



4a.

Piezoodporový jev

(Tenzometry, senzory síly, maticové taktilní senzory)

Přednášející: prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

husak@fel.cvut.cz

<http://micro.fel.cvut.cz>

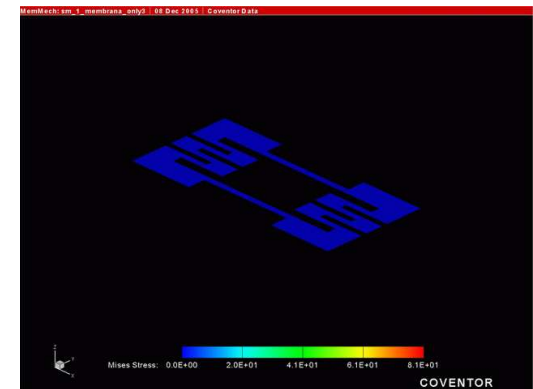
tel.: 2 2435 2267

Cvičící:

Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Ing. Alexandr Laposa, Ph.D.

Ing. Tomáš Teplý



- **Deformace tělesa** - změna tvaru při mechanickém namáhání.
- **Elastická** – těleso vrátí do původního stavu po odeznění mechanického namáhání.
- **Plastická** - těleso zůstane deformované.
- **Deformační síly** - tažné, tlakové, smykové, ohybové nebo torzní.

? Piezodporový jev: definujte deformaci elastickou a deformaci plastickou



- **Deformace** - nejčastěji *tlakem* nebo *tahem* v mezích Hookeova zákona (elastická deformace)
- **Hookeův zákon** - popisuje deformaci materiálu působením síly (deformace je úměrná mech. napětí materiálu), platí dobře pro malá mech. napětí

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

σ ... mechanické napětí

ε ... relativní délkové prodloužení

E ... Youngův modul pružnosti

$$\varepsilon = \frac{dl}{l}$$

? Hookův zákon: Napište matematický vztah, co vyjadřují jednotlivé jeho členy



Piezoodporový jev - historie

- Změna **R** kovů závisí na mechanickém namáhání (objev 1856 - Lord Kelvin)
- Piezoodporový jev v **krystalickém Si a Ge** (objev 1954 - p. Smith)



- Piezoodporový jev popisuje **závislost elektrického odporu R** materiálu na mechanickém namáhání, je způsobený pouze změnou geometrických rozměrů vlivem mechanického namáhání
- Jev je též nazývaný jako ***Tenzometrický jev*** \Rightarrow **Tenzometr**

$$R = f(F) = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l^2}{V}$$

? Napište vztah pro výpočet elektrického odporu odporového materiálu (kov, polovodič) v závislosti na jeho délce, průřezu a měrném odporu.

R odpor vodiče

V objem

l délka

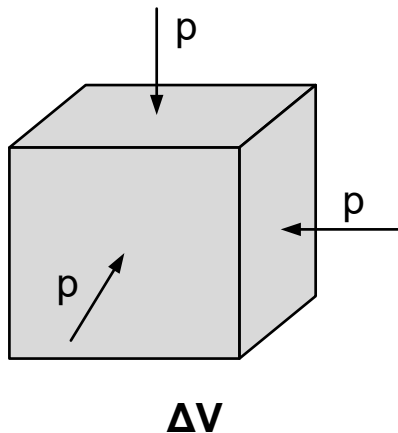
D průměr

ρ měrný odpor

Poznámka

POZOR – nezaměňovat s piezoelektrickým jevem, který generuje elektrický náboj

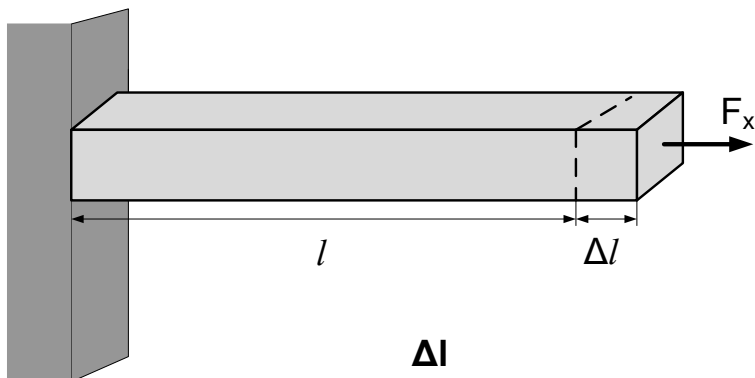




$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha p$$

α je tlakový součinitel
(u většiny materiálů závislý na
teplotě i na působícím tlaku)

? Objemová deformace: Nakreslete princip činnosti senzoru pro objemovou deformaci piezodoporového materiálu mechanickým namáháním a napište rovnici pro výpočet závislosti změny odporu na působícím tlaku, tj. $\Delta R = f(p)$



$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}$$

$$K = \frac{R}{\varepsilon} \frac{dR}{dR}$$

? Podélná deformace: Nakreslete princip činnosti senzoru pro podélnou deformaci piezoodporového materiálu mechanickým namáháním a napište rovnici pro výpočet závislosti změny odporu na jeho relativní změně délky, tj. $\Delta R = f(\Delta l)$

$\Delta R/R$ – relativní změna odporu

Δl je změna délky piezoodporového elementu v ose namáhání (síly)

$\varepsilon = \Delta l / l$ - relativní prodloužení

K je **součinitel deformační citlivosti** (též se označuje **G** nebo **GF** (gauge factor), Charakterizuje citlivost piezoodporových prvků

K = **-12** (Ni) až **+6** (Pt) u čistých kovů a slitin



Tenzometr – mění se ohmický odpor v závislosti na podélné deformaci

Pro jaká měření lze využít:

- Geometrické rozměry (prodloužení)
- Tlak (diferenciální tlak)
- Kroutící momenty
- Zrychlení
- Průtok kapalin a plynů
- Hladina
- atd.

😊 Výhody:

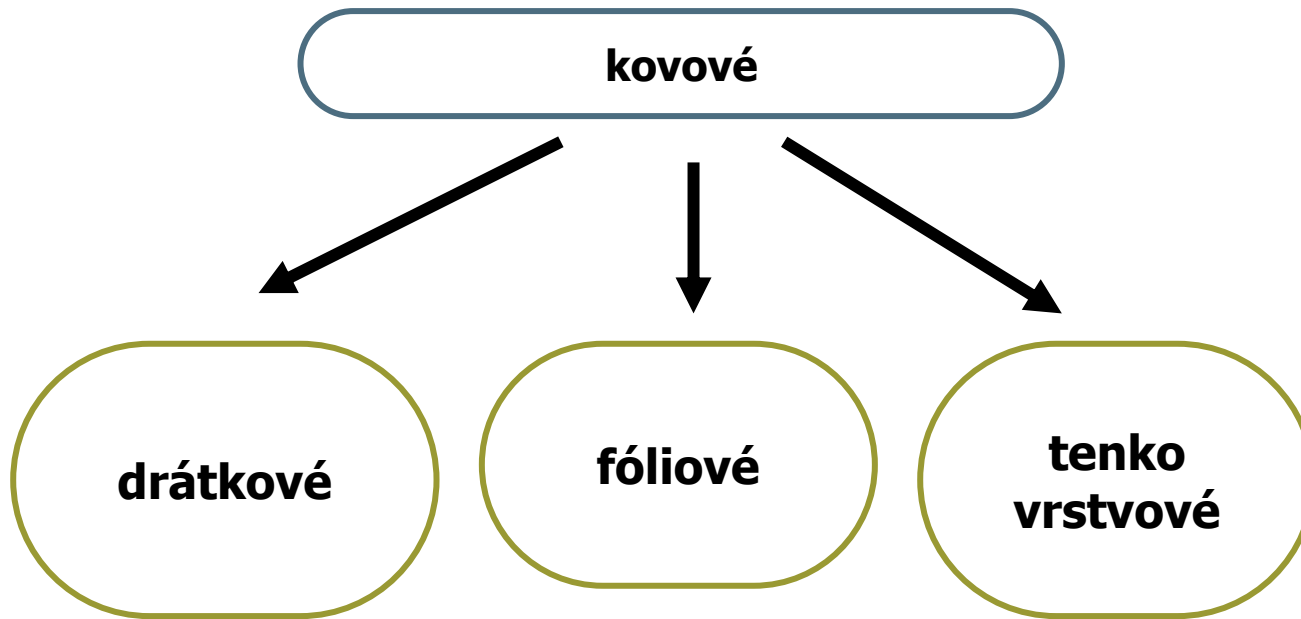
- ✦ Malá hmotnost
- ✦ Malé rozměry
- ✦ Dlouhodobá stabilita parametrů
- ✦ Velmi malá chyba senzoru
- ✦ Integrace \Rightarrow kompaktnost, menší cena

Piezoodporový jev v kovech

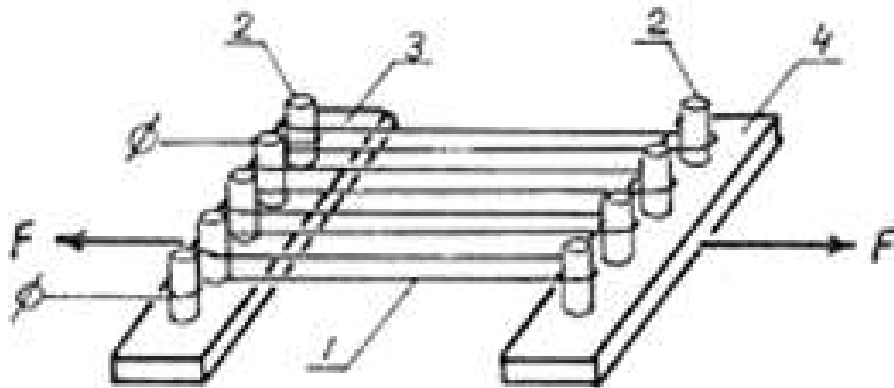
Tenzometry



Kovové tenzometry (technické provedení)



Nelepené (s volným drátkem)

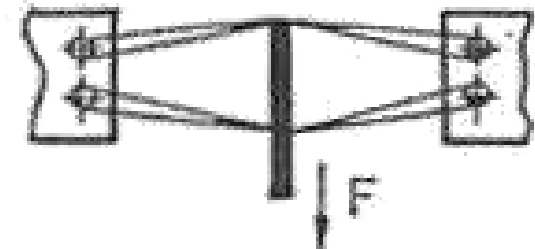
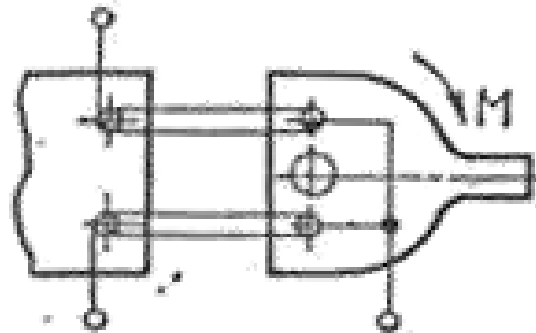
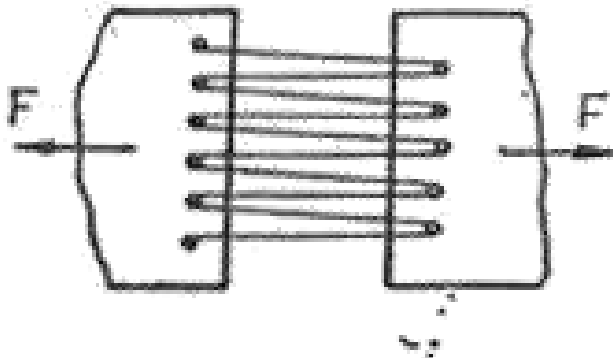


Typické parametry:

Materiály typické: Pt, Ni, Cu, Fe

Citlivost K: -12 Ni až $+6$ Pt

Rozměry: cm



? Kovové tenzometry s volným drátkem:

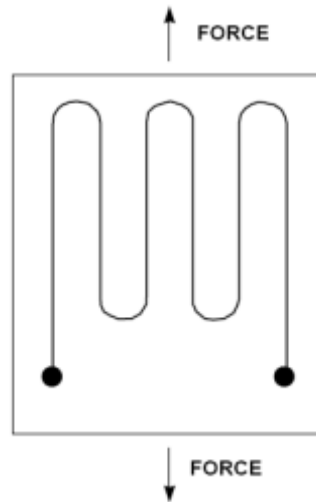
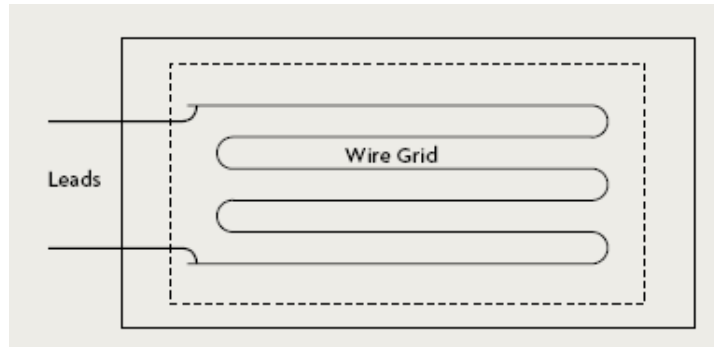
Nakreslete základní konstrukční uspořádání,

Používané materiály, typická citlivost K, rozměry

Kovové tenzometry – s lepeným drátkem

Zkouška

Lepené

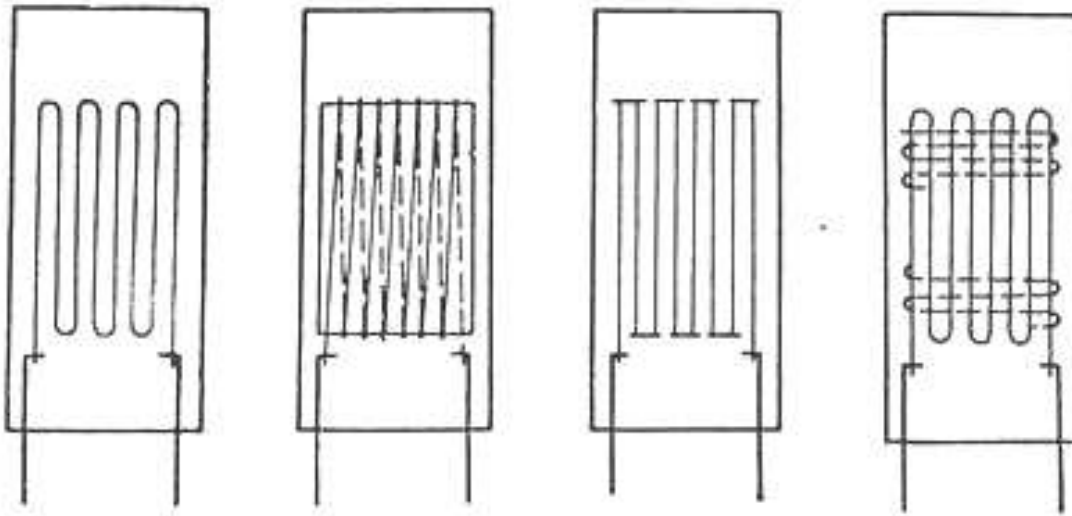


Typické parametry:

Materiály typické: Pt, Ni, Cu, Fe

Citlivost K: -12 Ni až $+6$ Pt

Rozměry: cm

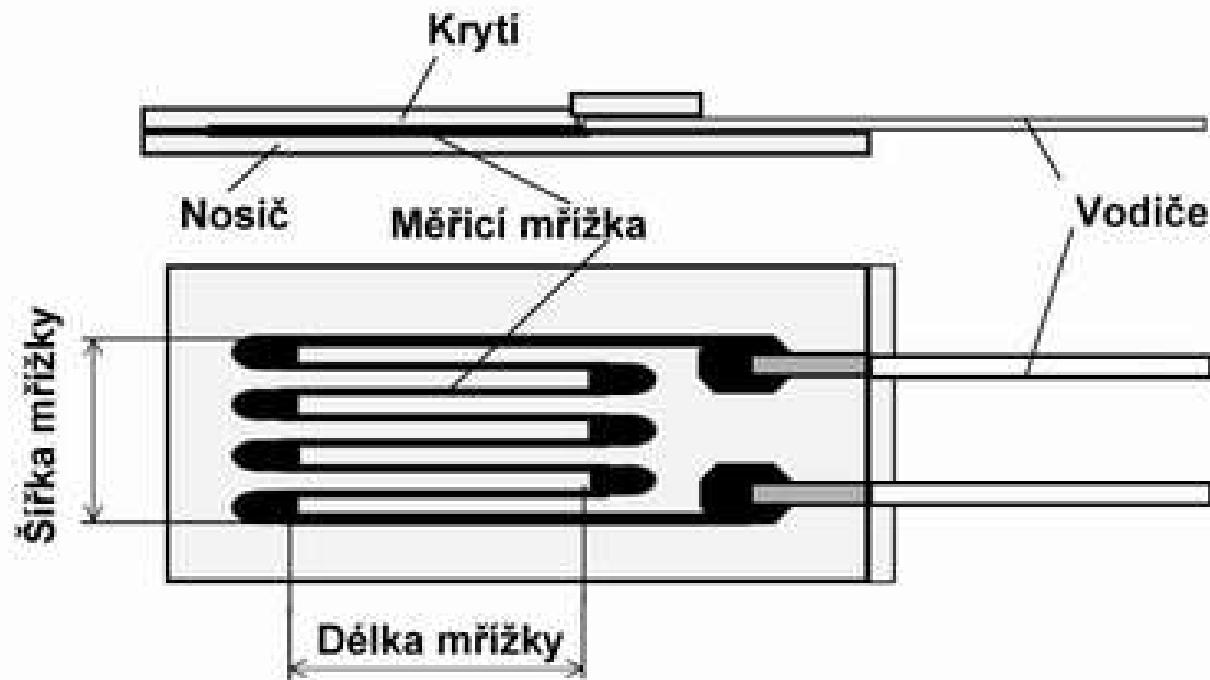
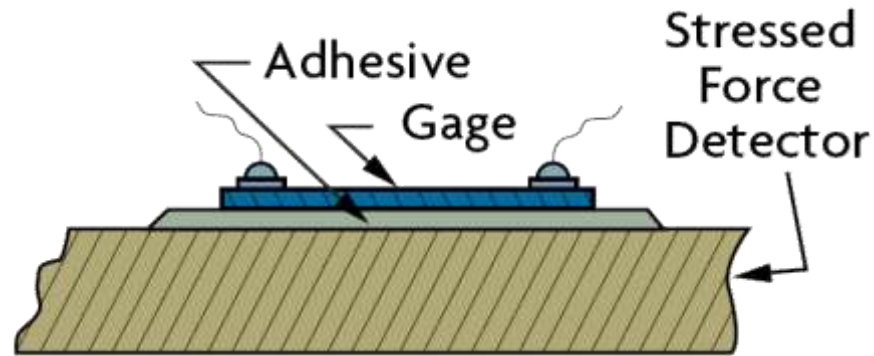


? **Lepené kovové drátkové tenzometry:** Nakreslete základní konstrukční uspořádání, Používané materiály, typická citlivost K, rozměry



Kovové tenzometry – s lepeným drátkem

Řez strukturou

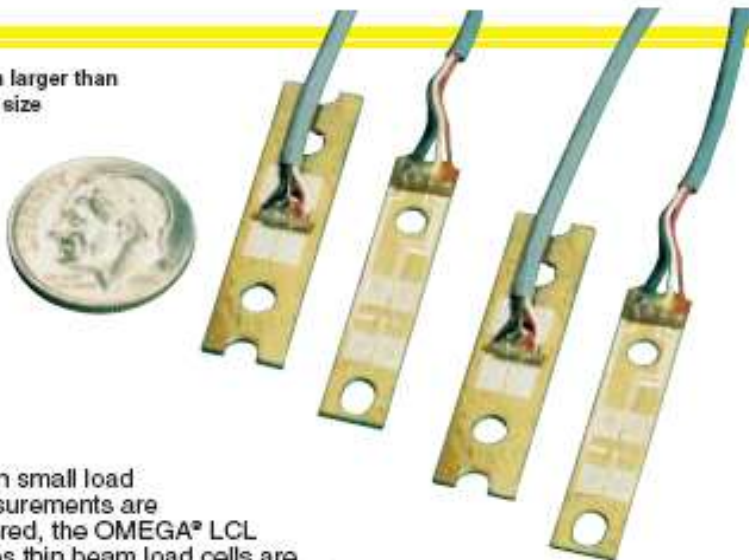


Kovové tenzometry – s lepeným drátkem

Příklad - tenzometry OMEGA

FULL BRIDGE THIN BEAM LOAD CELLS FOR LOADS 0-113 GM TO 0-18 KG

Shown larger than
actual size



When small load measurements are required, the OMEGA® LCL Series thin beam load cells are exceptionally well suited. The LCL Series is designed to measure many different parameters found in medical instrumentation, home appliances, process control, robotics, automotive and many other high volume applications.

