



POMIARY WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH

Dr inż. Eligiusz PAWŁOWSKI
Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Prezentacja do wykładu dla EMST

Semestr letni

Wykład nr 4

Prawo autorskie

Niniejsze materiały podlegają ochronie zgodnie z **Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych** (Dz.U. 1994 nr 24 poz. 83 z późniejszymi zmianami).

Materiał ten udostępniam **do celów dydaktycznych** jako materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Pomiar Wielkości Nielektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Mogą z nich również korzystać inne osoby zainteresowane tą tematyką. Do tego celu materiały te można **bez ograniczeń przeglądać, drukować i kopiować wyłącznie w całości**.

Wykorzystywanie tych materiałów bez zgody autora w inny sposób i do innych celów niż te, do których zostały udostępnione, **jest zabronione**.

W szczególności **niedopuszczalne jest**: usuwanie nazwiska autora, edytowanie treści, kopiowanie fragmentów i wykorzystywanie w całości lub w części do własnych publikacji.

Eligiusz Pawłowski

Uwagi dydaktyczne

Niniejsza prezentacja stanowi **tylko i wyłącznie materiały pomocnicze** do wykładu z przedmiotu Pomiary Wielkości Nielektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Udostępnienie studentom tej prezentacji nie zwalnia ich z konieczności sporządzania **własnych notatek z wykładów** ani też nie zastępuje **samodzielnego studiowania** obowiązujących podręczników.

Tym samym zawartość niniejszej prezentacji w szczególności **nie może być** traktowana jako zakres materiału obowiązujący na kolokwium.

Na kolokwium obowiązujący jest **zakres materiału faktycznie wyłożony podczas wykładu** oraz zawarty w odpowiadających mu fragmentach **podręczników** podanych w wykazie literatury do wykładu.

Eligiusz Pawłowski

Tematyka wykładu

Odkształcenia sprężyste

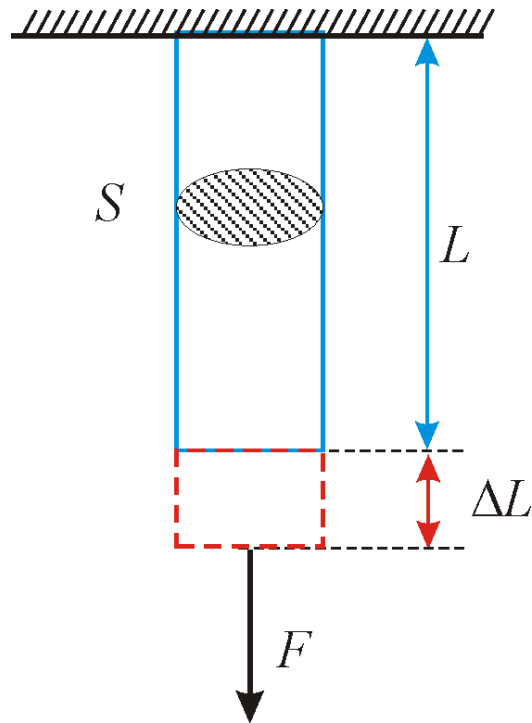
Prawo Hooke'a

Budowa i zasada działania tensometrów

Układy pomiarowe tensometrów

Zastosowania tensometrów

Działanie siły na element sprężysty



$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

$$\mu \text{ strain} = \frac{1 \mu \text{ m}}{1 \text{ m}}$$

ε - odkształcenie (wydłużenie względne)
(*ang. strain*)

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

σ - naprężenie (ciśnienie w $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$)
(*ang. stress*)

Ciało wykazujące właściwości sprężyste pod wpływem działania siły zmienia swoje wymiary.

Prawo Hooke'a

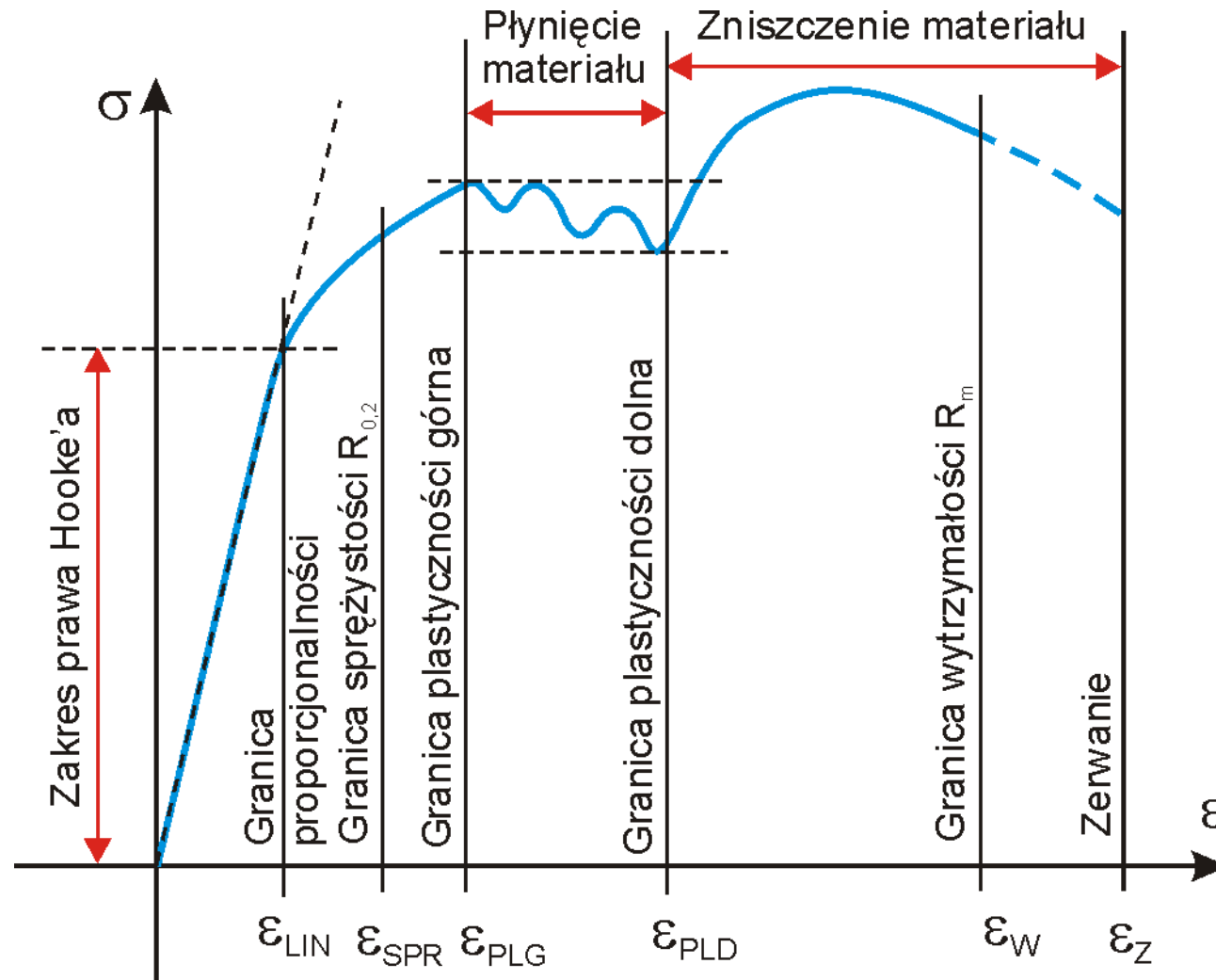
Napężenie σ w materiale jest wprost **proporcjonalne** do **wydłużenia względnego ε** (odkształcenia) i do **modułu sprężystości** wzdłużnej materiału E_Y (modułu Younga):

$$\sigma = E_Y \varepsilon$$

E_Y – **moduł Younga**, moduł sprężystości wzdłużnej, stała materiałowa, dla stali równy ok. 200 000 MPa

Prawo Hooke'a obowiązuje w zakresie odkształceń sprężystych. Za granicę sprężystości $R_{0,2}$ przyjmuje się takie napężenie, po osiągnięciu którego pozostaje odkształcenie jednostkowe nie przekraczające 0,2 ‰.

Granica liniowości i sprężystości



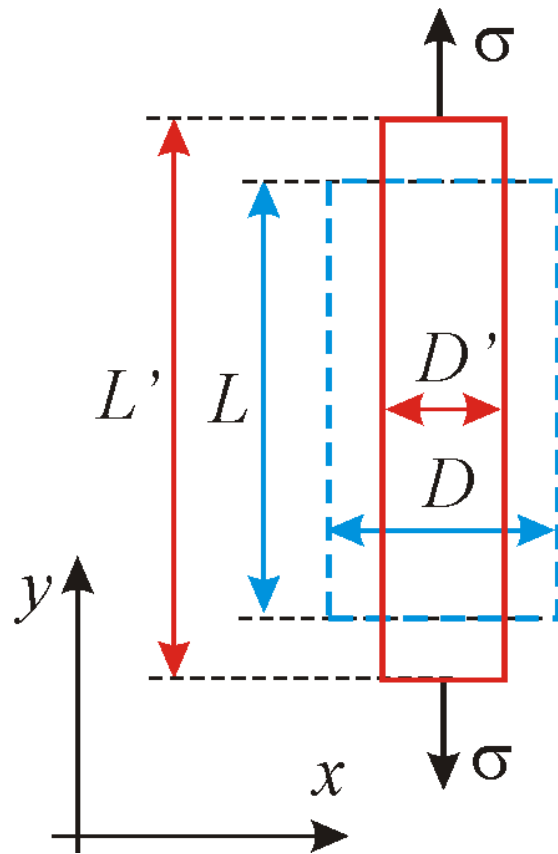
Badania Poissona

Okazuje się również, że ciało sprężyste **wydłuża** się w kierunku **zgodnym** z działającym naprężeniem i jednocześnie **zmniejsza swój wymiar w kierunku prostopadłym**.

