленном размещении блоков возникают погрешности, вызванные влиянием сопротивления соединительных проводов на результаты измерения выходных сигналов

датчиков, например резистивных датчиков температуры. Учитывая вышесказанное, повышение точности измерения сопротивления РД при их удаленном подключении является актуальным научно-техническим направлением, которому посвящено значительное количество научных публикаций [9-16].

Среди основных направлений следует выделить: технические и схемотехнические решения, применение различных алгоритмов и методов измерения и их комбинирование. Кроме того,

существуют компенсационные методы, требующие измерения и учета сопротивления соединительных проводов, и методы, исключаяющие их влияние на результаты измерения.

К техническим решениям относятся различные способы организации соединения блоков, когда кроме классического двухпроводного соединения применяются более дорогостоящие трех- и четырехпроводные схемы подключения, а также цифровые и беспроводные каналы связи. Беспроводные решения требуют подвода энергии и увеличивают стоимость каждой рабочей точки за счет дублирования электроники в многоканальных системах.

В [8] рассмотрен вариант линеаризации зависимости выходного сигнала мостовой схемы от величины сопротивления резистивного датчика температуры. Исследована схема компенсации влияния обратной связи, которой охватывается мост, и приведены результаты исследования схемы в LabView.

В [9] рассмотрен прямой трёхпроводный интерфейс резистивного датчика с микроконтроллером. Схема, содержащая опорный резистор, конденсатор, дополнительный резистор, ограничивающий ток заряда конденсатора, трёхпроводный интерфейс подключения РДТ, и использующая пять цифровых двунаправленных выводов микроконтроллера, измеряет 4 интервала разряда конденсатора от максимального напряжения до заданного уровня на различные элементы схемы, и на их основе вычисляет сопротивление РДТ.

В работе [10] применена трёхпроводная мостовая схема подключения РДТ, в которой питание половины моста, содержащей делитель РДТ и сопротивления проводов линии, осуществляется стабильным током за счёт охвата моста отрицательной обратной связью. Благодаря стабилизации тока падения напряжений на проводниках соединительной линии одинаковы и компенсируются за счёт их вычитания на измерительной диагонали моста. Вариант трёхпроводного подключения, содержащий три операционных усилителя и два аналоговых переключателя, осуществляет промежуточное преобразование сопротивления РДТ во временной интервал, требует три такта преобразования [11].

Рассмотренные схемы обладают относительно высокой сложностью, усугубляемой в многоканальных системах избытком проводов и коммутаторами.

Поэтому имеется значительное число работ, ориентированных на разработку способов подавления влияния сопротивления проводников в двухпроводных схемах подключения РДТ [12-16].

Простейшее решение основано на подключении к РДТ двух диодов. Один диод включается последовательно с РД, а второй шунтирует соединительную линию на стороне РДТ и направлен встречно первому диоду. Конец соединительной линии подключен в качестве сопротивления классического мультивибратора на таймере NE555 [12]. Измеряемое сопротивление пропорционально разности времён заряда и разряда конденсато-

ра мультивибратора. Недостатком решения является существенная погрешность, связанная с различием падений напряжения на диодах, работающих при разных токах заряда и разряда.

В [13] неидентичность вольтамперных характеристик (ВАХ) диодов предложено компенсировать на основе измерения напряжений на входе соединительной цепи, при возбуждении рассмотренной в [12] схемы, двухполярными трехуровневыми импульсами тока через соединительный провод. При этом необходимые вычисления выполняются цифровым блоком обработки сигналов. Погрешность измерения сопротивления РДТ находится в пределах $\pm 0,98$ Ом, при длине соединительного провода, равной 30 м (диапазон колебаний температуры окружающей среды - от 30 °С до 70 °С). Недостатком схемы является её высокая сложность и слабая защищённость от помех.

Другой вариант улучшения решения, предложенного в [12], представлен в [14]. Измерительная цепь, включённая в цепь обратной связи операционного усилителя, возбуждается разнополярными импульсами тока. При одинаковой величине положительного и отрицательного тока среднее значение напряжения на выходе фильтра нижних частот пропорционально величине сопротивления РДТ. Однако и в этом случае неидентичность ВАХ диодов вносит существенный вклад в погрешность измерения. Это приводит к необходимости тщательного подбора пар диодов с тесной тепловой

связью между ними. Обычно в подобных схемах используются переходы сдвоенных n-p-n транзисторов.

В [15] для определения сопротивления РДТ осуществляется измерение двух времён разряда конденсатора, включённого параллельно РДТ, на входной делитель напряжения, подключённый к двум управляемым выводам микроконтроллера, до достижения уровня логического нуля на каждом из них. Заряд конденсатора осуществляется переводом выводов МК в режим выхода и установкой уровня логической единицы на них. Для расчёта РДТ необходимо знать значения сопротивлений резисторов и ёмкости и обеспечить их стабильность. Для ослабления влияния сопротивления проводников на результат измерения РДТ необходимо выбирать сопротивление делителя много большим сопротивлению проводников. Для повышения точности измерения в работе предложен улучшенный метод, базирующийся на измерении трёх времён разряда конденсатора до фиксированного уровня, контролируемого в трёх точках делителя из трёх последовательных сопротивлений. В экспериментальных исследованиях при измерении сопротивлений в диапазоне 100 - 2000 Ом максимальные систематические погрешности составляют 0,15% для первого метода и 0,12% для второго. При этом время измерения достигает 1 мс при интервале дискретизации 10 нс. Устройство реализуется на FPGA.