A specially developed integrated strain gage includes all balancing, compensating and conductive elements and is laminated to the beam to provide excellent stability and reliability.

LCL Series

- ✓ Measures Force, Pressure, Displacement
- ✓ Thermally Matched, Fully Active, Full Bridge Gage for Optimum Temperature Tracking

All
Models
\$69



SPECIFICATIONS

Excitation: 5 Vdc, 12 volts max.

Rated Output: 2 mV/V $\pm 20\%$ (to minimize $\pm 20\%$ tolerance, end user must calibrate with a known weight)

Zero Balance: +0.3 mV/V

Combined Error: 0.25% full scale

Operating Temperature: -65 to 200°F (-54 to 93°C)

Compensated Temp.: 20 to 120°F (-7 to 49°C)

Temperature Effects: Zero Balance 0.02% FS/°F; Output 0.02%/°F

Resistance: (Input and output) 1200 Ω ± 300 Ω

Insulation Resistance: 1000 @ 50 Vdc

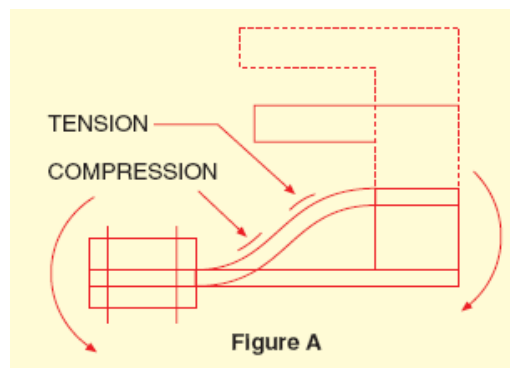
Seal: Urethane coated

Safe Overload: 150% FS

Full Scale Deflection: 0.010 to 0.050 in

Lead Wire: 9 in shielded PVC four-conductor 30 AWG

Material: 301 SS (beryllium copper $\frac{1}{4}$ and $\frac{1}{2}$ lb units)



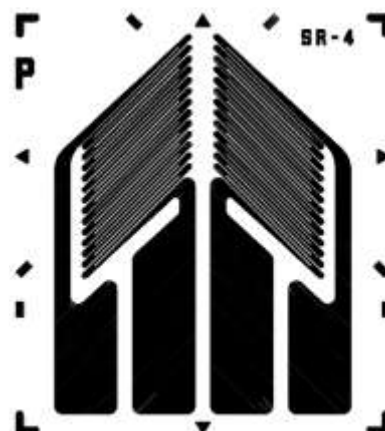
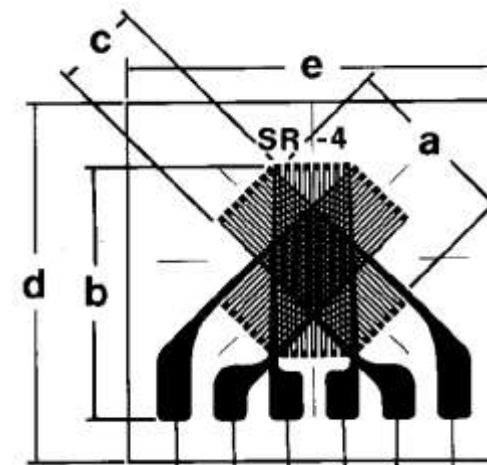
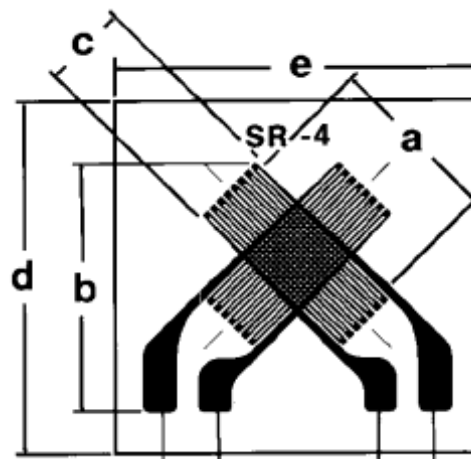
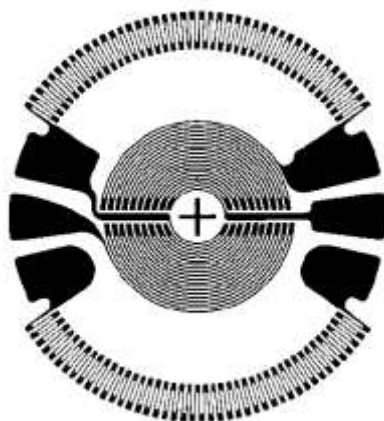
Kovové tenzometry – materiály

Vyrábějí se z kovových slitin, **K** jsou jednotky, vybírají se s ohledem na minimální teplotní součinitel odporu

| Materiál | Citlivost-K,GF |
|---|----------------|
| Platinum (Pt 100%) | 6.1 |
| Platinum-Iridium (Pt 95%, Ir 5%) | 5.1 |
| Platinum-Tungsten (Pt 92%, W 8%) | 4.0 |
| Isoelastic (Fe 55.5%, Ni 36% Cr 8%, Mn 0.5%) * | 3.6 |
| Constantan / Advance / Copel (Ni 45%, Cu 55%) * | 2.1 |
| Nichrome V (Ni 80%, Cr 20%) * | 2.1 |
| Karma (Ni 74%, Cr 20%, Al 3%, Fe 3%) * | 2.0 |
| Armour D (Fe 70%, Cr 20%, Al 10%) * | 2.0 |
| Monel (Ni 67%, Cu 33%) * | 1.9 |
| Manganin (Cu 84%, Mn 12%, Ni 4%) * | 0.47 |
| Nickel (Ni 100%) | -12.1 |

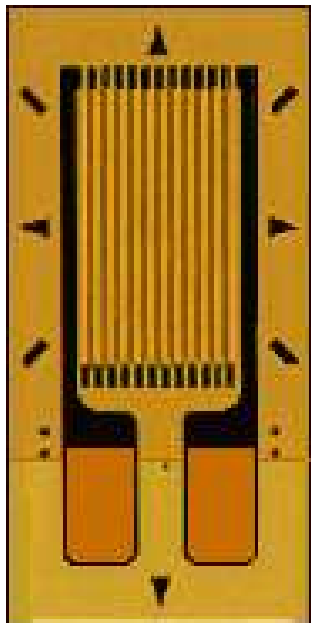


Fóliové - struktury pro speciální aplikace

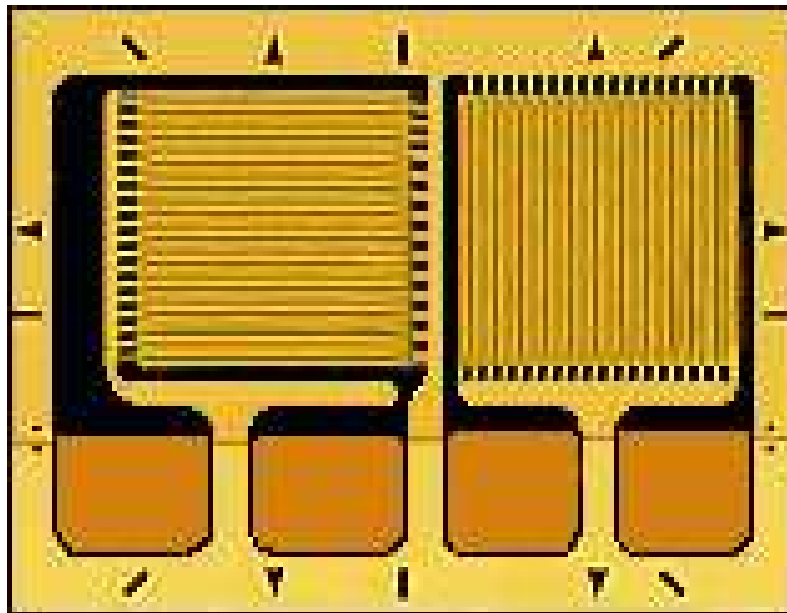


? Fóliové kovové tenzometry: Nakreslete 2 příklady uspořádání tenzometrů

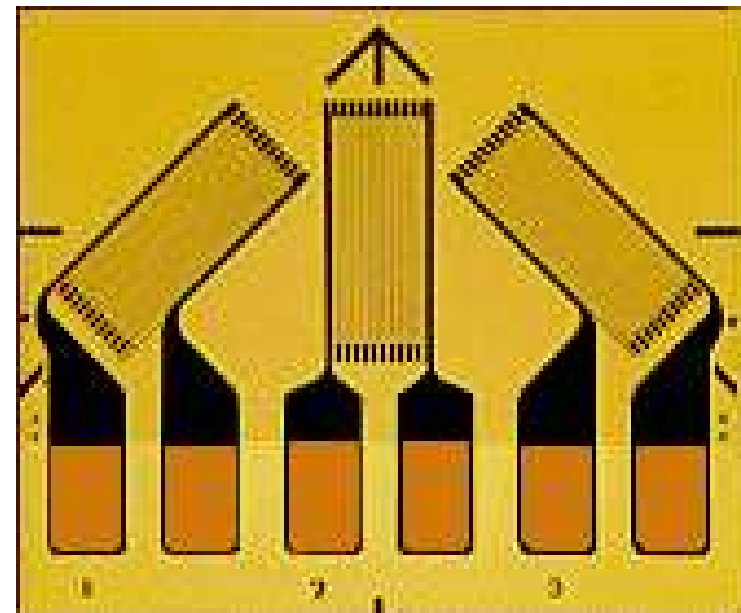
Samostatný
tenzometr



Biaxiálního
tenzometr



Tříprvkový
tenzometr



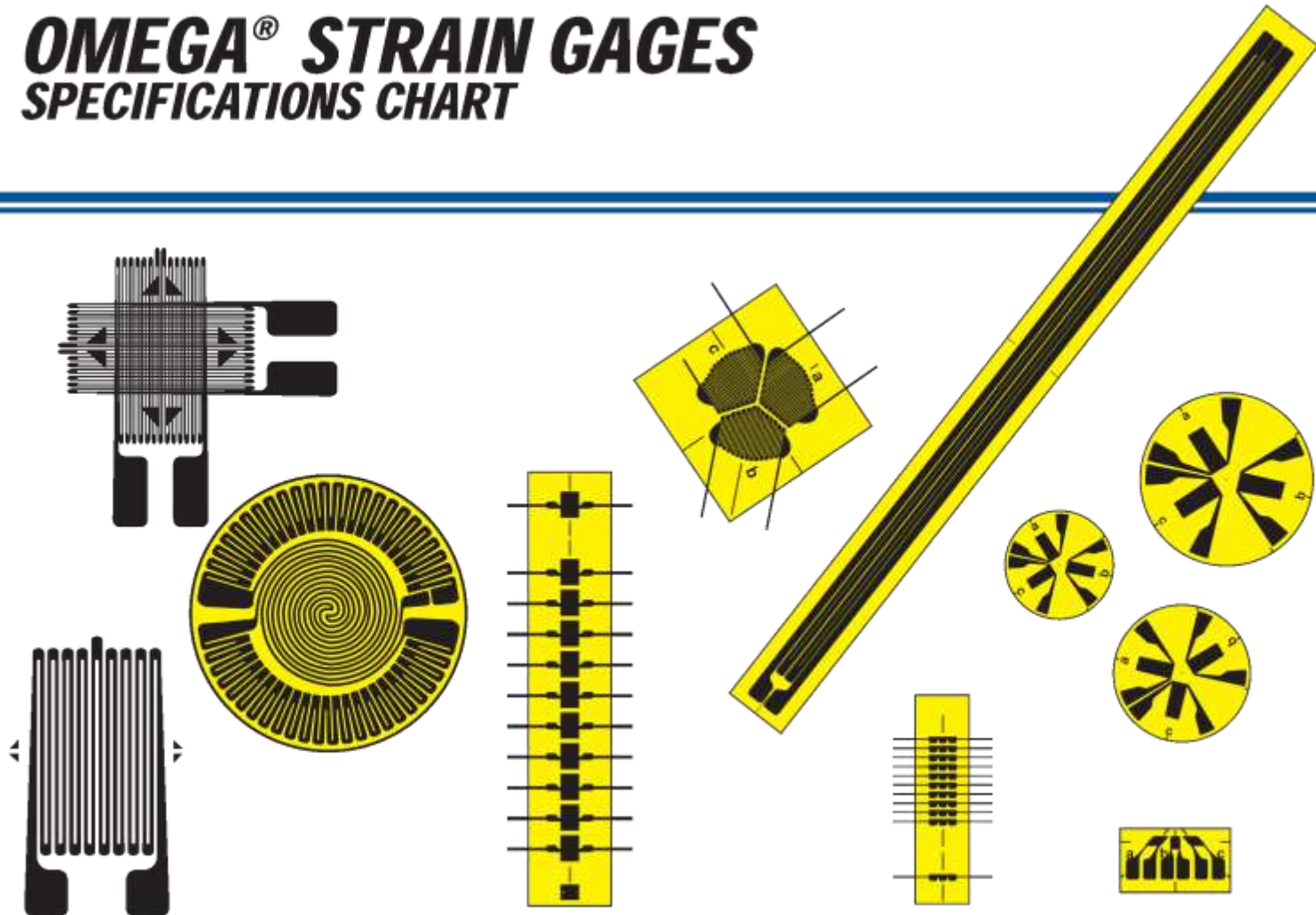
? Fóliové kovové tenzometry: Nakreslete 2 příklady uspořádání tenzometrů

Kovové tenzometry – fóliové

Foliové tenzometry firmy OMEGA

OMEGA® STRAIN GAGES

SPECIFICATIONS CHART



Kovové tenzometry – fóliové

BLH

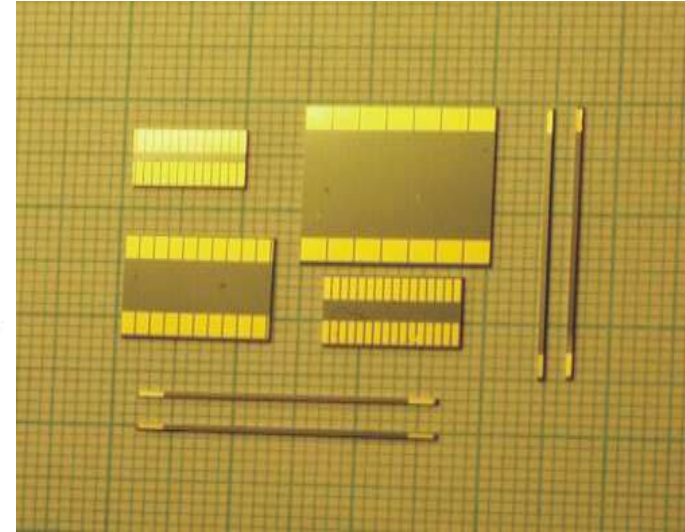
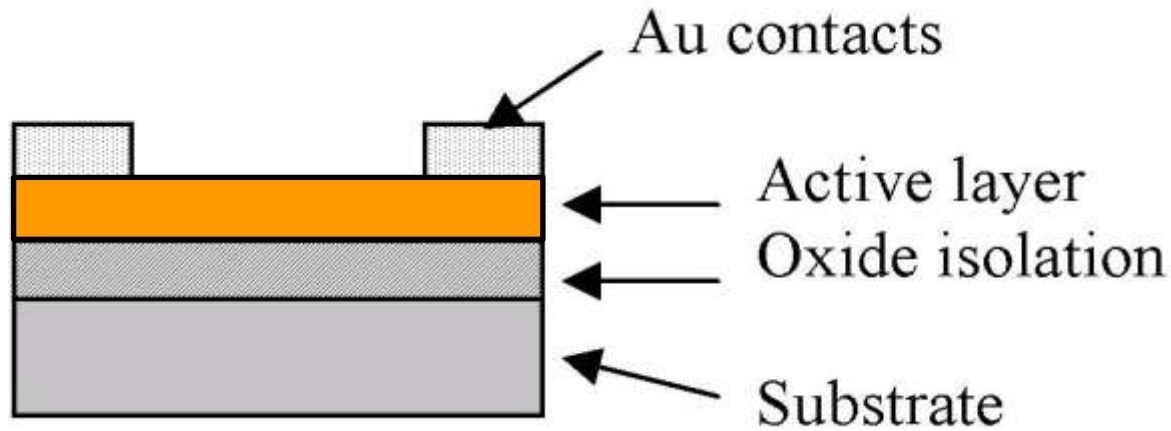
Gage Specifications

| Gage Type Speci- fications | FAB | FAE | FAP | FSM | FSE | DLB | Semiconductor | |
|---|--|---------------------|--|---|---------------------|---|--------------------------------|-------------------|
| Gage alloy | Constantan | Constantan | Constantan | Stabiloy (Karma) | Karma | Plat-Tung | Silicone | |
| Gage Type Family | FAB | FAE | FAP | FSM | FSE | DLB-PT | SPB | SNB |
| Nom. Gage Factors at Room Temperat. | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 2,2 | 4,0 | + 110 to + 150 | - 103 to - 110 |
| Carrier Material | Phenolic Glass Re- inforced | Polyimide | Nitro- Cellulose Impregn. Paper | High-Temp. Polyimide Glass Re- inforced | Polyimide | Phenolic Glass Reinforced | Phenolic Glass Reinforced | |
| Lead Material | Nickel- Clad Copper Ribbon 0,05 x 0,3 x 30 | See Options | Nickel- Clad Copper Ribbon 0,05 x 0,3 x 30 | Beryllium Copper Ribbon 0,05 x 0,38 x 19 | see options | Etched Be Cu Fatigue Resistant Design | Nickel Plated Copper Ribbon | |
| Gage Thickness Overall in mm | 0,06 Encaps. | 0,038 | 0,09 Encaps. | 0,06 Encaps. | 0,03 | 0,11 Encaps. | 0,06 Encapsulated | |
| Flexibility- Min. Safe Bend- ing Radius in mm | 3,1 | 1,5 | 1,5 | 3,1 | 4,7 | 3,1 | 76 | |
| Maximum Temperature Range °C * | - 195 to + 315 | - 195 to + 315 * | - 195 to + 82 | - 268 to + 400 | - 268 to + 260 * | - 268 to + 315 | - 268 to + 315 | - 268 to + 315 |
| Recommended Temperature Range °C | - 73 to + 232 | - 73 to + 204 | - 73 to + 66 | - 268 to + 315 | - 268 to + 232 * | - 195 to + 315 | - 73 to + 232 | - 73 to + 232 |



