

Применение тензодатчиков с системой *RealLab!*

➤ ВВОДНЫЕ ПОНЯТИЯ

Деформацией твердого тела называется изменение его размеров и объема. Деформация тела под действием приложенной силы называется растяжением или сжатием. Сжатие можно рассматривать как отрицательное растяжение. Деформация называется *упругой*, если она исчезает после прекращения действия силы. Неупругая деформация называется *пластической*. *Относительное растяжение* (относительная деформация) ε определяется как

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (1)$$

где ΔL - абсолютное растяжение, L - размер образца вдоль направления приложения силы (рис.1).

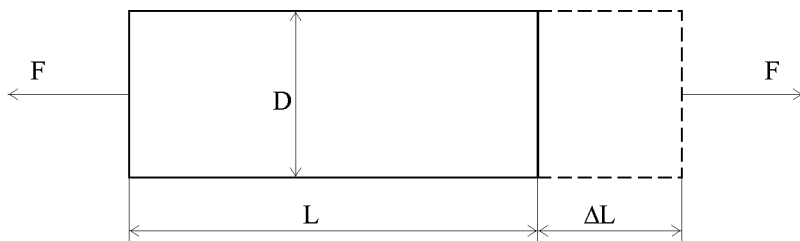


Рис.1. К понятию деформации

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

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (2)$$

При упругой деформации напряжение σ пропорционально относительной деформации (закон Гука):

$$\sigma = K \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

где K - *модуль упругости*. Величина, обратная K , называется *коэффициентом упругости*. Напряжение, при котором нарушается закон Гука, называется *пределом пропорциональности*. В случае продольного растяжения (сжатия) модуль упругости называется *модулем Юнга*.

Относительное продольное растяжение образца сопровождается его относительным поперечным сужением (расширением) $\frac{\Delta D}{D}$. Отношение относительного поперечного сужения к относительному продольному удлинению называется *коэффициентом Пуассона*

$$\nu = \frac{\Delta D/D}{\Delta L/L}. \quad (4)$$

Для стали коэффициент Пуассона имеет величину от 0,25 до 0,3.

Пределом упругости называется максимальное напряжение, при котором еще не получается остаточной деформации (после снятия приложенной силы). *Пределом текучести* называется состояние деформируемого тела, при котором его удлинение происходит без увеличения приложенной силы. *Пределом прочности* называется напряжение, непосредственно предшествующее разрушению образца.

Относительное удлинение тензодатчика является безразмерной величиной. Однако, поскольку относительное удлинение измеряется тысячными и миллионными долями, для удобства оперирования числами используются безразмерные единицы измерения, такие как мм/м, мкм/м, а в зарубежной литературе чаще всего используется единица микрострейн или микрос, равная 10^{-6} .

ТЕНЗОДАТЧИКИ

Среди многих методов измерения напряжения в твердых телах наиболее распространенным является измерение с помощью тензодатчиков, у которых электрическое сопротивление изменяется пропорционально величине деформации тела. Например, пьезорезистивный тензодатчик представляет собой полупроводниковый прибор, сопротивление которого нелинейно зависит от его деформации. Однако наиболее распространенные тензодатчики изготавливаются из металла.

Металлический тензодатчик состоит из очень тонкого провода или, более часто, металлической фольги, сформированной в виде змейки (рис.2) и нанесенной на подложку (носитель), которая непосредственно приклеивается к испытываемому телу. Длина тензодатчиков колеблется от 0,2 мм до 10 см.

