

Лекция №11

Тензорезистивные преобразователи

Тензодатчик -

измерительный преобразователь деформации твердого тела, вызываемой механическими напряжениями в электрический сигнал, предназначенный для последующей обработки.

Бывают металлические (проволочные, фольговые, пленочные) и полупроводниковые (пластинчатые).

1.1. Металлические

В основе принципа работы металлических тензорезисторов лежит явление *тензоэффекта*, заключающееся в изменении электрического сопротивления проводящего материала при его механической деформации.

Основной характеристикой чувствительности материала к механической деформации является коэффициент относительной тензочувствительности k , определяемый как отношение относительного изменения сопротивления к относительному изменению длины проводника:

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}$$

Так как сопротивление проводника связано с удельным электрическим сопротивлением ρ материала, длиной l и площадью поперечного сечения S_q этого проводника зависимостью

$$R = \rho \frac{l}{S_q}$$

то относительное изменение сопротивления, вызванное деформацией проводника под действием равномерного механического напряжения,

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{d\sigma} = \frac{1}{l} \frac{dl}{d\sigma} - \frac{1}{S_q} \frac{\partial S_q}{\partial \sigma} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma}$$

Из последнего выражения следует, что при конечном изменении напряжения относительное изменение сопротивления

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S_q}{S_q} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

При деформации твердых тел изменение их длины связано с изменением объема. При этом изменение объема в зоне упругих деформаций для каждого материала является величиной постоянной и характеризуется коэффициентом Пуассона

$$\mu = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l}, \text{ где } \varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d} \text{ (здесь } d \text{ – диаметр проводника круглого сечения или}$$

поперечный размер проводника квадратного сечения).

Учитывая, что $\frac{\Delta d}{d} = \frac{1}{2} \frac{\Delta S_q}{S_q} = -\mu \frac{\Delta l}{l}$, получим выражение для коэффициента

относительной тензочувствительности

$$k = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}$$

Параметры	Значение параметров для сплавов		
	Константан 60Cu + 40Ni	Манганин 84Cu+12Mn+ +4Ni	Нихром 80Ni + 20Cr
Коэффициент тензочувствительности K	1,9...2,1	0,5	2,1...2,3
Удельное сопротивление ρ , Ом мм ² /м	0,46...0,52	0,4...0,45	0,9...1,7
Температурный коэффициент сопротивления $\times 10^6$, град-1	≈ 30 (до 100°C)	≈ 10	150...170

Устройство наиболее распространенного типа наклеиваемого **проволочного** тензорезистора изображено на рис. На полоску тонкой бумаги или лаковую пленку 2 наклеивается так называемая решетка из зигзагообразно уложенной тонкой проволоки 3 диаметром 0,02-0,05 мм. К концам проволоки присоединяются (пайкой или сваркой) выводные медные проводники 4. Сверху преобразователь покрывается слоем лака 1. Такой преобразователь, будучи приклеенным к испытываемой детали, воспринимает деформации ее поверхностного слоя. Измерительной базой преобразователя является длина детали, занимаемая проволокой. Весьма важным параметром тензочувствительной решетки является расстояние между витками. Это расстояние определяет при заданных габаритах резистора число витков и, следовательно, сопротивление, а также допустимый ток, который ограничивается самонагревом и будет тем меньше, чем меньше расстояние между витками. Кроме того, наличие поперечных участков длиной b вызывает изменение сопротивления тензорезистора за счет деформации этих участков при действии на деталь напряжения, перпендикулярного оси чувствительности тензорезистора. Для проволочных тензорезисторов отношение поперечной и продольной чувствительностей определяется отношением b/l . Наиболее часто используются преобразователи с базами 5—20 мм, обладающие сопротивлением 30—500 Ом. константан, нихром, элинвар, платинородий Погрешность проволочных резисторов может быть сведена до 0,1...0,2%.

