

Способ реализации беспроводного резистивного датчика контроля температуры

А. А. Ухов[✉], Д. К. Кострин, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов, В. А. Симон

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ aauhov@yandex.ru

Аннотация. Технологическое оборудование часто оснащается внешними проводными датчиками, характеризующимися невысокой помехозащищенностью в случае существенной длины соединительного кабеля. Для обеспечения возможности контроля температуры объектов, расположенных на значительном расстоянии от технологической установки, необходимо использовать беспроводные датчики, позволяющие передавать сигнал по радиоканалу на десятки метров. Предложен метод замены проводного резистивного датчика температуры беспроводным, не требующий изменения цепей технологической установки. Температура удаленного объекта контролируется с помощью терморезистора по падающему на нем напряжению с применением сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя. Полученный цифровой код передается по радиоканалу на приемную часть устройства, расположенную вблизи от технологической установки. Далее с помощью схемы эмуляции на разъеме технологической установки обеспечивается сопротивление, эквивалентное сопротивлению измерительного терморезистора. Для решения данной задачи используется цифровой потенциометр, управляемый с помощью микроконтроллера. Погрешность установки эквивалентного сопротивления для платинового датчика Pt-100 с применением разработанного метода не превышает 1.3 % для диапазона температур –40...100 °С.

Ключевые слова: контроль температуры, платиновый резистор, эмуляция сопротивления, цифровой потенциометр, беспроводной датчик

Для цитирования: Способ реализации беспроводного резистивного датчика контроля температуры / А. А. Ухов, Д. К. Кострин, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов, В. А. Симон // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 2. С. 47–53. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-47-53.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Method for Implementing a Wireless Resistive Temperature Control Sensor

A. A. Uhov[✉], D. K. Kostrin, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, V. A. Simon

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ aauhov@yandex.ru

Abstract. Technological equipment is often provided with external wired sensors characterized by low noise immunity in the case of a significant length of the connecting cable. To ensure the possibility of monitoring the temperature of objects located at a considerable distance from the technological installation, it is necessary to use wireless sensors that allow transmitting a signal over a radio channel for tens of meters. The paper proposes a method for replacing a wired resistive temperature sensor with a wireless one, which does not require changing the circuits of the technological installation. The temperature of the remote object is controlled using a thermistor based on the voltage incident on it using a sigma-delta analog-to-digital converter. The received digital code is transmitted over the radio channel to the receiving part of the device located near the technological installation. Further, using the emulation circuit on the connector of the technological installation, a resistance equiva-

lent to the resistance of the measuring thermistor is provided. To solve this problem, a digital potentiometer controlled by a microcontroller is used. The error of setting the equivalent resistance for the Pt-100 platinum sensor using the developed method does not exceed 1.3 % for the temperature range $-40...100$ °C.

Keywords: temperature control, platinum resistor, resistance emulation, digital potentiometer, wireless sensor

For citation: Method for Implementing a Wireless Resistive Temperature Control Sensor / A. A. Uhov, D. K. Kostrin, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, V. A. Simon // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 2. P. 47–53. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-47-53.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest

Введение. В ряде технологических установок для контроля температуры некоторых объектов или внутри определенного объема используются внешние резистивные датчики [1]–[5], подключаемые к разъемам на корпусе оборудования. Очевидный недостаток такого подключения – это ограничение расстояния между установкой и контролируемым объектом, обусловленное небольшой длиной штатного кабеля из-за возникающих в измерительной цепи помех (рис. 1, а).

Замена используемого оборудования на более современное, имеющее беспроводные внешние датчики температуры [6], [7], экономически не целесообразна. Технологические установки имеют достаточно высокую стоимость и не требуют замены в течение минимум 10–15 лет, вплоть до появления нового технологического поколения, обладающего заметно лучшими характеристиками.

В данной статье рассматривается способ расширения возможностей оборудования, не требующий изменения цепей технологической установки и даже вскрытия ее корпуса.

Техническая реализация беспроводного датчика температуры.