Kovové tenzometry – s tenkou odporovou vrstvou

Tenká odporová vrstva



Technologie – aktivní vrstva naprašováním (např. Si) na nosnou destičku

Piezodoporový jev v polovodičích (Polovodičové tenzometry)



- Piezoodporový efekt v polovodičích může být **mnohonásobně větší** než piezoodporový efekt v kovech
- Polovodičové materiály: např. **Si** (krystalický, polykrystalický, amorfní), **Ge**, **GaAs**, **SiC**, **diamant** a další
- **Princip:** Změna měrného odporu polovodiče je způsobena **anizotropní** změnou pohyblivosti nosičů proudu při působení mechanického napětí v určité krystalografické ose polovodiče

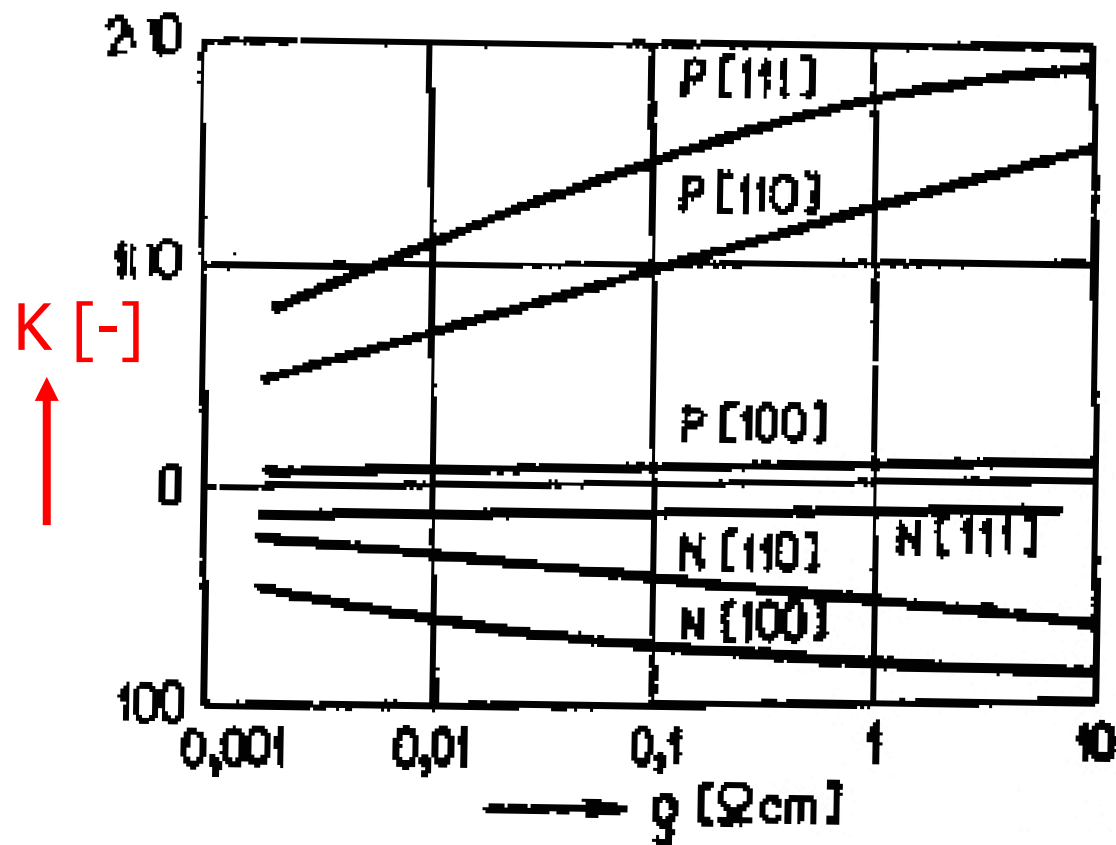
? Piezoodporový jev v polovodičích:
typické používané polovodičové materiály



Piezodoporový jev v polovodičích

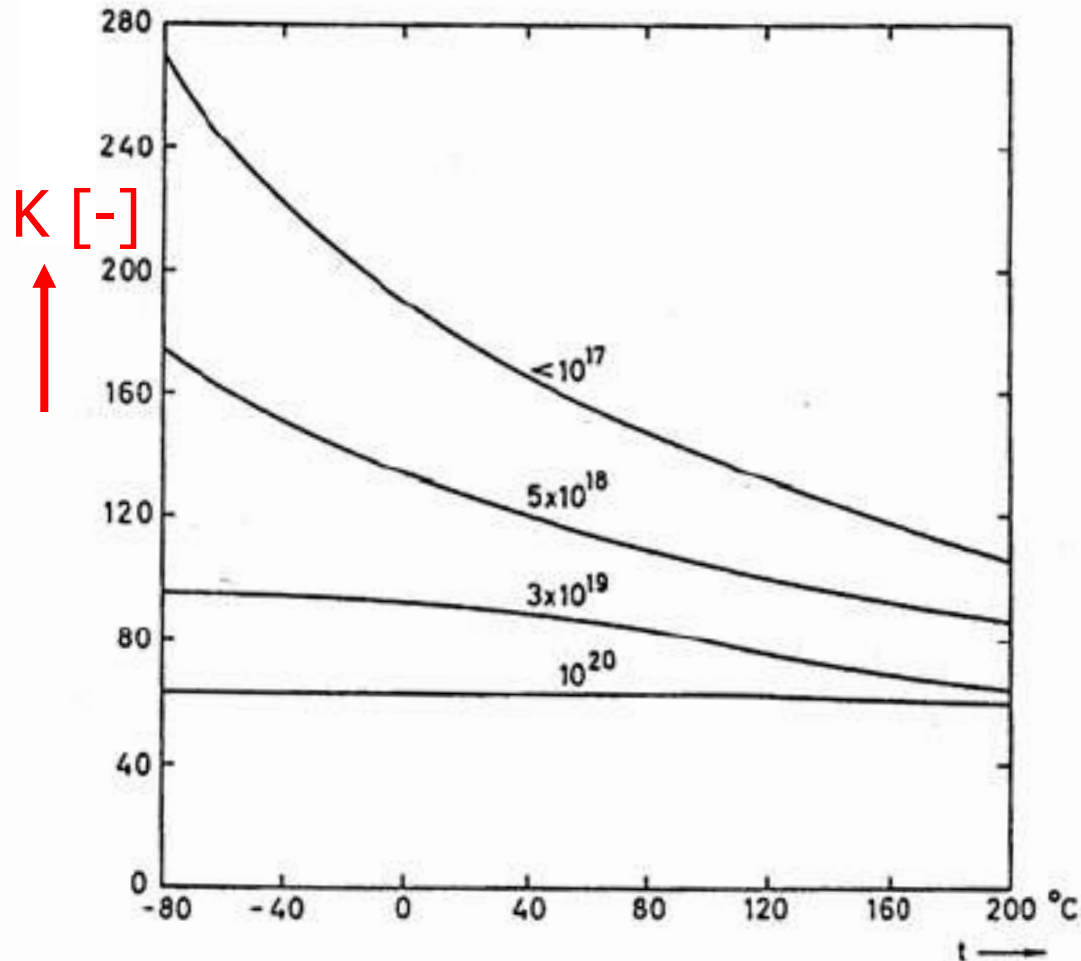
Koeficient deformační citlivosti K - závislost na typu vodivosti

- K je kladný pro P typ polovodiče
- K je záporný pro N typ polovodiče



Piezodoporový jev v polovodičích

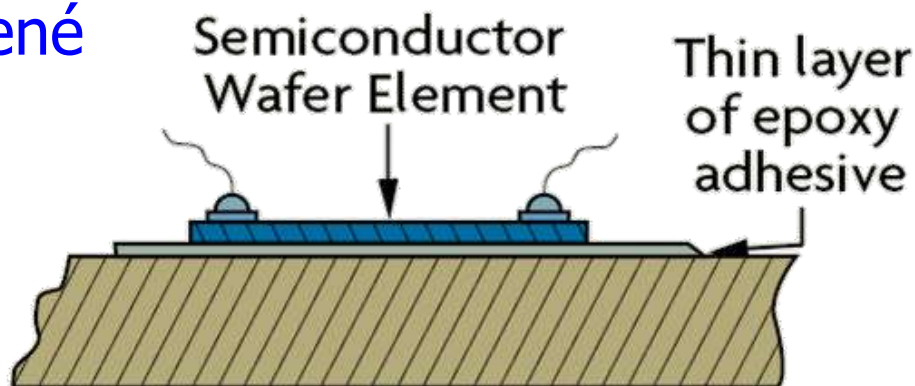
Koeficient deformační citlivosti **K** - závislost na dotaci a teplotě



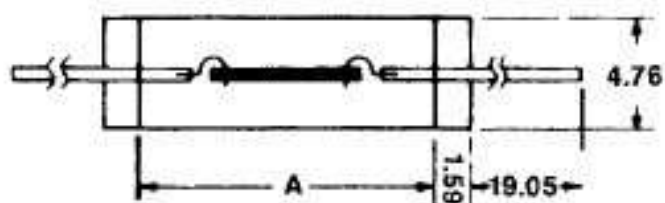
Polovodičové tezometry - lepené

Zkouška

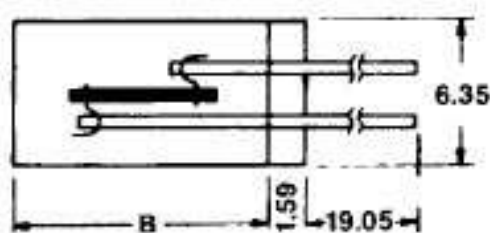
Lepené



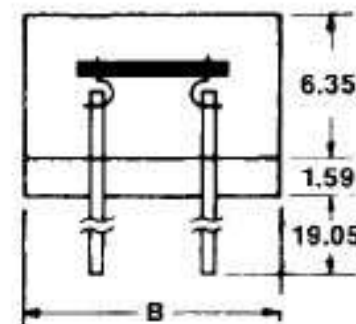
Typické rozměry: mm



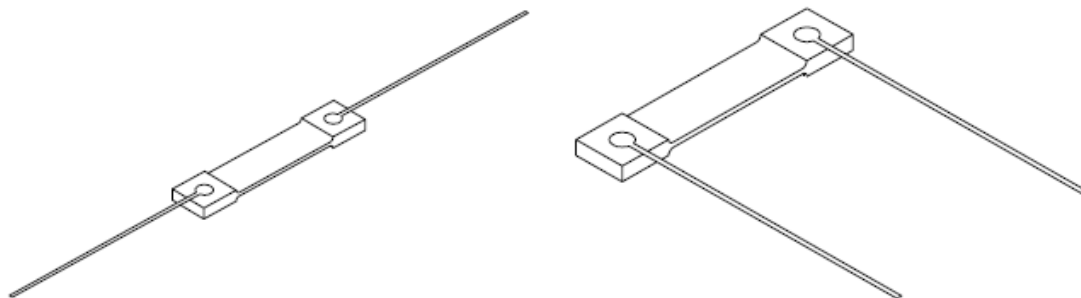
TYP 1



TYP 3



TYP 2

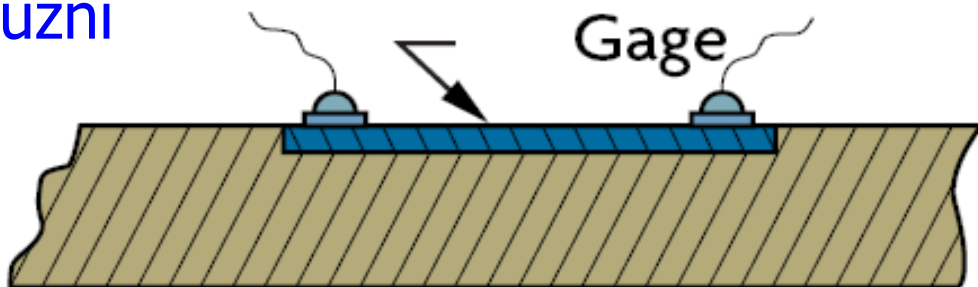


? Polovodičové lepené tenzometry:
Nakreslete konstrukční uspořádání
lepeného polovodičového tenzometru,
typické rozměry

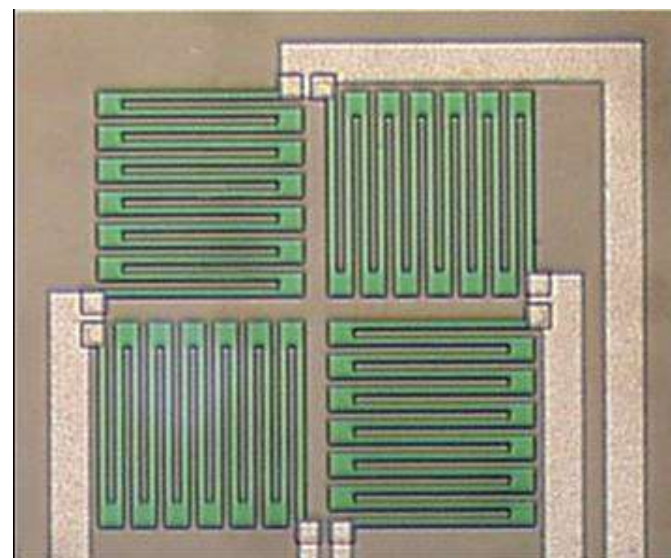
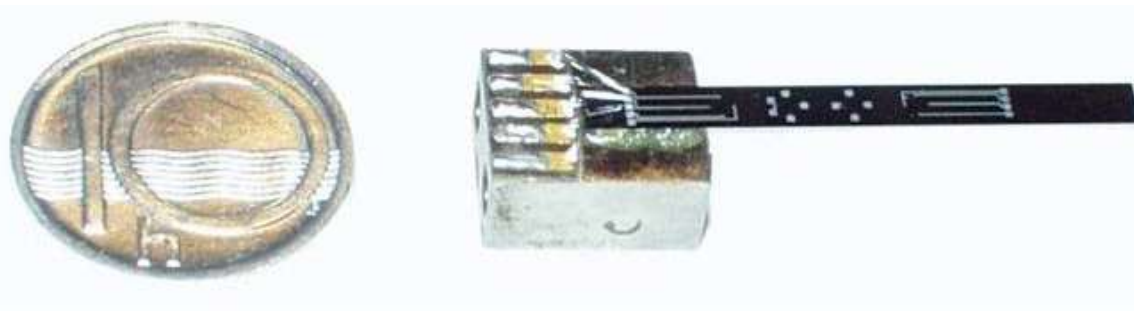
Polovodičové tenzometry - difúzní

Zkouška

Difúzní












Typické rozměry: μm - mm



? Polovodičové difúzní tenzometry:
Nakreslete konstrukční uspořádání polovodičového difúzního tenzometru, typické rozměry

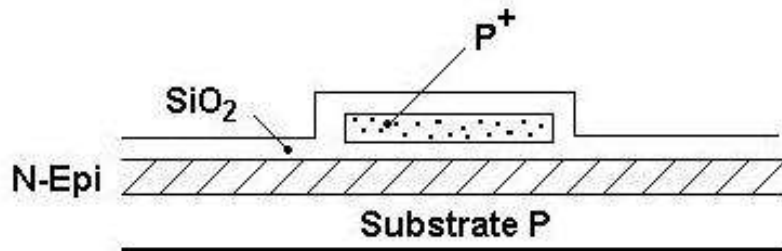
Polovodičové tezometry

| DWG | Gage Type | Nominal Resistance (ohms) | Nominal GF | DWG | Gage Type | Nominal Resistance (ohms) | Nominal GF |
|---|------------|---------------------------|------------|---|-------------|---------------------------|------------|
|  | SPB1-03-12 | 120 | +110 |  | SPB1-09-100 | 1000 | +145 |
| | SPB1-06-12 | 120 | +110 | | SPB1-18-100 | 1000 | +135 |
| | SPB1-07-35 | 350 | +130 | | SPB1-15-200 | 2000 | +145 |
| | SPB1-12-12 | 120 | +115 | | SPB1-35-300 | 3000 | +150 |
| | SPB1-12-35 | 350 | +130 | | | | |
| | SPB1-20-35 | 350 | +118 | | | | |
|  | SPB2-03-12 | 120 | +110 |  | SPB2-09-100 | 1000 | +145 |
| | SPB2-06-12 | 120 | +110 | | SPB2-18-100 | 1000 | +136 |
| | SPB2-07-35 | 350 | +130 | | SPB2-15-200 | 2000 | +145 |
| | SPB2-12-12 | 120 | +115 | | SPB2-35-300 | 3000 | +150 |
| | SPB2-12-35 | 350 | +130 | | | | |
| | SPB2-20-35 | 350 | +118 | | | | |
|  | SPB3-03-12 | 120 | +110 |  | SPB3-09-100 | 1000 | +145 |
| | SPB3-06-12 | 120 | +110 | | SPB3-18-100 | 1000 | +136 |
| | SPB3-07-35 | 350 | +130 | | SPB3-15-200 | 2000 | +145 |
| | SPB3-12-12 | 120 | +115 | | SPB3-35-300 | 3000 | +150 |
| | SPB3-12-35 | 350 | +130 | | | | |
| | SPB3-20-35 | 350 | +118 | | | | |
|  | SP4-17-35 | 350 | +118 |  | SP5-09-100 | 1000 | +145 |
| | | | | | SP5-15-100 | 1000 | +136 |
|  | SP5-03-12 | 120 | +110 | | | | |
| | SP5-06-12 | 120 | +110 | | | | |
| | SP5-06-35 | 350 | +130 | | | | |
| | SP5-10-12 | 120 | +115 | | | | |
| | SP5-11-35 | 350 | +130 | | | | |
| | SP5-17-35 | 350 | +118 | | | | |

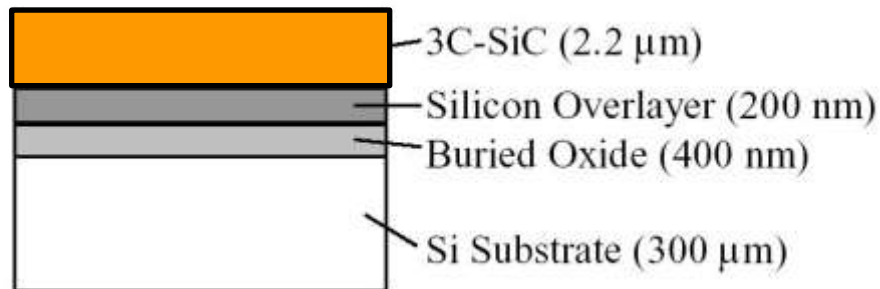


Polovodičové tezemetry pro vysoké teploty

Technologie pro vysoké teploty



Tenzometr v technologii SOI



Tenzometr vyrobený na bázi karbidu křemíku (SiC)

- Běžný rozsah -30 °C – 140 °C
- Vysoké teploty >200 °C

| Technology | Maturity | Temp Range |
|----------------------------|-------------------|----------------|
| Si CMOS | Production | -55 to 150 °C |
| SOI (silicon on insulator) | Production | -55 to 300 °C |
| E/D GaAs | Production | -55 to 150 °C |
| Complimentary GaAs | Development | -55 to 350 °C |
| SiC (Silicon Carbide) | Early Development | -55 to 600 °C |
| Diamond | Early Development | -55 to 1000 °C |

$$\Delta R = \alpha_R R_0 \Delta T$$

Teplotní součinitel odporu

$$\alpha_R = \frac{1}{R_0} \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (^{\circ}C^{-1})$$

kde R_0 – je odpor při pokojové teplotě
 ΔR – změna odporu vlivem teploty
 ΔT – rozsah změny teploty