В [16] предложен компенсационный способ, в котором сопротивление про-

водника при двухпроводном подключении определяется по результатам измерения напряжения, на входе измерительного устройства, образованного при протекании известного тока через обратно смещённый стабилитрон, подключенный параллельно датчику температуры, и соединительную линию. Апробация метода проводилась в диапазоне изменения сопротивлений РДТ 848–2120 Ом, а сопротивление соединительного провода составляло менее 50 Ом. Предложенное решение в указанных условиях обеспечивает погрешности измерения сопротивления датчика в пределах ± 1 Ом. Для снижения погрешности определения РДТ следует использовать стабилитрон с высокой температурной стабильностью, заранее определённым напряжением стабилизации и его малой чувствительностью к изменению тока и малым током утечки при напряжении ниже напряжения пробоя. Высокое напряжение стабилизации может привести к существенному саморазогреву РДТ.

Рассмотренные методы измерения сопротивления РДТ опираются на измерение временных интервалов или напряжений и требуют для представления результатов измерения в цифровой форме использования счётчиков или аналого-цифровых преобразователей (АЦП), устройств управления и обработки данных. Поэтому в их состав должны входить микроконтроллеры, АЦП, аналоговые коммутаторы или специализированные устройства на программируемых логических интегральных схемах. С учётом

чувствительности длинных линий к индустриальным помехам и того, что большинство рассмотренных способов определения РДТ опираются на результаты однократных измерений, требуются меры по подавлению влияния помех.

Авторами работы запатентован способ определения сопротивления РДТ на основе интегрирования участка переходного процесса разряда конденсатора на сопротивление датчика. Способ направлен на снижение погрешностей измерения и повышение быстродействия, а также исключает влияние сопротивления соединительных проводов¹. При этом устройство, реализующее данный способ, базируется на микроконтроллере (МК) со встроенным АЦП. Измерительная цепь устройства предельно проста и состоит из опорного резистора, РДТ и конденсатора, шунтирующего РДТ.

Оценка эффективности предложенного решения требует разработки алгоритмического обеспечения, технической реализации метода и его экспериментальной апробации.

Материалы и методы

На рис. 1 представлена структурно-функциональная схема устройства измерения сопротивления РДТ, позволяющая реализовать ряд способов измерения его сопротивления. Цепь, представляющая собой последовательное соединение опор-

¹ Способ измерения температуры: пат RU № 2824738. С1 / О. Г. Бондарь, Е. О. Брежнева, М.А. Брежнев // Изобретения. Полезные модели. 2024. № 23.

ного резистора и РДТ, питается импульсным напряжением длительностью, обеспечивающей полный заряд шунтирующего конденсатора, и скважностью, гарантирующей минимальный разогрев резистора протекающим током. Напряжение питания измерительной цепи снимается с вывода 1 МК.

В конце процесса заряда конденсатора определяется падение напряжения на опорном резисторе (R_{REF}) как разность напряжений на входах 2 и 3 мультиплексора встроенного АЦП микроконтроллера. При этом результаты многократных измерений усредняются, что

позволяет ослабить влияние шумов, в том числе квантования. При отключении напряжения питания измерительной цепи за счёт перевода вывода 1 МК в режим ввода, конденсатор разряжается, питая резистивный датчик в цикле измерения. При этом встроенный мультиплексор подключает к АЦП вывод 3 и измеряется напряжение на соединительной линии (А-В). Ток в соединительных проводах не течет, так как входное сопротивление встроенного АЦП очень велико (свыше 100 Мом), что позволяет исключить влияние их сопротивлений R_W на результаты измерений.

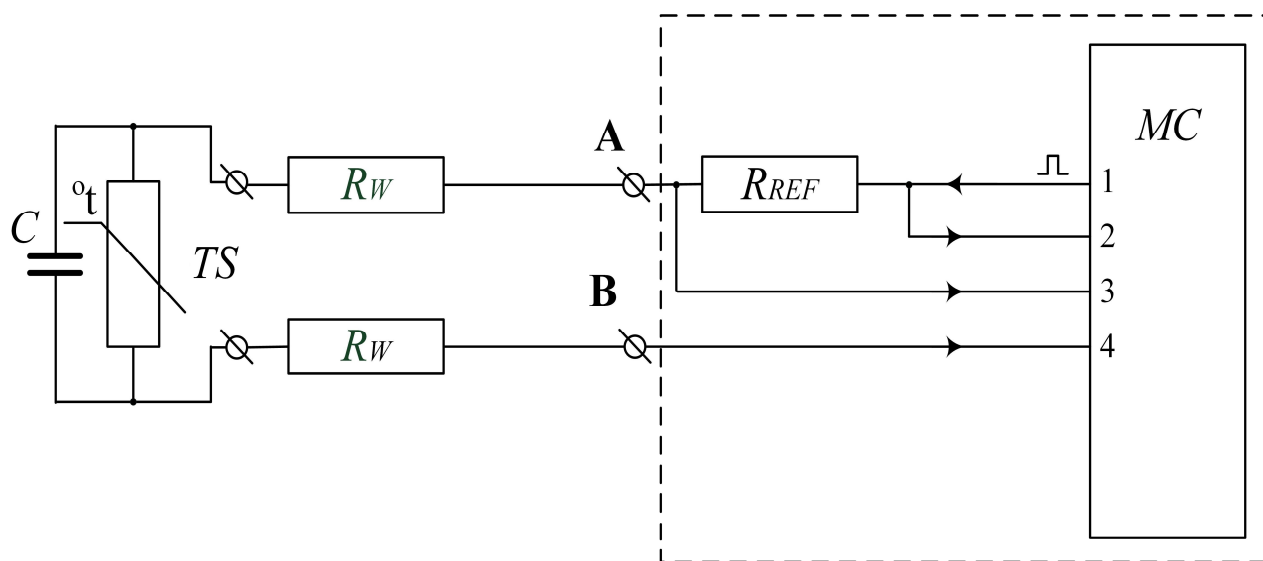


Рис. 1. Устройство измерения сопротивления РДТ при двухпроводном подключении:

MC — микроконтроллер; **R_{REF}** — опорный резистор; **R_W** — сопротивление двухпроводной линии; **TS** — резистивный датчик температуры; **C** — конденсатор

Fig. 1. Device for measuring the resistance of the RTD with a two—wire connection:

MC — microcontroller; **R_{REF}** — reference resistor; **R_W** — resistance of a two-wire line; **TS** — resistive temperature sensor; **C** — capacitor

Простейшая реализация измерительного алгоритма, использующая данную схему реализации устройства, заключается в измерении напряжения на зажимах А, В непосредственно после отключе-

ния питания измерительной цепи через вывод 1 МК [17]. При всей простоте такого подхода его недостатком является влияние на результаты измерения переходного колебательного процесса, воз-

никающего при отключении линии с распределёнными параметрами от источника напряжения. Поскольку сопротивление РДТ определяется по однократному измерению напряжения на нём, то на результат существенно влияют помехи, наводимые соединительную линию.

Влияние переходного процесса в линии можно исключить при оценке напряжения на РДТ после отключения питания по результатам определения параметров переходного процесса на основе измерения напряжения в моменты времени, удалённые от его начала. В [18] вычисление падения напряжения на РД, осуществляется по значениям напряжения, полученным в процессе разряда конденсатора в моменты времени t_1 и t_2 , причём $t_2 = 2t_1$.

Однако и при таком подходе на результаты однократных измерений сказывается влияние помех и шумов квантования.

Ослабить влияние вышеперечисленных факторов позволяет интегрирующий метод, заключающийся в интегрировании напряжения на РД в течение всего времени разряда конденсатора. При этом в вычислительном алгоритме используются результаты интегрирования в конце интервала t_1 и по завершении разряда конденсатора [19].

В [20] представлены результаты математического моделирования интегрирующего способа измерения, определены оптимальные значения первого интервала интегрирования t_1 и емкости конденсатора при заданном шаге кван-

тования. Показано, что преимуществом способа является отсутствие необходимости в проведении многократных измерений, меньшая величина среднеквадратической погрешности в сравнении с двухточечным методом. Недостатком метода является увеличение влияния шумов квантования, проявляющееся в процессе измерений на втором интервале интегрирования, вызванное уменьшением величины напряжения на РД.

В [21] представлены результаты исследования способа измерения, опирающегося на результаты интегрирования переходного процесса разряда конденсатора на РДТ и использующего линейную модель определения длительности интервала интегрирования, зависящего от величины сопротивления РДТ и, следовательно, от измеряемой температуры. Оценка величины интервала интегрирования осуществляется на основе грубой оценки сопротивления РДТ по результатам однократного измерения напряжения непосредственно после отключения питания измерительной цепи.

Наиболее совершенным из рассмотренных способов измерения является способ, представленный в работе¹. В соответствии с этим способом напряжение на РДТ при полном заряде конденсатора определяется по результатам интегрирования начального участка переходного процесса разряда конденсатора на

¹ Способ измерения температуры: пат RU № 2824738. С1 / О. Г. Бондарь, Е. О. Брежнева, М.А. Брежнев // Изобретения. Полезные модели. 2024. № 23.

сопротивление датчика. Сопротивление РДТ оценивается по отношению падений напряжения на опорном резисторе и РДТ, а температура по характеристике преобразования.

Процесс определения сопротивления РДТ начинается с полного заряда конденсатора подачей напряжения на измерительную цепь с вывода 1 МК (рис. 2). В конце заряда на основе многократных измерений определяется среднее значение напряжения на опорном резисторе. После этого МК отключает питание измерительной цепи и начинается процесс разряда конденсатора. Измеряется напряжение на входе соединительной линии, осуществляется оценка сопротивления РДТ и времени интегрирования.

Далее осуществляется интегрирование напряжения переходного процесса (накопление отсчетов с заданной частотой, представляющих собой результаты измерения напряжения между зажимами А и В). Накопление отсчетов длится в течение интервала времени t_2 , с сохранением промежуточного значения в середине этого интервала (момент времени t_1). Результаты суммирования отсчетов умножаются на интервал дискретизации и сохраняются как S_1 и S_2 , соответственно.

Интеграл напряжения на конденсаторе за временной интервал t от момента начала разряда рассчитывается согласно следующему выражению:

$$S = \int_0^t U_{TS} \exp(-t/\tau) dt = \tau U_{TS} [1 - \exp(-t/\tau)],$$

где $\tau = R_{TS}C$ – постоянная времени, цепи РДТ при отключенном источнике

питания; U_{TS} – напряжение на РДТ при полностью заряженном конденсаторе.