Для контроля температуры некоторого удаленного объекта можно использовать терморезистор, аналогичный штатному, и измерить его сопротивление, оценивая падающее на нем напряжение с применением сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя [8]–[10]. Полученный цифровой код с помощью микроконтроллера передается на радиочастотный приемопередатчик (трансивер), например работающий в частотном диапазоне 868 МГц [11]–[13], отличающемся большой дальностью передачи сигнала и разрешенным для открытого использования на территории Российской Федерации. Также возможно использование микроконтроллера со встроенным трансивером.

На приемной части устройства, расположенной вблизи от технологической установки, сигнал получается с помощью другого приемопередатчика и передается во второй микроконтроллер [14], [15]. Задача данного микроконтроллера состоит в том, чтобы с помощью схемы эмуляции обеспечить на разъеме технологической установ-

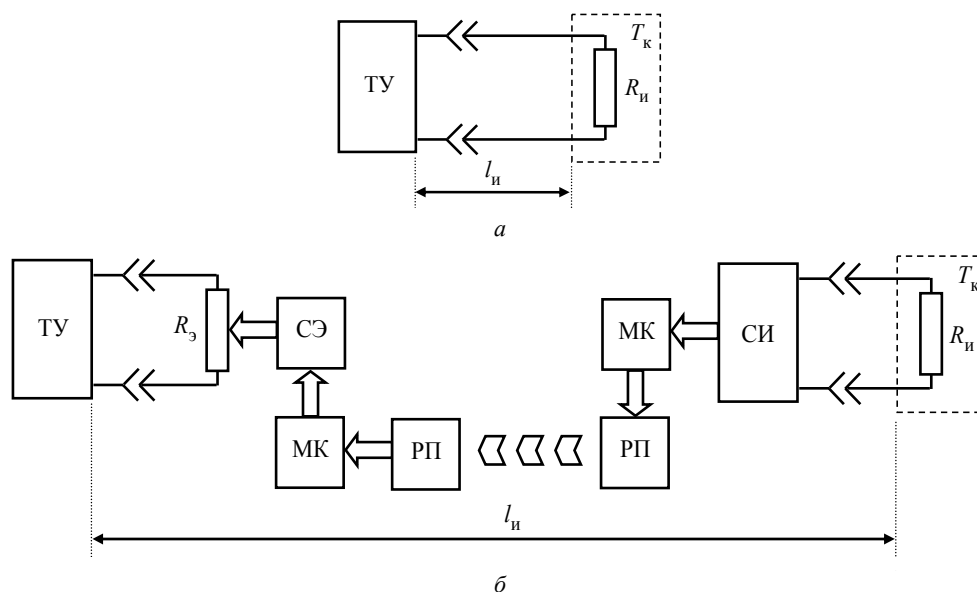


Рис. 1. Подключение проводного (а) и беспроводного (б) резистивного датчика температуры
Fig. 1. Connection of wired (a) and wireless (б) resistive temperature sensor

ки такое сопротивление, которое было бы эквивалентно сопротивлению измерительного терморезистора (рис. 1, б). На рис. 1 введены следующие обозначения: ТУ – технологическая установка; СИ – схема измерения; МК – микроконтроллер; РП – радиочастотный приемопередатчик; СЭ – схема эмуляции; $l_{и}$ – расстояние, на которое датчик может быть отнесен от корпуса установки; $T_{к}$ – контролируемая температура; $R_{и}$ – измерительный резистор; $R_{э}$ – эквивалентное сопротивление.