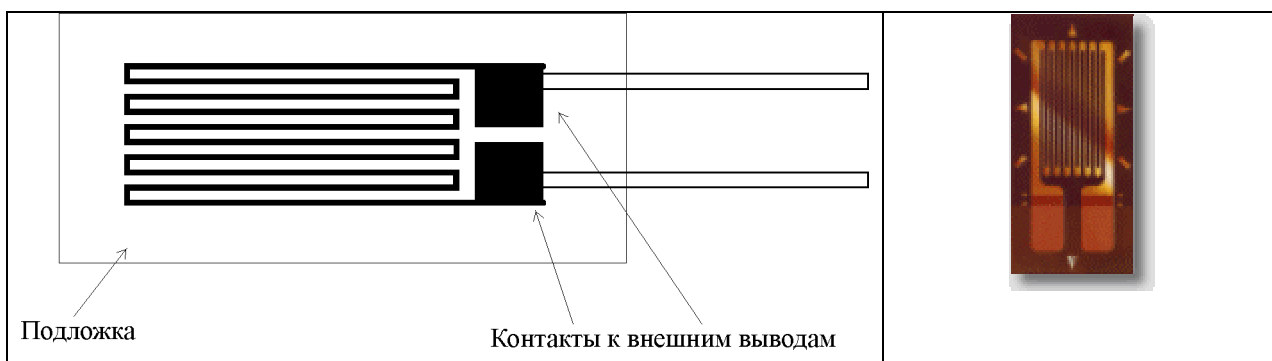


Рис.2. Структура и фотография металлического тензодатчика

Змеевидная структура датчика обеспечивает большое относительное изменение длины фольги вдоль датчика и очень малое изменение при растяжении датчика в поперечном направлении. В такой структуре минимизировано также влияние коэффициента Пуассона на результат измерения.

Серийные тензодатчики имеют сопротивление от 30 Ом до 3 кОм при типовых значениях 120 Ом, 350 Ом, и 1 кОм.

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

Основным параметром тензодатчика является его чувствительность к растяжению, характеризующаяся тензорезистивным коэффициентом GF , который определяется как отношение относительного изменения сопротивления тензодатчика к его относительному удлинению:

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad (5)$$

Тензорезистивный коэффициент для металлических тензодатчиков примерно равен 2.

Длина чувствительного элемента тензодатчика и длина подложки изменяется также в зависимости от температуры. Поэтому, несмотря на специальные меры, принимаемые при изготовлении тензодатчиков их производителями, существует проблема компенсации их температурной чувствительности.

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 составит всего лишь 0,12 Ом. Чтобы измерять столь малое изменение сопротивления и скомпенсировать температурную погрешность, тензодатчики практически всегда используют в мостовой схеме (мост Уитсона, рис.3), подключенной к источнику напряжения или тока (источнику питания моста).

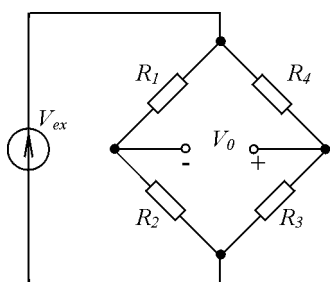


Рис.3. Мост Уитсона с источником напряжения

Выходное напряжение моста равно

$$V_o = \left[\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] \cdot V_{ex} \quad (6)$$

При условии баланса моста ($R_1 / R_2 = R_4 / R_3$) его выходное напряжение равно $V_o = 0$. Малейшая разбалансировка моста приводит к появлению ненулевого выходного напряжения. Поэтому если на рис.3 сопротивление R_4 заменить на сопротивление тензодатчика R_G , т.е. ($R_4 = R_G$), то изменение сопротивления тензодатчика вследствие его растяжения приведет к появлению напряжения на выходе моста.

Обозначим абсолютное изменение сопротивления тензодатчика через ΔR . Тогда, как следует из (5),

$$\Delta R = R_G \cdot GF \cdot \varepsilon \quad (7)$$

Если сбалансировать мост таким образом, чтобы при отсутствии растяжения тензодатчика $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_G$, то из (6) получим

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

или, окончательно,

$$\frac{V_o}{V_{ex}} = \frac{GF \cdot \varepsilon}{4} \cdot \left(\frac{1}{1 + GF \cdot \frac{\varepsilon}{2}} \right) \quad (8)$$

Таким образом, зная напряжение на выходе моста, из формулы (8) мы можем найти относительное удлинение тензодатчика ε .

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 скомпенсировать температурную погрешность.

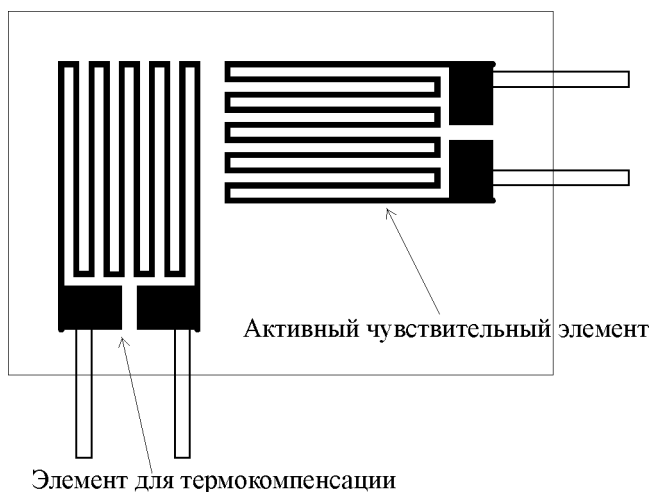


Рис.4. Использование двух тензочувствительных элементов для компенсации температурной погрешности

