УДК 536.531
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ

О. Г. Бондарь*, Е. О. Брежнева, П. С. Родионов

Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия,
** b.og@mail.ru*

Аннотация. Предложен метод многоканального измерения температуры, заключающийся в поочередном питании *n* термометров сопротивления. Метод позволяет повысить точность измерения за счет ослабления влияния сопротивления линий, с помощью которых осуществляется подключение термометров сопротивления. Разработан макет многоканального преобразователя температуры, на котором проведена апробация метода.

Ключевые слова: *многоканальное измерение температуры, точность измерений, микроконтроллер, термометр сопротивления*

Ссылка для цитирования: *Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Родионов П. С.* Многоканальный преобразователь температуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 254—261. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261

MULTI-CHANNEL TEMPERATURE CONVERTER

O. G. Bondar*, E. O. Brezhneva, P. S. Rodionov

The Southwest State University, Kursk, Russia
** b.og@mail.ru*

Abstract. A method for multichannel temperature measurement is proposed, which consists in alternately supplying *n* resistance thermometers. The method makes it possible to increase the accuracy of measurement by weakening the influence of the resistance of the lines through which resistance thermometers are connected. A prototype of multichannel temperature converter is developed and used for the method testing.

Keywords: multichannel temperature measurement, measurement accuracy, microcontroller, resistance thermometer

For citation: Bondar O. G., Brezhneva E. O., Rodionov P. S. Multi-channel temperature converter. *Journal of Instrument Engineering.* 2022. Vol. 65, N 4. P. 254—261 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-254-261.

Введение. Системы автоматизированного управления технологическими процессами и системы сбора данных обычно содержат распределенную сеть датчиков, среди которых одно из ведущих мест занимают преобразователи температуры [1—4]. Одним из самых распространенных видов преобразователей температуры являются термометры сопротивления (терморезисторы, термосопротивления). Для измерения сопротивления такого преобразователя используется делитель напряжения, образованный опорным резистором и термометром сопротивления (ТС). Измерив падение напряжения на ТС, а также зная опорное напряжение и сопротивление опорного резистора, можно определить величину сопротивления ТС, зависящую от температуры, а по известной зависимости сопротивления от температуры — и температуру [5—9].

© *Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Родионов П. С., 2022*

В случае удаленного подключения ТС сопротивление соединительных проводов оказывает существенное влияние на точность измерений, так как ток измерительной цепи вызывает дополнительное падение напряжения на ТС. Наиболее существенно оно в простейших двухпроводных схемах подключения. Известны решения, позволяющие уменьшить или исключить влияние сопротивления проводников на результат измерения, — трехпроводные и четырехпроводные подключения термометров сопротивления [10].

Влияние сопротивления соединительных проводов в трехпроводных схемах ослабляется путем компенсации. Полная компенсация достигается при равенстве сопротивлений соединительных проводов, а также идентичности их температурных зависимостей, что является основным условием применимости трехпроводной схемы. В четырехпроводной схеме питание ТС током возбуждения производится с помощью одних проводов, а измерение разности потенциалов на нем — с помощью других. При этом, согласно ГОСТ 6651-2009, использование двухпроводной схемы не допускается для термометров сопротивления классов точности АА (допуск $\pm(0{,}1+0{,}0017|t|)$ °С) и А (допуск $\pm(0{,}15+0{,}002|t|)$ °С).

Вместо использования делителя напряжения можно осуществлять питание ТС известным током генератора тока. При этом падение напряжения на ТС пропорционально его сопротивлению. Однако такой способ питания не упрощает измерительных схем при использовании длинных соединительных линий.

Недостатками перечисленных решений, по сравнению с двухпроводным вариантом, являются сложные измерительные схемы и высокая стоимость трехпроводных и четырехпроводных кабелей.

Для ослабления влияния на точность измерения температуры разогрева ТС протекающим током, ТС работают при малых величинах токов, что снижает падение напряжения на них и увеличивает влияние шумов, помех и погрешностей электронных узлов на результат измерения. Это обусловливает дальнейшее усложнение измерительных цепей, а также применение фильтрации, влекущей за собой снижение быстродействия. Усложнение измерительных цепей также снижает их надежность. Перечисленные недостатки усугубляются в системах сбора данных вследствие необходимости коммутации большого количества каналов измерения температуры.

