

TENSOMETRIA

PARAMETRY TENSOMETRÓW METALOWYCH

materiał:	konstantan: ($K \approx 2$), $T \approx$ do 300°C chromonikielina: ($K \approx 2,2$) izoelastik: ($k \approx 3,6$) Pt + W: ($K \approx 4$)
grubość:	(5 do 150) μm ,
dopuszczalny prąd:	5, 10 albo 15 mA
odkształcenie dop.	1 do $2 \cdot 10^{-3}$
żywołność:	10^7 cykli
histereza:	0,3% zakresu czujnika

PARAMETRY TENSOMETRÓW FOLIOWYCH

folia metalowa

- materiał: • konstantan,
- grubość: • 1 do 20 μm ,
- kształt: • prostokątny

warstwa izolacyjna :

- materiał: • poliamid, błony fenolowe
- grubość: • 20 μm

- technologia: • technika fotolitograficzna

WYKORZYSTANIE TENSOMETRÓW

- Analiza naprężenia mechanicznego:
 - jednoosiowego
 - powierzchniowego

Czujniki:

- siły
- momentu skręcającego
- ciśnienia
- szybkości przepływu

PARAMETRY TENSOMETRÓV FOLIOWYCH

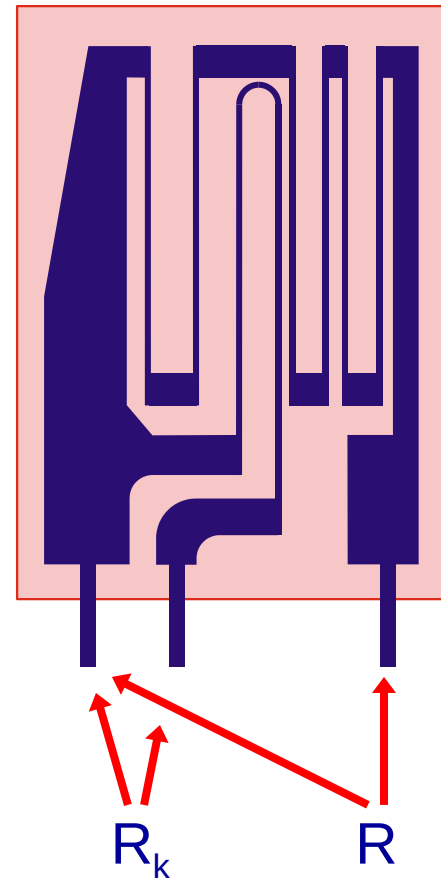
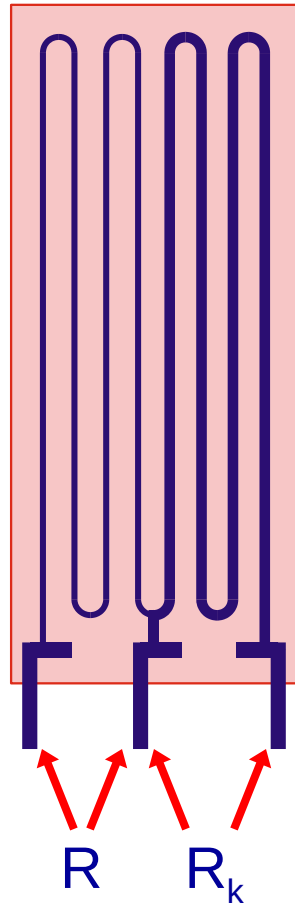
maksymalne mierzone odkształcenie: 0,5‰
trwałość: 10^7 cykli
K: 2 do 4

Przykład: $K = 2$, $U_{zas} = \max 4V$, $R_{tens} = 100 \Omega$,

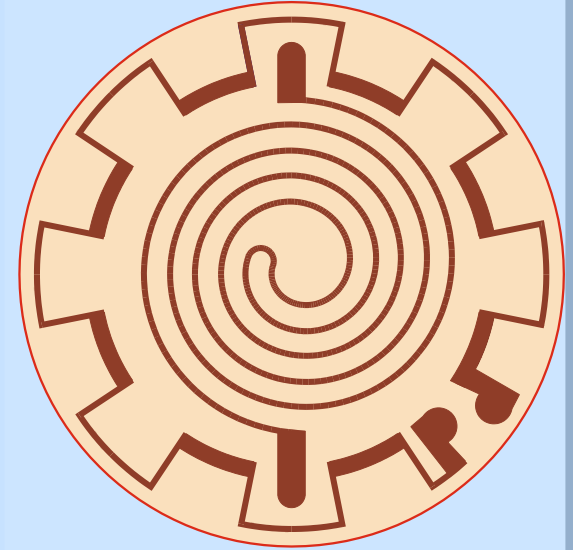
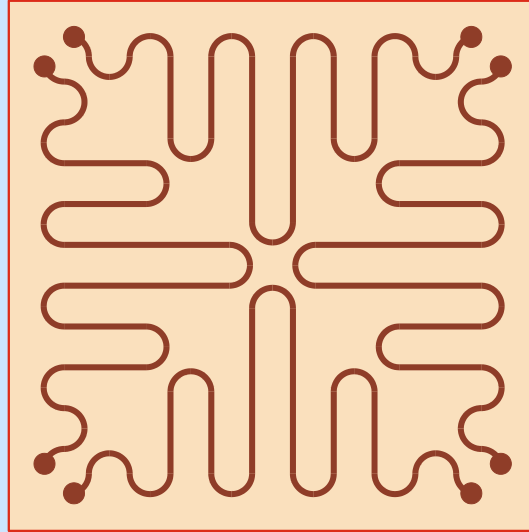
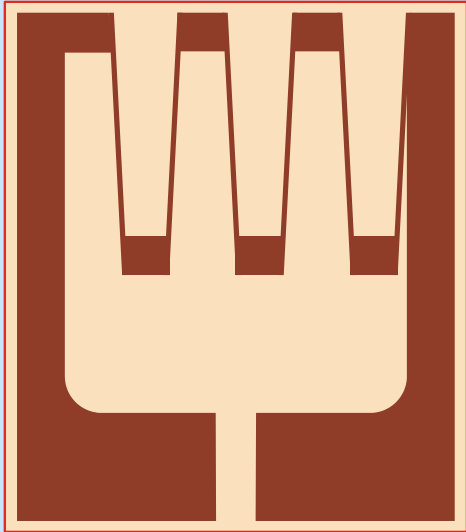


$U_{wyj} = 8 \text{ mV}$, rozdzielczość wymagana: kilka μV ,
zmiana całkowita rezystancji: $50 \text{ m} \Omega$