Badania Poissona wykazały, że :

Stosunek μ odkształceń jednostkowych w kierunku równoległym $\varepsilon_{\parallel}$ do działania naprężeń σ i w jakimkolwiek kierunku doń prostopadłym $\varepsilon_{\perp}$ jest wartością stałą dla jednorodnych ciał izotropowych. Są to ciała mające stałą gęstość oraz te same własności we wszystkich kierunkach. Stosunek μ nazywany jest **liczbą Poissona**. Dla metali waha się on w niewielkich granicach, przyjmuje się $\mu \approx 0,3$

Liczba Poissona, współczynnik Poissona μ



Element sprężysty pod wpływem naprężenia σ wydłuża się w kierunku (y) równoległym do σ i zwęża się w kierunku (x) prostopadłym do σ .

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L' - L}{L}$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\Delta D}{D} = \frac{D' - D}{D}$$

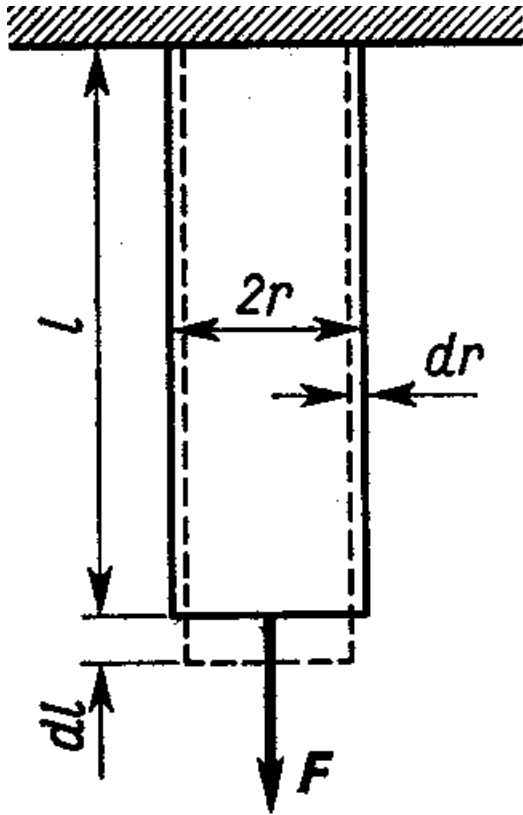
$$\varepsilon_{\perp} = -\mu \varepsilon_{\parallel} = -\mu \frac{\sigma}{E}$$

$$\mu = -\frac{\frac{\Delta D}{D}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

$$\mu \approx 0,3$$

Minus !!!

Efekt tensometryczny w przewodnikach



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

Jak zmienia się rezystancja R rozciąganego przewodu?

Po zlogarytmowaniu i zróżniczkowaniu otrzymamy:

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

$$s = \pi r^2 \Rightarrow \frac{\Delta s}{s} = 2 \frac{\Delta r}{r} \quad \rightarrow \quad s = \pi r^2$$

Podstawiamy i otrzymujemy:

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

Stała tensometryczna k_t , stała tensometru

Wprowadzamy oznaczenie k_t - współczynnik czułości odkształceniowej, **stała tensometryczna**:

$$k_t = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon}$$

Względna zamiana rezystancji

Względna zamiana długości - odkształcenie

Współczynnik czułości odkształceniowej, stała tensometryczna k_t opisuje zależność względnej zmiany rezystancji $\Delta R/R$ drutu oporowego od odkształcenia ε jakiemu ten drut poddano. Jeśli drut odpowiednio ukształtowano i wykonano z niego tensometr o długości l (którą nazywamy bazą tensometru) to powyższy wzór określa również **stałą tensometru k_t** .

Efekt tensometryczny w przewodnikach c.d.

Uwzględniając wcześniejsze zależności, współczynnik czułości odkształceniowej k_t (stała tensometryczna, stała tensometru) może być zapisana:

$$k_t = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 - 2 \frac{\frac{\Delta r}{r}}{\frac{\Delta l}{l}} + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}}$$

Zauważamy, że we wzorze występuje współczynnik Poissona μ

$$-\frac{\frac{\Delta r}{r}}{\frac{\Delta l}{l}} = \mu$$

Efekt tensometryczny w przewodnikach c.d.

Ostatecznie otrzymamy zależność na k_t - stałą tensometryczną:

$$k_t = 1 + 2\mu + \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{\varepsilon}$$

Ponieważ współczynnik Poissona μ przeciętnie wynosi:

$$\mu \approx 0,3$$

to stała tensometryczna na k_t w praktyce zawiera się w przedziale około od 2 do 4 dla stosowanych w praktyce materiałów.

$$k_t \approx 2 \dots 4$$

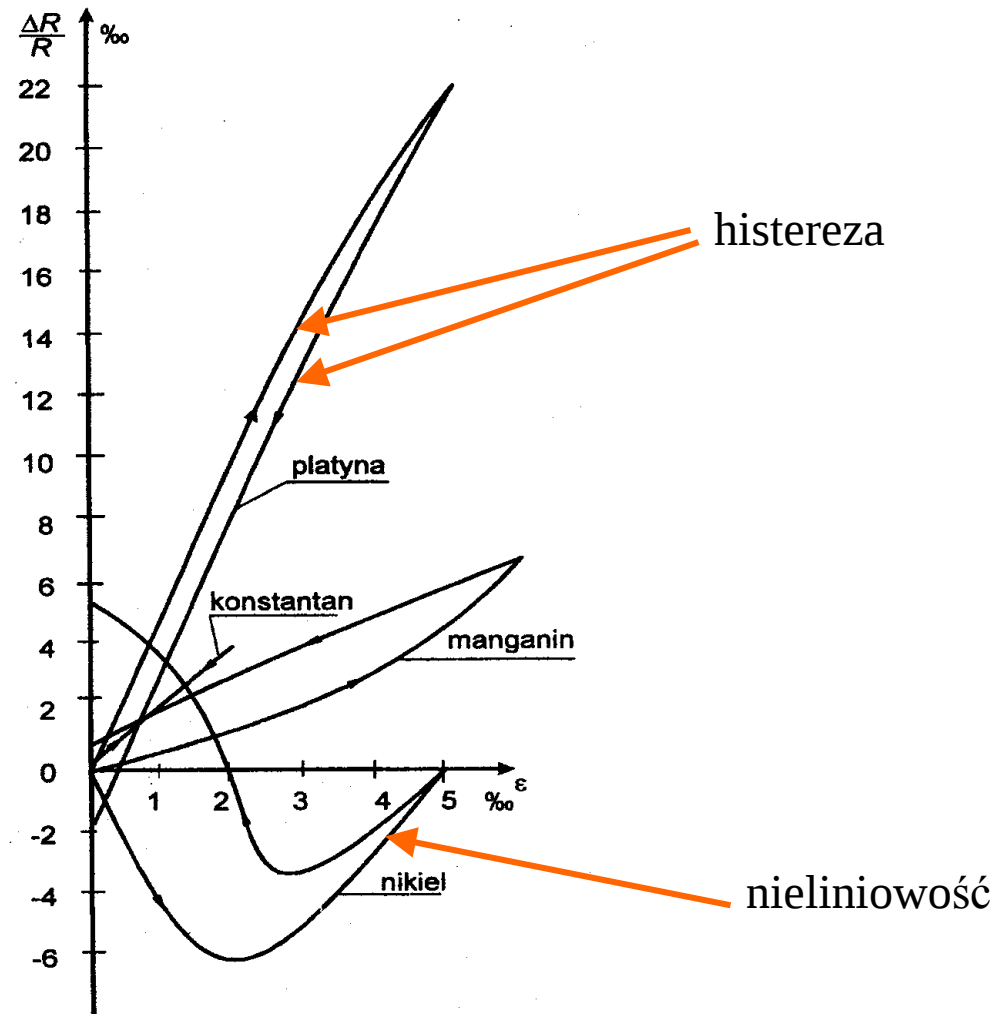
Efekt tensometryczny w różnych metalach

Właściwości stopów tensometrycznych

Nazwa stopu	Skład chemiczny (%)	K	p $\Omega \cdot \text{cm} \cdot 10^6$	α $(^\circ\text{C})^{-1} 10^6$	s. t. e. do Cu $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	$\epsilon_{\text{max}} \cdot 10^3$
Konstantan	40 Ni 60 Cu	2,1	50	3	45	~ 4
Nichrom	80 Ni; 20 Cr	2,1	100	30	20	~ 5
Chromel C	65 Ni; 12 Cr; 23 Fe	2,5	105	18	17	~ 5
Elinwar Izoelastik	36 Ni; 8 Cr; 55 Fe; 0,5 Mo	3,6	111	17,5	4	~ 8

Rezystancja gotowego tensometru zawiera się w granicach od 120 Ω do 1000 Ω . Tolerancja rezystancji jest rzędu 1 %.

Efekt tensometryczny w różnych metalach



Efekt tensometryczny w półprzewodnikach - piezorezystywność

W metalach (przewodnikach) zmiana rezystancji jest spowodowana przede wszystkim zmianą wymiarów geometrycznych, zjawisko to nazywamy efektem tensometrycznym. Zmiany rezystywności ρ są w **metalach bardzo małe**.

W półprzewodnikach w wyniku działania naprężeń deformacji ulega siatka krystaliczna, co skutkuje dużymi zmianami rezystywności ρ , około **100 większymi niż dla metali**. Efekt ten nazywamy **piezorezystywnością**.

Dla **półprzewodników** stała k_t zawiera się w przedziale od 40 do 300 i więcej, zależnie od rodzaju półprzewodnika, domieszkowania, orientacji sieci krystalicznej. Silnie zależy od temperatury!

Krótką historia tensometrii oporowej

1856- Wiliam Thomson-Kelvin odkrywa zjawisko zmiany rezystancji metali pod wpływem odkształcenia.

1937- E.E.Simmons z Kalifornijskiego Instytutu Technologicznego (Caltech) wykorzystuje po raz pierwszy efekt tensometryczny do badania naprężeń w konstrukcji mechanicznej.

1937- A.C. Ruge w Instytucie Technologicznym w Massachusetts (MIT) opracował pierwowzór tensometru drucikowego.

1939- Amerykańska firma Baldwin Southwork Comp. wykorzystując prace Simmons'a i Ruge'a wypuściła na rynek pierwszy komercyjny tensometr wężykowy SR-4.

