

Повышение точности измерения температуры: метод двухпроводного подключения термометра сопротивления

Олег Григорьевич Бондарь¹✉, Екатерина Олеговна Брежнева², Андрей Игоревич Калмыков³

^{1, 2, 3} Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

¹b.og@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-1876-4626>

²bregnevaeo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0039-3425>

³q56fyjim@mail.ru

Аннотация. Изучена актуальная проблема повышения точности измерения температуры термометрами сопротивления. Рассмотрены существующие методы уменьшения погрешностей указанных измерений. Исследован метод повышения точности измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления. Дополнительная погрешность температурных измерений обусловлена сопротивлением линии, соединяющей измерительную схему с термометром сопротивления. Уменьшение дополнительной погрешности при двухпроводном подключении достигнуто шунтированием термометра сопротивления конденсатором и импульсным питанием измерительной цепи. Погрешность измерений температур исследованным методом сравнима с погрешностью измерений с использованием трёх- и четырёхпроводного подключений. Эффективность метода подтверждена результатами экспериментальных исследований на специально созданном стенде с авторским программным обеспечением. Метод можно применить в любых системах контроля температуры производственного назначения.

Ключевые слова: термометрия, термометр сопротивления, сопротивление проводников, двухпроводная линия, измерительная цепь

Для цитирования: Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Калмыков А. И. Повышение точности измерения температуры: метод двухпроводного подключения термометра сопротивления // Измерительная техника. 2022. № 3. С. 53–58. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-3-53-58>

Increasing temperature measurement accuracy: method of two-wire connection of a resistance thermometer

Oleg G. Bondar¹✉, Ekaterina O. Brezhneva², Andrey I. Kalmykov³

^{1, 2, 3} Southwest State University, Kursk, Russia

¹b.og@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-1876-4626>

²bregnevaeo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0039-3425>

³q56fyjim@mail.ru

Abstract. The actual problem of increasing the accuracy of temperature measurement by resistance thermometers has been studied. Existing methods for reducing the errors of these measurements are considered. A method for increasing the accuracy of temperature measurement with a two-wire connection of a resistance thermometer has been studied. An additional error in temperature measurements is due to the resistance of the line connecting the measuring circuit with the resistance thermometer. Reducing the additional error in a two-wire connection is achieved by shunting the resistance thermometer with a capacitor and pulsed power supply to the measuring circuit. The temperature measurement error by the investigated method is comparable to the measurement error using three- and four-wire connections. The effectiveness of the method is confirmed by the results of experimental studies on a specially designed stand with author's software. The method can be applied in any industrial temperature control systems.

Keywords: thermometry, resistance thermometer, conductor resistance, two-wire line, measuring circuit

Введение. Методы и средства термометрии широко применяются в большинстве распределённых систем автоматизированного управления технологическими процессами, контроля параметров воздушной среды и сбора данных [1–3]. В качестве чувствительных элементов таких систем используются термометры сопротивления (ТС). Повышение точности

измерения температуры является актуальной научно-технической задачей и включает оптимизацию характеристик первичных преобразователей температуры (поиск новых материалов и конструктивных решений), разработку новых и совершенствование существующих измерительных схем и методов измерения температуры [4–8].

Для измерения сопротивления ТС применяется делитель напряжения опорного источника питания, образованный опорным резистором и ТС. Температура определяется по известной зависимости сопротивления от температуры [9] в результате предварительного определения сопротивления термометра через падение напряжения на нём и на сопротивлении опорного резистора. Также сопротивление ТС получают по измеренному падению напряжения и протекающему через ТС току генератора стабильного тока. В этом случае падение напряжения на ТС пропорционально его сопротивлению.

Соединение ТС, расположенных на объектах контроля, с измерительным устройством или системой сбора данных осуществляется проводниками значительной длины. Сопротивление проводников вносит погрешность в результаты измерений сопротивления ТС, а следовательно, и температуры.

В [10] предложен метод повышения точности измерений температуры при двухпроводном подключении ТС. Теоретически метод позволяет получить погрешность измерения температуры, сопоставимую с погрешностью измерений при трёх- и четырёхпроводном подключении.

Цель работы – исследовать метод повышения точности измерений температуры при двухпроводном подключении ТС.