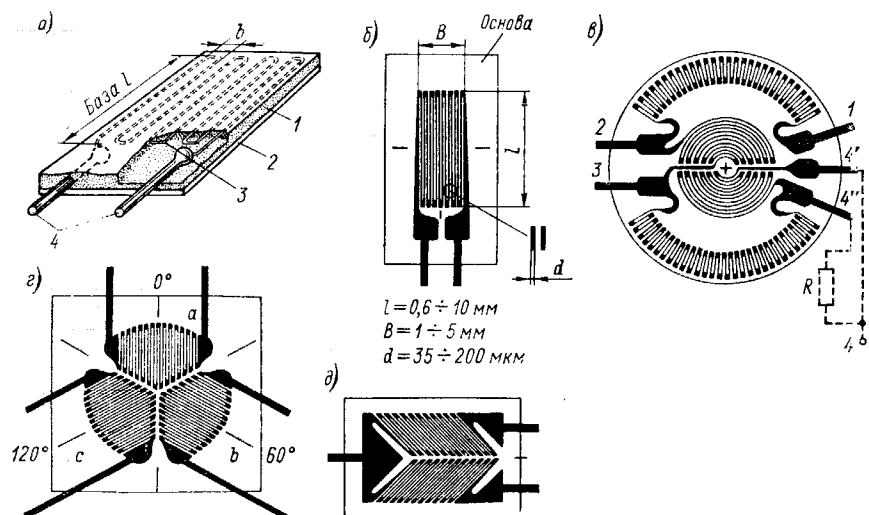
Фольговые преобразователи представляют собой ленту из фольги толщиной 4—12 мкм, на которой часть металла выбрана травлением таким образом, что оставшаяся его часть образует решетку с выводами. Фольговые преобразователи

имеют меньшие габариты, чем проволочные; известны тензорезисторы с базой до 0,8 мм. У фольговых тензорезисторов поперечная чувствительность значительно меньше за счет расширения поперечных участков. Характерные типы фольговых преобразователей показаны на рис. . Недостатком обычных фольговых преобразователей является сравнительно низкое сопротивление, не превышающее обычно 50 Ом.

Металлические **пленочные** тензорезисторы изготавливаются путем вакуумной возгонки тензочувствительного материала с последующим осаждением его на основу (подложку). Форма тензорезистора задается маской, через которую производится напыление. Пленочные тензорезисторы имеют толщину меньше 1 мкм. Для изготовления пленочных тензорезисторов применяются как металлические (например, титаноалюминиевый сплав),

k проволочных, фольговых $\approx 2 \div 2,5$

На рис. изображен элемент, состоящий из четырех тензорезисторов, образующих четыре плеча моста. Этот элемент наклеивается на мембрану. Тензорезисторы, расположенные в центре, испытывают растяжение, на периферии — сжатие. К выводам 1 и 3 подводится питание, выводы 2, 4' и 4'' образуют измерительную диагональ. Выводы 4' и 4'' разомкнуты для того, чтобы можно было включить добавочный резистор R в нужное плечо и добиться подбором R равновесия моста. Розетка из трех тензорезисторов, показанная на рис. применяется при измерении напряжений детали, находящейся в плосконапряженном состоянии, в том случае, когда направления действия напряжений неизвестны. По изменениям сопротивлений трех тензорезисторов определяются направления главных напряжений и их значения. Элемент, показанный на рис. , состоит из двух тензорезисторов и используется при измерении деформации валов при их скручивании. Для тензорезисторов, работающих в диапазоне температур до 180 °С, в качестве тензочувствительного материала используется константан. Для более высоких температур (200—1000 °С) применяются специальные сплавы. Изготавливаются из константана, нихрома, сплава на основе Ni , Mo , Pt .



Пьезорезистивный эффект: Физические основы и математическое описание.

Сущность: электрическое сопротивление полупроводника изменяется под действием механических напряжений приложенных вдоль определенных кристаллических осей.

Пьезорезистивный эффект описывается тензором 4 ранга. Для кубических кристаллов (*Si* и *Ge*) три компоненты этого тензора отличны от нуля. Это константы π_{11} , π_{12} , π_{44} .

π_{11} - для продольного эффекта (в направлении электрического тока).

π_{12} - для поперечного эффекта (в направлении перпендикулярном току).

π_{44} - для сдвигового напряжения

Уравнения пьезорезистивного эффекта

$$\frac{\Delta\rho_{ik}}{\rho_{ik}} = \sum \pi_{iklm} U_{im}$$

Относительное изменение компонент тензора электросопротивления (отношение изменения сопротивления к его начальному значению) связано с тензором деформации U_{im} через тензор 4 ранга π_{iklm} .

Коэффициент

$\pi_p = -(\pi_{11} + 2\pi_{12})$ - пьезорезистивный коэффициент для всестороннего сжатия.

