CC BY 4.0

Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87

Исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления

О.Г. Бондарь ¹ 🖂, Е.О. Брежнева ¹, К.А. Ботиков ¹

¹ Юго-Западный государственный университет

ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

🖂 e-mail: b.og@mail.ru

Резюме

Цель работы: исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления (TC) с использованием его математической модели. Провести апробацию модели и исследования, позволяющие оценить потенциальные возможности метода обработки измерительной информации, в основу которого положено определение сопротивления TC по результатам интегрирования переходного процесса в измерительной схеме после отключения её источника питания, определить параметры измерительной цепи и алгоритма, положенных в основу метода. Для заданного диапазона измеряемых температур определить вид и параметры модели адаптивного алгоритма измерения.

Методы: методы математического моделирования, численные методы. При разработке математической модели метода использовалась теория электрических цепей, в частности, анализ переходных процессов. При анализе предложенных решений учитывалось воздействие электромагнитных помех и эффектов квантования, а эффективность оценивалась по относительной погрешности (δ) измерения сопротивления TC и сравнению с аналогами. Моделирование осуществлялось в среде МАТLAB.

Результаты. Разработана математическая модель интегрирующего метода измерения температуры с помощью TC, осуществлен выбор оптимальной величины шунтирующей емкости для диапазона измеряемых температур 0 ... 660 оС, обеспечивающий в пределах диапазона расчётную величину среднеквадратичной погрешности (СКО) 0.02% -0.04%, определена оптимальная величина первого интервала интегрирования (4 мс). Показано, что для адаптивного алгоритма измерения возможен выбор линейной модели. Проведена оценка эффективности метода в сравнении с методом определения сопротивления TC по двум отсчётам переходного процесса.

Заключение. Представлены результаты математического моделирования метода измерения температуры на основе оценки величины сопротивления TC по результатам численного интегрирования переходного процесса разряда конденсатора, подключенного параллельно резистору, позволяющие оптимизировать алгоритмы, лежащие в основе его функционирования, а также судить об эффективности предложенного решения. Двухпроводный метод, основанный на определении сопротивления TC по результатам интегри-рования переходного процесса при выключении питания измерительной цепи позволяет повысить достичь точности измерения температуры сопоставимой с точностью трех и четырехпроводных схем, исключив недостатки, связанные с их сложностью и высокой стоимостью.

Ключевые слова: термометр сопротивления; температура; математическая модель; погрешности измерения; двухпроводная линия.

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

© Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Ботиков К.А., 2024

Для цитирования: Бондарь О.Г., Брежнева Е.О., Ботиков К.А. Исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 71-87. https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87.

Поступила в редакцию 26.12.2023

Подписана в печать 13.02.2024

Опубликована 27.03.2024

Research of the Method For Measuring Temperature with a Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer

Oleg G. Bondar ¹ 🖂, Ekaterina O. Brezhneva ¹, Konstantin A. Botikov ¹

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

⊠ e-mail: b.og@mail.ru

Abstract

Purpose: study of a method for measuring temperature with a two-wire connection of a resistance thermometer (RT) using its mathematical model. Conduct model testing and research to evaluate the potential capabilities of the measurement information processing method, which is based on determining the resistance of the vehicle based on the results of integrating the transient process in the measuring circuit after turning off its power source, determine the parameters of the measuring circuit and the algorithm underlying the method . For a given range of measured temperatures, determine the type and parameters of the adaptive measurement algorithm model.

Methods: methods of mathematical modeling, numerical methods. When developing a mathematical model of the method, the theory of electrical circuits was used, in particular, the analysis of transient processes. When analyzing the proposed solutions, the impact of electromagnetic interference and quantization effects was taken into account, and the effectiveness was assessed by the relative error (δ) of measuring the resistance of the vehicle and comparison with analogues. The simulation was carried out in the MATLAB environment.

Results: a mathematical model of an integrating method for measuring temperature using a TS was developed, the optimal value of the shunt capacitance was selected for the range of measured temperatures 0 ... 660 °C, providing within the range the calculated value of the root-mean-square error (RMS) of 0.02% -0.04%, the optimal value was determined first integration interval (4 ms). It is shown that for the adaptive measurement algorithm it is possible to select a linear model. The effectiveness of the method was assessed in comparison with the method of determining the resistance of the vehicle using two readings of the transient process.

Conclusion: The results of mathematical modeling of a method for measuring temperature based on estimating the resistance value of a vehicle based on the results of numerical integration of the transient discharge process of a capacitor connected in parallel with a resistor are presented, making it possible to optimize the algorithms underlying its operation, as well as to judge the effectiveness of the proposed solution.