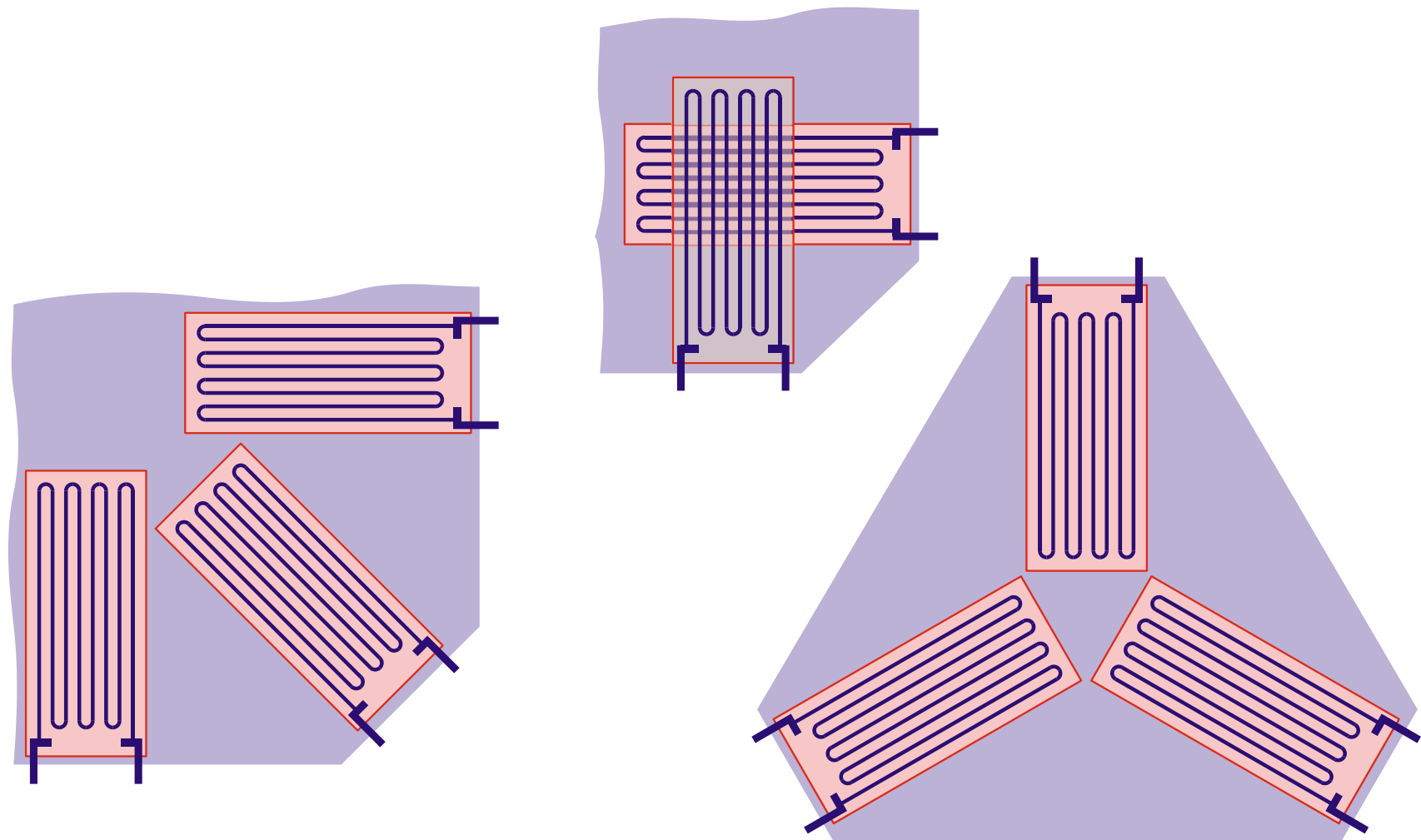
TENSOMETRY Z UZWOJENIEM KOMPENSACYJNYM



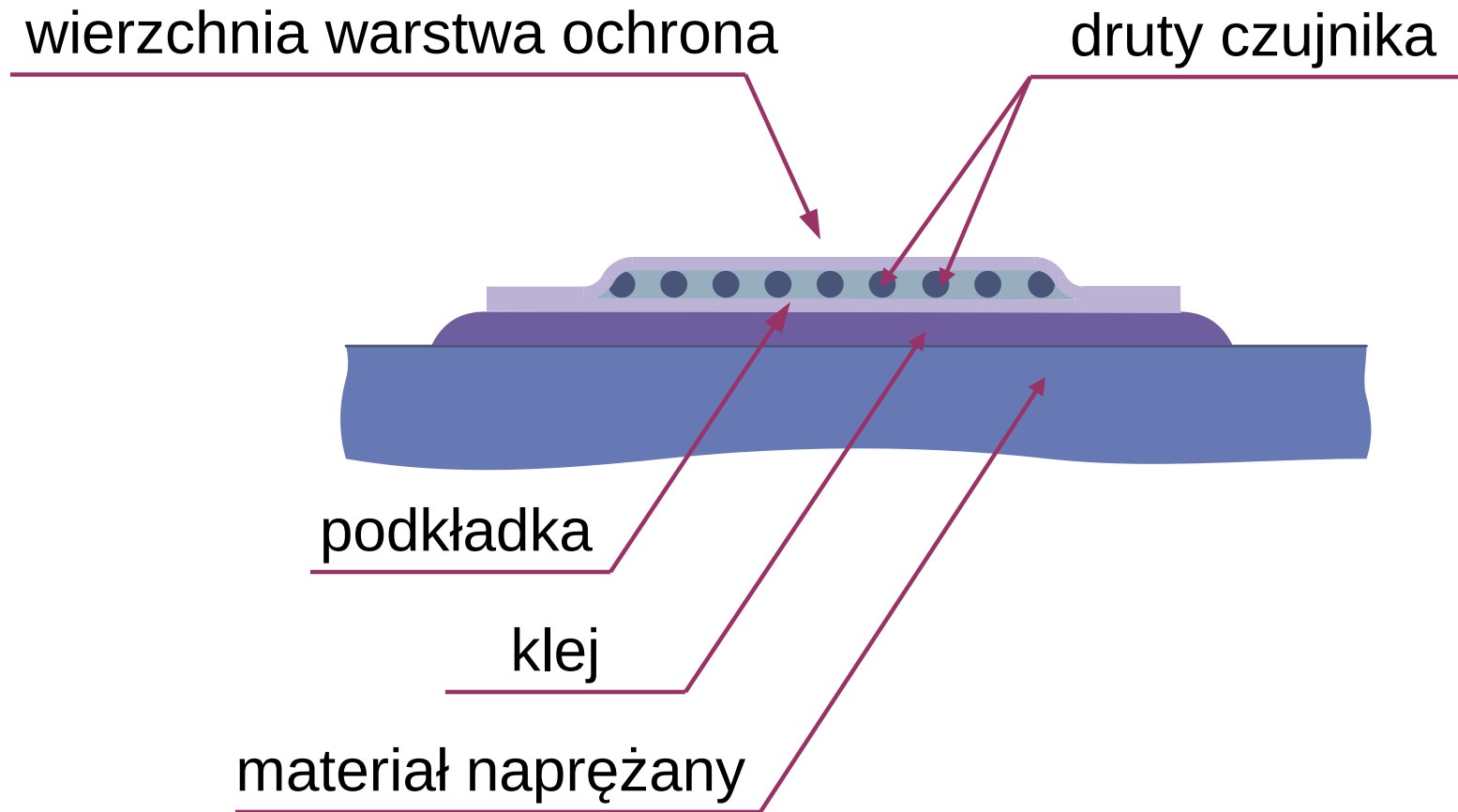
Tensometry foliowe



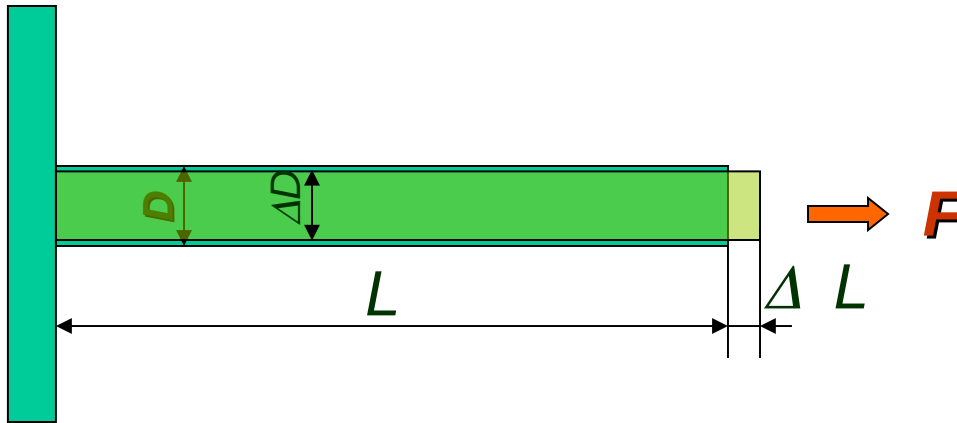
Rozety tensometryczne



KLEJENIE TENSOMETRU



TENSOMETRIA REZYSTANCYJNA



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

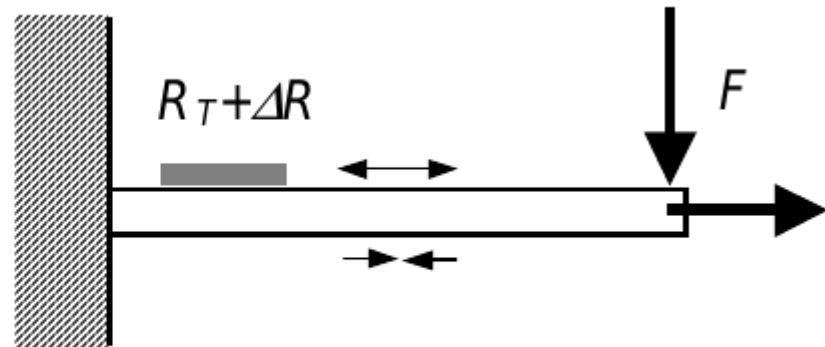
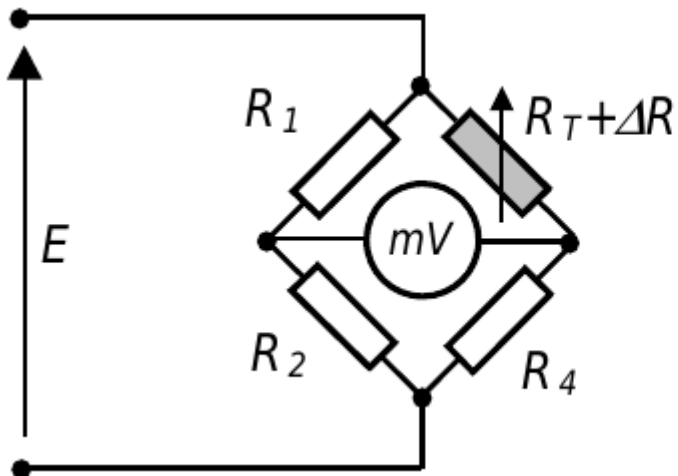
$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \varepsilon + C_2 \varepsilon^2 + \dots$$

*K - czułość odkształceniowa tensometru
(żargonowo „stała tensometryczna“)*

UKŁADY POMIAROWE

Z jednym tensometrem (układ pół mostka) rzadko używany, ponieważ charakteryzuje się słabą czułością $S=0,25$.

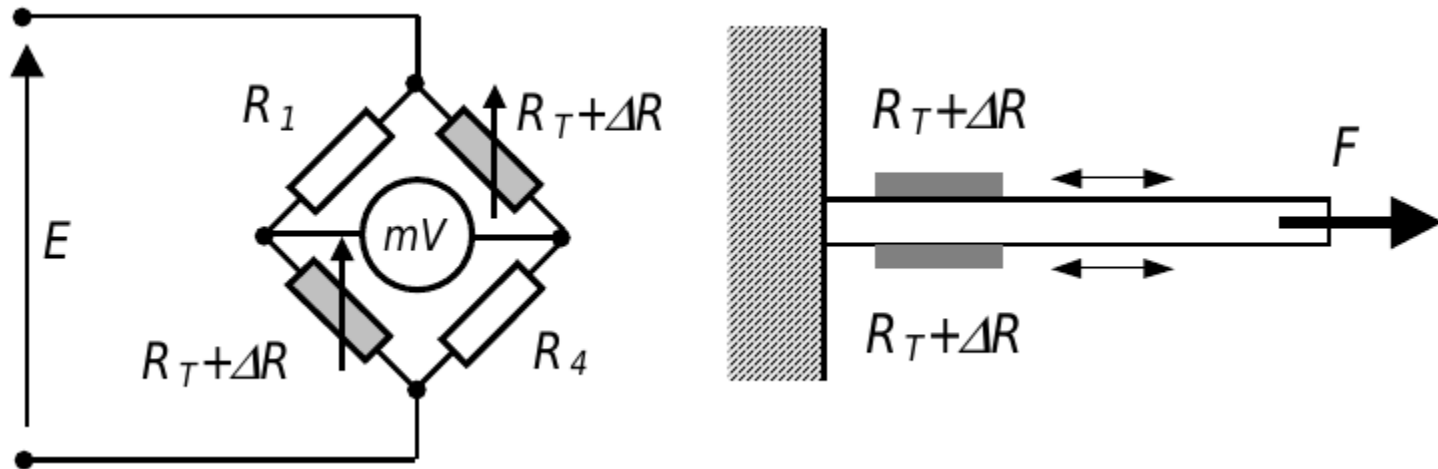
$$U = -\frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_T}{R_T + \Delta R_T / 2} \right)$$



UKŁADY POMIAROWE

Z dwoma tensometrami (układ pół mostka) – na każdy z tensometrów działają naprężenia o przeciwnych kierunkach (np. ściskanie i rozciąganie) , mają czułość równą 0,5 i mniejszą nieliniowość.

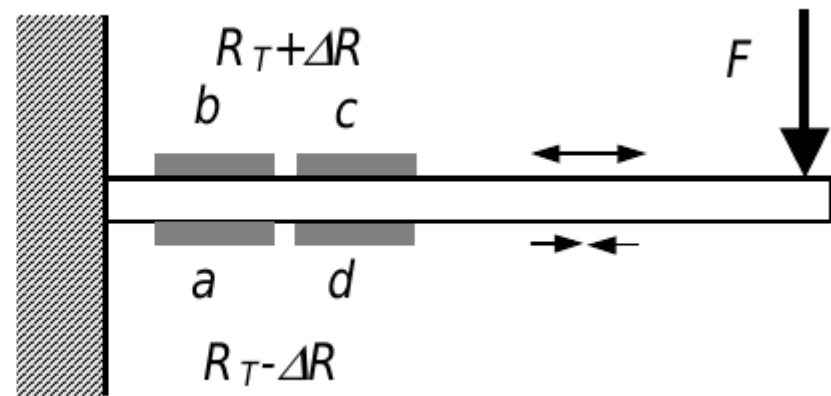
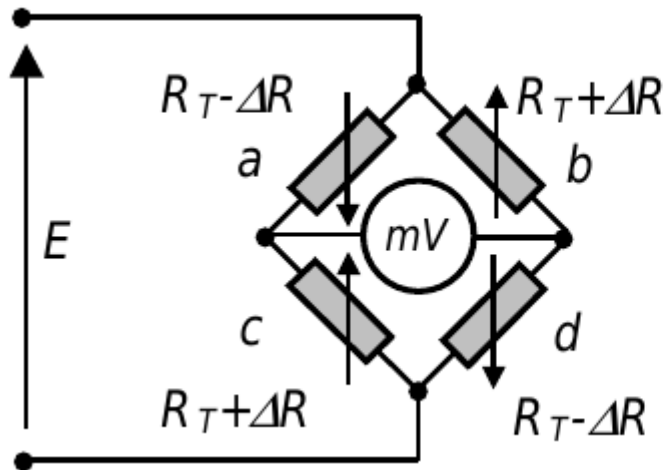
$$U = -\frac{E}{2} \left(\frac{\Delta R_T}{R_T} \right)$$



UKŁADY POMIAROWE

Z czterema tensometrami – występują w nim 2 tensometry o dodatnim kierunku zmian rezystancji i dwa o ujemnym kierunku zmian rezystancji. Układ ten charakteryzuje się największą czułością równą 1.

$$U = -E \left(\frac{\Delta R_T}{R_T} \right)$$



TENSOMETRY PÓŁPRZEWODNIKOWE

Tensometry półprzewodnikowe dzielą się na dwa rodzaje :

- monokrystaliczne ,wykonane z cienkich (o grubości ok.. 0.1-0.2 mm) pasków wycinanych z monokryształów krzemu lub germanu
- cienkowarstwowe, otrzymywane przez naparowywanie bizmutu, germanu lub tensometry półprzewodnikowe na elastycznym podłożu neutralnym

Zalety pełnego mostka

- 1) *Zmniejsza nieliniowość (jednakowe rezystancje, przeciwległe tensometry poddawane są takim samym odkształceniom a sąsiadujące przeciwnym)*
- 2) *Czterokrotnie większa czułość (w porównaniu do układu z jednym tensometrem)*
- 3) *Błąd temperaturowy bardzo zmniejszony (takie same rezystancje w tej samej temperaturze)*
- 4) *Błędy spowodowane rezystancją przewodów są nieistotne (cały mostek jest wytworzony na elemencie sprężystym)*

POMIARY SIŁ

PODZIAŁ CZUJNIKÓW SIŁY

- przetwarzanie sił na sygnał elektryczny

Elementem odkształcanym: - zmiana rezystancji,
indukcyjności, pojemności

bezpośrednio: - za pomocą zjawiska piezoelektrycznego,
magnetoelastycznego

- czujnik siły mierzy:

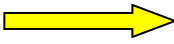
- siły statyczne albo dynamiczne,
- siły małe, średnie albo duże,
- jedną albo więcej składowych sił.

