



Politechnika Wrocławska

Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych

Dr inż. Grzegorz Kosobudzki

Konsultacje:

Budynek A5, pokój 311

grzegorz.kosobudzki@pwr.edu.pl ; tel. 71 320 26 33



Kolokwium i Konsultacje

- Termin 1:
- Termin poprawkowy:

Konsultacje:

Sala 310 lub 311 budynek A5

Program przedmiotu

- Przetwarzanie wielkości niewielkiej elektrycznej na sygnał elektryczny - zagadnienia ogólne
- Pomiary temperatury, skale temperatur, termometry rezystancyjne, termoelektryczne, pirometry
- Metody pomiaru temperatury ciał stałych, gazu i cieczy
- Przeworniki tensometryczne, pomiar momentu skręcającego, pomiar sił
- Pomiar natężenia przepływu gazów i cieczy

Program przedmiotu

- Pomiary ciśnień
- Pomiary wilgotności
- Pomiary przesunięcia liniowego i kątowego
- Pomiary drgań. Przetworniki przyśpieszenia.
- Pomiar PH i konduktometria. Pomiary składu chemicznego

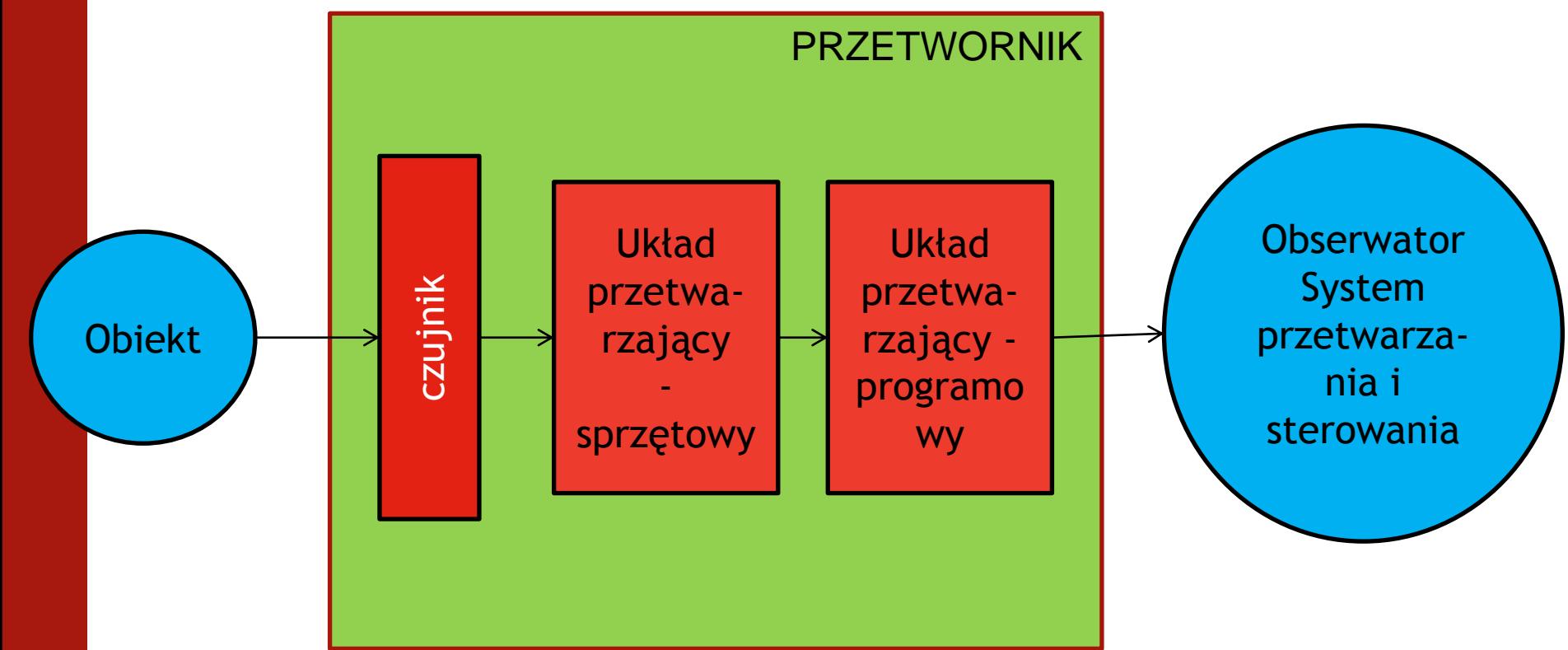
Literatura podstawowa

- Miłek M., Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych, Uniwersytet Zielonogórski 2006.
- Janiczek R., Elektryczne miernictwo przemysłowe, Wydawnictwo politechniki częstochowskiej 2006.
- Rząsa M., Kiczma B., Elektryczne i elektroniczne czujniki temperatury, WKŁ Warszawa 2005.
- Romer R., Miernictwo przemysłowe, PWN, Warszawa, 1970

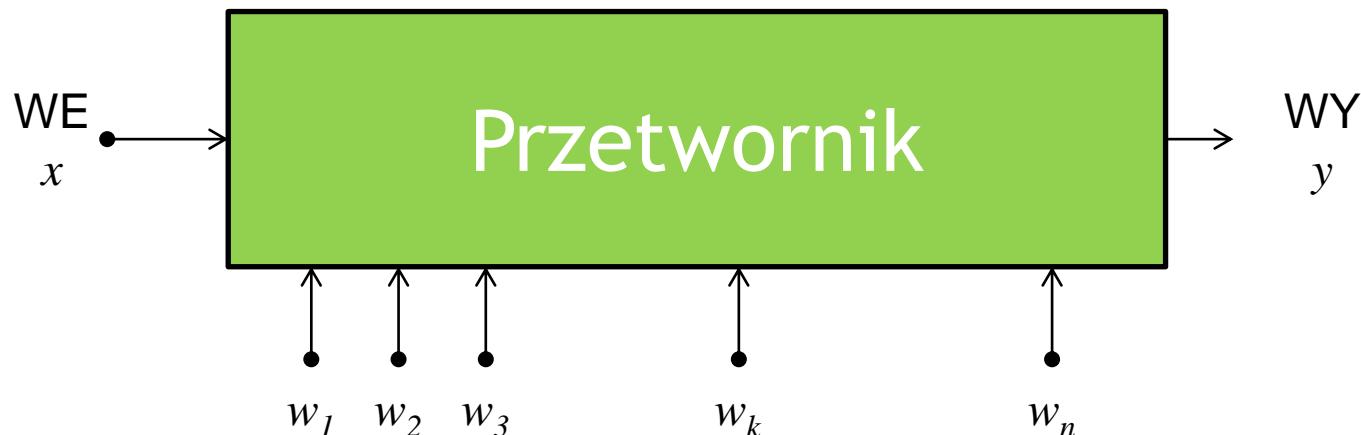
Literatura uzupełniająca

- Stryburski W. Przetworniki tensometryczne - konstrukcja, projektowanie, użytkowanie, WNT, Warszawa 1971.
- J.G. Webster, R. Pallaá S-Areny: Sensors And Signal Conditioning John Wiley & Sons 2001
- Nikolay V. Kirianaki and Sergey Y. Yurishdata Acquisition And Signal Processing For Smart Sensors- John Wiley & Sons 2002
- Editors: Erika Kress-Rogers and Christopher J. B. Brimelow - Instrumentation and sensors for the food industry, second edition, CRC Press 2001

Tor pomiarowy o strukturze łańcuchowej



Czujnik (przetwornik, system pomiarowy) - czułość, wrażliwość



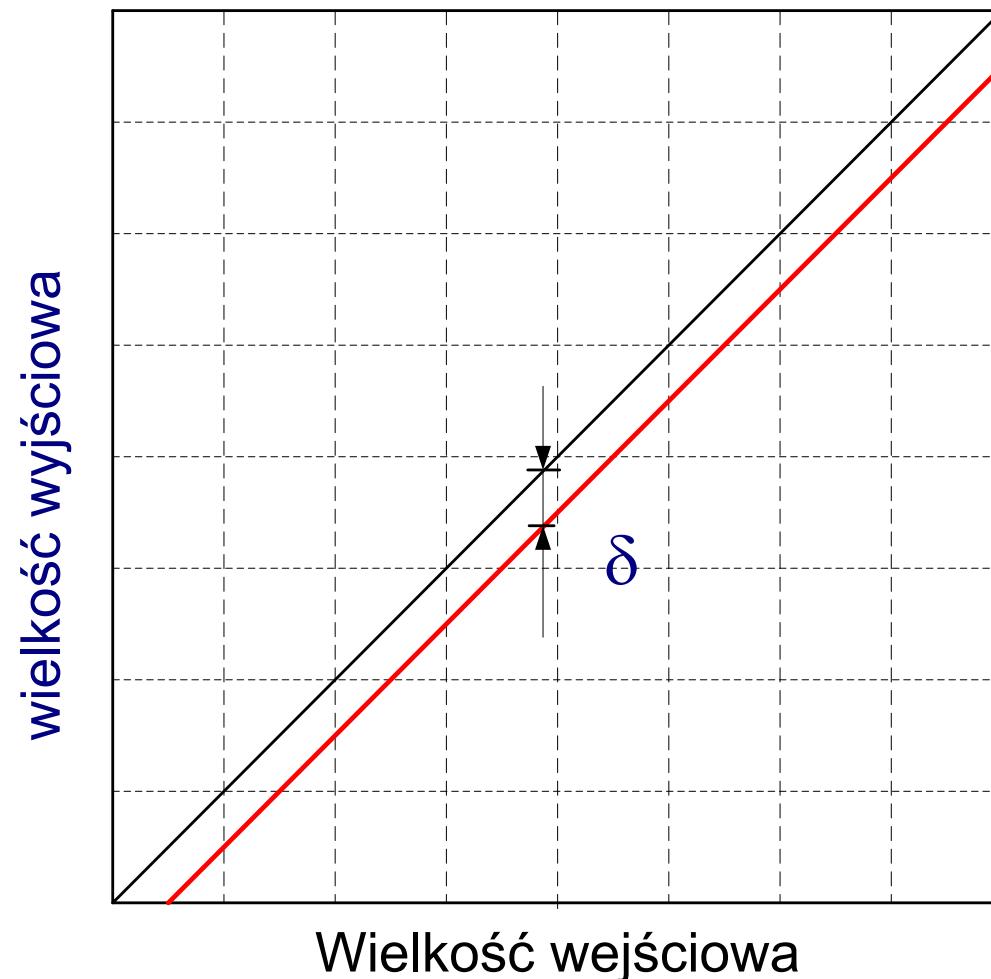
$$y = f(x, w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)$$

$$dy = \frac{dy}{dx} dx + \frac{dy}{dw_1} dw_1 + \frac{dy}{dw_2} dw_2 + \dots + \frac{dy}{dw_k} dw_k + \dots + \frac{dy}{dw_n} dw_n$$

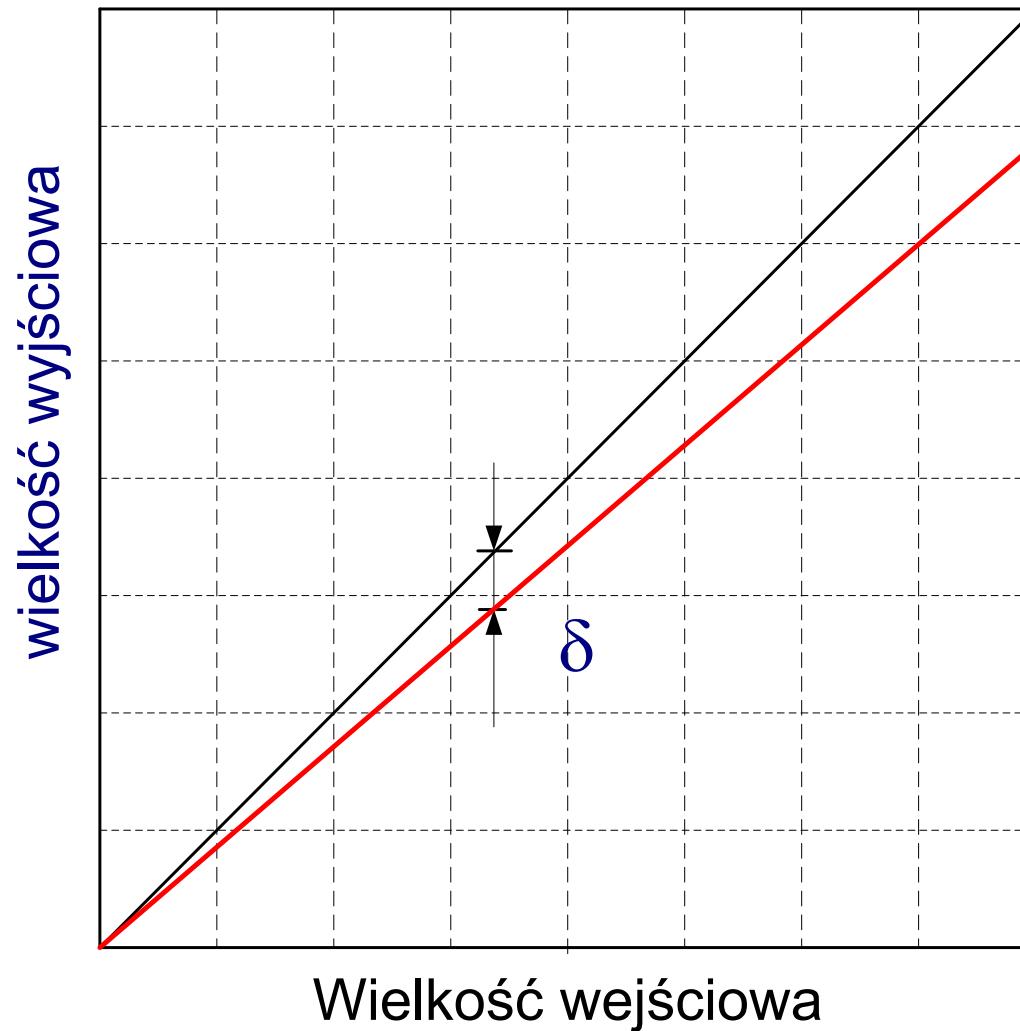
$\frac{dy}{dx}$ - Czułość

$\frac{dy}{dw_x}$ Wrażliwość k-tą wielkości

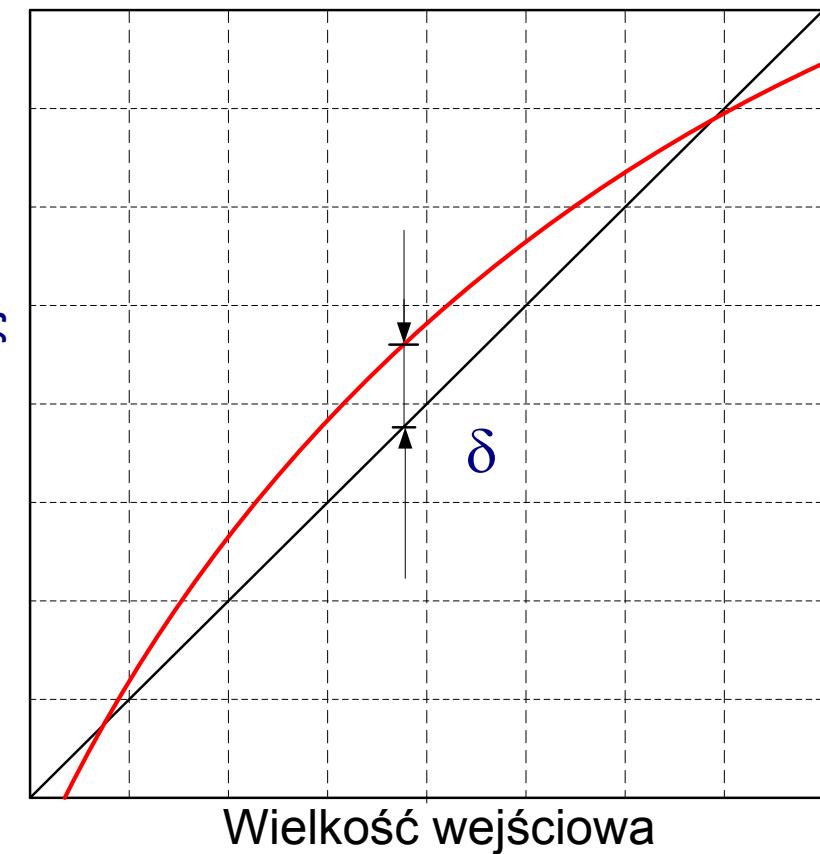
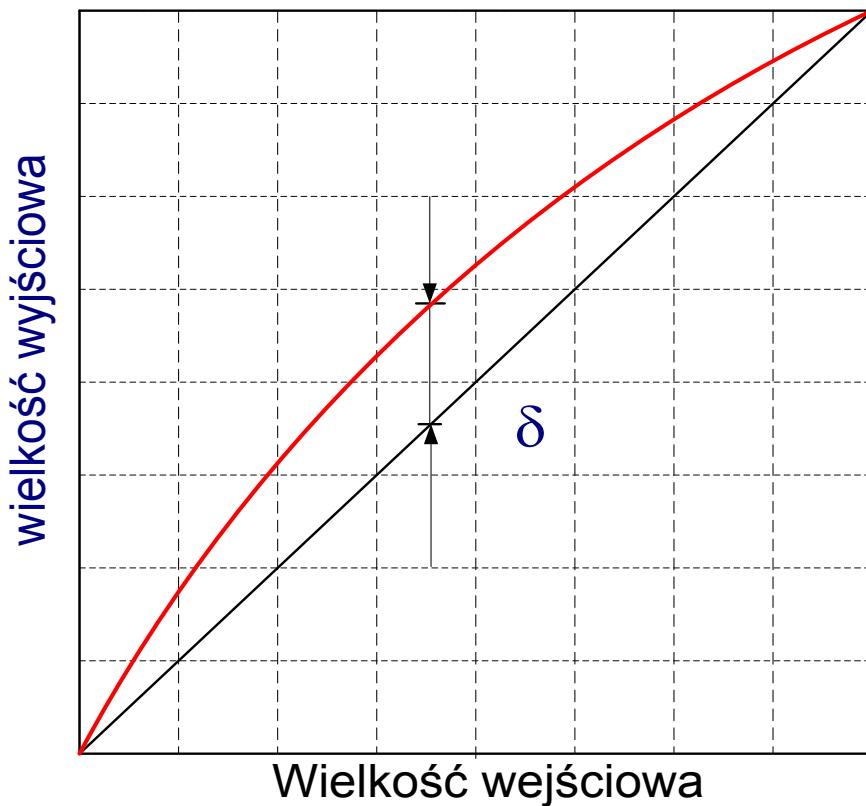
Charakterystyki statyczne - przesunięcie (błąd addytywny - offset error)



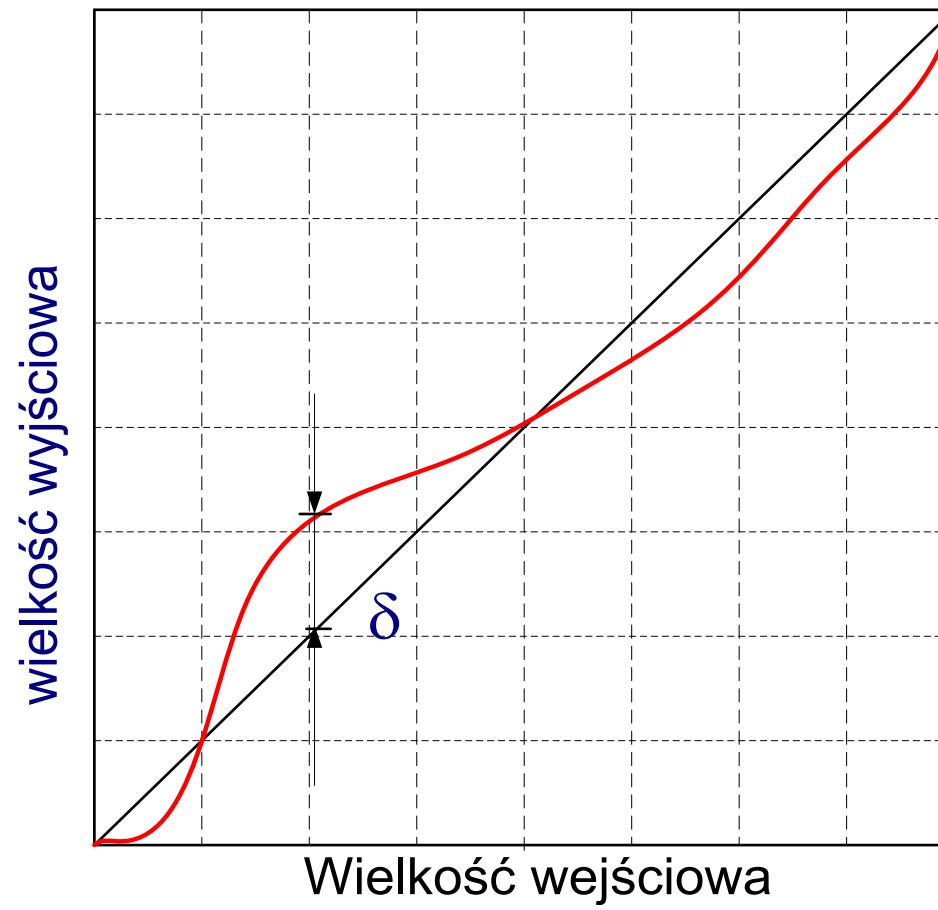
Charakterystyki statyczne - błąd wzmacnienia (błąd mnożnikowy) - gain error



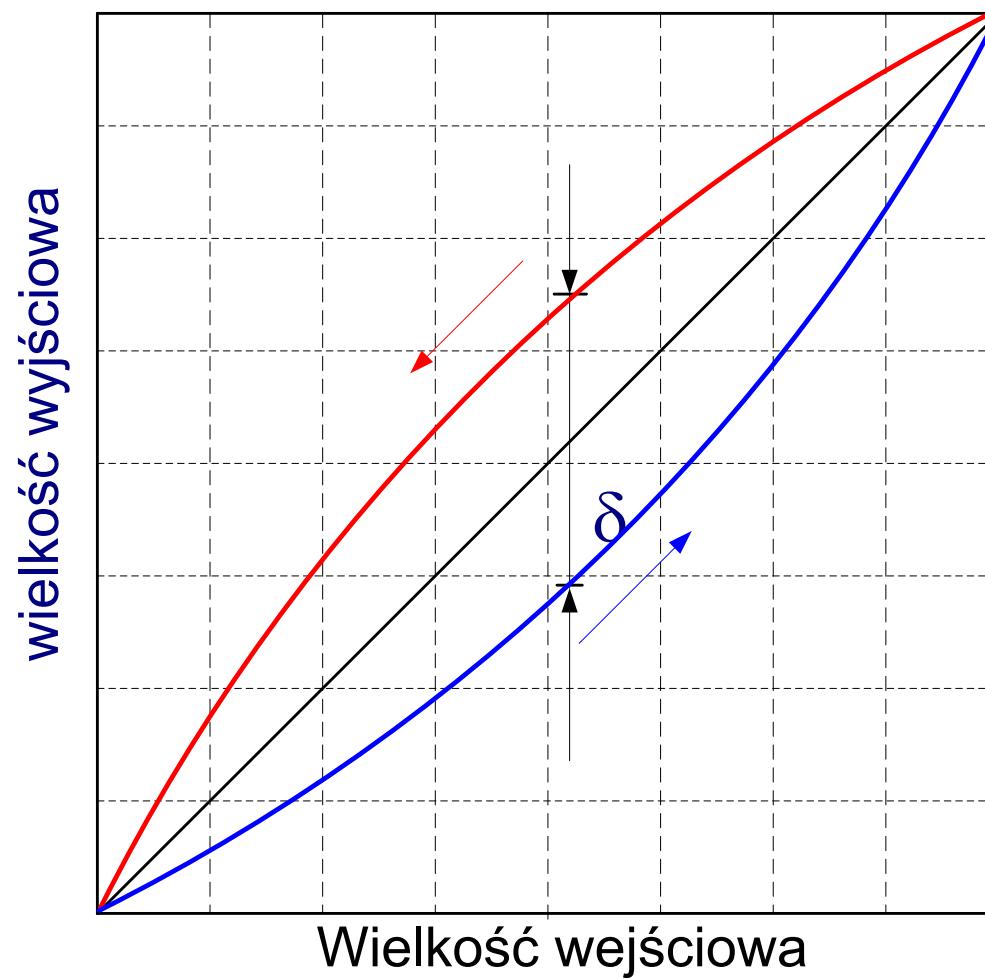
Rzeczywiste charakterystyki statyczne - liniowość



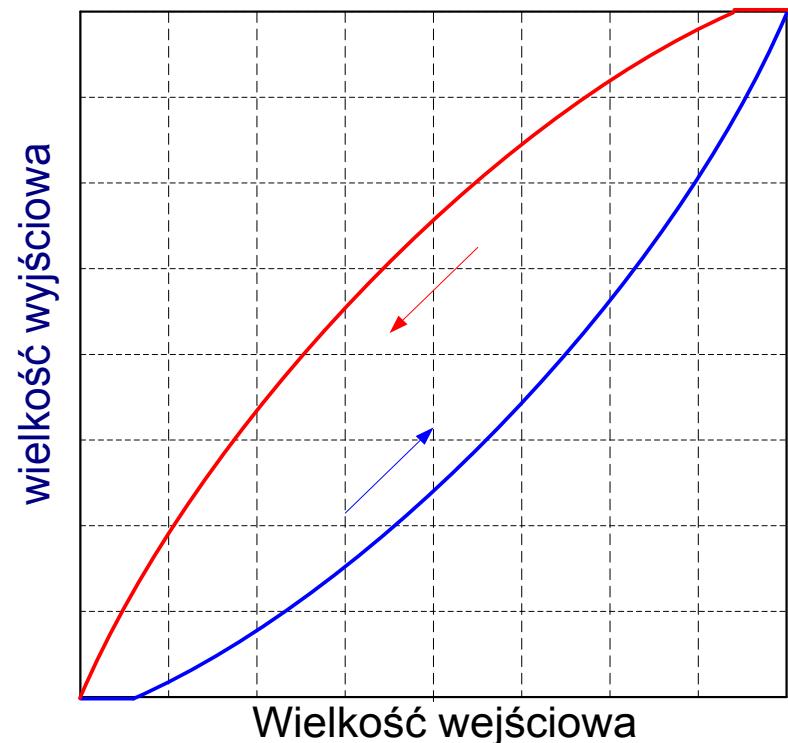
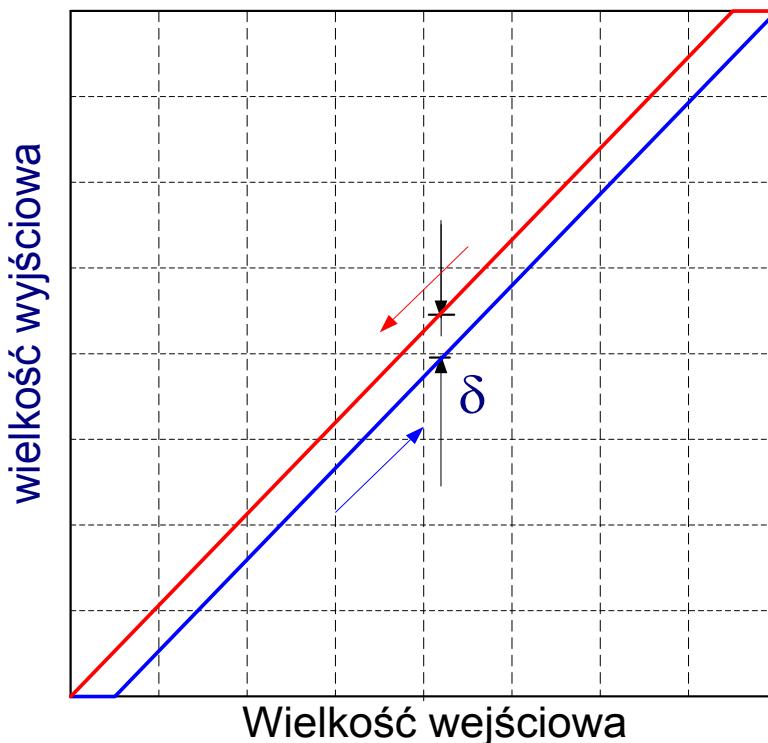
Rzeczywiste charakterystyki statyczne -2