Значение интеграла на интервалах от начала разряда конденсатора до момента времени t_1 и $t_2 = 2t_1$:

$$\begin{cases} S_1 = \tau U_{TS} [1 - \exp(-t_1/\tau)] \\ S_2 = \tau U_{TS} [1 - \exp(-2t_1/\tau)] \end{cases} \quad (1)$$

Постоянная времени определится через отношение S_2/S_1 :

$$\begin{aligned} \frac{S_2}{S_1} &= \frac{1 - \exp(-2t_1/\tau)}{1 - \exp(-t_1/\tau)} = \\ &= \frac{[\exp(2t_1/\tau) - 1] \cdot \exp(t_1/\tau)}{[\exp(t_1/\tau) - 1] \cdot \exp(2t_1/\tau)} \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{S_2}{S_1} &= \frac{(\exp(t_1/\tau) + 1)(\exp(t_1/\tau) - 1)}{(\exp(t_1/\tau) - 1)} \times \\ &\times \frac{1}{\exp(t_1/\tau)} = 1 + \exp(-t_1/\tau). \end{aligned}$$

Отсюда:

$$\tau = -t_1 / \ln(S_2 / S_1 - 1).$$

Подстановкой постоянной времени в первое уравнение системы (1), определяется начальное значение напряжения на РДТ:

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

Величина сопротивления РДТ определяется в соответствии с выражением

$$R_{TS} = R_{REF} \cdot U_{TS} / U_{REF}. \quad (3)$$

Температура датчика определяется по характеристике преобразования термометра РДТ. Для платиновых термометров при положительных температу-

рах используется аналитическая зависимость Каллендара-Ван Дюзена:

$$R(T)=R_0(1+\alpha T+\beta T^2), \quad (4)$$

где $R(T)$ – сопротивление РДТ при температуре T °C; R_0 – сопротивление РДТ при 0 °C; α , β – коэффициенты. Альтернативный вариант – вычисление по градуировочной таблице, размещаемой в памяти МК.

Длительность интервала t_1 определяется по измеренному напряжению на опорном резисторе, напряжению на зажимах соединительных проводов, измеряемому непосредственно после отключения питания, и начальному значению временного интервала t_{10} при номинальном значении сопротивления РДТ. Оптимальное значение временного интервала t_{10} определяется эмпирически по результатам экспериментальных исследований.

Ниже приведен обобщенный алгоритм измерений сопротивления РДТ.

1. По результатам многократных измерений вычисляется напряжение опорного резистора U_{REF} как разность измеренных значений напряжений питания и на выходе делителя при включенном питании в установившемся режиме в момент полного заряда конденсатора.

2. Отключение питания, измерение U_{TS} и интегрирование (суммирование) на интервалах t_1 и t_2 . При этом значение U_{TS} равно напряжению на РДТ в отсутствие тока на соединительных проводах.

3. Сохранение сумм накопленных значений U_{TS} , умноженных на интервал

дискретизации Δt , измеренных на зажимах соединительных проводов на интервалах t_1 и t_2 в переменные S_1 и S_2 соответственно, с последующей коррекцией в соответствии с методом трапеций.

4. Расчет напряжения на РДТ в соответствии с выражением (2).

5. Расчет сопротивления РДТ в соответствии с выражением (3).

6. Определение температуры из (4).

Осциллограмма напряжения на входе соединительной линии (А-В) представлена на рис. 2. Вертикальные участки на диаграмме в моменты выключения и последующего включения напряжения питания цепи РДТ обусловлены исчезновением и появлением падения напряжения на сопротивлении проводников соединительной линии из-за исчезновения и появления тока в соединительной линии.

Результаты и их обсуждение

Исследования проводились на экспериментальном стенде на базе МК *ATmega328* с магазином сопротивлений *P4831* с классом точности 0,02 (рис. 3). Последовательно с РДТ установлено два резистора, каждый сопротивлением 120 Ом, имитирующие сопротивление соединительных проводов. Выбор МК обусловлен наличием относительно быстрого АЦП с разрешением 10 бит, обладающим очень высоким входным сопротивлением (около 100 Мом), позволяющим пренебречь сопротивлением датчика и проводов без использования дополнительного буферного усилителя.

Немаловажным обстоятельством является низкая стоимость и доступность прототипных плат и бесплатных средств разработки программного обеспечения. Сопротивления опорного резистора целесообразно выбрать примерно равны-

ми среднему геометрическому значению сопротивления РДТ на границах диапазона температур, в котором требуется обеспечить минимальную погрешность измерений.

