

А. О. САЛЛЬ
(Ленинград)

**ОБ ОДНОМ УСЛОВИИ
ДОСТИЖЕНИЯ МИНИМУМА ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
МОСТОВОЙ ЦЕПИ С ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯМИ**

1. Измерение многих неэлектрических величин сводится в конечном итоге к регистрации разности $\vartheta_1 - \vartheta_2$, где уменьшаемое и вычитаемое представляют собой отклонения температур термосопротивлений (температурочувствительных электрических сопротивлений) от температуры T окружающей среды. При измерении через термосопротивления пропускают электрический ток j . Порог чувствительности $[\Delta|\vartheta_1 - \vartheta_2|]_{\text{пор}}$ измеряемой разности зависит от среднеквадратических значений колебания Δj тока и колебания ΔT окружающей температуры. Для уменьшения влияния этих колебаний применяют мостовую цепь измерения с двумя термосопротивлениями в качестве соседних плеч моста. Другими двумя плечами моста являются приблизительно равные сопротивления, одно из которых — переменное. Вольт-амперные характеристики термосопротивлений, однако, не могут быть совершенно одинаковыми. Поэтому полной компенсации влияния колебаний Δj и ΔT добиться невозможно.

Исследуем зависимость порога чувствительности моста от превышения Θ температур термосопротивлений в установившемся режиме над температурой окружающей среды за счет джоулева тепла Rj^2 . Обычно это превышение значительно меньше температуры окружающей среды ($\Theta \ll T$) и его полагают [1—7] пропорциональным мощности джоулева тепла

$$\Theta = \frac{Rj^2}{G_0} \quad (1)$$

где G_0 — коэффициент, характеризующий интенсивность передачи тепла от термосопротивления к окружающей среде. Назовем его тепловой проводимостью охлаждения.

2. Приведем формулы для оценки этой тепловой проводимости. Рассмотрим вначале термосопротивление (рис. 1), выполненное в виде тонкой плоской пластинки 1. Она расположена внутри полого призматического или цилиндрического корпуса 2 параллельно плоскостям оснований 3 и 4. Корпус и основания выполнены из хорошо теплопроводящих материалов. Если такое устройство используется в качестве болометрического приемника излучения [7], то одно или оба основания выполняются из прозрачного для излучения материала. Вследствие кон-

векции изменение геометрического положения газонаполненного приемника в пространстве приводит к изменению температур термосопротивлений. Для устранения этого влияния уменьшают объем полости камеры. Это уменьшение рационально до некоторого предела, определяемого условиями обеспечения максимальной (или, в крайнем случае, близкой к максимальной) чувствительности. Например, оптимальный диаметр цилиндрической полости разработанного нами приемника излучения равен 2 см, а глубина 1 см. Для более полного устранения конвекции полость разделяют на части тонкими перегородками 5 из материала (слюда и др.), хорошо пропускающего излучение. При необходимости можно также подобрать наполняющий камеру газ и его давление. Благодаря применению указанных средств конвективная теп-

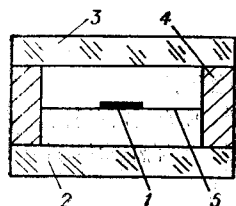


Рис. 1.

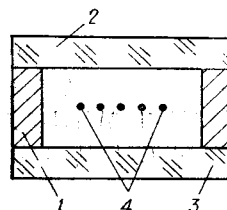


Рис. 2.

ловая проводимость в приемнике во много раз меньше кондуктивной. Нагреваемые электрическим током термосопротивления применяются также в целом ряде приборов, использующих тепловые, термохимические, термоманнитные и другие явления. Конвекция в такого рода датчиках также практически полностью устраняется [1]. Таким образом, существует достаточно широкий класс таких задач, связанных с применением термосопротивлений в мостовых цепях измерения, в которых нежелательна конвективная теплопередача, и она устраняется сравнительно простыми средствами. Для решения этих задач в первую очередь необходимо иметь хотя бы приближенные формулы для оценки тепловых проводимостей охлаждения.