Rzeczywiste charakterystyki statyczne - histereza



Rzeczywiste charakterystyki statyczne - obszar martwy



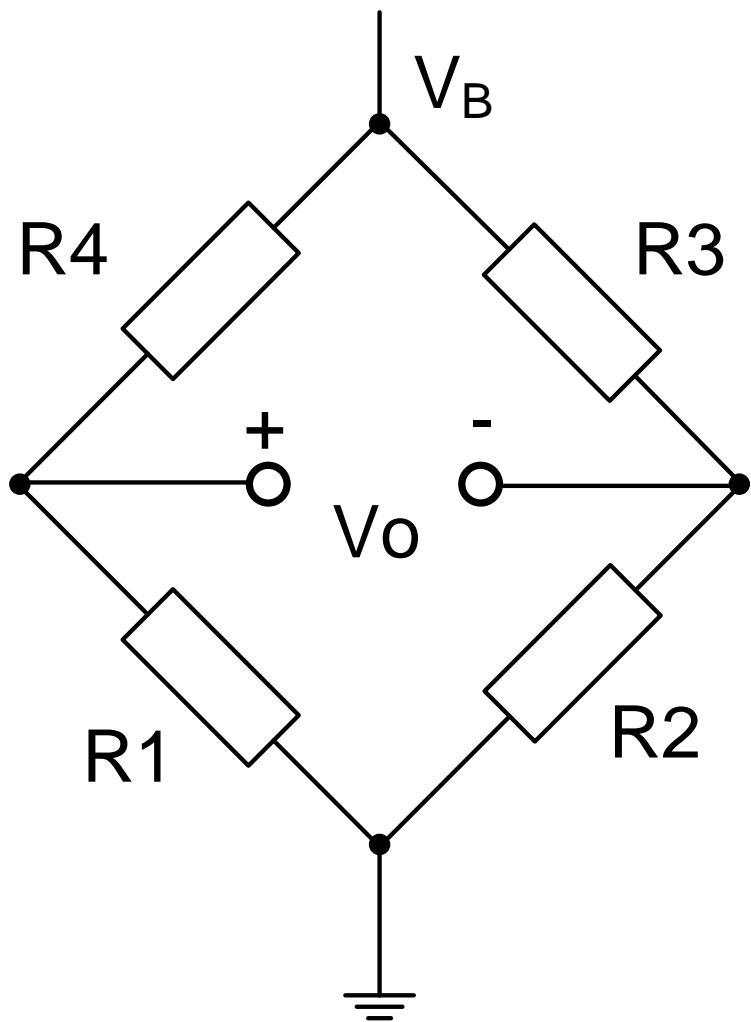
Przykład – luz mechaniczny

Zastosowanie układów mostków rezystancyjnych w kondycjonowaniu sygnałów z czujników

Rezystancja typowych czujników rezystancyjnych

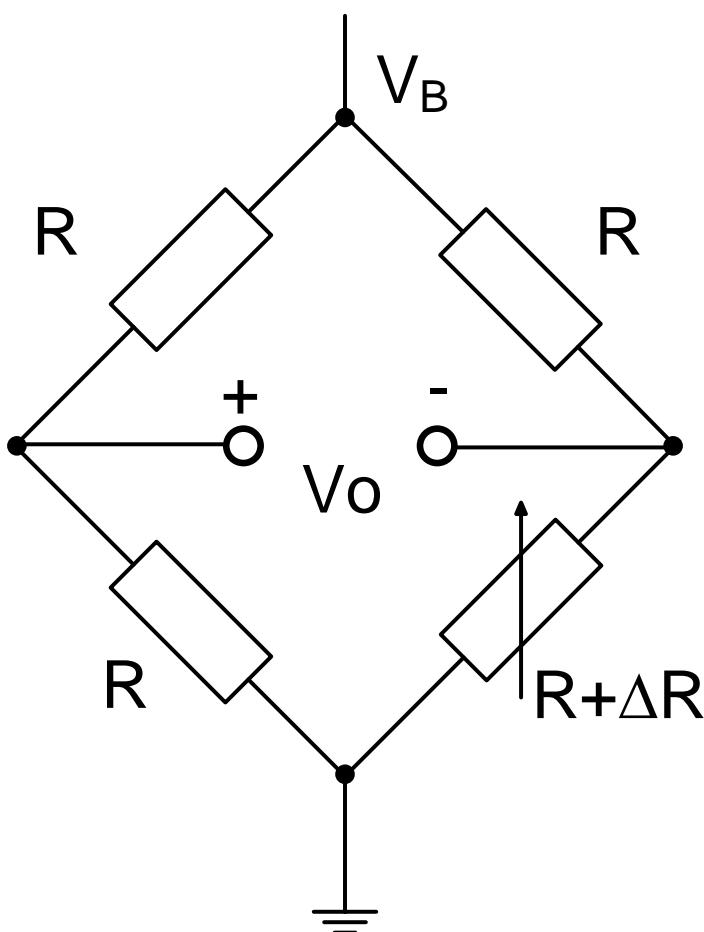
- Tensometr: $120\ \Omega$ - 3500Ω
- Czujniki wilgotności względnej $100k\Omega$ - $10M\Omega$
- Termorezytory (RTD np. Pt, Cu, Ni): 100Ω , 500Ω 1000Ω
- Termistory 100Ω - $10M\Omega$

Mostek Wheatstona



$$\begin{aligned} V_O &= \frac{R1}{R1+R4} V_B - \frac{R2}{R3+R4} V_B = \\ &= \frac{\frac{R1}{R4} - \frac{R2}{R3}}{\left(1 + \frac{R1}{R4}\right)\left(1 + \frac{R2}{R3}\right)} V_B \end{aligned}$$

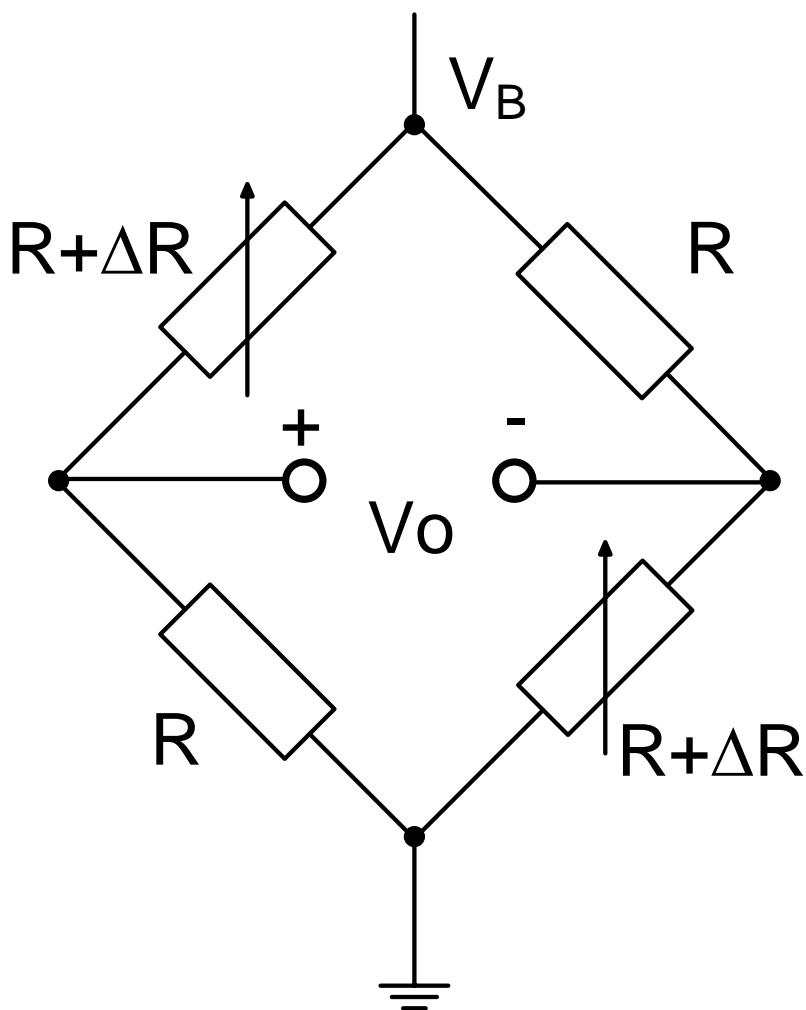
Napięcie na wyjściu mostka zasilanego napięciem stałym - 1 czujnik



$$V_O = \frac{V_B}{4} \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right)$$

Błąd liniowości: 0,5% / %

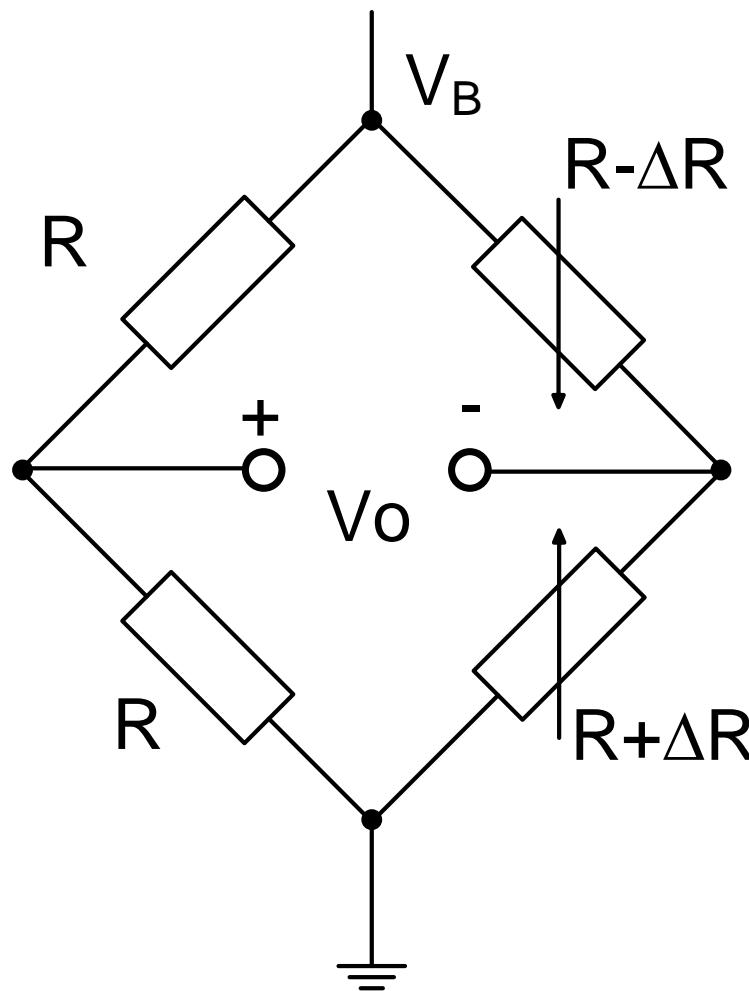
Napięcie na wyjściu mostka zasilanego napięciem stałym - 2 czujniki



$$V_O = \frac{V_B}{2} \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right)$$

Błąd liniowości: 0,5% / %

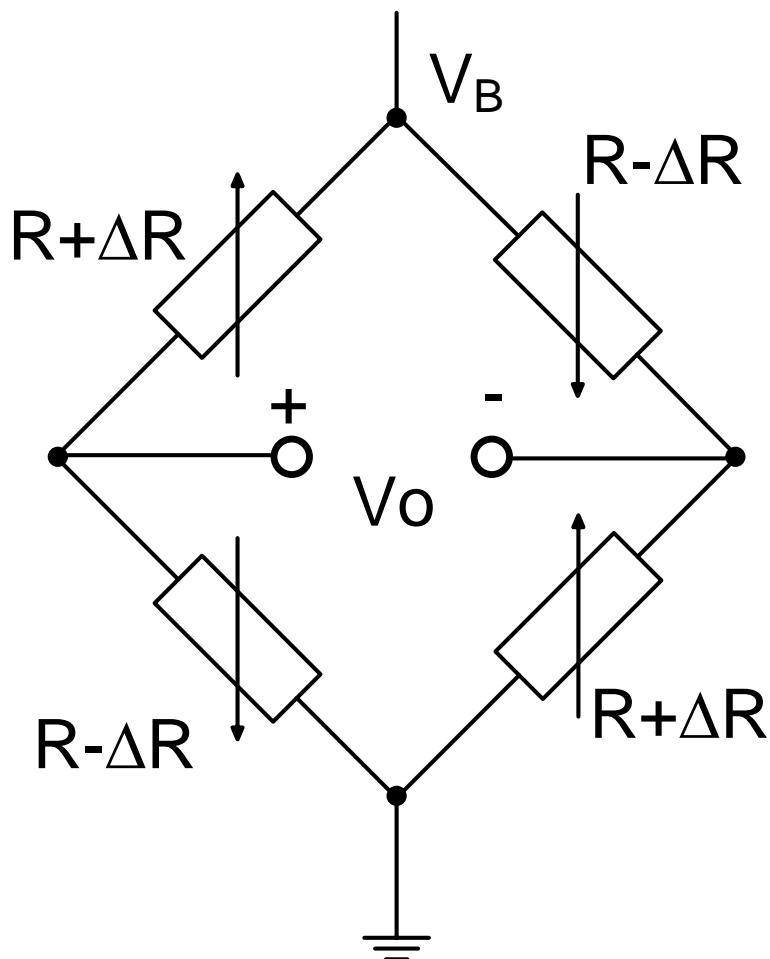
Napięcie na wyjściu mostka zasilanego napięciem stałym - 2 czujniki



$$V_O = \frac{V_B}{2} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)$$

Błąd liniowości: 0 % / %

Napięcie na wyjściu mostka zasilanego napięciem stałym - 4 czujniki



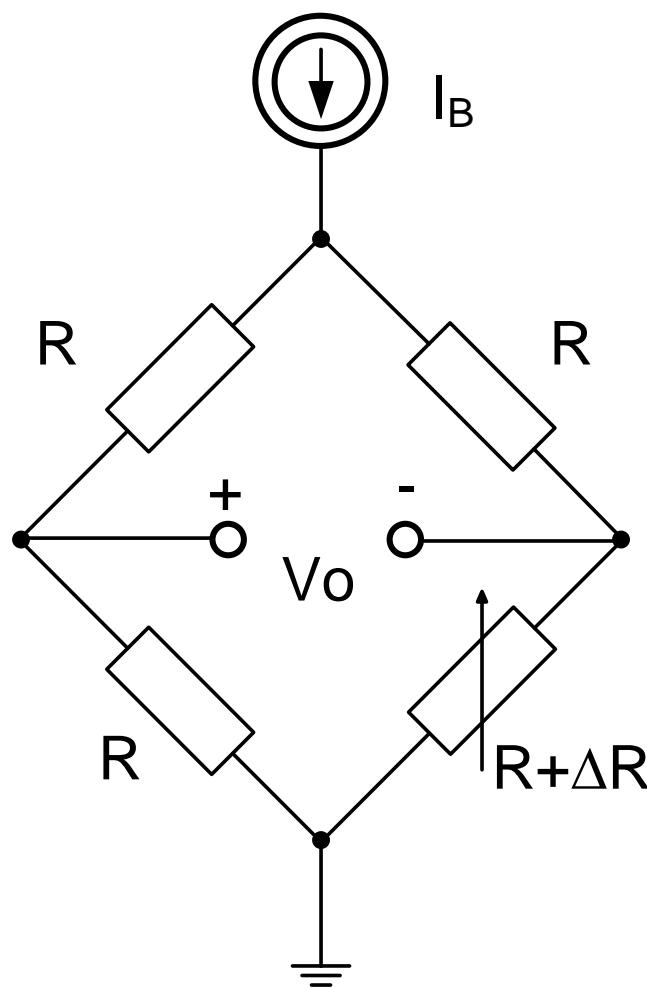
$$V_O = V_B \left(\frac{\Delta R}{R} \right)$$

Błąd liniowości: 0 % / %

Napięcie na wyjściu mostka zasilanego napięciem stałym - porównanie

Rysunki mathcad

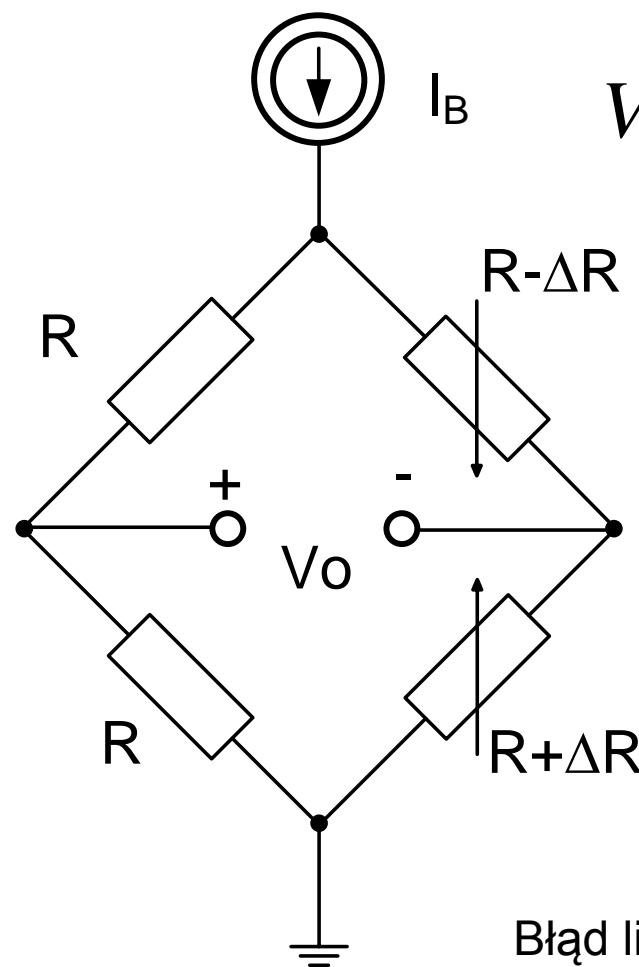
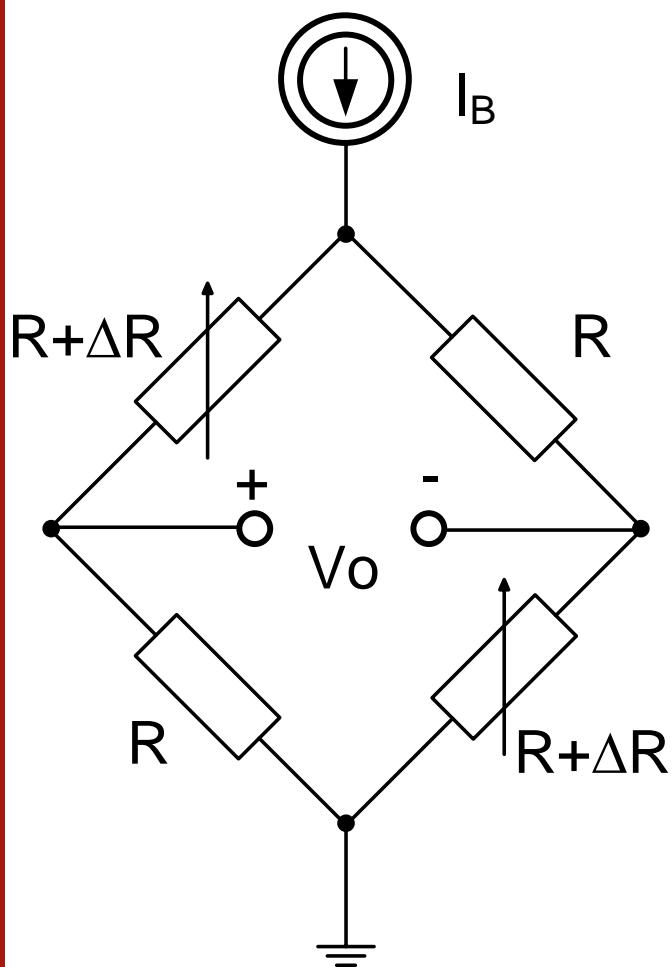
Napięcie na wyjściu mostka zasilanego prądem stałym - 1 czujnik



$$V_O = \frac{RI_B}{4} \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{4}} \right)$$

Błąd liniowości: 0,25% / %

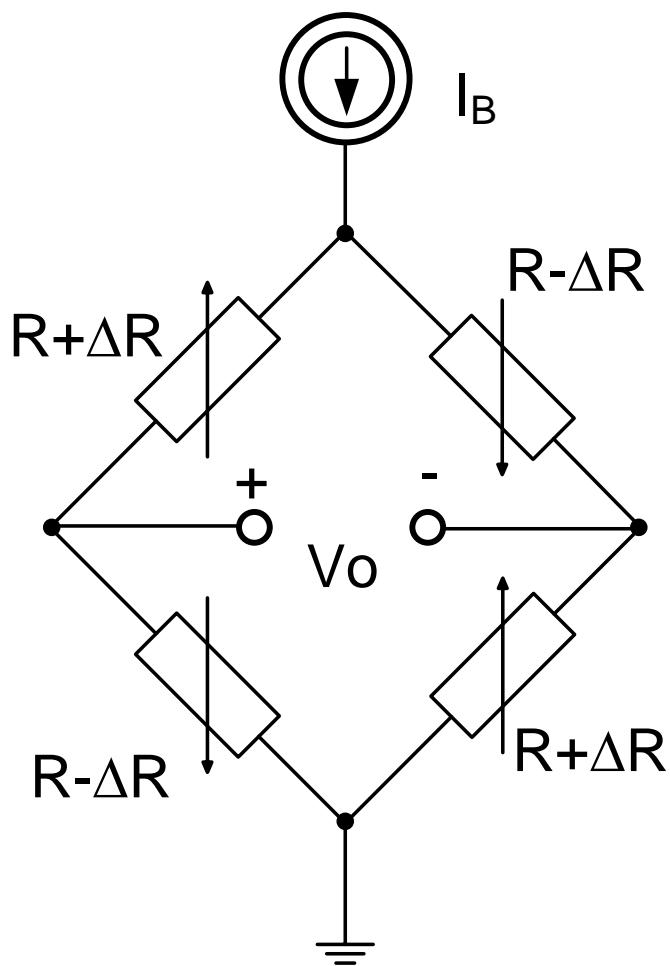
Napięcie na wyjściu mostka zasilanego prądem stałym - 2 czujniki



$$V_O = \frac{I_B}{2} (\Delta R)$$

Błąd liniowości: 0 % / %

Napięcie na wyjściu mostka zasilanego prądem stałym - 4 czujniki



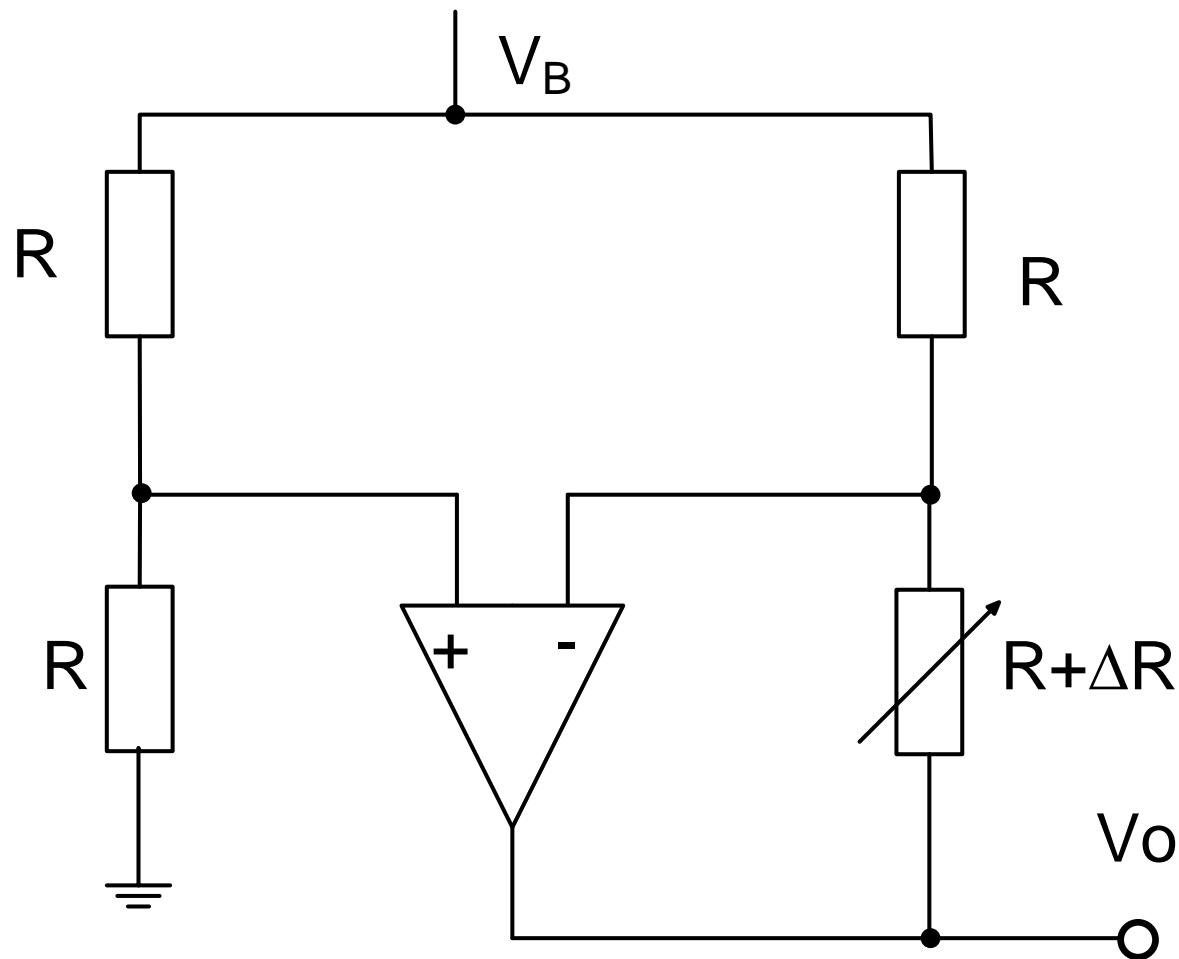
$$V_O = I_B(\Delta R)$$

Błąd liniowości: 0 % / %

Napięcie na wyjściu mostka zasilanego prądem stałym - porównanie

Rysunki mathcad
Plik mostek.mcd

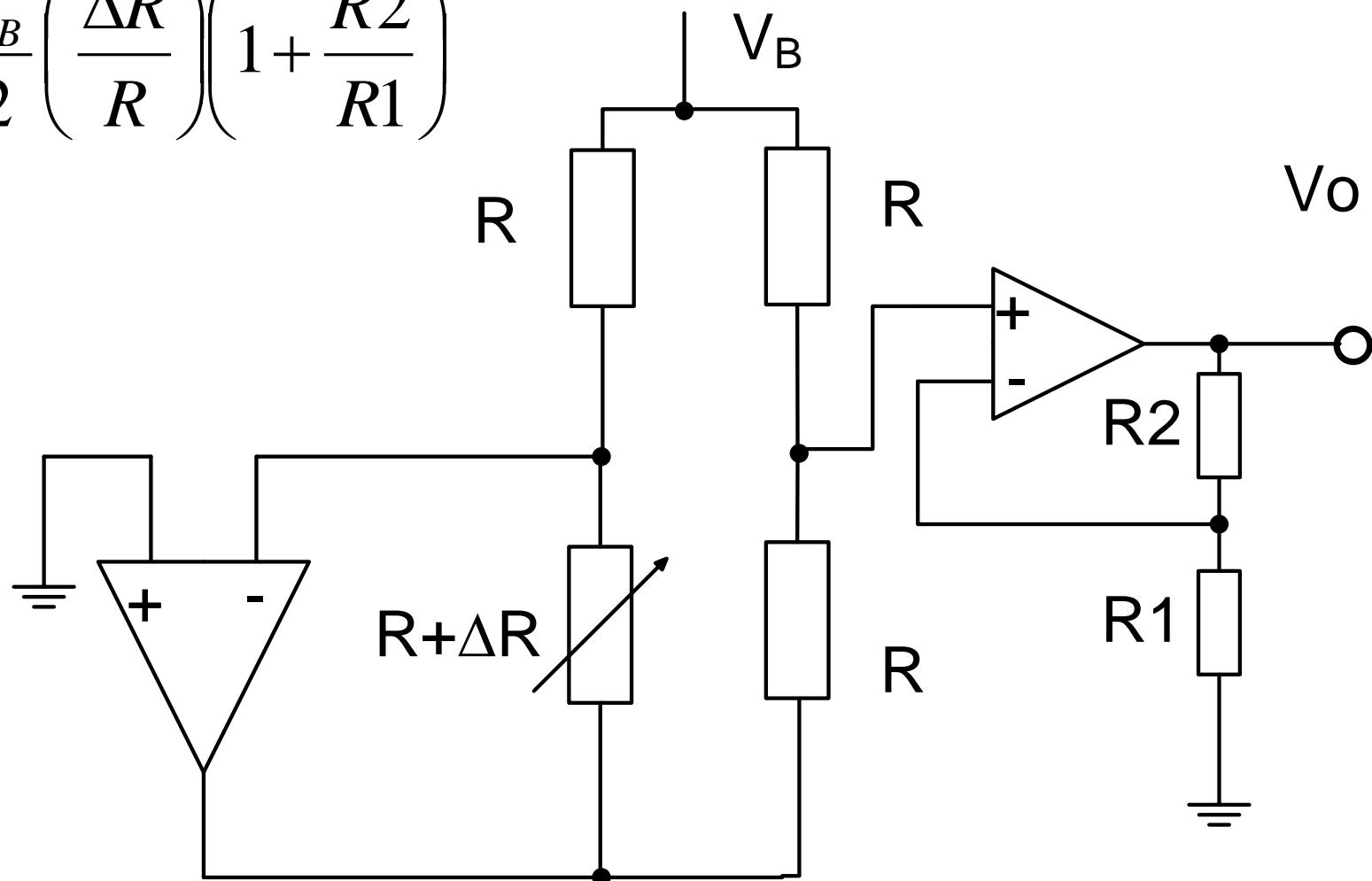
Linearyzacja mostka z 1 czujnikiem



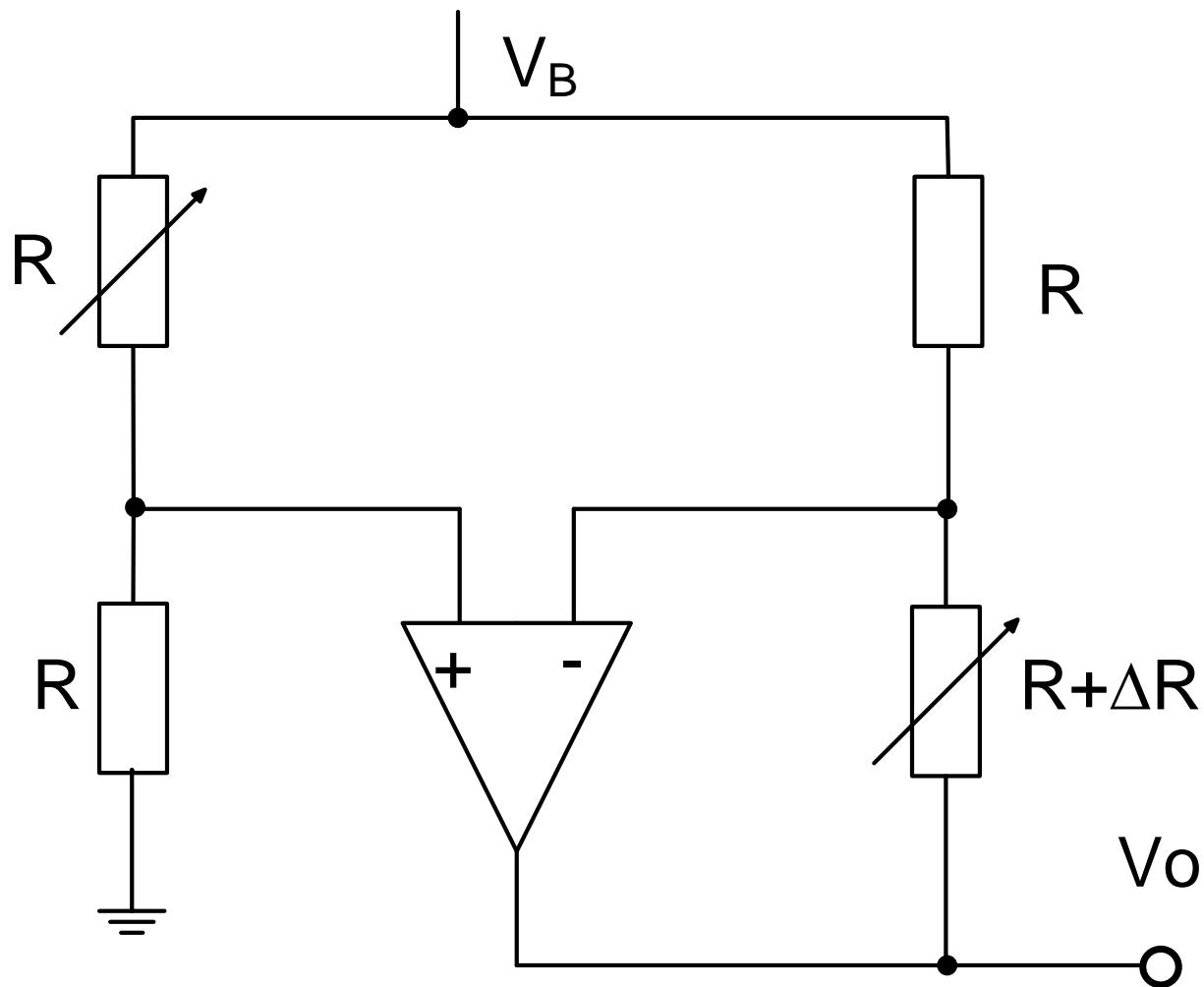
$$V_O = -\frac{V_B}{2} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)$$

