

Датчики на основе тензорезисторов и принципы их применения в измерениях

Тензорезисторы [1–3] используются для измерения деформации в твёрдых телах. На их основе строят датчики веса, давления, силы, перемещения, момента, ускорения, вибрации, натяжения, крутящего момента, остаточных напряжений в механических конструкциях и деталях машин после их обработки и т.д. Принцип действия тензорезистора основан на изменении электрического сопротивления твёрдого тела при его деформации приложенной силой.

Сопротивление твёрдого тела длиной L с площадью поперечного сечения определяется формулой $R = \rho \frac{L}{S}$, где ρ –

удельное сопротивление. При приложении к телу растягивающей силы F (рис. 1) происходит деформация: увеличивается длина тела на ΔL и уменьшается площадь поперечного сечения на ΔS . У большинства тел изменяется также удельное сопротивление на величину $\Delta \rho$. В случае когда эти приращения малы, путём логарифмирования и последующего дифференцирования обеих частей формулы для R получим:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta S}{S}. \quad (1)$$

Поскольку площадь поперечного сечения проводника пропорциональна его характерному поперечному размеру (в случае круглого сечения $S = \pi d^2/4$, для прямоугольного сечения $c \times d$ площадь $S = kd^2$, если $c = kd$), то при $\Delta d \ll d$

в обоих случаях можно получить соотношение $\frac{\Delta S}{S} = 2 \frac{\Delta d}{d}$. Поэтому

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} + 2 \frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1+2\nu) \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1+2\nu)\epsilon, \quad (2)$$

где $\nu = \frac{\Delta d}{d} / \frac{\Delta L}{L}$ – коэффициент Пуассона, для металлов рав-

ный $\nu = 0,25 \dots 0,4$; $\epsilon = \Delta L/L$ – относительное удлинение (относительная деформация) тела. Величина ϵ является безразмерной, но поскольку она измеряется тысячными и миллионными долями, для удобства оперирования числами используют безразмерные единицы измерения, такие как мм/м,

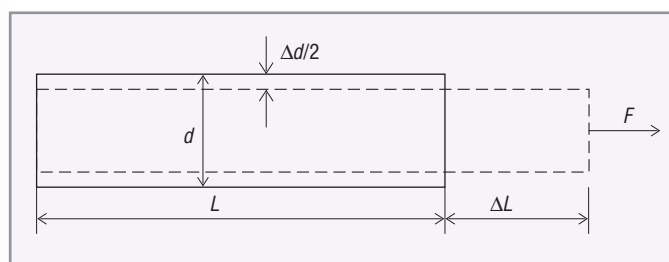


Рис. 1. К понятию деформации

мкм/м, а в зарубежной литературе чаще всего применяется единица микрострейн, равная 10^{-6} .

У металлов удельное сопротивление меняется слабо, поэтому

$$\frac{\Delta R}{R} \approx (1+2\nu)\epsilon, \quad (3)$$

то есть относительное изменение сопротивления линейно зависит от относительного изменения длины.

Чувствительность тензорезистора к изменению его длины характеризуется коэффициентом относительной тензочувствительности GF (Gauge Factor):

$$GF = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta R}{R} / \epsilon, \quad (4)$$

или, используя (2), получим:

$$GF = (1+2\nu) + \frac{\Delta \rho / \rho}{\epsilon}. \quad (5)$$

Коэффициент тензочувствительности GF для большинства металлических тензодатчиков примерно равен 2, для платины $GF = 6,1$, для некоторых специальных сплавов он может достигать до 10.

Для измерения силы с помощью тензорезисторов используют закон Гука, согласно которому при упругой деформации механическое напряжение σ пропорционально относительной деформации ϵ :

$$\sigma = K \cdot \epsilon,$$

где K – модуль упругости.