POMIAR SIŁY TENSOMETRAMI

Zasada
pomiaru

Okształcenie elementy sprężystego
mierzy się czujnikiem naprężenia
mechanicznego - tensometrem
rezystancyjnym

Umieszczenie tensometrów na podłożu:

Rozciąganie,
ściskanie zginanie  W kierunku osi

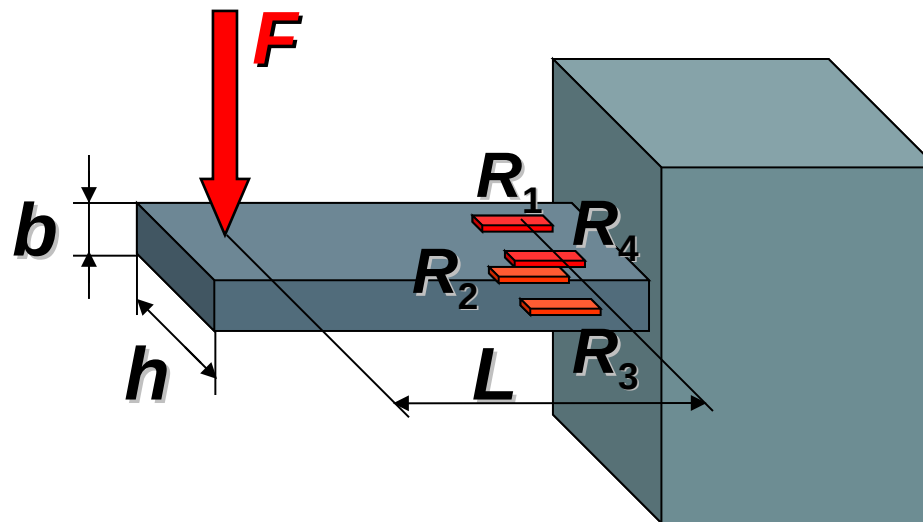
$$\sigma = \max \quad \xrightarrow{\text{yellow arrow}} \quad \tau = 0$$

Skręcanie,  pod kątem 45° do osi

$$\tau = \max \quad \xrightarrow{\text{yellow arrow}} \quad \sigma = 0$$

ELEMENT ODKSZTAŁCANY W POSTACI BELKI JEDNOSTRONNIE UMOCOWANEJ

zastosowanie: *Do sił nie większych od dziesiątek kN,*



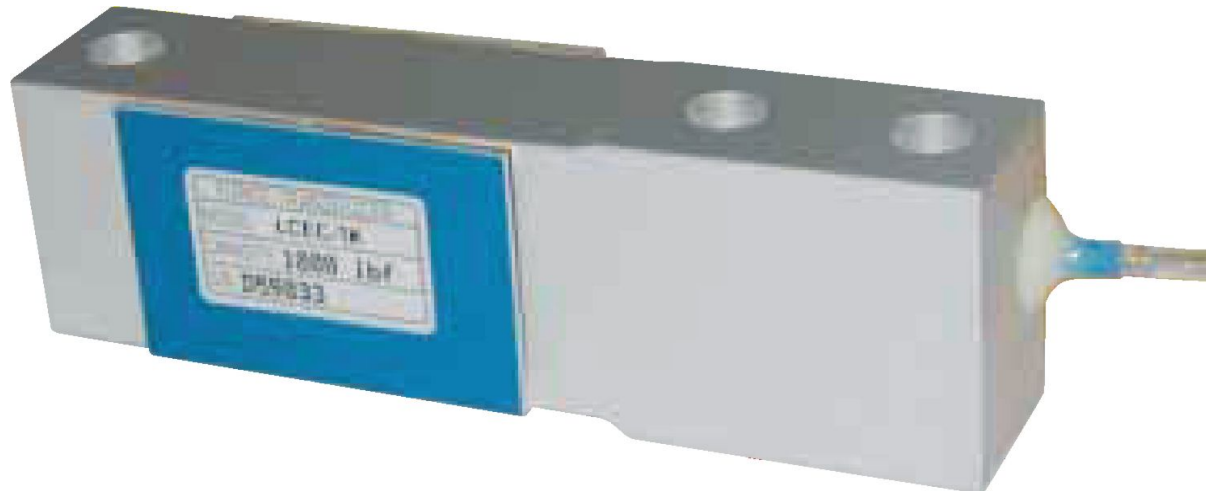
$$W_0 = \frac{h \cdot b^2}{6}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_0}{W_0 \cdot E} = \frac{F \cdot L}{W_0 \cdot E}$$

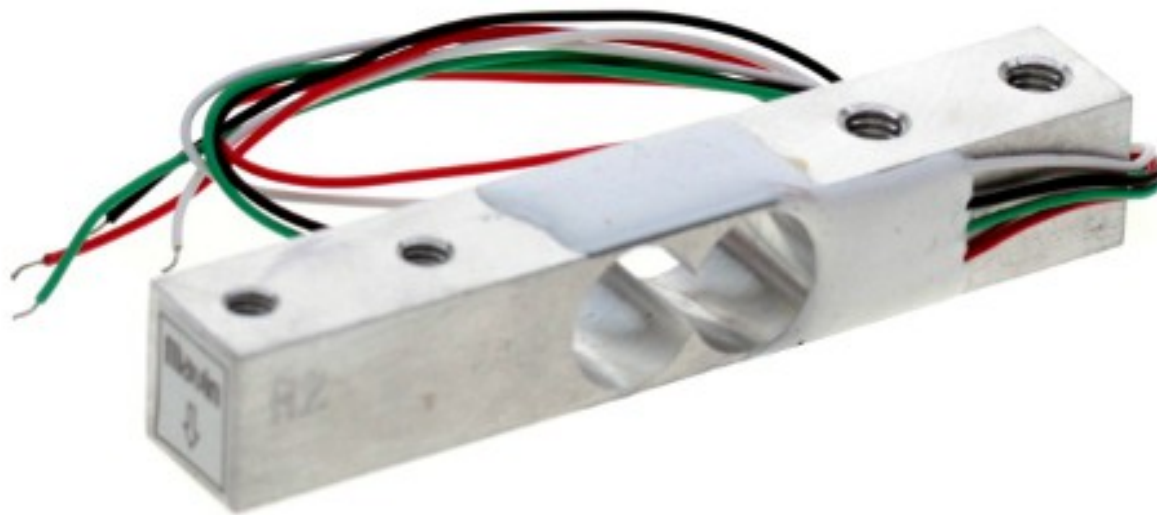
W_0 - moduł zginania

M_0 - moment zginający

ELEMENT ODKSZTAŁCANY W POSTACI BELKI JEDNOSTRONNIE UMOCOWANEJ



ELEMENT ODKSZTAŁCANY W POSTACI BELKI JEDNOSTRONIE UMOCOWANEJ



POMIAR CIĘŻARU (WAŻENIE)

SPECYFIKACJA

Zasilanie: 10 Vss (max.15 Vss)

Wyjście: 2 mV/V \pm 10% (1 mV/V \pm 10% < 6 kg

Błąd zera (usuwalny adjustacją): \pm 5% zakresu)

Neliniowość: 0,015% zakresu (0,02% < 6 kg)

Histereza: 0,015% zakresu (0,02% < 6 kg)

Niepowtarzalność: 0,02 % zakresu

Temperatura pracy: -10 do 50 °C

Kompensowany zakres temp.: -10 do 50 °C

Wpływ temperatury na zero: 0,0022% zakresu/°C

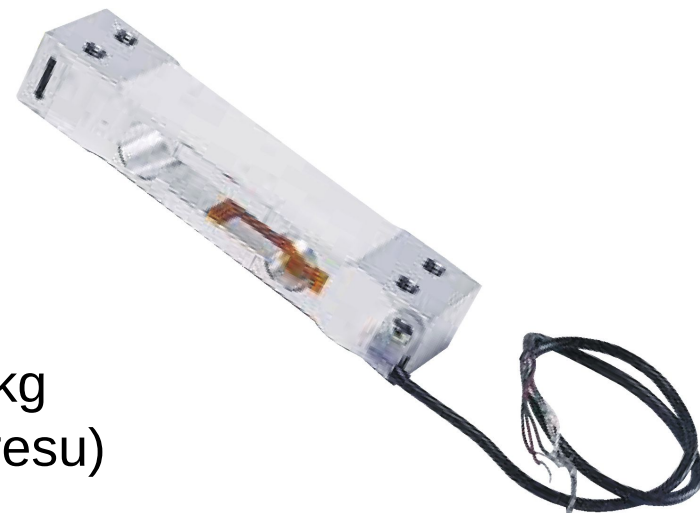
Wpływ temperatury na zakres: 0,0007% zakresu/°C

Przeciążalność: 150 % zakresu (300 % < 6 kg)