Linearyzacja mostka z 1 czujnikiem

$$V_O = \frac{V_B}{2} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

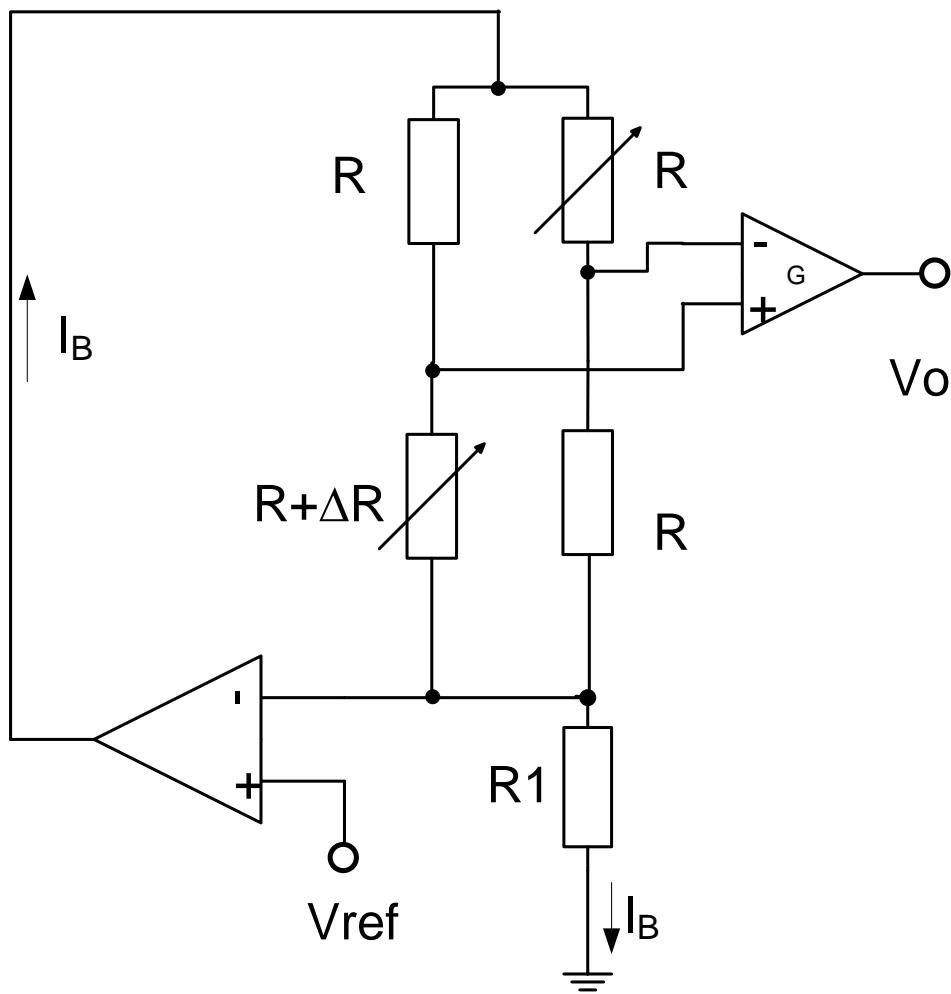


Linearyzacja mostka z 2 czujnikami



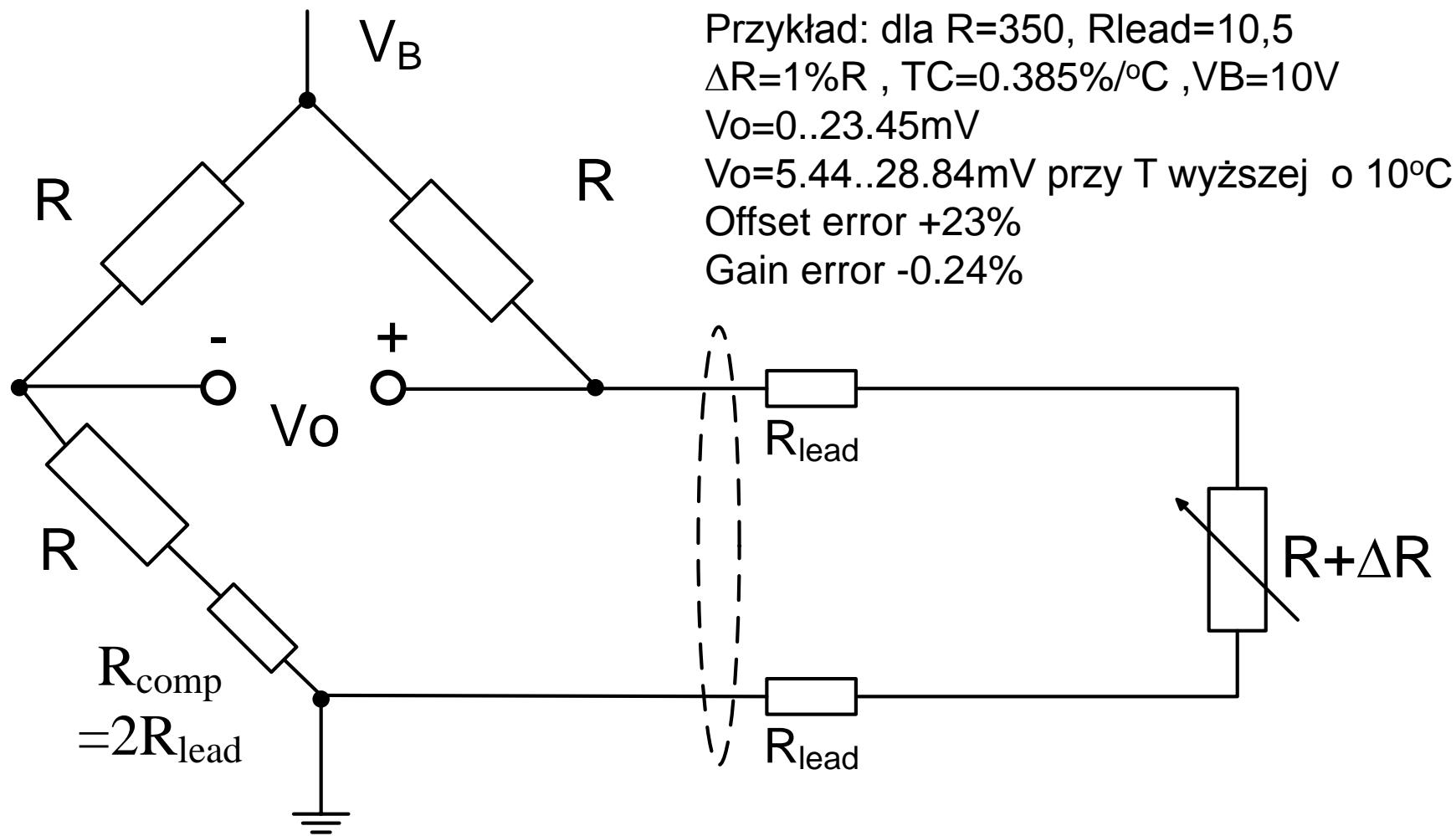
$$V_O = -V_B \left(\frac{\Delta R}{R} \right)$$

Linearyzacja mostka - 2 czujniki

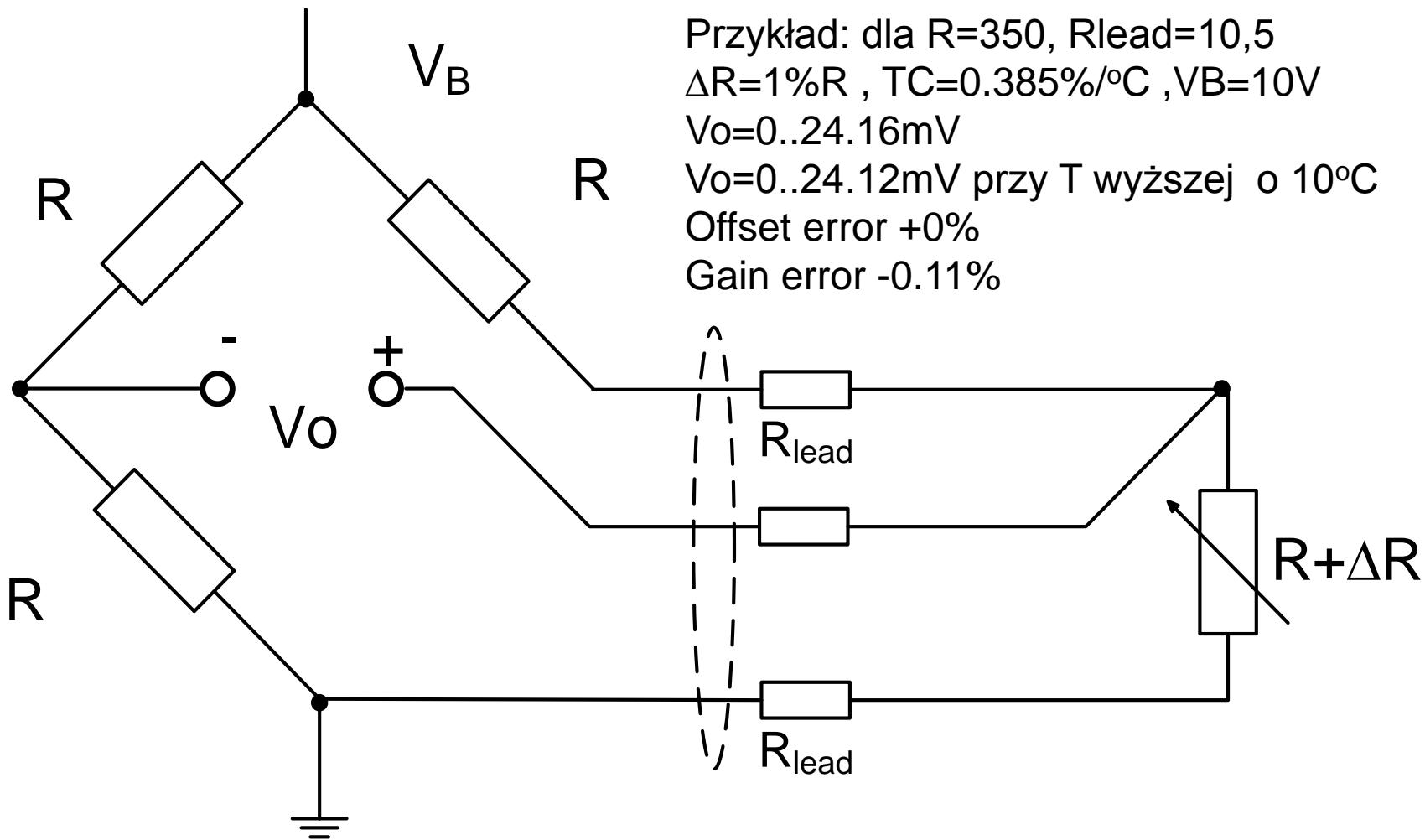


$$V_o = I_B \left(\frac{\Delta R}{2} \right) G$$

Błędy spowodowane rezystancją doprowadzeń do czujnika



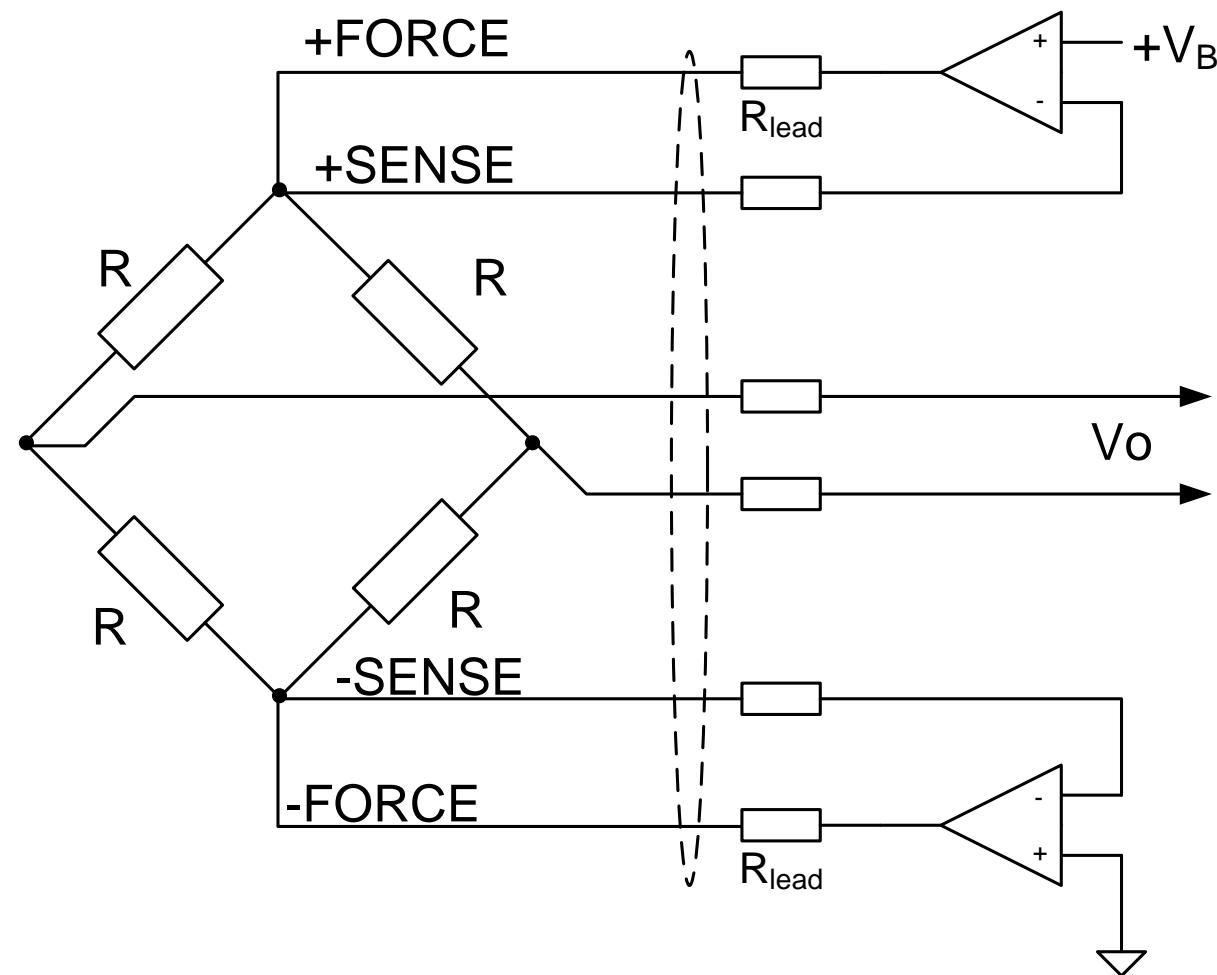
Trójprzewodowe podłączenie czujnika do mostka



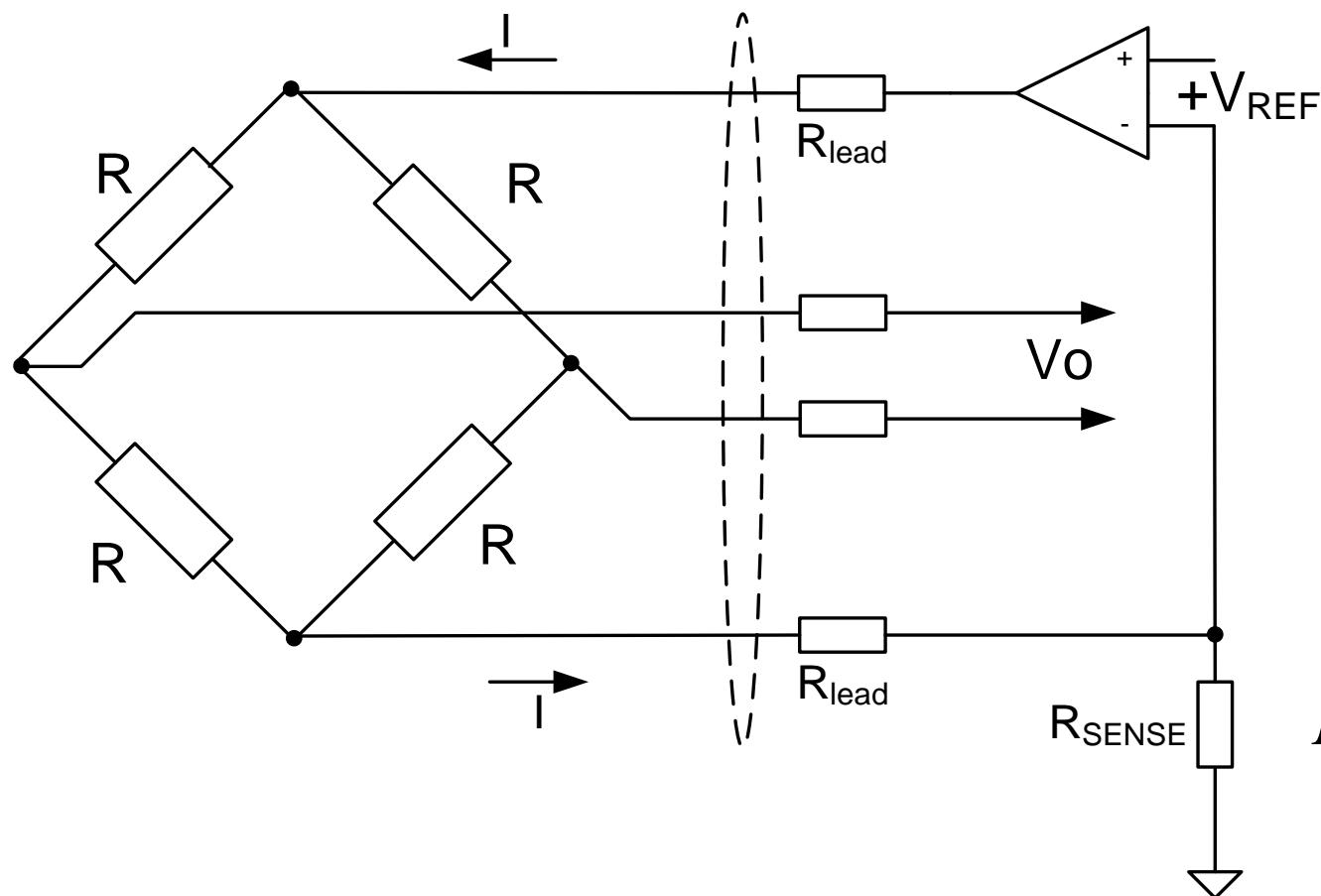
Błędy spowodowane rezystancją doprowadzeń czujnika

Plik MathCada
Mostek.mcd

Błędy spowodowane rezystancją doprowadzeń - układ Kelvin'a (4 przewodowy)

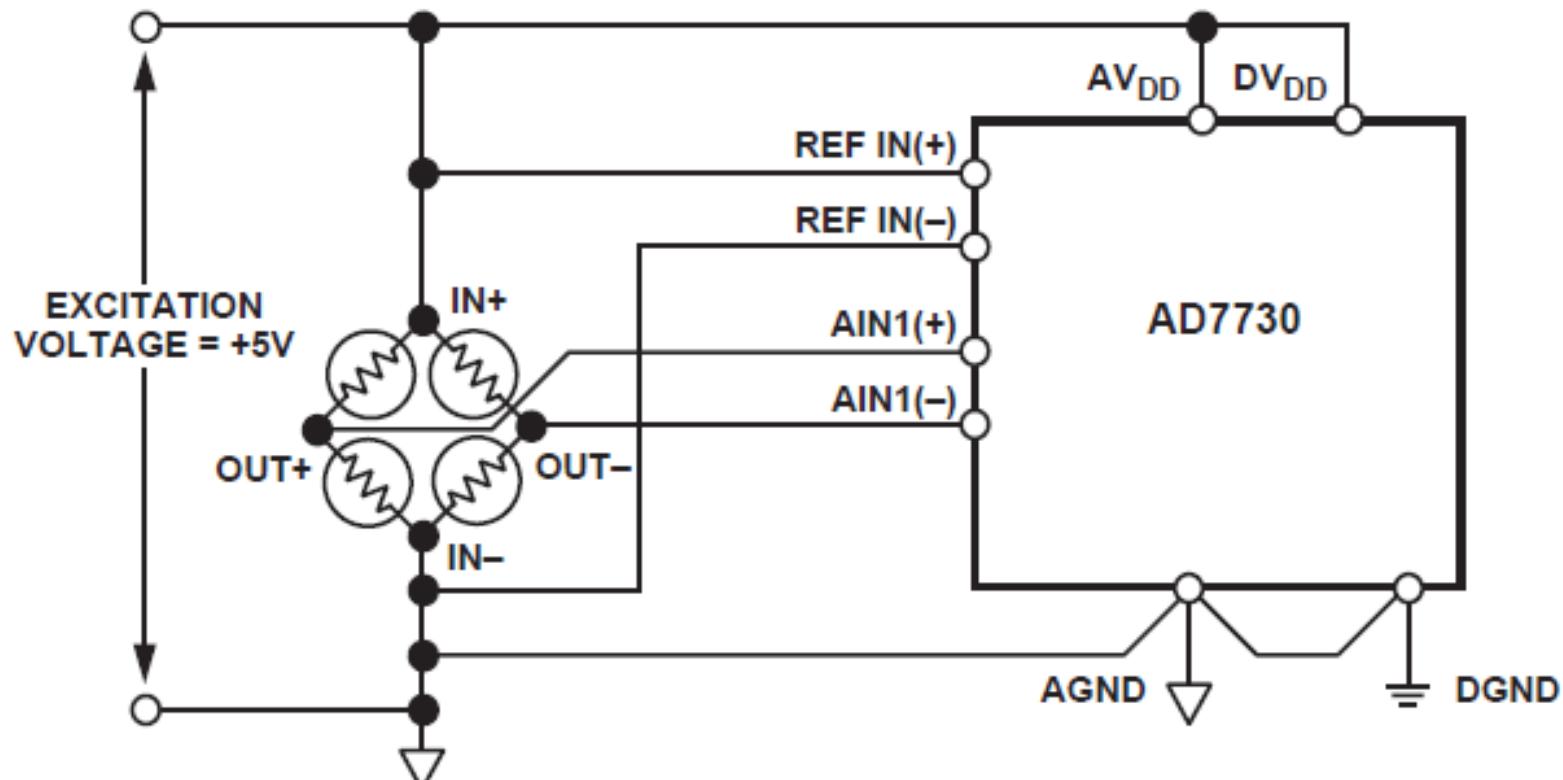


Błędy spowodowane rezystancją doprowadzeń - układ z zasilaniem stałoprądowym

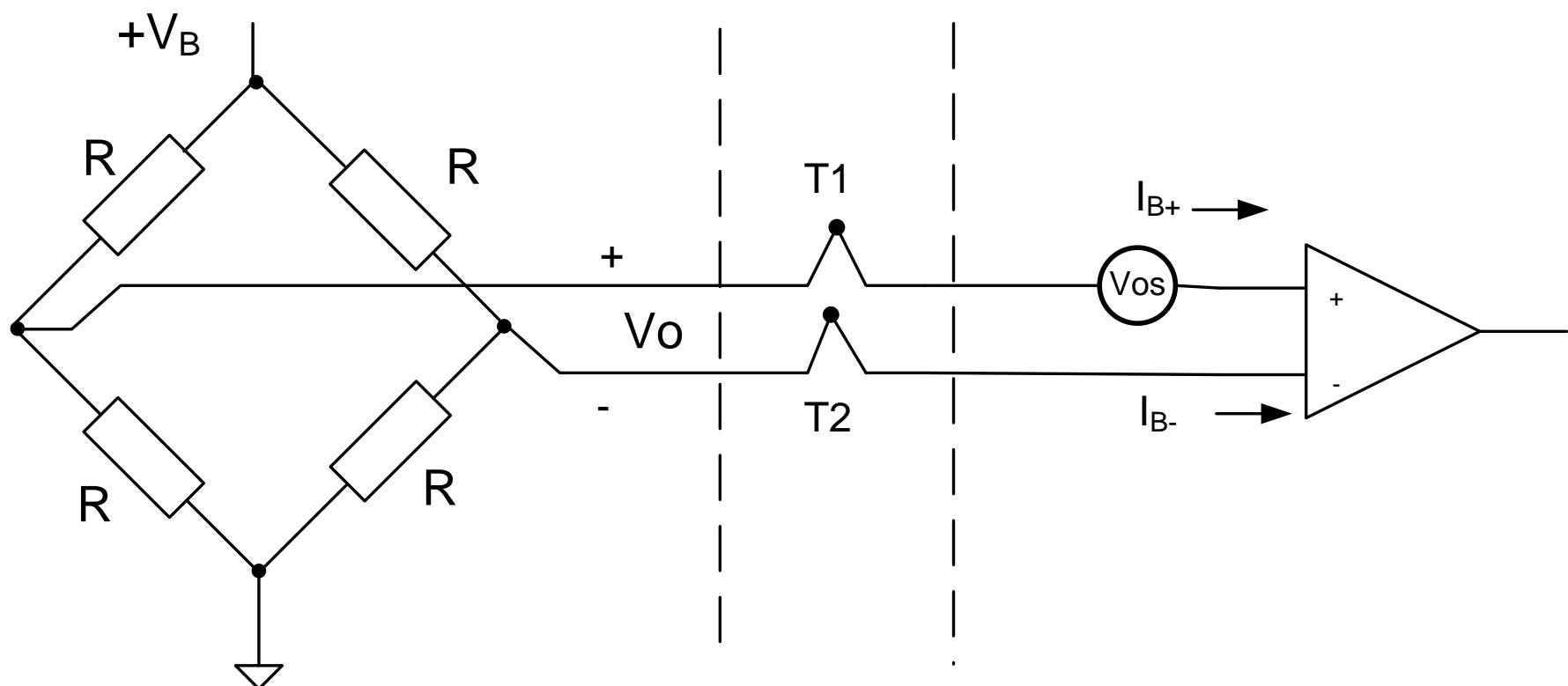


$$I = \frac{V_{REF}}{R_{SENSE}}$$

Zasilanie mostka w układzie Kelvin'a (4 przewodowym)