Для снижения требований к чувствительности измерительных схем, величине термоЭДС и температурным дрейфам напряжения в измерительных цепях целесообразно использовать импульсный режим возбуждения датчика температуры. Подобный подход хорошо зарекомендовал себя, например, при подогреве чувствительных элементов термокаталитических газочувствительных датчиков и измерении их сопротивления [11—14]. В этом случае при сохранении среднего значения тока его амплитуду можно увеличить в несколько раз и соответственно снизить требования к чувствительности измерительной схемы.

Метод повышения падения напряжения на ТС реализован устройством [15], в котором при изменении сопротивления термопреобразователя вследствие изменения температуры контролируемой среды автоматически изменяется ток питания термометра сопротивления с целью получения максимального уровня сигнала при допустимой мощности рассеивания. Для этого в устройство включен блок стабильных источников тока, в котором каждый источник настроен на генерацию заданного фиксированного тока опроса для конкретного диапазона значений сопротивлений термопреобразователя. Вычислительный блок компенсирует аддитивную и мультипликативную составляющие погрешности.

Недостатком такого решения является то, что выигрыш в мощности сигнала, получаемого с ТС, оказывается небольшим, а сложность устройства резко возрастает, что снижает его надежность.

В [16] представлен еще один метод существенного повышения уровня сигнала при упрощении устройства и, следовательно, снижения погрешности. Устройство содержит источник постоянного напряжения, поочередно подключаемый с помощью n-канального коммутатора к

делителям, образованным ТС и общим для них опорным резистором. Второй коммутатор поочередно подключает термометры сопротивления к аналого-цифровому преобразователю.

Выходной сигнал аналого-цифрового преобразователя поступает в контроллер, который управляет работой двух коммутаторов, поочередно измеряя напряжение на делителях, образованных термометрами сопротивления и опорным резистором, и на собственно опорном резисторе. По измеренным значениям напряжения на каждом из делителей и опорном резисторе, а также по известному сопротивлению этого резистора вычисляется сопротивление каждого ТС, а затем определяется соответствующая температура.

Недостатком этого метода измерения температуры является существенное возрастание погрешности за счет сопротивления проводов линии, с помощью которой подключается ТС, и повышенная сложность, обусловленная наличием второго коммутатора с (n+1) входом (дополнительный вход используется для измерения напряжения на опорном резисторе).

Многоканальное измерение температуры. Согласно предлагаемому решению точность измерения повышается за счет ослабления влияния сопротивления линий, с помощью которых подключается ТС, при этом снижается сложность самого устройства.

Питание поочередно подается на каждый из n ТС, сопротивление которых определяется по падению напряжения на опорном резисторе по окончании импульса напряжения и напряжения на входе линии, подключенном к опорному резистору, после отключения опорного резистора от источника питания.

Важной особенностью этого метода является то, что ТС шунтированы конденсаторами в точках их подключения к концу соединительной двухпроводной линии. Питание ТС осуществляется через соответствующие линии и общее опорное сопротивление импульсом напряжения со скважностью, при которой средний ток через ТС не превышает допустимой величины, а емкость конденсаторов выбирается такой, чтобы за время действия импульса напряжения завершился переходный процесс заряда конденсатора. Импульс напряжения заканчивается отключением опорного резистора от источника питания.

Устройство многоканального преобразования температуры. На рис. 1 представлена структурная схема устройства, реализующего предложенный метод измерения температуры. Рассматриваемая схема является трехканальной.

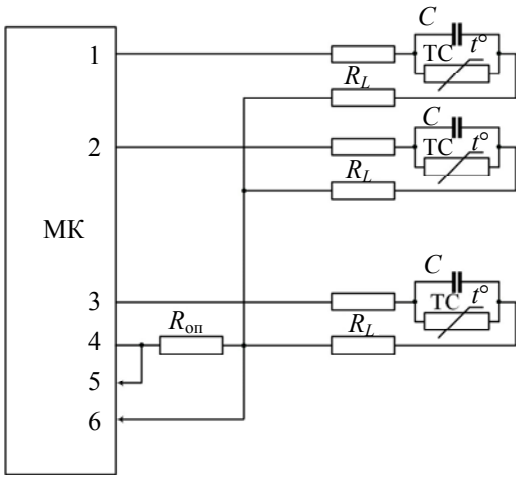

Рис. 1

Основой схемы является микроконтроллер МК (в данном случае — со встроенным аналого-цифровым преобразователем). Помимо него схема содержит опорный резистор $R_{оп}$, термометры сопротивления ТС, шунтированные конденсаторами C, соединительные двухпроводные линии R_L, представленные сопротивлениями ее проводов. Выходы 1, 2, 3 микроконтроллера присоединены к первым входам линий R_L, а вторые входы линий соединены и подключены к первому выводу опорного резистора $R_{оп}$, второй вывод которого присоединен к выходу 4 микроконтроллера. Оба вывода опорного резистора $R_{оп}$ соединены со входами 5 и 6

встроенного в микроконтроллер аналого-цифрового преобразователя, а к выходам двухпроводных линий R_L присоединены ТС, шунтированные конденсаторами.