The two-wire method, based on determining the resistance of the vehicle based on the results of integrating the transient process when the power of the measuring circuit is turned off, makes it possible to increase the accuracy of temperature measurement comparable to the accuracy of three and four-wire circuits, eliminating the disadvantages associated with their complexity and high cost.

Keywords: resistance thermometer; temperature; mathematical model; measurement errors; two-wire line.

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., 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.

Received 26.12.2023

Accepted 13.02.2024

Published 27.03.2024

Введение

Измерение температуры является критически важным в различных областях, включая промышленность, науку, медицину и бытовые цели. Существует множество методов измерения температуры, включая контактные и бесконтактные методы [1-16].

Контактные методы подразумевают применение термометров, которые физически соприкасаются с объектом для измерения его температуры, такие как: термопары, ртутные термометры, терморезисторы (термометры сопротивления). К преимуществам применения ТС относится высокая точность и возможность измерения температуры в широком диапазоне.

В зависимости от способа подключения ТС к измерительным приборам различают двухпроводные, трехпроводные и четырехпроводные методы измерения температуры [16]. Эти методы различаются по своим характеристикам и применению в различных условиях.

Двухпроводная схема измерения температуры является самой простой, она используется при прямом подключении TC к измерительному прибору и при малой длине проводников является доминирующей [14]. Однако сопротивление проводов вносит погрешности в результаты измерений. Это делает двухпроводные схемы менее точными для измерения температуры при большой длине присоединительной линии или в условиях изменения температуры окружающей среды.

Трехпроводная схема измерения температуры решает проблемы, связанные с сопротивлением проводов. Она использует три провода: два провода сигнальной линии и третий для компенсации сопротивления проводов, что хорошо работает в случае полной идентичности проводников сигнальной линии.

Четырехпроводная схема использует два провода для возбуждения TC (токовые проводники) и два – для измерения напряжения на TC (потенциальные проводники). Эта схема позволяет минимизировать ошибки, связанные с влиянием проводов присоединительной линии, и обеспечивает наиболее точные измерения температуры даже в условиях с переменной температурой окружающей среды и большой длиной присоединительной линии.

Трехпроводные и четырехпроводные схемы обеспечивают высокую точность измерений, особенно в сложных условиях, но в совокупности с большим расходом меди и относительно сложной электронной схемой измерительного устройства имеют высокую стоимость. Дополнительные сложности возникают в многоканальных системах измерения температуры, которые в большинстве случаев строятся как сканирующие системы, что связано с необходимостью коммутации четырёх линий.

Поэтому предпринимаются попытки применения двухпроводной присоединительной линии и при её большой длине. В [15] предложен метод компенсации сопротивления проводников двухпроводной линии, базирующийся на применении диода, шунтирующего соединённые последовательно второй диод и ТС, и питании линии трёхуровневыми импульсами тока положительной и отрицательной полярности. Последующая обработка измеряемых напряжений на зажимах двухпроводной линии позволяет определить сопротивление проводников и существенно ослабить их влияние на точность измерения сопротивления ТС. Схема требует применения 4 точных резисторов и относительно сложной измерительной схемы на операционных усилителях.

Авторами запатентован ряд способов ослабления влияния сопротивления проводников, соединяющих ТС с измерительным устройством [10, 17, 19], а детальное их рассмотрение представлено в [11, 18, 20]. В способе, предложенном в [19], сопротивление ТС определяется по результатам интегрирования напряжения разряжающегося на ТС конденсатора, который заряжается импульсом напряжения. Поскольку при измерении этого напряжения источник питания измерительной цепи отключен, и ток по проводам присоединительной линии не протекает, то её влияние исключается. Измерительная схема оказывается существенно проще трёхпроводных и четырёхпроводных, однако требуется оптимизация параметров схемы и алгоритма измерения с учётом изменения сопротивления TC в диапазоне температур, наличия шумов и эффектов квантования.

Необходимые исследования проводятся на математической модели.

Материалы и методы

Предложенные авторами методы измерения температуры TC, подключённым двухпроводной линией, используют единую измерительную схему, представленную на рис.1.

Ключом K измерительная цепь подключается к стабильному источнику питания U_{Π} на интервал времени, достаточный для полного заряда конденсатора C. При этом по завершении заряда ток в цепи:

$$I = U_{\Pi} / (R_0 + R_{\Pi} + R_{TC}), \qquad (1)$$

где U_{Π} – относительно стабильный источник напряжения (напряжение питания устройства, к которому предъявляются требования кратковременной стабильности в течение времени одного измерения – около сотни мс); R_0 – сопротивление опорного резистора; R_{Π} – сопротивление линии, соединяющей TC с измерительным устройством; R_{TC} – сопротивление TC.

