

УДК 681.5; 621.5

ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СВЕРХМАЛЫХ РАЗНОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОСРЕДСТВОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ РЕЗИСТОРНЫХ ТЕРМОДАТЧИКОВ

В.Г.Мельник, канд.техн.наук, **А.И.Новик**, докт.техн.наук, **М.П.Рубанчук**,

А.Д.Василенко, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail: melnik@ied.org.ua

Рассмотрен вариант мостовой измерительной цепи, работающей на переменном токе, с применением дифференциальных датчиков на основе миниатюрных тонкопленочных термопреобразователей сопротивления. Устройство обладает повышенной помехоустойчивостью при измерении слабых тепловых потоков. Библ. 7, рис. 2.

Ключевые слова: мостовая измерительная цепь, дифференциальный датчик, терморезистор, погрешность, импеданс.

В ряде отраслей науки и техники актуальной задачей является фиксация и количественная оценка малой разности температур в близкорасположенных областях пространства [3–5]. Примерами таких задач могут быть измерения слабых тепловых потоков, фиксация и оценка интенсивности протекания химических и биохимических реакций, определение конфигурации тепловых полей вокруг охлаждаемого/нагреваемого объекта и т.п. Одним из способов измерения малых разностей температуры является применение дифференциальных датчиков на основе миниатюрных тонкопленочных термопреобразователей сопротивления (терморезисторов), включаемых в плечи какой-либо измерительной цепи сравнения. Наиболее приемлемыми для этой цели представляются мостовые измерительные цепи переменного тока с операционными усилителями [1, 6, 7]. Сложным и недостаточно изученным вопросом, возникающим при реализации таких устройств, остается обеспечение помехоустойчивости, особенно с учетом весьма малого уровня полезного сигнала, а также значительной дистанционности, поскольку термопреобразователи подключаются к измерительной цепи (ИЦ) относительно длинными проводниками. Кроме того, мало исследовано влияние технологических разбросов элементов ИЦ, влияние внешней (фоновой) температуры.

Цель настоящей работы – обсуждение предложенных схмотехнических особенностей, направленных на минимизацию влияния помех (полей) и паразитных импедансов, а также анализ основных погрешностей, сопровождающих дифференциальное измерение разности температур.

Приведем некоторые количественные оценки. Описываемое измерение сводится к определению относительных разностей сопротивлений порядка десятиллионных долей (10^{-7}) от полного импеданса терморезистора. При этом подводимая мощность сигнала на датчике не должна превышать сотых долей мВт (по условиям работы). Простой расчет показывает, что при сопротивлениях термодатчиков порядка единиц кОм (реально достижимое значение) порог чувствительности схемы должен быть на уровне десятков нВ. Это, кстати, среди прочего определяет жесткие требования к выбору операционных усилителей по шумовым характеристикам.

На рис. 1 и 2 представлен один из возможных вариантов ИЦ для измерения сверхмалых разностей температуры посредством двух дифференциальных резистивных термодатчиков (термосопротивлений). На рис. 1 условно показано расположение соединяющих проводов, с помощью которых используемые терморезисторы подключаются к ИЦ. Для минимизации влияния наводок от электрических и магнитных полей применен известный принцип попарного бифилирования проводников с прямым и обратным током (на рис. 1 бифилированные провода обозначены символом " ∞ "). На рис. 2 изображены те же элементы цепи в традиционном для принципиальных схем начертании, обозначены токи и напряжения, а также паразитные сопротивления подключающих проводов. Мостовая измерительная цепь содержит два одинаковых термопреобразователя сопротивления R_{T1} и R_{T2} , которые образуют дифференциальный термодатчик, два идентичных высокостабильных резистора R'_0 и R''_0 , операционный усилитель ОУ и инструментальный дифференциальный усилитель ДУ с высокоомным входом. Термодатчик соединяется с остальными элементами схемы с помощью восьмипроводного кабеля. Сопротивление каждого из его проводников равно r . Питание мостовой цепи осуществляется напряжением U_T от генератора измерительного сигнала Γ , частота которого выбирается относительно невысокой (обычно в звуковом диапазоне), но не кратной частоте сети и ее гармоник. Собственно