Величина

$\pi_A \equiv (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})$ - мера анизотропии эффекта.

ТАБЛИЦА ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ

материал	ρ , Ом·см	π_{11}	π_{12}	π_{44}	π_p	π_A
		$\cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{дин} = 10^{-11} \text{ н/м}^2$				
<i>n-Ge</i>	9,9	-4,7	-5	137,9	+14,7	+138,2
<i>p-Ge</i>	1,1	-3,7	+3,2	+96,7	-2,7	-103,6
<i>n-Si</i>	11,7	-102,2	+53,4	-13,6	-4,6	-142
<i>p-Si</i>	7,8	6,6	-1,1	+138,1	-4,4	-130,4

Знак “-“ указывает на уменьшение сопротивления при наличии данного эффекта, знак “+” — на увеличение.

Тензочувствительность

G — отношение изменения сопротивления к произведению начального сопротивления на деформацию.

$$G = \frac{(\Delta\rho / \rho)}{(\Delta l / l)}$$

$$k = 1 + 2\sigma + \pi_{11} E_{10}$$

σ - коэффициент Пуассона

E_{10} - модуль Юнга.

Легирование полупроводников (добавление примесей)

1. Уменьшает тензочувствительность

2. Снижает температурную зависимость тензочувствительности, что важно при работе в широком диапазоне температур.

Пластинчатые полупроводники

Представляют собой тонкие полоски из кремния Р-типа, вырезанные в направлении оси [111], или из кремния n-типа, вырезанные в направлении оси [100]; применяется также германий р и n-типов. На концах полоски расположены контактные площадки, к которым припаиваются выводы; длина контактной площадки 0,25—0,6 мм. Полупроводниковые тензорезисторы имеют длину 2—12 мм, ширину 0,15—0,5 мм. Начальные сопротивления тензорезисторов лежат в диапазоне 50—10000 Ом, коэффициент тензочувствительности $K_m = 50 \dots 200$. погрешность 0,1...0,2%

Датчик жестко крепят на исследуемом объекте (клей). Упругий элемент воспринимает изменения исследуемого параметра X (давление, деформация и т. д.) и преобразует их в деформацию полупроводника $\epsilon(x)$, приводит к изменению сопротивления.

$$\Delta\rho(\epsilon) = \pm G\rho_0\epsilon$$

$$G_{ПП} \approx 200$$

$$\Delta\rho(T) = \alpha\Delta TR_0, \text{ где } T - \text{ температура}$$

α - температурный коэффициент

Для уменьшения погрешности необходимо вводить термокомпенсацию. Широко распространена схемная компенсация с использованием мостовых цепей.

ПП тензодатчики (ППТ) обычно используются в мостовых схемах, необходимых для компенсации начальной постоянной величины сопротивления.

$$\frac{v_0}{v_{нм}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

v_0 - напряжение разбаланса.

В общем случае $R = R_0 + r$; где R_0 - постоянная составляющая,

r - переменная составляющая.

Разновидности мостов:

1. С одним активным плечом $r \neq 0$; $r_2 = r_3 = r_4 = 0$. Значительная нелинейность v_0/v_n .

2. С двумя активными (одинаковыми) плечами — чистый полумост, $r_1 = r_2$; $r_3 = r_4 = 0$; $V_{\text{вых}}$ в 2 раза выше. Нет нелинейности.

3. С четырьмя активными одинаковыми плечами (чистый полный мост). $r_1 = r_3 = -r_2 = -r_4$. $V_{\text{вых}}$ в 4 раза выше. Нет нелинейности.

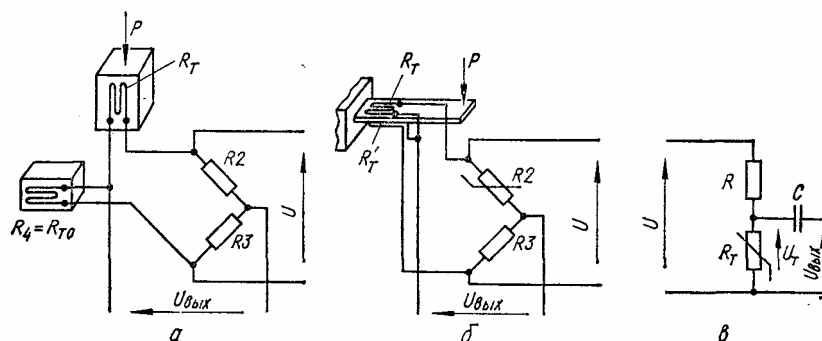


Рис. 6.17. Измерительные цепи тензорезистивных преобразователей.