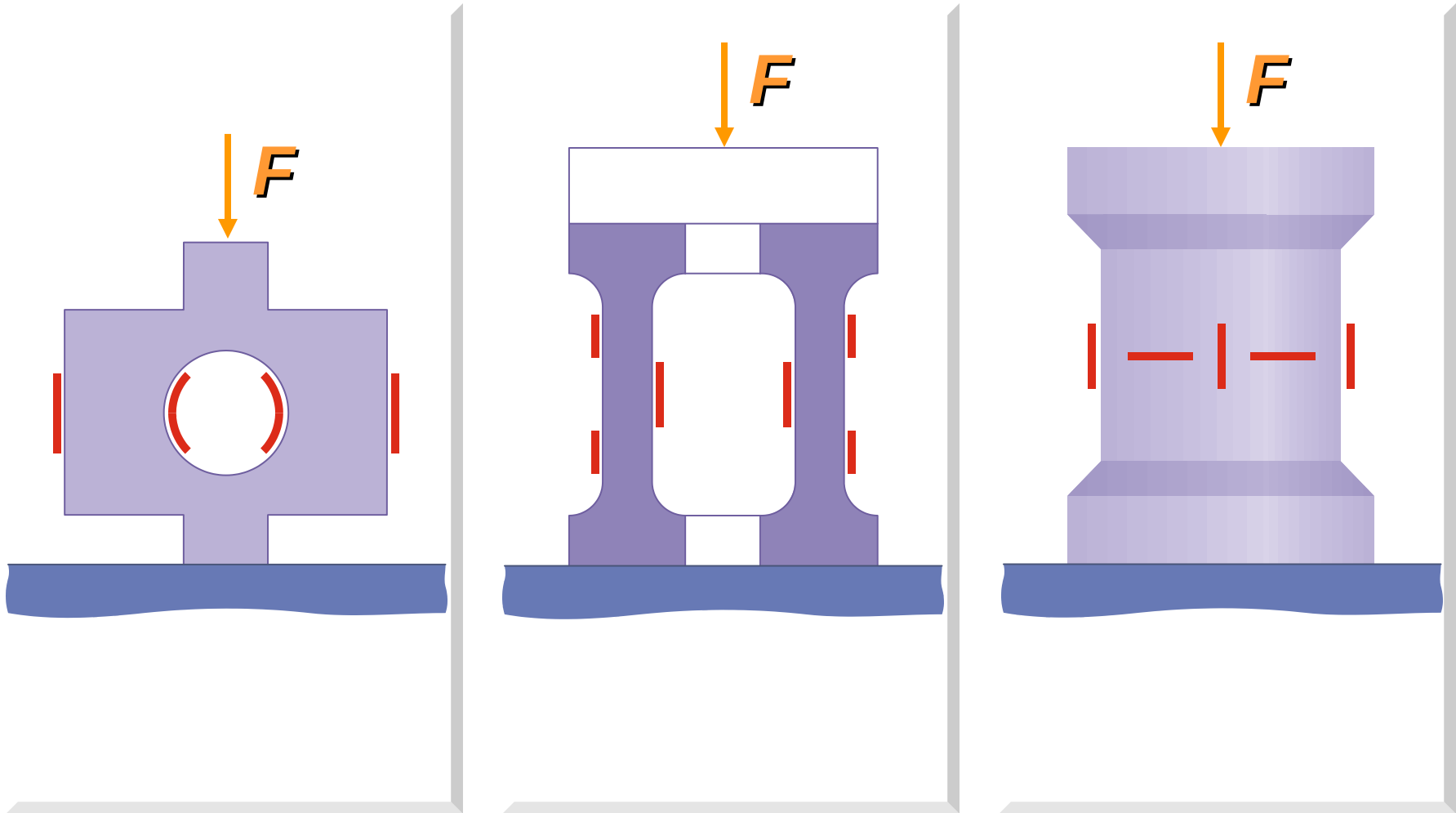
Przeciążalność graniczna: 200 % zakresu (400 % < 6 kg)

Materiał konstrukcyjny: aluminium

Przyłączenie: 30 cm 4-żyłowy kabel

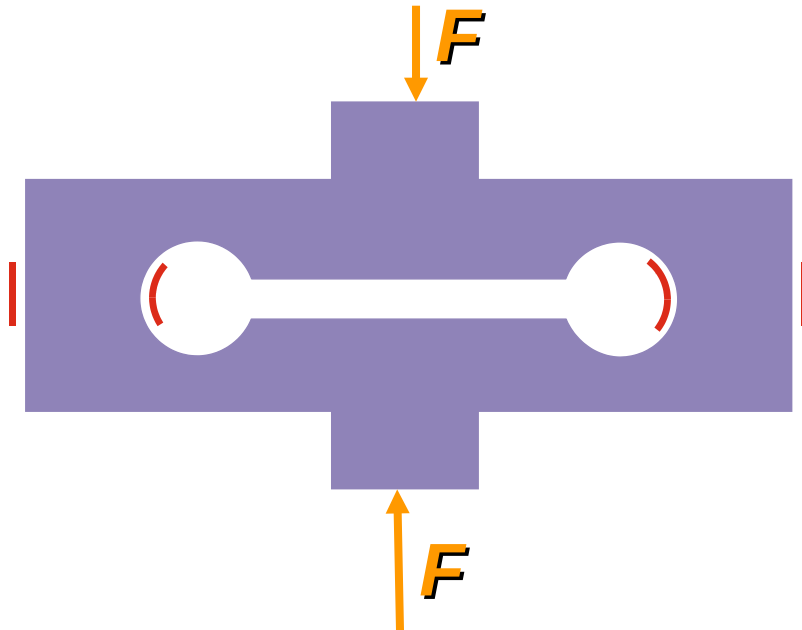


SPRĘŻYSTE ELEMENTY ODKSZTAŁCANE CZUJNIKÓW SIŁY

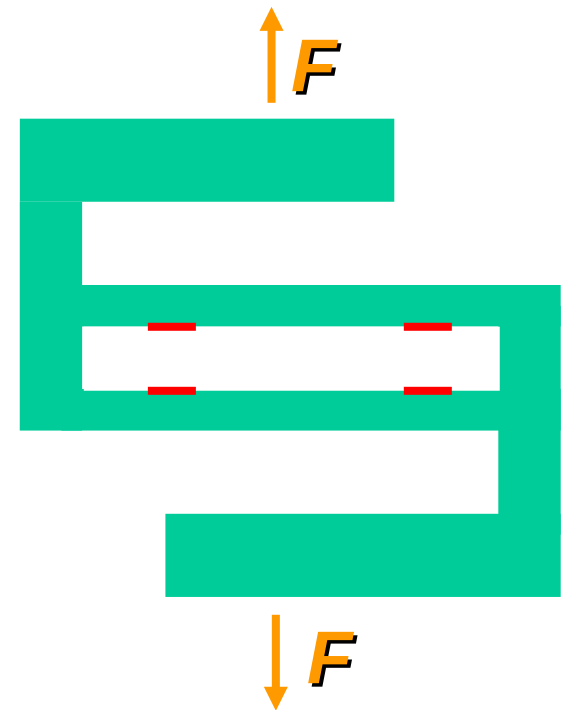


SPRĘŻYSTE ELEMENTY ODKSZTAŁCANE CZUJNIKÓW SIŁY

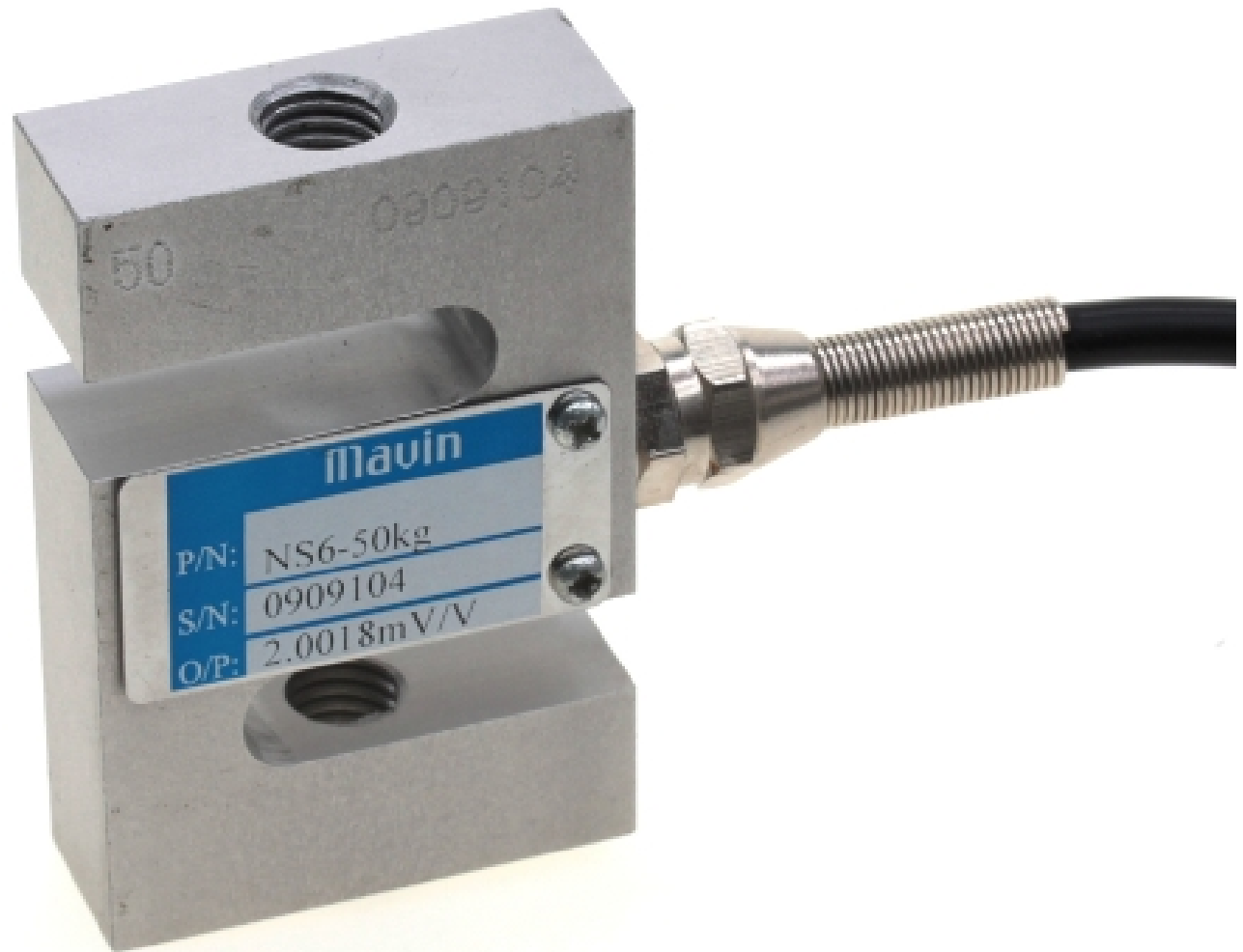
Do dużych sił



Do małych sił

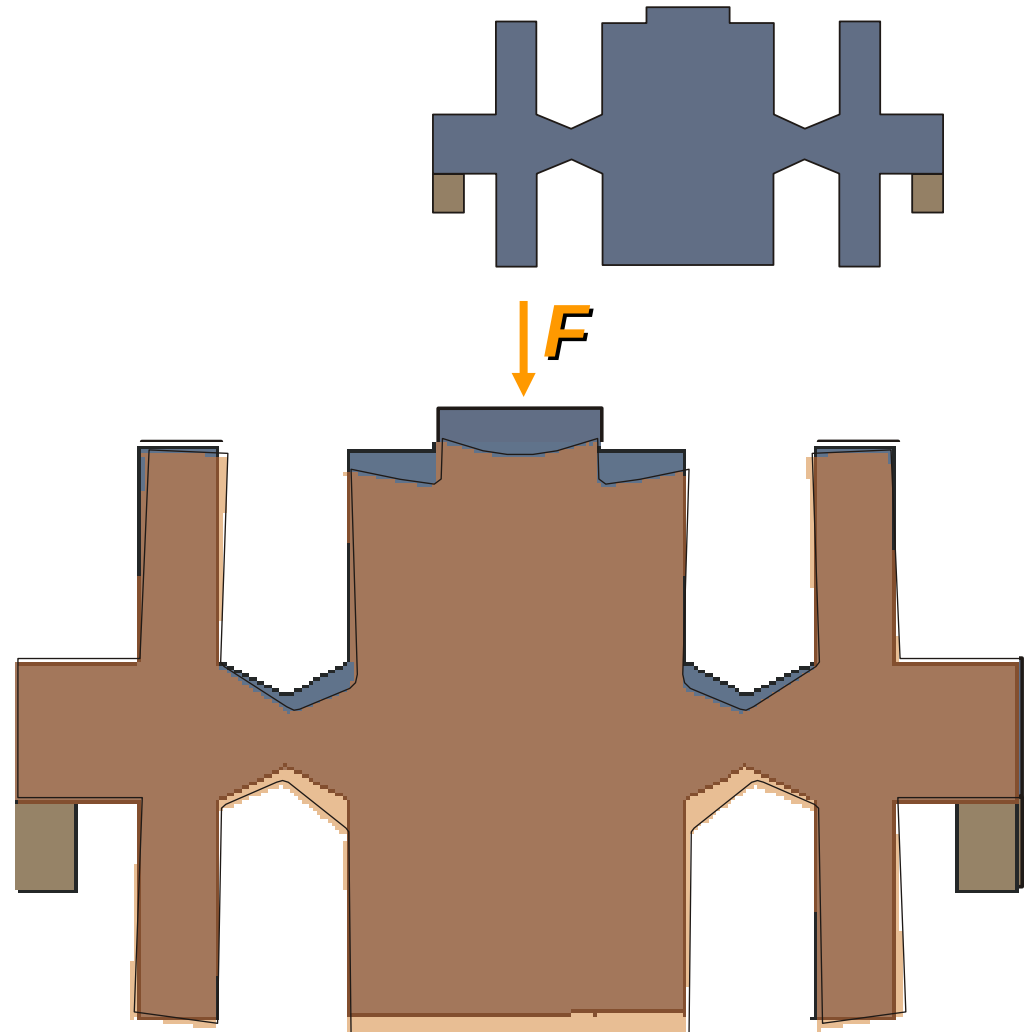


ELEMENT ODKSZTAŁCANY W FORMIE „S”