Напряжением σ называется физическая величина, численно равная упругой силе F , приходящейся на единицу площади поперечного сечения тела S (рис. 1):

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

Используя приведённые соотношения, можно выразить величину силы через относительное изменение сопротивления тензорезистора в виде:

$$F = S \cdot \sigma = S \cdot K \cdot \epsilon. \quad (6)$$

Подставляя вместо ϵ его значение из (4), получим:

$$F = S \cdot K \cdot \frac{\Delta R / R}{GF}. \quad (7)$$

Таким образом, измерение силы с помощью тензорезистора сводится к измерению его сопротивления или напряжения на выходе измерительного моста, которое зависит от сопротивления – см. (9).

ДАТЧИКИ НА ОСНОВЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

Конструктивно металлический датчик на основе тензорезистора (тензодатчик) состоит из очень тонкого провода или

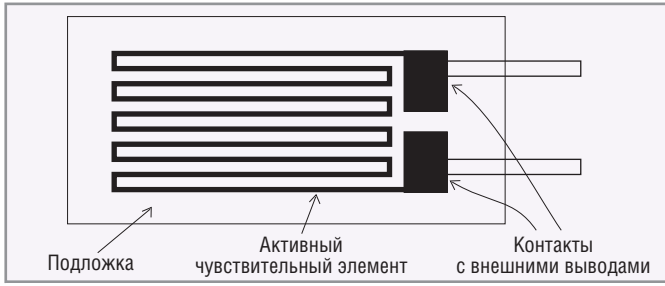


Рис. 2. Структура металлического тензодатчика

чаще из металлической фольги, сформированной в виде змейки (рис. 2) и нанесённой на подложку (носитель), которая непосредственно приклеивается к испытываемому телу. Типовая длина тензодатчиков колеблется от 0,2 мм до 10 см.

Змеевидная структура датчика обеспечивает большое относительное изменение длины фольги в направлении вдоль датчика и очень малое изменение при растяжении датчика в поперечном направлении. Поэтому коэффициент Пуассона в такой структуре минимален.

Серийные тензодатчики имеют сопротивление от 30 Ом до 3 кОм при типовых значениях 120 Ом, 350 Ом и 1 кОм. Материалами для них служат константан (45% Ni, 55% Cu), платина и её сплавы, нихром (80% Ni, 20% Cr), манганин (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni), никель и др.

Для точной передачи растяжения образца через подложку на металлический проводник очень важно правильно прикрепить датчик к испытываемому образцу. Для этого лучше всего пользоваться информацией, предоставляемой изготовителем тензодатчика.

Длина чувствительного элемента тензодатчика и длина его подложки изменяются в зависимости от температуры. Поэтому несмотря на специальные меры, принимаемые при изготовлении тензодатчиков их производителями, существует проблема снижения температурной чувствительности. Температурная чувствительность определяется двумя физическими явлениями: зависимостью омического сопротивления материала тензорезистора от температуры и паразитным тензорезистивным эффектом, который возникает вследствие несогласованности температурных коэффициентов расширения тензорезистора и материала объекта, на который наклеен тензорезистор.

Измерения с помощью тензодатчиков

Измерения с помощью тензодатчиков требуют регистрации очень малых изменений сопротивления. Например, относительное изменение сопротивления, вызываемое относительным растяжением 0,0005 при тензорезистивном коэффициенте, равном 2, составит 0,1%, что для тензодатчика сопротивлением 120 Ом эквивалентно сопротивлению всего лишь 0,12 Ом. Чтобы измерять столь малое изменение сопротивления и скомпенсировать температурную погрешность, тензодатчики практически всегда используют в мостовой схеме (мост Уитстона, рис. 3), подключённой к источнику напряжения или тока (источнику питания моста).

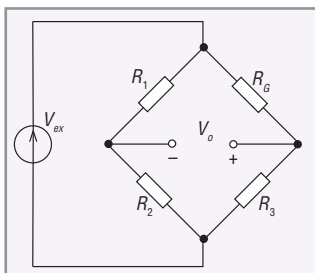


Рис. 3. Мост Уитстона с источником напряжения

Общепринятого стандарта для питания моста не существует. Типовыми являются напряжения 3 В и 10 В. Ток через тензодатчик обычно составляет от 2 до 30 мА для датчиков с со-

противлением от 1 кОм до 120 Ом. Напряжение питания моста должно быть по возможности большим, чтобы увеличить отношение сигнала к шуму, и в то же время достаточно малым, чтобы минимизировать погрешность, вызванную саморазогревом датчика. Особые требования предъявляются к точности и стабильности напряжения питания моста, если не используется шестипроводная схема подключения датчика (см. раздел «Влияние сопротивления соединительных проводов»).