мостовая цепь состоит из двух ветвей, включенных между выходом генератора и точкой нулевого потенциала (землей). Первая из них включает резистор R'_0 , термопреобразователь R_{T1} и выходную цепь ОУ. Вторая ветвь включает резистор R''_0 и термопреобразователь R_{T2} . Входы операционного усилителя подключены практически обесточенными проводниками к диагонали ab моста, что позволяет благодаря глубокой отрицательной обратной связи поддерживать на этой диагонали практически нулевую разницу потенциалов. При условии $R'_0 = R''_0$, $R_{T1} = R_{T2}$ напряжение на выходе ОУ равно нулю, в процессе работы оно изменяется пропорционально разности R_{T1} и R_{T2} . Сигнал с выхода мостовой цепи снимается с помощью ДУ, имеющего высокоомные входы, через обесточенные сопротивления кабеля r . Особенностью данной схемы является четырехзажимное подключение каждого чувствительного элемента дифференциального датчика, что позволяет свести к минимуму влияние сопротивлений проводников соединительного кабеля.

Проанализируем зависимость выходного сигнала мостового преобразователя от параметров его элементов с помощью схемы на рис. 2. Левая часть этой схемы (до входов ДУ) может рассматриваться как дифференциальный (вычитающий) усилитель [2], на оба входа которого подано одно и то же напряжение U_{Γ} . При этом, согласно формуле, приведенной в [2], выходное напряжение ОУ равно

$$U_{\text{выхОУ}} = U_{\Gamma} \left[R_4 (R_3 + R_4)^{-1} (1 + R_2 R_1^{-1}) - R_2 R_1^{-1} \right]. \quad (1)$$

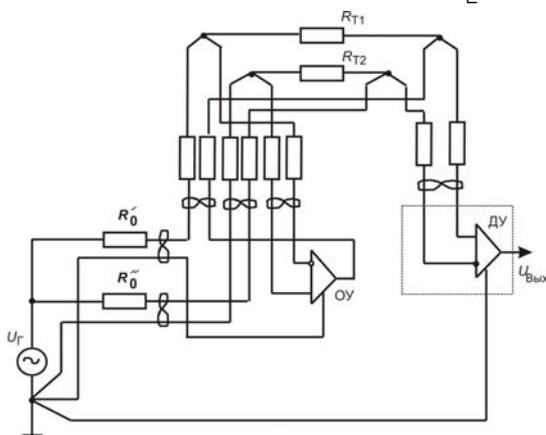


Рис. 1

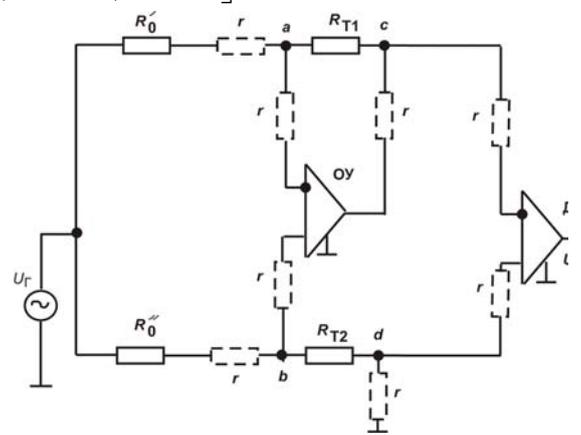


Рис. 2

Подставим вместо $R_1 \div R_4$ соответствующие им величины из схемы рис. 2

$$R_1 = R'_0 + r; \quad R_2 = R_{T1}; \quad R_3 = R''_0 + r; \quad R_4 = R_{T2} + r.$$

Влиянием сопротивлений проводников r на входах усилителей ОУ и ДУ можно пренебречь в силу того, что они находятся в практически обесточенных цепях. Влиянием сопротивления r в выходной цепи ОУ (как и внутреннего выходного сопротивления ОУ) также пренебрегаем, поскольку напряжение в точке "с" мало отличается от выходного напряжения ОУ ($r \ll R_{T1}$), и это уменьшение может рассматриваться как незначительное снижение $K_{\text{ОУ}}$ (коэффициент усиления $K_{\text{ОУ}}$ современных ОУ достигает нескольких десятков тысяч). Полагаем также, что все восемь подводящих проводов терморезисторов одинаковы, и их сопротивления r равны друг другу.