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2024; 28(1): 71-87



Рис. 1. Схема измерительной цепи для двухпроводного подключения ТС: *U*_П – стабильный источник напряжения; *K* – ключ; *R*o – опорный резистор; *R*_Л – сопротивление соединительной линии; *U*_{TC} – напряжение на TC; *R*_{TC} – TC; *C* – конденсатор

Fig. 1. Circuit diagram of the measuring circuit for two—wire connection of the vehicle: U_{Π} – stable voltage source; *K* – key; *R*o – reference resistor; *R*_Π – resistance of the connecting line; U_{TC} – voltage on the vehicle; *R*_{TC} – TC; *C* – capacitor

В конце заряда конденсатора измеряется напряжение на опорном резисторе. Поскольку через него и ТС протекает один и тот же ток, то напряжения на ТС и опорном резисторе пропорциональны величинам их сопротивлений. При отключении источника напряжения в первый момент времени напряжение на ТС остаётся таким же, как и в конце заряда конденсатора. Поскольку ток в цепи при отключении отсутствует, то напряжение на входе соединительной линии, с помощью которой ТС подключён к измерительному устройству, равно напряжению на ТС. Это напряжение может быть измерено методом, описанным в [10, 11]. Однако погрешность этого метода обусловлена затухающими колебаниями, вызванными переходным процессом в соединительной линии, наличием помех и шумов квантования.

В [17, 18] представлено решение, позволяющее восстановить значение

напряжения на TC по двум значениям напряжения, измеренным в моменты времени t_1 и $t_2 = 2t_1$, отстоящие от момента отключения источника напряжения на интервал, превышающий время затухания переходного процесса в соединительной линии. Однако и в этом случае помехи и шумы квантования сильно влияют на погрешность измерения.

Существенно ослабить влияние всех перечисленных факторов можно, применив более сложную обработку измерительной информации. В [19, 20] представлен вариант решения, опирающийся на интегрирование напряжения ТС в течение времени полного разряда конденсатора. При этом расчёт сопротивления TC осуществляется по значениям интеграла напряжения на некотором интервале t_1 и всём интервале разряда конденсатора.

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

$$S = \int_{0}^{t} U_{\text{TC0}} \exp\left(-t/\tau\right) dt =$$

= $\tau U_{\text{TC}} \left[1 - \exp\left(-t/\tau\right)\right],$ (2)

где $\tau = R_{TC}C$ – постоянная времени, цепи термометра сопротивления при отключенном источнике возбуждения; U_{TC0} – напряжение на термометре сопротивления при полностью заряженном конденсаторе.

Определим значение интеграла на интервалах от начала разряда конденсатора до момента времени t_1 и от начала разряда до завершения переходного процесса (8 ... 10τ):

$$\begin{cases} S_1 = \tau U_{\text{TC0}} \left[1 - \exp\left(-t_1/\tau\right) \right] \\ S_2 = \tau U_{\text{TC0}}. \end{cases}$$
(3)

Постоянная времени, определённая из (3)

$$\tau = -t_1 / \ln(1 - S_1 / S_2).$$
(4)

Подстановка постоянной времени в выражение для S₂ (3) позволяет определить напряжение на TC в момент начала разряда

$$U_{\rm TC0} = -\frac{S_2}{t_1} \ln(1 - S_1 / S_2).$$
 (5)

Из (1) и (5) рассчитывается сопротивление TC

$$R_{\rm TC} = R_0 U_{\rm TC0} / U_0 \,. \tag{6}$$

Поскольку целью применения двухпроводных методов является снижение стоимости оборудования и повышение надёжности функционирования, то рассматривается вариант решения задачи с использованием минимального количества оборудования, в предельном случае: микроконтроллера со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), одного точного резистора, конденсатора и термометра сопротивления (рис.1).

Широко применяемые в промышленности устройства содержат дополнительно: источники опорного напряжения или тока; специализированные интегральные схемы, базирующиеся, как правило, на сигма-дельта АЦП; фильтр входного напряжения; несколько дополнительных точных резисторов в измерительной схеме. Микроконтроллер является практически обязательным устройством, которое управляет АЦП, выполняет преобразование измерительной информации в температуру, поддерживает функции индикации и/или внешний интерфейс.

В рассматриваемом устройстве целесообразно использовать микроконтроллеры со встроенным АЦП. В настоящее время подобные МК являются доминирующими на рынке.