Для проверки правильности калибровки измерительной схемы используют резистор с известным (калиброванным) значением сопротивления, которым шунтируют тензодатчик. Показания измерительной системы должны соответствовать расчётному значению для этого сопротивления.

В связи с малой величиной сигнала от тензодатчика во многих случаях целесообразно применять фильтр, ослабляющий помехи с частотой 50 Гц. Например, в модуле ввода сигналов тензодатчика NL-2SG фирмы НИЛ АП использован sinc-фильтр 3-го порядка, подавляющий помеху с частотой 50 Гц на 120 дБ.

Выходное напряжение измерительного моста (рис. 3) равно:

$$V_o = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_G} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V_{ex} \tag{8}$$

При условии баланса моста ($R_1/R_2 = R_G/R_3$) его выходное напряжение $V_o = 0$. Малейшая разбалансировка вследствие изменения сопротивления тензодатчика приводит к появлению напряжения на выходе.

Обозначим абсолютное изменение сопротивления тензодатчика через ΔR . Тогда, как следует из (4), $\Delta R = R_G \cdot GF \cdot \epsilon$, где R_G – сопротивление тензорезистора в ненапряжённом состоянии.

Если сбалансировать мост таким образом, чтобы при отсутствии растяжения тензодатчика $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_G$, то из (8) получим:

$$\frac{V_o}{V_{ex}} = \frac{R_G}{R_G + R_G + \Delta R} - \frac{R_2}{R_2 + R_2} = \frac{1}{2 + GF \cdot \epsilon} - \frac{1}{2} = \frac{GF \cdot \epsilon}{4 + 2 \cdot GF \cdot \epsilon},$$

или окончательно:

$$\frac{V_o}{V_{ex}} = \frac{GF \cdot \epsilon}{4} \cdot \left(\frac{1}{1 + GF \cdot \epsilon / 2} \right) \tag{9}$$

Таким образом, зная напряжение на выходе моста, из формулы (9) мы можем найти относительное удлинение тензодатчика ϵ и из (6) – силу F .

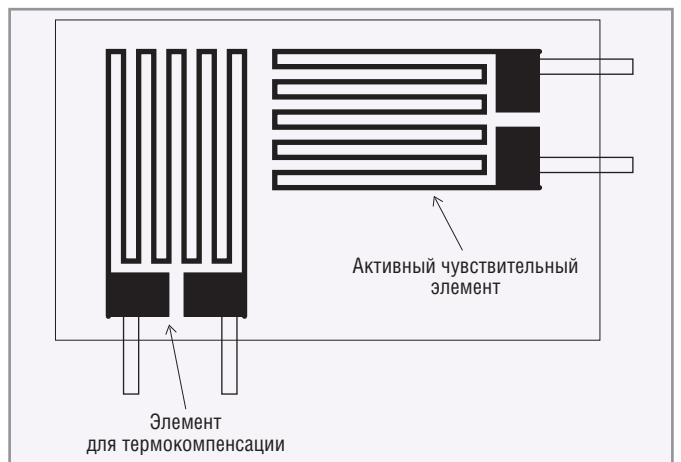


Рис. 4. Использование двух тензорезисторов для компенсации температурной погрешности

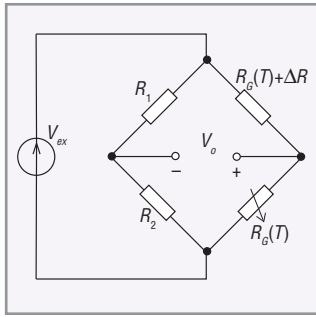


Рис. 5. Полумостовая схема включения тензорезисторов для компенсации температурной погрешности

