

2. СЕНЗОРИ ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА МЕХАНИЧНИ ВЕЛИЧИНИ. ТЕНЗОМЕТРИ

1. Използване на съпротивленията като сензорни елементи

За едно електрическо съпротивление е сила закона на Ом ако отношението $U/I = R$ остава постоянно, независимо от силата на тока I .

Омичното съпротивление на нишковиден проводник е

$$(2.1) \quad R = \frac{\rho \cdot l}{A},$$

където ρ е специфичното електрическо съпротивление, l - дължината, A - напречното сечение.

Или едно съпротивление може да се използва за измервателен преобразувател като се изменят стойностите на ρ , l или A . При това ρ зависи от електрическите свойства на проводника

$$(2.2) \quad \rho = \frac{E}{j} \text{ или } \gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{j}{E},$$

където E е интензивността на електрическото поле, $j = I/A$ - плътността на тока, γ - електрическата проводимост.

За метали (проводници), при които носители на електрическите заряди са само електрони е в сила:

$$(2.3) \quad j = n \cdot e \cdot v = n \cdot e \cdot \mu \cdot E$$

където n е броят на носителите на заряд в единица обем = концентрация на свободните електрони, e - елементарния товар, v - дрейфовата скорост на носителите на заряда, $\mu = v/E$ - подвижност на зарядите.

Оттук следва:

$$(2.4) \quad \rho = \frac{E}{j} = \frac{1}{n \cdot e \cdot \mu} \text{ или } \gamma = n \cdot e \cdot \mu$$

За полупроводници с р- и п-проводимост се получава

$$(2.5) \quad \gamma = e \cdot (n_+ \cdot \mu_+ + n_- \cdot \mu_-) \quad \text{където } n_+, n_- \text{ е концентрацията, а } \mu_+, \mu_- \text{ - подвижността съответно на р- и п-зарядите.}$$

При полупроводници в областта на собствена проводимост, концентрацията на носителите на заряди се повишава експоненциално с увеличаване на температурата. Чрез дотиране може да се постигне преобладаване на п- или на р-проводимостта. Концентрацията на зарядите е значително по-висока отколкото при собствената проводимост и почти не се променя с промяна на температурата.

За електролити с положителни и отрицателни йони със заряди съответно z_+ и z_- е в сила:

$$(2.6) \quad \gamma = e \cdot (z_+ \cdot n_+ \cdot \mu_+ + z_- \cdot n_- \cdot \mu_-)$$

Или съпротивленията могат да се използват като сензорни елементи не само като се управлява I и/или A , но и n и μ . Това позволява многостранно приложение на проводниците при създаване на сензори.

2. Измерване на сила с тензометри

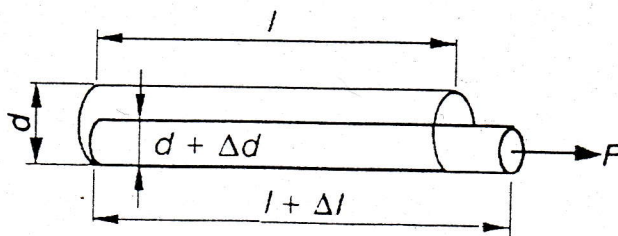
Сили на опън и натиска, които въздействат върху дадено тяло, променят формата му, а в определени граници и плътността му. Фиг. 2.1 онагледява това за проводник с кръгово сечение, подложен на опън. Под въздействие на силата проводникът се удължава с Δl , а диаметърът му се намалява с Δd (Δd е с отрицателна стойност). Удължаването се определя като относително изменение на дължината на дадено тяло под въздействие на сила. Удължаването се означава с ε . ε е безразмерно число.

$$(2.7) \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Изменението на дължината и промяната на диаметъра на проводника от фиг. 2.1 са противоположни. За означаване на относителното изменение на диаметъра по отношение на относителното изменение на дължината се означава с Поасоновото число μ .

$$(2.8) \quad \mu = -\frac{\frac{\Delta d}{d}}{\varepsilon}$$

μ също е безразмерно число. С минус знака се взема под внимание противоположността на изменение на диаметъра и на удължаването. Така за Поасоновото число се получава винаги положителна стойност защото $\Delta d/d$ има отрицателна стойност.



Фиг. 2.1.