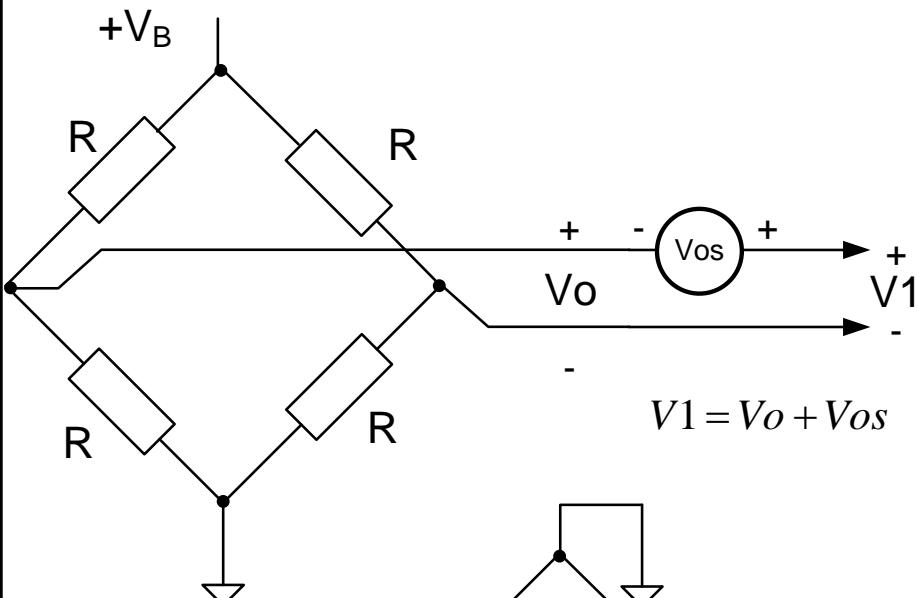


Źródła błędu offsetu w układzie mostkowym



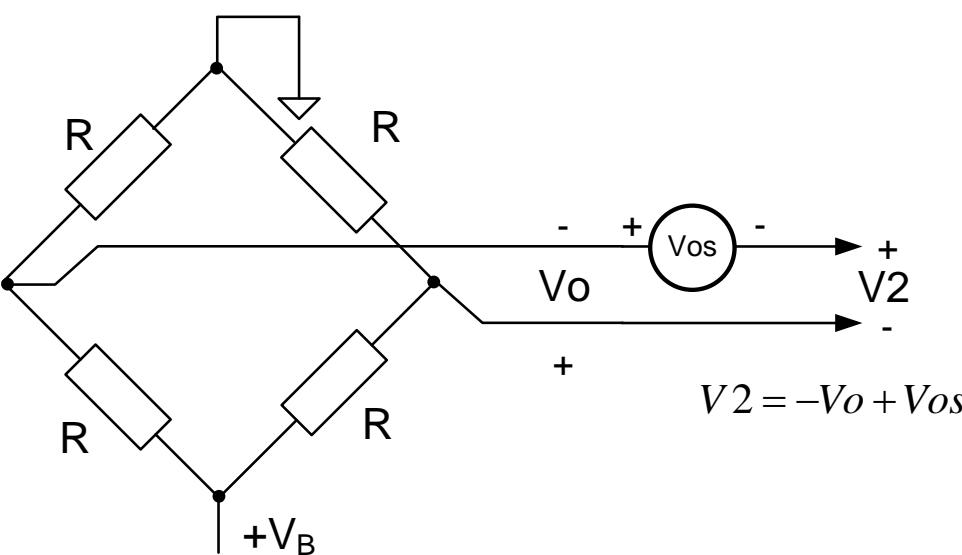
Współczynnik temperaturowy termopary miedź - kovar $35 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Minimalizacja błędu offsetu przez zmianę polaryzacji zasilania



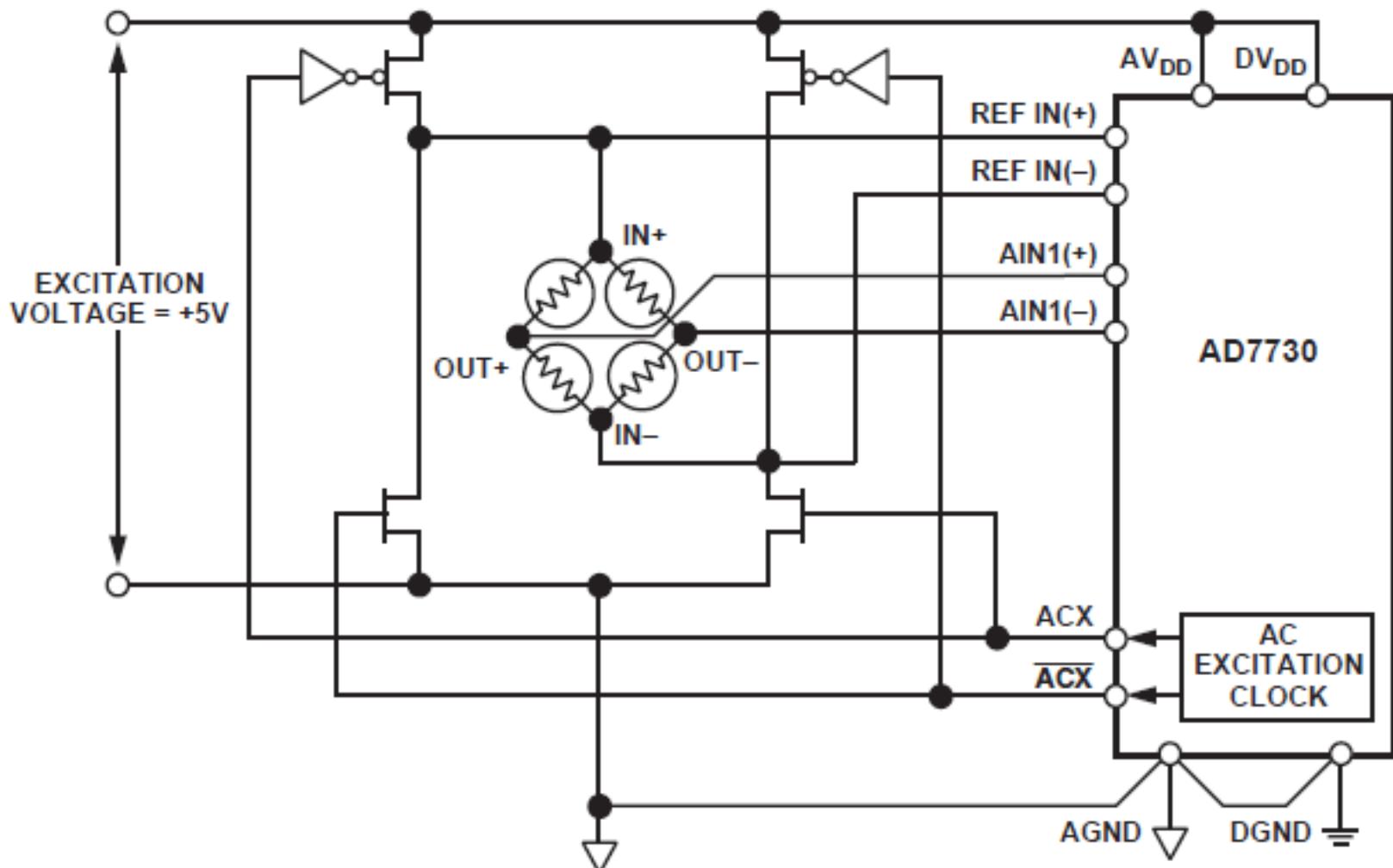
$$V_1 = V_o + V_{os}$$

$$V_1 - V_2 = V_o + V_{os} - (-V_o + V_{os}) = 2V_o$$



$$V_2 = -V_o + V_{os}$$

Minimalizacja błędu offsetu przez zmianę polaryzacji zasilania





POMIAR TEMPERATURY

Skale temperatur Celcjusza i Kelwina

Skala temperatur Celcjusza,
a skala bezwzględna Kelwina

Temperatura wrzenia wody

$$100^{\circ}\text{C} = 373,15 \text{ K}$$

$$\Delta t = 100^{\circ}\text{C}$$

Punkt побójowy wody

$$273,16 \text{ K} = 0,01^{\circ}\text{C}$$

Temperatura topnienia lodu

$$0^{\circ}\text{C} = 273,15 \text{ K}$$

Zero bezwzględne

$$-273,15^{\circ}\text{C} = 0 \text{ K}$$

Skale temperatur Fahrenheita

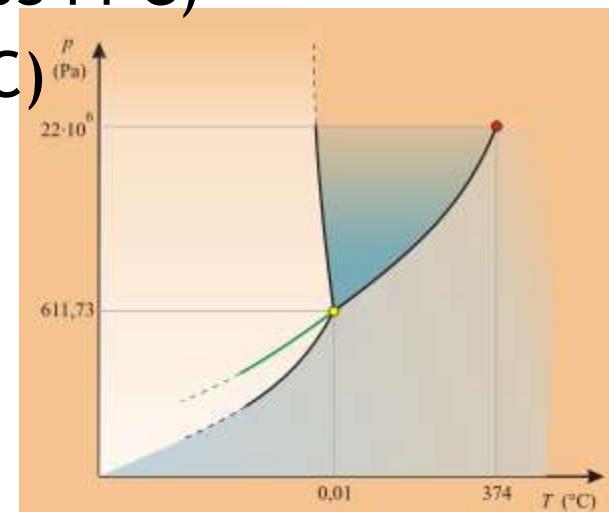
- 0°F - temperatura mieszaniny lodu i salmiaku
- 100°F - temperatura normalna ciała człowieka

$$t[{}^{\circ}\text{C}] = (5/9) \cdot (t_{\text{F}}[{}^{\circ}\text{F}] - 32)$$

$$t[{}^{\circ}\text{F}] = t_{\text{C}}[{}^{\circ}\text{C}] \cdot (9/5) + 32$$

Definicyjne stany równowagi według Międzynarodowej Skali Temperatur (MST-90)

- Punkt potrójny wodoru w równ.: $13,8033\text{K}$ ($-259,346^\circ\text{C}$)
- Punkt wrzenia wodoru w równowadze: $20,3\text{K}$ ($-252,85^\circ\text{C}$)
- Punkt potrójny neonu $24,5561\text{K}$ ($-248,5939^\circ\text{C}$)
- Punkt potrójny tlenu $54,3584\text{K}$ ($-218,7916^\circ\text{C}$)
- Punkt potrójny argonu $83,8058\text{K}$ ($-189,3442^\circ\text{C}$)
- Punkt potrójny rtęci $234,3156\text{K}$ ($-38,8344^\circ\text{C}$)
- Punkt potrójny wody $273,16\text{K}$ ($-0,01^\circ\text{C}$)



Definacyjne stany równowagi według Międzynarodowej Skali Temperatur (MST-90)

- Temperatura topnienia galu: 302,9146K (29,7646°C)
- Temperatura krzepnięcia indu : 429,7485K (156,5985°C)
- Temperatura krzepnięcia cyny : 505,078K (231,928°C)
- Temperatura krzepnięcia cynku: 692,677K (419,527°C)
- Temperatura krzepnięcia aluminium: 933,473K (660,323°C)
- Temperatura krzepnięcia srebra: 1234,93K (961,78°C)
- Temperatura krzepnięcia złota: 1337,33K (1064,18°C)
- Temperatura krzepnięcia miedzi: 1357,77K (1084,62°C)

Temperatury przy ciśnieniu 101,325kPa

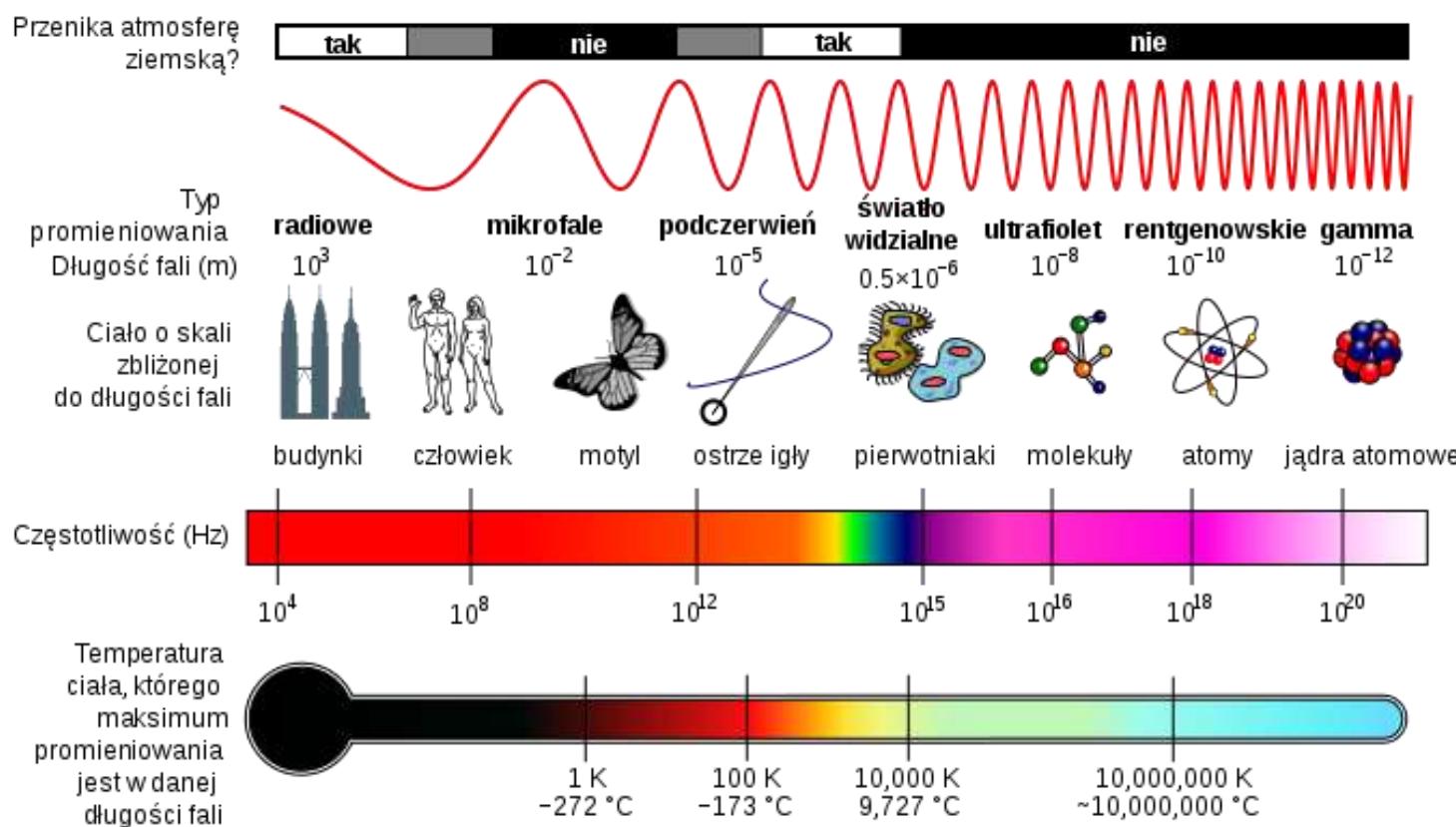
Wymagania stawiane czujnikom temperatury

- Powtarzalność charakterystyk - wymienność
- Konstrukcja umożliwiająca łatwą wymianę oraz odporność na środowisko pracy
- Jak największa czułość
- Liniowość charakterystyki
- Jak najmniejsze opóźnienie i zwiększenie sygnału wyjściowego
- Dogodna postać sygnału wyjściowego

Metody pomiaru temperatury

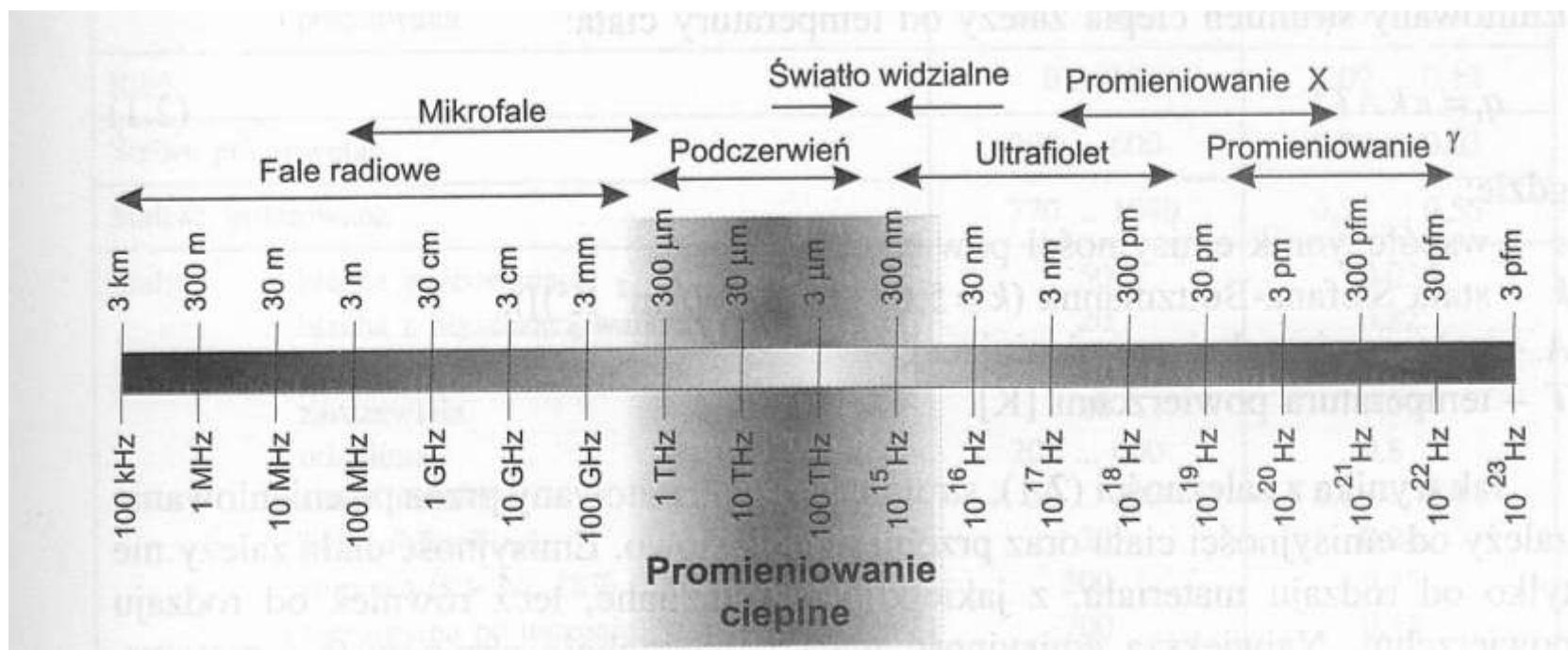
- Stykowe:
 - rezystancyjne,
 - termoelektryczne,
 - półprzewodnikowe
 - mechaniczne - rozszerzalność cieplna
 - inne
- Bezstykowe - pirometry
 - inne

Bezstykowe metody pomiaru temperatury

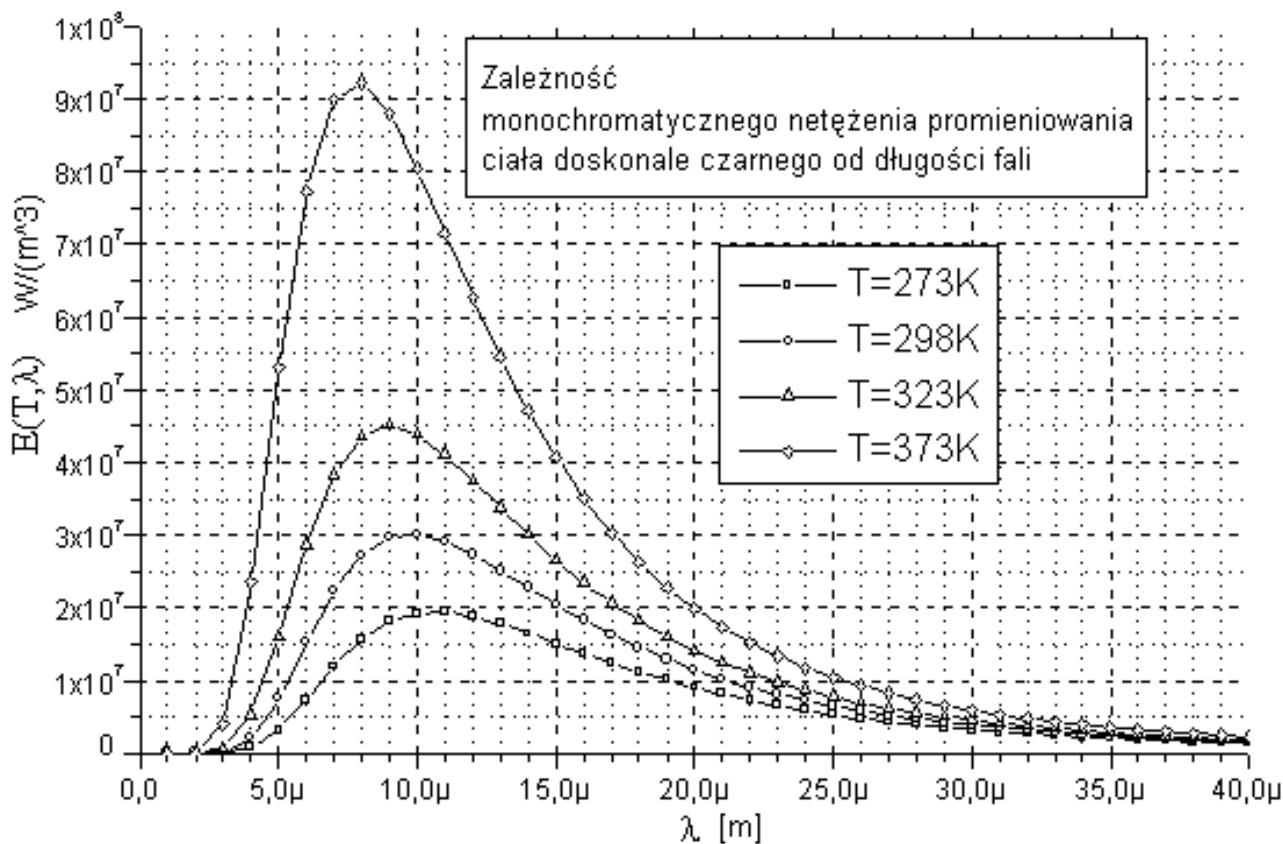


Rysunek: źródło Wikipedia

Widmo fal elektromagnetycznych



Rozkład gęstości spektralnej strumienia energii emitowanej przez ciało doskonale czarne - Prawo Planka



$$E_{0\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\frac{C_2}{e^{\lambda T}} - 1}$$

T - temperatura ciała [K] ; λ -długość fali [m] ; $C_1=3.74 \cdot 10^{-16}$ [Wm²] ; $C_2=0.0144$ [mK]

Emisja strumienia ciepła

$$q_t = \varepsilon k A T^4$$

Gdzie:

ε : współczynnik emisyjności powierzchni

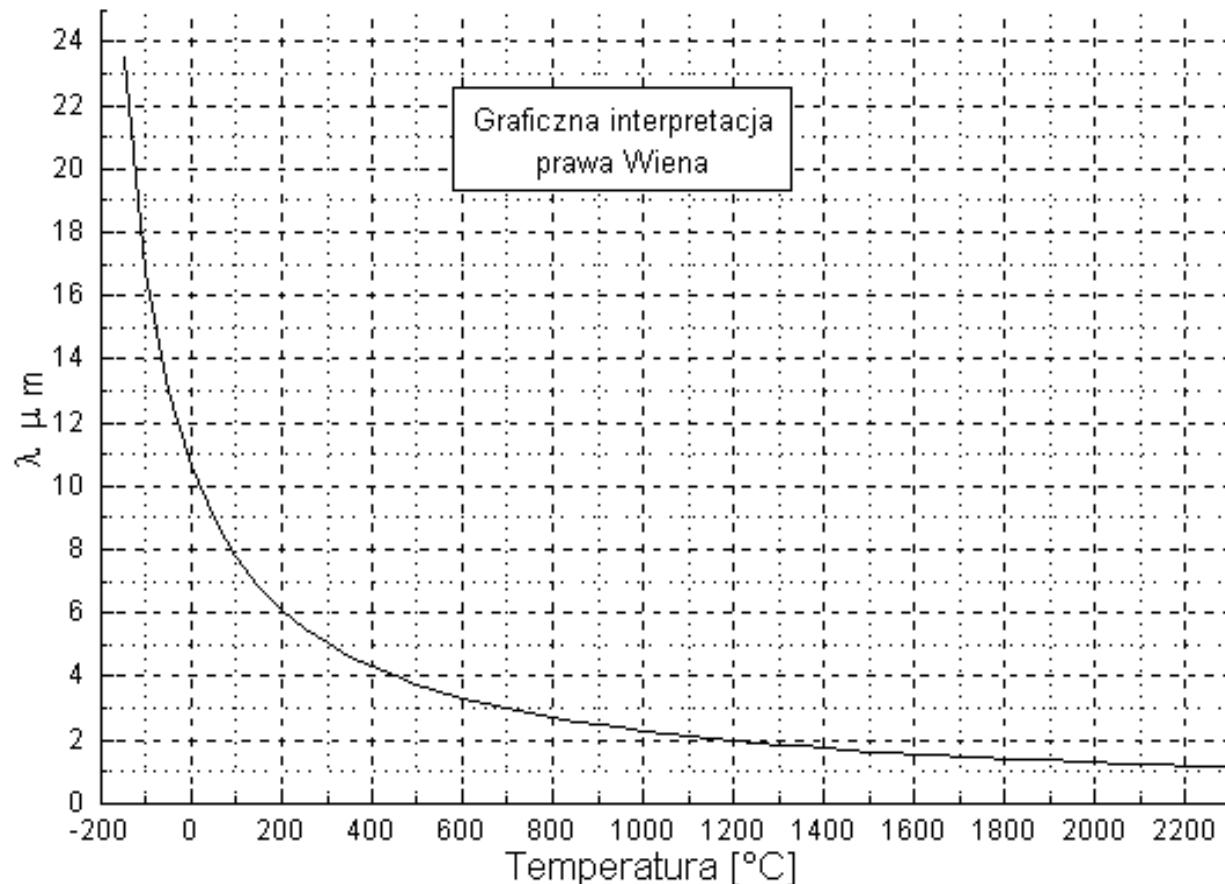
k: stała Stefana-Boltzmana $k=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$