Методы измерения температуры при трёх- и четырёхпроводных подключениях ТС. Использование трёх- и четырёхпроводных подключений ТС позволяет уменьшить или исключить влияние сопротивления проводников на результат измерения [9]. Недостатки подобного применения: сложные измерительные схемы; увеличенное сечение проводников, так как сопротивление кабелей должно быть на два-три порядка меньше сопротивления ТС; высокая стоимость трёх- и четырёхпроводных кабелей, что существенно удорожает подключение ТС.

Для ослабления влияния на точность измерения температуры разогрева протекающим током ТС работают при малых значениях токов, что уменьшает падение напряжения на них и увеличивает влияние шумов, помех и погрешностей электронных

узлов на результат измерения. Это приводит к дальнейшему усложнению измерительных цепей, а также к применению фильтрации, влекущей за собой снижение быстродействия. Усложнение измерительных цепей также снижает их надёжность. Перечисленные недостатки обостряются в многоточечных сканирующих системах измерения температуры.

В [11] представлен метод, позволяющий увеличить падение напряжения на ТС. Для этого ток питания ТС автоматически изменяется с целью получения максимального уровня сигнала при допустимой мощности рассеивания. Устройство измерения температуры содержит блок стабильных источников тока, в котором каждый источник тока настроен на генерацию заданного фиксированного тока опроса для конкретного диапазона значений сопротивлений термопреобразователя. Вычислительный блок осуществляет компенсацию аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности.

Недостаток данного метода – мощность сигнала, получаемого с ТС, увеличивается незначительно по сравнению с методом питания цепи ТС постоянным током, а сложность устройства резко возрастает, что снижает его надёжность.

В [12] описан метод существенного повышения уровня сигнала при упрощении устройства и, следовательно, уменьшения погрешности. Измерительная цепь устройства содержит эталонный резистор и последовательно включённый ТС. Ток опроса измерительной цепи формируется в виде прямоугольного импульса со скважностью, при которой средний ток через термопреобразователь не превышает допустимого значения. В контроллере рассчитывается значение сопротивления ТС, а затем температура среды по падению напряжения на ТС и эталонном резисторе. Для этого измеряемые напряжения предварительно преобразуются в цифровой код аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

Недостаток указанного метода измерения температуры – возрастание погрешности измерения за счёт сопротивления проводников линии, с помощью которой подключается ТС.

Таким образом, для снижения требований к чувствительности измерительных схем, термоэлектродвижущей силе, температурным дрейфам напряжения в измерительных цепях и шумам целесообразен переход к импульсному режиму возбуждения датчика температуры. Подобный подход обеспечивает трёхкратное увеличение полезного сигнала при измерении сопротивления чувствительных элементов термокаталитических газочувствительных датчиков [13].

Метод повышения точности измерения температуры при двухпроводном подключении ТС. Исследуемый в настоящей статье метод измерения температуры описан в [10]. Последовательное соединение, образованное сопротивлением проводов двухпроводной линии и ТС, питается прямоугольными импульсами известного тока со скважностью, при которой средний ток через ТС не превышает допустимого значения. ТС шунтируется конденсатором непосредственно на его присоединительных контактах. Измерение значений падения напряжения на последовательном соединении, по которым вычисляется сопротивление ТС, осуществляется в моменты времени t_1 , t_2 переходного процесса, а по сопротивлению определяется температура.

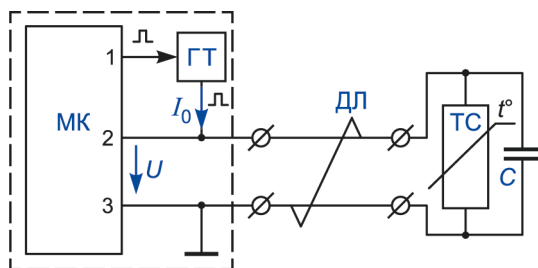


Рис. 1. Структурная схема устройства, реализующего исследуемый метод измерения температуры:

МК – микроконтроллер со встроенным АЦП, ГТ – генератор тока, управляемый микроконтроллером, ДЛ – двухпроводная линия, ТС – термометр сопротивления, С – конденсатор

Fig. 1. Block diagram of a device implementing a temperature measurement method:

МК – microcontroller with integrated ADC, CG – current generator controlled by microcontroller, TWL – two-wire line, RT – resistance thermometer, C – capacitor

Структурная схема устройства, реализующего исследуемый метод измерения температуры, представлена на рис. 1. Управляющий вывод 1 микроконтроллера МК подключается к управляющему входу генератора тока ГТ. С выхода генератора тока импульс тока поступает на вход двухпроводной линии ДЛ, к концу которой присоединяется ТС, шунтированный конденсатором С. Вход двухпроводной линии соединяется со входами 2, 3 встроенного АЦП микроконтроллера.