Устройство функционирует следующим образом. В начальном состоянии микроконтроллер удерживает выходы 1—3 в высокоимпедансном состоянии (в этом режиме они ориентированы на ввод), а на выходе 4 устанавливает логический нуль. При этом ток в цепях термометров сопротивлений отсутствует. На первый вход выбранной линии R_L подается низкое напряжение с одного из выходов (1, 2 или 3) микроконтроллера, а на вывод 4 в течение времени t — высокое. При подаче импульса напряжения протекающий в выбранной линии ток обеспечивает падение напряжения на термометре сопротивления и заряжает шунтирующий его конденсатор. К концу импульса длительностью t конденсатор заряжается до установившегося значения. Установившееся напряжение меньше напряжения источника питания на величину падения напряжения на выходных сопротивлениях микроконтроллера, а также падения напряжения на опорном резисторе и сопротивлениях проводов линии.

В конце интервала t измеряется напряжение на опорном резисторе $R_{\text{оп}}$, между входами 5 и 6 встроенного в микроконтроллер аналого-цифрового преобразователя. По завершении интервала t выход 4 микроконтроллера переводится в высокоимпедансное состояние, а ток в измерительной цепи устанавливается равным нулю. При этом на входе 6 измеряется напряжение на втором входе линии R_L, присоединенном к первому выводу опорного резистора. Это напряжение равно напряжению на термометре сопротивления, шунтированном конденсатором.

Выборка напряжения схемой выборки-хранения аналого-цифрового преобразователя осуществляется в первый момент времени после разрыва цепи, потому измеряемое напряжение соответствует напряжению на конденсаторе и ТС в конце интервала заряда t. Поскольку при полностью заряженном конденсаторе в конце импульса напряжения через опорный резистор и термометр сопротивления протекает один и тот же ток, то падение напряжения на опорном резисторе $U_{\text{оп}}$ и термометре сопротивления $U_{\text{тс}}$ пропорционально их сопротивлениям $R_{\text{оп}}$ и $R_{\text{тс}}$ соответственно:

$$R_{\text{тс}} = R_{\text{оп}} \times U_{\text{тс}} / U_{\text{оп}}.$$

Таким образом, по измеренным напряжениям и сопротивлению опорного резистора можно рассчитать сопротивление ТС, а по нему — температуру.

После этого выходы микроконтроллера переводятся в высокоимпедансное состояние, выдерживается пауза, обеспечивающая требуемое значение среднего тока термометра сопротивления, выбирается следующая линия, устанавливается логический нуль на очередном выводе (из 1—3) уровень, и процесс измерения повторяется для следующего ТС.

Период повторения циклов опроса ТС и длительность импульса обеспечивают непревышение допустимого значения тока. Число измерительных каналов температуры может быть бóльшим, оно ограничивается количеством портов микроконтроллера. При этом для реализации метода измерения температуры достаточно лишь двух входов аналого-цифрового преобразователя.

Сопротивление выходных каскадов портов может рассматриваться как часть сопротивления проводников линии, и оно не влияет на результат измерения, так как падение напряжения в конце импульса длительности t измеряется непосредственно на опорном резисторе. Второе измерение на втором входе линии осуществляется после перевода выхода 4 микроконтроллера в высокоимпедансное состояние. В этом случае ток в линии R_L, с помощью которой подключен ТС, практически отсутствует, как и падение напряжения на проводниках линии и выходном сопротивлении выходов микроконтроллера (входное сопротивление аналого-цифрового преобразователя превышает 100 МОм). Таким образом, выходные сопротивления портов микроконтроллера не влияют на результат измерения.

При повышении требований к точности измерений может использоваться внешний аналого-цифровой преобразователь, а напряжение на ТС может измеряться в нескольких точках переходного процесса разряда шунтирующего конденсатора.

Моделирование схемы преобразователя температуры и обсуждение результатов. Апробация предложенного решения проводилась с помощью экспериментального стенда на базе микроконтроллера *ATmega 328P* (рис. 2).