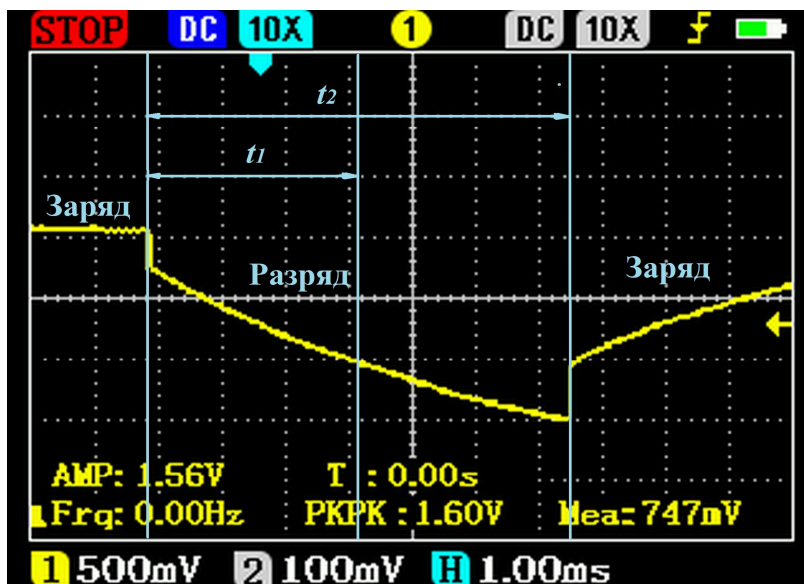


Рис. 2. Осциллограмма напряжения на зажимах линии подключения датчика

Fig. 2. Voltage waveform at the terminals of the sensor connection line

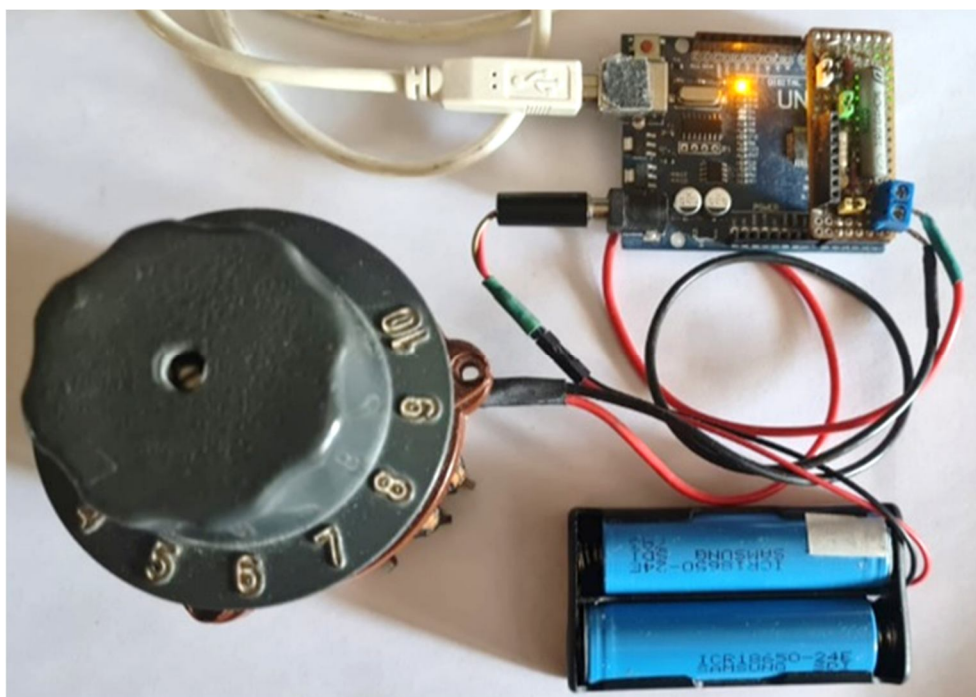


Рис. 3. Экспериментальный стенд

Fig. 3. Experimental stand

При этом суммарная величина сопротивления опорного резистора и РДТ должна выбираться таким образом, чтобы не превысить максимально допустимый выходной ток цифрового вывода (в цикле заряда конденсатора) и обеспечить минимальный перегрев РДТ током, что достигается выбором скважности импульсов питания. Наиболее распространёнными являются платиновые РДТ с сопротивлением от 10 до 1000 Ом, но применяются и даже -10 кОм. При испытании сенда сопротивления РДТ изменяется в четырёхкратном диапазоне, что при чувствительности около 40%/°C перекрывает диапазон -200 ... 660. При этом типичная верхняя граница платиновых термометров для промышленных применений не превышает 660 °C.

На выбор ёмкости конденсатора, шунтирующего РДТ, влияет частота дискретизации АЦП. Минимально достижимая погрешность вычислений сопротивления РДТ по выражению (2) определяется погрешностью численного интегрирования.

Сравнение методов численного интегрирования левых прямоугольников (нулевой порядок точности) и трапеций (первый порядок точности) показал, что при отношении постоянной времени к интервалу дискретизации более 100 обеспечивается относительная погрешность вычисления РДТ меньше 0.5% и 0.00083% соответственно, что предопределяет выбор метода трапеций. При этом погрешность численного интегрирования методом прямоугольников снижается пропорционально частоте дискретизации, а методом трапеций –

квадрату частоты дискретизации. Отсюда ёмкость конденсатора:

$$C \geq 100 \frac{\Delta t}{R_{TS}}.$$

Может потребоваться коррекция величины ёмкости в сторону увеличения при завышенном сопротивлении РДТ, что может привести к недозаряду конденсатора устройства выборки хранения. В сенде значение ёмкости конденсатора выбрано равным 6,8 мкФ (постоянная времени в 250 раз выше интервала дискретизации).

В рамках экспериментальных исследований предложенным методом при фиксированной оптимальной длительности интервала t_1 (100 отсчетов для R_{TS} равном 1 кОм) для четырех номинальных сопротивлений РДТ (1-4 кОм) по результатам 100 измерений определены следующие значения: максимальные (R_{MAX}), минимальные (R_{MIN}) и средние (R_{AVER}) значения, относительные погрешности отклонения измеренных средних значений от номинальных (δ_{AVER}) и диапазон погрешностей (d), демонстрирующий разброс результатов измерения относительно среднего значения (табл. 1). График, демонстрирующий относительный диапазон отклонений от среднего значения, рассчитанный как разность максимального и минимального значений по отношению к среднему, выраженный в %, представлен на рис. 4. Анализ полученных значений относительных погрешностей, характеризующих отклонение измеренных значений сопротивлений от номинальных в диапазоне 1-4 кОм, продемонстрировал необходимость применения корректирующей модели.