Основные технико-метрологические характеристики. К основным технико-метрологическим характеристикам тензорезисторов относятся тензочувствительность, ползучесть, механический гистерезис, температурная нестабильность, динамические характеристики.

Тензочувствительность определяется главным образом тензорезистивными свойствами материала чувствительного элемента, однако в значительной степени зависит от конструкции преобразователя, материала основы, вида и условий полимеризации клея и других факторов. Тензочувствительность тензорезистора, как и самого тензорезистивного материала, определяется коэффициентом относительной тензочувствительности $k = \varepsilon_R / \varepsilon_I \dots$

Ползучесть проявляется в виде изменения выходного сигнала при заданном и неизменном значении деформации и определяется обычно как $\delta_{II} = \frac{\Delta \varepsilon_I}{\varepsilon_I} \dots$, где $\Delta \varepsilon_I \dots$ - приведенное ко входу изменение выходного сигнала при заданной относительной деформации $\varepsilon_I \dots$

Причиной ползучести является упругое несовершенство основы и клея. В пределах упругого диапазона деформаций ползучесть большинства тензорезисторов не превышает 1...1,5% за 6 ч.

Механический гистерезис, как и ползучесть, обусловлен упругим несовершенством основы и клея и численно определяется как приведенная ко входу разность значений выходного сопротивления для одного и того же значения деформации при условии, что данное значение деформации достигается при плавном ее возрастании и плавном уменьшении. Для различных типов тензорезисторов механический гистерезис лежит в пределах 0,5...5%.

Температурная нестабильность, или влияние температуры окружающей среды на основные параметры тензорезисторов, заключается, с одной стороны, в изменении сопротивления тензорезистора за счет его ТКС, а с другой - в появлении дополнительных механических напряжений вследствие различия в температурных коэффициентах линейного расширения материала тензорезистора и исследуемой детали.

Если β_D и $\beta_{II} \dots$ - температурные коэффициенты линейного расширения исследуемой детали и подложки тензорезистора, то относительная деформация тензорезистора, обусловленная изменением окружающей температуры на $\Delta \theta \dots$,

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\Delta l_{\theta}}{l} = (\beta_D - \beta_{II}) \Delta \theta$$

а изменение его сопротивления при этом

$$\Delta R = kR \frac{\Delta l_{\theta}}{l} = kR(\beta_D - \beta_{II}) \Delta \theta$$

Так как изменение сопротивления тензорезистора, обусловленное наличием ТКС материала чувствительного элемента, равно $\Delta R_{\alpha} = R \alpha_{\theta} \dots$, то общее изменение сопротивления тензорезистора, вызванное изменением температуры окружающей среды на $\Delta \theta \dots$,

$$\Delta R_{\theta} = R \alpha_{\theta} + kR(\beta_D - \beta_{II}) \Delta \theta = R[\alpha + k(\beta_D - \beta_{II})] \Delta \theta$$

Основной динамической характеристикой тензорезисторов является их *собственная частота*, значение которой для наклеенных тензорезисторов лежит в пределах 100...300 кГц. Собственная частота тензорезистора определяет предельную частоту исследуемого процесса, при которой частотными погрешностями можно пренебречь. Для исследований переменных деформаций обычно выбирают тензорезистивный преобразователь, собственная частота которого хотя бы в 5...10 раз превышала частоту деформаций.

Важным параметром тензорезисторов является *допустимая мощность* ..., которая может рассеиваться в тензорезисторе при условии, что его перегрев не превысит допустимого значения. Допустимая мощность тензорезистора находится в определенной зависимости от его геометрических размеров, что может использоваться как при определении ... для известных тензорезисторов, так и при определении геометрических размеров проектируемых преобразователей, исходя из заданной допустимой мощности или допустимого значения измерительного тока:

$$\Delta\theta = PR_T = \frac{P}{S_0\alpha_T} = \frac{P_{y0}}{\alpha_T}$$

где $R_T \dots$ - тепловое сопротивление; $S_0 \dots$ - площадь поверхности теплоотдачи материала резистора; $\alpha_T \dots$ - коэффициент теплоотдачи; $P_{y0} = P / S_0 \dots$ - удельная тепловая нагрузка.