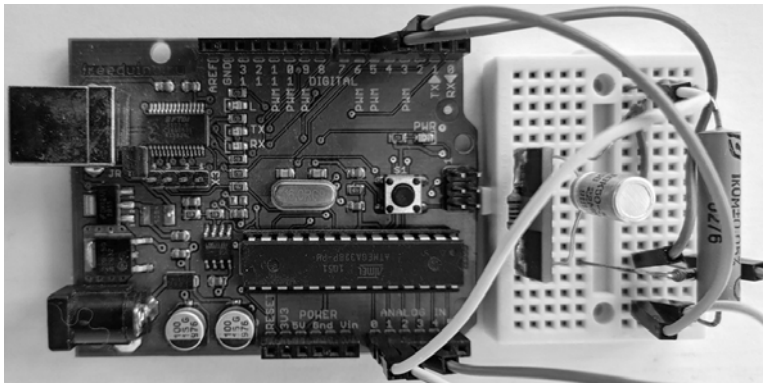

Рис. 2

На рис. 3 представлена схема стенда, включающая: опорный резистор, сопротивление провода линии подключения термометра сопротивления, термометр сопротивления, конденсатор, микроконтроллер (1 — цифровой двунаправленный вывод возбуждения измерительной цепи, 2 — вход аналого-цифрового преобразователя для измерения напряжения на входе измерительной цепи, 3 — вход аналого-цифрового преобразователя для измерения напряжения на входе линии подключения термометра сопротивления, 4 — двунаправленный вывод коммутации канала многоканальной измерительной системы, 5 — общий провод системы многоканального измерения температуры). На схеме величина сопротивления опорного резистора 1 кОм, погрешность 0,05 %, измеряемый резистор 1 кОм, погрешность 5 %.

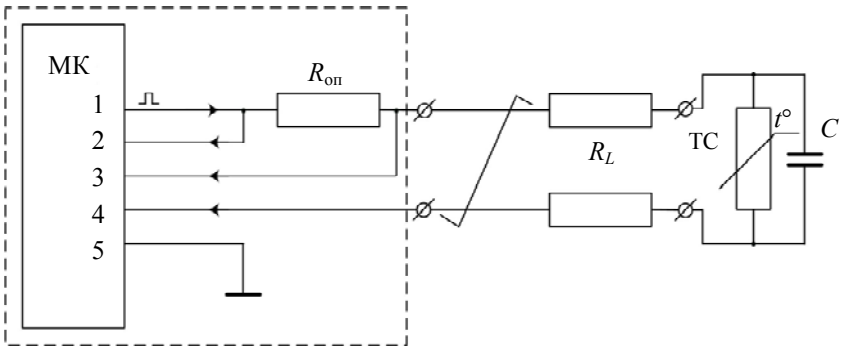

Рис. 3

Измеренное откалиброванным мультиметром *RICHMETERS 113D* сопротивление измеряемого резистора 963 Ом (+/–0,2 %). Соединительные линии имитировались двумя резисторами по 120 Ом.

При измерениях на выводе 4 микроконтроллера устанавливается логический нуль, поэтому линия, соединяющая ТС с МК, подключается к общему проводу системы через выходное сопротивление буфера МК, увеличивая суммарное сопротивление соединительной линии.

Встроенный в микроконтроллер аналого-цифровой преобразователь не имеет дифференциального режима измерений, поэтому напряжение на опорном резисторе вычисляется через напряжения, измеренные на входах 2 и 3 в конце переходного процесса заряда конденсатора:

$$U_{оп} = U_2 - U_3.$$

Это напряжение определяется исключительно током, протекающим через активные сопротивления цепи ($R_{оп}$, R_L, $r_{тс}$ и выходные сопротивления МК), поскольку конденсатор уже заряжен.

При завершении импульса питания цепь ТС разрывается переводом вывода 1 МК в высокоимпедансное состояние. Поскольку ток в цепи ТС отсутствует, то и падение напряжения

между выводами 4 и общим проводом системы 5 практически равно нулю. Поэтому напряжение, измеренное на входе 3 МК, равно напряжению на конденсаторе и ТС, включенных параллельно. Вычисление сопротивления ТС осуществляется МК в соответствии с (1).

На рис. 4 представлены временные диаграммы сигналов (верхняя — на входе измерительной цепи; нижняя — на входе линии подключения датчика). Управление измерительной схемой, вычисление значений сопротивления ТС и передача их в компьютер осуществляются с помощью разработанной программы *Termo_Net_M*^{ean}. Результаты представлены в таблице (среднеквадратическое отклонение определено относительно среднего значения).