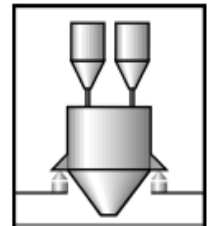
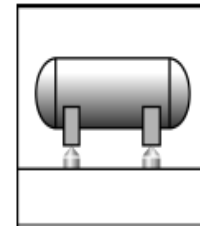
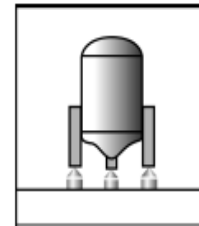
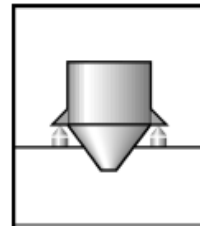
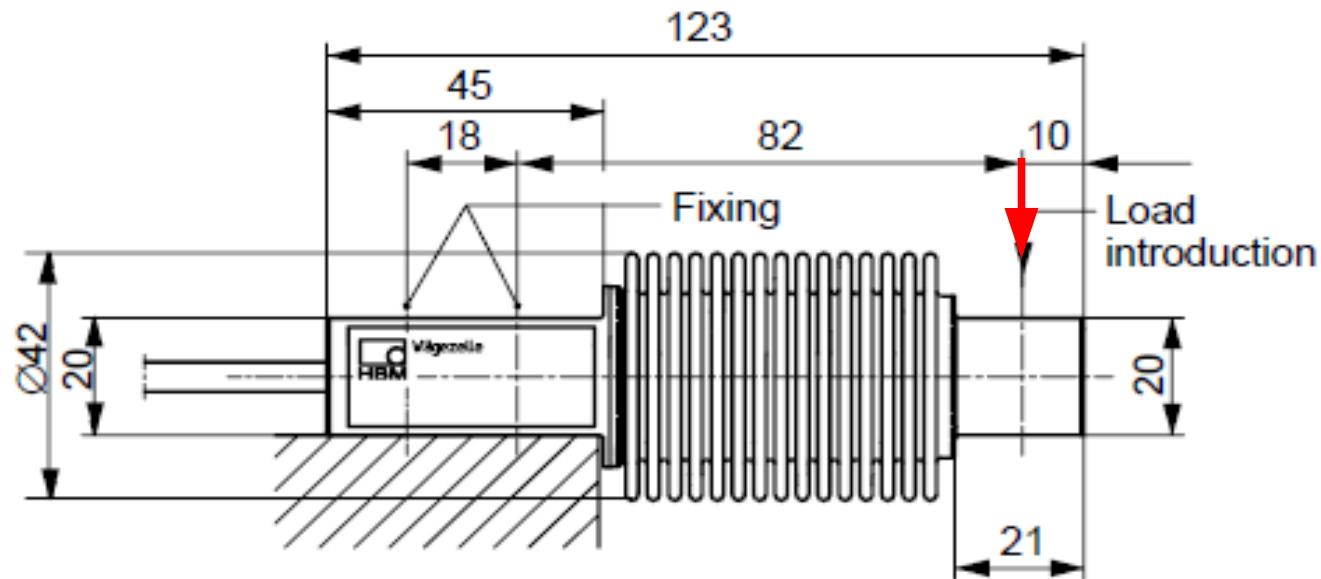
ELEMENT ODKSZTAŁCALNY DO PRECYZYJNYCH CZUJNIKÓW SIŁY

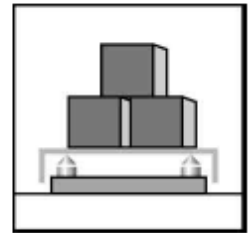
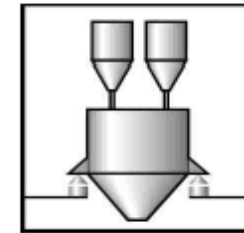
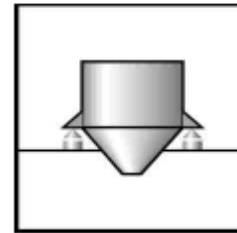
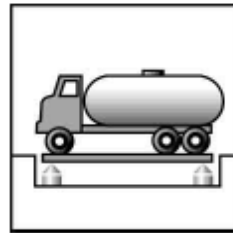
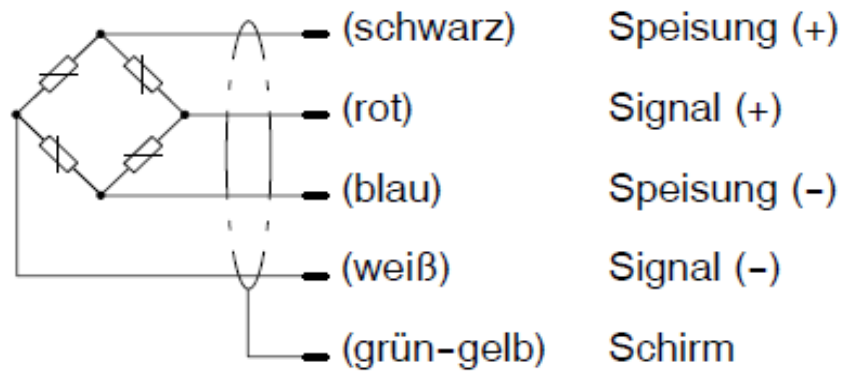
- a) środkowa część (piasta) jest połączona z częścią obwodową 12 -ma elementami,
- b) na każdym elemencie są naklejone u góry 2 tens. i na dole też 2 tens.



niepewność: $\pm 0,002\%$

PRECYZYJNE CZUJNIKI SIŁY



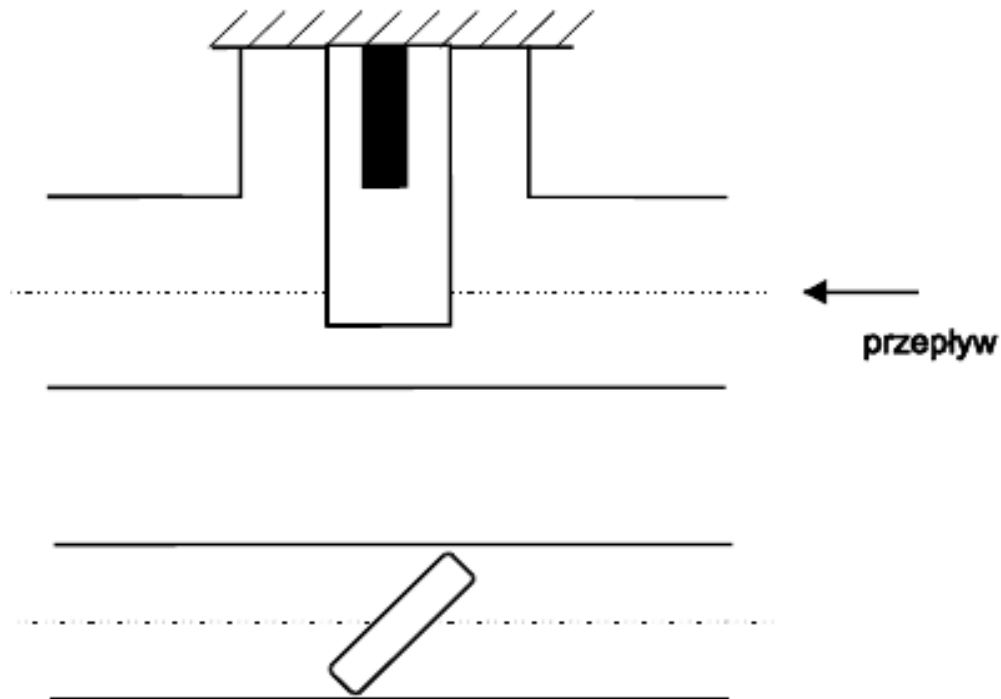


- **Nennlasten: 1 t ... 470 t**
- **Hohes Ausgangssignal von 2,85 mV/V**

POMIAR NATĘŻENIA PRZEPŁYWU

Pomiar ten polega na wykorzystaniu zginanego elementu sprężystego oraz faktu oddziaływania sił aerodynamicznych na profil umieszczony pod kątem do kierunku napływającego strumienia.

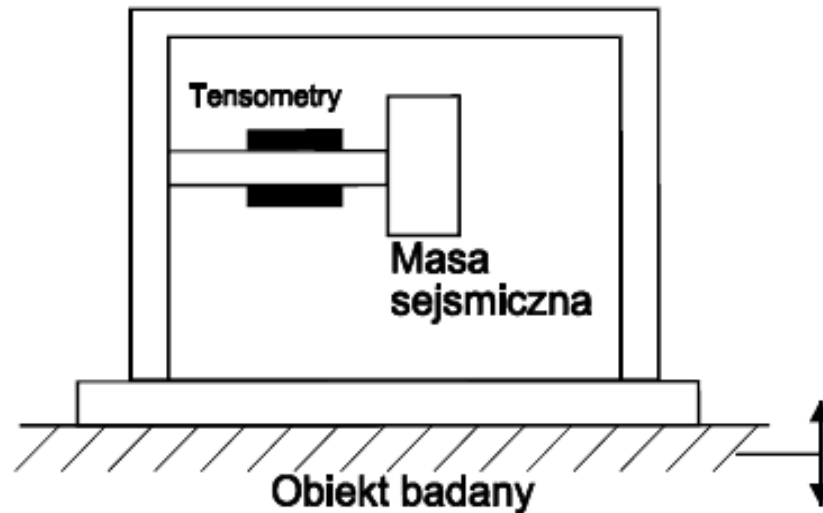
Siła gnąca jest proporcjonalna do kwadratu prędkości czynnika.



POMIAR PRZEMIESZCZEŃ

Do pomiaru przemieszczeń wykorzystywany jest m.in. układ belki jednostronnie utwierdzonej. Rozkład naprężeń w belce zginanej jest praktycznie, w pewnym zakresie, proporcjonalny do jej strzałki ugięcia. Tensometry naklejane w pobliżu miejsca utwierdzenia przekażą sygnał proporcjonalny do strzałki ugięcia końca belki.