? Polovodičové tenzometry:
napište definici teplotního
součinitele odporu
polovodičového tenzometru



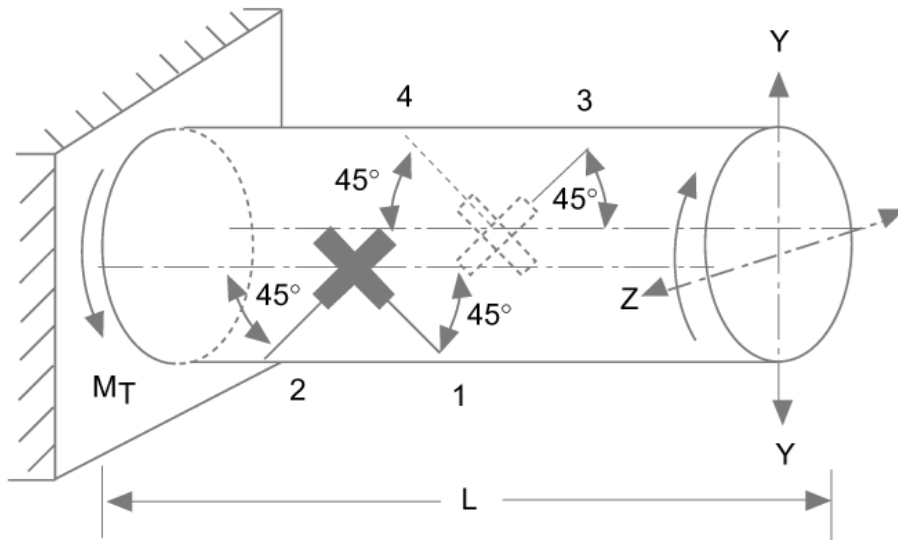
Polovodičové a kovové tezometry – porovnání typických základních vlastností

| Vlastnost | tenzometr Si, typ P | tenzometr drátek nebo fólie Karma |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| součinitel K | 125 | 2 |
| α_R [1/K] | $12 \cdot 10^{-6}$ | $0,2 \cdot 10^{-6}$ |
| α_K [1/K] | $16 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-6}$ |
| převodní charakteristika | nelineární | lineární |

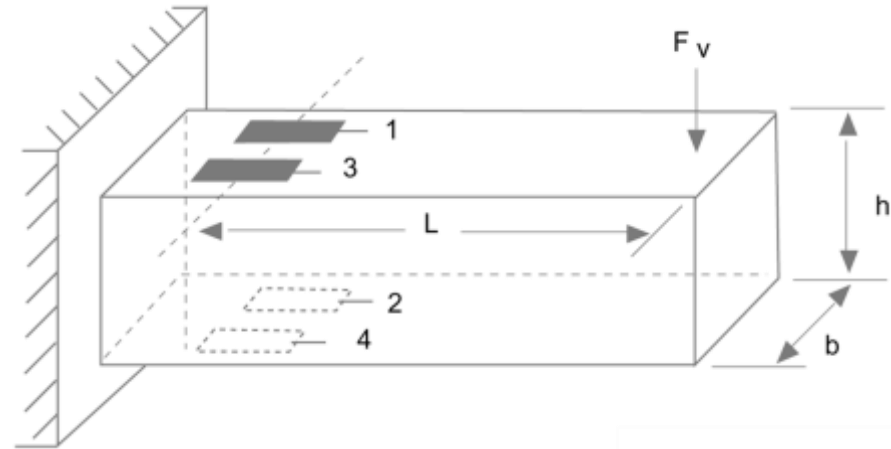


Polovodičové tezometry – umístění

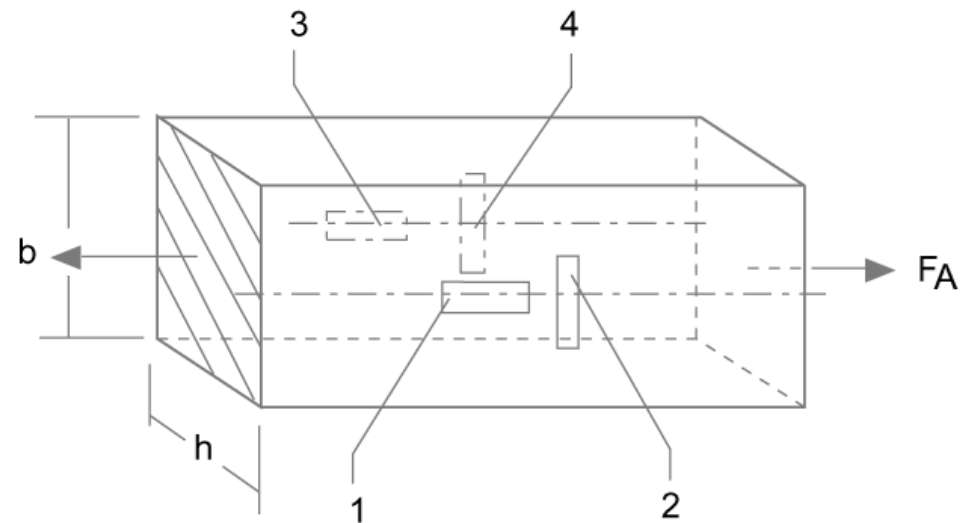
Měření torzní deformace



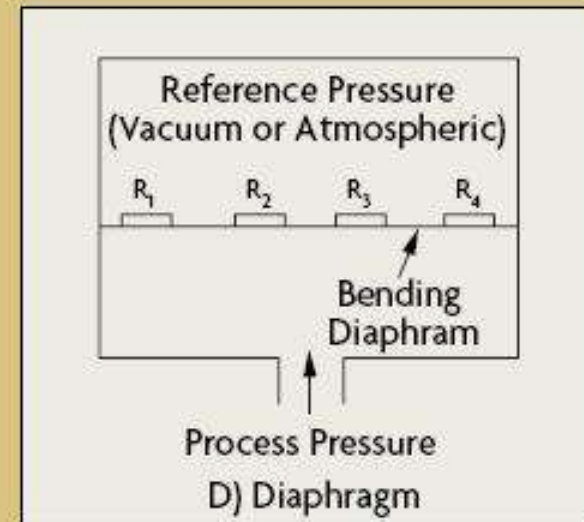
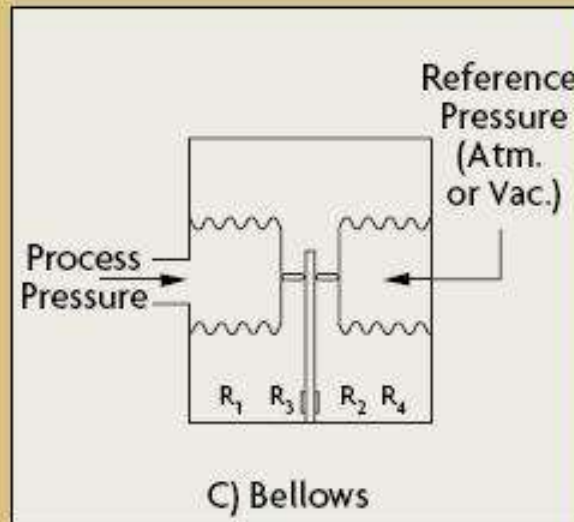
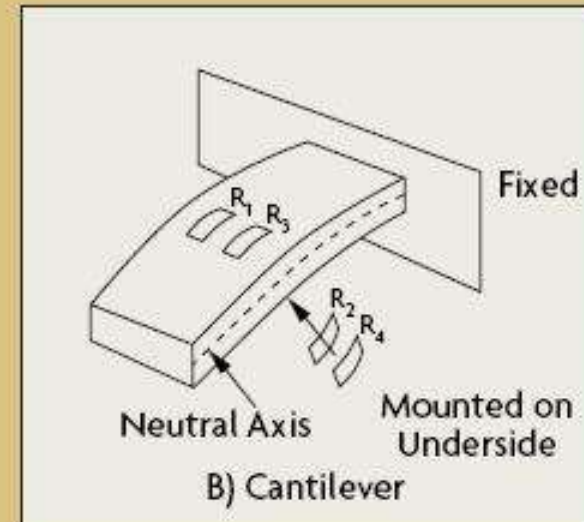
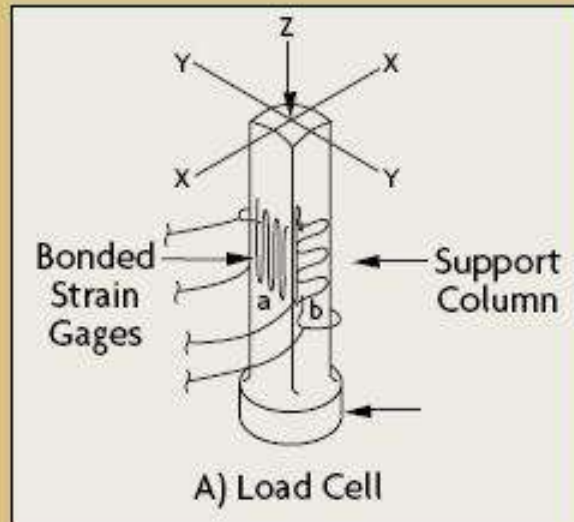
Měření ohybu na nosníku



Měření axiální deformace

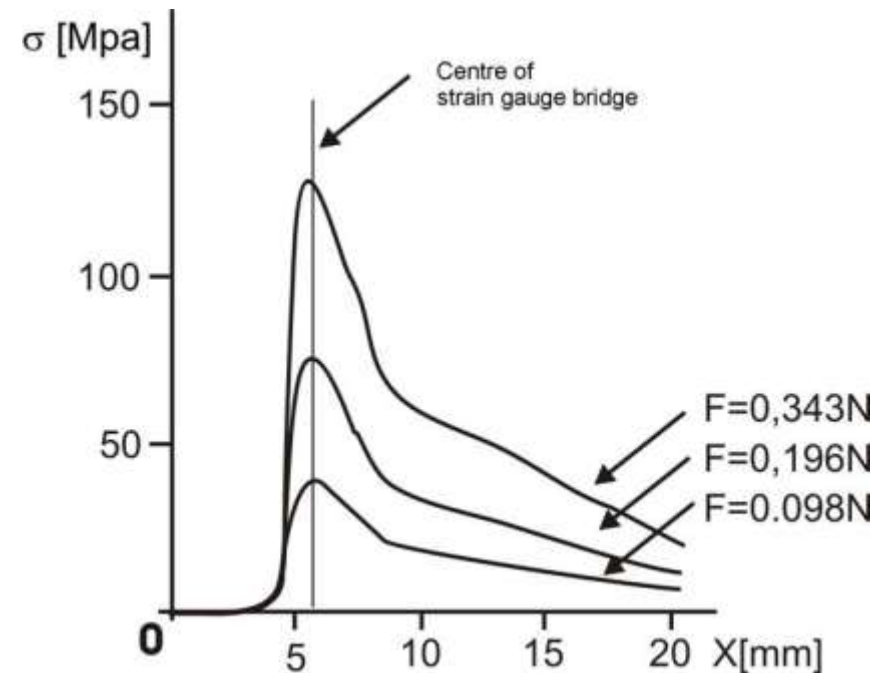
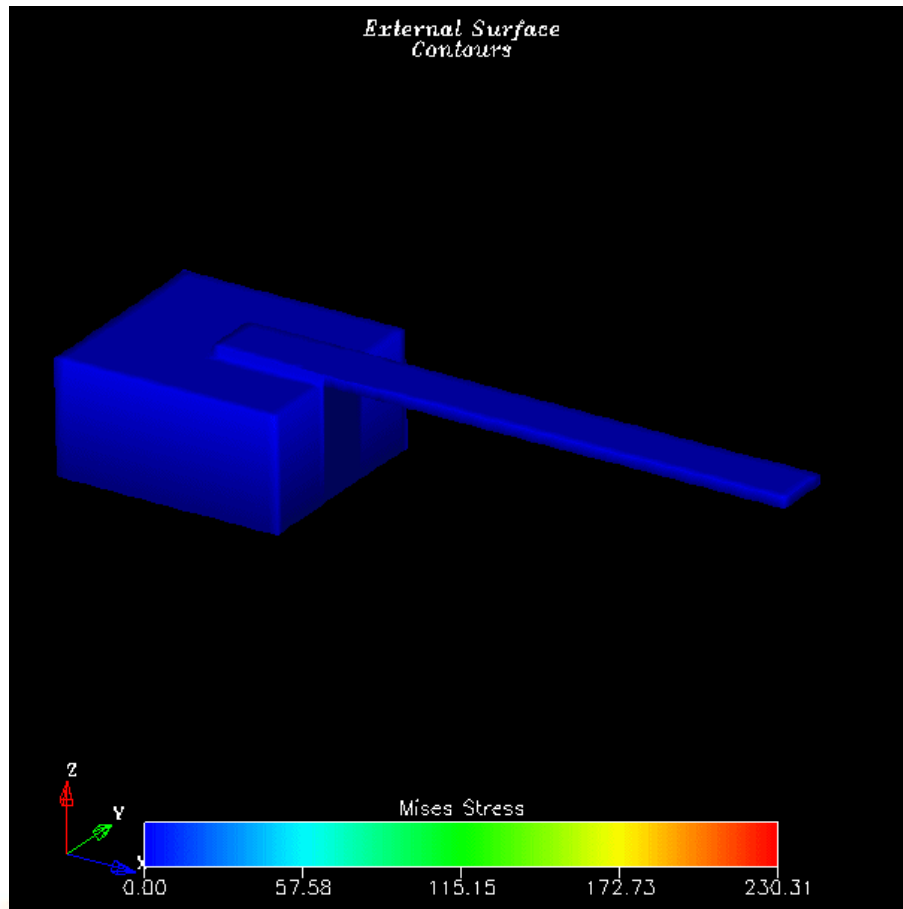


Polovodičové tezometry – umístění



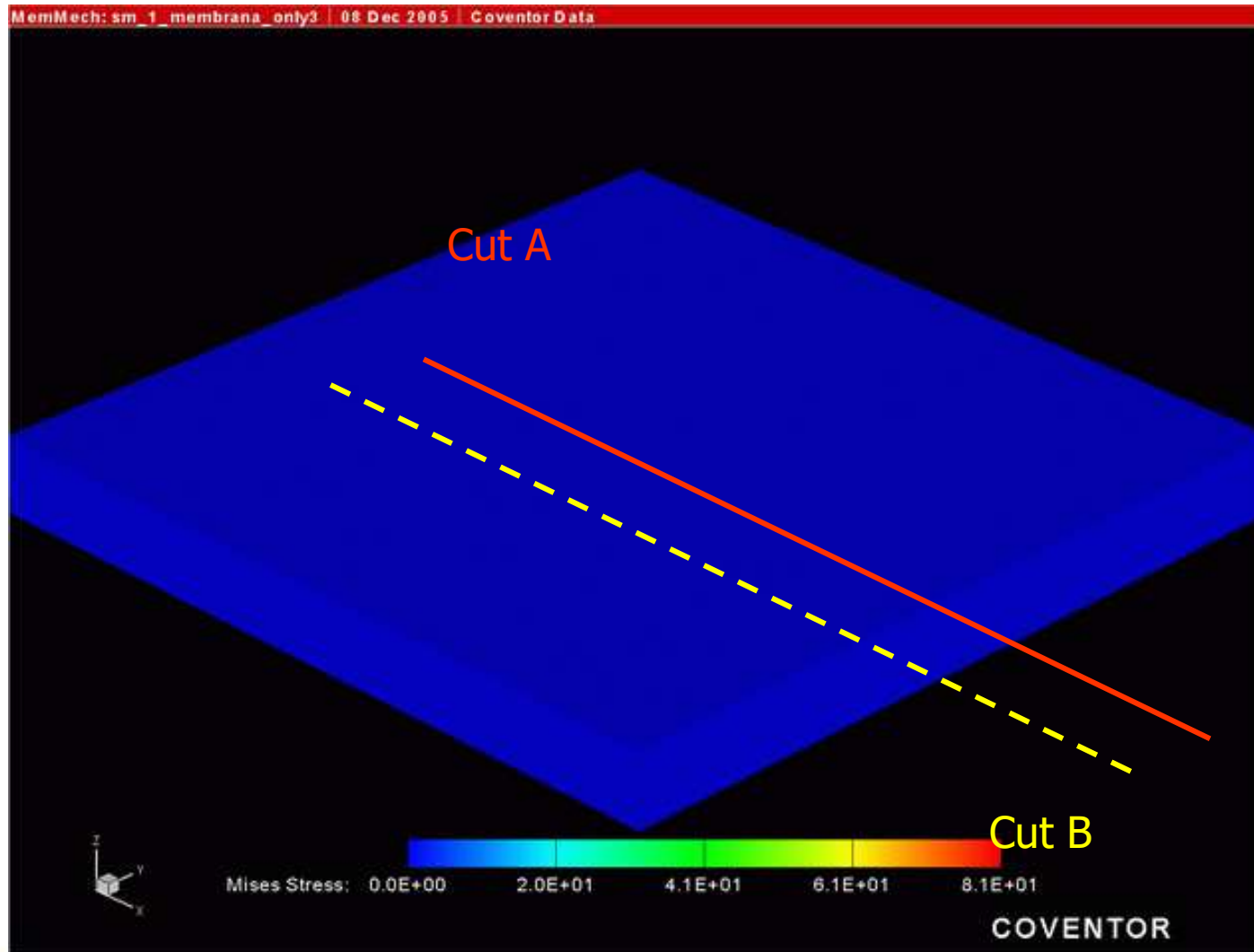
Polovodičové tezometry – umístění

Nosník - mechanické namáhání



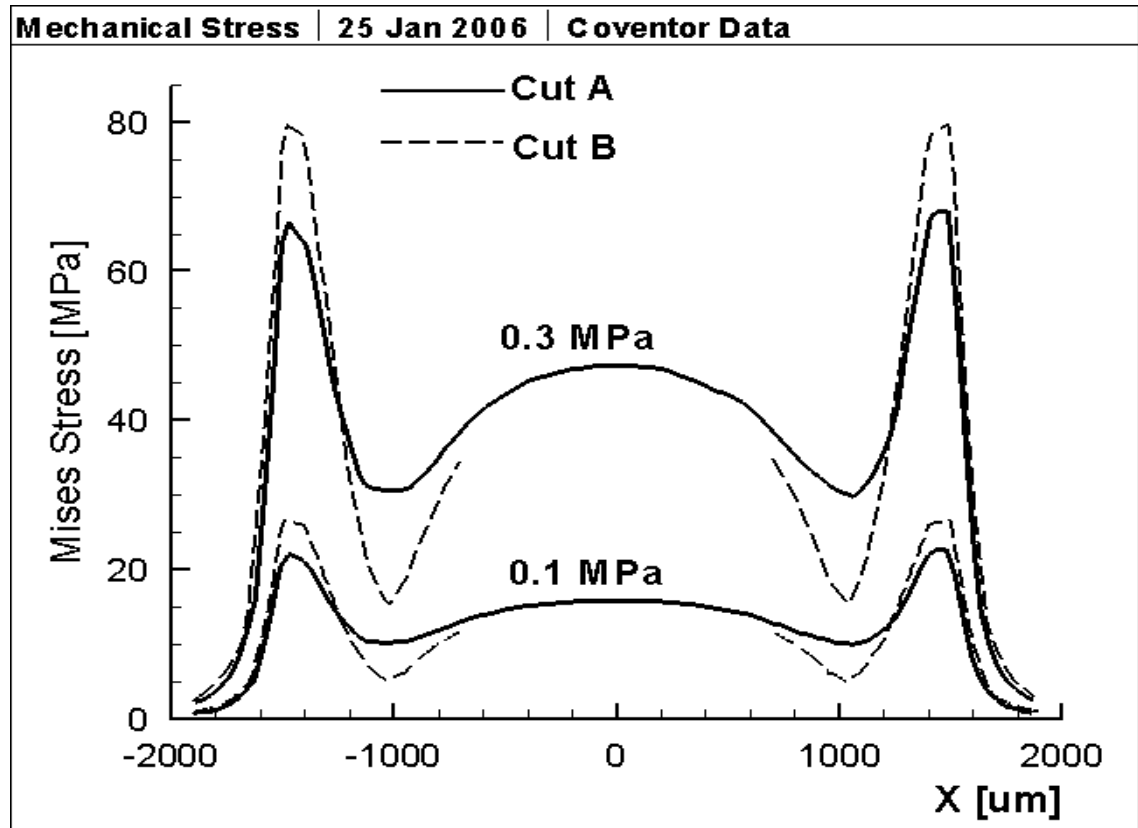
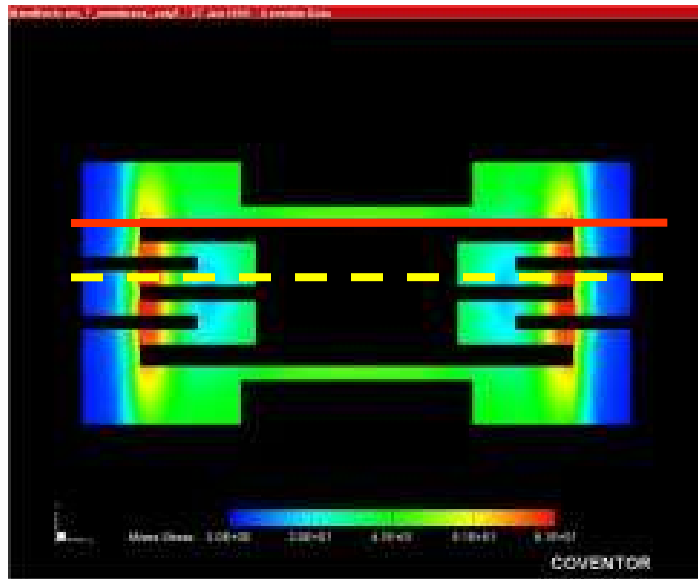
Polovodičové tezometry – umístění