В качестве датчика температуры рассмотрим широко используемый и хорошо себя зарекомендовавший платиновый резистор типа Pt-100 [1], [16]. Для эмуляции сопротивления такого датчика может использоваться либо специализированное оборудование (например, прецизионный эмулятор термометров сопротивления с цифровым управлением 4530-Е производства фирмы «Burrster»), либо достаточно сложные электронные схемы [17], [18]. Более простым и недорогим решением данной задачи оказывается использование цифрового потенциометра [19], [20], управляемого с помощью микроконтроллера. Напрямую эмулировать такой датчик электронным потенциометром невозможно, так как его сопротивление обычно составляет единицы–десятки килоом, а номинальное сопротивление эмулируемого резистора – 100 Ом. Решением в данной ситуации служит подключение постоянного резистора параллельно выводам цифрового потенциометра, управляемого микроконтроллером (рис. 2). На рисунке введены следующие обозначения: ЦАП – цифроаналоговый преобразователь электронного потенциометра; R_1 – сопротивление скользящего контакта потенциометра; R_2 – сопротивление самого потенциометра; R_3 – постоянный резистор; $R_{э}$ – эквивалентное сопротивление; А, В – разъемы технологической установки.

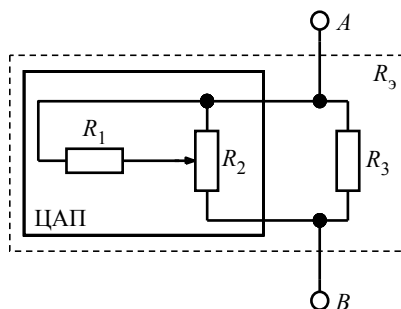


Рис. 2. Схема эмуляции сопротивления измерительного резистора
Fig. 2. Circuit of resistance emulation of the measuring resistor

Далее необходимо подать в электронный потенциометр определенный код от микроконтроллера для получения требуемого сопротивления с учетом того, что у электронного потенциометра есть средний вывод со своим сопротивлением (в отличие от обычного потенциометра) [19], [20]. Рассмотрим в качестве электронного потенциометра микросхему AD8400 производства фирмы «Analog Devices». Данная микросхема представляет собой восьмиразрядный дискретный переменный резистор с 256 позициями сопротивления. Номинальное сопротивление потенциометра может иметь значение 1, 10, 50 или 100 кОм. Для связи с микроконтроллером используется интерфейс SPI. Диапазон напряжений питания микросхемы 2.7...5 В. Изображение приемной части разработанного устройства, включающей в себя схему эмуляции и микроконтроллер со встроенным радиочастотным приемопередатчиком, приведено на рис. 3.

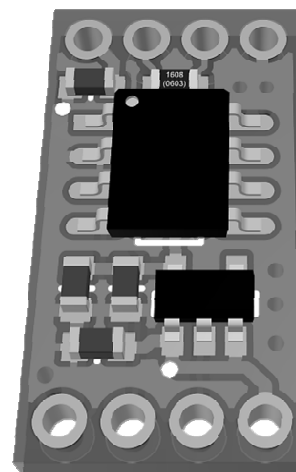


Рис. 3. Приемная часть разработанного устройства
Fig. 3. Receiving part of the developed device

Для используемой в данном случае микросхемы AD8400 с номинальным сопротивлением 1 кОм эквивалентное сопротивление, подключаемое к выводам технологической установки, может быть определено как

$$R_{э} = R_{AB} = \left[(nh + R_1)^{-1} + (R_3)^{-1} \right]^{-1},$$

где $n = 0...255$ – код, подаваемый на цифроаналоговый преобразователь электронного потенциометра; h – шаг преобразования цифроаналогового преобразователя; $R_1 = 53...100$ Ом – сопротивление скользящего контакта; $R_2 = 0.8...1.6$ кОм – сопротивление электронного потенциометра; $R_3 = 164$ Ом – выбранное сопротивление постоянного резистора.

Конкретное значение сопротивлений R_1 и R_2 лежит в указанных диапазонах и различается для различных образцов микросхем. Шаг преобразования цифроаналогового преобразователя $h = R_2/n$ и для двух крайних значений сопротивления равен 3.125 и 6.25 Ом. При минимальных значениях параметров R_1 и R_2 эквивалентное сопротивление принимает в зависимости от n значение от 40.06 до 137.47 Ом (кривая 1), при максимальных значениях параметров – от 62.12 до 149.52 Ом (кривая 2). На рис. 4 приведена область значений эквивалентного сопротивления, ограниченная упомянутыми выше кривыми.