Отвод теплоты от тензорезистора до исследуемой детали через слой клея и подложку значительно превышает теплоотдачу в окружающий воздух. Поэтому можно считать, что практически все тепло отводится в исследуемую деталь, а за площадь $S_0 \dots$ принимают для пленочных и фольговых тензорезисторов поверхность резистора, обращенную к исследуемой детали, а для проволочных - половину цилиндрической поверхности проволоки чувствительного элемента.

Удельная мощность используемых в настоящее время проволочных, фольговых и полупроводниковых тензорезисторов независимо от рассеиваемой в них мощности и полной поверхности, занимаемой чувствительным элементом, обычно колеблется в незначительных пределах: $P_{y0} \dots = 26 \dots 28$ кВт/м... (или м...)

Допустимое значение измерительного тока через тензорезистор может быть определено из соотношения $P = I^2 R = P_{y0} S_0 \dots$. Для проволочных тензорезисторов с базой $l \dots$, количеством проводов в решетке чувствительного элемента $n \dots$ и диаметром провода $d \dots$

$$S_0 = \frac{\pi d}{2} nl \quad R = \frac{4nl\rho}{\pi d^2}$$

Отсюда

$$I_{дон} = \sqrt{\frac{P_{y0} S_0}{R}} = \sqrt{\frac{P_{y0} \pi^2 d^3}{8\rho}}$$

Особенностью приклеиваемых тензорезистивных преобразователей является то обстоятельство, что они представляют собой преобразователи разового действия, т.е. не могут быть переклеены из объекта на объект. Поэтому функция преобразования рабочего тензорезистора не может быть определена, а для ее оценки определяют функцию преобразования аналогично, так называемого градуировочного, преобразователя из той же партии. Естественно, что такой способ оценки характеристик рабочих тензопреобразователей применим лишь в том случае, когда свойства преобразователей всей партии совершенно идентичны, а остаточные деформации, вызываемые затвердеванием клея при приклейке рабочих и градуировочных преобразователей, так же одинаковы. Опыт показывает, что погрешность от неидентичности при тщательной приклейке тензорезисторов и хорошем качестве клея обычно не превышает 1,5%.

Следует отметить, что для приклеивания тензорезисторов к исследуемой детали применяются специальные клеи, для работы в нормальных температурных условиях - ацетатно-целлулоидные и бакелито-фенольные (БФ) клеи, для работы при высоких температурах (до 600...800°C) - кремнийорганические цементы (например, Б-56, ВН-12) и специальные цементы на основе жидкого стекла или полисилоксанов.

Тензочувствительность готовых тензопреобразователей практически не поддается точному расчету, так как она может существенно отличаться от тензочувствительности исходного материала. Кроме влияния технологических факторов на воспроизводимость тензорезистивных свойств материала существенное влияние на значение коэффициента тензочувствительности преобразователя оказывают изогнутости в местах закругления проволоки, особенно в петлевых преобразователях. В этих местах образуются участки, не воспринимающие деформацию в направлении оси базы. Уменьшение чувствительности, вызванное этим фактором, тем больше, чем меньше измерительная база (в двухслойных преобразователях с уменьшенной базой чувствительность может уменьшиться на 20...30%). Существенное влияние на результирующую чувствительность оказывает поперечный тензо-эффект, обусловленный наличием участков проволоки, перпендикулярных оси базы преобразователя и воспринимающих поперечную деформацию. Этого недостатка практически

полностью лишены фольговые и пленочные преобразователи, у которых сечение проводящего слоя в месте изгиба может быть значительно увеличено.

ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ.

1. Влияние температуры на объект измерений и тензорезистор.