Для случая, когда плоское термосопротивление 1 расположено в центре призматической или цилиндрической камеры на одинаковых расстояниях до оснований 3 и 4, учитывая теплопередачу теплопроводностью (через газ и электрические соединительные проводники) и излучением, приближенно получим

$$G_0 \approx \frac{2S\lambda}{l} + n_r \lambda \sqrt{S} + \frac{\lambda_n S_n}{l_n} + 4\varepsilon \sigma S T^3, \quad (2)$$

где S — площадь поверхности термосопротивления; l — глубина камеры; λ — коэффициент теплопроводности газа, заполняющего камеру; n_r — численный коэффициент, определяемый геометрическими размерами и конфигурациями термосопротивления и камеры (значения этого коэффициента находятся в пределах от 2,4 до 13); λ_n — коэффициент теплопроводности материала, из которого выполнены проводники, соединяющие термосопротивление с электрической схемой; S_n и l_n — суммарное поперечное сечение и длины соединительных проводников; σ — постоянная Стефана — Больцмана; ε — коэффициент черноты поверхности термосопротивления.

В сумме (2) первые два слагаемых учитывают передачу тепла теплопроводностью через газ, третье слагаемое — через соединительные проводники [5] и четвертое — тепловым излучением [7]. Если уменьшать

К такой предельной (минимально возможной) тепловой проводимости можно приблизиться, используя температурочувствительные элементы, выпускаемые отечественной промышленностью. Пусть, например, требуется изготовить болометр в виде круглой пластинки с площадью поверхности $S=0,1 \text{ см}^2$. В качестве основы для изготовления болометра возьмем одно из термосопротивлений [8], имеющих площадь поверхности менее 10^{-2} см^2 , а длину и сечение платиновых соединительных проводников $l_n=1 \text{ см}$ и $S_n=10^{-5} \text{ см}^2$. Дополним термосопротивление до круглой пластинки требуемых размеров веществом, поглощающим излучение в исследуемой области спектра. Поместим такое термосопротивление в центр заполненной воздухом камеры с глубиной $l=1 \text{ см}$ и диаметром 2 см . Коэффициент n_r для круглой пластинки равен 3,2. При этом расчет по формуле (2) дает значение $G_0=3 \cdot 10^{-4} \text{ вт/град}$, а по формуле (3) всего на 19% меньше приведенного значения. Таким образом, уже в настоящее время удается приблизиться к такой идеальной конструкции термосопротивления, при которой теплопередача осуществляется преимущественно теплопроводностью через газ.

Выражение (3) годится и для сферических поверхностей S , если положить $n_r \approx 3,5$. Для того чтобы эту формулу приближенно распространить и на другие конфигурации термосопротивлений, в частности на квадратную пластину, то необходимо принять $n_r \approx 4$.

Рассчитаем теперь тепловую проводимость термосопротивления рамочного типа (рис. 2). Камера также состоит из цилиндрического или призматического корпуса 1 и хорошо теплопроводящих оснований 2 и 3. Термосопротивление выполнено в виде рамки из большого числа достаточно тонких металлических нитей 4, натянутых параллельно плоскостям оснований. На рисунке изображены в виде кружочков сечения нитей с плоскостью листа. В этом случае

$$G_0 \approx \frac{4 S_p \lambda}{l} + \frac{3 \pi N \lambda_n d_n^2}{l_n}, \quad (4)$$

где S_p — площадь, занимаемая рамкой; λ — коэффициент теплопроводности газа, заполняющего камеру; l — глубина камеры (расстояние между основаниями); N — число нитей в рамке; λ_n — коэффициент теплопроводности материала нитей термосопротивления; d_n — диаметр нити; l_n — длина нити. Первое слагаемое в правой части формулы (4) учитывает теплопередачу через газ, а второе — тепловую проводимость нитей.

Термосопротивления изготавливаются обычно [1] из платиновых нитей, причем в отечественных серийных промышленных приборах [9] диаметр провода равен 20 мк. Рамки с параметрами $S_p=2 \text{ см}^2$, $N=9$, $l_n=2 \text{ см}$, $d_n=0,002 \text{ см}$ и $R \approx 55 \text{ ом}$ применялись в заполненных воздухом или азотом цилиндрических полостях диаметром 2 см и глубиной $l=1 \text{ см}$. Тепловая проводимость при этом оказалась равной $G_0 \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ вт/град}$.