Проверка работоспособности разработанной схемы и определение ее погрешности измерения. В табл. 1 приведены значения сопротивления платинового датчика температуры Pt-100 (R_{Pt-100}) в зависимости от температуры (t), наименьшее ($R_{э\ min}$) и наибольшее ($R_{э\ max}$) ближайшие значения эквивалентного сопротивления (кривые 1 и 2 на рис. 4), а также наибольшее значение ошибки выставления эквивалентного сопротивления (δ) по сравнению с реальным значением сопротивления датчика.

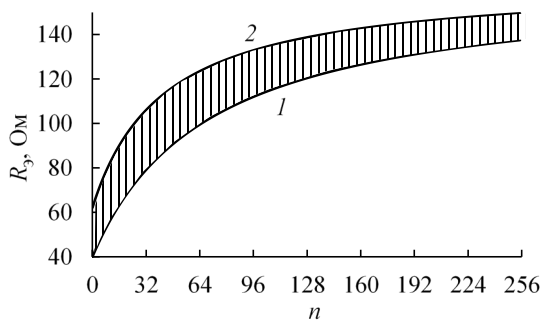


Рис. 4. Возможные значения эквивалентного сопротивления в зависимости от параметров используемого электронного потенциометра
Fig. 4. Possible values of equivalent resistance depending on the parameters of the used electronic potentiometer

Погрешность подбора эквивалентного сопротивления резистивного датчика температуры не превышает 1.3 % для диапазона температур –40...100 °С и 0.74 % для диапазона температур 0...100 °С. Аналогично может быть проведена эмуляция сопротивления других датчиков температуры, например NTC-термистора В3435, хотя и с намного большей погрешностью в случае широкого диапазона температур. В табл. 2 приведены данные о погрешности подбора эквивалентного сопротивления NTC-термистора В3435 с номинальным сопротивлением 10 кОм при использовании цифрового потенциометра AD8400 с номинальным сопротивлением 100 кОм.

Табл. 1. Ошибка подбора эквивалентного сопротивления резистивного датчика температуры
Tab. 1. Error in selecting the equivalent resistance of a resistive temperature sensor

$t, ^\circ\text{C}$	$R_{Pt-100}, \text{Ом}$	$R_{э\ min}, \text{Ом}$	$R_{э\ max}, \text{Ом}$	$\delta, \%$
100	138.50	137.47	138.42	0.74
95	136.60	136.54	136.46	0.10
90	134.70	134.67	134.57	0.09
85	132.80	132.75	132.64	0.12
80	130.89	130.83	130.70	0.14
75	128.98	128.93	128.80	0.14
70	127.07	126.97	126.98	0.08
65	125.16	125.13	124.96	0.16
60	123.24	123.10	123.11	0.11
55	121.32	121.27	121.07	0.21
50	119.40	119.28	119.29	0.10
45	117.47	117.34	117.35	0.11
40	115.54	115.50	115.23	0.27
35	113.61	113.50	113.51	0.09
30	111.67	111.66	111.03	0.57
25	109.73	109.68	109.69	0.05
20	107.79	107.54	107.56	0.23
15	105.85	105.63	105.24	0.57
10	103.90	103.58	103.59	0.31
5	101.95	101.83	101.85	0.12
0	100.00	99.98	100.00	0.02
-5	98.04	98.02	98.04	0.02
-10	96.09	95.93	95.95	0.17
-15	94.12	93.71	93.73	0.44
-20	92.16	91.94	91.36	0.87
-25	90.19	90.08	90.11	0.12
-30	88.22	88.13	87.48	0.84
-35	86.25	86.07	86.10	0.21
-40	84.27	83.89	83.17	1.30

Табл. 2. Ошибка подбора эквивалентного сопротивления NTC-термистора В3435
Tab. 2. Error in selecting the equivalent resistance of NTC thermistor В3435