Przetworniki tensometryczne łatwo realizują pomiar przemieszczenia lub przyspieszenia.



POMIARY SIŁ CZUJNIKAMI INDUKCYJNOŚCIOWYMI

Zasada pomiaru:

Człon sprężysty jest tak zaprojektowany, aby mierzona siła wywoływała jak największe przemieszczenie pomiędzy określonymi jego punktami.

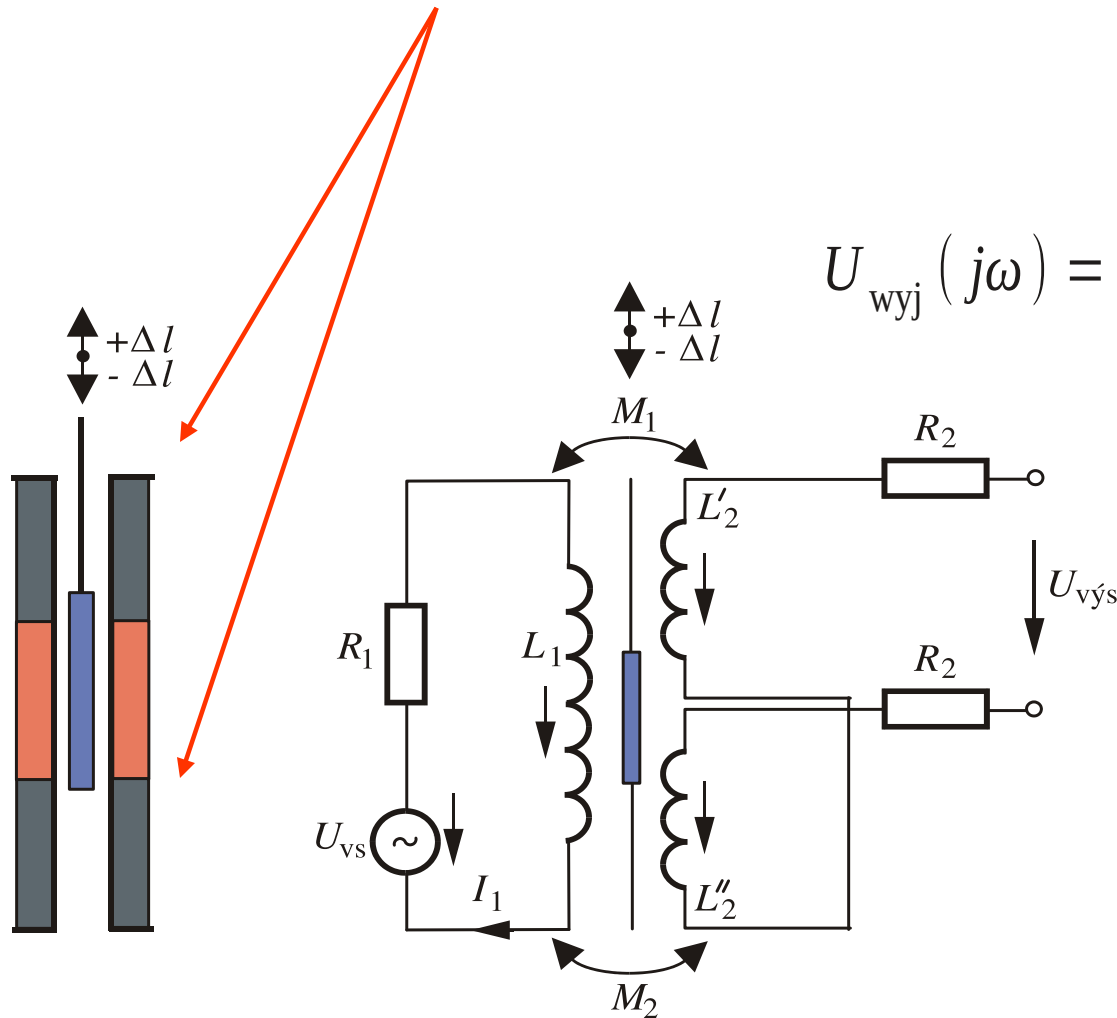
Elementy sprężyste:

- a) belka utwierdzona,
- b) rama sprężysta przestrzena,
- c) rama sprężysta skrętna,

Czujnik przemieszczenia LVDT

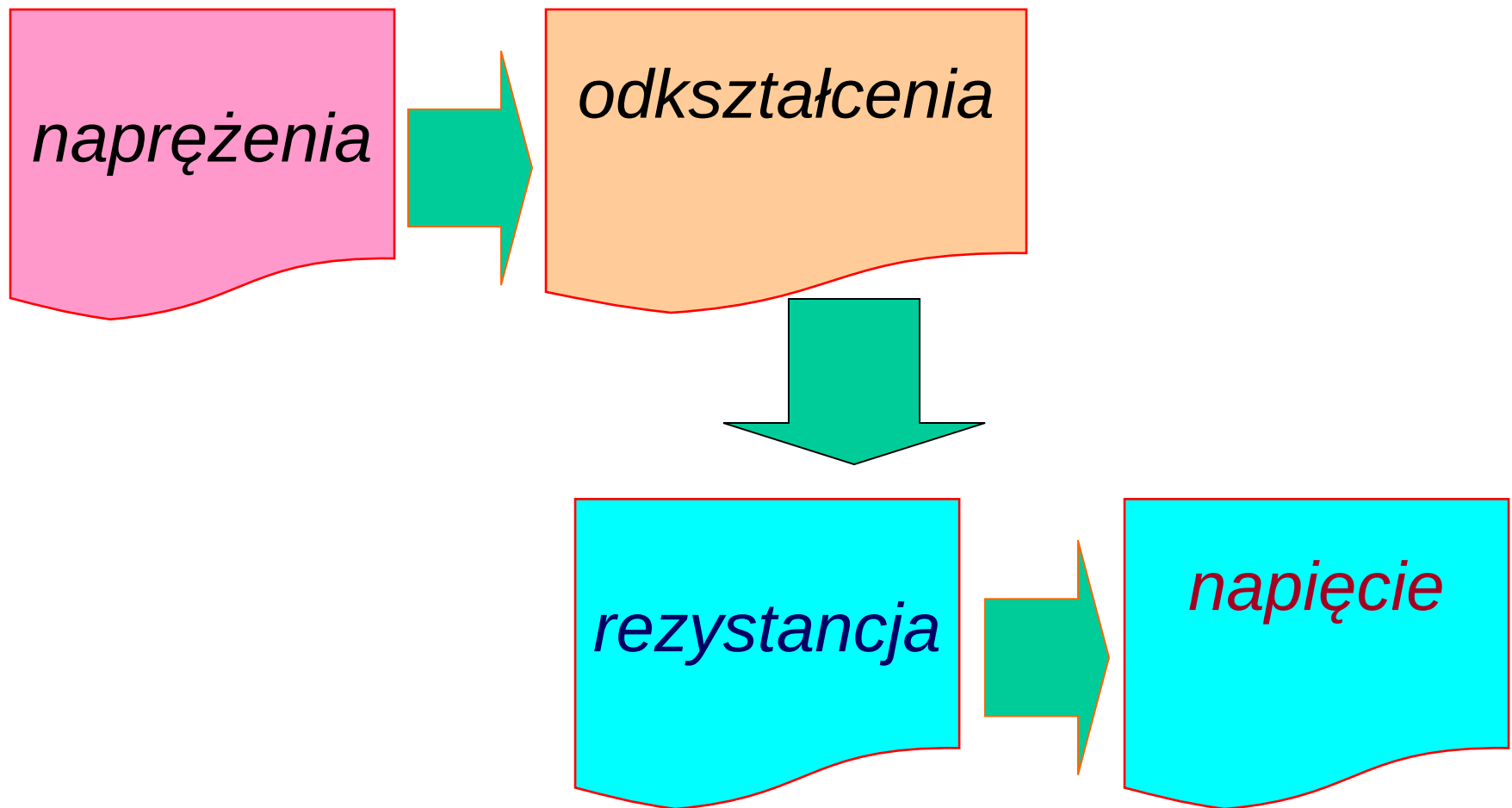
(*L*inear *V*ariable *D*ifferential *T*ransformer)

Uzwojenia wtórne połączone przeciwsobnie

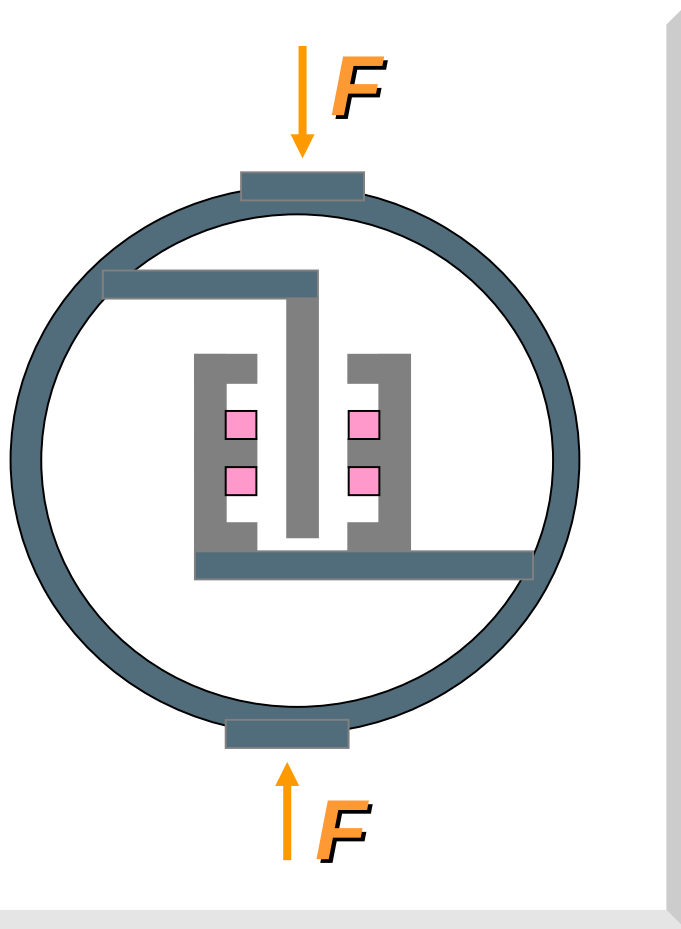


$$U_{wyj}(j\omega) = j\omega (M_1 - M_2) \frac{U_{zas}(j\omega)}{R_1 + j\omega L_1}$$