Во многих приборах [1, 9] в качестве термосопротивления используется металлическая нить, протянутая через центр заполненной газом полости. Если на рис. 2 удалить все нити, кроме центральной, то и получим пример рассматриваемого случая. Здесь так же, как и раньше,

тепловая проводимость состоит из двух слагаемых, учитывающих по-
 зонь теплопередачу через газ и через нить:

$$G_0 \approx \frac{2 \pi \lambda l_n}{\ln \left(\frac{4 V_k}{S_k d_n} \right)} + \frac{3 \pi \lambda_n d_n^2}{l_n}, \quad (5)$$

где V_k и S_k — объем камеры и площадь поверхности ее стенок. Осталь-
 ные обозначения приведены выше. Нами использовалась платиновая
 нить с диаметром $d_n = 2 \cdot 10^{-3}$ см и длиной $l_n = 2$ см. Она устанавли-
 валась в цилиндрической полости диаметром 2 см и глубиной 1 см
 приемника излучения, заполненного смесью CO и N₂ (коэффициенты
 теплопроводности компонентов смеси практически одинаковы). При
 этом получено $G_0 \approx 5 \cdot 10^{-4}$ вт/град.

За последние годы в промышленных газоанализаторах теплопро-
 водности получили широкое распространение [9] термосопротивления,
 которые представляют собой платиновую проволоку, намотанную на
 стеклянный капилляр и сверху покрытую стеклом. Для инфракрасного
 приемника (диаметр цилиндрической полости равен 2 см, а глуби-
 на 1 см) были изготовлены по такой же технологии термосопротивле-
 ния с рабочей длиной $l_n = 2$ см и диаметром $d_n = 0,03$ см. Их парамет-
 ры: $R = 45$ ом и $G_0 \approx 10^{-3}$ вт/град. Близкое к этому значению (около
 $9 \cdot 10^{-4}$ вт/град) можно получить и расчетным путем, если использовать
 первое слагаемое в формуле (5). Вместо второго слагаемого в формуле
 появляется более сложное выражение, учитывающее теплопередачу
 по токопроводам и стеклянному капилляру. Однако эта поправка невелика.
 Это следует также из сравнения приведенных выше эксперимен-
 тальных и расчетных значений.

3. Для описанных выше термосопротивлений в результате экспери-
 ментальных исследований и расчетов с использованием приведенных
 формул удалось найти количественные зависимости, связывающие
 влияние напряжения питания и температуры со степенью различия
 между вольт-амперными характеристиками термосопротивлений. Эти
 зависимости оказались одинаковыми для всех рассмотренных типов
 термосопротивлений после того, как степень различия была охаракте-
 ризована отношениями:

$$\left| \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta} \right|; \quad \left| \frac{R_1 \theta_1 - R_2 \theta_2}{R \theta} \right|,$$

где $\theta = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$; $R = \frac{R_1 + R_2}{2}$; θ_1 и θ_2 — превышения температур
 первого и второго термосопротивлений над температурой окружаю-
 щей среды; R_1 и R_2 — значения сопротивлений.

В общем случае для результирующего порога чувствительности
 $[\Delta |\vartheta_1 - \vartheta_2|]_{\text{пор}}$, ограничиваемого колебаниями тока и температуры, а
 также помехами на входе регистрирующего устройства, подключенного
 к измерительной диагонали моста, получим

$$\begin{aligned} [\Delta |\vartheta_1 - \vartheta_2|]_{\text{пор}}^2 \approx & \left[4 \left| \frac{R_1 \theta_1 - R_2 \theta_2}{R \theta} \right| \left| \frac{\Delta j}{j} \right| \right]^2 \theta^2 + \\ & + \left[\alpha_R \left| \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta} \right| \Delta T \right]^2 \theta^2 + \left[\left(1 + \frac{R}{R_{\text{вх}}} \right) \frac{2 (\Delta U)_{\text{по}}}{\alpha_R R j} \right]^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где α_R — температурный коэффициент изменения сопротивления; $R_{\text{вх}}$ —
 входное сопротивление регистрирующего устройства; $(\Delta U)_{\text{по}}$ —
 среднеквадратический порог чувствительности регистрирующего устрой-

ства; α_λ — температурный коэффициент изменения теплопроводности газа, окружающего термосопротивление.