Zalety tensometrów

Mała histereza,

Niewrażliwość na wstrząsy,

Możliwość przenoszenia wysokich częstotliwości,

Kompensacja wpływu temperatury w układzie mostkowym,

Małe wymiary,

Szybkie realizowanie wielokrotnych pomiarów,

Niski koszt czujnika, prosta konstrukcja, wysoka niezawodność

Wady tensometrów

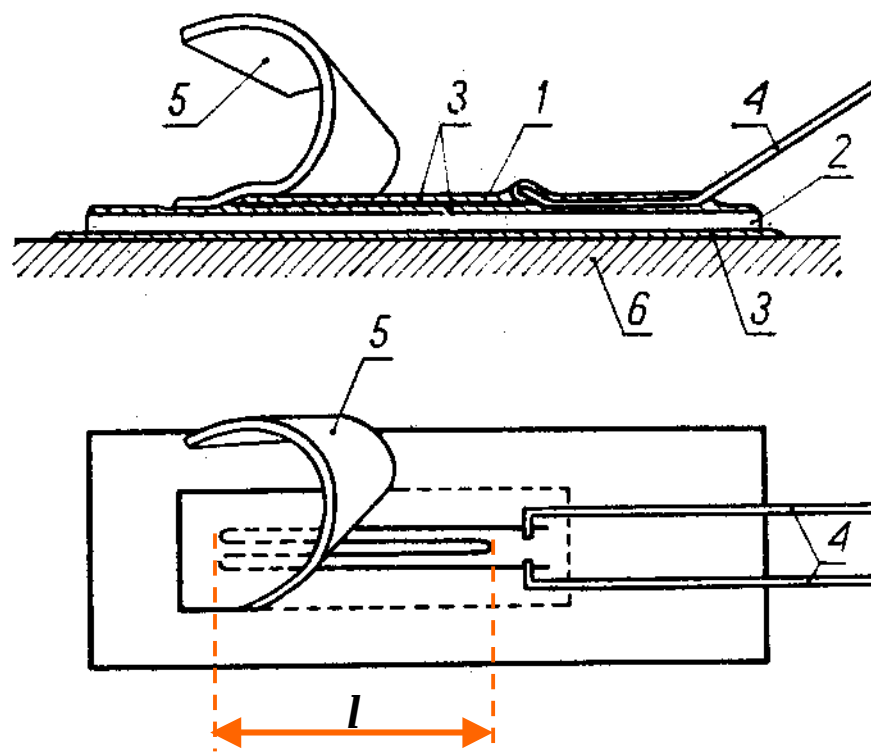
Trudność wzorcowania,

Skomplikowana i czasochłonna instalacja pomiarowa,

Duży koszt aparatury pomiarowej,

Skomplikowana obsługa aparatury pomiarowej

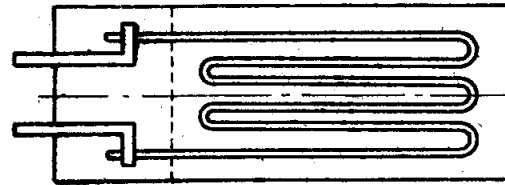
Tensometr drucikowy SR-4, rok 1339



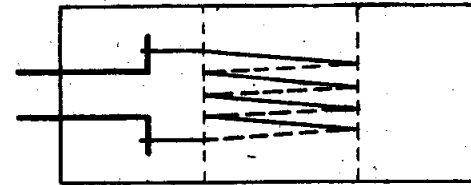
Budowa pierwszego komercyjnego tensometru SR-4 (Simmons, Ruge - 4 druciki): 1.Drucik oporowy (średnica ok.0,025mm), 2.Podkładka papierowa, 3.klej, 4.doprowadzenie z drutu miedzianego, 5.Papier zabezpieczający, 6. Badany obiekt.

Konstrukcje tensometrów drucikowych

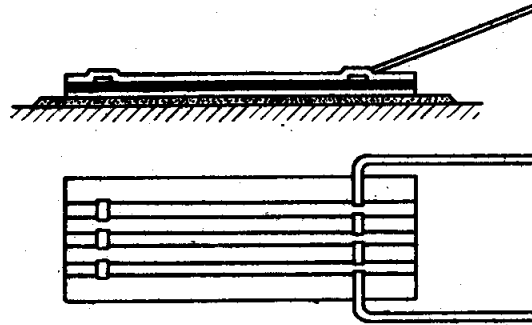
wężykowy



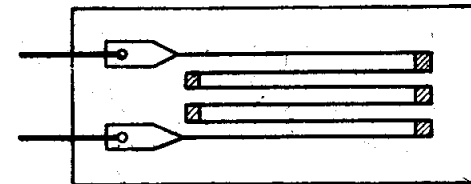
zygzakowy



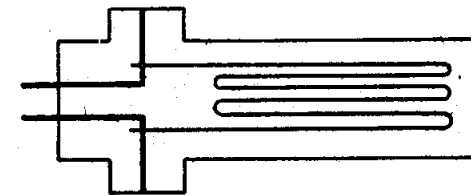
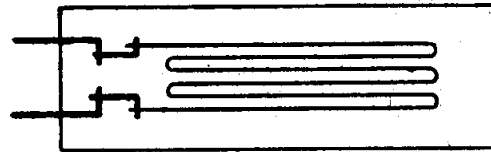
kratowy