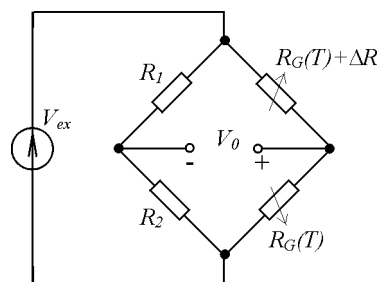


Рис.5. Полумостовая схема включения тензодатчиков

В полумостовой схеме (рис.6) можно использовать также два тензодатчика с некомпенсированной температурной погрешностью, если один из них работает на растяжение, второй - на сжатие, например, если измеряется механическое напряжение изгибаемой балки. При этом если датчики расположить так, что один из них будет в состоянии растяжения, а второй - в состоянии сжатия, то таким образом можно повысить чувствительность схемы измерения в 2 раза и скомпенсировать температурную погрешность (рис.6).

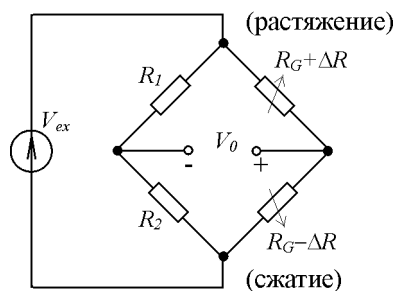


Рис.6. Включение двух датчиков для компенсации температурной погрешности.

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

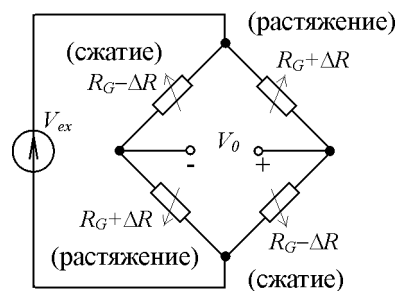


Рис.7. Использование четырех тензодатчиков для повышения чувствительности схемы измерения и компенсации температурной погрешности.

$$\frac{V_o}{V_{ex}} = -GF \cdot \varepsilon$$

В схеме на рис. 6 выходное напряжение моста равно $\frac{V_o}{V_{ex}} = \frac{-GF \cdot \varepsilon}{2}$.

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

Уравнения для выходного напряжения моста получены в предположении, что в исходном состоянии ненапряженных датчиков выходное напряжение моста равно нулю, т.е. мост сбалансирован. Начальная балансировка моста в системе RealLab! выполняется программно, что гораздо более удобно и точно. Для этого начальное смещение сначала измеряется, а затем вычитается из напряжения, полученного при нагруженных датчиках.

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПРОВОДОВ

В предыдущих схемах для более доходчивого объяснения принципов применения тензодатчиков не были учтены сопротивления подводящих проводов. Однако на практике, особенно при использовании низкоомных датчиков, сопротивления проводов могут достигать единиц и десятков Ом, что делает измерения ошибочными. Для решения этой проблемы используется трехпроводное включение тензодатчика (рис.8). Сопротивления проводов, поставляющих ток к тензодатчику, в этой схеме взаимно компенсируются, поскольку расположены в разных плечах измерительного моста. Сопротивление третьего провода R_{Lo} не влияет на результат измерения, поскольку ток через него равен нулю, поскольку цепь измерения напряжения не потребляет ток.

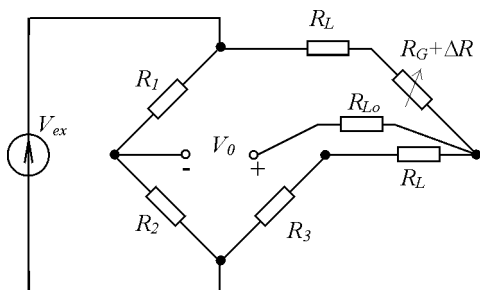


Рис.8. Трехпроводное подключение. Сопротивления подводящих проводов R_L взаимно компенсируются, поскольку находятся в разных плечах моста.

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ТЕНЗОДАТЧИКОВ

Общепринятого стандарта для питания моста не существует. Типовыми являются напряжения 3В и 10В. При этом ток через тензодатчик составляет от 2 мА до 28 мА для датчиков с сопротивлением от 1 кОм до 120 Ом. Однако большие напряжения вызывают больший саморазогрев тензодатчика и увеличивают температурную компоненту погрешности. Напряжение питания моста должно иметь очень высокую стабильность и точность. Другой подход состоит в использовании источника умеренной точности, но измерительная схема должна позволять измерять его напряжение с высокой точностью и при расчете конечного результата учитывать измеренное значение.