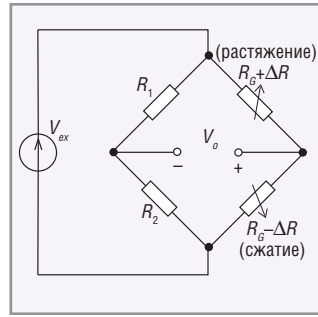


Рис. 6. Включение двух датчиков для компенсации температурной погрешности, $\epsilon = -\frac{2V_\gamma}{GF}$

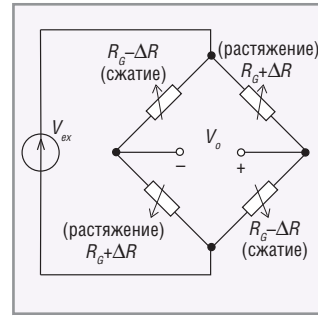


Рис. 7. Использование четырёх тензодатчиков для повышения чувствительности схемы измерения и компенсации температурной погрешности, $\epsilon = -\frac{V_\gamma}{GF}$

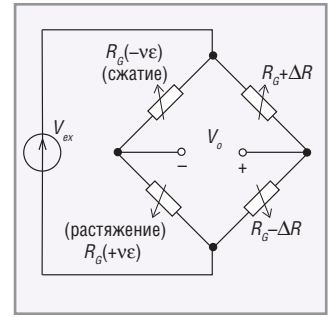


Рис. 8. Схема с четырьмя тензодатчиками, два из которых расположены перпендикулярно направлению силы, $\epsilon = -\frac{2 \cdot V_\gamma}{GF \cdot (v+1)}$

Поскольку относительное удлинение зависит также от температуры, для компенсации температурной составляющей используют два тензочувствительных элемента, расположенных на общей подложке перпендикулярно друг другу (рис. 4). При этом температурные удлинения обоих элементов одинаковы, а удлинения вследствие воздействия деформирующей силы будут разные. Используя эти элементы в разных плечах измерительного моста (рис. 5), можно частично скомпенсировать температурную погрешность.

Компенсация температурной погрешности, выполняемая изготовителем тензодатчиков, обычно не позволяет получить ошибку менее 10 микрострейн на градус. Однако, используя полиномиальную аппроксимацию температурной зависимости сопротивления для её программной компенсации, можно снизить температурную погрешность до 1 микрострейна на градус.

В полумостовой схеме (рис. 5) можно использовать два тензодатчика с нескомпенсированной температурной погрешностью, если один из них работает на растяжение, а второй — на сжатие, например в случае измерения механического напряжения изгибаемой балки. Таким образом можно повысить чувствительность схемы измерения в 2 раза и одновременно скомпенсировать температурную погрешность (рис. 6).

Дальнейшего повышения чувствительности схемы измерений можно достичь, если использовать четыре тензодатчика, два из которых работают на растяжение, а два других — на сжатие (рис. 7).

В схеме на рис. 6 относительное выходное напряжение моста равно:

$$\frac{V_o}{V_{ex}} = \frac{-GF \cdot \epsilon}{2},$$

а с учётом начального смещения напряжения вследствие дисбаланса моста V_{CM} получим:

$$\frac{V_o - V_{CM}}{V_{ex}} = \frac{-GF \cdot \epsilon}{2}.$$

Если ввести обозначение

$$V_r = \frac{V_o - V_{CM}}{V_{ex}},$$

то для измерительной цепи, показанной на рис. 6, относительное растяжение тензодатчика в зависимости от относительного приращения напряжения на выходе моста V_r будет равно

$$\epsilon = -\frac{2V_\gamma}{GF}.$$

Зная ϵ и пользуясь законом Гука в форме (6), можно найти искомую силу F .

Для других схем включения тензодатчиков, показанных на рис. 7–9, аналогичные формулы приведены в соответствующих подрисуночных подписях.

Начальная балансировка моста может быть выполнена как аппаратно (с помощью резисторов), так и программно. Эти методы имеют принципиальные различия.