MECHANICZNE I ELEKTRYCZNE CZŁONY PRZY POMIARZE SIŁ

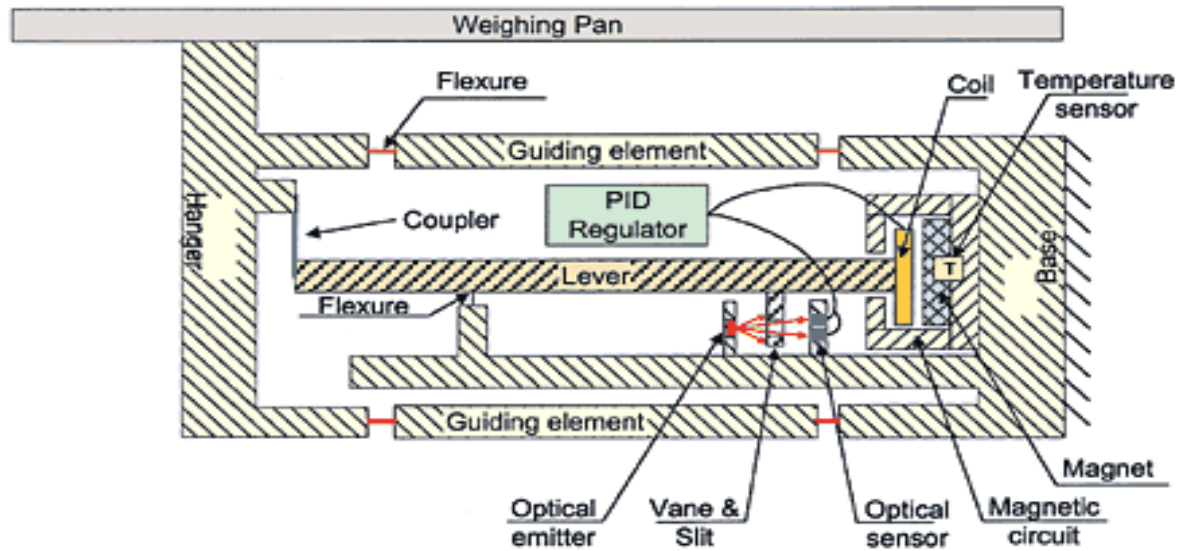
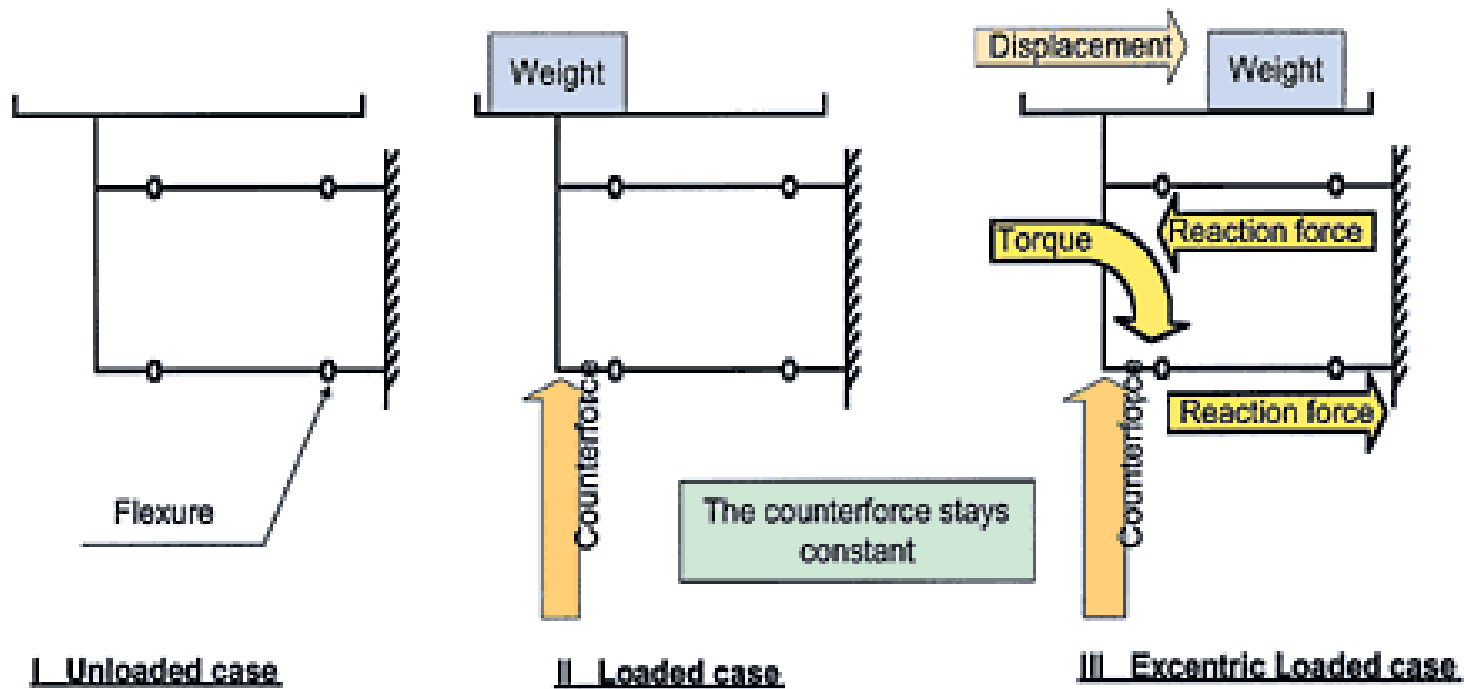


PIERŚCIENIOWY CZUJNIK SIŁY Z INDUKCYJNOŚCIOWYM CZUJNIKIEM PRZEMIESZCZENIA O OTWARTYM POLU MAGNETYCZNYM

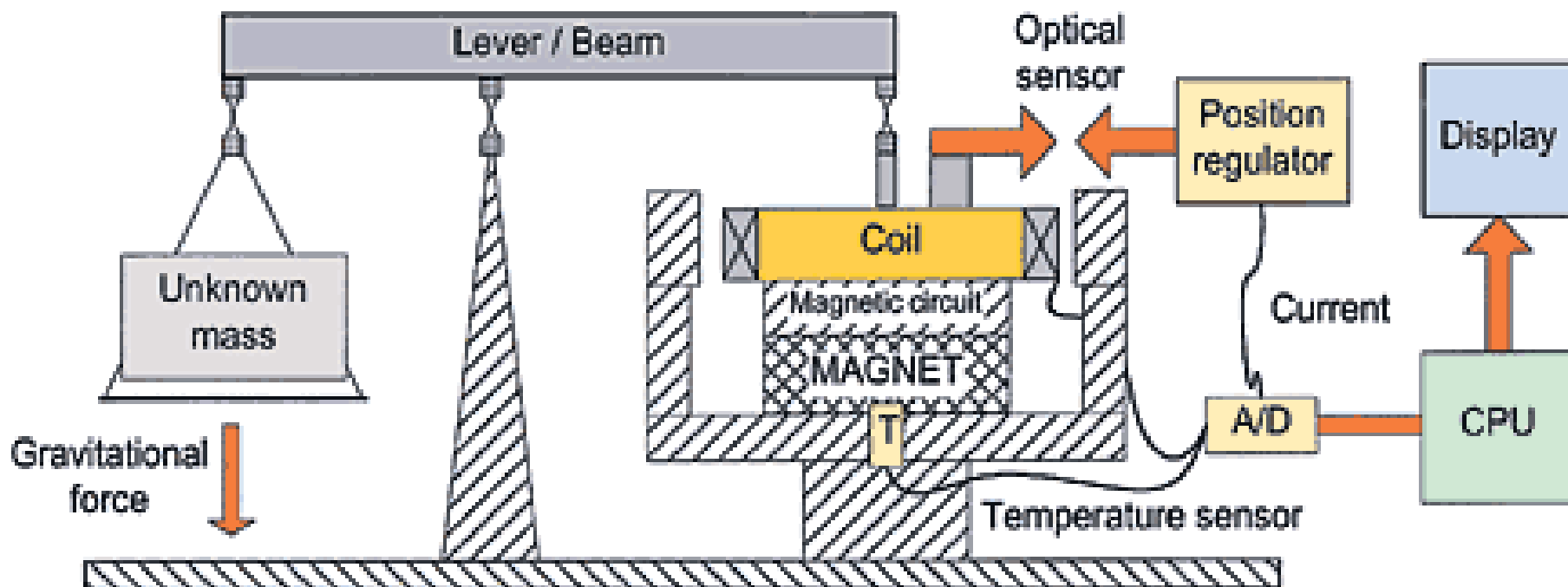


*Przetwarzanie siły
na przemieszczenie*

*siły: od 0,01 N do 10 MN
niepewności: 1 do 3%*



Wagi „zelektronizowane”

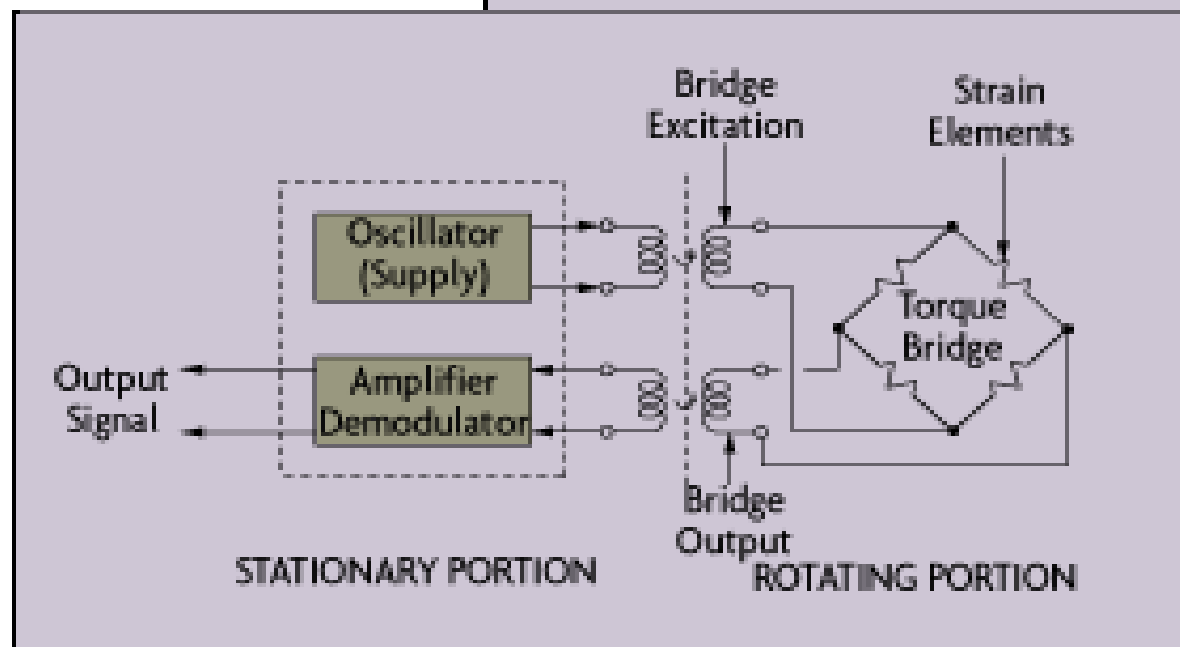
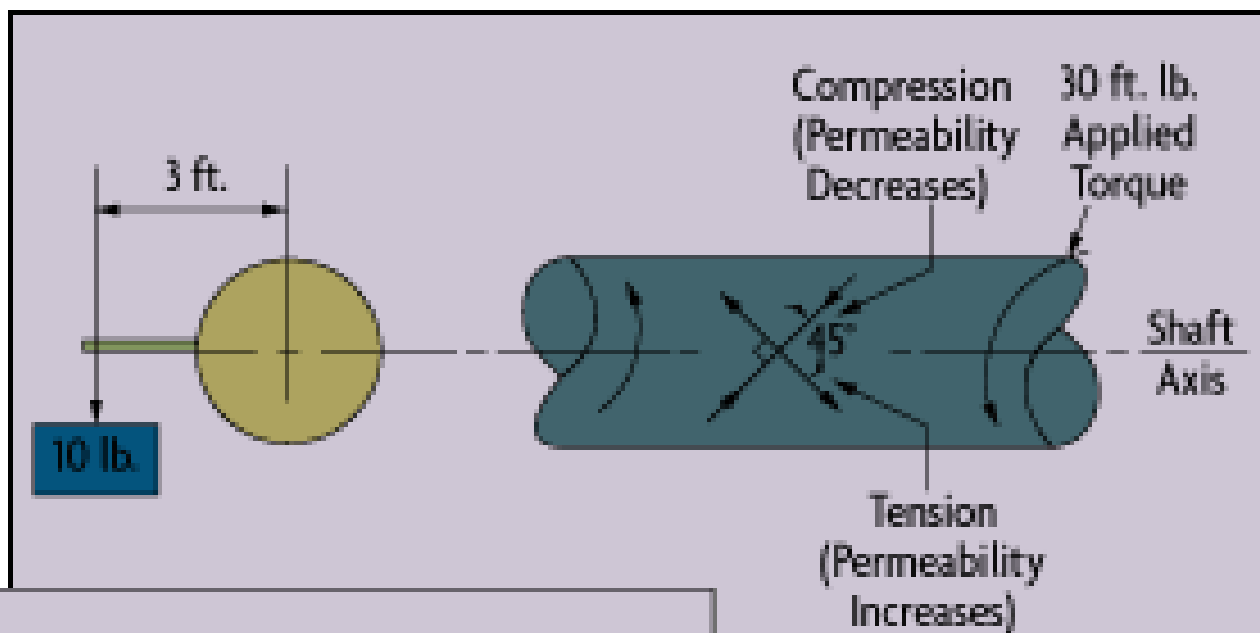


ELEMENTY ODKSZTAŁCANE

Największa wartość odkształcenia nie może przewyższać 10 do 30% odkształcenia wynikającego z granicy sprężystości użytego materiału.