С указанными допущениями напряжение в точке "с" относительно земли будет определяться выражением

$$U_c = U_{\Gamma} \frac{(R'_0 + r)(R_{T2} + r) - R_{T1}(R''_0 + r)}{(R'_0 + r)(R''_0 + R_{T2} + 2r)}. \quad (2)$$

Номинальные сопротивления резисторов равны R_0 , однако за счет технологического разброса они могут отличаться (обычно не более чем на 0,1 %); считаем, что $R'_0 = R_0$, $R''_0 = R_0 + \Delta R$, где ΔR – отклонение за счет технологического разброса. Тогда из (2), исключив величины 2-го порядка малости, получим

$$U_c \approx U_{\Gamma} \frac{R_{T2} - R_{T1}(1 + \delta_{R_0}) + r}{R_0 + R_{T2} + \Delta R + 2r}, \quad (3)$$

где $\delta_{R_0} = \Delta R / R_0$ – относительное неравенство величин R'_0 и R''_0 .

Напряжение в точке "d" относительно земли за счет протекания тока нижней ветви схемы через сопротивление r

$$U_d = U_{\Gamma} r / R_{\Sigma}, \quad (4)$$

где через R_{Σ} обозначена сумма сопротивлений, представленная в знаменателе выражения (3).

Поддаваемое на вход ДУ напряжение U_{cd} является разностью ($U_c - U_d$), оно же $U_{вых}$ (для упрощения считаем коэффициент передачи ДУ равным единице)

$$U_{вых} \approx U_{\Gamma} [R_{T2} - R_{T1} (1 + \delta_{R_0})] R_{\Sigma}^{-1}. \quad (5)$$

При фоновой температуре в идеальном случае $R_{T2} = R_{T1} = R_{Tн}$, в реальном – за счет разброса параметров терморезисторов $R_{T2} = R_{T1} (1 + \delta_{R_T})$, где δ_{R_T} – относительное неравенство сопротивлений терморезисторов при фоновой температуре (обычно $|\delta_{R_T}| \leq |0,1\%|$). Поскольку задачей является измерение не абсолютной температуры, а лишь небольшой разности температур, можем принять, что $R_{T1} = R_{Tн}$ (номинальное значение сопротивления при фоновой температуре). Тогда из (5) следует

$$U_{выхфон} = U_{\Gamma} R_{Tн} (\delta_{R_T} - \delta_{R_0}) R_{\Sigma}^{-1}. \quad (6)$$

Последним выражением определяется аддитивный сдвиг характеристики преобразования рассматриваемой цепи (смещение нуля) за счет технологических отклонений от номинала параметров используемых элементов. Очевидно, что значение δ_{R_T} и δ_{R_0} не коррелированы друг с другом, в выражении (6) их модули могут складываться либо вычитаться. В частном случае это выражение обращается в нуль, в остальных случаях коррекция нуля может выполняться с помощью добавочных резисторов или посредством дополнительного ЦАП, не показанного на схеме. При этом в процессе коррекции оба терморезистора должны иметь строго одинаковую температуру.