A : pole powierzchni

T: temperatura powierzchni wyrażona w stopniach

Kelwina

Prawo Wiena



$$\lambda_{\max} * T = 2896 \text{ } [\mu\text{m} * \text{K}]$$

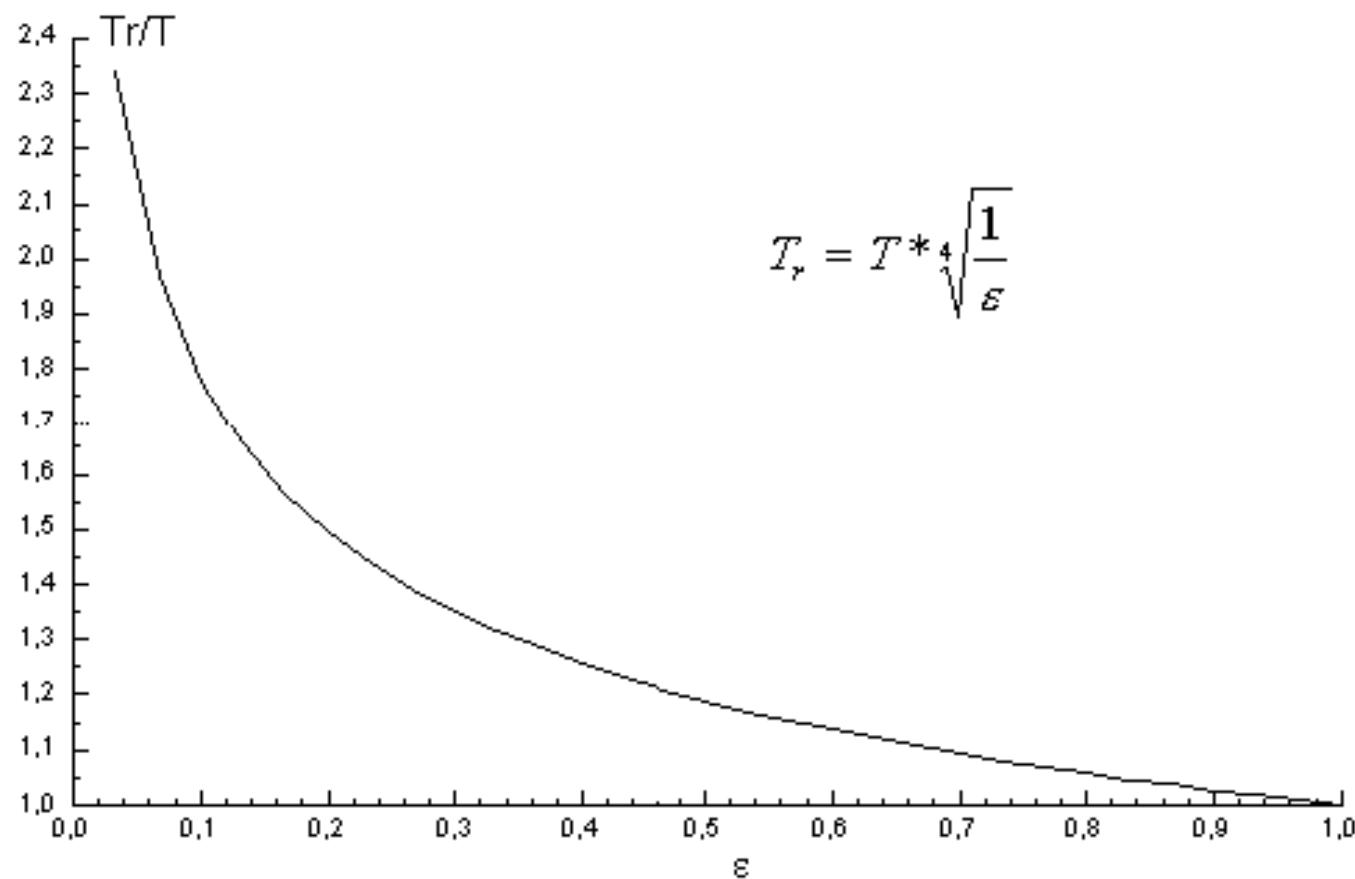


Współczynniki emisyjności

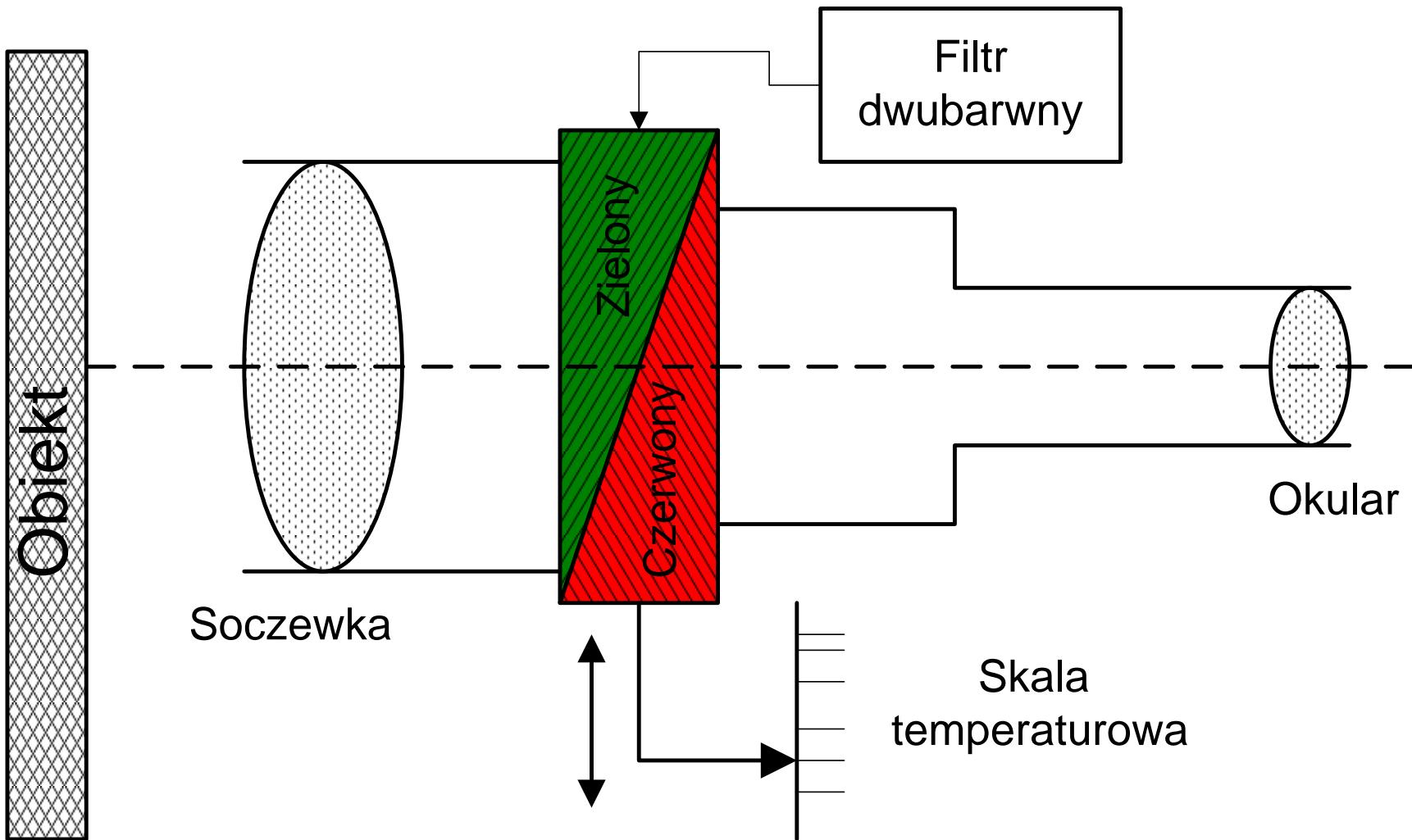
Materiał	ϵ	Materiał	ϵ
Aluminium: polerowane chropowate utlenione	0,04...0,06 0,06...0,08 0,08...0,25	Miedź: polerowana utleniona tleniona, szczerniąta	0,02 0,55..0,85 0,88
Brąz polerowany szorstki	0,1 0,55	Węgiel, miał Węgiel oczyszczony	0,95 0,8
Lakier, bakelitowy	0,93	Cegła czerwona	0,88...0,93
Lakier, biały	0,87	Szamotowa	0,75
Lakier, czarny, błyszczący	0,87	Krzemionkowa	0,8..0,85
Lakier, czarny, matowy	0,97	Mur ceglany otynkowany	0,9...0,94
Papier azbestowy	0,94	Guma	0,85...0,95
Papier,	0,7...0,9		
Gips	0,8..0,9	Wolfram	0,06...0,4
Piasek	0,6	Drewno heblowane	0,8...0,9
Farba olejna	0,9...0,95	Złoto polerowane	0,02...0,003



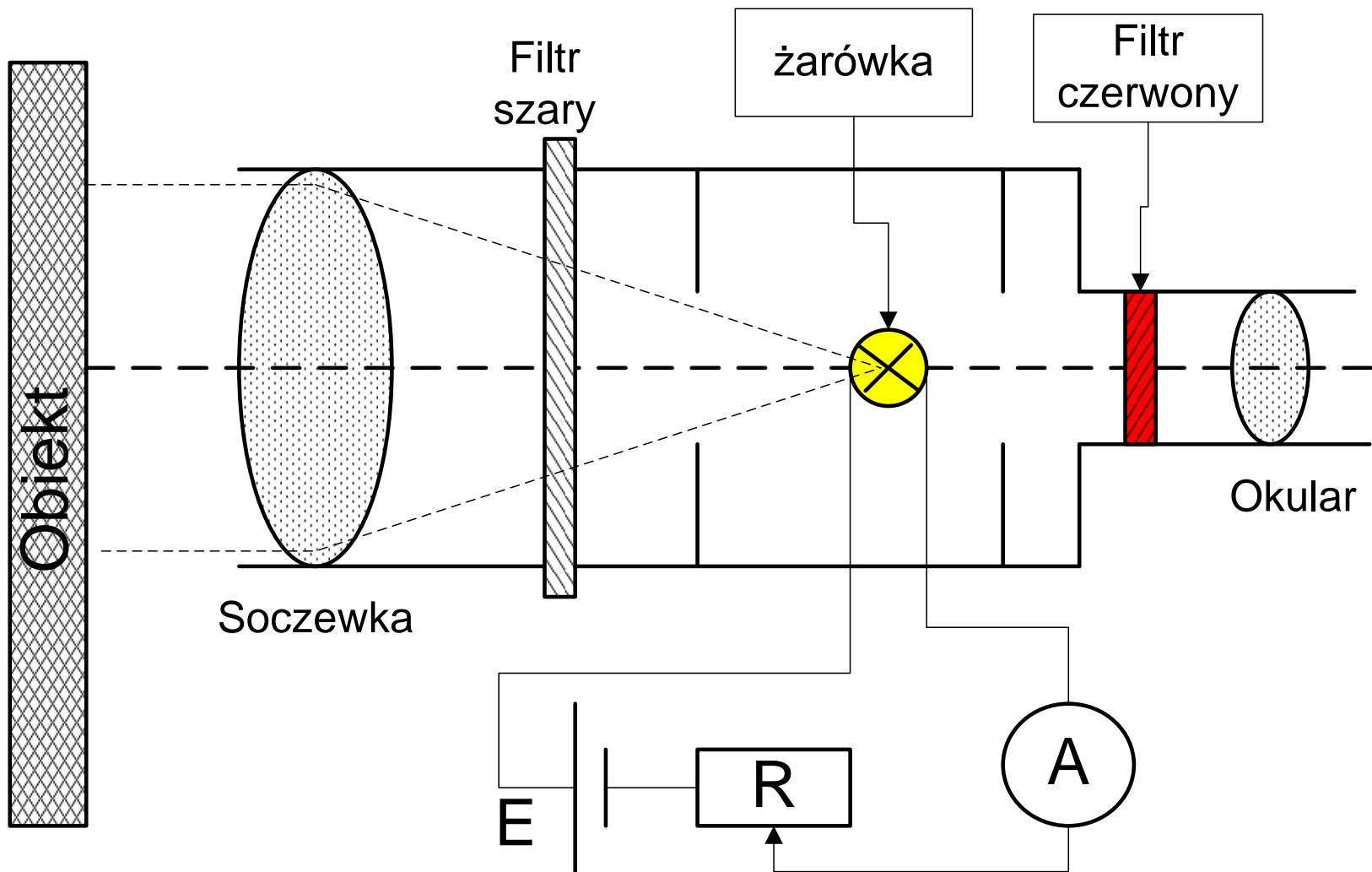
Zależność pomiędzy temperaturą ciała szarego a ciała doskonale czarnego



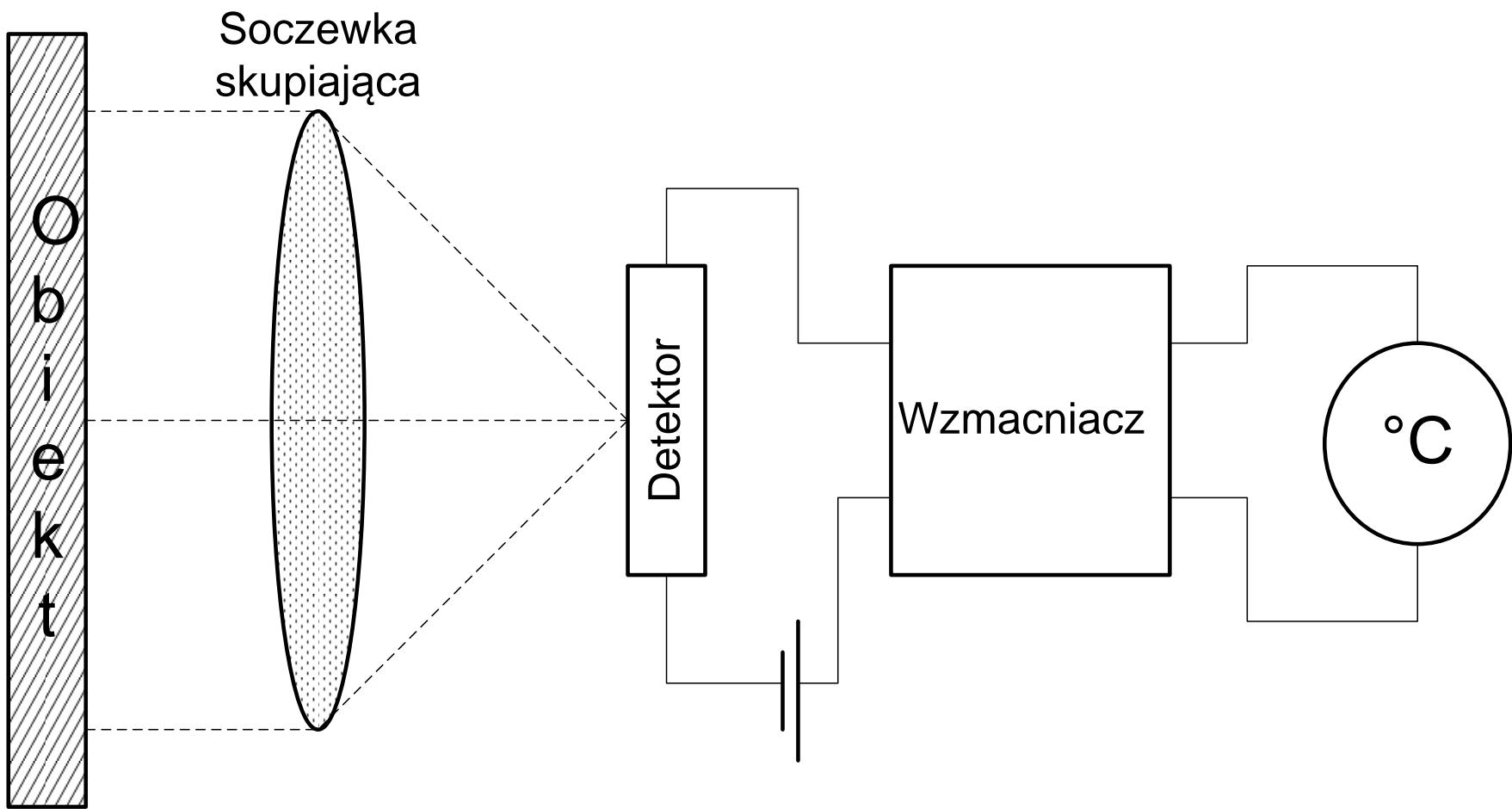
Pirometr dwubarwny



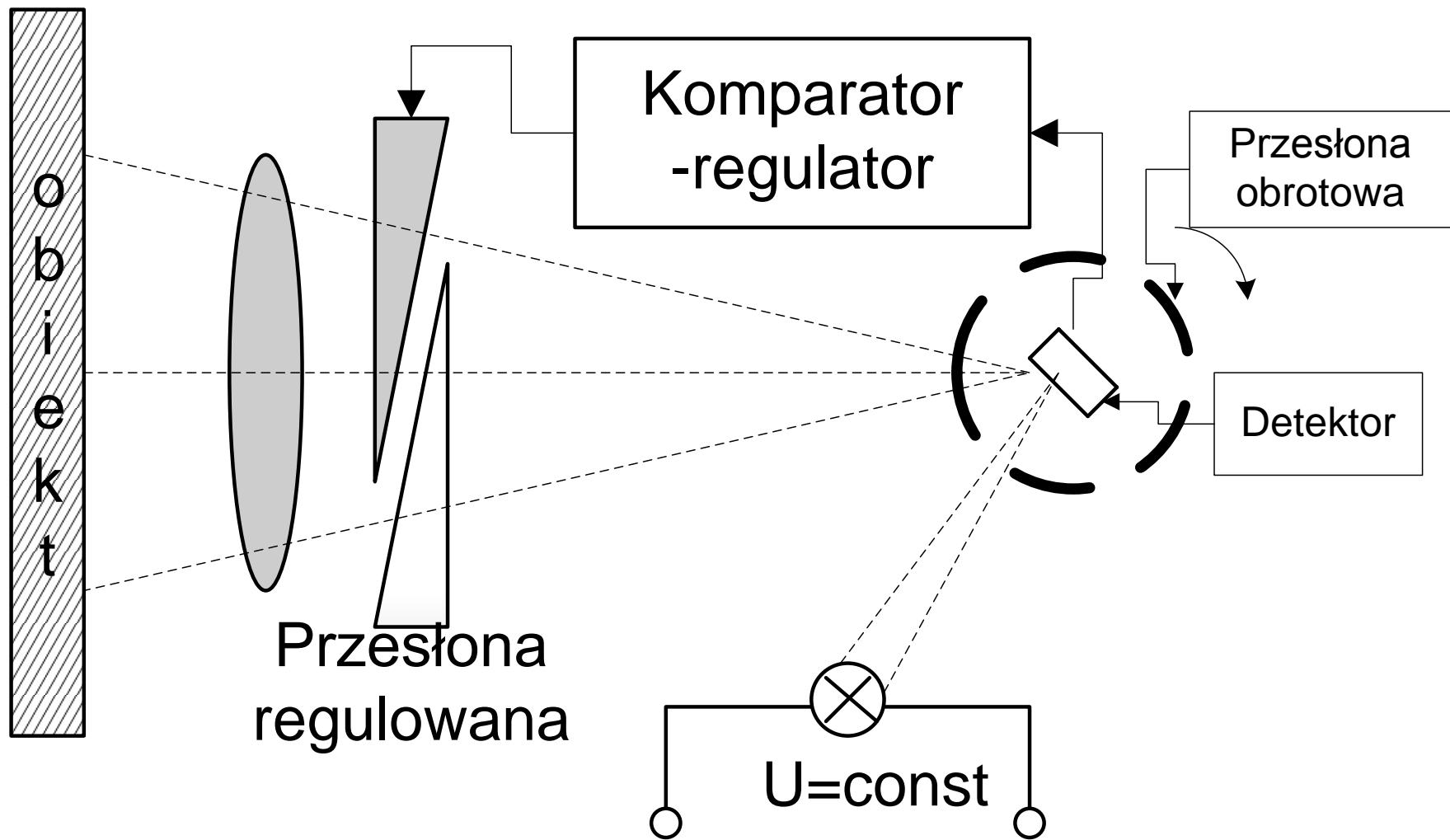
Pirometr z zanikającym włóknem



Pirometr fotoelektryczny



Pirometr komparacyjny





Typowe popularne czujniki temperatury

Termopara	RTD	termistor	Półprzewodnikowe
Najszerzy zakres -200°C...+2300°C	Zakres -200°C...+850°C	Zakres 0°C...+200°C	Zakres -55°C...+150°C
Duża dokładność i powtarzalność	Dobra liniowość	Duża nieliniowość	Dobra liniowość i dokładność
Wymaga kompensacji zimnej spoiny	Wymaga zasilania	Wymaga zasilania	Wymaga zasilania
Niska wartość sygnału wyjściowego	Niski koszt	Niski koszt. Duża czułość	Wyście cyfrowe lub analogowe np. 10mV/°C

Stykowy pomiar temperatury. Obudowy przemysłowe czujników temperatury

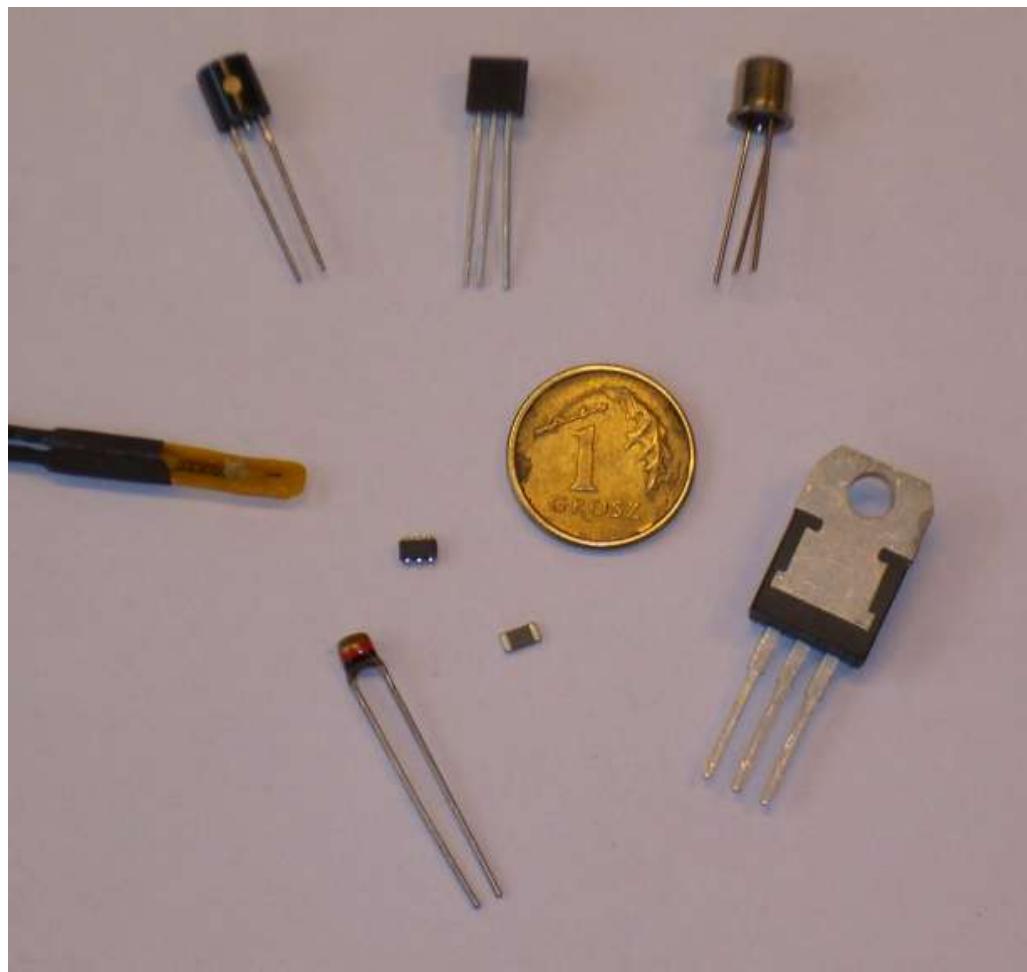


Stykowy pomiar temperatury. Obudowy przemysłowe czujników temperatury

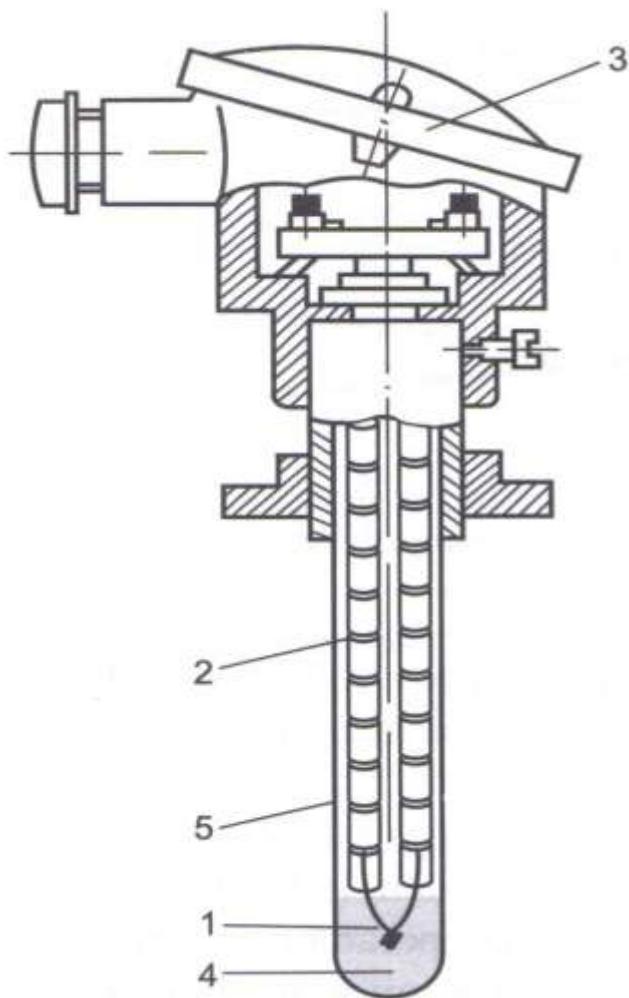


2014/03/18

Stykowy pomiar temperatury. Obudowy czujników temperatury

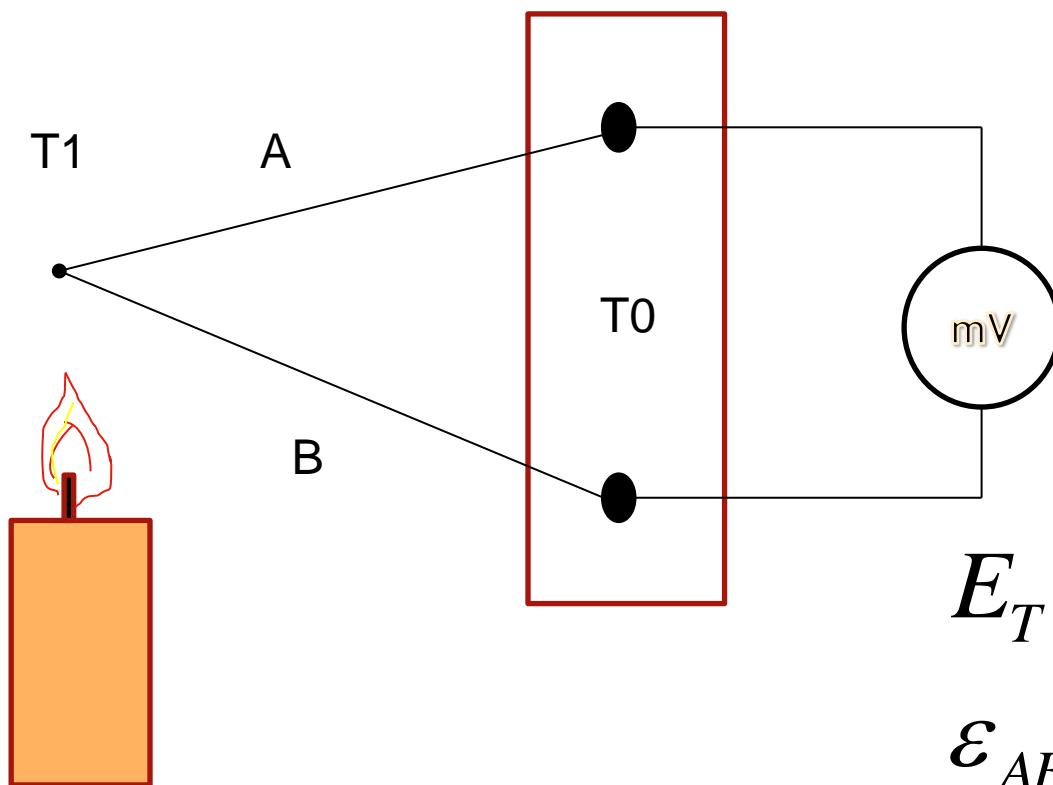


Czujnik termoelektryczny - budowa



- 1** - spoina termopary
- 2** – osłona wykonana z materiału ceramicznego (przy pomiarach wysokich temperatur) lub ze stali (dla temperatur niższych).
- 5** – zewnętrzna osłona metalowa
- 4** – materiał izolacyjny o dużej przewodności cieplnej.
- 3** – Główica w której znajdują się zaciski do połączenia czujnika z układem pomiarowym.