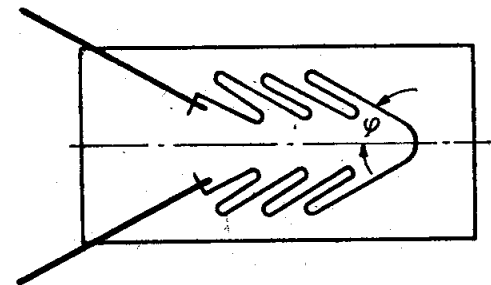
ulepszony
wężykowy



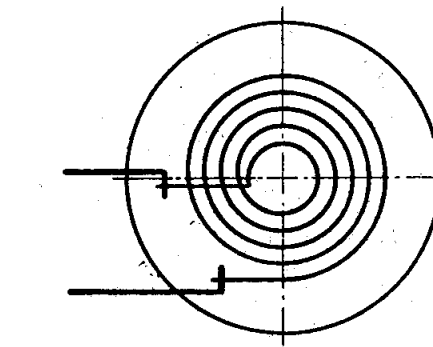
ulepszony
wężykowy



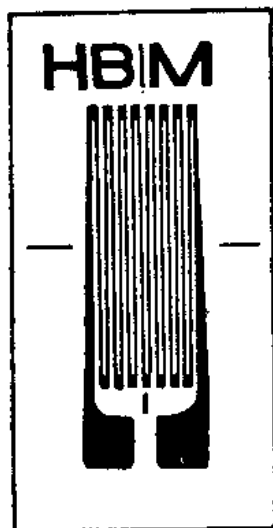
Zmniejszona
czułość
poprzeczna



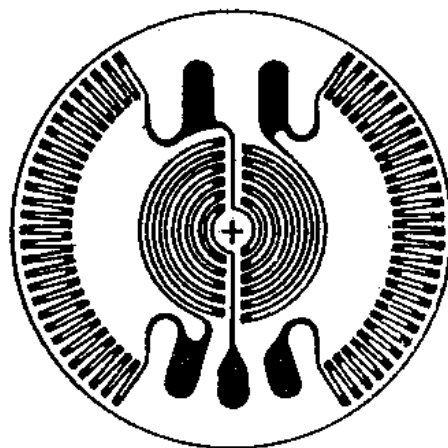
spiralny na
membrany



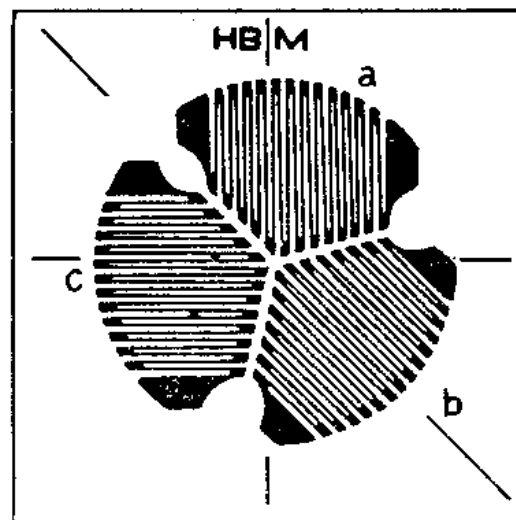
Tensometry foliowe



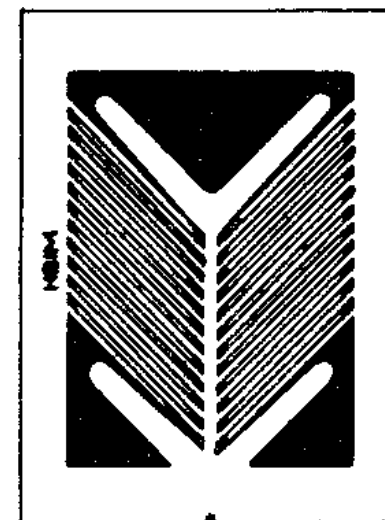
Pojedynczy
zwykły



Membranowy



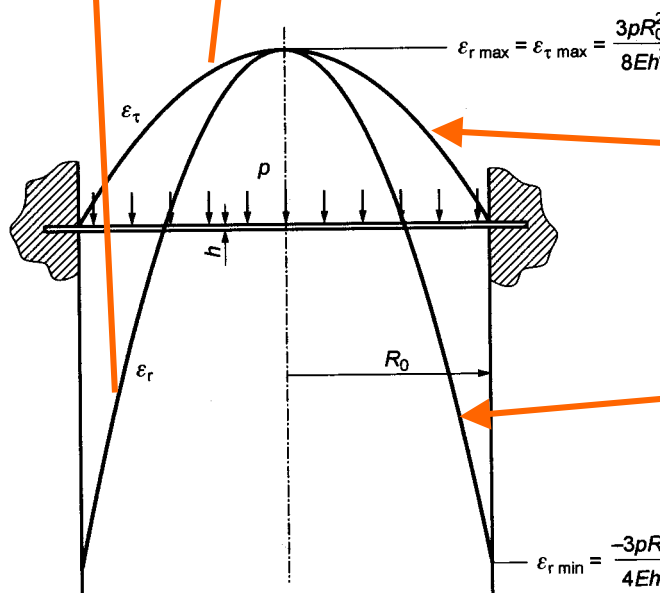
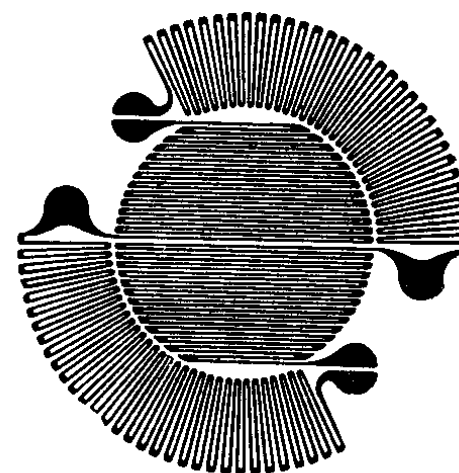
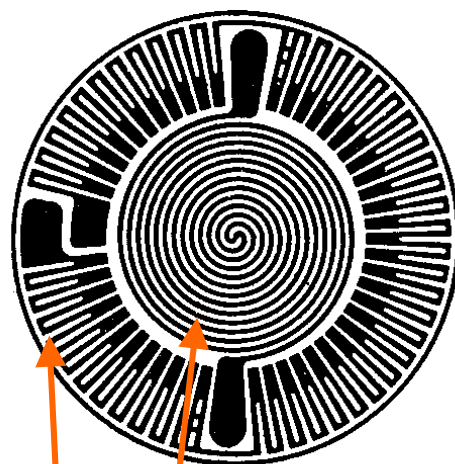
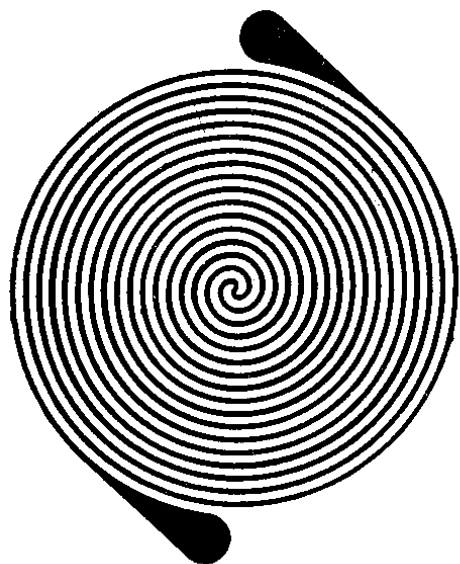
Rozeta
prostokątna



Do naprężeń
stycznych

Hottinger Baldwin Messtechnik

Tensometry foliowe membranowe



Tangenoidalne
(obwodowe)

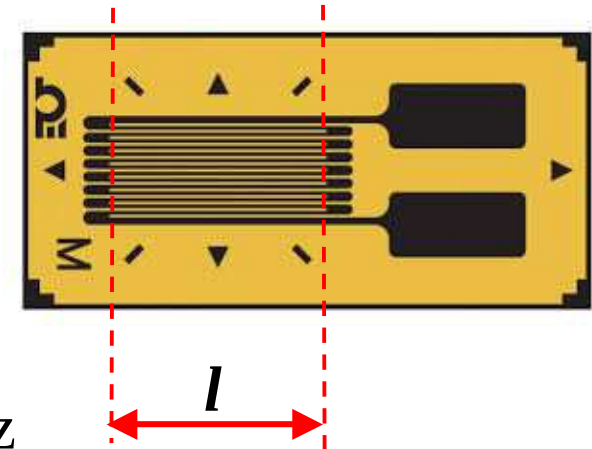
Radialne
(promieniowe)

Odkształcenia w
membranie płaskiej

Najważniejsze parametry tensometrów

Do najważniejszych parametrów tensometrów należą:

- rezystancja znamionowa R_0 tensometru,
- współczynnik czułości odkształceniowej k_t tensometru (lub krócej: stała tensometru),
- długość bazy pomiarowej l tensometru (lub krócej: baza tensometru),
- maksymalne wydłużenie $\varepsilon_{\max}$,
- dopuszczalna wartość prądu pomiarowego,
- zakres temperatur pracy,
- współczynnik temperaturowy rezystancji oraz
- rezystancja izolacji.



Rezystancja znamionowa i stała tensometru

Rezystancja znamionowa R_0 , obecnie produkowanych tensometrów metalowych zawiera się w granicach od 120 Ω do 1000 Ω , z tolerancją wykonania nie gorszą niż 1%.

Współczynnik czułości odkształceniowej k_t tensometru (stała tensometru):

$$k_t = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon}$$

zależnie od zastosowanego stopu na druciki wynosi od 2,1 (konstantan, nichrom) do 3,6 (izoelastic).

Długość bazy i maksymalne wydłużenie

Długość bazy pomiarowej l tensometru (baza tensometru) współcześnie produkowanych tensometrów zawiera się w granicach od 0,2 mm do 150 mm.

Dostępna jest olbrzymia różnorodności produkowanych kształtów ścieżek oporowych, szczególnie w przypadku tensometrów foliowych.

Maksymalne wydłużenie określa największą wartość mierzonego odkształcenia ε , poniżej którego tensometr może pracować w sposób powtarzalny, bez uszkodzeń mechanicznych. Wartość graniczna wynosi od 4 ‰ do 8 ‰. Powyżej tej wartości tensometr może ulec mechanicznemu uszkodzeniu (rozerwaniu)

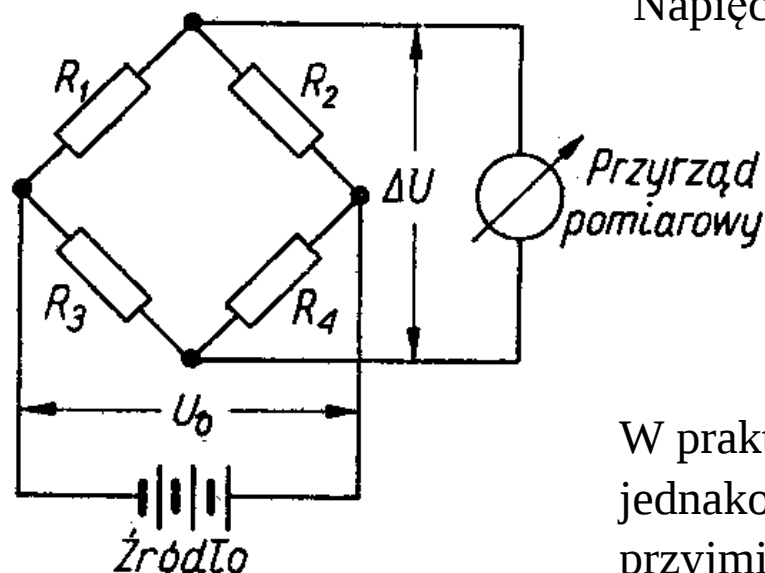
Pozostałe parametry tensometrów

Dopuszczalna **wartość prądu pomiarowego** dla tensometrów foliowych sięga 200 mA (mają lepsze odprowadzanie ciepła), a dla tensometrów drucikowych około 30 mA.

Zakres temperatur pracy dla specjalnych konstrukcji tensometrów i odpowiednich klejów sięga do 1100 °C.

Rezystancja izolacji przy prawidłowym naklejeniu i wykonaniu połączeń powinna być nie mniejsza niż 50 MΩ. Taką wartość rezystancji izolacji powinien wykazywać naklejony tensometr między masą elektryczną badanego obiektu, a dowolnym przewodem wyjściowym.

Układy pomiarowe tensometrów – mostek Wheatstone’a



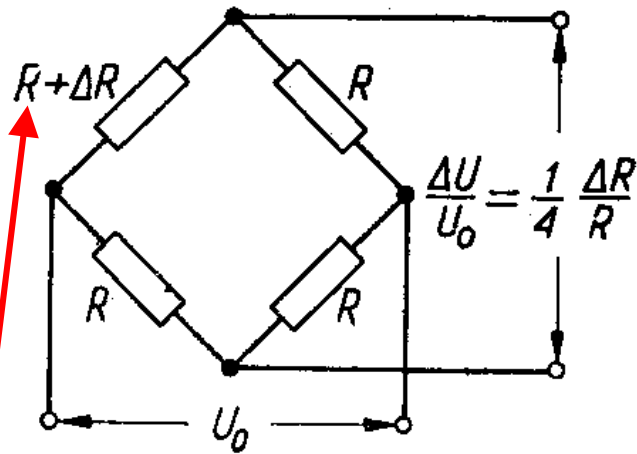
Napięcie ΔU na przekątnej pomiarowej mostka wynosi:

$$\Delta U = U_0 \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

W praktyce wszystkie rezystory (tensometry) R_1 - R_4 mają jednakowe wartości początkowe równe R . Jeśli przyjmiemy, że rezystor (tensometr) R_1 zmieni swoją wartość o ΔR , to napięcie na wyjściu mostka wyniesie:

$$\Delta U = U_0 \left(\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R} - \frac{R}{R + R} \right)$$

Układy pomiarowe tensometrów – mostek Wheatstone'a

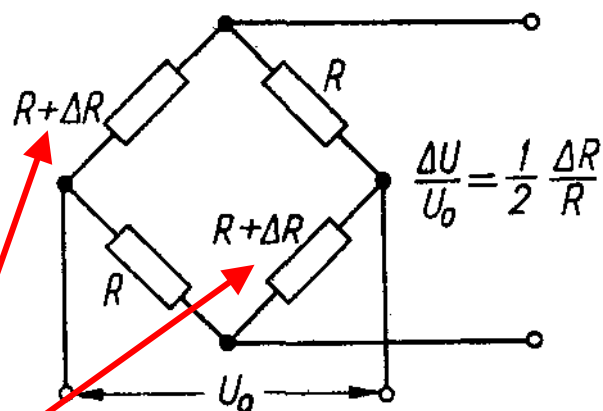


Po przekształceniach dla jednego tensometru o rezystancji R zmieniającego swoją rezystancję o ΔR , otrzymamy:

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}$$

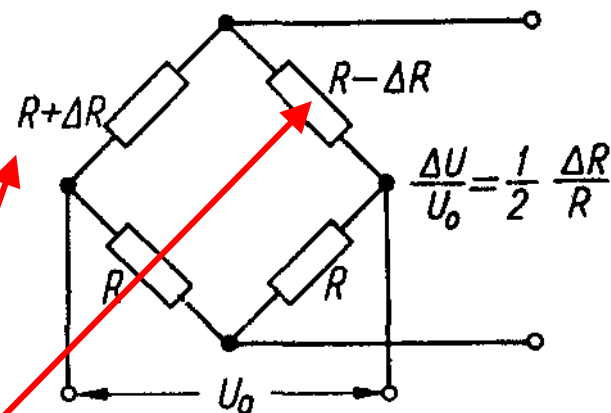
1 tensometr czynny w
jednym ramieniu mostka