Membrána - mechanické namáhání



Polovodičové tezometry – umístění

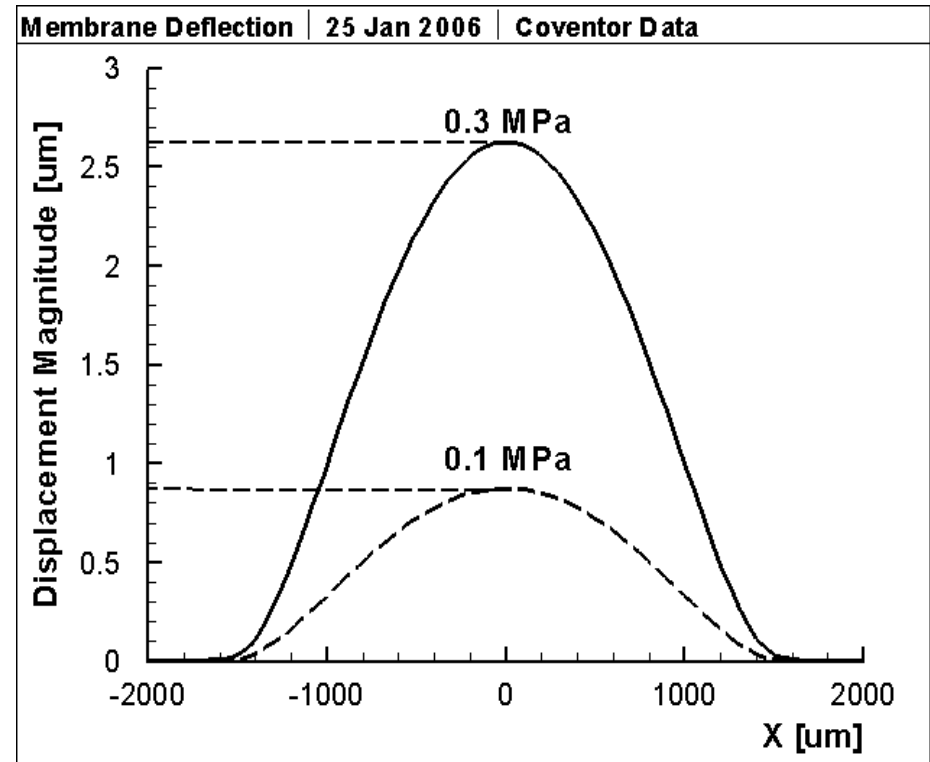
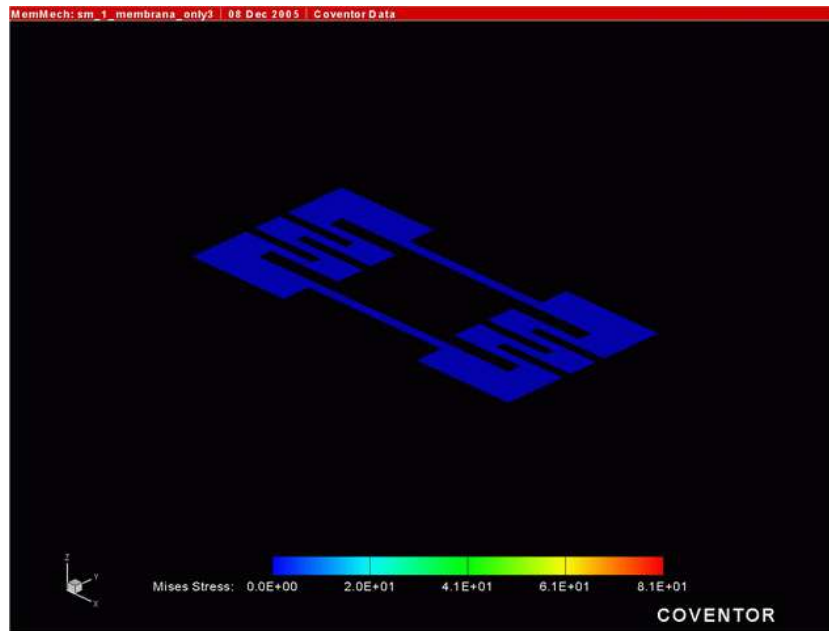
Membrána - mechanické namáhání



Polovodičové tezometry – umístění

Membrána - mechanické namáhání

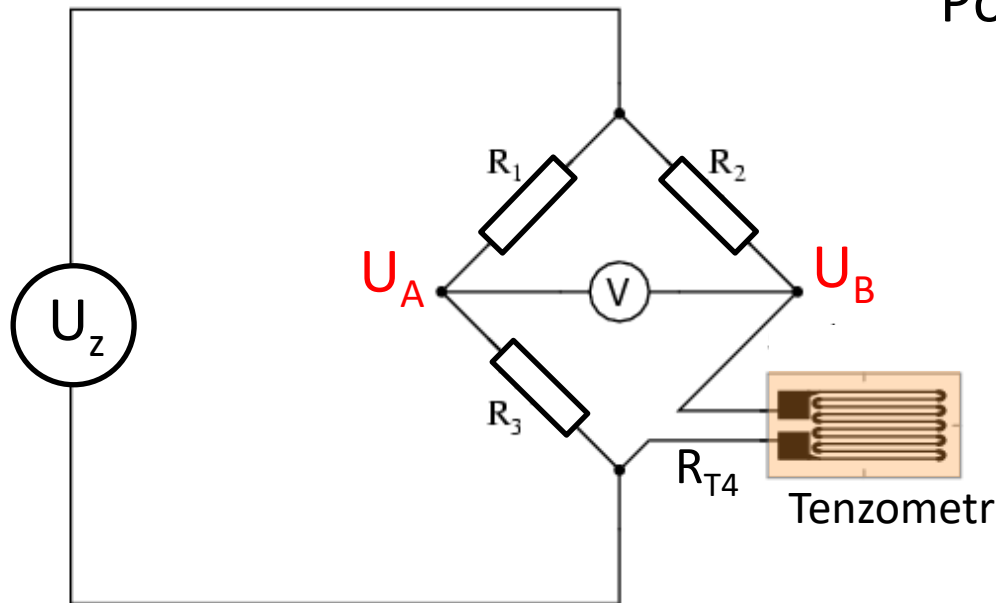
Průhyb $2,6 \mu\text{m}$ při tlaku $0,3 \text{ MPa}$ tloušťka membrány $100 \mu\text{m}$



Tenzometry – vyhodnocovací obvody



Wheatstoneův můstek (nejčastěji)



Podmínka pro vyvážený můstek:

$$U_A = U_B$$

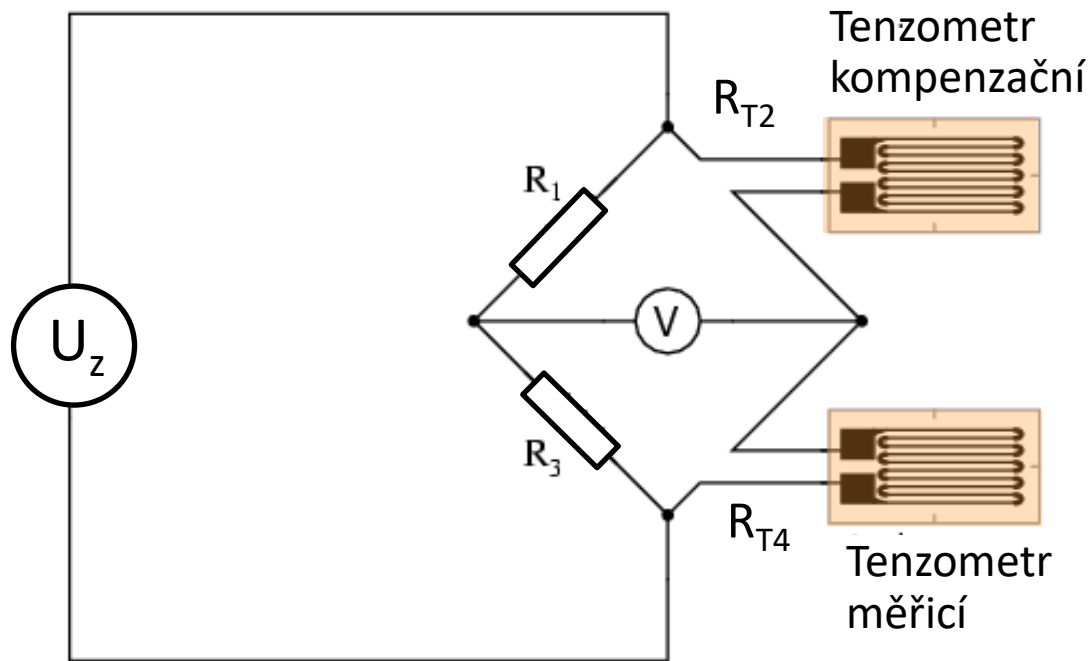
$$U_A = U_z \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$

$$U_B = U_z \frac{R_{T4}}{R_2 + R_{T4}}$$

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_{T4}}$$

? Tenzometry – vyhodnocování signálu:
Nakreslete zapojení tenzometrů do
tenzometrického můstku, napište
podmínku vyvážení můstku

Wheatstoneův můstek – základní teplotní kompenzace



Podmínka pro
vyvážený můstek:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_{T2}}{R_{T4}}$$

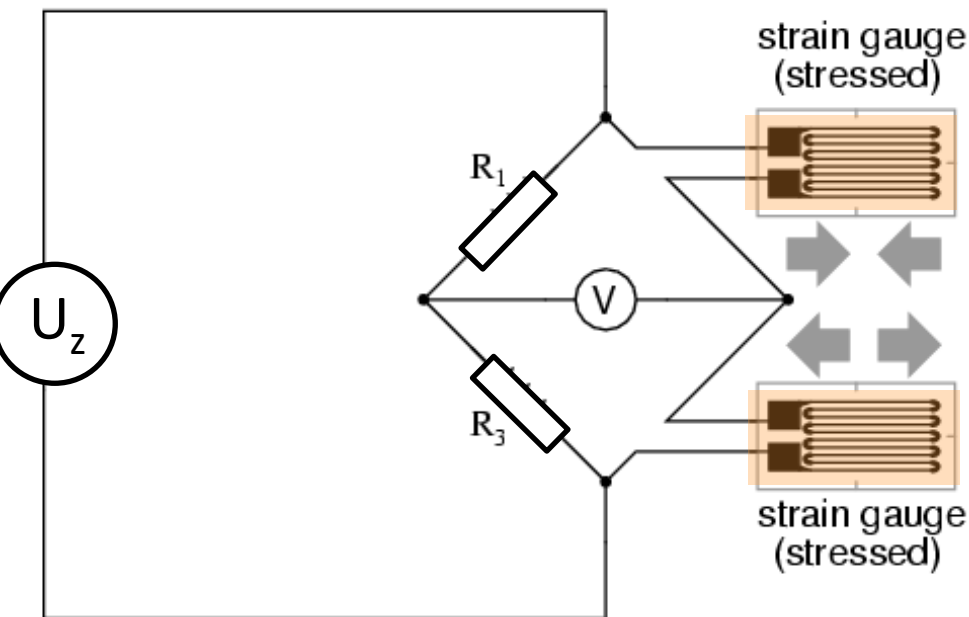
? Tenzometry – vyhodnocování signálu:

Nakreslete princip kompenzace teploty v můstku

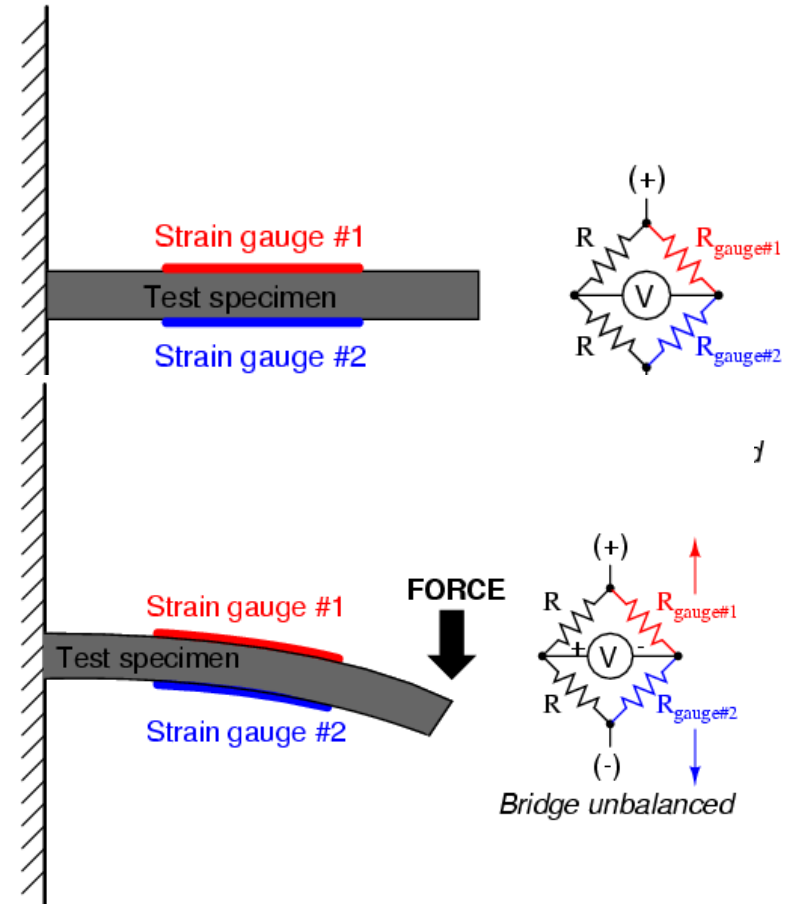
Tezometry – vyhodnocovací obvody

Zkouška

Wheatstoneův můstek – zvýšení citlivosti 2x



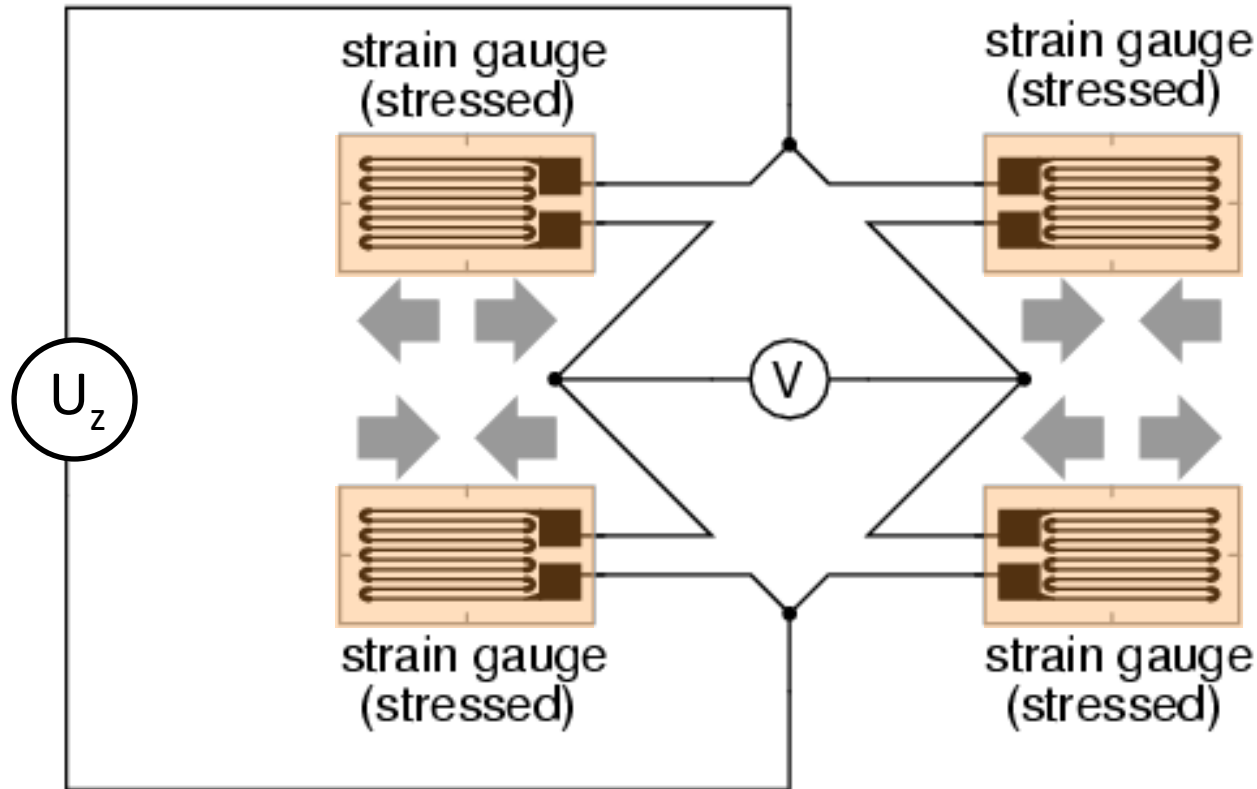
$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_{T2}}{R_{T4}}$$