С вывода микроконтроллера на вход генератора тока поступает прямоугольный импульс заданной длительности, при этом генератор тока формирует импульс тока той же длительности. Импульс I_0 генератора тока ГТ приводит к падению напряжения U на последовательном соединении двухпроводной линии ДЛ и ТС, шунтированном конденсатором С (рис. 2).

Напряжение U на входах 2, 3 АЦП преобразуется в цифровые коды в моменты времени t_1, t_2 , отсчитываемые от момента окончания импульса тока. По значениям напряжения, измеряемым в моменты времени t_1, t_2 , вычисляется падение напряжения на сопротивлении ТС в момент окончания переходного процесса заряда конденсатора. По вычисленному падению напряжения и известному току генератора определяется сопротивление ТС, а по его градуировочной характеристике – измеряемая температура.

Падение напряжения на последовательном соединении двухпроводной линии и ТС (на зажимах двухпроводной линии на входе измерительного устройства) во время действия импульса тока I_0 определяется по выражению

$$U = U_n + U_{TC}(1 - e^{-t/\tau}),$$

где U_n – падение напряжения на сопротивлении проводников двухпроводной линии от протекающего тока; U_{TC} – падение напряжения на ТС в конце переходного процесса заряда конденсатора, шунтирующего ТС; τ – постоянная времени цепи.

В конце заряда конденсатора (установившийся режим) падение напряжение на зажимах двухпроводной линии достигнет максимального значения:

$$U_{\max} = U_n + U_{TC}.$$

Измеренное при постоянном токе падение напряжение на зажимах двухпроводной линии отличается от падения напряжения на ТС на значение падения напряжения на сопротивлении проводников двухпроводной линии. Скачки напряжения U на временной диаграмме (см. рис. 2) связаны с изменением падения напряжения на сопротивлении проводников двухпроводной линии при включении и выключении генератора тока. Плавное экспоненциальное изменение падения напряжения во время действия импульса тока и по его окончании соответствует заряду и разряду шунтирующего конденсатора С. При этом конденсатор заряжается до напряжения, равного U_{TC} , а по окончании импульса тока разряжается до нуля. Определить напряжение U_{TC} можно по результатам измерений напряжений в двух точках переходного процесса разряда конденсатора.

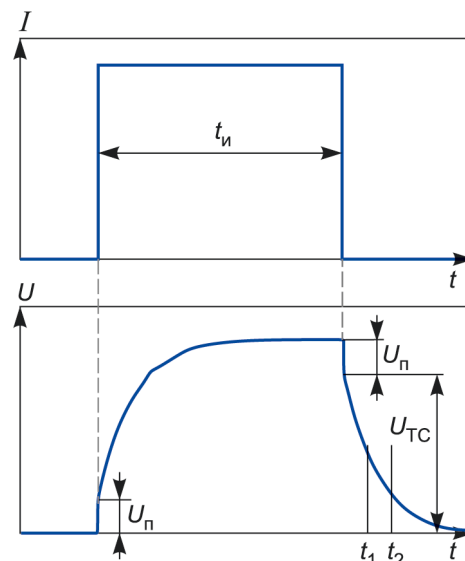


Рис. 2. Временные диаграммы импульсов тока и напряжения на последовательном соединении двухпроводной линии и ТС

Fig. 2. Time diagram of the current and voltage pulse at the serial connection of a two-wire line and a resistance thermometer

Напряжение на последовательном соединении двухпроводной линии и ТС в моменты времени t_1, t_2 после завершения действия импульса составит

$$U_1 = U_{TC} e^{-t_1/\tau}, \quad (1)$$

$$U_2 = U_{TC} e^{-t_2/\tau}. \quad (2)$$

Разделив (1) на (2), получим

$$U_1/U_2 = e^{(t_2-t_1)/\tau}. \quad (3)$$

Из (3) определим постоянную времени (поскольку при изменении температуры изменяется сопротивление ТС, то постоянная времени различна при различных температурах):

$$\tau = (t_2 - t_1) / \ln(U_1/U_2).$$

Подставив выражение постоянной времени в (1), найдём из него напряжение на ТС

$$U_{TC} = U_1 (U_1/U_2)^{t_1/(t_2-t_1)}.$$

При $t_2 = 2t_1$

$$U_{TC} = U_1^2 / U_2.$$

Разделив полученное напряжение на значение известного тока, определим сопротивление ТС, а по его градуировочной таблице – температуру.