Если мост не сбалансирован с помощью резисторов, то на его выходе присутствует напряжение дисбаланса V_{CM} ,

которое складывается с полезным сигналом V_c , то есть $V_0 = V_{CM} + V_c$. Если верхняя граница диапазона измерения напряжения (напряжение насыщения усилителя) равна V_{max} , то

коэффициент усиления не может быть больше, чем $\frac{V_{max}}{V_{CM} + V_c}$,

то есть максимально возможный коэффициент усиления сигнала K_c на выходе несбалансированного моста ограничивается

напряжением дисбаланса: $K_c \leq \frac{V_{max}}{V_{CM}}$. Например, при ти-

повом значении $V_{max} = 2,5$ В и $V_{CM} = 25$ мВ коэффициент усиления сигнала не может быть больше 100. Однако практически необходимое усиление достигает 2000 (см. описание прибора SCXI-1121 фирмы National Instruments).

Таким образом, несмотря на возможность компенсации смещения программным способом, этот метод ограничивает возможность увеличения чувствительности измерительной системы. Им можно пользоваться для компенсации только небольших напряжений дисбаланса моста.

Влияние сопротивления соединительных проводов

В предыдущих измерительных цепях не были учтены сопротивления подводящих проводов. Однако при использова-

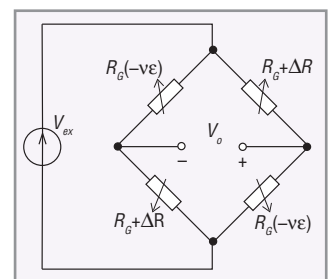


Рис. 9. Схема с четырьмя тензодатчиками, но с отличающимся от представленного на рис. 8 размещения датчиков в плечах моста, $\epsilon = \frac{-2 \cdot V_\gamma}{GF \cdot [(v+1) - V_\gamma \cdot (v-1)]}$

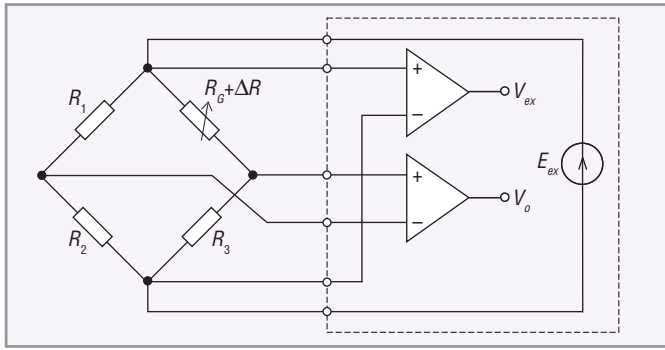


Рис. 10. Шестипроводное подключение измерительного моста

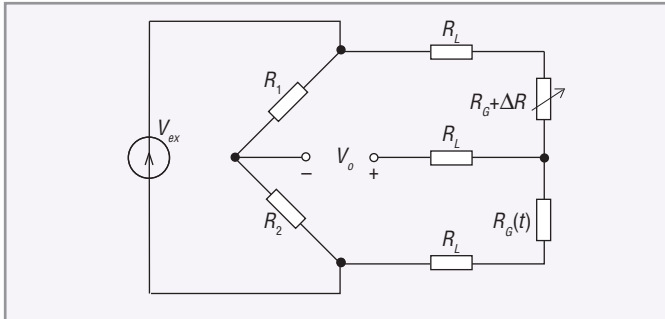


Рис. 11. Подсоединение тензодатчика с внутренним термокомпенсирующим элементом, $\varepsilon = \frac{-4 \cdot V_{\gamma}}{GF \cdot (1 + 2 \cdot V_{\gamma})} \left(1 + \frac{R_L}{R_G}\right)$

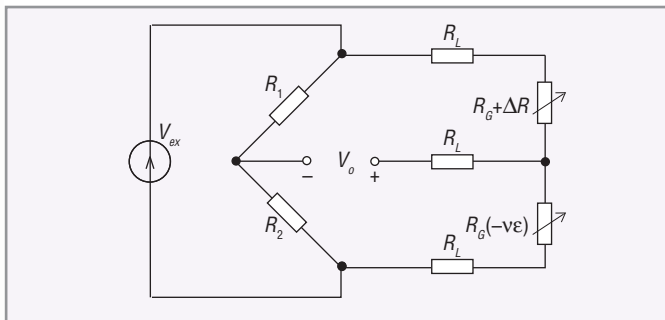


Рис. 12. Включение тензорезистивных элементов, один из которых (верхний) расположен вдоль направления силы, второй (нижний) – перпендикулярно ему, $\varepsilon = \frac{-4 \cdot V_{\gamma}}{GF \cdot [(1+v) - 2 \cdot V_{\gamma} \cdot (v-1)]} \left(1 + \frac{R_L}{R_G}\right)$