Выражение (6) получено нами при учете нелинейных зависимостей в болометрическом мосте (нелинейность вольт-амперных характеристик термосопротивлений из-за изменения сопротивлений под действием джоулева тепла). В линейном же приближении колебания окружающей температуры и тока моста не ограничивают порога чувствительности последнего. Первые два слагаемых в сумме (6) обусловлены колебаниями Δj тока и температуры ΔT . Эти колебания предполагаются настолько медленными, что период колебаний больше времени установления теплового режима. Последнее слагаемое в правой части равенства (6) учитывает порог чувствительности регистрирующего устройства. Используя соотношение (1), выделяем в этом слагаемом явную зависимость от Θ :

$$\left[\left(1 + \frac{R}{R_{\text{вх}}} \right) \frac{2(\Delta U)_{\text{пор}}}{\alpha_R R j} \right]^2 = \left[\left(1 + \frac{R}{R_{\text{вх}}} \right) \frac{2(\Delta U)_{\text{пор}}}{\alpha_R \sqrt{R G_0}} \right]^2 \frac{1}{\Theta}. \quad (7)$$

Упомянутые выше относительные величины $\left| \frac{\theta_1 - \theta_2}{\Theta} \right|$ и $\left| \frac{R_1 \theta_1 - R_2 \theta_2}{R \Theta} \right|$ не зависят от Θ , а определяются допусками на изготовление термосопротивлений или точностью их подбора в пару. Это подтверждается, например, неравенствами:

$$0 \leq \left| \frac{\theta_1 - \theta_2}{\Theta} \right| \leq \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta G_0}{G_0}; \quad 0 \leq \left| \frac{R_1 \theta_1 - R_2 \theta_2}{R \Theta} \right| \leq 2 \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta G_0}{G_0}, \quad (8)$$

где $\frac{\Delta R}{R}$ и $\frac{\Delta G_0}{G_0}$ — максимально возможные относительные отклонения, возникающие при изготовлении. Величины $\frac{\Delta G_0}{G_0}$ можно оценить, пользуясь приведенными выше выражениями для G_0 , по соответствующим возможным отклонениям $\frac{\Delta V_{\text{к}}}{V_{\text{к}}}$, $\frac{\Delta S_{\text{к}}}{S_{\text{к}}}$, $\frac{\Delta l}{l}$ и др. Влиянием смещения термосопротивления от центрального положения при этом обычно можно пренебречь.

Учитывая приведенные результаты, найдем оптимальное превышение Θ , соответствующее минимуму порога чувствительности моста, из условия

$$\frac{\partial}{\partial \Theta} [\Delta |\theta_1 - \theta_2|]_{\text{пор}}^2 = 0. \quad (9)$$

Используя равенства (6) и (7), найдем

$$\Theta_{\text{опт}} = \sqrt[3]{ \frac{2 \left[\left(1 + \frac{R}{R_{\text{вх}}} \right) \frac{(\Delta U)_{\text{пор}}}{\alpha_R \sqrt{G_0 R}} \right]^2}{\left[\alpha_\lambda \left| \frac{\theta_1 - \theta_2}{\Theta} \right| \Delta T \right]^2 + \left[4 \left| \frac{R_1 \theta_1 - R_2 \theta_2}{R \Theta} \right| \frac{\Delta j}{j} \right]^2} }. \quad (10)$$

Рассчитаем в качестве примера оптимальный перегрев платинового термосопротивления. Положим $R=50 \text{ ом}$; $G_0 = 10^{-3} \text{ вт/град}$; $\alpha_R = 4 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ и $\alpha_\lambda \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$. Последнее значение наблюдается, если термосопротивление окружено смесью N_2 , O_2 , CO и CO_2 . Это наиболее распространенный случай анализа [9]. Среднеквадрати-