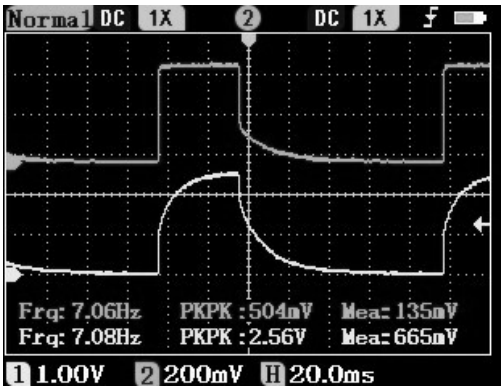

Рис. 4

Результаты измерения сопротивления

№ измерения	R_t, Ом
1	0,959
2	0,96
3	0,96
4	0,96
5	0,96
6	0,96
7	0,961
8	0,96
9	0,96
10	0,961
11	0,96
12	0,96
13	0,961
14	0,961
15	0,96
16	0,96
17	0,96
18	0,96
19	0,96
20	0,96
21	0,96
22	0,96
23	0,96
24	0,96
25	0,96
26	0,96
27	0,96
28	0,96
29	0,961
30	0,96
Среднее значение	0,96013
СКО	0,00043

Согласно таблице, измеренное номинальное сопротивление резистора (R_t) составило 960 Ом (действительное значение 963 Ом, относительная погрешность 0,3 %) при суммарном сопротивлении линии 240 Ом, что убедительно доказывает высокую степень подавления влияния соединительной линии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кондрусев А. В., Миронов С. А.* Расчет характеристик чувствительного элемента волоконно-оптического датчика температуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 6. С. 49—52.
2. *Чивель Ю. А., Затягин Д. А., Смуров И. Ю.* Система мониторинга процесса селективного лазерного спекания // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 4. С. 70—73.
3. *Федоров А. В., Тагиев Ш. К.* Метод регулирования теплового режима при барботаже концентрированного раствора растительного масла // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 12. С. 50—54.
4. *Киба Д. А., Любушкина Н. Н., Гудим А. С., Биткина А. А.* Регистратор условий хранения и транспортировки специализированных грузов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 668—674.
5. *Kasparov K. N., Belozerov A. V.* Measurement of the Temperature of High-Speed Processes // Measurement Techniques. 2002. Vol. 45, N 12. P. 1256—1263.
6. *Куликов В. А., Муравьев В. В., Никитин К. А., Брагин Г. В.* Измерение температуры рельсов в бесстыковом пути // Измерительная техника. 2017. Т. 60, № 5. С. 53—55.
7. *Филатов А. В., Сердюков К. А., Новикова А. А.* Перспективы использования модифицированного нулевого метода измерений температуры датчиками сопротивления // Измерительная техника. 2020. Т. 63. № 7. С. 51—55.
8. *Су Ц., Кочан О. В., Йоцов В. С.* Методы снижения влияния приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар на погрешность измерения температуры // Измерительная техника. 2015. Т. 58, № 3. С. 52—55.
9. *Волков Б. И., Новицкий Д. М.* Анализ погрешностей измерений температуры, обусловленных неточностью модели измерительно-вычислительного преобразователя // Измерительная техника. 2004. Т. 47, № 3. С. 24—27.
10. *Андрусевич А., Губа А.* Термометры сопротивления: от теории к практике // Компоненты и технологии. 2011. № 7. С. 61—66.
11. *Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Полякова А. В.* Применение микроконтроллера для температурной стабилизации полупроводниковых газочувствительных датчиков // Датчики и системы. 2014. № 2. С. 41—46.
12. *Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Поздняков В. В.* Реализация изотермического режима термокаталитических газочувствительных датчиков // Датчики и системы. 2016. № 2. С. 43—47.
13. *Бондарь О. Г., Брежнева Е. О.* Изотермический режим газочувствительных каталитических датчиков // Изв. ЮЗГУ. 2012. Ч. 3. № 2(41). С. 27—31.
14. *Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Поздняков В. В.* Методы и алгоритмы управления термокаталитическим датчиком водорода // Измерительная техника. 2018. Т. 61, № 5. С. 669—672.
15. Пат. 1394062 РФ, МПК G01K7/00 (2006.01). Устройство для измерения температуры / *В. Е. Безвенюк, Г. Е Богославский., Ю. В. Голубев, В. С. Зеленский, А. В. Синельников*. Заяв. № 4083692, 1986.07.03. Опубл.1988.05.07. Бюл. № 17.
16. Пат. 2534633 РФ, МПК G01K 7/18(2006.01). Устройство для измерения температуры среды / *А. Ф. Буслаев.* Заяв. № 2013113068/28, 2013.03.22. Опубл. 2014.12.10. Бюл. № 17.