Представим сумму R_{Σ} в виде двух слагаемых – суммы $R_{\Sigmaн}$ номинальных (паспортных) значений R_0, R_{T2} и суммы ΔR_{Σ} значений искажающих параметров $\Delta R, r$, т.е.

$$R_{\Sigma} = R_{\Sigmaн} + \Delta R_{\Sigma} = R_{\Sigmaн} (1 + \delta_{R_{\Sigma}}), \quad \delta_{R_{\Sigma}} = \Delta R_{\Sigma} / R_{\Sigmaн}. \quad (7)$$

Поскольку $\delta_{R_{\Sigma}}$ является малой величиной (доли процента), из (5) и (6) с учетом (7) можно найти общее выражение для выходного напряжения цепи в следующем виде:

$$U_{выхх} \approx U_{\Gamma} [R_{Tн} (\delta_{R_T} - \delta_{R_0}) - \Delta R_{Tx} (1 + \delta_{R_0})] R_{\Sigmaн}^{-1} (1 - \delta_{R_{\Sigma}}), \quad (8)$$

где ΔR_{Tx} – изменение сопротивления R_{T1} за счет измеряемой разности температур двух терморезисторов, $\Delta R_{Tx} = R_{T1} - R_{Tн}$.

Учитывая, что первое слагаемое в квадратных скобках (рассмотренная выше аддитивная погрешность) после процедуры компенсации обращается в нуль, получаем после несложных преобразований и отбрасывания членов 2-го порядка малости

$$U_{выхх} \approx U_{\Gamma} \Delta R_{Tx} (1 + \delta_{R_0} - \delta_{R_{\Sigma}}) R_{\Sigmaн}^{-1}. \quad (9)$$

Абсолютное приращение температуры ΔT_x терморезистора вызывает пропорциональное (в первом приближении) относительное изменение его сопротивления, т.е.

$$\Delta R_{Tx} / R_{Tн} = \alpha \cdot \Delta T_x, \quad (10)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС) терморезистора.

$$\text{Окончательно получаем} \quad U_{выхх} \approx U_{\Gamma} \cdot \alpha \cdot \Delta T_x R_{Tн} R_{\Sigmaн}^{-1} (1 + \delta_{R_0} - \delta_{R_{\Sigma}}). \quad (11)$$

Здесь $\alpha R_{Tн} / R_{\Sigmaн}$ – крутизна характеристики преобразования цепи. Отличие выражения в скобках от единицы показывает мультипликативную погрешность измерения, которая, как видно, является постоянной для конкретного экземпляра устройства величиной.

С использованием выражения (11) можно, применив цифровую коррекцию с помощью встроенного микроконтроллера, учесть влияние мультипликативной составляющей ($\delta_{R_0} - \delta_{R_{\Sigma}}$), для чего при изготовлении прибора необходимо внести в энергонезависимую память контроллера точные значения соответствующих параметров элементов цепи.

Выводы. Анализ полученных выражений показывает, что в исследуемой схеме сопротивления r проводников кабеля не вносят в результат измерения аддитивных погрешностей. Сравнительно небольшая мультипликативная погрешность (порядка 0,1%), возникающая за счет влияния этих и

других сопротивлений на токи в ветвях моста, имеет постоянную величину и может быть существенно уменьшена известными методами коррекции погрешностей.

При значительном изменении фоновой температуры крутизна характеристики преобразования может заметно меняться. Поэтому в реальных устройствах необходим контроль и учет отклонения фоновой температуры от номинальной (при которой определено и зафиксировано в памяти значение R_{Tn}), например, с помощью дополнительного термометра сопротивления.

1. *Гриневиц Ф.Б., Сурду М.Н.* Высокоточные вариационные измерительные системы переменного тока. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
2. *Гутников В.С.* Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
3. *Дослідження у галузі сенсорних систем та технологій / За ред. Г.В. Сельської, В.Д. Походенка.* – К.: Інститут молекулярної біології і генетики НАН України, 2006. – 408 с.
4. *Мельник В.Г., Василенко О.Д., Стародуб М.Ф., Медведенко М.П.* Високочутливі термометричні системи для біомедичних та технологічних вимірювань // Технічна електродинаміка. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2006. – Ч. 3. – С. 125–128.
5. *Мельник В.Г., Рубанчук М.П., Мелкумян Р.Г.* Термосенсорні системи на основі вимірювань параметрів теплових потоків // 36. наук. праць Військового інституту Національного університету ім. Тараса Шевченка. – 2011. – № 33. – С. 167–171.
6. *Новик А.И.* Системы автоматического уравнивания цифровых экстремальных мостов переменного тока. – К.: Наукова думка, 1983. – 224 с.
7. *Shakil Awan, Bryan Kibble, Jurgen Schurr.* Coaxial electrical circuits for interference-free measurements. – London: Institution of Engineering and Technology, 2011. – 321 p.