Для оценки потенциальных возможностей метода и выбора параметров схемы и алгоритма обработки в МАТLAB построена математическая модель, позволяющая определить значение напряжения на входе присоединительной линии в конце заряда конденсатора, воспроизвести процесс разряда конденсатора на TC, выполнить интегрирование и рассчитать значения интегрирование и рассчитать значения интегрирование S_2 при отключении питания измерительной цепи, рассчитать по выражениям (4), (5), (6) величину сопротивления TC, относительную погрешность его

измерения в %. При этом, в пределах диапазона измерения температуры, с выбранным шагом изменяется сопротивление TC, а для каждого значения его сопротивления автоматически, с заданным шагом (10), изменяется интервал измерения t_1 . Модель является многофакторной и дополнительно учитывает влияние шага квантования, интервала дискретизации и наличие шумов, помех.

Модель позволяет оценить поведение погрешности измерения ТС, с учётом изменения его сопротивления. Изменение сопротивления на ТС приводит к изменению соотношения напряжения на опорном резисторе и напряжения на ТС в момент полного заряда конденсатора, что при заданной разрядности АЦП (иначе, относительном шаге квантования h) вызывает перераспределение погрешностей измерения этих напряжений. Кроме того, изменение постоянной времени $\tau = R_{TC} \times C$, при фиксированной частоте дискретизации, изменяет погрешность интегрирования, т.к. одновременно действуют два фактора – меняется скорость разряда конденсатора и соотношение интервалов интегрирования.

В устройстве возможно применение 8-разрядных МК, производительность которых и объёмы оперативной памяти ограничены. Это требует проводить интегрирование на лету без предварительного сохранения преобразованных в код отсчётов напряжения в оперативной памяти, а для организации интегрирования использовать интервал дискретиИсследование метода измерения температуры... 77

зации Δt , что заставляет, с одной стороны, использовать механизм прерывания при работе с АЦП, а с другой – целочисленную арифметику и простейшие способы интегрирования. Разумным выбором является метод трапеций, поскольку по производительности он практически эквивалентен методу прямоугольников, а погрешность интегрирования ($\Delta_{\rm H}$) существенно меньше и оценивается выражением:

$$\Delta_{\mathrm{H}} \leq \frac{t^{3}}{12n^{2}} \cdot \max \left| \frac{d^{2}F(t)}{dt^{2}} \right| = \frac{t^{3}}{12n^{2}} \cdot \frac{U_{\mathrm{TC0}}}{\tau^{2}} \approx$$
$$\approx \frac{n^{2}\Delta t^{2}t}{12n^{2}} \cdot \frac{U_{\mathrm{TC0}}}{\tau^{2}} = \frac{t}{12} U_{\mathrm{TC0}} \left(\frac{\Delta t}{\tau}\right)^{2}.$$

С помощью разработанной математической модели исследованы: поведение погрешности измерения ТС при разных значениях его сопротивления и вариации величины первого интервала интегрирования без учёта эффекта квантования, что позволяет оценить характер поведения погрешности измерения для случая АЦП большой разрядности (от 14 разрядов), без выпадающих кодов;

 поведение погрешности измерения ТС при разных значениях его сопротивления и вариации величины первого интервала интегрирования с учётом квантования (10-разрядный АЦП);

 поведение погрешности измерения ТС при разных значениях его сопротивления и вариации величины первого интервала интегрирования с учётом воздействия электромагнитных шумов (нормально распределённый

78 Информатика, вычислительная техника и управление / Computer science, computer engineering and control

шум со стандартным отклонением равным шагу квантования) и эффекта квантования.

Рассмотрим факторы, определяющие диапазоны изменения варьируемых величин. Наибольшим диапазоном измерений обладают платиновые TC. В промышленности чаще всего используются таблицы номинальных стан-(HCX) для дартных характеристик определения температуры по величине сопротивления ТС. Погрешность, обеспечиваемая использование НСХ, не превышает 0.1 °С. При этом сами платиновые ТС могут быть выполнены как проволочные или как плёночные. Первые имеют более широкий диапазон рабочих температур - до 660 °С. В соответствии с уравнением Каллендара-Ван Дьюзена, в котором коэффициентами при квадратичной и кубической составляющей при оценке диапазона изменения температуры можно пренебречь

 $R_{\rm T} \leq R_0 \cdot (1 + 0.0039083 \cdot T) \approx 3.58 R_0.$

Таким образом диапазон изменения сопротивления ТС может быть ограничен четырёхкратным.