Напряжение необходимо измерять через интервал времени t_1 после фронта или спада импульса тока. Указанный интервал времени необходим для завершения колебательных процессов, возникающих на входе двухпроводной линии при

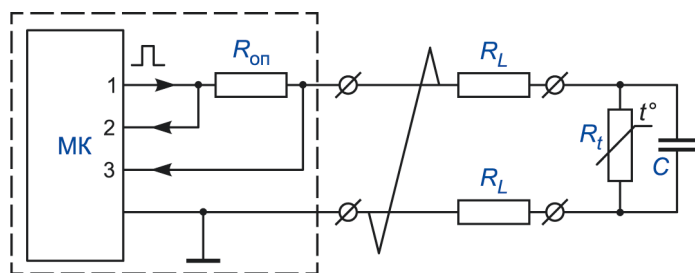


Рис. 3. Схема исследовательского стенда:

C – шунтирующий конденсатор, $МК$ – микроконтроллер, 1 – цифровой двунаправленный вывод возбуждения измерительной цепи, 2, 3 – входы АЦП для измерения напряжения на входе соответственно измерительной цепи и двухпроводной линии

Fig. 3. The scheme of the research stand:

C – a shunt capacitor, MC – a microcontroller, 1 – a digital bidirectional excitation output of the measuring circuit, 2, 3 – an ADC input for measuring voltage at the input of the measuring circuit and a two-wire line respectively

скачкообразном изменении тока. Для снижения динамической составляющей погрешности постоянная времени $\tau = R_{TC}C$ (где R_{TC} – сопротивление ТС и ёмкость шунтирующего конденсатора) должна составлять от 1/8 до 1/11 длительности импульса тока, питающего ТС. Это гарантирует, что относительное отклонение напряжения на ТС в конце импульса тока от установившегося значения, составит 0,0017–0,035 %.

Результаты апробации метода повышения точности измерения температуры при двухпроводном подключении ТС.

Апробацию метода проводили на разработанном авторами настоящей статьи исследовательском стенде на кафедре космического приборостроения и систем связи Юго-Западного государственного университета. На рис. 3 представлена структурная схема исследовательского стенда. Стенд содержал следующие элементы: $МК$ – микроконтроллер ATmega 8535 (Microchip Technology, USA) со встроенным АЦП; опорный резистор 1 кОм с допуском 0,05 %; конденсатор К52-1 (Электонд, Россия) 6,8 мкФ (± 10 %, 50 В) с эквивалентным последовательным сопротивлением $ESR = 1,8$ Ом. Вместо ТС использовали резистор 963 Ом. Соединительные линии имитировали двумя резисторами по 120 Ом.

Для упрощения стенда вместо управляемого источника тока использовали опорный резистор $R_{оп}$, подключённый к выводу микроконтроллера, на котором формировался импульс напряжения. При завершении импульса напряжения опорный резистор отключали от микроконтроллера перепрограммированием порта (вывод 1) из режима вывода в режим ввода. Выходной ток отключённого таким образом источника определялся лишь током утечки цифрового входа микроконтроллера, максимальное значение которого не превышало для высокого уровня 8 мкА, а для низкого 8 нА. Ток, протекавший в измерительной цепи в конце переходного процесса заряда конденсатора, вычисляли через измеренное падение напряжения на опорном резисторе. Напряжения на конденсаторе в моменты времени t_1 , t_2 описывались выражениями (1), (2).

Результаты измерения сопротивления на стенде

N	R , Ом	N	R , Ом	N	R , Ом
1	0,962	11	0,963	21	0,961
2	0,960	12	0,962	22	0,959
3	0,962	13	0,961	23	0,959
4	0,962	14	0,962	24	0,961
5	0,963	15	0,959	25	0,960
6	0,961	16	0,960	26	0,960
7	0,962	17	0,961	27	0,960
8	0,961	18	0,960	28	0,959
9	0,963	19	0,961	29	0,959
10	0,961	20	0,962	30	0,959

Результаты измерений, полученные на стенде с помощью программного обеспечения, разработанного авторами настоящей статьи, представлены в таблице, где N – номер измерения. Среднее квадратическое отклонение (СКО), определённое относительно среднего значения измеряемого сопротивления, составляло 0,0013 Ом, среднее значение сопротивления резистора $R_{cp} = 0,9608$ Ом.