В зависимост от материала подложен на деформация (удължаване), може да настъпи и изменение на неговия обем. За малко удължаване изменението на обема може да се изчисли Поасоновото число:

$$V = l \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ - при кръгови сечения.}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \cdot \frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta l}{l} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{d}{\frac{\Delta l}{l}} \right),$$

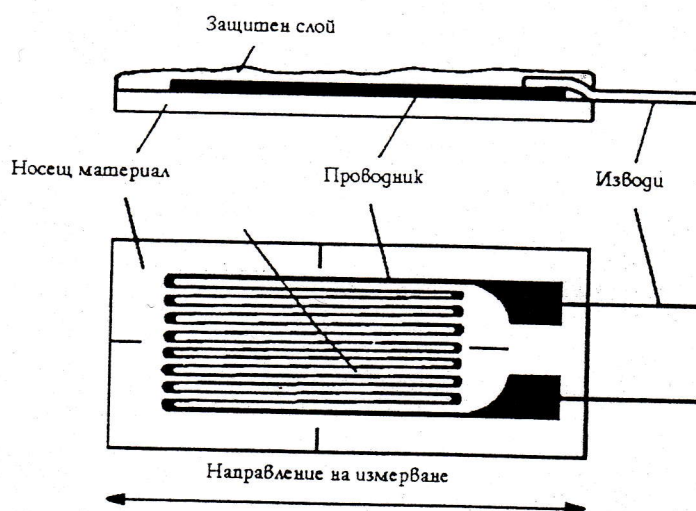
$$(2.9) \quad \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l}{l} \cdot (1 - 2 \cdot \mu).$$

Ако обемът остава постоянен, т.е. $\Delta V/V = 0$ то от уравнение (С) се намира $\mu = 0,5$. Типични стойности за μ при наличие на изменение на обема $\mu = 0,2 - 0,5$.

2.1. Тензометри - устройство и принцип на действие

Тензометрите се използват за електрическо измерване на удължаване, свиване и др. деформации, а оттук за измерване и на сила. Върху изолиращ носител изкуствен материал или хартия е нанесен метален проводник под формата на нишка или чрез етцване на метално фолио е оформена метална писта. Проводникът изменя съпротивлението си при удължаване или свиване, защото се променя дължината и сечението на проводящия материал.

На фиг. 2.2 е показано устройството на тензометър. Той трябва да се позиционира, така че натоварването му да по надлъжната ос.



Фиг. 2.2.

Нека бъде разгледан случая, при който проводника има кръгово напречно сечение с площ A , диаметър d , обща дължина l и специфично съпротивление ρ . Тогава за съпротивлението се получава:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \rho \cdot \frac{l \cdot 4}{\pi \cdot d^2}.$$

Ако проводника се удължи се получава следното относително изменение на съпротивлението:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2 \cdot \frac{\Delta d}{d}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta l}{l}} + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} \right).$$

Като се използват уравнения (A) и (B) се получава:

$$(2.10) \quad \frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot \left(1 + 2 \cdot \mu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} \right).$$

Изразът $k = 1 + 2 \cdot \mu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon}$ се означава като k -коефициент, чувствителност (англ. Gage-Faktor) на тензометъра. Ако обемът и специфичното съпротивление останат постоянни при удължаването, то за $\mu = 0,5$ се получава чувствителност $k = 2$. Това е в сила, например, за сплави като константан (60 % Cu, 40 % Ni) и карма (74 % Ni, 20 % Cr, 3 % Fe, 3 % Al). Чувствителност от около 6 се постига при тензометри от платина и платиноиридиеви сплави. Тези материали се използват най-вече при високи температури (около 1000 °C).

Още по-голяма чувствителност имат тензометрите от полупроводникови материали. При тях се постигат стойности за k от около 120 (дотиран силиций). Недостатък при тези тензометри е зависимостта на съпротивлението от температурата.

$$(2.11) \quad \frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon.$$

Деформацията на проводника на тензометъра трябва да е еластична, защото в противен случай, след отстраняване на деформиращото въздействие ще се установи друга базова стойност за съпротивлението.

Максимално допустимото удължаване на тензометрите лежи в областта $\varepsilon = 3 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$. Свърхударжаване може да доведе до остатъчни деформации или разрушаване.