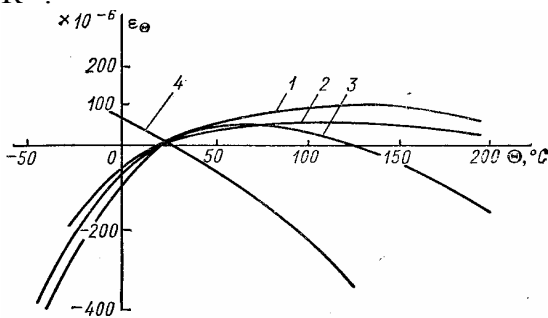
Величина «кажущейся» деформации при воздействии температуры определяется формулой:

$$\Delta \varepsilon \theta = (\alpha \theta / K_m + (\beta \delta - \beta \tau)) \theta,$$

где $\alpha \theta$ — температурный коэффициент сопротивления (ТКС);

$\beta \delta$ и $\beta \tau$ — коэффициенты линейного расширения (КЛР) материалов детали и тензорезистора.

ТКС константана в зависимости от примесей в сплаве может иметь любое значение в пределах $\pm 30 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$, причем в относительно небольшом интервале температур заданное значение ТКС обеспечивается с погрешностью $\pm (0,5 - 1) \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$. Это позволяет для многих материалов объектов измерения (сталь, нержавеющая сталь, сплавы алюминия) изготавливать термокомпенсированные тензорезисторы. Кажущаяся деформация изменяется с температурой примерно так, как показано на рис. 2 для термокомпенсированных тензорезисторов, наклеенных на сталь (кривая 1), алюминий (кривая 2) и нержавеющую сталь (кривая 3); здесь же для сравнения приведена кривая 4 температурной погрешности тензорезистора, предназначенного для наклейки на нержавеющую сталь, а наклеенного на сталь. Для термокомпенсированных тензорезисторов величина кажущейся деформации в диапазоне температур 20—100 °C не превышает в $\Delta \varepsilon \theta = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что при измеряемой деформации $\varepsilon_l = 10^{-2}$ приводит к температурной погрешности нуля 0,00015 K^{-1} .



Подобная самокомпенсация кажущейся деформации невозможна для дискретных полупроводниковых тензорезисторов. Действительно, КЛР кремния очень мал (около $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) по сравнению с КЛР металлов (сталь — $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, алюминий — $22,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), ТКС тензорезистора из кремния р-типа положителен ($\alpha \theta = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$).

2. Влияние сопротивления изоляции.

3. Паразитные электрические напряжения.

4. Термо-ЭДС (на соединении различных материалов).

5. Плохое закрепление тензорезистора на объекте измерения.

Эти источники погрешностей связаны с характером поведения самого тензорезистора. Они связаны с нелинейностью мостов и самого тензоматериала (устанавливаются подбором сопротивлений).

Погрешности за счет соединительной линии делятся на:

1. Температурная зависимость сопротивления проводов.
2. Сопротивление изоляции между проводами и экранной оплеткой.
3. Емкость кабелей.

Изменение температуры воздействует на

- дрейф нуля моста,
- изменение коэффициента чувствительности.

Тепловое расширение объекта измерения + $t^0 \text{C}$ коэффициент сопротивления тензорезисторов = дрейф нуля моста. (свойственно ПП тензорезисторам).

На Чувствительность влияет температурная зависимость коэффициента тензочувствительности.

Условия:

Оба тензорезистора полумоста находятся в одинаковых условиях, наклеены на один тот же материал.

Сопротивление изоляции - Между наклеенным тензорезистором и металлической поверхностью объекта измерения зависит от:

- 1.связующего или подложки,
- 2.свойств клея,
- 3.толщины слоя,
- 4.влажности окружающей среды.

Проволочные или фольговые	n_n
$R_{из} > 3 \cdot 10^{10}$ Ом	$R_{из} \geq 10^8$ Ом

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Приборы для измерения прямого артериального давления.

В крупные сосуды вводят катетер. Перед введением заполняют физиологическим раствором (без пузырьков). Этот столб жидкости передает давление на микрофон, преобразующий изменения давления крови в электрический сигнал.

$\Delta f = 50 \dots 80$ Гц.

Колебания столба жидкости воздействуют на мембрану, деформируя и смещая ее.

Движения мембраны можно фиксировать несколькими способами:

- 1.Емкостным датчиком \Rightarrow сдвиг-изм. С \rightarrow изм. f контура
- 2.Индуктивным датчиком
- 3.Тензорезистором: движение мембраны \rightarrow растяжение или укорочение.

Внутрисердечный датчик давления \rightarrow преобразователь диаметром 2-3 мм. Для определения быстрых колебаний давления.

Конструкция

С обратной стороны воздействию давления стороны мембраны крепятся 2 или 4 тензорезистора.