При численном интегрировании напряжения переходного процесса время интегрирования определяется как количество интервалов интегрирования, ум-ноженное на шаг дискретизации. Для практической проверки рассмотренных решений использовался макет на основе микроконтроллеров фирмы ATMEL, поскольку у этого семейства есть отечественные аналоги, выпускаемые НИИЭТ (Воронеж) 1887ВЕ4У, 1887ВЕ7Т, 1887ВЕ8Т, и среди 8-разрядных МК это семейство выделяются как одно из наиболее производительных по доступной цене. Исследование их АЦП позволило определить наименьший шаг дискретизации, который они могут обеспечить без потери точности – 26 мкс.

Результаты и их обсуждение

Исследования проводились численным методом в среде *MATLAB*. На рис. 2 представлены результаты моделирования в идеализированных условиях, что соответствует применению АЦП с высокой разрешающей способностью. Диапазон изменения относительной погрешности определения сопротивления ТС ограничен величиной 0.2%. представленное семейство из 7 кривых обеспечивает перекрытие по температуре 0 – 660 0 С. Время на всех представленных рисунках представлено в виде числа отсчётов, полученных при постоянном времени дискретизации, T.e. $t = n\Delta t$.

Поскольку АЦП приводит к квантованию аналогового напряжения, то это приводит к росту погрешности определения сопротивления ТС. Интегрирование улучшает ситуацию, поскольку срабатывает механизм передискретизации и дизеринга за счёт формы кривой напряжения, что приводит к повышению разрешающей способности и частичной компенсации возрастания погрешности за счёт квантования.



Рис. 2. Зависимость относительной погрешности измерений *R*_{TC} (δ≤0,2%): 1 –1кОм; 2 –1,5 кОм, 3 – 2 кОм; 4 – 2,5 кОм; 5 – 3 кОм; 6 – 3,5 кОм, 7 – 4 кОм

Fig. 2. Dependence of the relative measurement error RTS (δ≤0.2%): 1 – 1kOhm; 2 -1.5 kOhm, 3 – 2 kOhm; 4 – 2,5 kOhm; 5 – 3 kOhm; 6 – 3.5 kOhm, 7 – 4 kOhm

На рис. 3 представлены результаты моделирования для этого случая. Как и на рис. 2 кривые пронумерованы в порядке возрастания номинального сопротивления TC с шагом 0.5 кОм.

Рис. 4 демонстрирует резкое возрастание погрешности измерения при приближении времени интегрирования на первом интервале ко времени полного интегрирования.



- Рис. 3. Зависимость относительной погрешности измерений *R*_{TC} от времени измерения при квантовании результатов измерения: **1** –1кОм; **2** –1,5 кОм; **3** 2 кОм; **4** 2,5 кОм; **5** 3 кОм; **6** 3,5 кОм; **7** 4 кОм
- Fig. 3. The dependence of the relative measurement error RTS on the measurement time when quantizing the measurement results: 1 1kOm; 2 1,5 kOhm; 3 2 kOhm; 4 2,5 kOhm; 5 3 kOhm; 6 3,5 kOhm, 7 4 kOhm



Рис. 4. Зависимость относительной погрешности измерений R_{TC} от времени измерения при квантовании результатов измерения (δ≤20%): 1 –1кОм; 2 –1,5 кОм; 3 – 2 кОм;
 4 – 2,5 кОм; 5 – 3 кОм; 6 – 3,5 кОм, 7 – 4 кОм

Fig. 4. The dependence of the relative measurement error RTS on the measurement time when quantizing the measurement results (δ≤20%): 1 – 1kOm; 2 – 1,5 kOhm, 3 – 2 kOhm; 4 – 2.5 kOhm; 5 – 3 kOhm; 6 – 3.5 kOhm, 7 – 4 kOhm

Поскольку при реальных условиях измерения напряжение питания цепи измерения подвергается воздействию шумов, то в математической модели предусмотрено добавление на каждом шаге многократного измерения напряжения на опорном резисторе шумового сигнала с нормальным распределением и среднеквадратичным отклонением σ , равным шагу квантования h, а результат каждого измерения подвергается квантованию. Аналогично в алгоритме обрабатывается и напряжение, поступающее с ТС. В данном случае определяется относительная величина среднеквадратичного отклонения сопротивления *R*_{TC} от его номинального значения по результатам обработки 100 измерений в каждой точке.

Рис. 5 демонстрирует зависимость погрешности измерения от длительности первого интервала интегрирования.

Представленные результаты позволяют сделать нижеследующие выводы.