2.2. Температурна зависимост на характеристиките на тензометрите

Съпротивлението на тензометрите зависи не само от удължаването но и от температурата. Особено силно е въздействието на температурните колебания при полупроводникови материали. Ето защо е необходимо компенсиране на температурното въздействие чрез подходящо свързване в мостови схеми например. Пренебрежимо малка е промяната на съпротивлението под въздействие на температурата при константана ($\alpha = -3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). Този материал се използва за измервания при температури до около 300°C .

Друг важен аспект, на който трябва да се обърне внимание при измерванията с тензометри е собственото удължаване на проводника при повишаване на температурата. Температурния коефициент на удължаване α_T не оказва въздействие, ако обекта на измерването притежава същия коефициент на удължаване, като този на тензометъра. В противен случай се получават грешки, дължащи се на температурнозависимото удължаване или свиване на тензометъра от страна на измервания обект. За основа при измервания с тензометри от константан са особено подходящи стоманата и бетона, които имат подобни температурни коефициенти на удължаване ($\alpha_T = 12 \mu\text{m/m}\cdot\text{K}$).

Типични характеристики на един тензометър: Номиналната стойност на съпротивлението на тензометрите е в областта между 100Ω и 600Ω . Типични стойности са 120Ω , 300Ω , 600Ω . По-долу е даден пример за типичните характеристики на тензометър:

$$R = 598 \Omega \pm 0,25 \%;$$

$$k = 2,12 \pm 1 \%;$$

$$\alpha_T = +(16 \pm 2) \mu\text{m/m}\cdot\text{K};$$

Номинален ток 10 mA .

2.3. Измервателни схеми с тензометри

За измерване на измененията на съпротивления най-често се използват *неуравновесени мостови схеми*, които се захранват с постоянно или с променливо напрежение с ниска честота (например 5 kHz). В най-простия случай, тензометъра се включва на едното рамо на моста. Но за повишаване на чувствителността, тензометри може да се включат два или в четири тензометра.

Използването на два или четири тензометра позволява и редуциране на влиянието на температурата, когато температурния коефициент на

съпротивлението е голям или когато съществуват големи разлики между температурните коефициенти на разширение на тензометрите и на материала на изследвания обект.

При работа с тензометри за измервателни схеми се използват най-често неуравновесени мостове. Мостовите схеми дават възможност за:

- относително точно измерване на изменението на съпротивленията;
- компенсация на влиянието на температурата;
- повишаване на чувствителността чрез включване на повече тензометри.

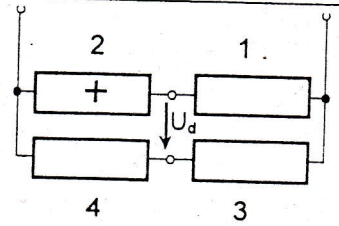
На фиг. 2.3 са показани примери за включване на тензометри в мостови схеми. Мостът се уравновесява в ненатоварено начално състояние. При удължаване и свиване на тензометрите се получават изменения на съпротивленията с различен знак. Това може да се отчете при мостовете, захранвани с постоянно напрежение, по поляритета на диагоналното напрежение, а при мостовете, захранвани с променливо напрежение - по фазата на диагоналното напрежение по отношение на захранващото напрежение.

Диагоналното напрежение на моста, в ненатоварено състояние, при малки изменения на съпротивленията и при равни стойности на съпротивленията на рамената се изчислява по формулата:

$$(2.12) \quad U_{AB0} \approx \frac{U_s}{4} \left(\frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

От уравнението се вижда, че чрез използване на повече тензометри не само може да се повиши диагоналното напрежение, но може да се постига и компенсация. Компенсацията се използва предимно при отстраняване на неблагоприятни температурни влияния. Различни схеми на свързване са показани на фиг. 2.3.