Układy pomiarowe tensometrów – mostek Wheatstone'a



2 tensometry o takiej samej zmianie w przeciwległych ramionach mostka

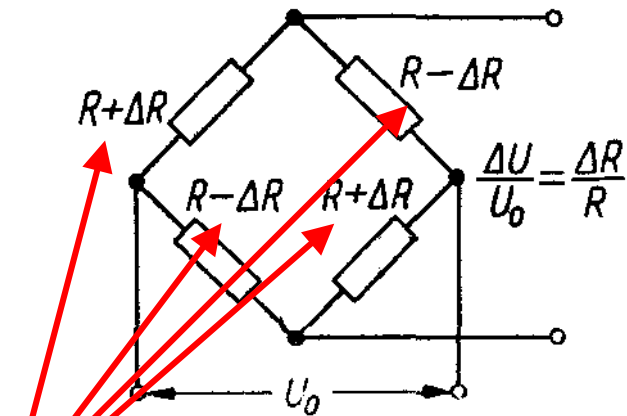
$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}$$



2 tensometry o przeciwnej zmianie w sąsiednich ramionach mostka

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}$$

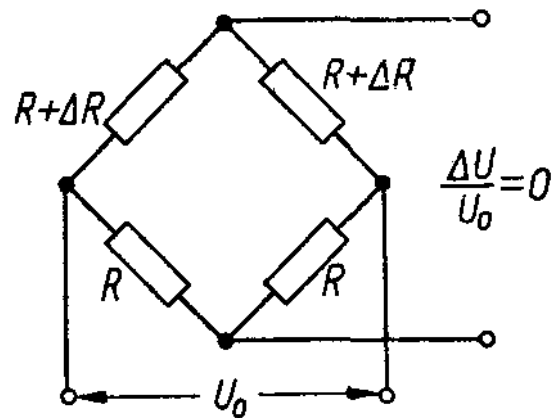
Układy pomiarowe tensometrów – mostek Wheatstone'a



$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{\Delta R}{R}$$

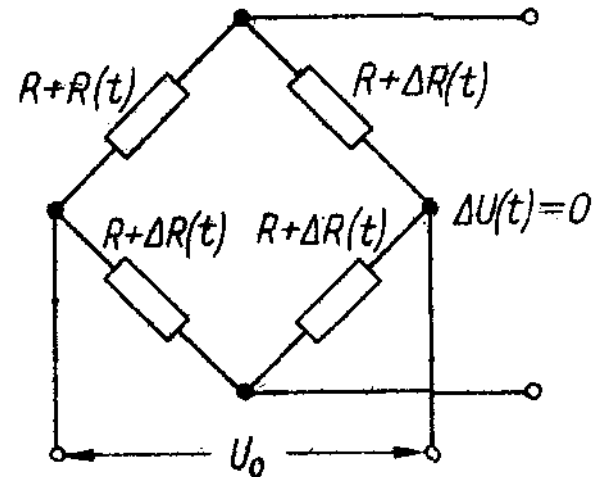
4 tensometry o naprzemiennej zmianie w kolejnych ramionach mostka – najwyższa czułość

Układy pomiarowe tensometrów – mostek Wheatstone'a



2 tensometry o takiej samej zmianie w sąsiednich ramionach mostka – **brak sygnału wyjściowego!**

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx 0$$



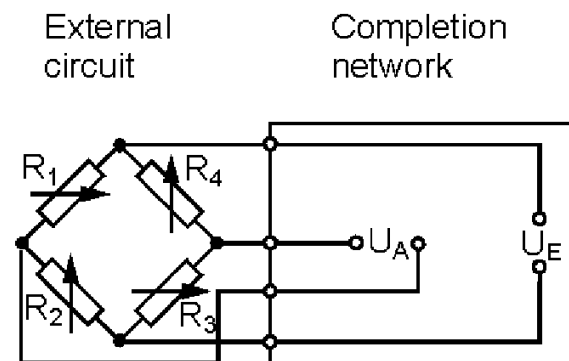
4 tensometry o takich samych zmianach w funkcji temperatury – **kompensacja temperaturowa**

$$\frac{\Delta U(t)}{U_0} \approx 0$$

Układy pomiarowe tensometrów – mostek Wheatstone’a

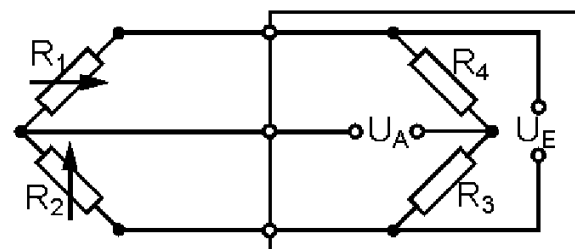
Pełny mostek

a) Full bridge



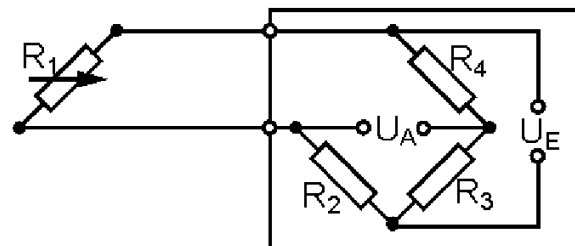
Pół mostek

b) Half bridge

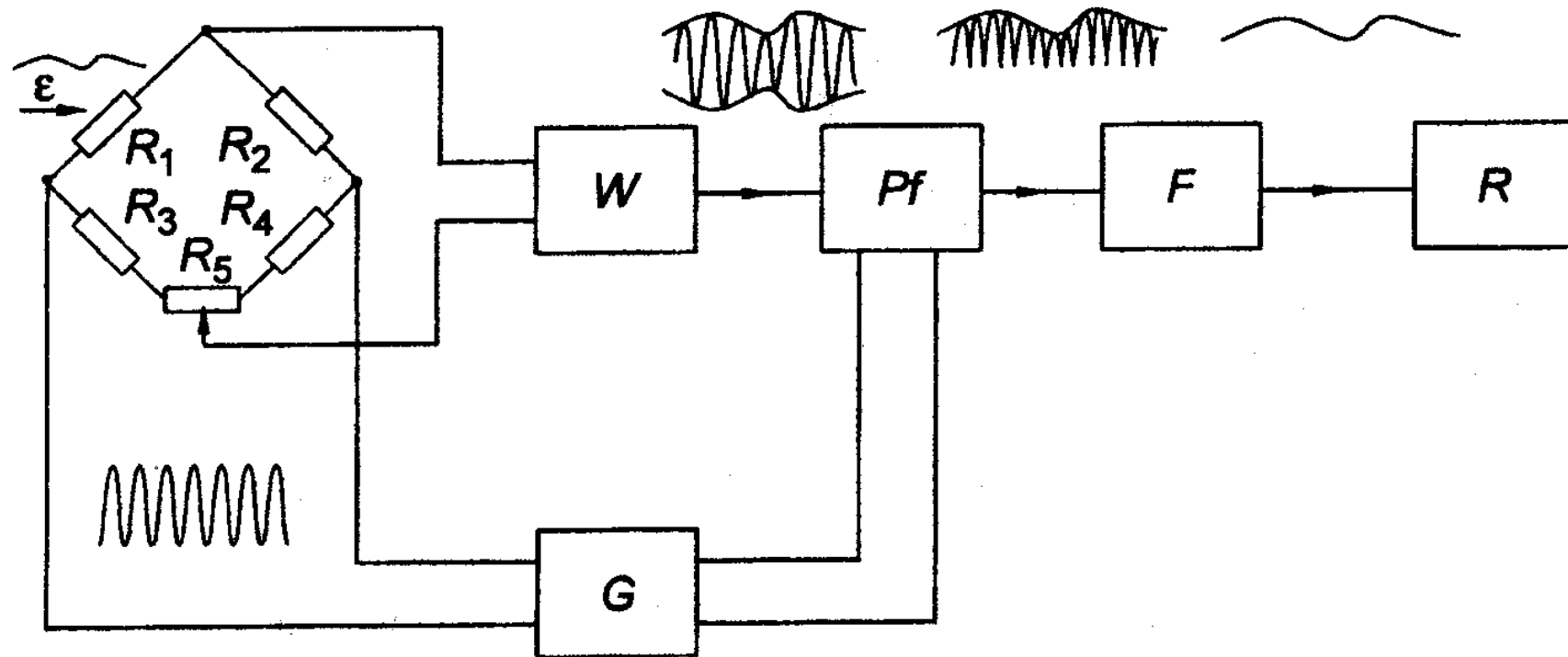


Ćwierć mostek

c) Quarter bridge

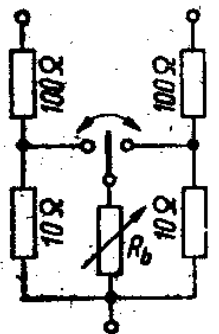


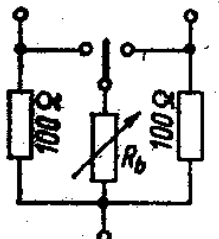
Wzmacniacz tensometryczny z falą nośną



R1-tensometr czynny, R2-tensometr kompensacyjny, R3, R4-rezystory półmostka, R5-potencjometr równoważący mostek, G-generator fali nośnej, W-wzmacniacz selektywny wąskopasmowy, Pf-prostownik fazoczuły, F-filtr dolnoprzepustowy, R-rejestrator lub wskaźnik pomiaru odkształcenia ε

Skalowanie wzmacniaczy tensometrycznych, układ Lasockiego

Schemat																							
	ε_{wej} ‰	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00		
	R_b Ω	9080,0	4535,4	3020,3	2262,7	1808,2	1505,2	1288,7	1126,4	1000,4	899,1	816,4	747,6	689,3	639,4	596,1	558,2	524,7	495,1	468,5	444,5		