Для коррекции результатов измерения (R_{TS}) получена следующая линейная модель

$$R_{ADJ} = 1,0063 \cdot R_{TS} + 0,0061,$$

где R_{ADJ} – скорректированное значение сопротивления РДТ.

В табл. 1 представлены значения максимальных, средних и минимальных сопротивлений РДТ в диапазоне 1-4 кОм с шагом 1 кОм, вычисленные с использованием модели линейной адаптации, а также относительные погрешности.

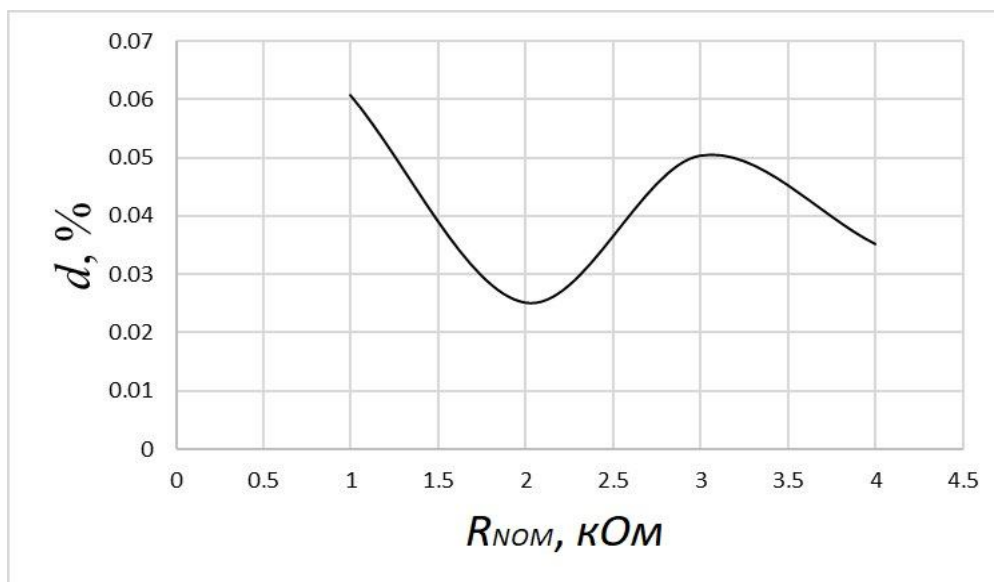


Рис. 4. Диапазон отклонения результатов измерения от среднего значения в зависимости от номинального значения сопротивления

Fig. 4. Range of deviation of measurement results from the average value depending on the nominal resistance value

Таблица 1. Результаты эксперимента и применения модели линейной адаптации

Table 1. Results of the experiment and application of the linear adaptation model

До применения линейной модели коррекции				
R_{NOM}	1	2	3	4
R_{MAX}	0,9876	1,9822	2,9759	3,9690
R_{AVER}	0,9872	1,9819	2,9753	3,9684
R_{MIN}	0,987	1,9817	2,9744	3,9676
$\delta_{AVER}, \%$	-1,28	-0,91	-0,79	-0,79
После применения линейной модели коррекции				
R_{MAX}	0,9999	2,0008	3,00075	4,0001
$\delta_{MAX}, \%$	-0,01	0,04	0,025	0,003
R_{AVER}	0,9995	2,0005	3,00014	3,9995
$\delta_{AVER}, \%$	-0,048	0,024	0,005	-0,013
R_{MIN}	0,9993	2,0003	2,99924	3,9987
$\delta_{MIN}, \%$	-0,068	0,015	-0,025	-0,033

На рис. 5 представлен график, демонстрирующий разброс относительных погрешностей измерения сопротивления после применения модели линейной адаптации.

Максимальный диапазон погрешностей отклонения результатов измерения от среднего составляет 0,06% (см. рис. 4), что свидетельствует о возможно-

сти применения результатов однократных измерений сопротивления РДТ. Оценка эффективности предложенного способа показала, что максимальная относительная погрешность измерения при использовании линейной модели коррекции не превышает 0,07%, что демонстрирует эффективность предложенного решения в сравнении с аналогами.