Таблица 2.1. Мостови схеми за включване на тензометри

Схема на свързване в мост	Захранване с напрежение U_0	Захранване с ток I_0
1. 	$U_d \approx + \frac{U_0}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d \approx \frac{I_0}{4} \Delta R$

2.		$U_d \approx -\frac{U_0}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d \approx -\frac{I_0}{4} \Delta R$
3.		$U_d \approx -\frac{U_0}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d \approx -\frac{I_0}{4} \Delta R$
4.		$U_d \approx \frac{U_0}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = \frac{I_0}{2} \Delta R$
5.		$U_d \approx \frac{U_0}{2} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = \frac{I_0}{2} \Delta R$
6.		$U_d = \frac{U_0}{4} \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = \frac{I_0}{2} \Delta R$
7.		$U_d \approx -\frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R}{R_0} \right)^2$	$U_d = -\frac{I_0}{4} \frac{\Delta R}{R_0} \Delta R$
8.		$U_d = U_0 \frac{\Delta R}{R_0}$	$U_d = I_0 \Delta R$

3. Задачи за предварителна подготовка

Задача 3.1. В неуравесен измервателен мост е включен тензометър R_1 с чувствителност $K = 2$. Всички други съпротивления имат константни стойности: $R_2 = R_3 = R_4 = 300 \Omega$. В ненатоварено състояние стойността на R_1 е $300,1 \Omega$. Номиналната стойност за протичащия през тензометъра ток е 20 mA , а изходното напрежение $U_{\text{изх}}$ се усилва 1000 пъти. Да се определи захранващото напрежение за моста така, че да се осигури номиналната стойност на протичащия през тензометъра ток и да се изчисли изходното напрежение за $\varepsilon_1 = 0$ и $\varepsilon_1 = 100 \mu\text{m/m}$. [Niebuhr 94, 205]

Задача 3.2. При измерване на усукване на вал се използват 4 тензометъра.

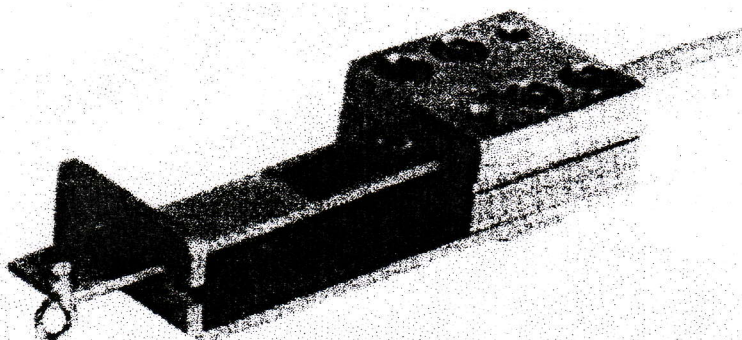
- а) скицирайте разположението на тензометрите върху вала;
- б) Тензометрите се свързани в мостова схема с 4 активни елемента. В ненатоварено състояние съпротивлението на всички тензометри е 300Ω , а k -коефициента е $2,05$. Какво трябва да е захранващото напрежение на моста, така че при разширяване или свиване от 1 mm/m на всеки от тензометрите да се получи диагонално напрежение на моста 2 mV .

4. Контролни въпроси и задачи

- 4.1. Какви са предимствата и недостатъците на тензометрите от полупроводников материал?
- 4.2. Какво се разбира под Поасоново число?
- 4.3. Какво е значението на k -коефициента на даден тензометър и каква е приблизителната стойност на този коефициент за константан?
- 4.4. В измервателните схеми за тензометри се използват предимно мостови схеми. Какви са основните причини за това?
- 4.5. Скицирайте:
 - а) разположението на два активни тензометъра при измерването на провисването на греда;
 - б) свързването на тензометрите към съответна мостова схема.
- 4.6. Тензометър от константан увеличава дължината си с $0,5 \%$. В недеформирано състояние съпротивлението му е 600Ω . Изчислете изменението на съпротивлението.

Приложение 1

Характеристики на тензорезисторен сензор за сила



Тензометричен сензор за сила

Характеристики

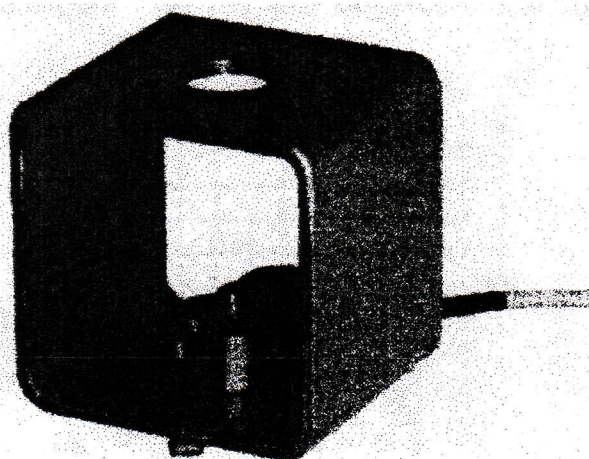
Измервателен обхват	0 – 5 N
Свръхнатоварване	До 130 % от измервателния обхват
Работна температура	-10 до +70 °C
Тип на тензорезисторите	Фолийни
Съпротивление на тензорезисторите	350 Ω
Максимално захранващо напрежение	10 V
Материал	Огъваща се гредка – алуминий Захващане – алуминий, Предпазител от пренатоварване - стомана
Тегло	200 g
Свързване	Кабел – четири-проводен, 2 m 4 mm щтекери (тип банан)