Ниже представлен алгоритм функционирования устройства измерения температуры с компенсацией сопротивления двухпроводной линии.

1. В исходном состоянии на выводе 1 устанавливается низкий уровень.

2. С вывода 1 подаётся импульс питания измерительной цепи с длительностью достаточной для заряда конденсатора и гарантирующей отсутствие разогрева ТС в цикле измерения.

3. В конце импульса питания измерительной цепи измеряется напряжение $U_{вх2}$ возбуждения измерительной цепи (на входе 2) и напряжение $U_{вх3}$ на соединительной линии (на входе 3). Вычисляется напряжение $U_{оп}$ на опорном резисторе: $U_{оп} = U_{вх2} - U_{вх3}$.

4. Вывод 1 переводится в высокоимпедансное состояние. При этом опорный резистор отключается от источника напряжения питания измерительной цепи.

5. Задаётся интервал t_1 , достаточный для завершения колебательного переходного процесса при разрыве измерительной цепи (его длительность существенно меньше времени разряда конденсатора, шунтирующего ТС). В экспериментальной установке этот интервал формируется временем холостого измерения напряжения АЦП на входе соединительной линии $t_1 = t_{и}$ (где $t_{и}$ – длительность импульса), т. е. результат измерения игнорируется.

6. Запускается измерение напряжения на соединительной линии. Измеренное напряжение U_1 равно напряжению на конденсаторе, разряжающемся на ТС в момент времени t_1 .

7. Запускается измерение напряжения на соединительной линии. Измеренное напряжение U_2 равно напряжению на конденсаторе в момент времени t_2 (удвоенное время измерения АЦП). Напряжение на ТС передаётся на вход соединительной линии практически без потерь, так как входное

сопротивление АЦП в экспериментальной установке превышает 100 МОм.

8. Рассчитывается напряжение на ТС: $U_{TC} = U_1^2 / U_2$.

9. Рассчитывается сопротивление ТС. Так как в конце переходного процесса заряда конденсатора через опорный резистор и ТС протекает одинаковый ток, то отношение падений напряжений на опорном резисторе и ТС пропорционально отношению сопротивлений: $R_{TC} = R_{оп} U_{TC} / U_{оп}$.

На рис. 4, 5 представлены временные диаграммы сигналов измерительной схемы, иллюстрирующие поведение напряжения на выходе источника импульсного напряжения (кривые 1 на рис. 4, 5), и на входных зажимах двухпроводной линии (кривые 2 на рис. 4, 5). На рис. 5 увеличено временное разрешение, что позволило наблюдать скачки напряжения при разрыве цепи питания ТС. Напряжение в начале экспоненциального процесса разряда конденсатора представляло собой напряжение на ТС, которое определялось через значения напряжения, измеренные в двух точках переходного процесса.

Обсуждение результатов. Согласно таблице среднее значение измеренных сопротивлений резистора $R_{ср}$ составило 960,8 Ом при относительном отклонении от действительного значения менее 0,3 %. Суммарное сопротивление проводников линии в эксперименте выбрано заведомо завышенным (240 Ом), чтобы продемонстрировать эффективность метода. Во время эксперимента измерительное устройство не калибровало. Занижение результатов измерения сопротивления по сравнению с действительным значением объясняли последовательным сопротивлением конденсатора ($ESR = 1,8$ Ом). Заметная вариация результатов измерения относительно среднего значения связана с повышенным шумом источника питания (порт USB компьютера) и отсутствием гальванической развязки.

Исследуемый метод нечувствителен к точности установки напряжения питания измерительной цепи (требуется лишь стабильность напряжения во время измерения), поскольку в конечное выражение для расчёта сопротивления ТС входит отношение напряжений. Это позволяет обеспечить высокую точность измерений за счёт применения только одного прецизионного резистора.