	ε_{wej} ‰	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	R_b kΩ	49,9	24,9	16,57	12,4	9,9	8,23	7,04	6,15	5,41	4,9

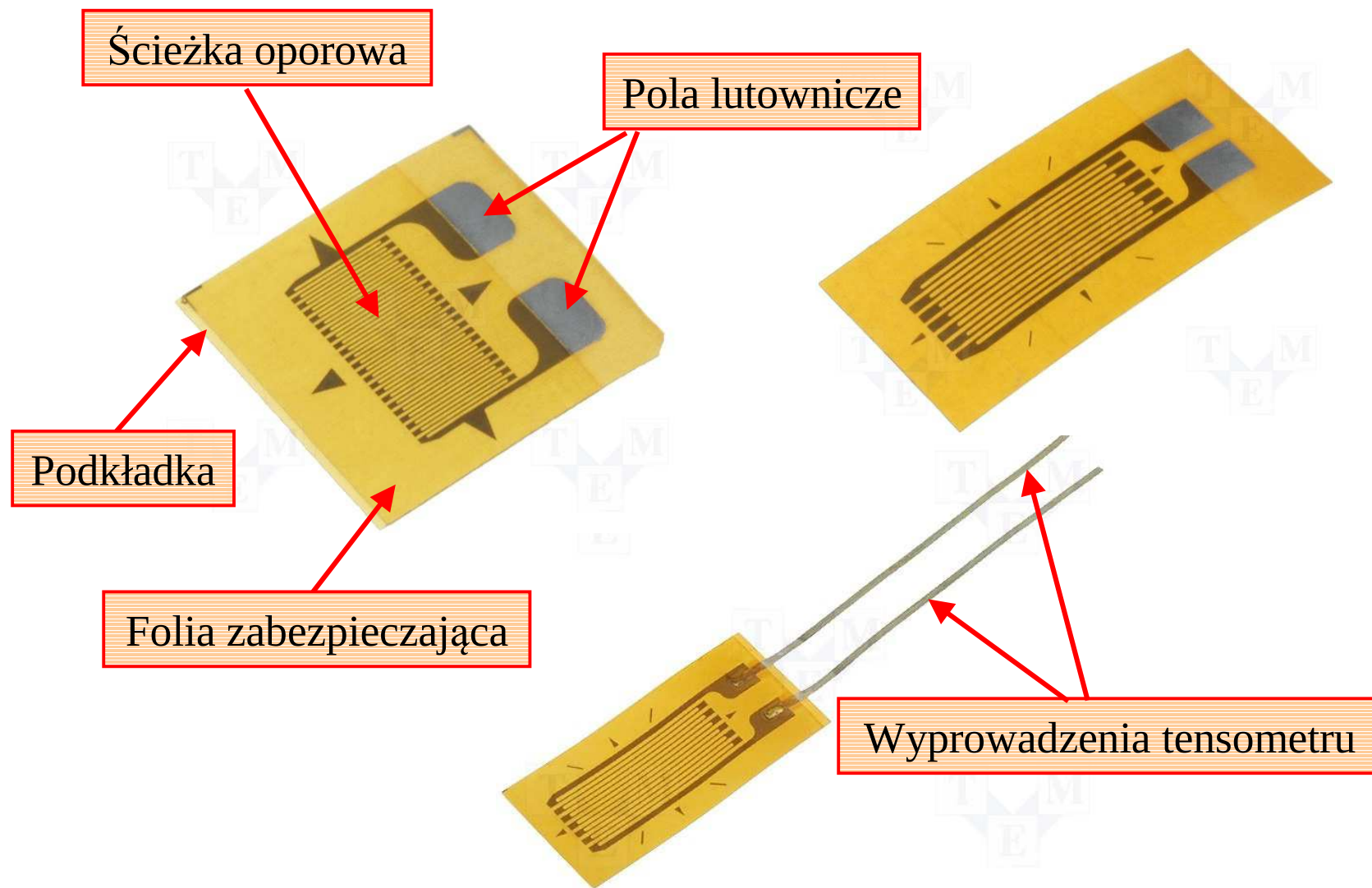
Symulacja odkształceń tensometru w zakresie od 0,05 ‰ do 10 ‰ przy założonej stałej tensometru $k=2$.

Zastosowania tensometrów

Tensometry wykorzystywane są w dwóch zastosowaniach:

- 1.do **pomiaru odkształceń i naprężeń** w elementach konstrukcyjnych maszyn, budowli itp. (mosty, dźwigi, zapory, fundamenty, szkielety budynków, samochody, samoloty i wiele innych),
- 2.do **budowy przetworników** wielkości mechanicznych: siły, masy, przesunięcia, ciśnienia, parametrów drgań itp.

Współczesne tensometry foliowe

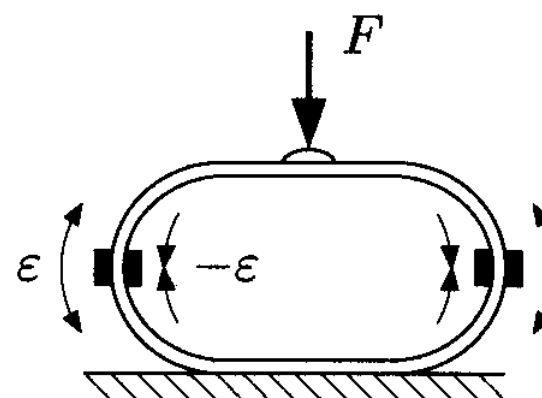
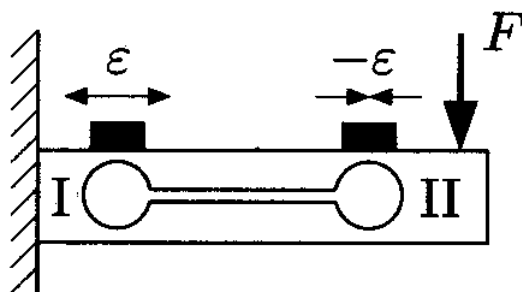
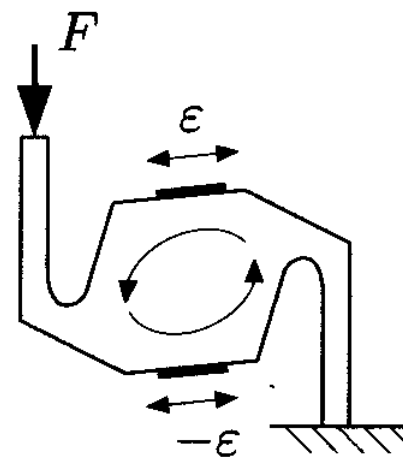
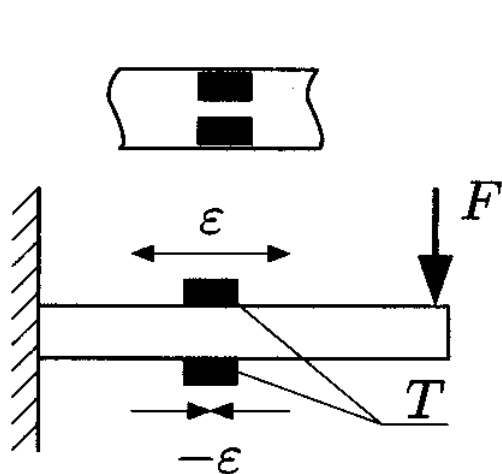


Zastosowania tensometrów



Experimental investigations
on a railway rail

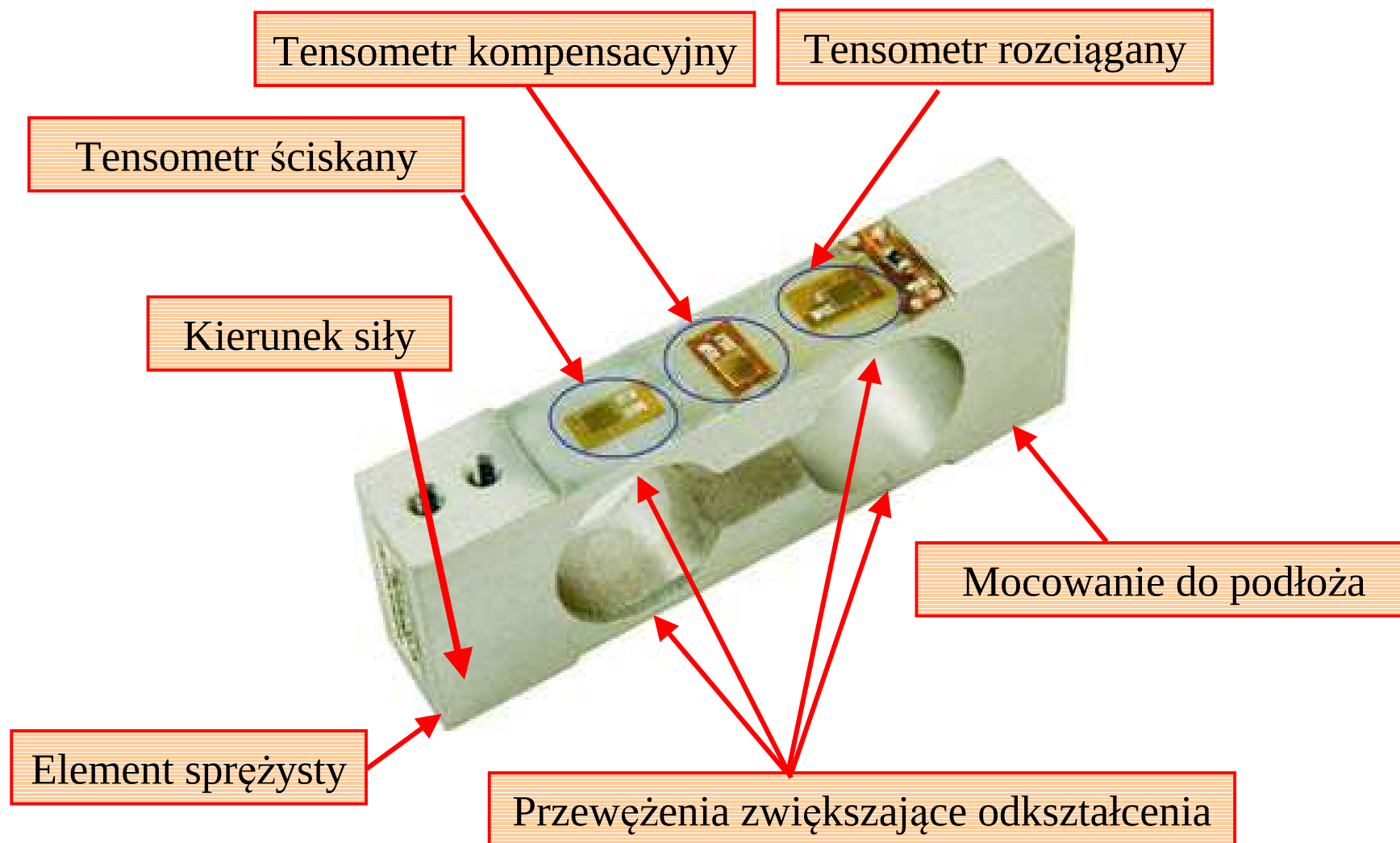
Zastosowanie tensometrów – przetworniki siły



Współczesne przetworniki siły



Budowa tensometrycznego przetwornika siły



LOADCELL TYPE U201 3K to 20K Przykład

● PERFORMANCE

29.42 N	{ 3 kgf }
58.84 N	{ 6 kgf }
98.07 N	{ 10 kgf }
147.1 N	{ 15 kgf }
196.1 N	{ 20 kgf }

: 200 %R.C.