? Tenzometry – vyhodnocování signálu:
Nakreslete princip zvýšení citlivosti 2x v můstku



Wheatstoneův můstek – zvýšení citlivosti 4x

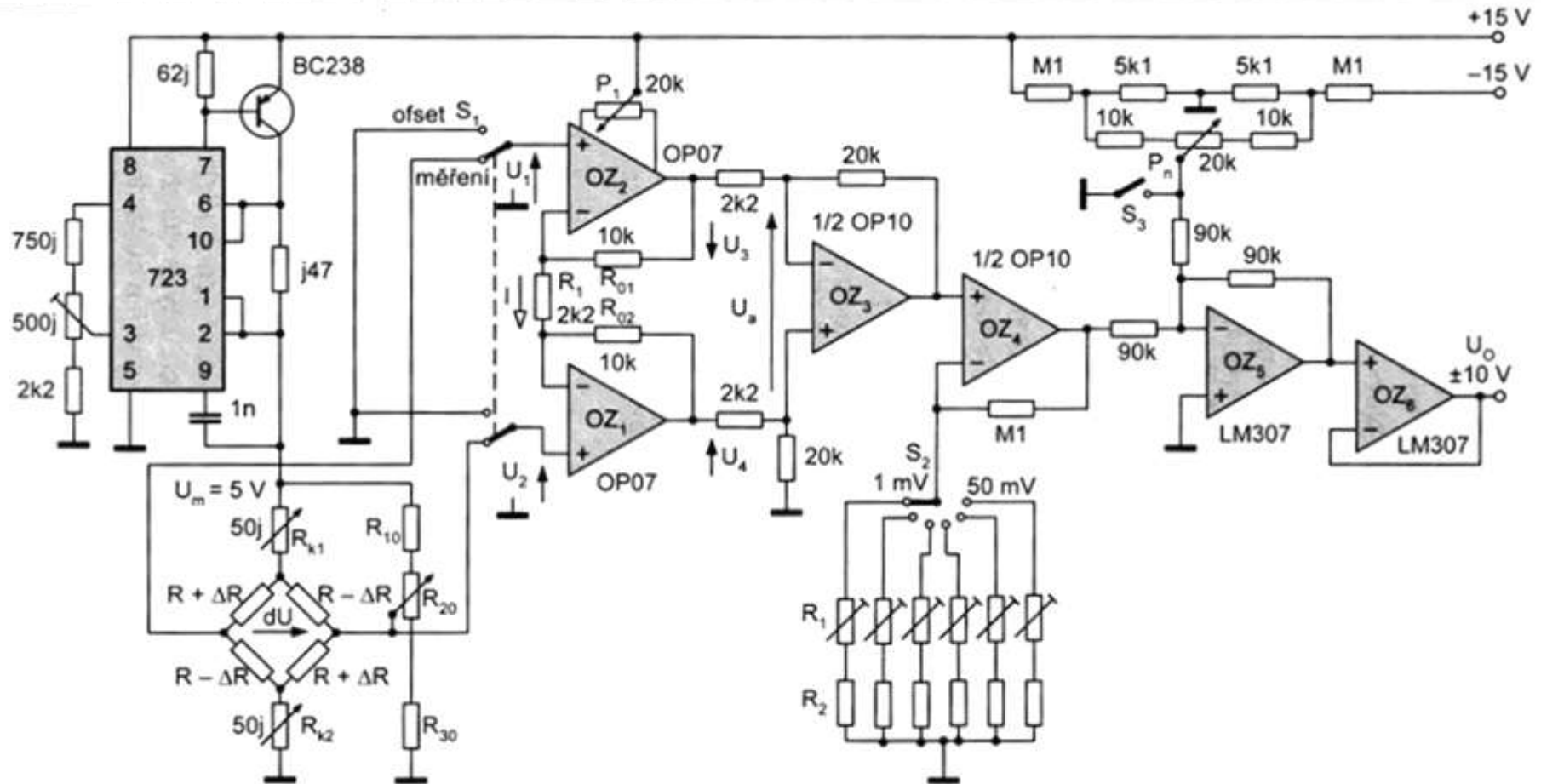


$$\frac{R_{T1}}{R_{T3}} = \frac{R_{T2}}{R_{T4}}$$

? Tenzometry – vyhodnocování signálu:
Nakreslete princip zvýšení citlivosti 4x v můstku

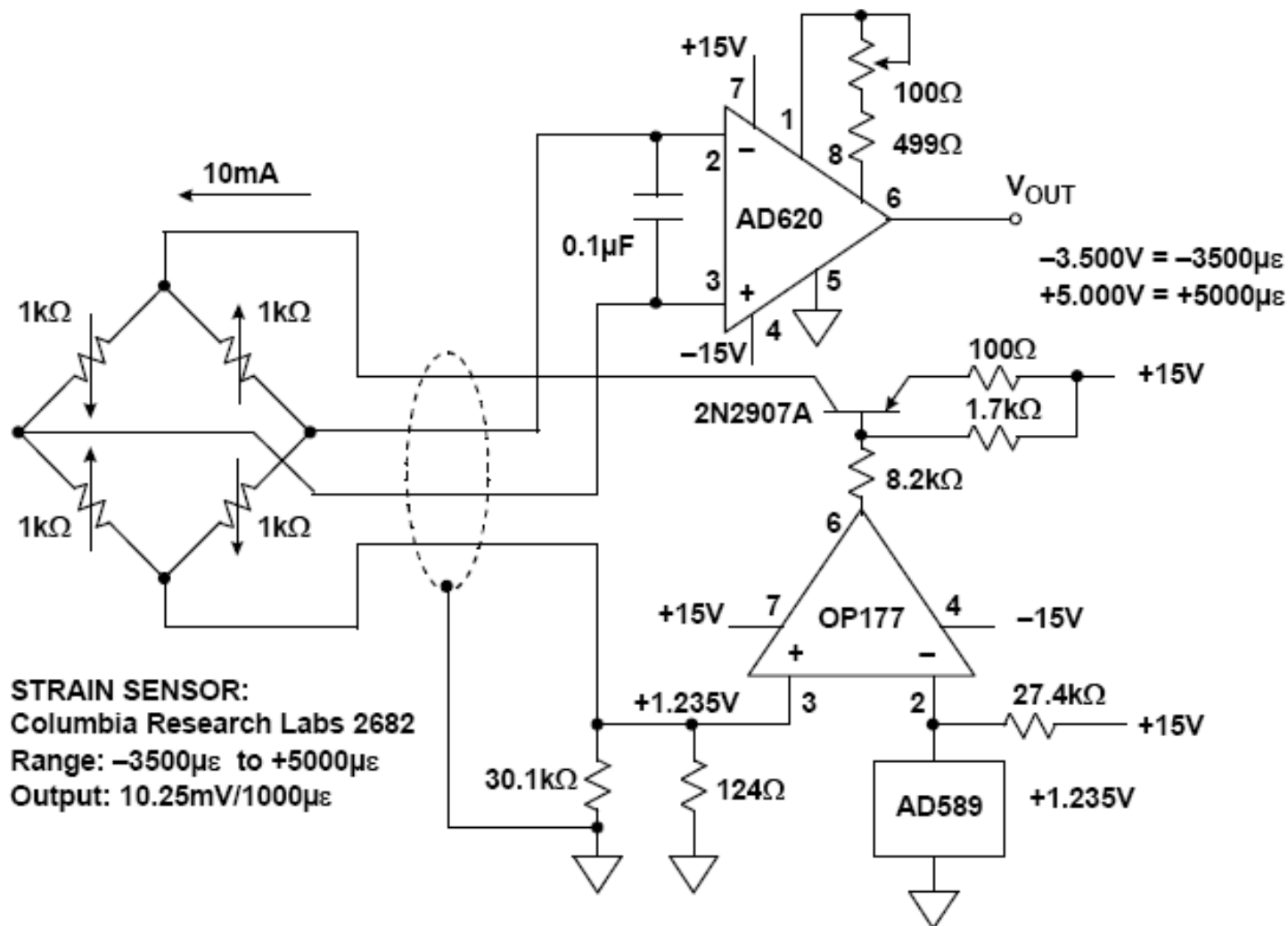
Tezometry – vyhodnocovací obvody

Příklad: Zapojení zesilovače pro tenzometrický můstek



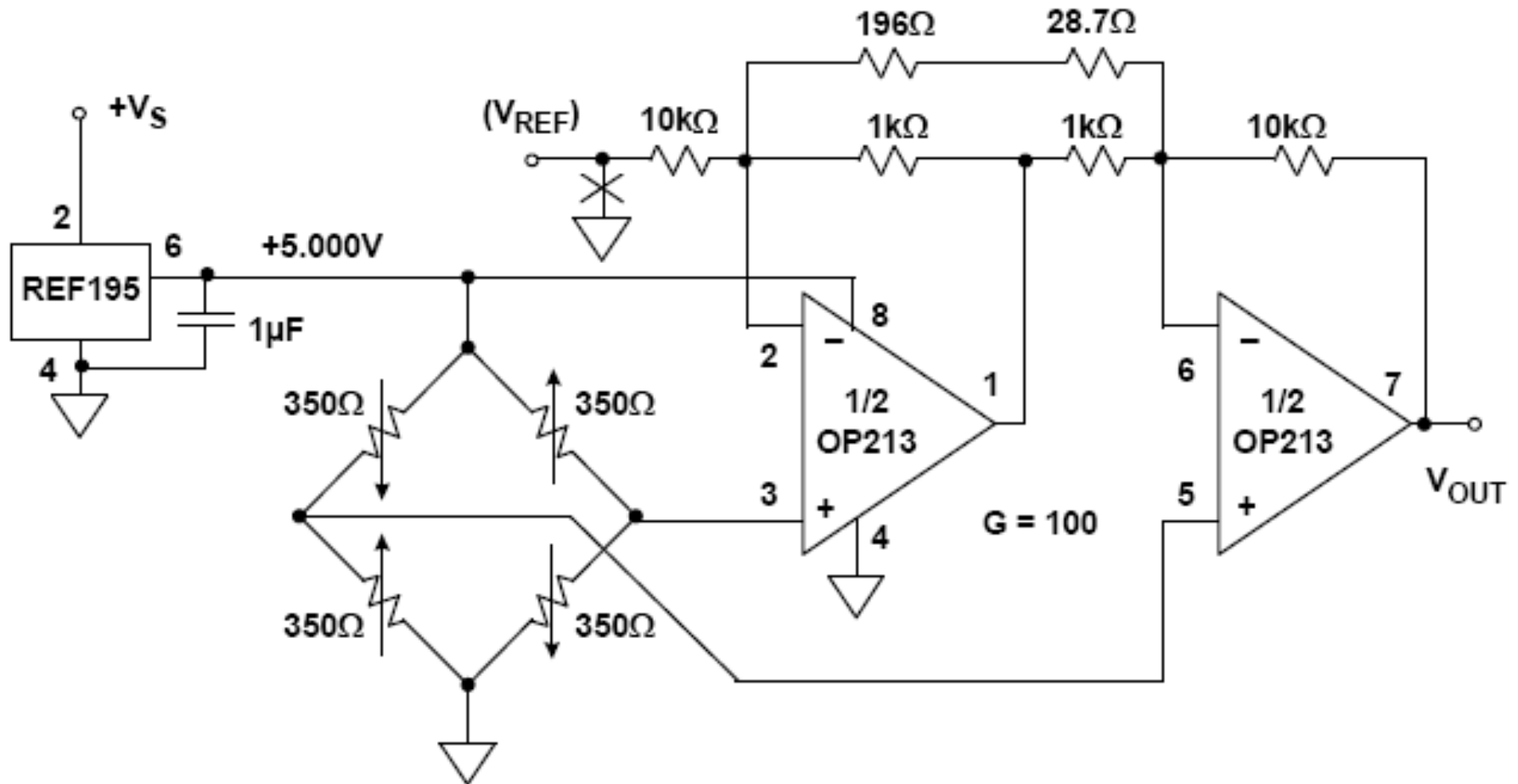
Tezometry – vyhodnocovací obvody

Příklad: Přesný zesilovač pro tenzometrický můstek (Analog Devices)



Tezometry – vyhodnocovací obvody

Příklad: Přesný zesilovač pro siloměry – Analog Devices



Vyhodn. IO

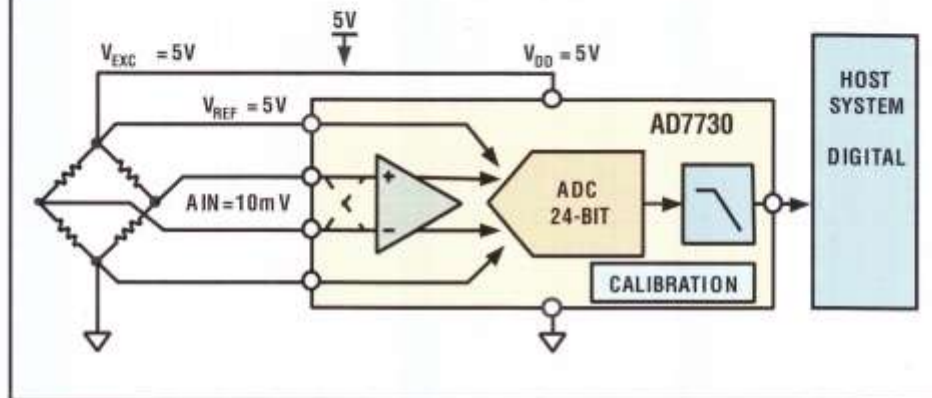
Instrumentation Converters—Solutions for Your Weigh Scales and Battery Monitoring Needs

When precision measurement is needed in applications such as weigh scales and battery monitoring, ADI has more than one answer. From the highest performing weigh scale specific AD7730 to the low power, 24-bit AD7787 for battery monitoring, these devices offer the resolution, stability, and filtering necessary to meet the demands of these applications.

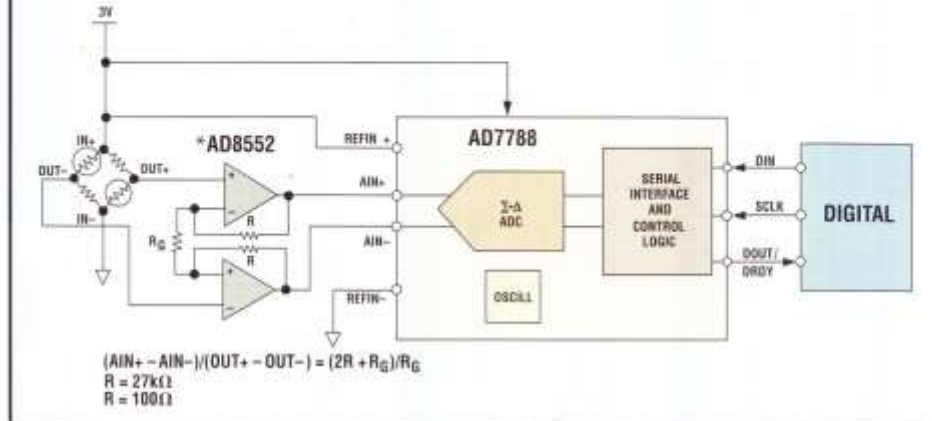
Příklad:

Přesný
přístrojový
převodník pro
váhy a
bateriové
napájení
(Analog
Devices)

AD7730: HIGH PERFORMANCE SOLUTION FOR WEIGH SCALES



AD7788: GENERAL-PURPOSE SOLUTION FOR WEIGH SCALES



Weigh Scale Solutions

AD7730

- Reference detect: detects disconnected 6-wire cable
- TARE DAC: offset removal
- AC or dc load cell excitation
- FASTStep™ filter: rapid indication of applied weight
- RFI immunity: compliant with IEC1000-4-3
- High resolution: 40 nV rms or 1 count in 80,000

AD7788 (with AD8552 Op Amp)

- Low I_{DD} current: 75 μA max
- Low cost
- Internal clock oscillator
- Resolution (with AD8552): 1 count in 5,000 or 600 nV rms

*Order a sample of the AD7788 $\Sigma\Delta$ ADC and automatically receive a sample of the AD8552 amplifier. It's a zero-drift, low noise, single-supply, dual-channel, rail-to-rail input/output op amp that's ideal for driving the AD7788. Price is \$1.71.



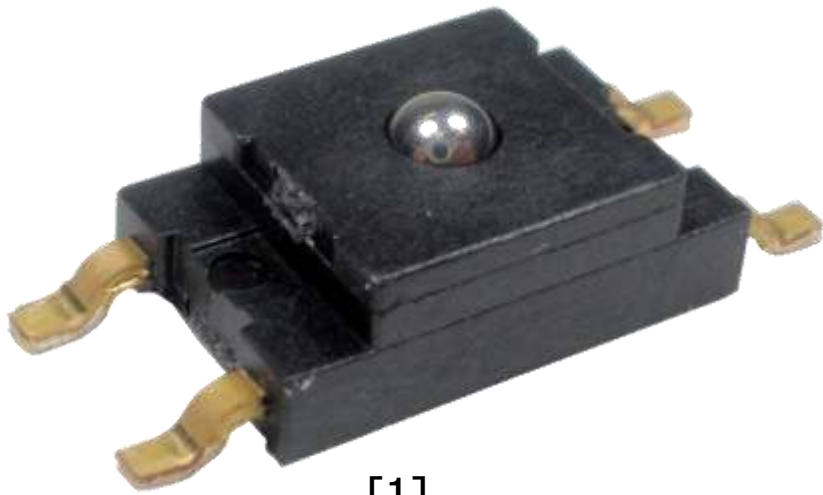
Tenzometr – příklady aplikací

Siloměry



Monitor dechu u novorozenců

- Detekce pohybu při dýchání pomocí piezorezistivních tenzometrů



[1] sensing.honeywell.com

[2] <http://www.jablotron.com/cz/katalog-produktu/personalni-bezpecnost/monitor-dechu-kojence/bm-02.aspx>



Tenzometr – aplikace biomedicína

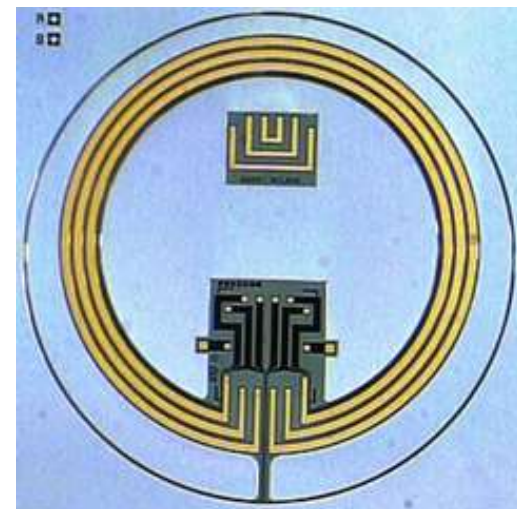


Glaukom, druhá nejčastější příčina slepoty, nelze vyléčit, průběh může být řízen.

Standardně je měření **nitroočního tlaku** (IOP) pomocí tonometru. Měření může selhat, a to zejména u pacientů s glaukomem, protože tlak se mění v průběhu dne a často vrcholy během spánku nebo mimo aktivní dobu.

"inteligentní", kontaktní čočky, který používá malý vložený tenzometr sleduje zakřivení oka po dobu, typicky 24 hodin

Systém s inteligentními kontaktními čočkami, malý přijímač na krku pacienta. Kromě tenzometru čočka obsahuje **anténu, obvod pro zpracování signálu a RF vysílač pro komunikaci**. Objektív je napájen pomocí přijímaných rádiových vln a nemusí být připojen k baterii.