Для медных ТС конденсатор может монтироваться непосредственно у контактов ТС, так как в настоящее время существуют герметичные 230-градусные оксидмарганцевые танталовые конденсаторы. Однако в любом случае, в том числе и при использовании платиновых термометров, конденсатор может быть вынесен из зоны высокой температуры с помощью кабеля длиной 1–2 м, что практически не скажется на точности измерений. При этом можно использовать распространённые танталовые конденсаторы с максимальной рабочей температурой 125 °С.

Снижение стоимости аппаратуры определяется прежде всего снижением стоимости измерительной схемы. Цифровые измерительные преобразователи, рассчитанные на трёх- и четырёхпроводные схемы подключения в настоящее время реализуются на основе сигма-дельта АЦП, операционных усилителей с напряжением смещения менее 20 мкВ, источниках

опорного напряжения и микроконтроллерах. При поддержке нескольких каналов измерения добавляется коммутатор. Микроконтроллер выполняет функции управления измерениями, коррекции результатов измерений, вычисления температуры по результатам измерения, индикации, поддержки внешнего интерфейса. Приведённое решение базируется на микроконтроллере со встроенным АЦП и требует дополнительно конденсатора и одного прецизионного резистора. Учитывая, что стоимость перечисленных интегральных схем, необходимых при трёх- и четырёхпроводном подключении превышает стоимость микроконтроллера, можно прогнозировать снижение стоимости не менее чем на 30 % (остаются общие для измерительных преобразователей расходы на источник питания, корпус, органы управления и индикации). Дополнительно снижается стоимость кабельной продукции на 20–30 % по сравнению с трёхпроводным вариантом подключения и на 60–80 % – с четырёхпроводным. Более того, для двухпроводного подключения можно использовать кабели с меньшим сечением проводов, поскольку показана эффективность подавления влияния сопротивления кабеля. В эксперименте сопротивление каждого проводника равнялось 120 Ом, что в 8 раз превышает типичное

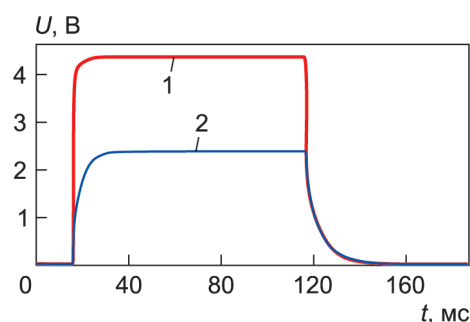


Рис. 4. Диаграмма сигналов измерительной схемы: напряжение на выходе 1 микроконтроллера (1); напряжение на входе двухпроводной линии (2)

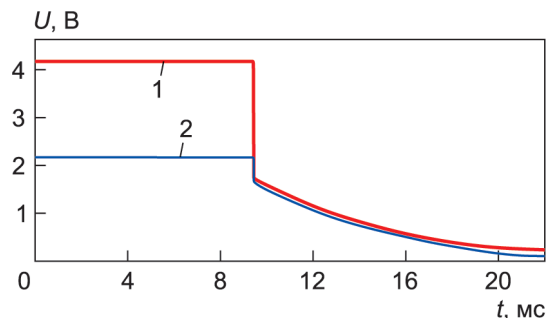


Рис. 5. Диаграмма сигналов измерительной схемы с увеличенным временным разрешением: напряжение на выходе 1 микроконтроллера (1); напряжение на входе двухпроводной линии (2)

Fig. 5. Signal diagram of the measuring circuit with increased time resolution: voltage at the output of 1 microcontroller (1); voltage at the input of a two-wire line (2)

ограничение для сопротивления каждого из проводников при трёхпроводном подключении ТС.

Заключение. Исследованный метод повышает точность измерения температуры при двухпроводном подключении ТС, ослабляя влияние сопротивления проводников на результат измерения. При этом высокий уровень сигнала в измерительной схеме снижает влияние шумов и помех на точность измерения, что позволяет упростить измерительную схему. Отношение сигнал/помеха пропорционально отношению амплитуды импульсов питающего ТС тока к среднему значению, т. е. скважности импульсов тока. В целом исследование показало, что двухпроводное подключение ТС повышает надёжность результатов измерений и снижает стоимость измерительной схемы.