Czujniki termoelektryczne Efekt Seebecka (1821)



$$E_T = \varepsilon_{AB} (T_1 - T_0)$$

$$\varepsilon_{AB} = \varepsilon_A - \varepsilon_B$$

ε_A = współczynnik Seebecka materiału A

Siły termoelektryczne materiałów względem platyny. $T_1=100^{\circ}\text{C}$ $T_0=0^{\circ}\text{C}$

Metal lub stop	S_{te} [mV]	Metal lub stop	S_{te} [mV]
Kopel	-4	Iryd	+0,65
Konstantan	-3,51	Rod	+0,70
Nikiel	-1,48	Srebro	+0,74
Kobalt	-1,33	Cynk	+0,76
Alumel	-1,29	Miedź	+0,76
Pallad	-0,59	Złoto	+0,78
Platyna	0	Wolfram	+1,12
Aluminium	+0,42	Molibden	+1,45
Ołów	+0,44	Żelazo	+1,98
Platynorod (90%Pt)	+0,645	Nikielchrom	+2,2
Platynorod (70%Pt)	+0,647	Chromel	+2,81

Zjawiska termoelektryczne na styku dwóch materiałów (metali, półprzewodników)

$$E_p = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} - \frac{A_A - A_B}{e}$$

k – stała Boltzmana, e – ładunek elektronu, N_A , N_B – koncentracje swobodnych elektronów w metalach A i B, A_A , A_B – prace wyjścia elektronu z metalu A i B

Zjawisko Peltiera(1834) - wydzielanie lub pochłanianie energii na styku pod wpływem przepływu prądu

Zjawiska termoelektryczne w pojedynczym przewodzie

$$E_T = \sigma \int_{T_1}^{T_2} dt = \sigma(T_2 - T_1)$$

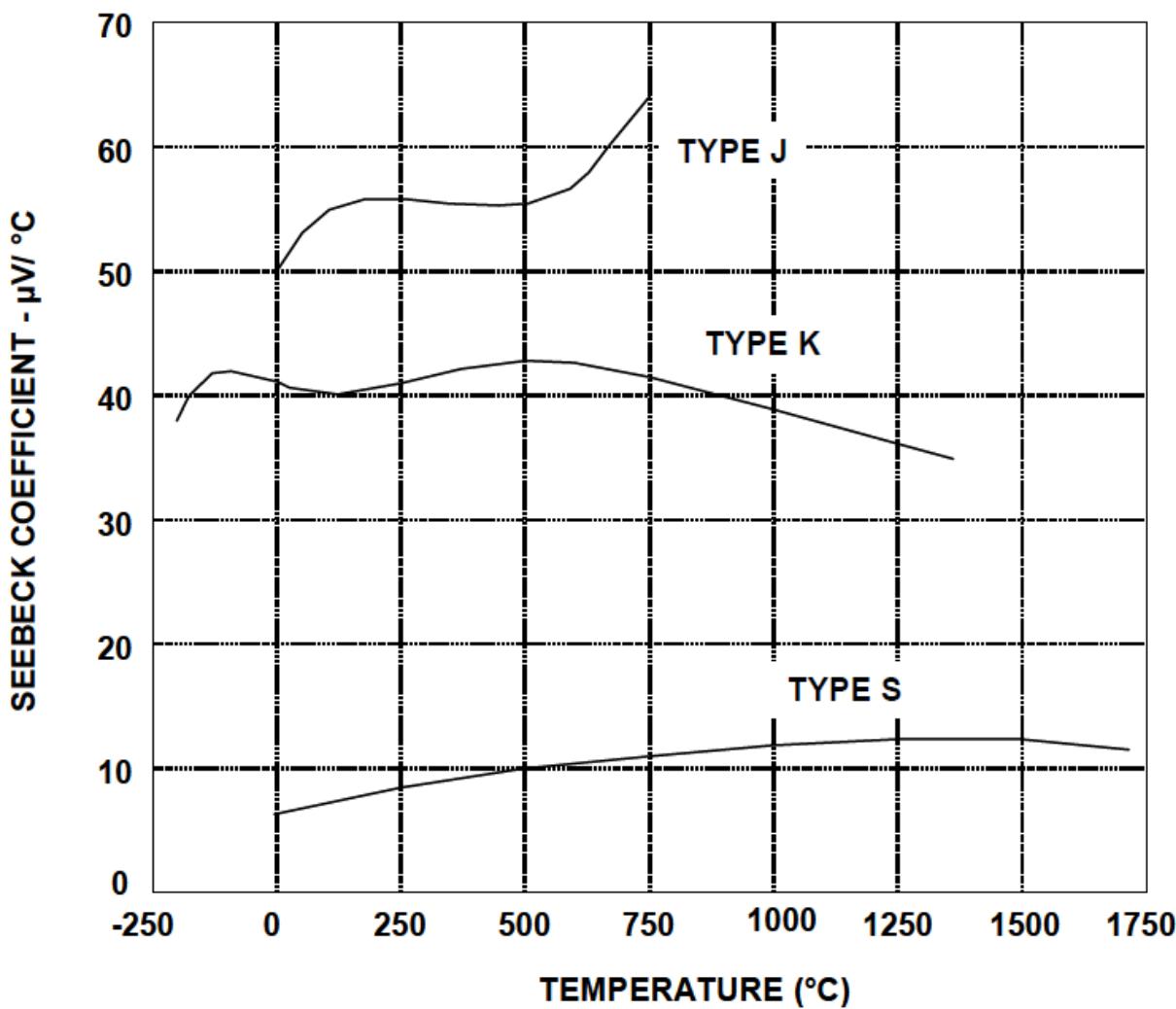
Zjawisko Thomsona(1854) - wydzielanie lub pochłanianie energii w przewodzie w którym istnieje gradient temperatury, pod wpływem przepływu prądu

$$q_T = -\mu_T I(T_2 - T_1)$$

Właściwości najczęściej stosowanych termopar

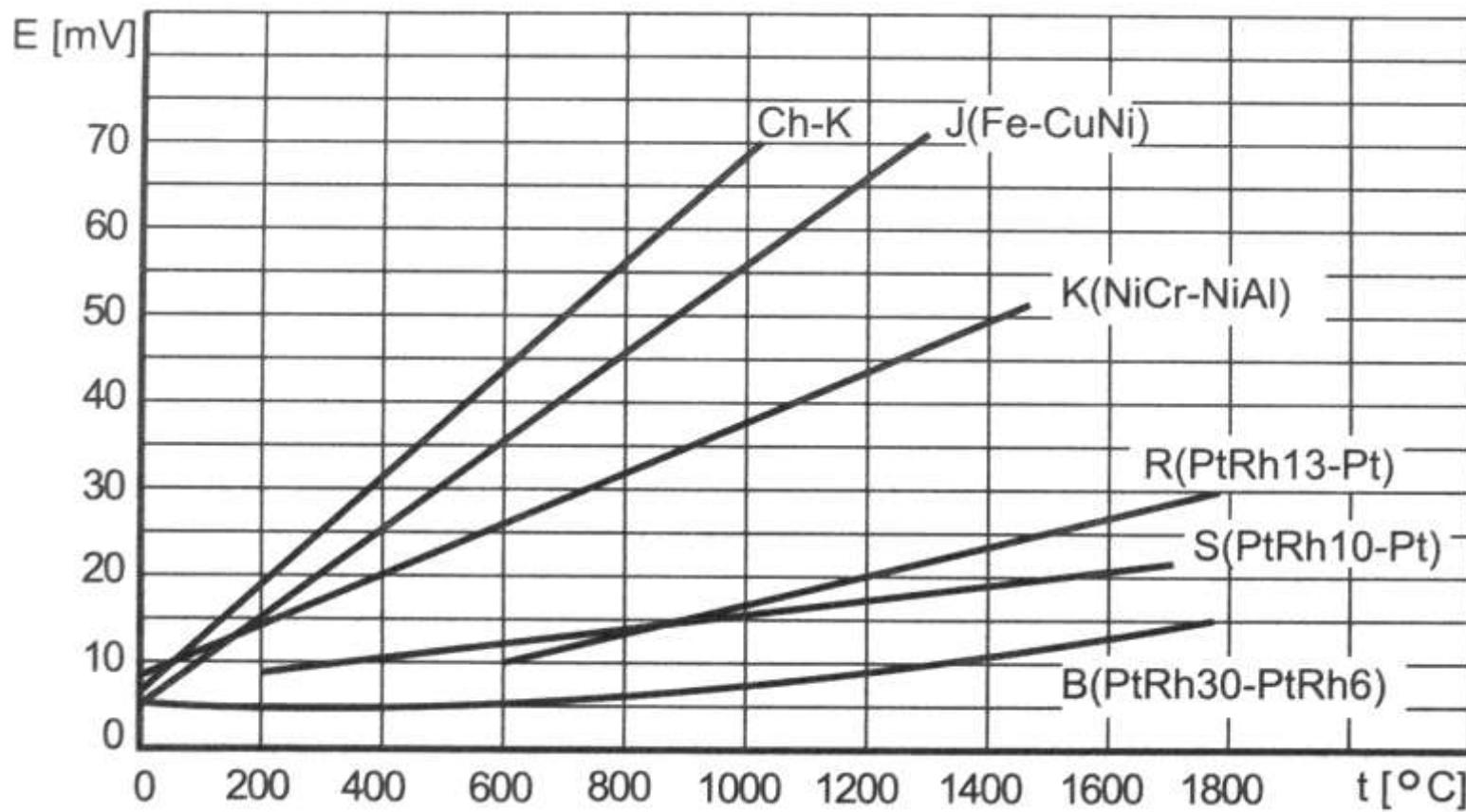
Sym- bol	Materiał	Zakres stosowania [°C]	Czułość [uV/°C]
B	Platynorod-Platynorod, PtRh30-PtRh6	0...+1800	7,7
E	Chromel-konstantan NiCr-CuNi	0...+1000	76
J	Żelazo Konstantan Fe-CuNi	-200...+700	55
K	Chromel-Alumel NiCr-NiAl	-270...+1200	39
R	PlatynoRod-Platyna PtRh13-Pt	0...+1500	11,7
S	PlatynoRod-Platyna PtRh10-Pt	0...+1500	10,4
T	Miedź-Konstantan Cu-CuNi	-200...+400	45

Czułości termopary w funkcji temperatury

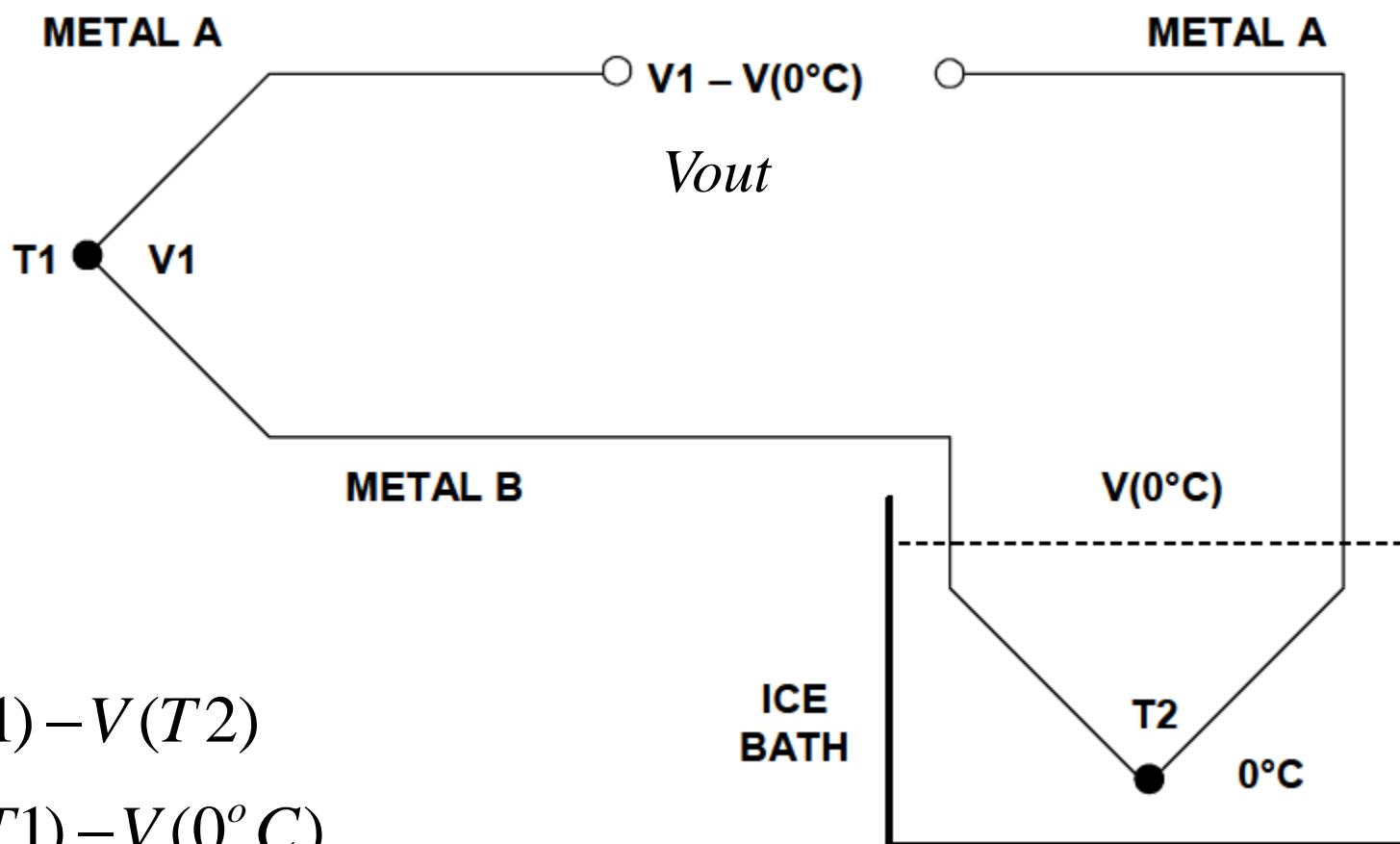


J	Żelazo Konstantan Fe-CuNi
K	Chromel-Alumel NiCr-NiAl
S	PlatynoRod-Platyna PtRh10-Pt

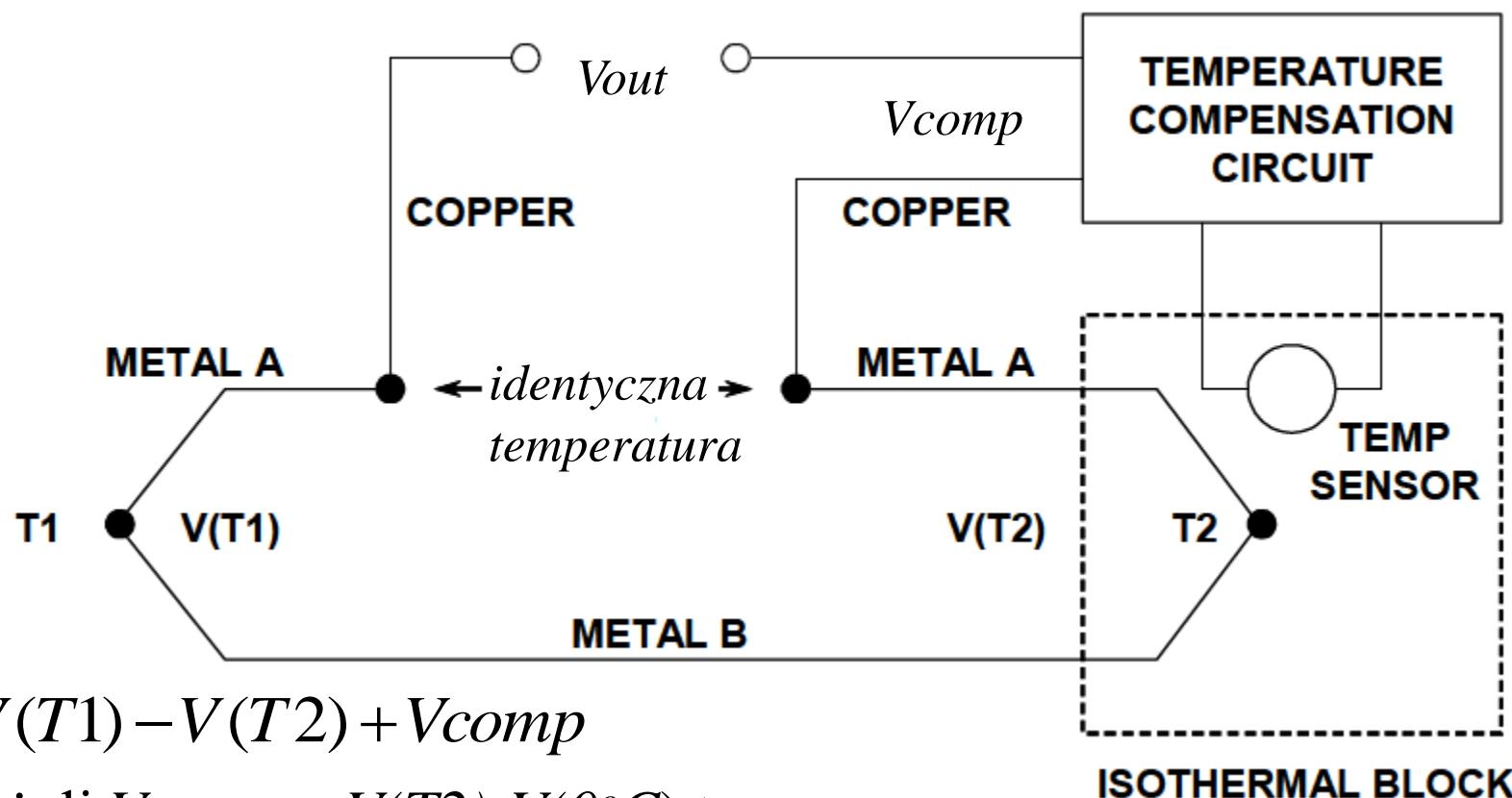
Charakterystyki termopar



Układy pomiaru temperatury termoelementami



Układy pomiaru temperatury termoelementami

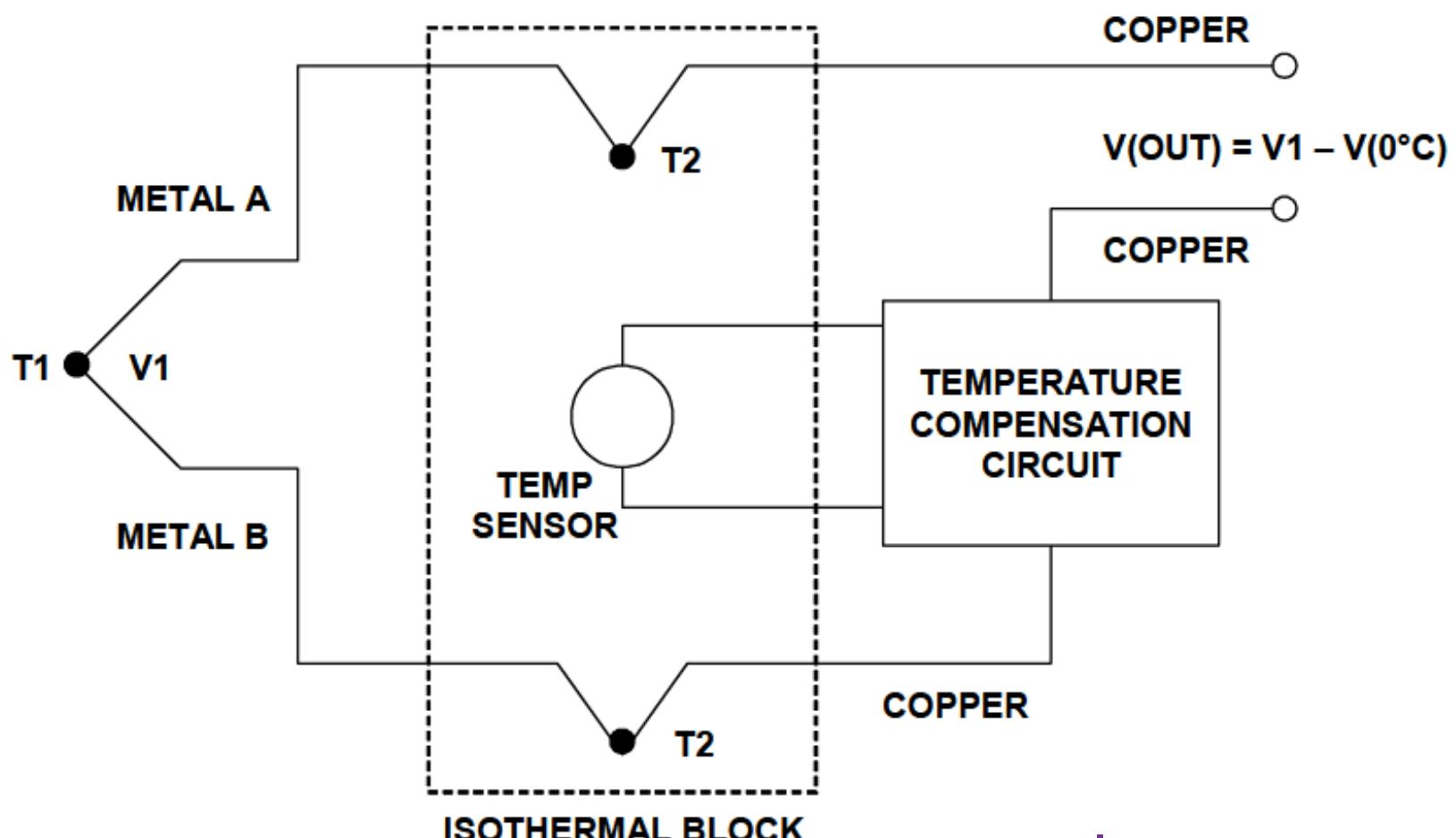


$$V_{out} = V(T_1) - V(T_2) + V_{comp}$$

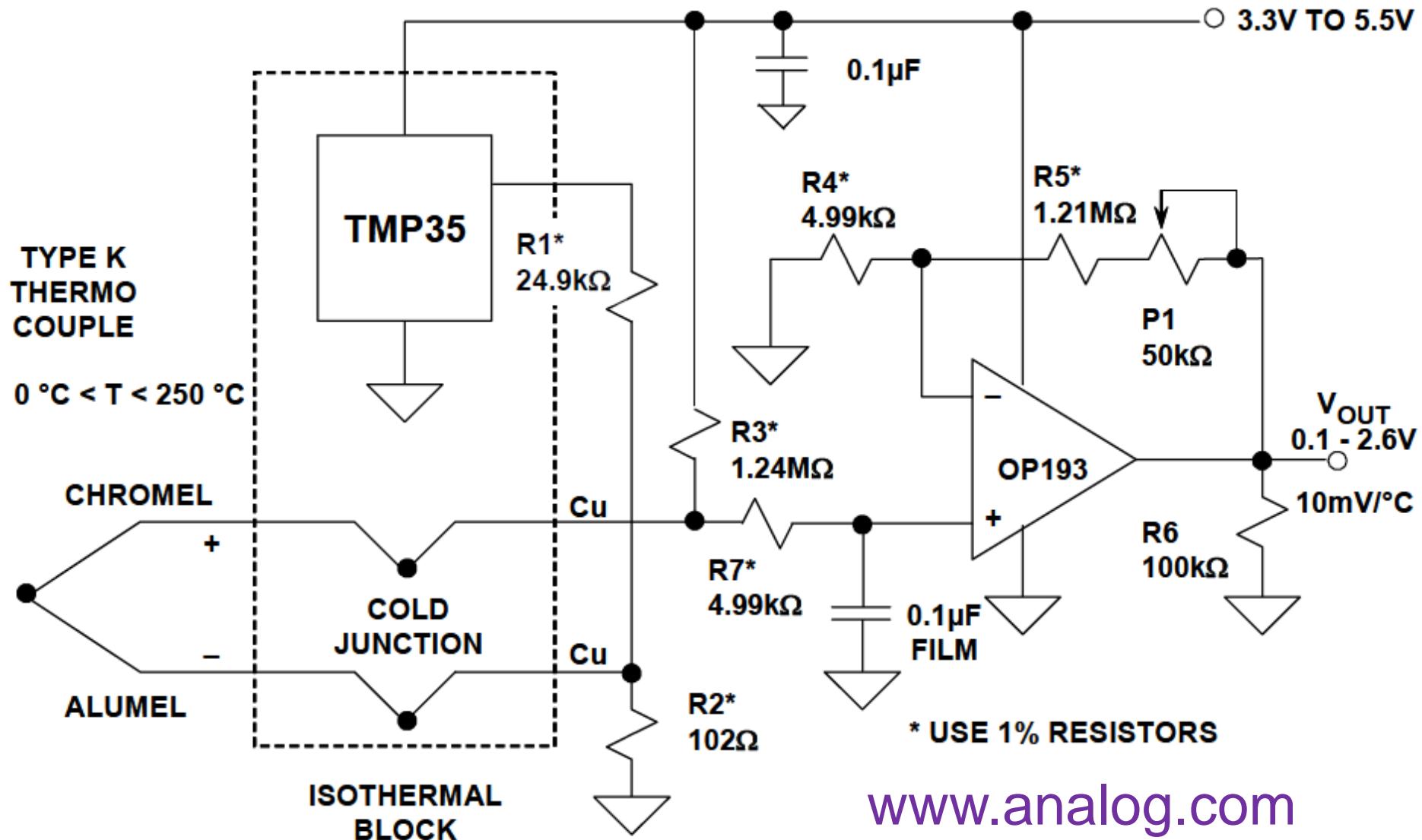
Jeżeli $V_{comp} = V(T_2) - V(0^\circ C)$ to