$t, ^\circ\text{C}$	$\delta, \%$	$t, ^\circ\text{C}$	$\delta, \%$
105	10.44	30	0.51
100	21.09	25	1.50
95	11.57	20	0.62
90	10.52	15	0.90
85	14.73	10	0.74
80	2.64	5	1.01
75	11.34	0	0.51
70	4.91	-5	0.41
65	2.36	-10	0.35
60	3.07	-15	0.26
55	1.45	-20	0.02
50	2.60	-25	0.23
45	1.56	-30	0.10
40	1.72	-35	0.09
35	1.21	-40	0.07

Погрешность подбора эквивалентного сопротивления NTC-термистора В3435 не превышает 1.5 % для диапазона температур –40...35 °С, но достигает 21.09 % в расширенном температурном диапазоне –40...105 °С.

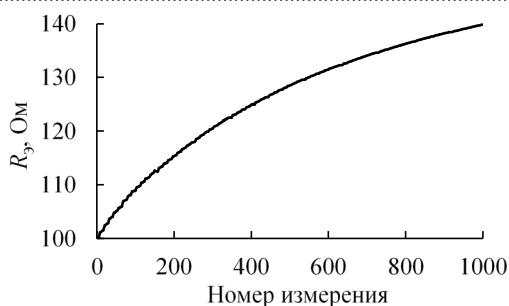


Рис. 5. Изменение значения эквивалентного сопротивления в ходе теста устройства
Fig. 5. Change of the equivalent resistance value during the device test

Работа предложенной схемы была проверена с применением высокоточного регистрирующего цифрового мультиметра Fluke 289. На рис. 5 приведен фрагмент результатов длительного теста устройства с измерением эмулируемого сопротивления платинового датчика температуры Pt-100 прецизионным прибором при плавном изменении кода, подаваемого на цифровой потенциометр.

Небольшие пульсации на приведенной характеристике связаны с отсутствием синхронизации процесса изменения кода, подаваемого микроконтроллером в электронный потенциометр, с процессом измерения эквивалентного сопротив-

ления с помощью цифрового регистрирующего мультиметра.

Необходимо отметить, что внешний сигнал возбуждения от технологической установки не должен быть больше напряжения питания схемы эмуляции. Также напряжение питания схемы должно быть гальванически развязано с питанием технологической установки.

Заключение. Рассмотренный метод замены проводного резистивного датчика температуры беспроводным позволяет при достаточно простой конструкции обеспечить расширение возможностей технологического оборудования. В электронных схемах могут быть использованы доступные и относительно недорогие компоненты. Применение рассмотренного способа получения эквивалентного сопротивления датчика обеспечивает допустимую в большинстве применений погрешность, не превышающую 1.3 % во всем рабочем диапазоне температур и менее 1 % в середине диапазона. Можно отметить, что в схеме эмуляции сопротивления может использоваться не только микросхема AD8400, но и другие цифровые потенциометры. При этом сама эмуляция может осуществляться для большой номенклатуры резистивных датчиков температуры.