В любых условиях увеличение первого интервала интегрирования до значений, приближающихся к интервалу полного разряда конденсатора шунтирующего ТС, погрешность измерения сопротивления ТС резко возрастает. На этот факт не влияет ни повышение разрядности АЦП, ни увеличение постоянной времени, что эквивалентно повышению частоты дискретизации, ни уменьшение уровня шумов.

При повышении разрядности АЦП и при минимальных шумах возрастание погрешности становится более монотонным.



- Рис. 5. Зависимость средне квадратичного относительного отклонения сопротивления от номинального значения R_{TC} при зашумлении нормально распределённой величиной с σ, равной одному шагу квантования: 1 1 кОм; 2 –1,5 кОм; 3 2 кОм; 4 2,5 кОм; 5 3 кОм; 6 3,5 кОм, 7 4 кОм
- Fig. 5. Dependence of the average quadratic relative deviation of the resistance from the nominal value of RTC with noise of a normally distributed value c σ equal to one quantization step:
 1 1 kOhm; 2 -1,5 kOhm; 3 2 kOhm; 4 2,5 kOhm; 5 3 kOhm; 6 3,5 kOhm, 7 4 kOhm

Шумы с уровнем, близким к шагу квантования, приводят к появлению явного минимума на зависимостях погрешности измерения сопротивления TC от величины первого интервала интегрирования.

Для минимизации погрешности определения TC величина первого интервала интегрирования может быть увеличена в соответствии с линейной моделью, т.е. возможно введение автоматической подстройки интервала интегрирования по оценке сопротивления TC без учёта влияния сопротивления присоединительной линии. Погрешность определения TC может быть снижена с увеличением постоянной времени цепи TC примерно в три раза по сравнению с текущим значением, что соответствует для данных условий трёхкратному увеличению ёмкости конденсатора.

Применение метода определения сопротивления TC по результатам интегрирования напряжения переходного процесса разряда конденсатора шунтирующего TC позволяет помимо подавления влияния сопротивления присоединительной линии снизить величину

Известия Юго-Западного государственного университета / Proceedings of the Southwest State University. 2024; 28(1): 71-87

82 Информатика, вычислительная техника и управление / Computer science, computer engineering and control

погрешности измерения ниже значения шага квантования.

Для сравнения приведены результаты измерения величины TC на экспериментальном стенде, методом определения величины TC по измерениям в двух точках переходного процесса для одного конкретного значения сопротивления с теми же параметрами измерительной цепи и 10-разрядным АЦП [18]. Результаты сравнения представлены в табл. 1, где: k – номер измерения; R – измеренное значение сопротивления. Среднее значение измеренного сопротивления равно 0,9608 кОм, а среднее квадратичное отклонение измеренного значения относительно среднего значения составило 1,3 Ом, т.е. превысило 0,1%. При этом номинальное значение сопротивления равно 0,963 кОм.

| Таблица 1. | Результаты | измерения | сопротивления | на стенде |
|------------|------------|-----------|---------------|-----------|
|------------|------------|-----------|---------------|-----------|

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>R</i> , кОм | 0.962 | 0.960 | 0.962 | 0.962 | 0.963 | 0.961 | 0.962 | 0.961 | 0.963 | 0.961 |
| k | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| <i>R</i> , кОм | 0.963 | 0.962 | 0.961 | 0.962 | 0.959 | 0.960 | 0.961 | 0.96 | 0.961 | 0.962 |
| k | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| <i>R</i> , кОм | 0.961 | 0.959 | 0.959 | 0.961 | 0.960 | 0.960 | 0.960 | 0.959 | 0.959 | 0.959 |

Table 1. Results of resistance measurement on the stand

В соответствии с рис. 5 для сопротивления 1 кОм среднеквадратичное отклонение от номинального значения не превысило 0,03%. Следует также учесть, что снизить величину погрешности определения ТС за счёт усреднения по [18] можно повторными измерениями. В рассматриваемом методе необходимости в многократных измерениях нет, а это позволяет многократно повысить скорость измерений, что важно в многоканальных системах измерения температуры.

Выводы

Описан метод измерения температуры TC, подключённым двухпроводной линией, позволяющий исключить влияние сопротивления линии на результаты измерения, и использующий для определения величины сопротивле-ТС результаты интегрирования ния напряжения переходного процесса разряда предварительно заряженного конденсатора, шунтирующего ТС. Метод обладает преимуществами двухпроводных схем и точностью сопоставимой с трех- и четырехпроводными схемами. Разработана соответствующая математическая модель интегрирующего метода, позволяющая оценить зависимость относительной погрешности измерения сопротивления ТС от величины первого интервала интегрирования при разных величинах термометра сопротивления и учитывающая влияние дополнительных факторов, таких как: шаг квантования, интервал дискретизации, наличие электромагнитных помех.