Обычно мостовые схемы с типовыми тензодатчиками имеют выходное напряжение величиной менее 100 мВ при напряжении питания моста 10 В. Поэтому для использования полной шкалы системы аналогового ввода нужно иметь усилитель с коэффициентом усиления порядка 100-1000.

Для проверки правильности калибровки измерительной схемы используют резистор с известным (калиброванным) значением сопротивления, которым шунтируют тензодатчик. Показания измерительной системы должны соответствовать расчетному значению, соответствующему этому сопротивлению.

В связи с малостью сигнала от тензодатчика во многих случаях целесообразно применять фильтра третьего порядка RL-4F3, ослабляющий помехи с частотой 50 Гц.

УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Зная электрическое напряжение на выходе измерительного моста V_o , напряжение его питания V_{ex} и напряжение смещения нуля моста V_{oo} , можно вычислить требуемое значение относительного растяжения тензодатчика ε по формулам, которые следуют из рассмотрения соответствующей схемы измерений. Для упрощения формул введем обозначение

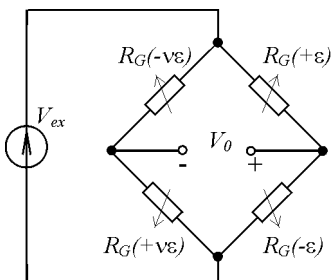
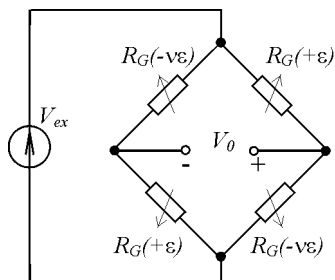
$$V_r = \frac{V_o - V_{oo}}{V_{ex}}$$

Тогда для схемы на рис.8 механическое напряжение в зависимости от относительного растяжения тензодатчика будет равно

$$\varepsilon = \frac{-4 \cdot V_r}{GF \cdot (1 + 2 \cdot V_r)} \cdot \left(1 + \frac{R_L}{R_G}\right)$$

Для других схем включения тензодатчиков соответствующие формулы приведены на рис.9 - рис.14.

<p>Рис.9. Подсоединение тензодатчика с внутренним термокомпенсирующим элементом</p> $\varepsilon = \frac{-4 \cdot V_r}{GF \cdot (1 + 2 \cdot V_r)} \cdot \left(1 + \frac{R_L}{R_G}\right)$	<p>Рис.10. Использование тензорезистивных элементов как с продольным ε, так и поперечным ($\nu\varepsilon$) напряжением</p> $\varepsilon = \frac{-4 \cdot V_r}{GF \cdot [(1 + \nu) - 2 \cdot V_r \cdot (\nu - 1)]} \cdot \left(1 + \frac{R_L}{R_G}\right)$
<p>Рис.11. Схема включения двух датчиков, один из которых работает на растяжение, второй - на сжатие (см. также рис. 6)</p> $\varepsilon = \frac{-2 \cdot V_r}{GF} \cdot \left(1 + \frac{R_L}{R_G}\right)$	<p>Рис.12. Схема включения четырех тензодатчиков для повышения чувствительности в 4 раза и компенсации сопротивлений подводящих проводов</p> $\varepsilon = \frac{V_r}{GF}$

	
<p>Рис.13. Схема с четырьмя тензодатчиками, два из которых используются для измерения поперечного напряжения</p> $\varepsilon = \frac{-2 \cdot V_r}{GF \cdot (v+1)}$	<p>Рис.14. То же, что и на рис.14, но с иным размещением датчиков в плечах моста</p> $\varepsilon = \frac{-2 \cdot V_r}{GF \cdot [(v+1) - V_r \cdot (v-1)]}$

При использовании системы Reallab! для усиления сигналов тензомоста следует применять усилители RL-4DA200 и при необходимости фильтр нижних частот RL-4F3.

Аддитивная и мультипликативная погрешности схемы измерения и измерительных преобразователей аппаратуры компенсируются с помощью калибровочных коэффициентов, которые заносятся в калибровочный файл программы RLDataView в процессе калибровки системы. Туда же записывается начальное напряжение смещения моста (при отсутствии механического напряжения).

Компенсация температурной погрешности, выполняемая изготовителем тензодатчиков, обычно не позволяет получить ошибку менее 10 микрострейн на градус (1 микрострейн - это относительное растяжение, равное 10^{-6}). Однако, используя полиномиальную аппроксимация температурной зависимости и последующую ее программную компенсацию, можно снизить температурную погрешность до 1 микрострейна на градус.