- 200 %D.C.

 $2\text{ mV/V} \pm 0.2\text{ mV/V}$

: 0.015 %R.O.

: 0.015 %R.O.

: 0.02 %R.O.

: U2D1-3K .

U2D1-6K ~ 20K : 0.02 %R.O.

• U2D1-3K • 0.03 2R 0.1/20min

U2D1-6K ~ 20K : 0.02 %R.O.

Recommendations

: 12 V or LESS

20 V

 $\pm 0.1 \text{ mV/V}$
$$= 420 \, \Omega \pm 30 \, \Omega$$
 $350 \Omega \pm 5 \Omega$

- : 2000 MΩ or more

1. 2000 10 10 0

Safe temperature range

: -10 °C to 50 °C

 $\alpha = 0.04\% R_{0.1}/10^3$

e

 $\cdot 0.012\% \text{ OAD}/10\%$

* STATE RECORD/100

● THE OTHERS

• Ø 3.2 mm 4 core shield 30 cm

: Alloy Aluminum

: Approx. 350 p

Input(+): Red
Output(-): Blue
Input(-): White
Output(+): Green
Shield



Size of loading plate
Installation

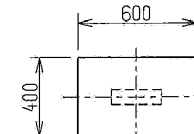
Accuracy

: Max. 400mm × 600mm

- : Be sure to adjust center of loading plate to center of loadcell.

: 0.02%R.O. with 1/2 rated load
applied at 150mm from center.

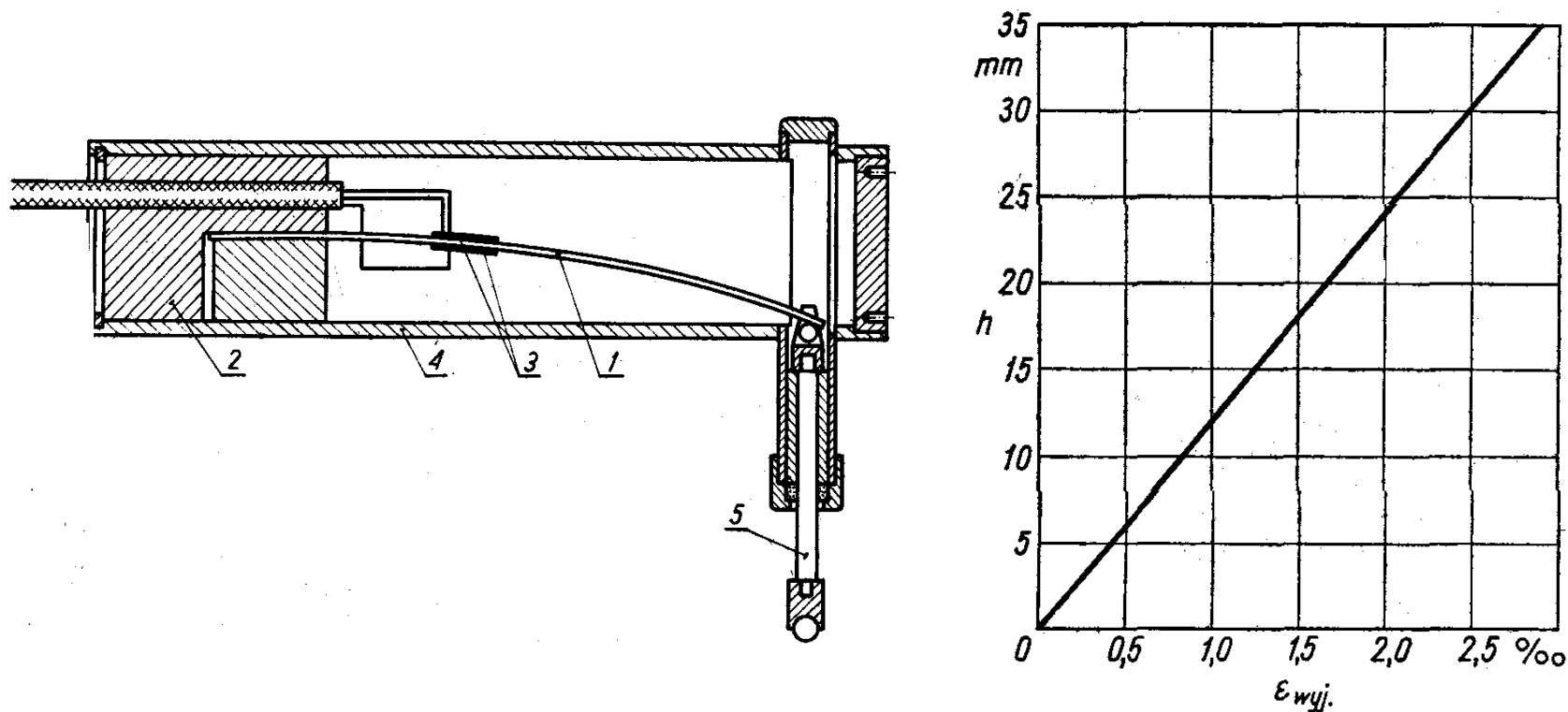
△ MAX. SIZE OF LOADING PLATE



						ミネベバ株式会社 MINEBEA CO.,LTD.			 単位 UNIT mm 尺度 SCALE Free	材質 MATERIAL		作成日 DATE 1983.12.14	
						計測機器事業部				表面粗さ SURF.ROUGH.		品名 DESCRIPTION OUTLINE	
F	2009.1.9	KN09-0005	T.TATSUTA	A.MURO	APPROVED	CHECKED	DRAWN	 一般公差 寸法 L 公差 4<L≤4 ±0.1 4<L≤16 ±0.2 16<L≤63 ±0.3 63<L≤250 ±0.5 250<L≤1000 ±0.8 角度 DEG. ±0.5		熱処理 HEAT TREAT.		品番 PART NO.(MODEL NO.) U2D1-3K TO 20K	
E	2003.5.6	KN03-0228	A.YOSHIDA	A.MURO	Kikuchi	T.Koyama	A.Yoshida			表面処理 FINISH		図番 DRAWING NO. K102903-2	
D	1997/06/02	KN97-0169	HASUIKE	F.IDE								改訂 REVISION	
符号 MARK	日付 DATE	変更事項 REASON / ECR NO.	担当 ENGINEER	承認 APPROVED								F	

MINEBEA Co.Ltd.

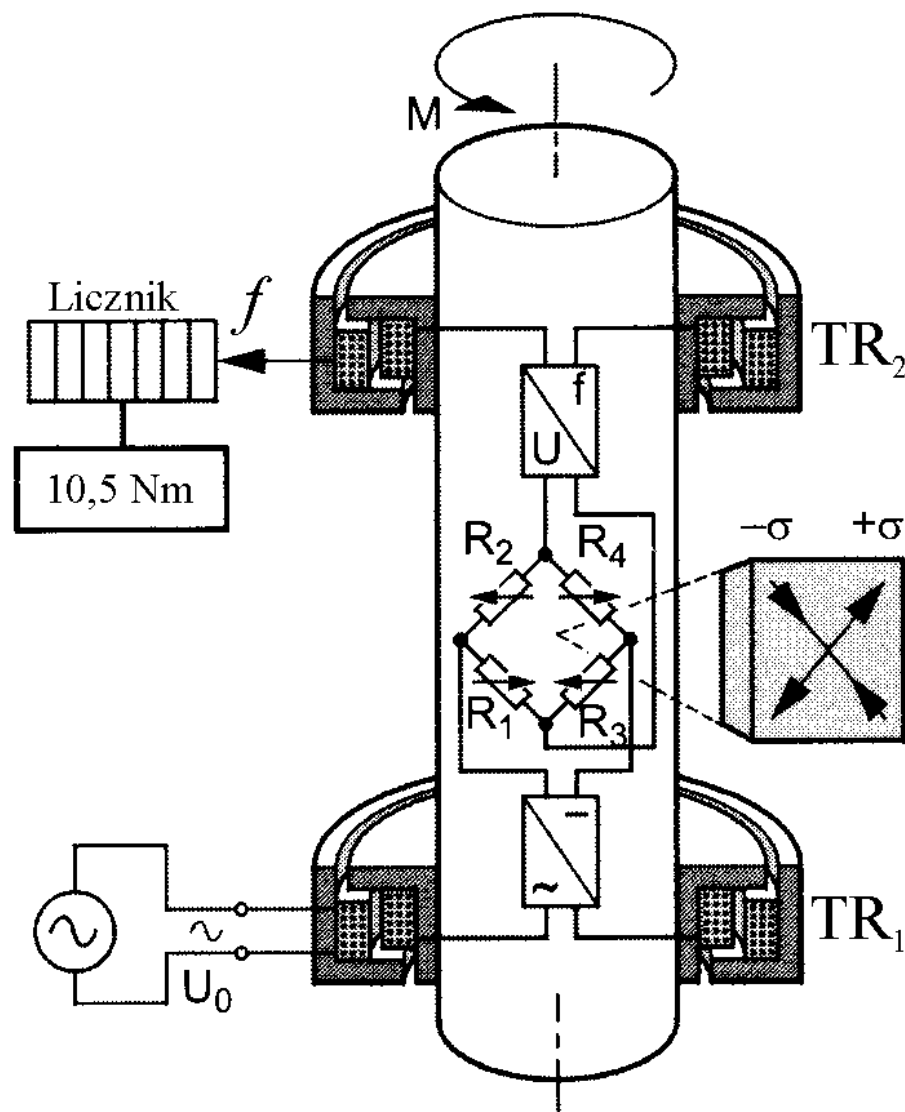
Zastosowanie tensometrów – przetwornik przesunięcia