С помощью математической модели оценен общий характер поведения погрешности измерения для идеализированного случая, с учётом квантования, и в условиях наличия шумов, распределённых по нормальному закону с среднеквадратичным отклонением, соответствующим шагу квантования при одновременном квантовании измеряемого сигнала.

Определены следующие параметры: оптимальная величина шунтирующей емкости при заданном диапазоне измеряемых температур и выбранном интервале дискретизации 26 мкс (20 мкФ), оптимальная величина первого интервала интегрирования (4 мс для нижней границы диапазона измеряемых температур – 0 °C) и поправочный коэффициент ($k = U'_{TC}/U_0$), величина которого оценивается по результатам грубой оценки напряжения на TC измерением напряжения на зажимах присоединительной линии в конце импульса заряда конденсатора. Для выбора оптимального значения при адаптивном алгоритме измерения достаточно использования линейной модели.

Проведена оценка эффективности метода в сравнении с методом определения сопротивления ТС по результатам измерения напряжения переходного процесса в двух точках.

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

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

4. Лапшинов Б. А. Методы измерения температуры в технологиях сверхвысокочастотного нагрева // Измерительная техника. 2021. № 6. С. 20–28. https://doi.org/ 10.32446/0368-1025it.2021-6-20-28.

5. Zhang M., Zhang J., Qiao L., Wang T. Distributed Fiber Optic Raman Thermometer and Applications // In: Novel Optical Fiber Sensing Technology and Systems. Progress in Optical Science and Photonics. 2024. Vol 28. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7149-7-6.

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

84 Информатика, вычислительная техника и управление / Computer science, computer engineering and control

7. Cheung Y., Jing Z., Liu Q. et al. Fast-Response Fiber-Optic FPI Temperature Sensing System Based on Modulated Grating Y-Branch Tunable Laser // Photonic Sens. 2024. Vol. 14. No. 1. https://doi.org/10.1007/s13320-023-0690-0.

8. Woo K.R., Kim H.B., Kim H.L. et al. An MMC-Based Temperature Control System for a Long-Term Data Collection // J Low Temp Phys. 2022. Vol. 209. Pp. 1218–1225 https://doi.org/10.1007/s10909-022-02805-w.

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

10. Способ многоканального измерения температуры: пат RU № 2775873. С1 / О. Г. Бондарь, Е. О. Брежнева // Изобретения. Полезные модели. 2022. № 20.

11. 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

12. 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. Vol. 31. Pp. 309–314 https://doi.org/10.1134/S1810232822020114.

13. Malinarič, S. The Application of the Finite Elements Method in the Transient Measurements of Thermophysical Parameters // Int J Thermophys. 2024. Vol. 45, 22 https://doi.org/10.1007/s10765-023-03311-1.

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

15. Bondar O.G., Brezhneva E.O. & Pozdnyakov, V.V. Methods and Algorithms for Control of a Thermocatalytic Hydrogen Sensor // Meas Tech. 2018. Vol. 61. Pp. 514–519 https://doi.org/10.1007/s11018-018-1460-z.

16. Apinai Rerkratn, Supatsorn Prombut, Thawatchai Kamsri, et al. A Procedure for Precise Determination and Compensation of Lead-Wire Resistance of a Two-Wire Resistance Temperature Detector // Sensors. 2022. Vol. 22. https://doi.org/10.3390/s22114176.

17. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Двойных Е. С. Способ измерения температуры: пат RU № 2752132. С1 // Изобретения. Полезные модели. 2021. № 21.

18. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Kalmykov A.I. Increasing Temperature Measurement Accuracy: Method of Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer // Meas Tech. 2022. Vol. 65. Pp. 206–212. https://doi.org/10.1007/s11018-022-02070-z.

19. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О., Поляков Н. В. Способ измерения температуры среды: пат RU № 2781754. С1 // Изобретения. Полезные модели. 2022. № 29.

20. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Zubarev, A.Y. Improvement of Algorithms for Measuring Temperature with Two-Wire Connection of Resistance Thermometers // Meas Tech. 2023. Vol. 66, Pp. 273–278 https://doi.org/10.1007/s11018-023-02221-w.

References

1. Kasparov K. N., Belozerov A. V. Izmerenie temperatury bystroprotekayushchikh protsessov [Temperature measurement of fast-flowing processes]. *Izmeritel'naya tekhnika* = *Measurement Techniques*, 2002, vol. 45, pp. 1256–1263. https://doi.org/10.1023/A:1022985107345.