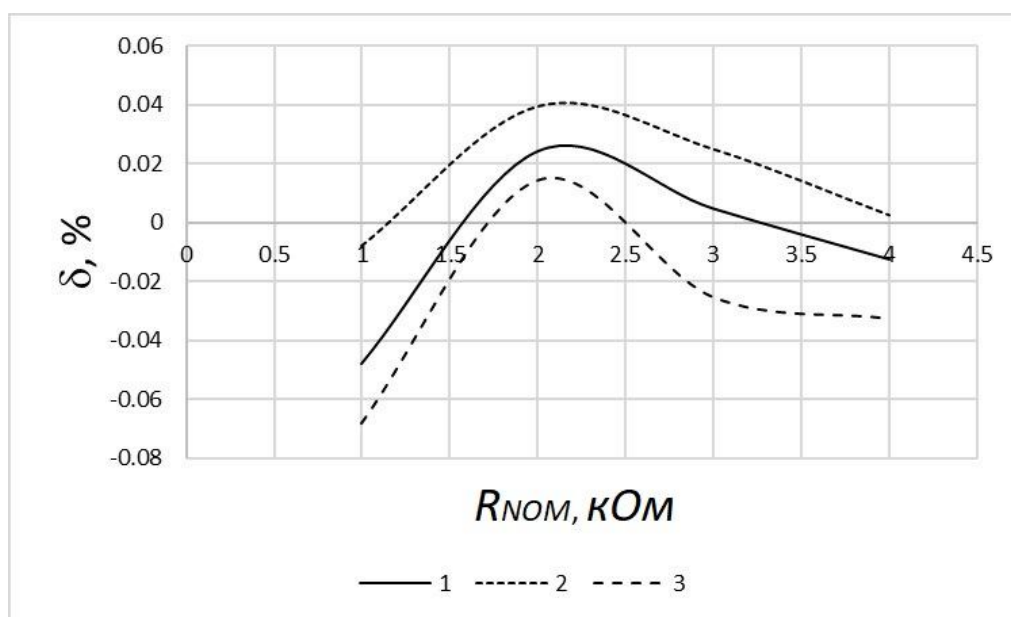


Рис. 5. Разброс относительных погрешностей измерения сопротивления РД на основе интегрирования начального участка переходного процесса при применении модели линейной адаптации: 1 — δ_{max} ; 2 — δ_{AVER} ; 3 — δ_{min}

Fig. 5. The spread of relative errors in measuring RD resistance based on the integration of the initial phase of the transition process when applying the linear adaptation model: 1 — δ_{max} ; 2 — δ_{AVER} ; 3 — δ_{min}

Так однократный способ непосредственного измерения обеспечивает относительную погрешность измерения на уровне 0,3% [17]. Относительная погрешность способа оценки сопротивления по результатам измерения напряжения переходного процесса разряда конденсатора на $R_{ТС}$ в двух точках составила 0,2% [18], а способа оценки по

результатам интегрирования на всём интервале переходного процесса с автоматической подстройкой параметров алгоритма измерения — в пределах 0,14% [19]. Предложенный способ измерения обеспечивает ускорение процедуры измерения в сравнении с представленным в [19] благодаря сокращению интервала интегрирования.

Выводы

Проведен аналитический обзор, посвященный способам снижения погрешностей измерения температуры резистивными датчиками при их удаленном размещении от измерительного блока. Определены основные направления совершенствования способов измерения температуры при двухпроводном подключении датчиков, как одного из наиболее перспективных технических решений, что обусловлено его простотой, надежностью и низкой стоимостью. Показано, что применение алгоритмов обработки на базе МК позволяет повысить точность измерений до уровня более сложных и дорогостоящих трех- и четырехпроводных схем.

Описан способ измерения сопротивления РДТ на основе обработки результатов интегрирования переходного процесса на начальном участке переходного процесса, преимуществами которого являются быстроедействие и повышение точности измерений. Приведено математическое описание и разработано программное обеспечение. Следует отметить, что интегрирование участка переходного процесса является средством подавления влияния шумов и помех, при этом повышение частоты дискретизации повышает эффективность подавления импульсных помех. Важным достоинством способа является нечувствительность к точности напряжения питания

цепи, точности поддержания ёмкости шунтирующего конденсатора, в том числе и к влиянию факторов внешней среды. Единственное требование к напряжению питания и ёмкости конденсатора – их стабильность в течение одного цикла измерения (в пределах 100 мс в условиях эксперимента).

Проведена апробация способа измерения на экспериментальном стенде, показавшая эффективность предложенного решения.

Проведен сравнительный анализ эффективности предложенного решения с одноточечным способом непосредственного измерения напряжения на РДТ, и оценками напряжения на основе измерения в двух точках переходного процесса и результатов интегрирования напряжения переходного процесса полного разряда конденсатора. Максимальная эффективность предложенного решения достигается в многоканальных сканирующих системах за счёт полного исключения аналоговых коммутаторов, особенно сложных при использовании 4-проводных схем подключения и двухкратного уменьшения суммарной длины проводников. При этом коммутация датчиков осуществляется цифровыми выводами МК, коммутирующими на общий провод возвратный проводники РДТ. Для разрыва цепи соответствующий цифровой вывод переводится в высокоимпедансное состояние [17].