Цветовете на щекерите

Тензорезистор, разположен отгоре	Черен (BK)
Тензорезистор, разположен отдолу	Бял (WH)

Приложение 2

Характеристики на индустриален сензор за сила



Индустриален сензор за сила

Индустриалният сензор за сила е изграден от 4 тензорезистора, които са поставени на деформираща се мембрана и са включени в мостова схема. При натоварване мембраната се деформира и мостът се разбалансира. При това се получава полезен сигнал от порядъка на миливолти, който може да се усили.

Характеристики

	Измервателен обхват	0 – ± 200 N
	Грешка (дефинира се като сума от грешките от нелинейност и хистерезис)	≤ 1 % от крайната стойност
	Чувствителност (номинална)	1 mV/V
Механични	Свръхнатоварване	До 130 % от измервателния обхват
	Препоръчано динамично натоварване	50 % от измервателния обхват
	Допустимо динамично натоварване	170 % от измервателния обхват
	Материал	Сензор – алуминий Профил – поцинкована стомана
	Тегло	750 g
Околна среда	Работна температура	-30 °C до +70 °C
	Компенсиран температурен обхват	0 °C до +70 °C
	Температурно отместване на нулата	$\pm 0,04$ % от крайната стойност/K
	Темп. изменение на чувствителността	+ 0,07 % от показанието/K
Електрически	Съпротивление на пълния мост	350 Ω

	Допустимо захранващо напрежение	3 до 10 V (постоянно или променливо)
	Препоръчано захранващо напрежение	5 V
	Изоляционно съпротивление	> 10 MΩ
	Свързване	4 mm лабораторни щекери (тип банан)

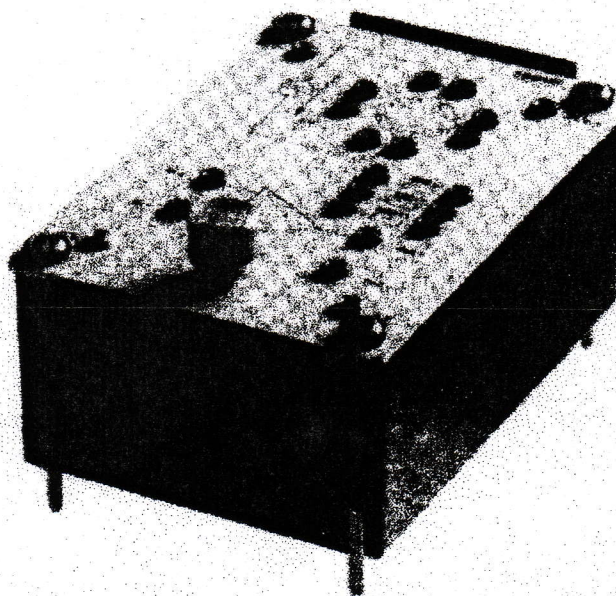
Цветовете на щекерите

	Кабел	Щекер
Захранване (+)	Бял (WH)	Черен (BK)
Захранване (-)	Кафяв (BN)	Черен (BK)
Сигнал (+)	Жълт (YE)	Бял (WH)
Сигнал (-)	Зелен (GN)	Бял (WH)

$1\text{ N} = 1\text{ kg m/s}^2 = 0,1019\text{ kp}$

Приложение 3

Характеристики на мостов усилвател



Мостов усилвател

Захранващо напрежение	10 V
Ток на консумация	50 mA
Захранващо напрежение на моста	5 V
Съпротивление на тензорезисторите	350 Ω
Обхват на входните сигнали	± 10 mV
Обхват на изходните сигнали	± 5 V
Усилване	Около 500 пъти
Тегло	510 g