Список источников

1. Чивель Ю. А., Затягин Д. А., Смулов И. Ю. Система мониторинга процесса селективного лазерного спекания // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 4. С. 70–73.
2. Федоров А. В., Тагиев Ш. К. Метод регулирования теплового режима при барботаже концентрированного раствора растительного масла // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2005. Т. 48. № 12. С. 50–54.
3. Коба Д. А., Любушкина Н. Н., Гудим А. С., Биткина А. А. Регистратор условий хранения и транспортировки специализированных грузов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 7. С. 668–674.
4. Каспаров К. Н., Белозеров А. В. Измерение температуры быстропротекающих процессов // Измерительная техника. 2002. № 12. С. 34–38.
5. Куликов В. А., Муравьев В. В., Никитин К. А., Брагин Г. В. Измерение температуры рельсов бесстыкового пути // Измерительная техника. 2017. № 5. С. 53–55.
6. 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>
7. Су Цзюнь, Кочан О. В., Йоцов В. С. Методы снижения влияния приобретенной термоэлектрической неоднородности термопар на погрешность измерения температуры // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 52–55.
8. Волков Б. И., Новицкий Д. М. Анализ погрешностей измерения температуры, обусловленных неточностью модели измерительно-вычислительного преобразователя // Измерительная техника. 2004. № 3. С. 24–27.
9. Андруевич А., Губа А. Термометры сопротивления: от теории к практике // Компоненты и технологии. 2011. № 7. С. 61–66.
10. Пат. № 2752132 РФ / О. Г. Бондарь, Е. О. Брежнева, Е. С. Двойных // Изобретения. Полезные модели. 2021. № 21.
11. Пат. № 1394062 РФ / В. Е. Безвенюк, Г. Е. Богославский, Ю. В. Голубев, В. С. Зеленецкий, А. В. Синельников // Изобретения. Полезные модели. 1988. № 17.
12. Пат. № 2534633 РФ / А. Ф. Буслаев // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 34.
13. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Поздняков В. В. Методы и алгоритмы управления термодаталитическим датчиком водородом // Измерительная техника. 2018. № 5. С. 69–72. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-5-69-72>

References

1. Andrianov D. E., Ereemeev S. V., Kovalev Yu. A., Titov D. V., *Journal of Instrument Engineering*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 21–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-1-21-31>
2. Fedorov A. V., Regulation method of thermal mode at bubbling of vegetable oil concentrated solution, *Journal of Instrument Engineering*, 2005, vol. 48, no. 12, pp. 50–54. (In Russ.)
3. Kiba D. A., Lyubushkina N. N., Gudim A. S., Bitkina A. A., *Journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 62, no. 7, pp. 668–674. (In Russ.) <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-7-668-674>
4. Kasparov K. N., Belozеров A. V., *Measurement Techniques*, 2002, vol. 45, pp. 1256–1263. <https://doi.org/10.1023/A:1022985107345>
5. Kulikov V. A., Murav'ev V. V., Nikitin K. A., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 487–490. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1222-3>
6. Filatov A. V., Serdyukov K. A., Novikova A. A., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 63, no. 7, pp. 567–572. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01824-x>
7. Jun Su, Kochan O. V., Jotsov V. S., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 3, pp. 327–331. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0709-z>
8. Volkov B. I., Novitskii D. M., *Measurement Techniques*, 2004, vol. 47, no. 3, pp. 247–253. <https://doi.org/10.1023/B:METE.0000029867.47692.86>
9. Andrusevich A., Guba A., *Termometry soprotivleniya: ot teorii k praktike, Komponenty i tekhnologii*, 2011, no. 7, pp. 61–66. (In Russ.)
10. Bondar O. G., Brezhneva E. O., Dvoynikh E. S., RF Patent no. 2752132, *Byull. Izobret.*, no. 21 (2021).
11. Bezvenyuk V. E., Bogoslavskii G. E., Golubev Y. V., Zelenetskii V. S., Sinel'nikov A. V., RF Patent no. 1394062, *Byull. Izobret.*, no. 17 (1988).
12. Buslaev A. F., RF Patent no. 2534633, *Byull. Izobret.*, no. 34 (2014).
13. Bondar' O. G., Brezhneva E. O., Pozdnyakov V. V., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 5, pp. 514–519. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1460-z>

Статья поступила в редакцию 06.12.2021; одобрена после рецензирования 13.01.2022; принята к публикации 18.01.2022.
The article was submitted 06.12.2021; approved after reviewing 13.01.2022; accepted for publication 18.01.2022.