ческий порог чувствительности регистрирующего устройства, подключаемого к измерительной диагонали моста, полагаем равным $(\Delta U)_{\text{пор}} = 10^{-5} \text{ в}$ (в лабораторных условиях можно достигнуть меньших значений порога, но мы ограничиваемся рассмотрением только таких устройств, которые уже применимы в промышленности). Входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ также сравнительно несложно сделать значительно больше сопротивления R плеча моста. Из приведенных в [10] результатов следует, что среднеквадратическое колебание ΔT температуры обычно близко к 10 град , а среднеквадратическое колебание напряжения питающей сети 2% относительно номинального значения. Благодаря использованию промышленных стабилизаторов [11] относительное среднеквадратическое колебание $\frac{\Delta j}{j}$ тока питания становится соизмеримым с $5 \cdot 10^{-3}$. Существующие в настоящее время технология изготовления и методы проверки характеристик термосопротивлений позволяют достаточно точно подбирать их в пары. Эта точность такова, что введенные выше отношения оказываются обычно равными: $\left| \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta} \right| = 0,03$ и $\left| \frac{R_1 \theta_1 - R_2 \theta_2}{R \theta} \right| = 0,05$. Подставляя числовые значения в формулу (10), получим $\theta_{\text{опт}} \approx 5 \text{ град}$.

4. С целью уменьшения порога чувствительности измеряемую величину часто модулируют. Например, для устранения влияния изменений температуры окружающей среды измеряемый поток электромагнитного излучения модулируется и во избежание потери чувствительности модуляция осуществляется с достаточно низкой частотой. Покажем, что полученные результаты справедливы и для этого случая.

Обозначим через ϑ превышение температуры термосопротивления (болметра) над температурой окружающей среды под действием тепла, выделяющегося в нем в единицу времени при поглощении измеряемого потока Φ . При оговоренном выше ограничении на частоту модуляции имеем

$$\vartheta = \frac{\varepsilon \Phi}{G}. \quad (11)$$

Тепловую проводимость G в отличие от G_0 назовем сигнальной. Необходимость различать G_0 и G вытекает из следующего. Джоулево тепло обычно можно считать выделяющимся равномерно по площади болметра. Поэтому проводимости G_0 и G могут быть близки по величине только в том случае, если поток излучения падает на болметр с равномерной поверхностной плотностью. Если же поток сфокусировать в центр болметра, то сигнальная проводимость G уменьшится. Как показали исследования, проводимость G уменьшается при этом не более чем в 3 раза. Несмотря на это, учитывать неравенство $G \neq G_0$ обычно необходимо.

Порог $(\Delta \Phi)_{\text{пор}}$ чувствительности приемника излучения пропорционален порогу $[\Delta |\vartheta_1 - \vartheta_2|]_{\text{пор}}$ чувствительности измерения разности температур с помощью мостовой цепи

$$(\Delta \Phi)_{\text{пор}} = \frac{G}{\varepsilon} [\Delta |\vartheta_1 - \vartheta_2|]_{\text{пор}}. \quad (12)$$

Поэтому и для болметрического приемника справедливо условие (9) и равенство (10), если в последнем для случая модулированного излучения принять $\Delta T = 0$.

Оптимальный выбор собственного перегрева термосопротивлений позволил резко уменьшить порог чувствительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Эйкен. Физико-химический анализ в производстве. Л., ОНТИ, 1936.
2. Ф. Е. Темников, Р. Р. Харченко. Электрические измерения неэлектрических величин. М., Госэнергоиздат, 1948.
3. Б. С. Сотсков. Основы расчета и проектирования элементов автоматических и телемеханических устройств. М., Госэнергоиздат, 1953.
4. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений. М., Гостехиздат, 1953.
5. А. О. Салль. О тепловом расчете некоторых узлов приборов.— Приборостроение, 1958, № 8.
6. А. А. Гофман. К вопросу о рациональном выборе характеристик термодатчиков сопротивления.— В сб. «Автоматический контроль и электрические измерения», вып. 1. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1960.
7. Р. Смит, Ф. Джонс, Р. Чесмер. Обнаружение и измерение инфракрасного излучения. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
8. Полупроводниковые термосопротивления.— Сб. статей под ред. Б. С. Сотскова. М.—Л., Гостехиздат, 1959.
9. В. А. Павленко. Газоанализаторы. М.—Л., «Машиностроение», 1965.
10. П. В. Новицкий. Основы информационной теории измерительных устройств. Л., «Энергия», 1968.
11. А. М. Илюкович, Б. Р. Шулман. Стабилизаторы и стабилизированные источники питания переменного тока. М.—Л., «Энергия», 1965.

*Поступила в редакцию
8 октября 1968 г.,
окончательный вариант —
6 мая 1969 г.*