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

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

4. Lapshinov B.A. Metody izmereniya temperatury v tekhnologiyakh sverkhvysokochastotnogo nagreva [Methods of temperature measurement in ultrahigh-frequency heating technologies]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*, 2021, no. 6, pp. 20–28. https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-6-20-28.

5. Zhang M., Zhang J., Qiao L., Wang T. Distributed Fiber Optic Raman Thermometer and Applications. *In: Novel Optical Fiber Sensing Technology and Systems. Progress in Optical Science and Photonics*, 2024, vol 28. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7149-7-6.

6. Filatov A. V., Serdyukov K. A., Novikova A. A. Perspektivy ispol'zovaniya modifitsirovannogo nulevogo metoda izmerenii temperatury datchikami soprotivleniya [Prospects for the use of a modified zero temperature measurement method by resistance sensors]. *Izmeritel'naya tekhnika = Measurement Techniques*, 2017, vol. 63, no. 7, pp. 567–572. https://doi.org/10.1007/s11018-020-01824-x

7. Cheung Y., Jing Z., Liu Q. *et al.* Fast-Response Fiber-Optic FPI Temperature Sensing System Based on Modulated Grating Y-Branch Tunable Laser. *Photonic Sens*, 2024, vol 14, no. 1. https://doi.org/10.1007/s13320-023-0690-0.

8. Woo K.R., Kim H.B., Kim H.L. *et al.* An MMC-Based Temperature Control System for a Long-Term Data Collection. *J Low Temp Phys*, 2022, vol. 209, pp. 1218–1225 https://doi.org/10.1007/s10909-022-02805-w.

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

10. Bondar' O.G., Brezhneva E.O. Sposob mnogokanal'nogo izmereniya temperatury. Patent RU 2775873 C1 [Method of multichannel temperature measurement. Patent RU 2775873 C1]. *Izobreteniya. Poleznye modeli = Inventions. Utility models*, 2022. no. 20.

11. Bondar' O.G., Brezhneva E.O., Rodionov P. S. Mnogokanal'nyj preobrazovatel' temperatury [Multi-channel temperature converter]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*. *Priborostroenie = Journal of Instrument Engineering*, 2022, vol. 65, no. 4, pp. 254-261 (In Russ.). https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-7-668-674

12. 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, vol. 31, pp. 309–314. https://doi.org/10.1134/S1810232822020114.

13. Malinarič S. The Application of the Finite Elements Method in the Transient Measurements of Thermophysical Parameters. *Int J Thermophys*, 2024, vol. 45, 22 https://doi.org/10.1007/s10765-023-03311-1.

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

15. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Pozdnyakov V.V. Methods and Algorithms for Control of a Thermocatalytic Hydrogen Sensor. *Meas Tech*, 2018, vol. 61, pp. 514–519 https://doi.org/10.1007/s11018-018-1460-z

16. Apinai Rerkratn, Supatsorn Prombut, Thawatchai Kamsri, et al. A Procedure for Precise Determination and Compensation of Lead-Wire Resistance of a Two-Wire Resistance Temperature Detector. *Sensors*, 2022, vol. 22. https://doi.org/10.3390/s22114176.

17. Bondar' O.G., Brezhneva E.O., Dvoinykh E. S. Sposob izmereniya temperatury: pat RU № 2752132. C1 [Temperature measurement method: PAT RU No. 2752132. C1]. *Izo-breteniya. Poleznye modeli = Inventions. Utility models*, 2021, no. 21.

18. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Kalmykov A.I. Increasing Temperature Measurement Accuracy: Method of Two-Wire Connection of a Resistance Thermometer. *Meas Tech*. 2022, vol. 65, pp. 206–212. https://doi.org/10.1007/s11018-022-02070-z.

19. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Polyakov N. V. Sposob izmereniya temperatury sredy: pat RU № 2781754. C1. [Temperature measurement method: PAT RU No. 2752132.
C1]. *Izobreteniya. Poleznye modeli = Inventions. Utility models*, 2022, no. 29.

20. Bondar O.G., Brezhneva E.O., Zubarev, A.Y. Improvement of Algorithms for Measuring Temperature with Two-Wire Connection of Resistance Thermometers. *Meas Tech*, 2023, vol. 66, pp. 273–278. https://doi.org/10.1007/s11018-023-02221-w.

Информация об авторах / Information about the Authors

Бондарь Олег Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, 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

Ботиков Константин Алексеевич, студент кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: botikov.03@mail.ru **Oleg G. Bondar**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: b.og@mail.ru

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

Konstantin A. Botikov, Student of Space Instrumentation and Communication Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: botikov.03@mail.ru