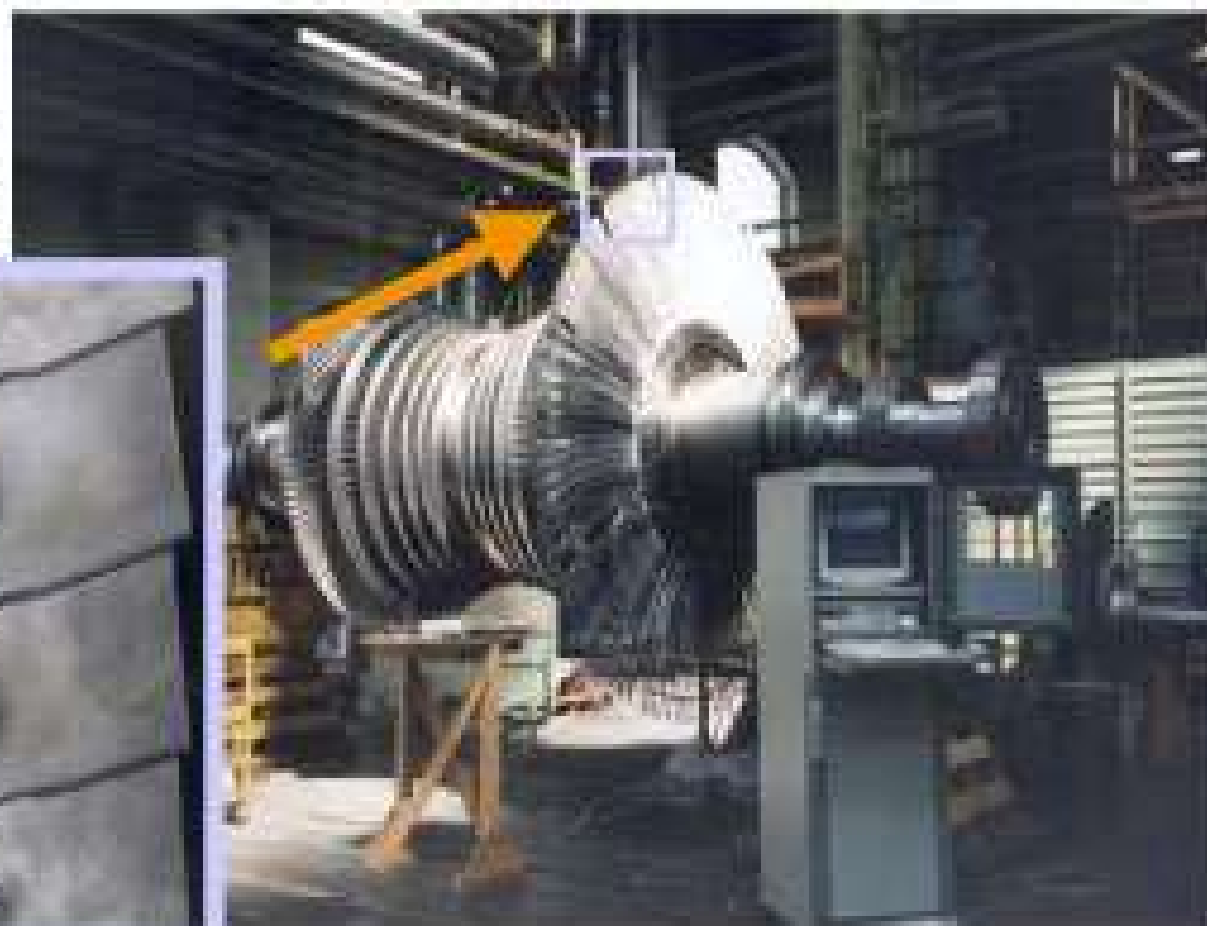


<http://www.st.com/stonline/stappl/cms/press/news/year2010/t2485.htm>



Tenzometr – příklady aplikací

Měření napětí v
lopatkách turbíny



Tenzometr – příklady aplikací



Kontrolní měření hladiny materiálu v zásobníku – je realizováno polepením nohou zásobníku tenzometry



Tenzometr – příklady aplikací



Namáhání řídítek
bicyklu



Tenzometr – příklady aplikací

Zatěžování nuselského mostu a měření prohnutí



Tenzometr – Porovnání vlastností včetně dalších metod pro měření mechanického namáhání

Sensor mechanisms

| Mechanism | Parameter Sensed | Needs Local Circuits? | DC Response? | Complex System? | Linearity | Issues |
|------------------------------|------------------|-----------------------|--------------|-----------------|-----------|--|
| Metal Strain Sensor | strain | NO | YES | + | +++ | <ul style="list-style-type: none">• low sensitivity• very simple |
| Piezoresistive Strain Sensor | strain | NO | YES | + | +++ | <ul style="list-style-type: none">• temperature effects can be significant• easy to integrate |
| Piezoelectric | force | NO | NO | ++ | ++ | <ul style="list-style-type: none">• high sensitivity• fabrication can be complex |
| Capacitive | displacement | YES | YES | ++ | poor | <ul style="list-style-type: none">• very simple• extremely low temperature coefficients |
| Tunneling | displacement | YES | YES | +++ | poor | <ul style="list-style-type: none">• sensitive to surface states• drift performance not yet proven |
| Optical | displacement | NO | YES | +++ | +++ | <ul style="list-style-type: none">• rarely employed in mechanical microsensors |



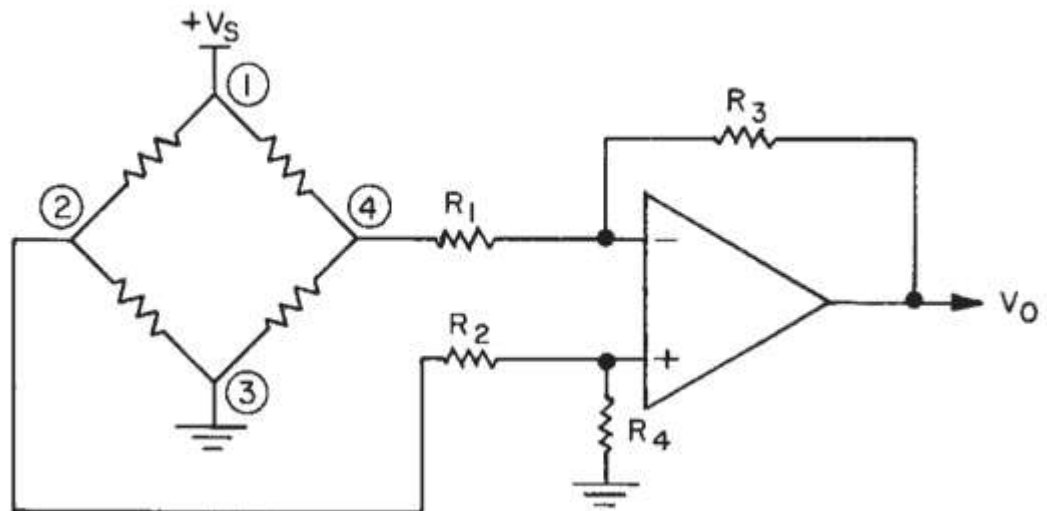
Senzory síly (s tenzometry)



Senzor síly – Honeywell

- Princip změny odporu vnitřního implantovaného Si piezorezistoru (s rostoucí silou roste odpor)
- Rezistor je zapojen do vnitřního nekompenzovaného Wheatstone odporového můstku
- Senzor FSG má vyveden nerezovou ocelovou plochu přímo spojenou s uvedeným piezorezistorem

$$V_o = (V_2 - V_4) R_3/R_1 \text{ for } R_3/R_1 = R_4/R_2$$



Senzor síly – Honeywell

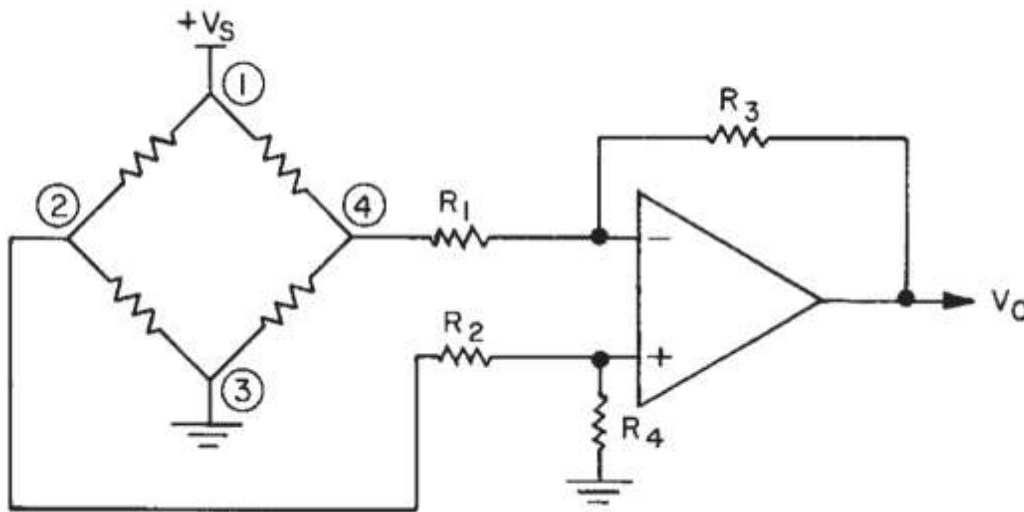
Princip činnosti a obvody pro vyhodnocení výstupu senzorů

Změnu napětí desetiny a jednotky mV - nutné použít napěťový stejnosměrný zesilovač

Příklad

Jednoduché zapojení používající klasické zapojení rozdílového OZ, např. LM108. Pro řízení zesílení je vhodné měnit odpor rezistorů R_3 a R_4 .

$$V_o = (V_2 - V_4) R_3/R_1 \text{ for } R_3/R_1 = R_4/R_2$$

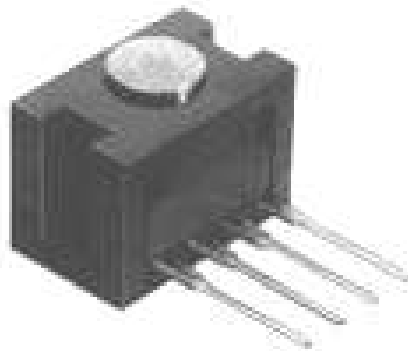
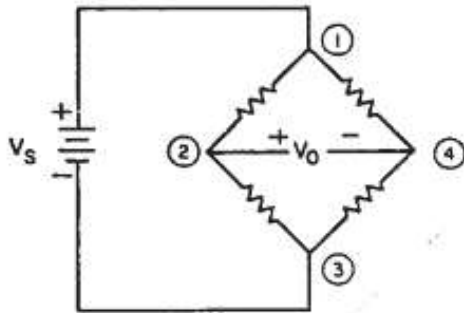


Základní zapojení senzoru a klasického rozdílového zesilovače

Senzor síly – Honeywell

příklad 1: Senzor FSG - MICRO SWITCH Force Sensors

- Změna odporu vnitřního implantovaného Si piezorezistoru (s rostoucí F roste R)
- Rezistor je zapojen do vnitřního nekompenzovaného Wheatstone odpor. můstku
- Senzor FSG má vyveden nerezovou ocelovou plochu přímo spojenou s uvedeným piezorezistorem
- Vnější působící F je přenášena na senzor jako tlak na kulatou plošku senzoru



Základní parametry senzor:

Rozsah měření síly: 0 až 1500 gramů

Maximální tlakové zatížení: 5500 g

Napájení: napětím +10 V nebo proudem 150 mA

Citlivost: 0,12 mV / g

Linearita: 0,12 % z rozsahu

Chyba opakovatelnosti: 0.2%

Pružná deformace: 300 μm

Odezva: 1ms

Vstupní odpor: 5 k Ω

Výstupní odpor: 5 k Ω

Pracovní teplota: -40°C až +85 °C

Senzor síly – Honeywell

Příklad 2: Senzor FSS - Low Profile Force Sensors

Senzor FSS, vhodný pro široké komerční využití, má kontakt okolí s vnitřním křemíkovým piezorezistorem prostřednictvím nerezové ocelové kuličky (viz. foto senzoru). Venkovní působící síla na kuličku způsobí změnu vnitřního odporu piezorezistoru a tím i změnu výstupního napětí v řádu mV. Provedení s kuličkou neumožňuje tak přesná měření jako senzor řady FSG s vyvedebou rovnou ploškou (viz. parametry). Popis výstupních pinů senzoru, který je v provedení pro SMD, je na dalším obrázku.

Základní parametry senzor:

Rozsah měření síly: 0 až 1500 gramů

Maximální zatížení: 4500 g

Buzení senzoru: napětím +10 V nebo proudem 150 mA

Citlivost: 0.24 mV / g

Chyba citlivosti: 5.5 %

Linearita: 1.5 % z rozsahu

Chyba opakovatelnosti: 10g při zatížení 300g

Průžná deformace při působící síle: typ. 300 mikronů

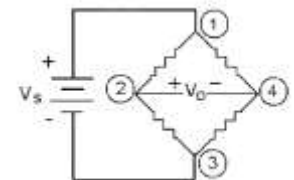
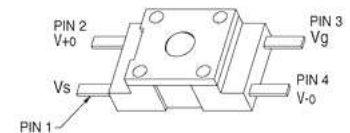
Odezva: 1ms

Vstupní odpor: 5 k Ω

Výstupní odpor: 5 k Ω

Pracovní teplota: -40°C až +85 °C

Pouzdro SMD

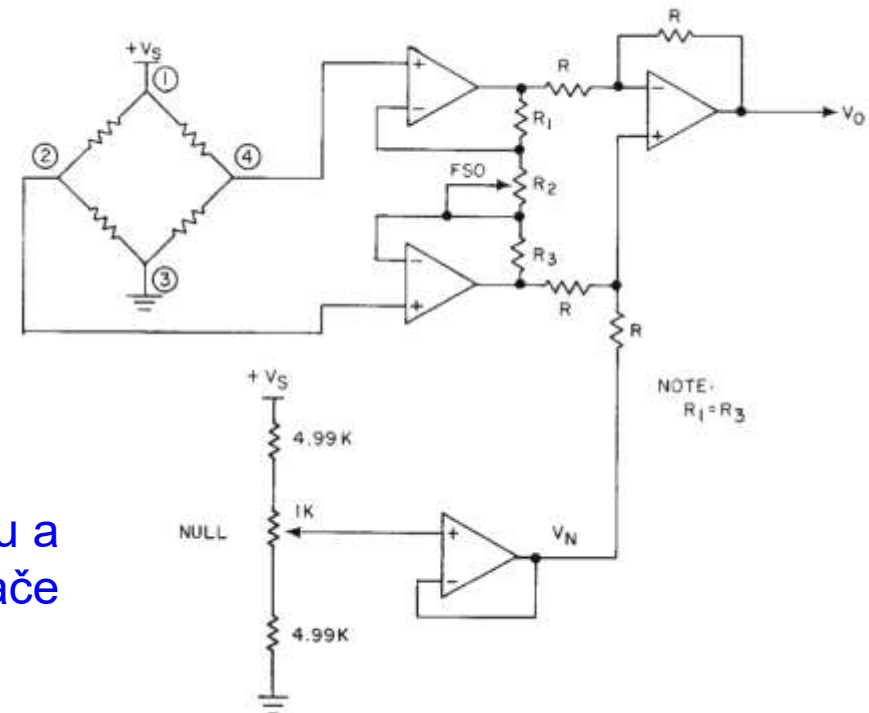


Senzor síly – Honeywell

Obvody pro vyhodnocení výstupu senzorů

- Složitější řešení v podobě jistě známého přístrojového zesilovače se 4 operačními zesilovači (OZ).
- 😊 **Hlavní výhodou** tohoto řešení je větší odolnost proti souhlasnému napětí na vstupu zesilovače.
- OZ na výstupu má jednotkové zesílení a slouží pouze jako sumátor/sčítačka.
- Podle doporučení by se nemělo používat zesílení větší než 250.
- Pro měření absolutní síly, ne relativní, je nutné prohodit zapojení svorek senzoru 2 a 4.
- Napětím V_N je možné přesně nastavit výstupní napětí pro nejmenší měřenou působící sílu.

$$V_o = (V_2 - V_4) (1 + 2R_1/R_2) + V_N, \text{ Note: } R_1 = R_3$$

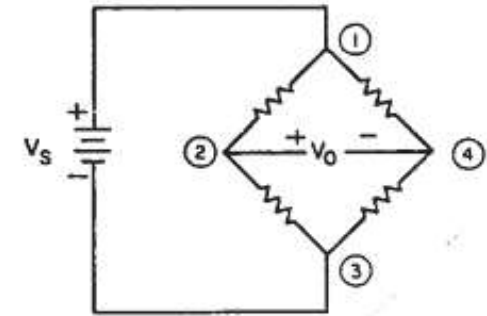


Základní zapojení senzoru a
klasického rozdílového zesilovače

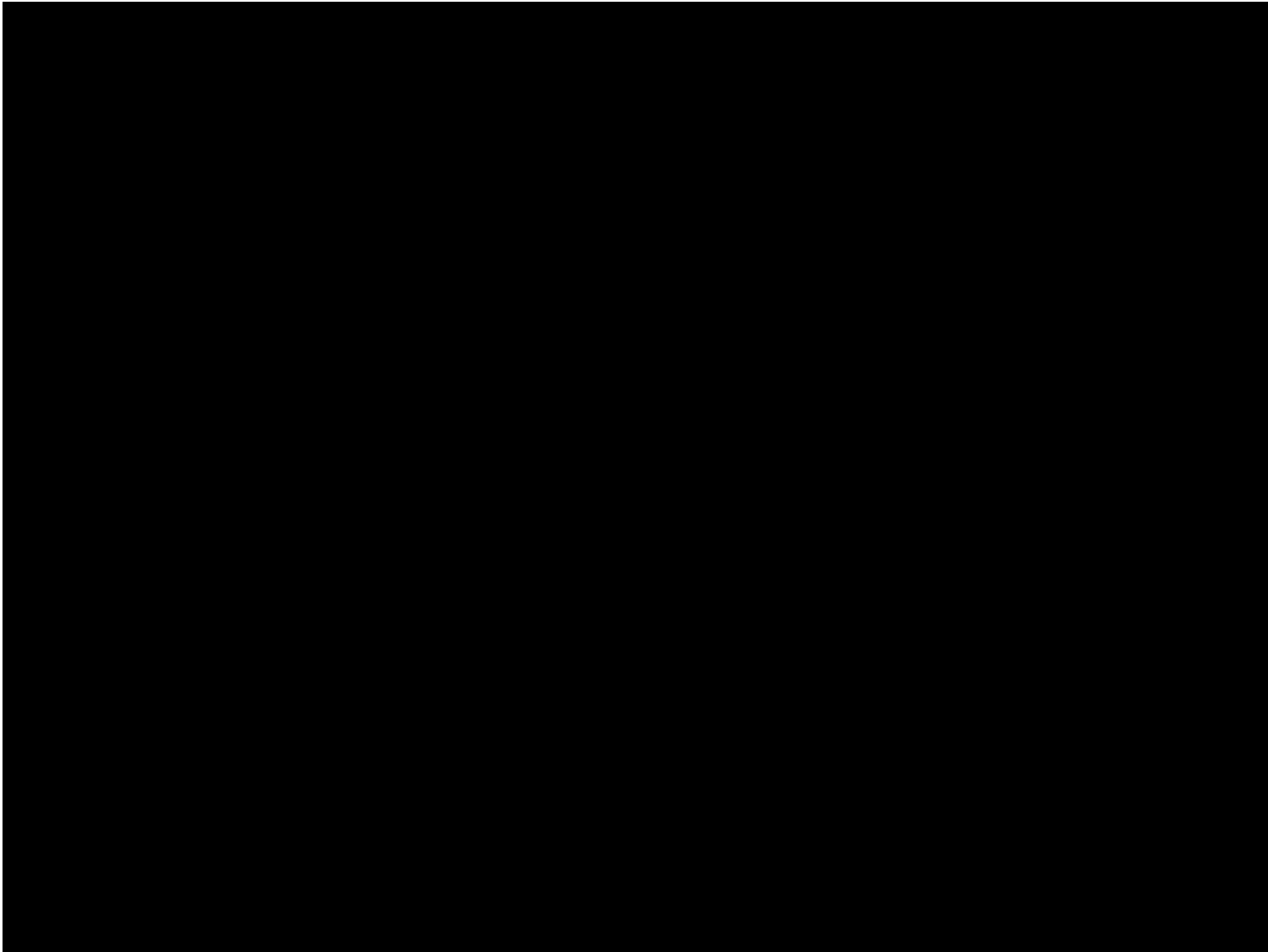


Senzor síly – příklady aplikací

Osobní váha



? Snímání informace u elektronické váhy: Nakreslete princip činnosti snímacího elementu u elektronické váhy, Nakreslete zjednodušený elektronický vyhodnocovací obvod snímače