Список литературы

1. Фрайден Дж. Современные датчики. М.: Технофера, 2005. 592 с.
2. Кострин Д. К., Лисенков А. А., Ухов А. А. Электронные средства контроля технологических процессов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.
3. Чистяков А. Резистивные датчики температуры. Принципы работы и характеристики // Компоненты и технологии. 2003. № 2. С. 24–26.
4. Родригез Д., Маккарти М., Ивашенко Е. Как выбрать и спроектировать оптимальную систему измерения температуры на основе резистивных термодатчиков // Компоненты и технологии. 2022. № 1. С. 18–26.
5. Журав А. Датчики температуры // Современная электроника. 2006. № 6. С. 22–24.
6. Мосин Е. И., Заев А. А. Автоматизированная система мониторинга микроклимата в центрах обработки данных на основе беспроводных технологий // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 8. С. 9–10.
7. Скогорев С. А., Каботько К. И., Колмаков В. О. Беспроводные датчики температур // Междунар. студенческий науч. вестн. 2022. № 6. С. 74. doi: 10.17513/msnv.21089.
8. Штрапенин Г. Сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи Texas Instruments // Компоненты и технологии. 2007. № 1. С. 104–108.
9. Боровикова Ю. А., Пискаев К. Ю. Построение распределенных информационно-измерительных систем на базе сигма-дельта АЦП // Современные информационные технологии. 2019. № 29. С. 71–74.
10. Брюханов Ю. А., Лукашевич Ю. А. Нелинейные искажения при сигма-дельта аналого-цифровом преобразовании сигналов // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62, № 3. С. 224–233. doi: 10.7868/S0033849417030044.
11. Аникин А. Радиомодули компании Telit для задач беспроводной телеметрии в частотном диапазоне 868 МГц // Беспроводные технологии. 2009. № 2. С. 27–31.
12. Аникин А. Обзор современных технологий беспроводной передачи данных в частотных диапазонах ISM (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi) и 434/868 МГц // Беспроводные технологии. 2011. № 4. С. 6–12.
13. Бородулин В. В. Быстродействующие радиointерфейсы для беспроводной передачи видеоданных // Вестн. Тихоокеанского гос. ун-та. 2008. № 4. С. 215–224.
14. Белов А. В. Конструирование устройств на микроконтроллерах. СПб.: Наука и техника, 2005. 256 с.
15. Компьютерные технологии в разработке электронных приборов и устройств / В. А. Герасимов, Д. К. Кострин, Л. М. Селиванов, А. А. Ухов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 164 с.
16. Кострин Д. К., Ухов А. А. Датчики в электронных устройствах. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 240 с.

17. Пат. на полезную модель 196707 (RU) / Е. Г. Зубов, Ш. М. Загидуллин, Г. А. Витютин. Имитатор сигналов тензорезистора. № 2019140907. Заявл. 11.12.2019; опубл. 12.03.2020; бюл. № 8.

18. Волочаев М. Н., Мизрах Е. А. Имитатор резистивного датчика температуры аккумуляторной ба-

тарей // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Т. 1, № 10. С. 170–171.

19. Ридико Л. Цифровые потенциометры // Компоненты и технологии. 2001. № 5. С. 50–55.

20. Пушкарев М. Цифровые потенциометры // Компоненты и технологии. 2006. № 5. С. 74–81.

Информация об авторах

Ухов Андрей Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: aahov@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3744-0777>

Кострин Дмитрий Константинович – д-р техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: dkkostrin@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

Герасимов Владимир Александрович – ассистент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vl.gerasimov@mail.ru

Селиванов Лев Михайлович – ассистент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: lmselivanov@gmail.com

Симон Всеволод Алексеевич – канд. техн. наук, ассистент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vsev.simon@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-3958-6339>

References

1. Frajden Dzh. Sovremennye datchiki. M.: Tehnosfera, 2005. 592 s. (In Russ.).

2. Kostrin D. K., Lisenkov A. A., Uhov A. A. Jelektronnye sredstva kontrolja tehnologicheskikh processov. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2016. 228 s. (In Russ.).

3. Chistjakov A. Rezistivnye datchiki temperatury. Principy raboty i harakteristiki // Komponenty i tehnologii. 2003. № 2. S. 24–26. (In Russ.).

4. Rodrigez D., Makkarti M., Ivashenko E. Kak vybrat' i sproektirovat' optimal'nuju sistemu izmerenija temperatury na osnove rezistivnyh termodatchikov // Komponenty i tehnologii. 2022. № 1. S. 18–26. (In Russ.).

5. Zhurav A. Datchiki temperatury // Sovremennaja jelektronika. 2006. № 6. S. 22–24. (In Russ.).

6. Mosin E. I., Zaev A. A. Avtomatizirovannaja sistema monitoringa mikroklimata v centrakh obrabotki dannyh na osnove besprovodnyh tehnologij // Promyshlennye ASU i kontroliery. 2011. № 8. S. 9–10. (In Russ.).