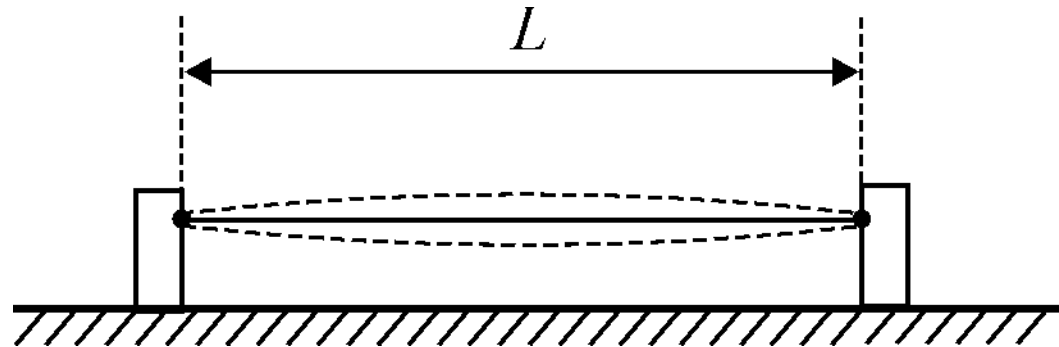
1. Odkształcana belka, 2. mocowanie belki, 3. tensometry, 4. obudowa, 5. popychacz.

Zastosowanie tensometrów – przetwornik momentu

U_0 -napięcie zasilające,
 f -sygnał wyjściowy
częstotliwościowy,
 $R_1..R_4$ -tensometry,
 M -moment obrotowy



Tensometry strunowe, zasada działania

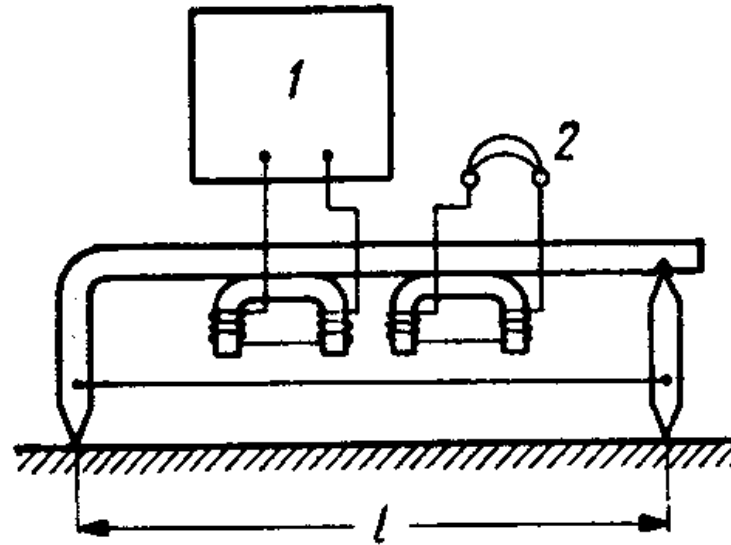


Częstotliwość f drgań struny o długości L i gęstości ρ w funkcji naprężenia σ :

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}$$



Tensometr strunowy, układ pomiarowy



Przykładowy układ pomiarowy tensometru strunowego: przestrajany generator 1 dostraja się do rezonansu struny według wskaźnika rezonansu 2 (woltomierz, słuchawki).

Tensometry strunowe, zastosowania

Zastosowania tensometrów strunowych:

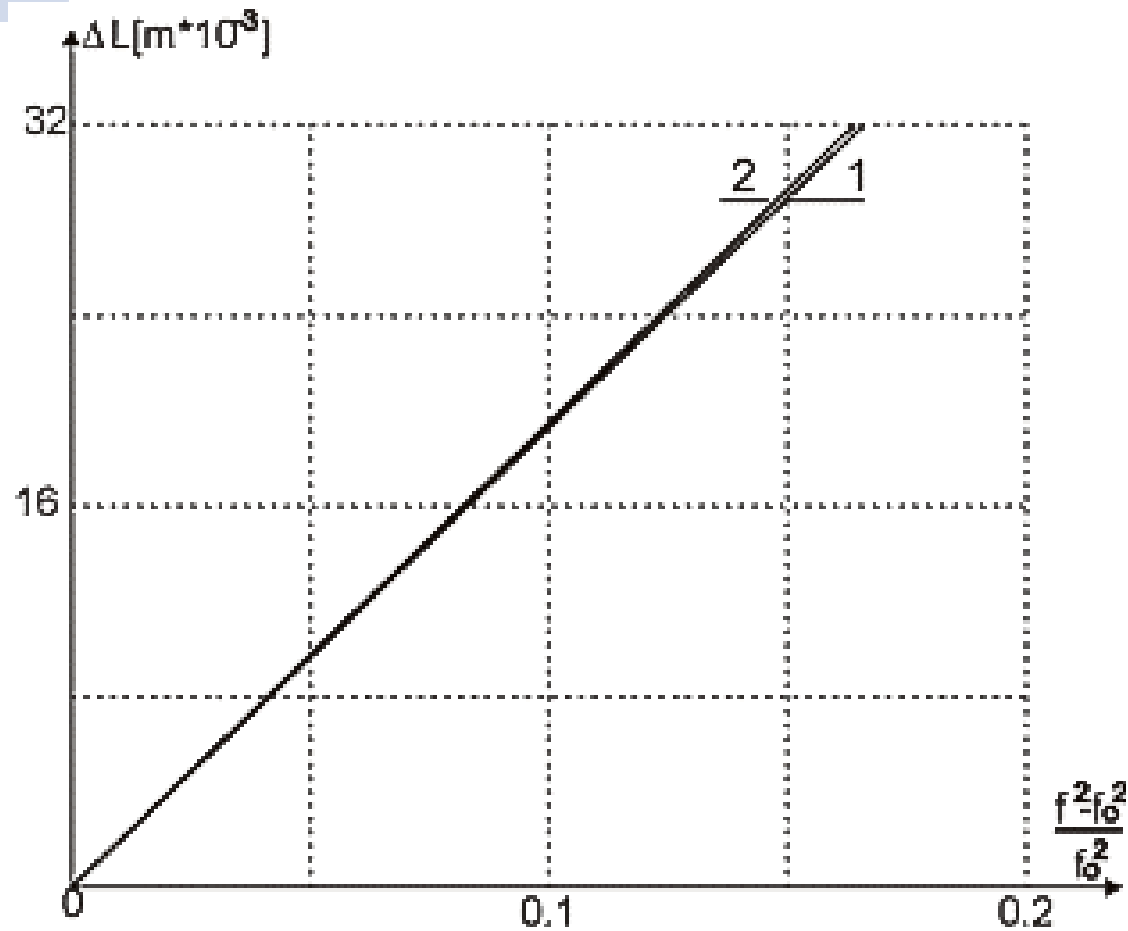
- Kontrola i pomiary przemieszczeń gruntu i skał,
- Kontrola i pomiary odkształceń w dużych budowlach: zapory wodne, fundamenty budynków, mosty,
- Wszelkie pomiary dużych odkształceń przy bardzo dużej bazie pomiarowego, do kilku metrów.

Tensometr strunowy IMG PAN

Tensometr strunowy TTCS 4000.3 jest urządzeniem do wieloletnich pomiarów składowej poziomej przemieszczenia i temperatury gruntu i skał. Głowica pomiarowa tensometru połączona jest z regulatorem zakresu cięgnem, prawidłowy kontakt głowicy i regulatora z gruntem lub skałą zapewniają odpowiednie kotwie. W przypadku instalacji w gruncie, tensometr umieszczany jest w wykopach poniżej strefy przemarzania i dobowych wahań temperatury. Ciężko zabezpieczone jest niewzględnionym na fotografii układem teleskopowo połączonych rur. Wysoką stabilność czasową parametrów metrologicznych tensometru ilustruje wykres, na którym charakterystyka 1 została zdjęta przed instalacją, natomiast charakterystyka 2 po 14-letnim okresie pozostawania w gruncie.



Tensometr strunowy IMG PAN, stabilność



Zależność między częstotliwością drgań struny i zmianami odległości pomiędzy kotwiami przetwornika TTCS 4000.3 przed instalacją (1) i po 14 latach pozostawania w gruncie (2).

Dane techniczne tensometru strunowego **TTCS 4000.3**:

baza pomiarowa tensometru: 2 - 4 m

zakres pomiarowy: 30 mm

rozszerzony zakres pomiarowy: 150 mm

dokładność pomiaru: $< 1 \%$

rozdzielczość pomiaru: 5 mm

wymiary kotwi: 300 x 300 mm

maksymalne i minimalne napięcie cięgna: 50 -70 N

nacisk kotwi na grunt: < 1 kPa

zakres pomiaru temperatury: -10 - 30 st. C

dokładność pomiaru temperatury: ± 0.03 st. C

zakres częstotliwości drgań strun pomiarowych: 672 - 821 Hz

Podsumowanie

1. Odkształcenia sprężyste ciał stałych podlegają prawu Hooke'a
2. Zmiany geometryczne przewodnika pod wpływem naprężenia powodują zmianę jego rezystancji, jest to efekt tensometryczny.
3. W półprzewodnikach występuje efekt piezorezystywny, znacznie silniejszy od efektu tensometrycznego.
4. Zmiany rezystancji tensometrów są bardzo małe, dlatego praktycznie pracują one w mostkach niezrównoważonych.
5. Tensometry są wykorzystywane do budowy czujników siły, ciśnienia, przesunięcia.
6. Do specyficznych zastosowań wykorzystywane są tensometry strunowe.

Podsumowanie