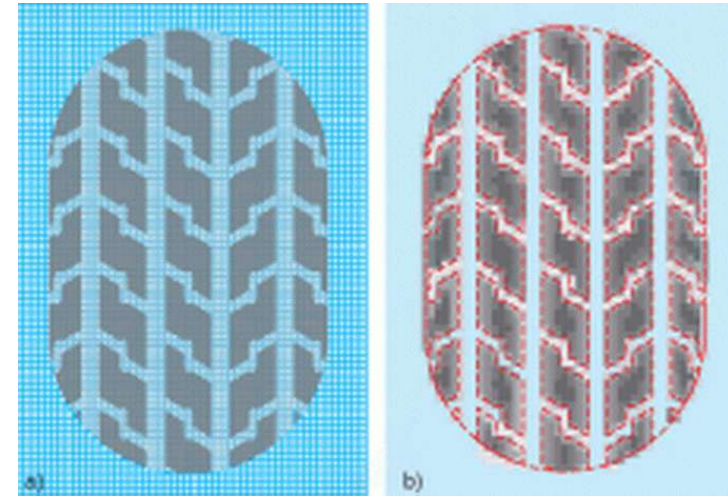
Maticové taktilní senzory (MTS)

Princip:

- Vytváření **tlakových map** ve styku s tělesem
- Matice taktilních senzorů (MTS), jednotky až stovky prvků
- MTS měří **rozložení sil** (MTS napodobuje hmat).
- Slouží i k rozpoznávání

Aplikace MTS:

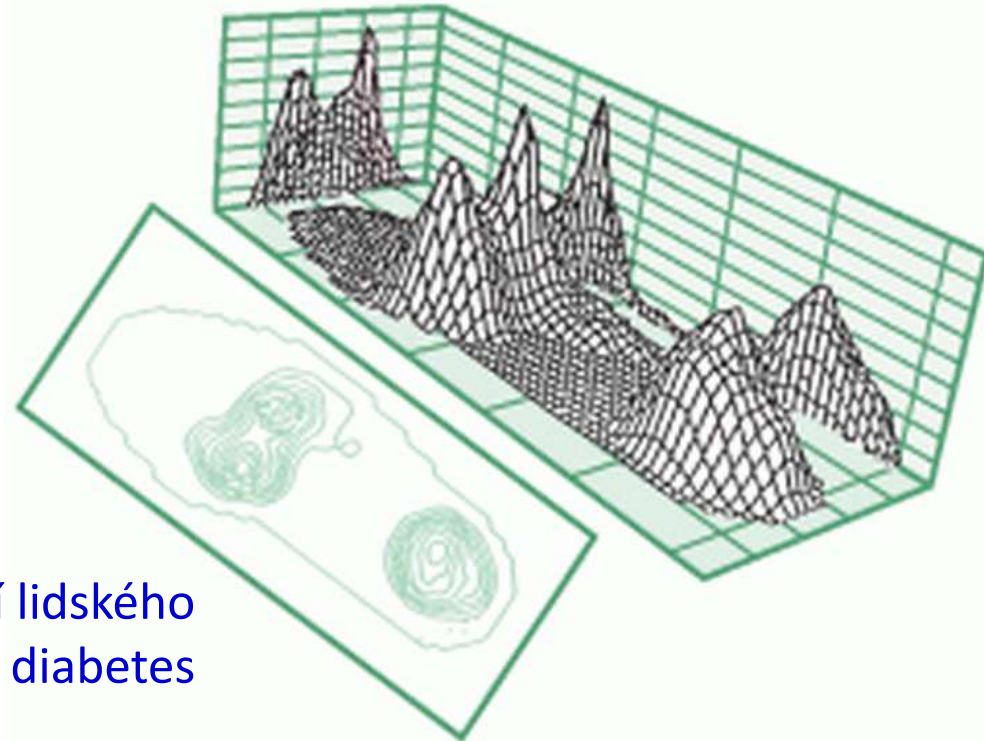
- přítomnost síly, polohu, orientaci, velikost, rozměry, tvar a jeho poruchy, oblast dotyku, identitu, vlastnosti povrchu (drsnost, textura) apod.
- dynamometrické vlastnosti jako tlak, rozložení tlaku, sílu dotyku, rozložení sil, hmotnost, tření, elasticitu apod.



Rozložení zatížení na pneumatice

Maticové taktilní senzory (MTS) – taktilní obraz

- Získávání taktilního obrazu znamená zjišťování tvaru předmětu
- **Využití:** všeobecné a sportovní lékařství, protetika, ortopedie, robotika, ...
- **MTS s pružnou podložkou:** Sledování napětí v různých **svalových partiích** lidského těla např. ve **sportovním lékařství** při extrémních výkonech apod. Podložka s MTS je ovinuta kolem sledované svalové partie.
- **MTS s pevnou podložkou:**
Ortopedie. Pacient se postaví na MTS pevnou podložku. Signál z MTS je zpracován v PC. Z mapy zatížení chodidla lékař relativně snadno, rychle a spolehlivě určí zdravotní postižení pacienta.



Mapa rozložení zatížení lidského
chodidla při diabetes

Volf, J. et al, Using of Tactile Transducer for Pressure-Distribution Measurement on the Sole of the Foot. In: Sensors and Actuators (A)

MTS pro taktilní obraz – používané principy

Nejznámější používané principy MTS pro taktilní obraz

- ☐ s maticí hrotů
- ☐ piezoodporový tenzometrický MTS
- ☐ piezoelektrický MTS
- ☐ optické MTS
- ☐ ultrazvukový MTS
- ☐ chemický MTS
- ☐ se změnou dotykové plochy
- ☐ s proměnlivou tloušťkou elastické vrstvy



MTS pro taktilní obraz – s maticí hrotů

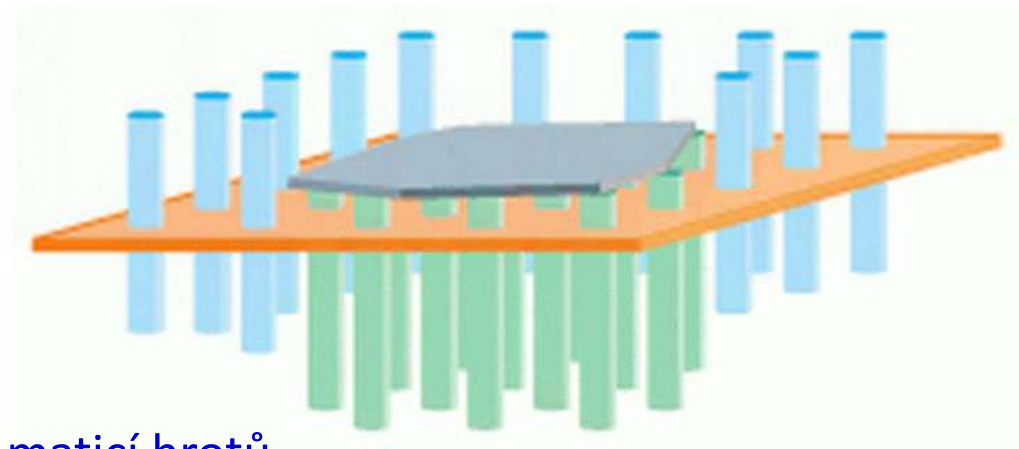
Matice senzorů posunutí s velkým měřicím rozsahem

Analogový MTS:

- Přitlačením senzoru k objektu je struktura povrchu objektu změřena maticí hrotů senzoru.
- Posunutí hrotů se měří analogovými **senzory polohy** každého hrotu (**indukční a kapacitní**, popř. i **optické**)
- Trojrozměrný obraz lze získat jen při použití analogového principu, měří se současně i velikost posunutí jednotlivých hrotů

Binární MTS:

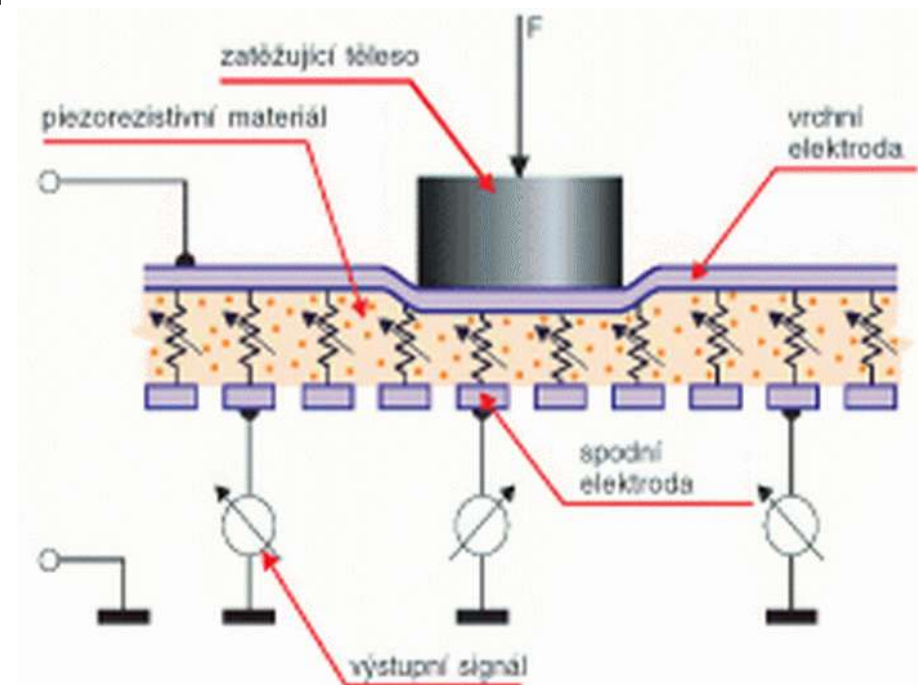
Poloha hrotu je měřena binárními senzory polohy



MTS s maticí hrotů

MTS – piezoodporový

- ❑ Piezoodporový materiál - silikonová pryž nebo kaučuk s příměsí vodivých částic (15 až 20 %)
- ❑ Při nulovém zatížení je elektrický odpor velmi vysoký
- ❑ Při zatížení se vodivé částice k sobě přibližují a tím odpor klesá (řádově o několik dekád)
- ❑ V praxi se vyskytují 2 základní uspořádání:
 - s elektrodami
 - s maticí prvků



MTS s piezoodporovým principem

MTS piezoodporový – s elektrodami

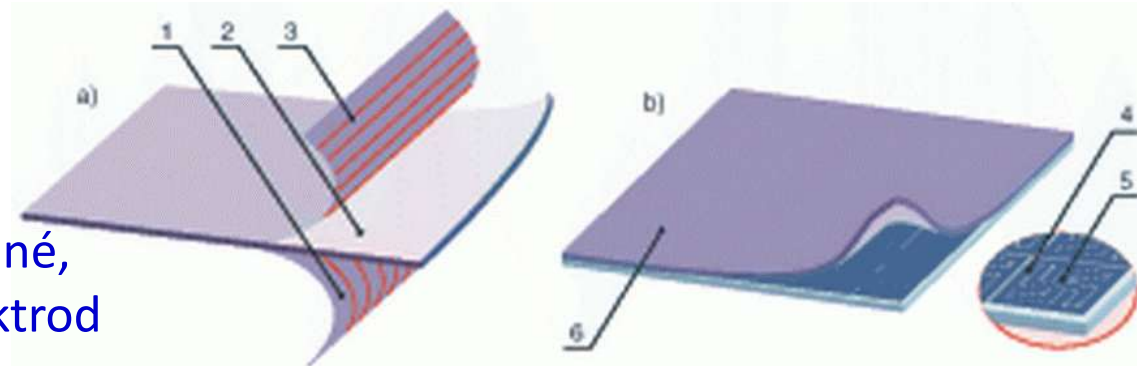
Piezoodporový MTS s jednostrannými a oboustrannými elektrodami

a) Oboustranné uspořádání

- Vodivé elektrody jsou rovnoběžné a oddělené izolovanými proužky
- Sady elektrod jsou navzájem kolmé oddělené **piezoodporovým** materiálem
- Změna odporu deformované sycené pryže se měří na průsečících elektrod MTS

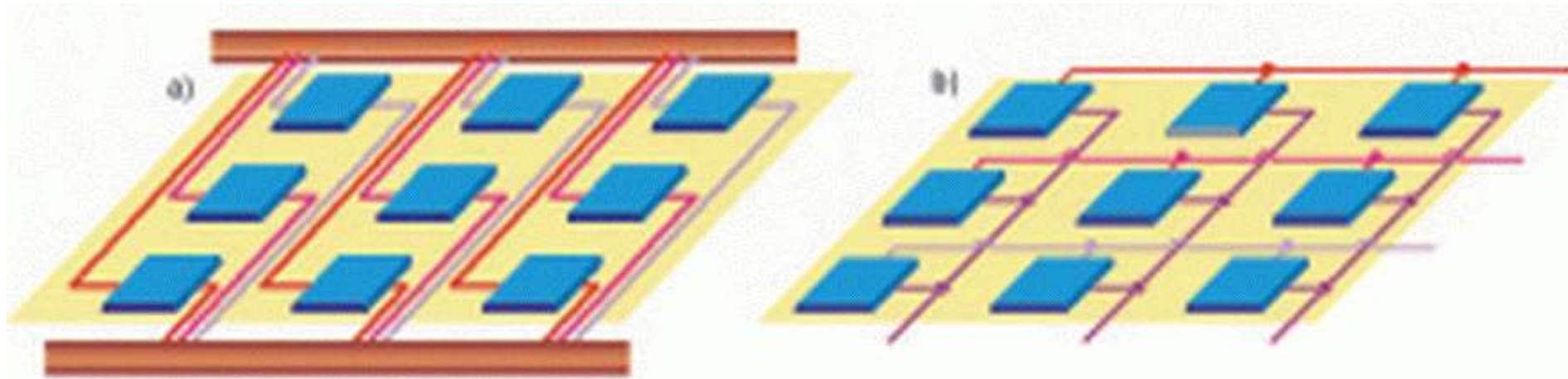
a) Jednostranné uspořádání

- Elektrody nacházejí jen na jedné straně aktivní pryže
- Taktilní prvek tvoří vnější elektroda 4 a vnitřní elektroda 5, které překrývá **piezoodporový** materiál 6.
- Odpor je snímán jen na jedné straně mezi vnější a vnitřní elektrodou
- Obdobného maticového uspořádání jako u uspořádání a) je vytvořeno tak, že např. vnější elektroda je zapojena do sloupců a vnitřní do řádků



Piezoodporový MTS, a) oboustranné,
b) jednostranné a uspořádání elektrod

MTS piezoodporový – s maticí taktilních senzorů



a) Sběrnice s adresací každého senzoru MTS

- Každý senzor je připojený na společnou datovou sběrnici.
- Složitost jednotlivých buněk pro připojení přes příslušné vstupní a výstupní rozhraní

b) MTS s maticí piezoodporových prvků

- matice taktilních senzorů MTS
- Principu řádků a sloupců

Literatura

1. Ďaďo, S. Kreidl, M. Senzory a měřící obvody, Praha : Skriptum ČVUT, r.1996
2. Sirohi, R. Krishna, R. Machanical Measurement: Wiley Eastern Ltd., 1991
3. Husák, M. Senzorové systémy, Praha : Skriptum ČVUT, r.1993
4. Guldan, A. Mikroelektronické senzory, Bratislava : Alfa, r.1988
5. internetové stránky firmy Vishay <http://www.vishay.com>
6. internetové stránky firmy Honeywell <http://www.honeywell.com>
7. internetový portál <http://www.sensorsmag.com/>
8. internetový portál <http://www.omega.com/>
9. internetový portál <http://www.sensors.co.uk/>
10. internetový portál <http://www.sensorsuk.com/>
11. internetový portál <http://automatizace.hw.cz/>
12. firma Distrelec - <http://www.distrelec.com/>
13. firma Honeywell - <http://www.honeywell.com/>, <http://www.honeywell.cz/>



Otázky

- Piezodporový jev: definujte deformaci elastickou a deformaci plastickou
- Hookův zákon: Napište matematický vztah, co vyjadřují jednotlivé jeho členy
- Napište vztah pro výpočet elektrického odporu odporového materiálu (kov, polovodič) v závislosti na jeho délce, průřezu a měrném odporu. Objemová deformace: Nakreslete princip činnosti senzoru pro objemovou deformaci piezodporového materiálu mechanické namáhání a napište rovnici pro výpočet závislosti změny odporu na působícím tlaku, tj. $\Delta R = f(p)$
- Podélná deformace: Nakreslete princip činnosti senzoru pro podélnou deformaci piezodporového materiálu mechanickým namáháním a napište rovnici pro výpočet závislosti změny odporu na jeho relativní změně délky, tj. $\Delta R = f(\Delta l)$
- Kovové tenzometry s volným drátkem: Nakreslete základní konstrukční uspořádání, Používané materiály, typická citlivost K, rozměry
- Lepené kovové drátkové tenzometry: Nakreslete základní konstrukční uspořádání, Používané materiály, typická citlivost K, rozměry
- Fóliové kovové tenzometry: Nakreslete 2 příklady uspořádání tenzometrů
- Piezodporový jev v polovodičích: typické používané polovodičové materiály
- Polovodičové lepené tenzometry: Nakreslete konstrukční uspořádání lepeného polovodičového tenzometru, typické rozměry
- Polovodičové difúzní tenzometry: Nakreslete konstrukční uspořádání polovodičového difúzního tenzometru, typické rozměry
- Polovodičové tenzometry: napište definici teplotního součinitele odporu polovodičového tenzometru
- Tenzometry – vyhodnocování signálu: Nakreslete zapojení tenzometrů do tenzometrického můstku, napište podmínku vyvážení můstku
- Tenzometry – vyhodnocování signálu: Nakreslete princip kompenzace teploty v můstku
- Tenzometry – vyhodnocování signálu: Nakreslete princip zvýšení citlivosti 2x v můstku
- Tenzometry – vyhodnocování signálu: Nakreslete princip zvýšení citlivosti 4x v můstku