УДК 681.5; 621.5

ДИСТАНЦІЙНЕ ВИМІРЮВАННЯ НАДМАЛИХ РІЗНИЦЬ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ РЕЗИСТОРНИХ ТЕРМОДАТЧИКІВ

В.Г.Мельник, канд.техн.наук, **А.І.Новік**, докт.техн.наук, **М.П.Рубанчук**, **О.Д.Василенко**, канд.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.
e-mail: melnik@ied.org.ua

Розглянуто варіант мостового вимірювального кола, що працює на змінному струмі, із застосуванням диференційних датчиків на основі мініатюрних тонкоплівкових термоперетворювачів опору. Пристрій має підвищену завадостійкість при вимірюванні слабких теплових потоків. Бібл. 7, рис. 2.

Ключові слова: мостове вимірювальне коло, диференційний датчик, терморезистор, похибка, імпеданс.

TELEMETERING OF OVER SMALL TEMPERATURE DIFFERENCES BY MEANS OF THE DIFFERENTIAL RESISTOR THERMOSENSOR

V.G.Melnyk, A.I.Novik, M.P.Rubanchuk, O.D.Vasylenko
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine. e-mail: melnik@ied.org.ua

An actual task is fixing and quantitative estimation of small difference of temperatures in the nearby areas of space in some branches of science and technique. A purpose of this work is consideration of circuit solutions directed on minimization of influence of noise (fields), parasite impedances, and also analysis of basic errors, accompanying the similar measuring. A bridge measuring circuit, working on an alternating current with the use of differential sensors on the basis of miniature thinfilm resistance thermotransducers, providing the best noise stability for the measuring of weak thermal streams, is offered. Analysis of the obtained expressions shows that in the investigated scheme resistance of cable wires are not entered additive errors in the measurement. A relatively small multiplicative error (about 0,1 %), arising from the impact of these and other resistance on the currents in the bridge branches, is constant and can be considerably reduced well-known methods of errors correction. References 7, figures 2.

Key words: bridge measuring circuit, differential sensor, thermoresistor, error, impedance.

1. *Grinevich F.B., Surdu M.N.* High-accuracy variation measuring systems of alternating current. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 192 p. (Rus)
2. *Gutnikov V.S.* An integrated electronics in measuring devices. – Leningrad: Energoatomizdat, 1988. – 304 p. (Rus)
3. *Investigations on sensor systems and technologies / Edited by H.V. Yelskaia, V.D. Pokhodenko.* – Kyiv: Instytut molekuliarnoi biolohii i henetyky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2006. – 408 p. (Ukr)
4. *Melnyk V.G., Vasylenko O.D., Starodub M.F., Medvedenko M.P.* The highly sensitive thermometric systems for the biomedical and technological measurings // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki". – 2006. – Vol. 3. – Pp. 125–128. (Ukr)
5. *Melnyk V.G., Rubanchuk M.P., Melkumian R.H.* The termosensor system on the basis of measurings of thermal stream parameters // Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Natsionalnogo universytetu im. Tarasa Shevchenka. – 2011. – № 33. – Pp. 167–171. (Ukr)
6. *Novik A.I.* Systems of the automatic balancing of digital extreme bridges of alternating current. – Kiev: Naukova dumka, 1983. – 224 p. (Rus)
7. *Shakil Awan, Bryan Kibble, Jurgen Schurr.* Coaxial electrical circuits for interference-free measurements. – London: Institution of Engineering and Technology, 2011. – 321 p.

Надійшла 17.01.2014
Остаточний варіант 27.01.2014