$$V_{out} = V(T_1) - V(0^\circ C)$$

Układy pomiaru temperatury termoelementami

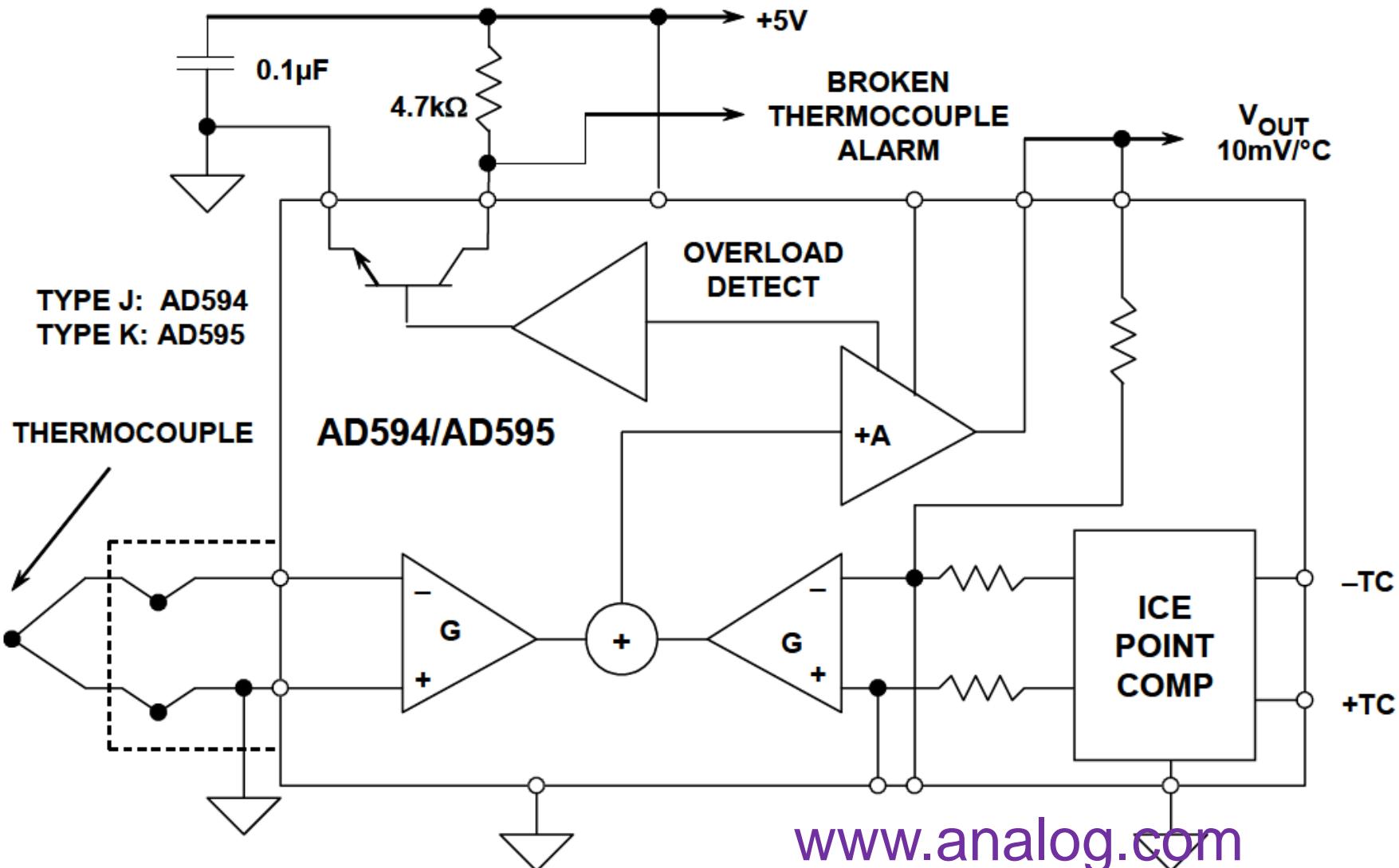


Układy pomiaru temperatury



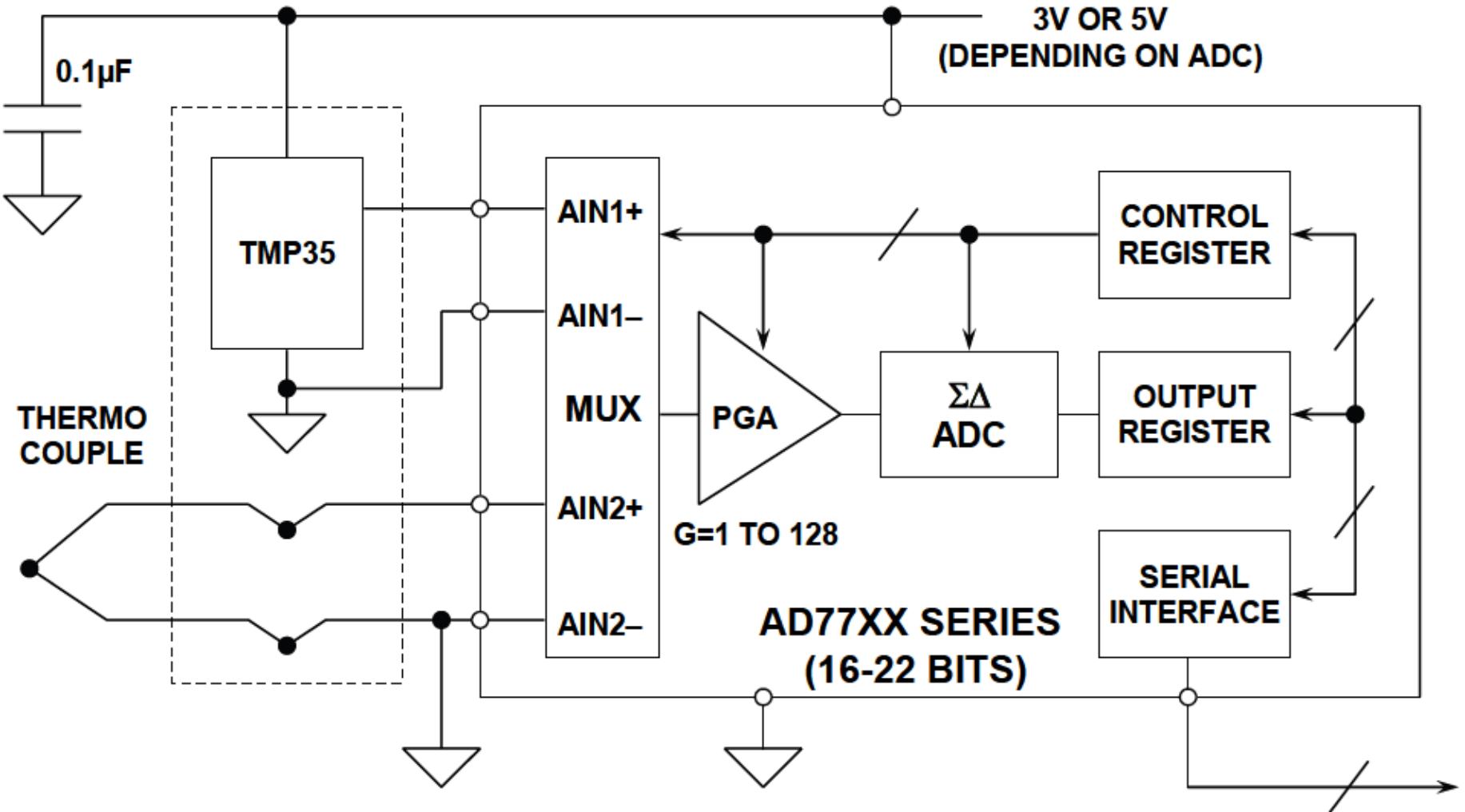


Układy pomiaru temperatury termoelementami



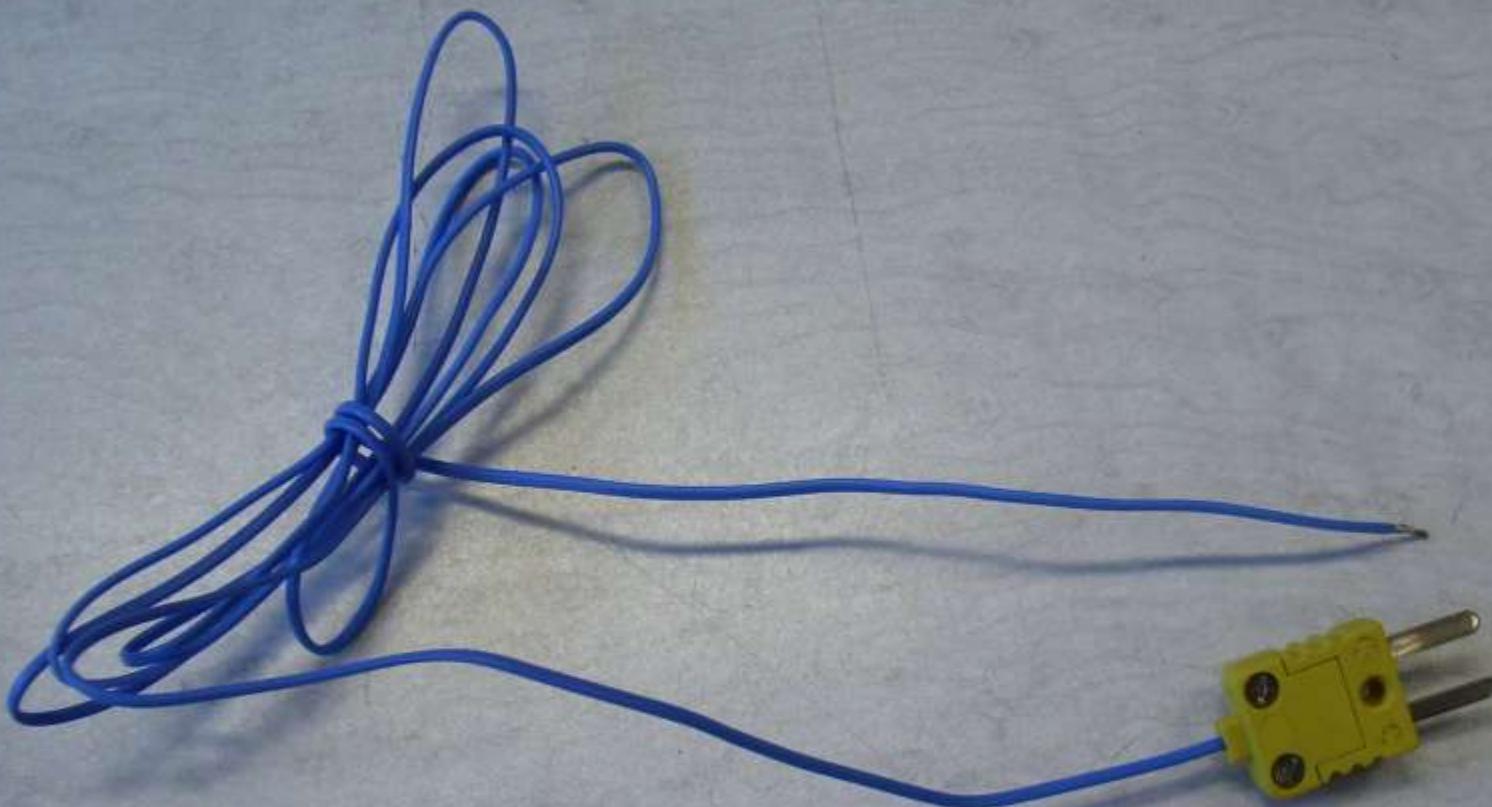


Układy pomiaru temperatury termoelementami





Termopara K (Chromel-Alumel NiCr-NiAl) w wykonaniu uniwersalnym





wyprowadzenia zależności - tablica

- prawo trzeciego metalu
- prawo kolejnych temperatur
- przewody kompensacyjne

Rezystancyjne czujniki temperatury

- Czujniki metalowe (Platyna, Miedź, Nikiel)
- Termistory półprzewodnikowe (NTC, PTC)
 - wykonane z tlenków metali
- Półprzewodnikowe

Czujnik platynowy (PT100)

W zakresie -200°C do 0°C

$$R_{Pt}(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^4)$$

W zakresie od 0°C do 850°C

$$R_{Pt}(T) = R_0(1 + AT + BT^2)$$

R_0 – opór nominalny rezystora termometrycznego w temperaturze 0°C (100Ω dla Pt100),

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1},$$

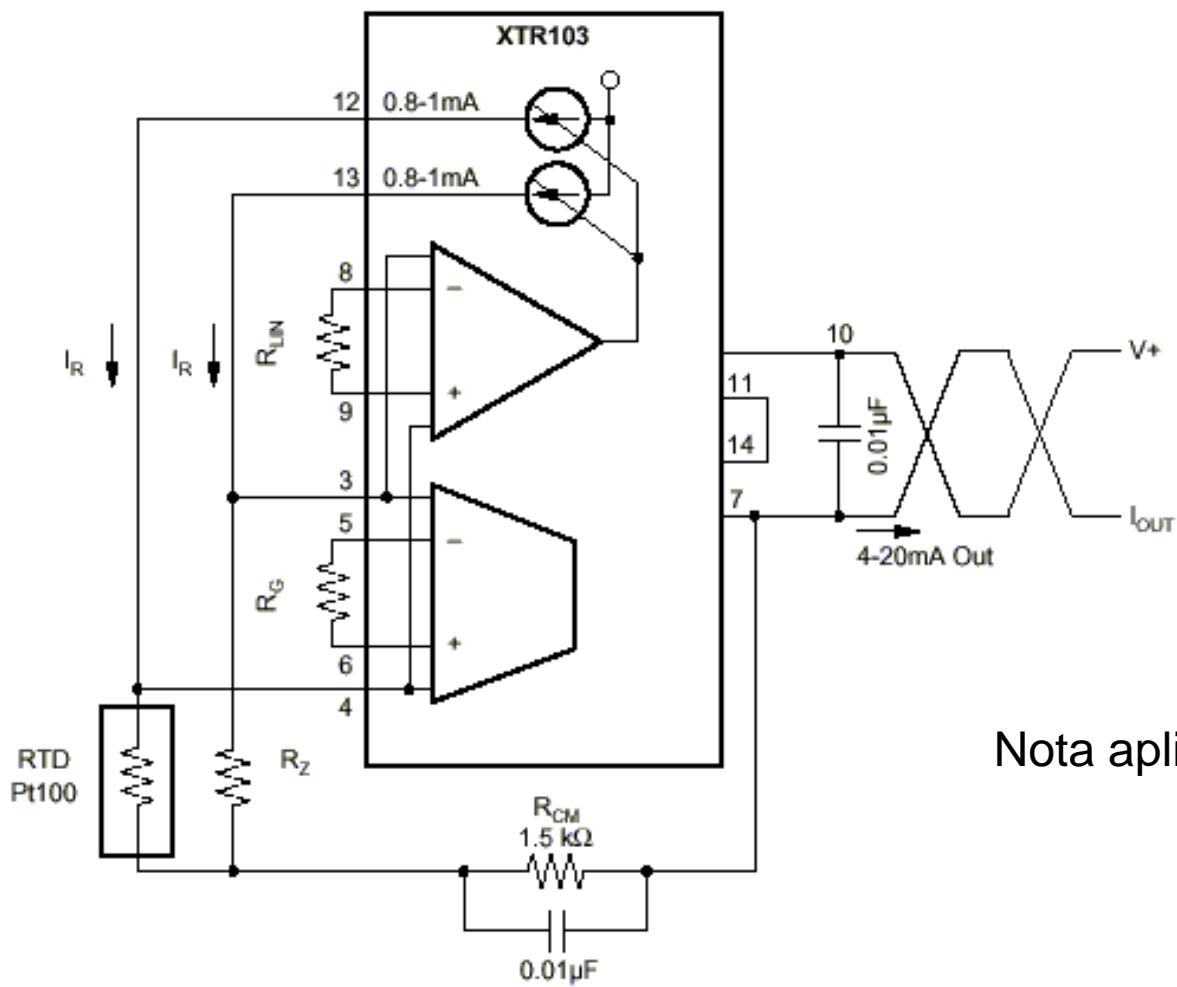
$$B = -5,802 \cdot 10^{-7} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-4}$$

Czujnik platynowy (PT100) - wykresy

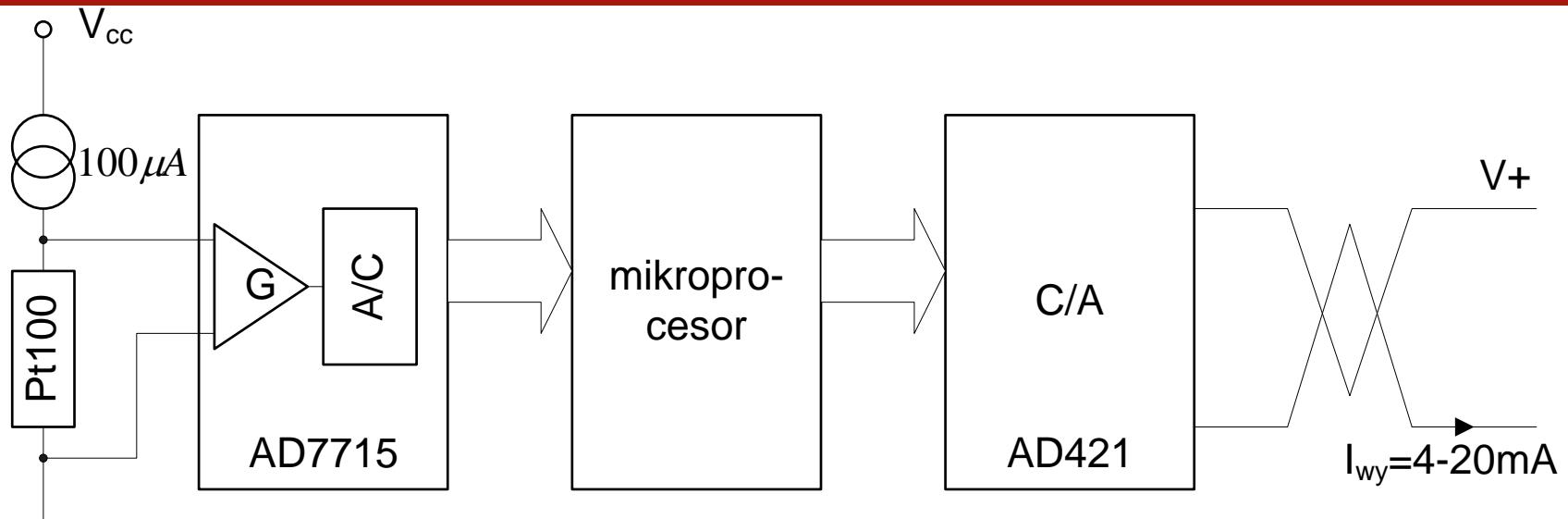
Plik mathcada: pt100

Analogowy linearyzator XTR103 firmy Burr-Brown do czujnika termometrycznego Pt100



Nota aplikacyjna XTR103

Cyfrowy linearyzator do czujnika termometrycznego Pt100 - przykład realizacji



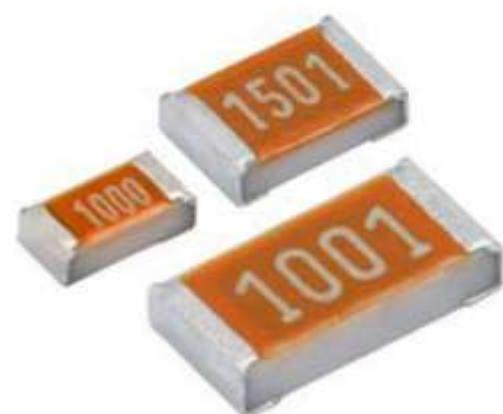
$$T(R_{Pt}) = 3367,821 - \sqrt{13065750 - 17235,44R_{Pt}}$$

$$R_{Pt} \cdot I_z = \frac{U_{ref}}{2^{16} \cdot G} D$$

$$DC = T \cdot \frac{2^{16}}{T_g - T_d}$$

$$DC = 275892 - 8\sqrt{1370043187 - 10772 \cdot D}$$

Czujnik niklowy - wykresy



Pliki – noty aplikacyjne

Termistor NTC

$$R_T = R_{25} e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298,15} \right)}$$

B-stała zależna od materiału termistora

$$B_{25/85} = \ln \left(\frac{R_{85}}{R_{25}} \right) / \left(\frac{1}{358,15} - \frac{1}{298,15} \right)$$

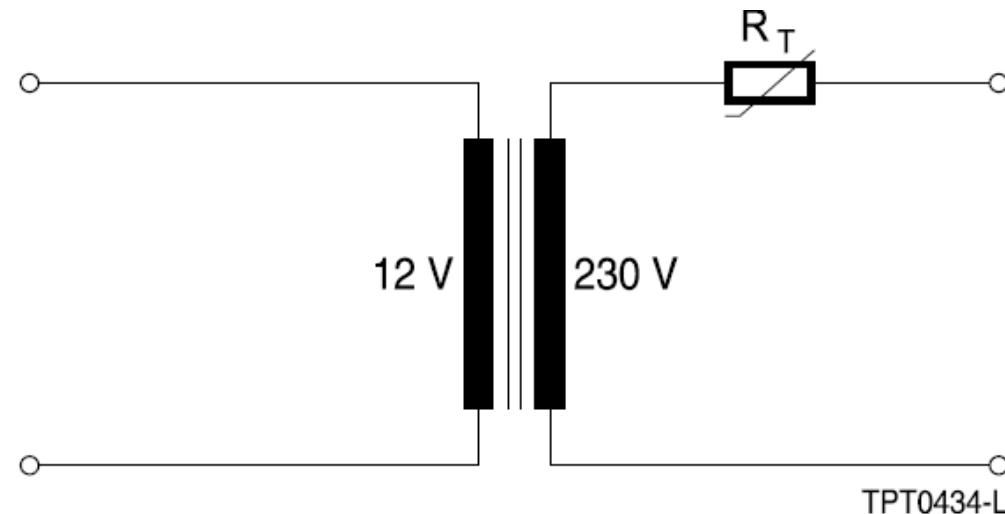
Plik mathcada – termistor.mcd

Termistor PTC

Plik PTC_OC_Leaded_230V_C_B598_C810_C890.pdf

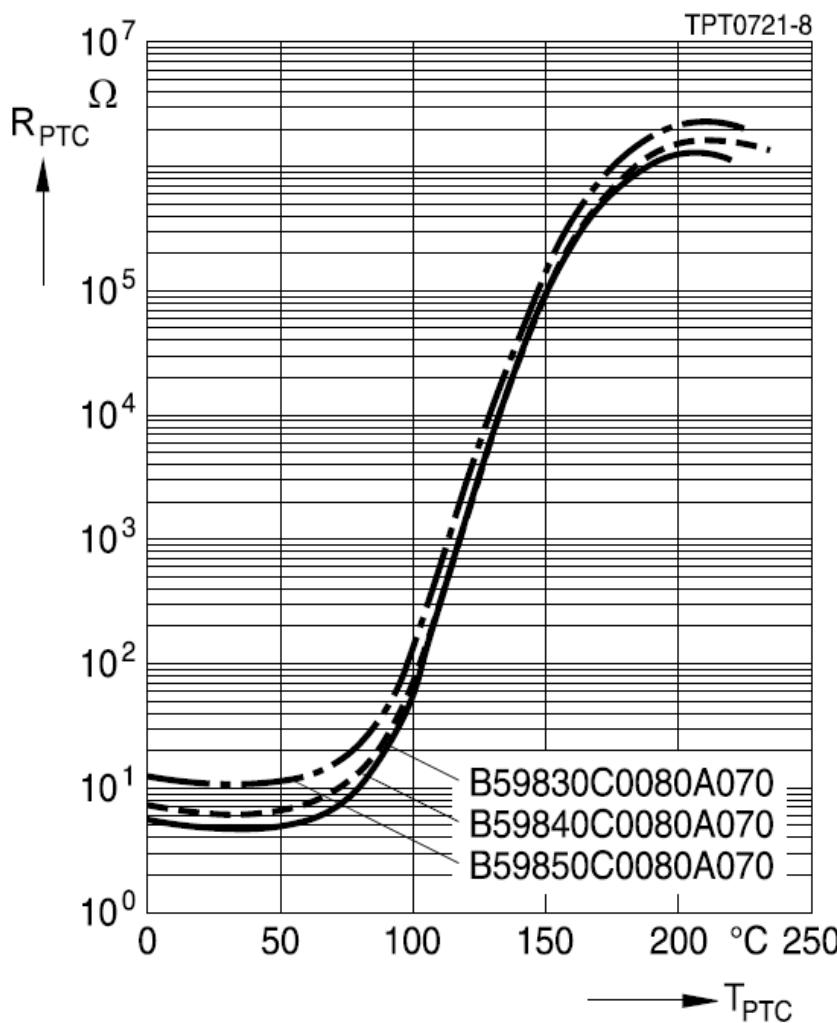
Termistor PTC - zastosowania

- Bezpiecznik – (zwarcia, przeciążenia)
- Rozruch silników
- Przełączanie
- Termostat
- Pomiar temperatury

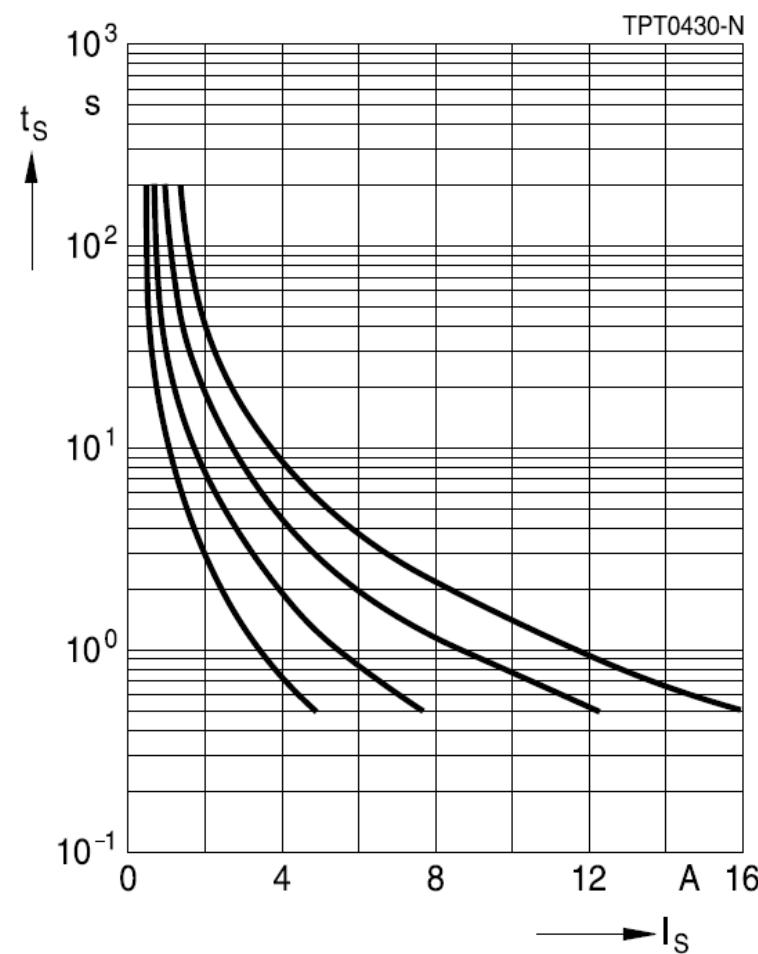




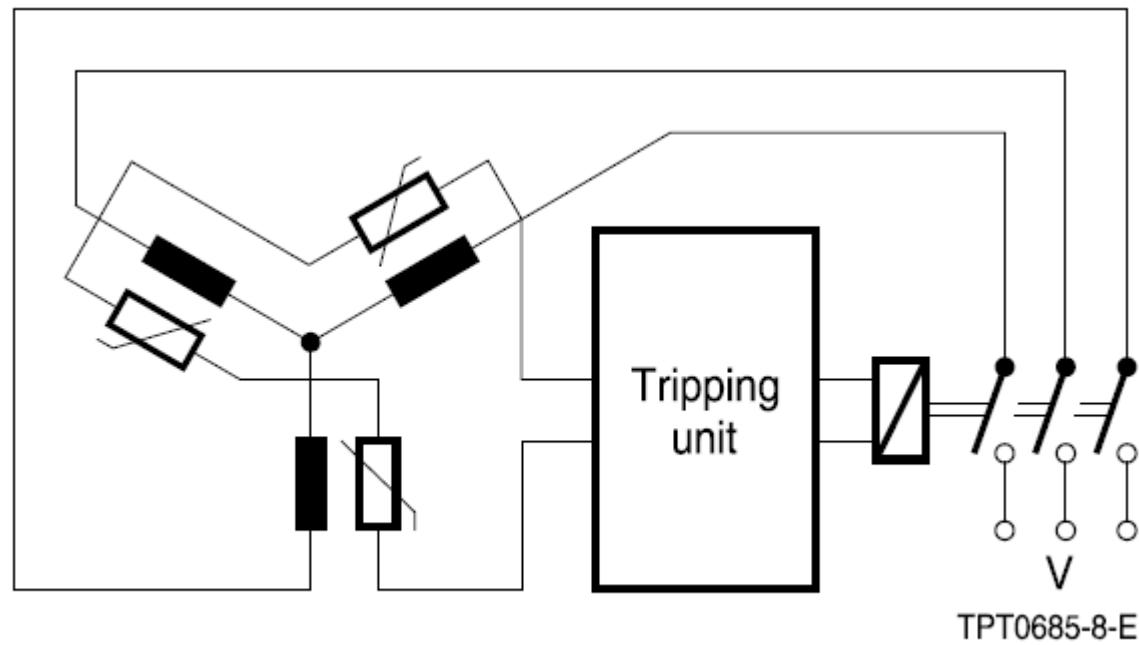
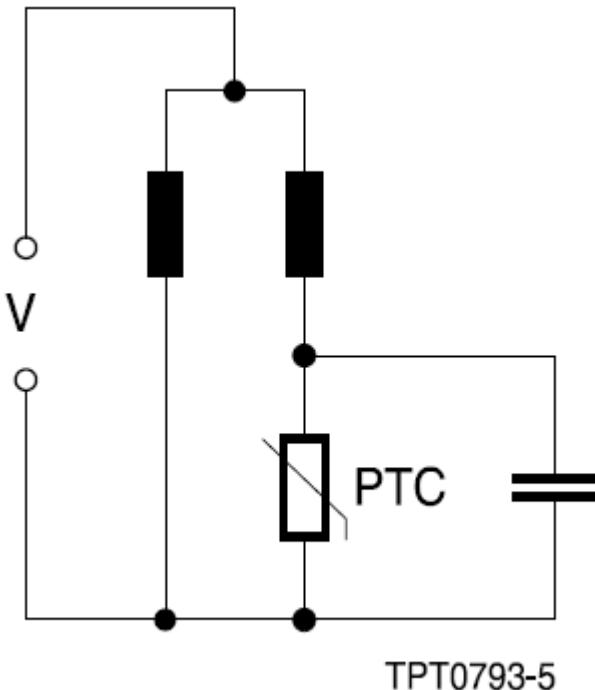
Termistor PTC - zastosowania



Pliki z notami pdf

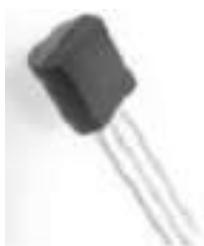


Termistor PTC - zastosowania



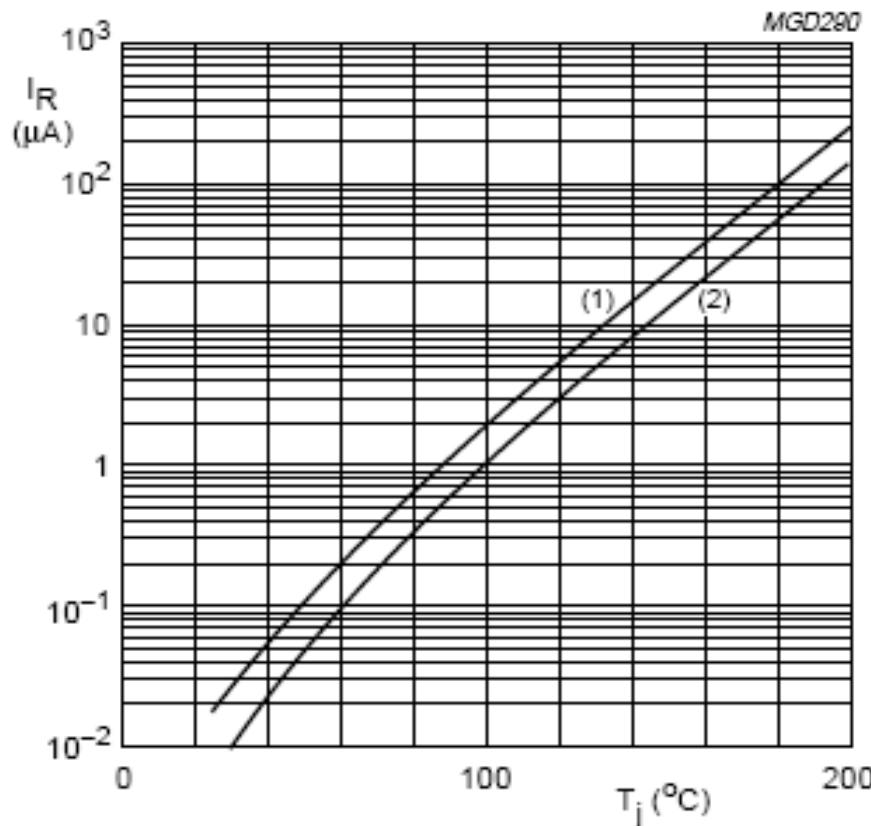
Półprzewodnikowe czujniki temperatury

- Diody
- Tranzystory
- Scalone czujniki temperatury z wyjściami analogowymi lub cyfrowymi





Dioda - złącze pn



- (1) V_R = 75 V; typical values.
- (2) V_R = 20 V; typical values.