7. Skogorev S. A., Kabot'ko K. I., Kolmakov V. O. Besprovodnye datchiki temperatur // Mezhdunar. studenteskij nauch. vestn. 2022. № 6. S. 74. doi: 10.17513/msnv.21089. (In Russ.).

8. Shtrapein G. Sigmadel'ta analogocifrovye preobrazovateli Texas Instruments // Komponenty i tehnologii. 2007. № 1. S. 104–108. (In Russ.).

9. Borovikova Ju. A., Piskaev K. Ju. Postroenie raspredelennyh informacionno-izmeritel'nyh sistem na baze sigmadel'ta ACP // Sovremennye informacionnye tehnologii. 2019. № 29. S. 71–74. (In Russ.).

10. Brjuhanov Ju. A., Lukashevich Ju. A. Nelinejnye iskazhenija pri sigma-del'ta analogocifrovom preobrazovanii signalov // Radiotekhnika i jelektronika. 2017. T. 62, № 3. S. 224–233. doi: 10.7868/S0033849417030044. (In Russ.).

11. Anikin A. Radiomoduli kompanii Telit dlja zadach besprovodnoj telemeknii v chastotnom diapazone 868 MGc // Besprovodnye tehnologii. 2009. № 2. S. 27–31. (In Russ.).

12. Anikin A. Obzor sovremennyh tehnologij besprovodnoj peredachi dannyh v chastotnyh diapa-zonah ISM (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi) i 434/868 MGc // Besprovodnye tehnologii. 2011. № 4. S. 6–12. (In Russ.).

13. Borodulin V. V. Bystrodejstvujushhie radio-interfejsy dlja besprovodnoj peredachi videodannyh // Vestn. Tihookeanskogo gos. un-ta. 2008. № 4. S. 215–224. (In Russ.).

14. Belov A. V. Konstruirovanie ustrojstv na mikro-kontrollerah. SPb.: Nauka i tehnika, 2005. 256 s. (In Russ.).

15. Komp'juternye tehnologii v razrabotke jelektronnyh priborov i ustrojstv / V. A. Gerasi-mov, D. K. Kostrin,

L. M. Selivanov, A. A. Uhov. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LjeTI», 2015. 164 s. (In Russ.).

16. Kostrin D. K., Uhov A. A. Datchiki v jelektronnyh ustrojstvah. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LjeTI», 2013. 240 s. (In Russ.).

17. Pat. na poleznuju model' 196707 (RU) / E. G. Zubov, Sh. M. Zagidullin, G. A. Vitjutin. Imitator signalov tenzorezistora № 2019140907. Zajavl. 11.12.2019; opubl. 12.03.2020; bjul. № 8. (In Russ.).

18. Volochaev M. N., Mizrah E. A. Imitator rezistivnogo datchika temperatury akkumuljatornoj batarei // Aktual'nye problemy aviacii i kosmonav-tiki. 2014. T. 1, № 10. S. 170–171. (In Russ.).

19. Ridiko L. Cifrovyje potenciometry // Komponenty i tehnologii. 2001. № 5. S. 50–55.

20. Pushkarev M. Cifrovyje potenciometry // Komponenty i tehnologii. 2006. № 5. S. 74–81. (In Russ.).

Information about the authors

Andrey A. Uhov – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint-Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: aauhov@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3744-0777>

Dmitry K. Kostrin – Dr Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint-Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: dkkostrin@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

Vladimir A. Gerasimov – Assistant of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint-Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vl.gerasimov@mail.ru

Lev M. Selivanov – Assistant of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint-Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: lmselivanov@gmail.com

Vsevolod A. Simon – Cand. Sci. (Eng.), Assistant of the Department Of electronic Instruments and of Saint-Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vsev.simon@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-3958-6339>

Статья поступила в редакцию 06.07.2023; принята к публикации после рецензирования 11.11.2023; опубликована онлайн 26.02.2024.

Submitted 06.07.2023; accepted 11.11.2023; published online 26.02.2024.