Konieczny jest projekt elementów obciążonych całego czujnika. Niewystarczające jest jedynie obliczenie odkształceń w miejscach umieszczenia tensometrów.

Pomiar momentu



POMIAR SIŁ CZUJNIKAMI PIEZOELEKTRYCZNYMI

Zasada pomiaru:

Podstawą fizyczną jest zjawisko piezoelektryczne wykorzystujące *polaryzację* niektórych dielektryków krystalicznych lub polikrystalicznych poddanych naprężeniom mechanicznym

Pomiary dynamiczne

POMIARY SIŁY CZUJNIKAMI PIEZOELEKTRYCZNYMI

O podstawowych właściwościach czujnika decyduje **materiał piezoelektryczny**

Materiały a) monokrystaliczne (kwarc SiO_2 , LiTAO_3),
b) polikryst. (titaniany ołowiu, baru, cyrkonu),
c) polimery organiczne (poliwinylidendifluorid),

1

Po przekroczeniu temperatury Curie materiał **traci właściwości** piezoelektryczne.

2

Po usunięciu naprężeń materiał powraca do **stanu pierwotnego**

POMIAR SIŁY CZUJNIKAMI PIEZOELEKTRYCZNYMI

a) efekt piezoelektryczny podłużny



Siła działa w kierunku osi
elektrycznej kryształu

Ładunek na elektrodach: $Q = k \cdot F_x$

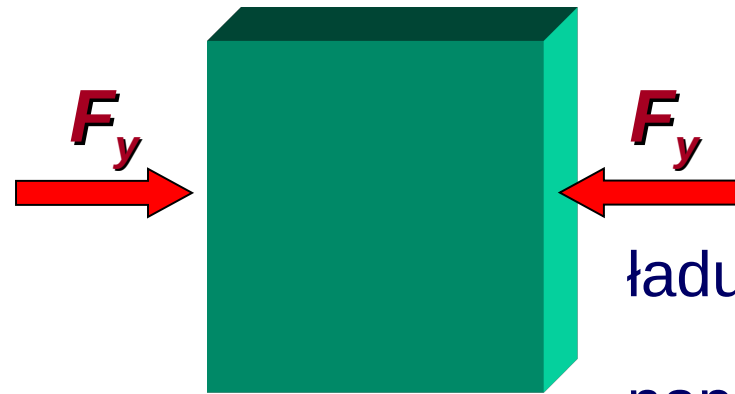
Napięcie: $U = Q/C = k_x \cdot F_x / C$

Wartość ładunku nie zależy od rozmiarów
geometrycznych

POMIAR SIŁY CZUJNIKAMI PIEZOELEKTRYCZNYMI

b) efekt piezoelektryczny poprzeczny

Siła działa w kierunku osi **mechanicznej** kryształu



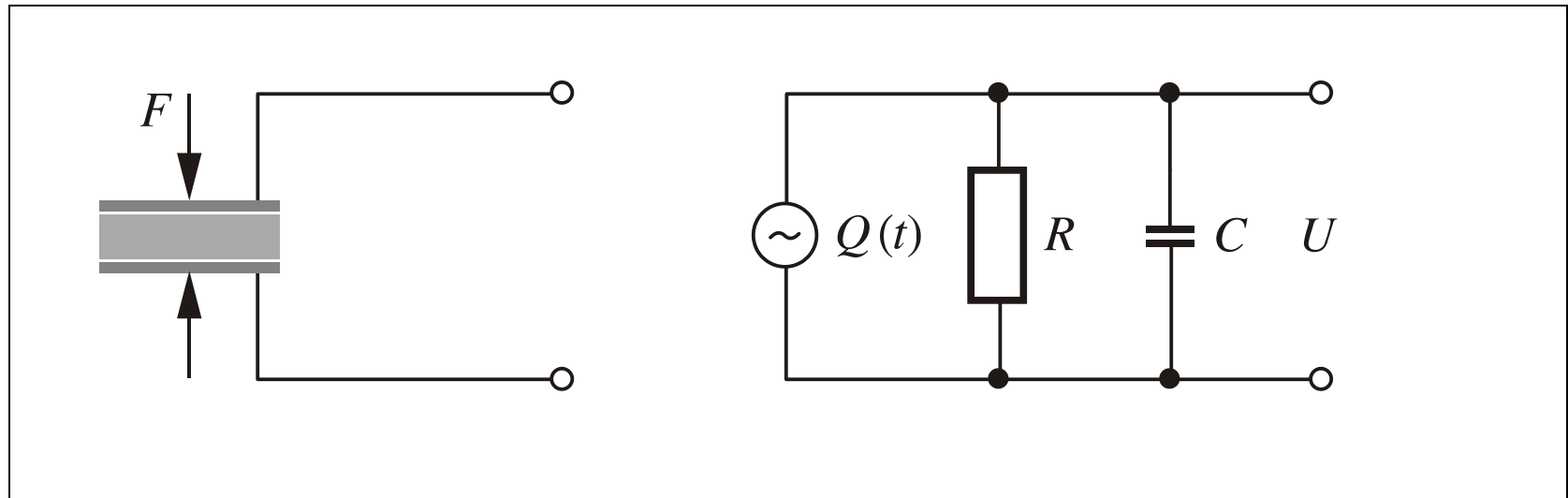
ładunek na elektrodach: $Q = k \cdot F_y a/b$

napięcie: $U = Q/C = k_y \cdot F_y a/bC$

Wartość ładunku zależy od rozmiarów geometrycznych, lecz ze względu na mniejsze dopuszczalne siły nie jest większa niż przy wykorzystaniu efektu podłużnego.

POMIAR SIŁY CZUJNIKAMI PIEZOELEKTRYCZNYMI

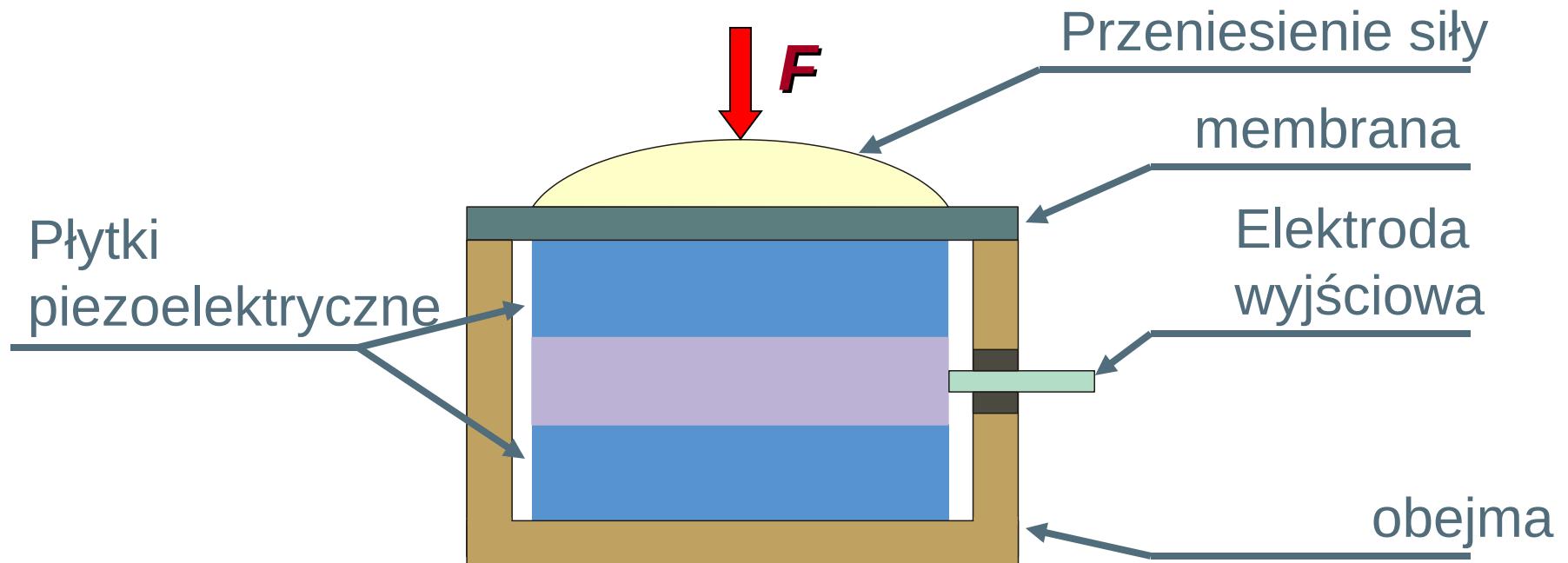
Gdy częstotliwość mierzonej wielkości jest niższa, od częstotliwości własnej kryształu, czujnik piezoelektryczny można przedstawić obwodem zastępczym.



Czujnik traktuje się jako źródło ładunkowe

PIEZOELEKTRYCZNY CZUJNIK SIŁY

parametry: zakres: 0,1 do 10^3 MN,
nieliniowość: $\pm 1\%$,
Zakres temp.: (-150 do 250) °C
Częstotł. własna: 2 do 300 000 kHz



MINIATUROWE PIEZOELEKTRYCZNE CZUJNIKI SIŁY

parametry: zakres: do 1200 kN, nieliniowość: $\pm 1\%$,

Zakres temp.: (-196 do 200) °C ciężar: 3 g do 2,35 kg



Pomiary tensometryczne:

- Siły i obciążenia stałe lub zmieniające się do kilkaset razy na s. Niewielka cena czujnika, dobra dokładność do kilka %.
- Możliwość wykorzystania jako siłomierza mierzonego elementu lub układu kopusu, mocowania (trzeba go oczywiście wyskalować).
- Naklejony tensometr nie może być już użyty w innym miejscu.
- Wrażliwość na zmiany temperatury (jeśli to możliwe to stosujemy układy mostkowe).

Pomiary czujnikiem piezoelektrycznym:

- Tylko pomiary dynamiczne (kilka dziesiąt min. do kilka tys. na s) - sam wzmacniacz pomiarowy powoduje odpływ ładunku z czujnika a tym samym spadek wskazań.
- Duża dokładność wskazań (lepsz niż 1%).
- Niewrażliwość na zmiany temperatury.
- Bardzo wysoki koszt czujnika (np. 3 osiowy dynamometr to kilkadziesiąt tys. zł)