Сведения об авторах

Олег Григорьевич Бондарь — канд. техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет, кафедра космического приборостроения и систем связи; E-mail: b.og@mail.ru

Екатерина Олеговна Брежнева — канд. техн. наук; Юго-Западный государственный университет, кафедра космического приборостроения и систем связи; доцент; E-mail: bregnevaeo@mail.ru

Павел Сергеевич Родионов — студент; Юго-Западный государственный университет, кафедра космического приборостроения и систем связи;
E-mail: pasha.rodionov.0202@mail.ru

Поступила в редакцию 07.12.21; одобрена после рецензирования 21.12.21; принята к публикации 28.02.22.

REFERENCES

1. Kondrusev A.V., Mironov S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2003, no. 6(46), pp. 49–52. (in Russ.)
2. Chivel Yu.A., Zatyagin D.A., Smurov I.Yu. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 4(51), pp. 70–73. (in Russ.)
3. Fedorov A.V., Tagiev Sh.K. *Journal of Instrument Engineering*, 2005, no. 12(48), pp. 50–54. (in Russ.)
4. Kiba D.A., Lyubushkina N.N., Gudim A.S., Bitkina A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 7(62), pp. 668–674. (in Russ.)
5. Kasparov K.N., Belozerov A.V. *Measurement Techniques*, 2002, no. 12(45), pp. 1256–1263.
6. Kulikov V.A., Murav'ev V.V., Nikitin K.A., Bragin G.V. *Measurement Techniques*, 2017, no. 5(60), pp. 487–490.
7. Filatov A.V., Serdyukov K.A., Novikova A.A. *Measurement Techniques*, 2020, no. 7(63), pp. 567–572.
8. Jun S., Kochan O.V., Jotsov V.S. *Measurement Techniques*, 2015, no. 3(58), pp. 327–331.
9. Volkov B.I., Novitskii D.M. *Measurement Techniques*, 2004, no. 3(47), pp. 247–253.
10. Andrusevich A., Guba A. *Komponenty i tekhnologii* (Components and Technologies), 2011, no. 7, pp. 61–66. (in Russ.)
11. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Polyakova A.V. *Datchiki i sistemy*, 2014, no. 2, pp. 41–46. (in Russ.)
12. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Pozdnyakov V.V. *Datchiki i sistemy*, 2016, no. 2, pp. 43-47. (in Russ.)
13. Bondar O.G., Brezhneva E.O. *Proceedings of Southwest State University*, 2012. Pt. 3, no. 2(41), pp. 27–31. (in Russ.)
14. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Pozdnyakov V.V. *Measurement Techniques*, 2018, no. 5(61), pp. 514–519.
15. Pat. RU 1394062, G01K7/00 (2006.01), *Ustroystvo dlya izmereniya temperatury* (Device for Measuring the Temperature), V.E. Bezvenyuk, G.E. Bogoslavsky, Yu.V. Golubev, V.S. Zelensky, A.V. Sinelnikov, Patent application no. 4083692, Priority 1988.05.07, Published Bulletin 17. (in Russ.)
16. Pat. RU 2534633, G01K 7/18(2006.01), *Ustroystvo dlya izmereniya temperatury sredy* (Device for Measuring the Temperature of the Environment), A.F. Buslaev, Patent application no. 2013113068/28, Priority 2013.03.22, Bulletin 17. (in Russ.)

Data on authors

Oleg G. Bondar — PhD, Associate Professor; The Southwest State University, Department of Space Instrumentation and Communication Systems;
E-mail: b.og@mail.ru

Ekaterina O. Brezhneva — PhD; The Southwest State University, Department of Space Instrumentation and Communication Systems; Associate Professor;
E-mail: bregnevaeo@mail.ru

Pavel S. Rodionov — Student; The Southwest State University, Department of Space Instrumentation and Communication Systems;
E-mail: pasha.rodionov.0202@mail.ru

Received 07.12.21; approved after reviewing 21.12.21; accepted for publication 28.02.22.