Список литературы

1. Каспаров К. Н., Белозеров А. В. Измерение температуры быстропротекающих процессов // Измерительная техника. 2002. № 12. С. 34–38. <https://doi.org/10.1023/A:1022985107345>
2. Nagarajan P.R., George B., Kumar V.J. Improved Single-Element Resistive Sensor-to-Microcontroller Interface // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2017. № 66. P. 2736–2743. <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2712918>.
3. 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>
4. 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. P. 309–314 <https://doi.org/10.1134/S1810232822020114>.
5. Malinarič S. The Application of the Finite Elements Method in the Transient Measurements of Thermophysical Parameters // Int J Thermophys. 2024. № 45. P. 22 <https://doi.org/10.1007/s10765-023-03311-1>.
6. Kowal A., Manuszkiewicz H., Kołodziej B., et al. Tests of the Stability of Chinese RhFe Resistance Thermometers at Low Temperatures // Int J Thermophys. 2017. № 38. P. 38–95. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2232-8>
7. Ventura G., Giomi S. A Simple Method to Extend the Range of Low Temperature Resistance Thermometers // Int J Thermophys. 2019. № 40. P. 1-7. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2482-8>.
8. Ghaly S. M. A. LabVIEW Based Implementation of Resistive Temperature Detector Linearization Techniques // Engineering, Technology & Applied Science Research. 2019. № 9. P. 4530–4533. <https://doi.org/10.48084/etasr.2894>.
9. Piechowski L., Muc A., Iwaszkiewicz J. The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence // Energies. 2021. Vol. 14, no. 24. P. 8214. <https://doi.org/10.3390/en14248214>.
10. Reverter F. A Microcontroller-Based Interface Circuit for Three-Wire Connected Resistive Sensors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2022. № 71. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3219492>.
11. Elangovan K. A Novel Triple-Slope-Based Digital Measurement Platform for Three-Wire Connected Resistive Sensors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2024. № 73. P. 1-3. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3411132>.
12. Tapan Kr. Maiti, Asim Kar. A new and low-cost lead resistance compensation technique for resistive sensors // Measurement. 2010. № 43. P. 735-738. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.01.013>.

13. 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. Vol. 22, no. 11. P. 4176. <https://doi.org/10.3390/s22114176>.
14. Reverter F. A Front-End Circuit for Two-Wire Connected Resistive Sensors with a Wire-Resistance Compensation // *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 19. P. 8228. <https://doi.org/10.3390/s23198228>.
15. Jos' e A. Hidalgo-Lopez. Direct interface circuits for resistive sensors affected by lead wire resistances // *Measurement*. 2023. № 218. P. 113250. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113250>.
16. 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. Vol. 20, no. 9. P. 2742. <https://doi.org/10.3390/s2009274>
17. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Родионов П. С. Многоканальный преобразователь температуры // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2022. Т.65, № 4. С. 254–26. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261>.
18. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Kalmykov A.I. Increasing Temperature Measurement Accuracy: Method of Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer // *Measurement Techniques*. 2022. № 65. P. 514-519. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02070-z>.
19. Bondar O. G., Brezhneva E.O., Zubarev A. Yu.. Improvement of algorithms for measuring temperature with two-wire connection of resistance thermometers // *Measurement Techniques*. 2023. Vol. 66, no. 4. P. 514-519. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02221-w>.
20. Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Ботиков К.А. Исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2024. Т. 28, № 1. С. 71-87. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87>.
21. 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. Kasparov K.N., Belozerov A.V. Measurement of the Temperature of High-Speed Processes. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*. 2002; 45: 1256–1263. (In Russ.). <https://doi.org/10.1023/A:1022985107345>
2. 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>.
3. 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. 2017; 63(7):567–572 (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01824-x>.

4. 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>.

5. 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>.

6. Kowal A., Manuszkiewicz H., Kołodziej B., et al. Tests of the Stability of Chinese RhFe Resistance Thermometers at Low Temperatures. *Int J Thermophys.* 2017; 38: 38–95. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2232-8>

7. Ventura G., Giomi S. A Simple Method to Extend the Range of Low Temperature Resistance Thermometers. *Int J Thermophys.* 2019; 40:1-7. <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2482-8>.

8. Ghaly S. M. A. LabVIEW Based Implementation of Resistive Temperature Detector Linearization Techniques. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2019; 9:4530–4533. <https://doi.org/10.48084/etasr.2894>.

9. Piechowski L., Muc A., Iwaszkiewicz J. The Precise Temperature Measurement System with Compensation of Measuring Cable Influence. *Energies*. 2021; 14(24):8214. <https://doi.org/10.3390/en14248214>.

10. 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>.

11. Elangovan K. A Novel Triple-Slope-Based Digital Measurement Platform for Three-Wire Connected Resistive Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2024; 73: 1-3. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3411132>.

12. Tapan Kr. Maiti, Asim Kar. A new and low-cost lead resistance compensation technique for resistive sensors. *Measurement*. 2010; 43: 735-738. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.01.013>.

13. 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(11):4176. <https://doi.org/10.3390/s22114176>.

14. Reverter F. A Front-End Circuit for Two-Wire Connected Resistive Sensors with a Wire-Resistance Compensation. *Sensors*. 2023; 23(19):8228. <https://doi.org/10.3390/s23198228>

15. 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>.

16. 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; 9: 2742. <https://doi.org/10.3390/s20092742>.

17. Bondar' O.G., Brezhneva E.O., Rodionov P. S. Multi-channel temperature converter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*. 2022; 65 (4): 254-261. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261>.
18. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Kalmykov A.I. Increasing Temperature Measurement Accuracy: Method of Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer. *Measurement Techniques*. 2022; 65:514-519. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02070-z>.
19. Bondar O. G., Brezhneva E.O., Zubarev A. Yu.. Improvement of algorithms for measuring temperature with two-wire connection of resistance thermometers. *Measurement Techniques*. 2023; 66 (4): 514-519. <https://doi.org/10.1007/s11018-023-02221-w>.
20. Bondar O. G., Brezhnev 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(1): 71-87 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87>
21. 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 = Measurement Techniques*. 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

Oleg G. Bondar, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: b.og@mail.ru

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

Ekaterina O. Brezhneva, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: bregnevaeo@mail.ru

Калмыков Андрей Игоревич, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: q56fyjim@mail.ru

Andrey I. Kalmykov, Student, Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: q56fyjim@mail.ru