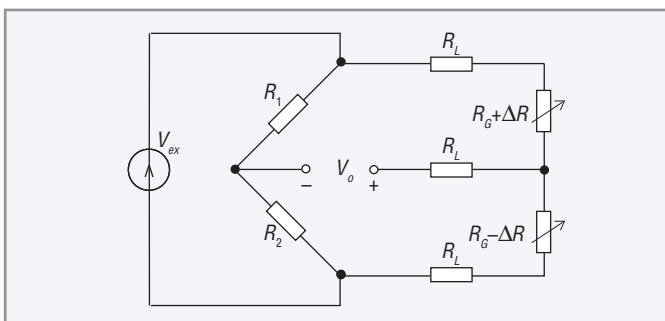


Рис. 13. Схема включения двух датчиков, один из которых работает на растяжение, второй – на сжатие (см. также рис. 6), $\varepsilon = \frac{-2 \cdot V_{\gamma}}{GF} \left(1 + \frac{R_L}{R_G}\right)$

нии низкоомных датчиков они могут достигать единиц и десятков ом, что вносит значительную погрешность в результат измерения.

Для решения этой проблемы весь измерительный мост обычно располагают рядом с датчиком, а сигналы с выхода моста измеряют модулями с высокоомным (потенциальным) входом. Для исключения погрешности, вызванной падением напряжения на проводах, передающих к мосту напряжение питания V_{ex} , используют шестипроводное подключение моста (рис. 10). В этой цепи напряжение питания моста не задаётся, а измеряется. Поэтому падение напряжения на проводах питания не вносит погрешность в величину V_{ex} , которая используется в расчётных формулах.

Если сопротивления проводов невозможно сделать достаточно малыми, их измеряют и учитывают в дальнейших расчётах с целью исключения вносимой ими погрешности. В подрисовочных подписях к рис. 11–13 приведены соответствующие формулы, которые могут быть реализованы программно в микропроцессоре модуля ввода сигналов тензодатчиков или в компьютере.

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

При использовании тензорезисторов большинство источников погрешностей аналогичны тем, что возникают при использовании терморезисторов. Основными компонентами погрешностей являются следующие:

- случайная погрешность, вызванная технологическим разбросом сопротивлений тензорезисторов;
- систематическая погрешность, вызванная термоэлектрическим эффектом;
- тепловой и фликкер-шум измеряемого сопротивления;
- температурная погрешность, вызванная разогревом датчика протекающим током;
- погрешность, связанная с разностью температурных коэффициентов расширения тензорезистора и материала объекта, на который наклеен тензорезистор;
- погрешность метода (схемы измерения) сопротивления, зависящая от длины проводов и точности измерения их сопротивления;
- внешние наводки;
- сопротивление контактов;
- «ползучесть» сопротивления длительно нагруженного тензорезистора;
- погрешность измерительного модуля ввода.

Вследствие очень малой чувствительности тензорезисторов особую роль играют наведённые помехи. Для их уменьшения используют не витые пары, а четыре плетёных провода, в которых попарно параллельно соединяют провода, проходящие во взаимно перпендикулярных плоскостях. Это устраняет индуктивность обычной витой пары, которая представляет собой катушку индуктивности, если смотреть на витую пару с торца [4]. ●

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с.
2. ГОСТ 20420-75. Тензорезисторы. Термины и определения.
3. ГОСТ 21616-91. Тензорезисторы. Общие технические условия.
4. Noise Control in Strain Gage Measurements. Tech. Note TN-501-2. – Vishay Micro-Measurements, 2007. – 8 p.