$$I_F = I_R \exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$$

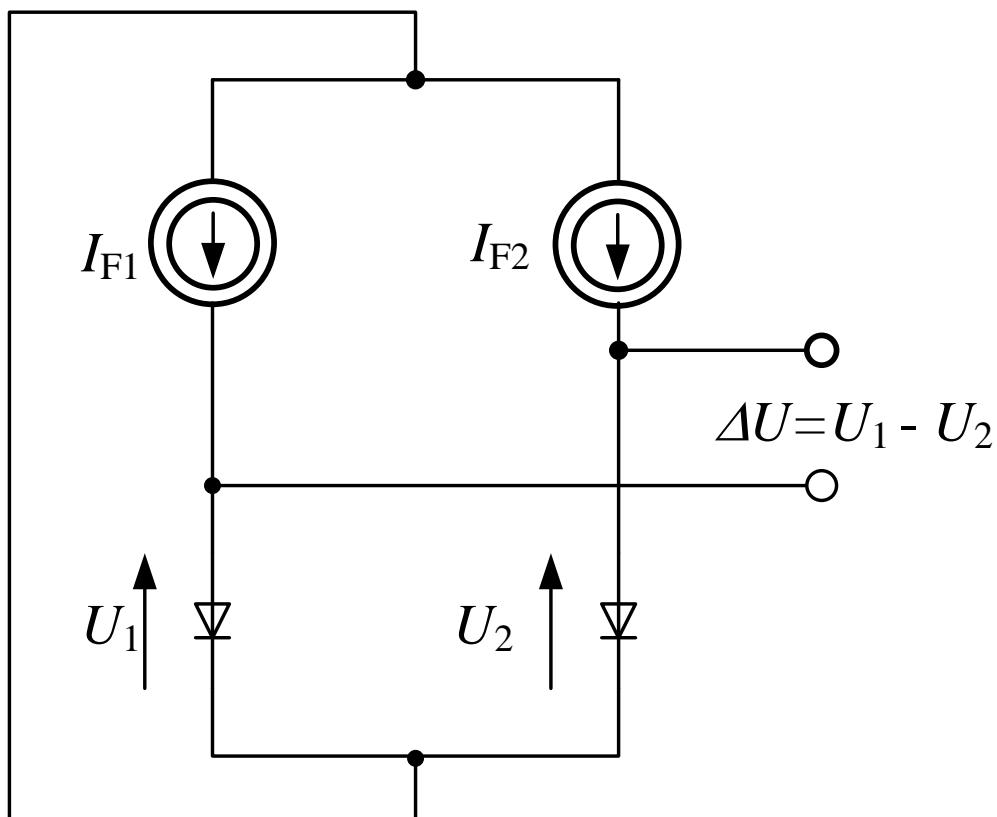
e - ładunek elektronu = $1.6 * 10^{-19}$ C
 k - stała boltzmana = $1.3804 * 10^{-23}$ J/K
 T – temperatura w K

$$I_R = B \exp\left(\frac{W_0}{kT}\right)$$

B – stała materiałowa
 W_0 – energia warstwy zabronionej

$$I_F = B \exp\left(\frac{eU}{kT} + \frac{W_0}{kT}\right)$$

Dioda - złącze pn



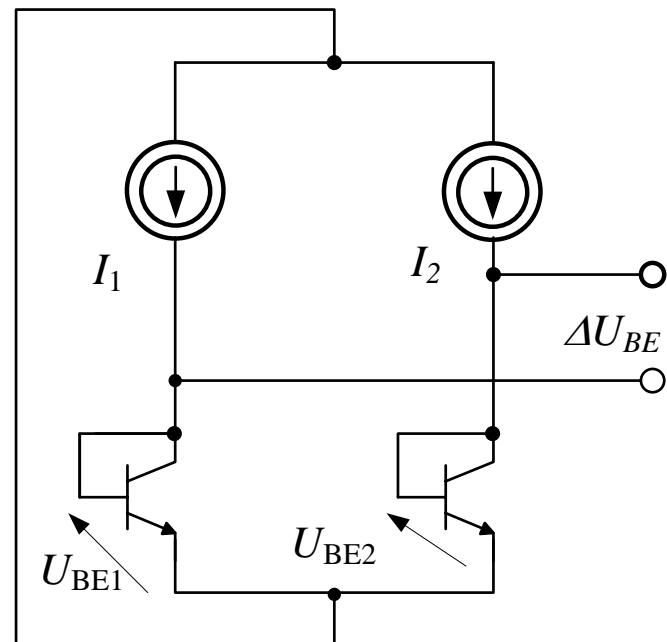
$$U_1 = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_{F1}}{B} - \frac{W_0}{e}$$

$$U_2 = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_{F2}}{B} - \frac{W_0}{e}$$

$$\Delta U = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_{F1}}{I_{F2}}$$

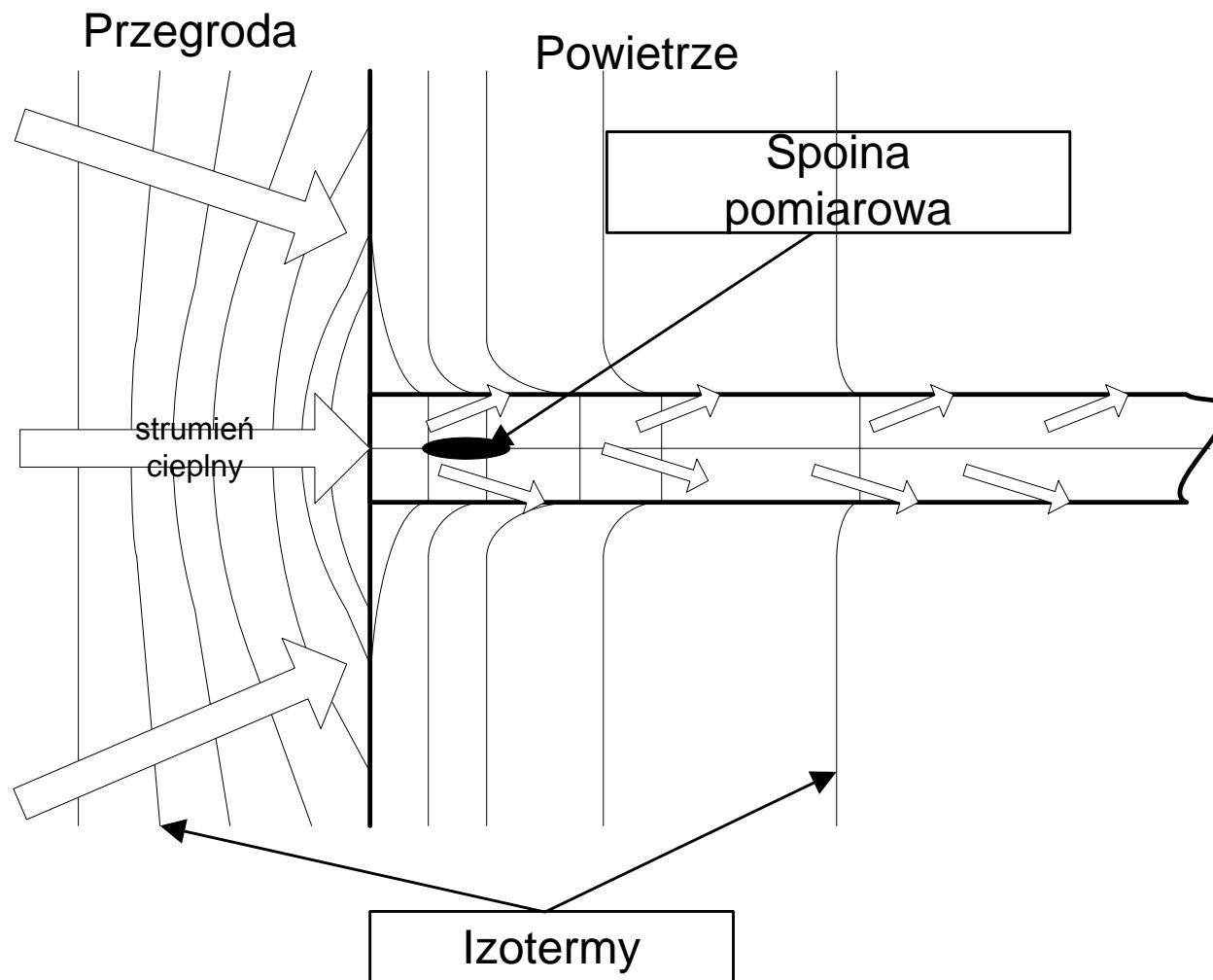
Scalone czujniki temperatury

- Wyjście analogowe np.
 $10\text{mV}/^\circ\text{C}$
- Wyjście cyfrowe:
 - zmienna częstotliwość
 - wypełnienie przebiegu PWM
 - magistrala szeregowa (i2c, spi, 1wire)

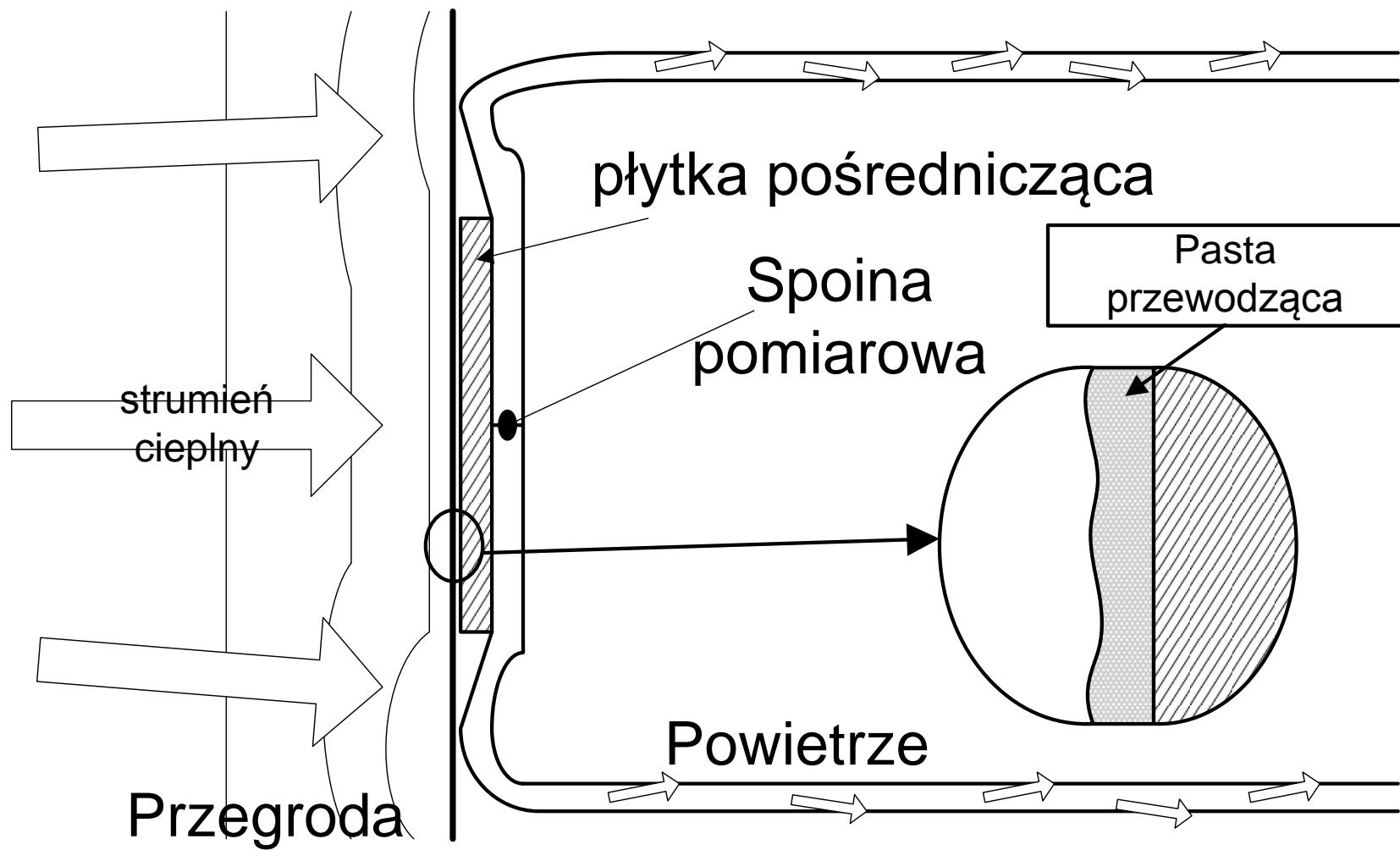




Stykowy pomiar temperatury

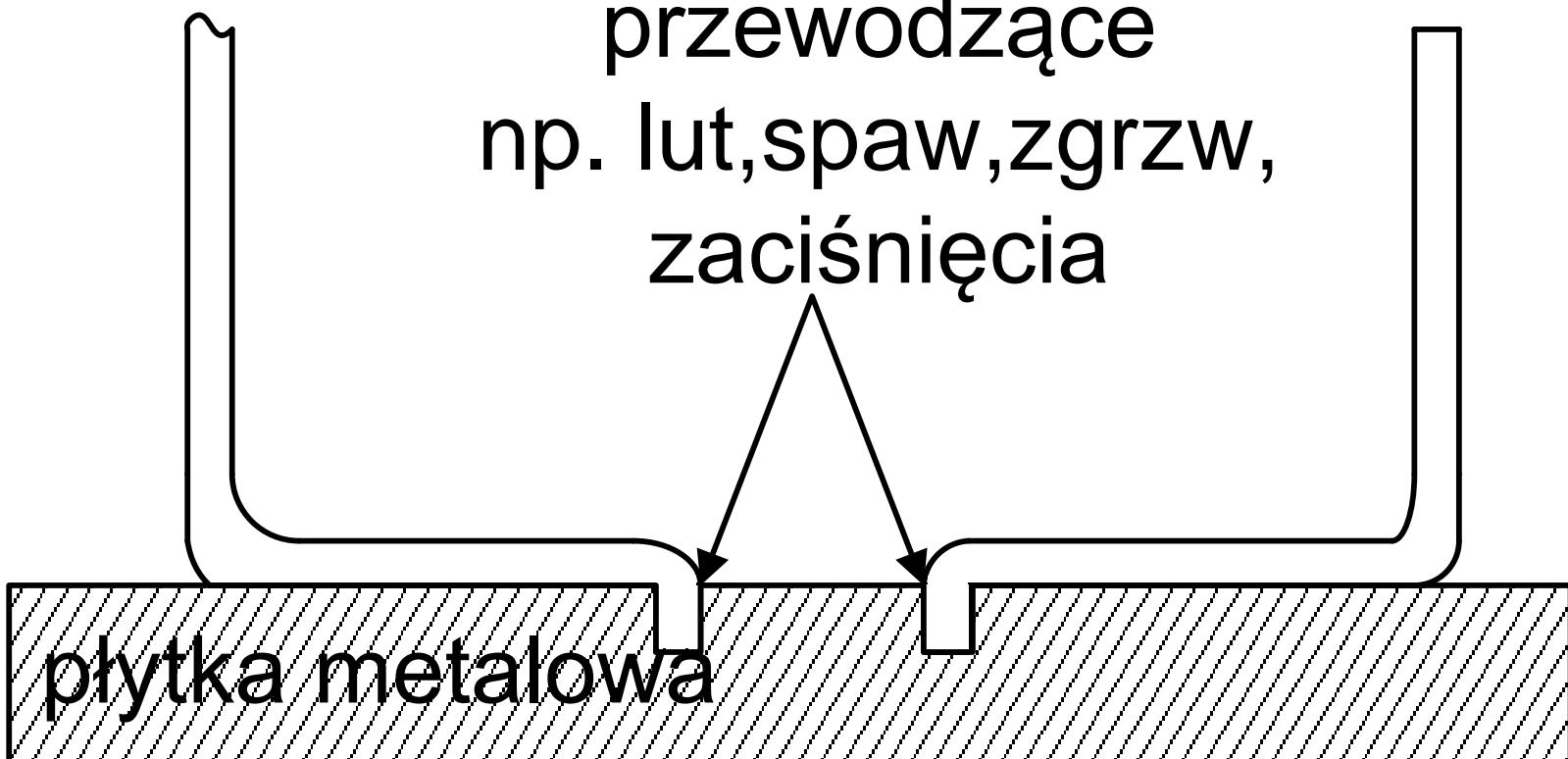


Zmniejszanie błędów przy stykowym pomiarze temperatury



Zmniejszanie błędów przy stykowym pomiarze temperatury - 2

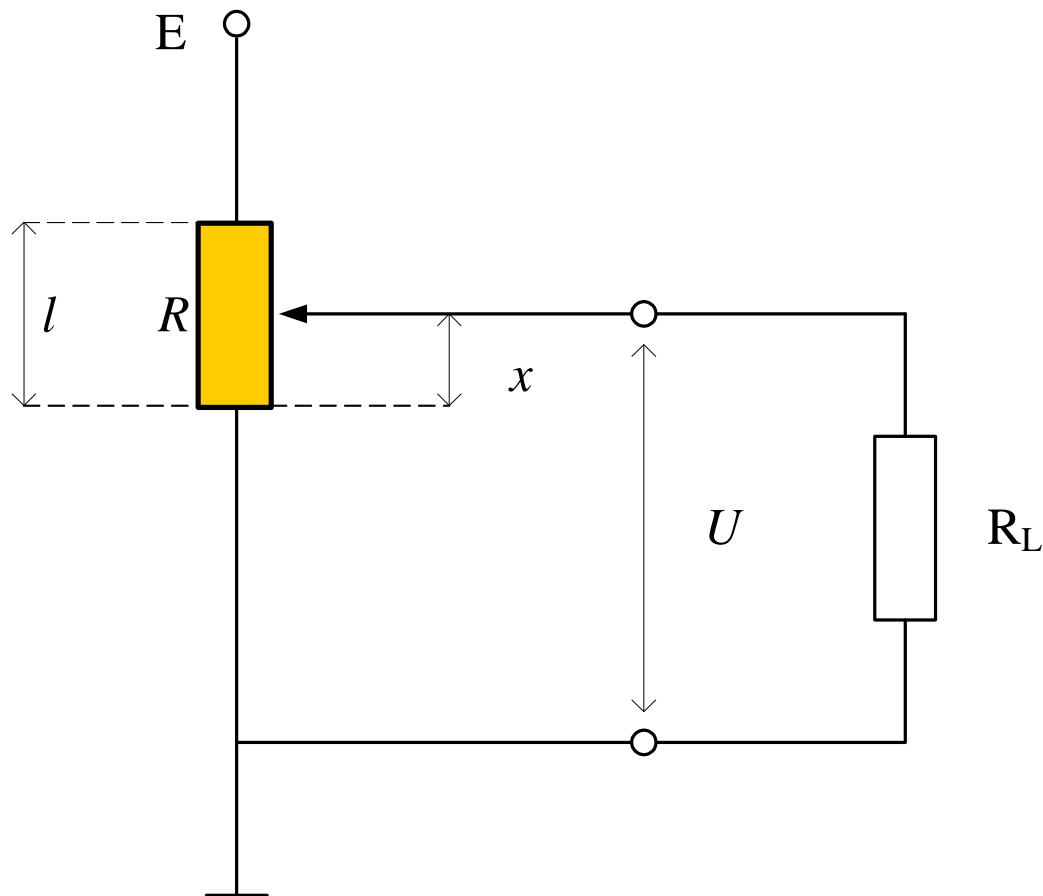
połączenie
przewodzące
np. lut, spaw, zgrzw,
zaciśnięcia



Pomiar przesunięcia liniowego i kątowego

- Pojemnościowe
- Indukcyjne
- Transformatory LVDT i RVDT
- Rezystancyjne
- Optyczne
- Ultradźwiękowe
- Cyfrowe (enkodery)

Rezystancyjny czujnik przemieszczenia liniowego



Dla $R_L \rightarrow \infty$

$$x = k = \frac{U}{E}$$

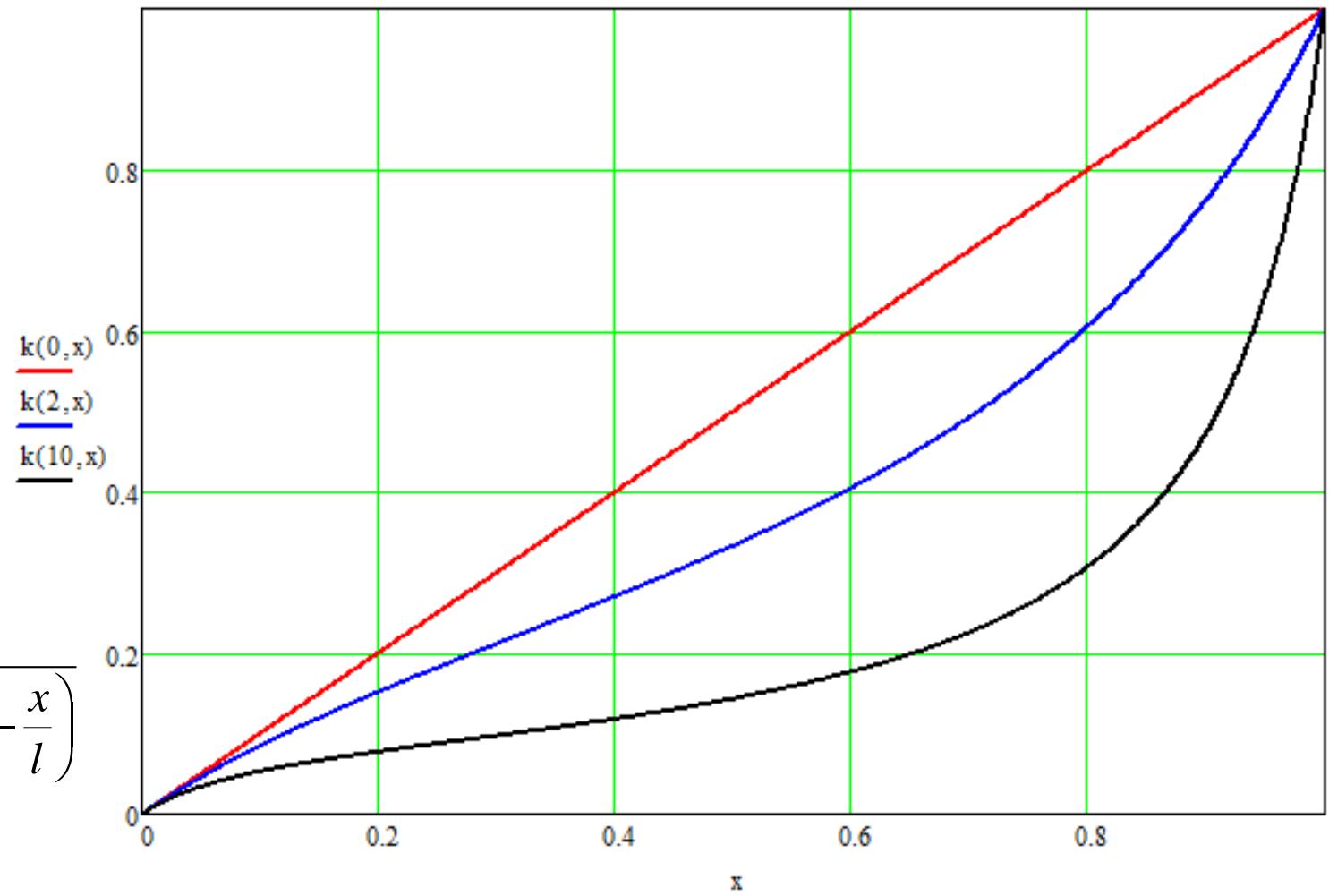
R_L – rezystancja
wejściowa układu
pomiaru napięcia

$$k = \frac{U}{E} = \frac{1}{\frac{l}{x} + \frac{R}{R_L} \left(1 - \frac{x}{l}\right)}$$

Błąd pomiaru rezystancyjnym czujnikiem przemieszczenia liniowego

$$b = \frac{R}{RL}$$

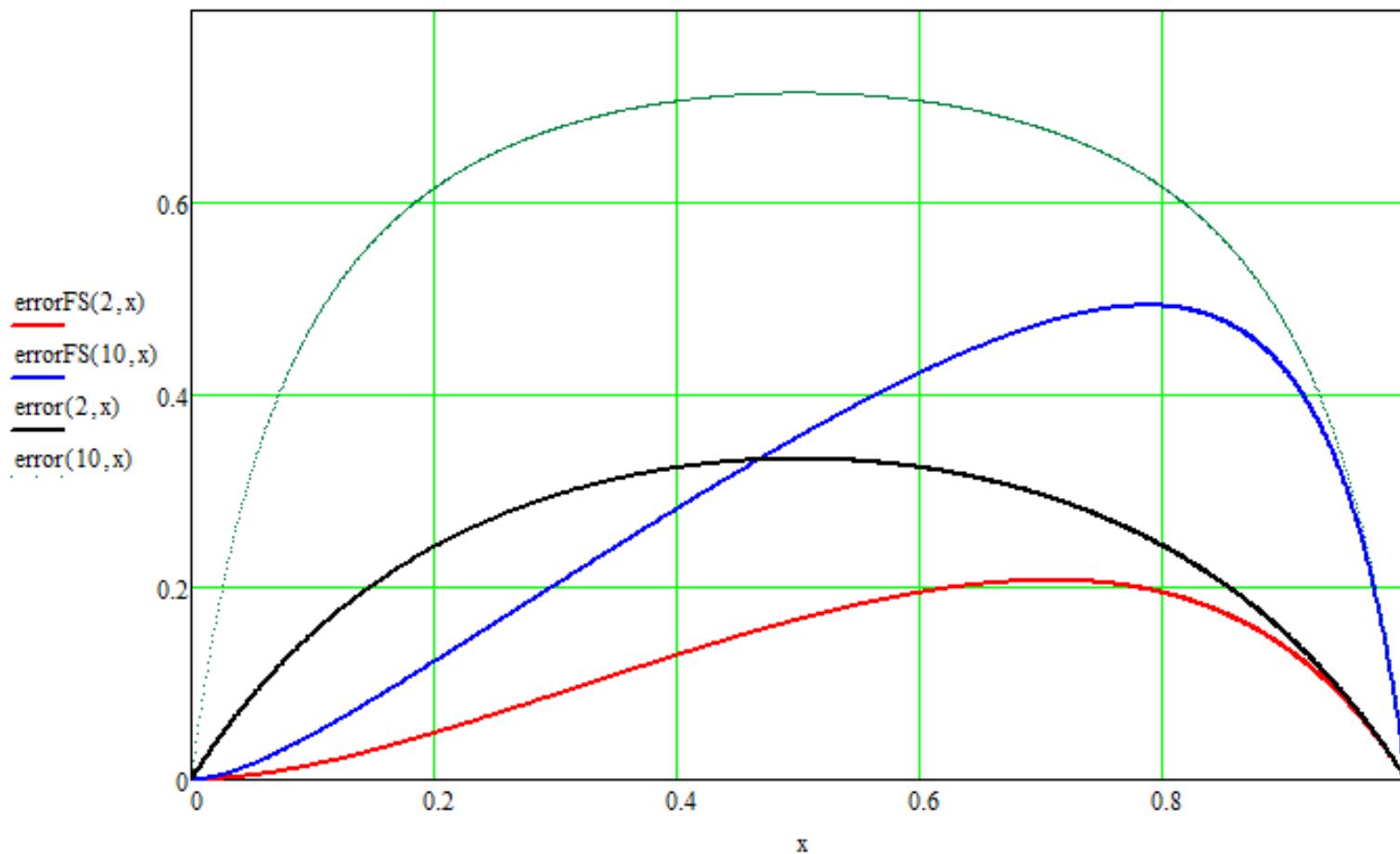
$$k = \frac{U}{E} = \frac{1}{\frac{l}{x} + b \left(1 - \frac{x}{l}\right)}$$



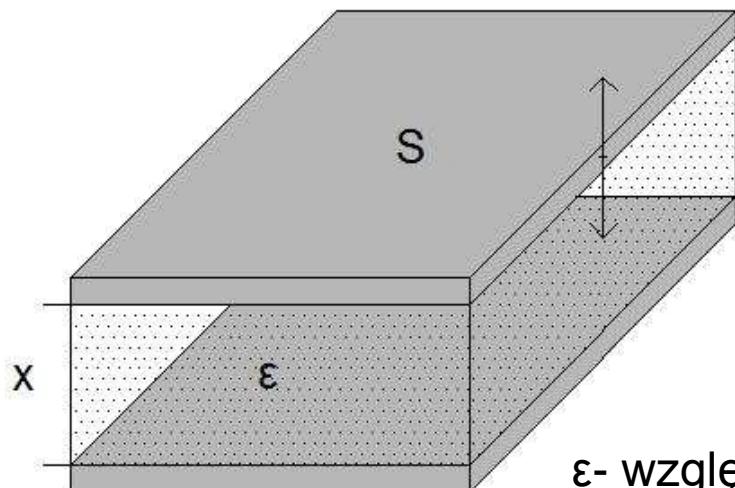
Błąd pomiaru rezystancyjnym czujnikiem przemieszczenia liniowego

$$\text{errorFS}(b, x) := \frac{x - k(b, x)}{1}$$

$$\text{error}(b, x) := \frac{x - k(b, x)}{x}$$



Czujnik pojemnościowy - zmiana odległości pomiędzy elektrodami



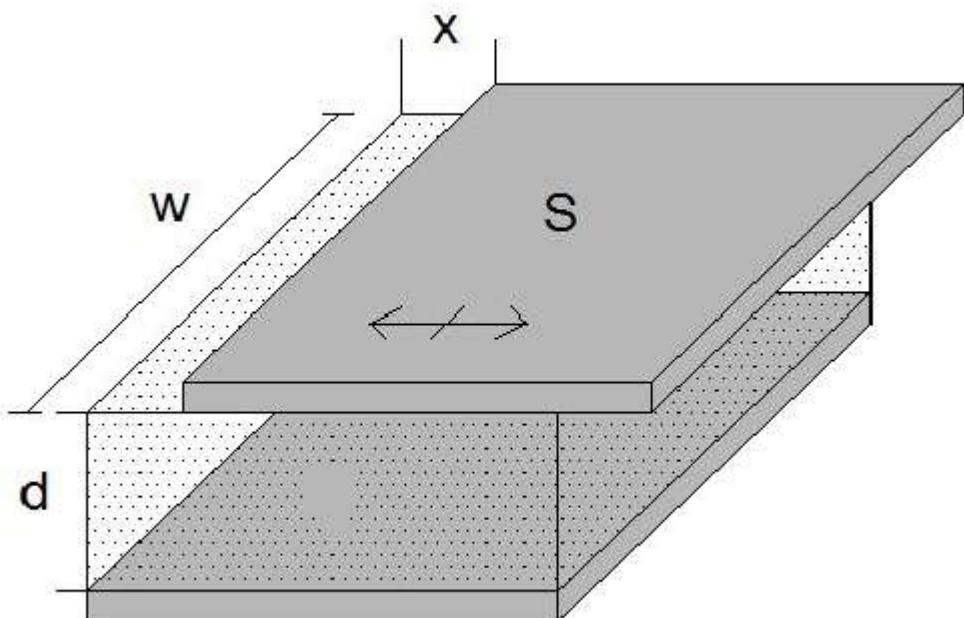
$$C(x) = \epsilon \cdot \epsilon_0 \frac{S}{x}$$

ϵ - względna stała dielektryczna dla danego materiału dielektrycznego

ϵ_0 - przenikalność dielektryczna próżni
($\epsilon_0 = 8,854\,188 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$)

$$\frac{dC}{dx} = -\epsilon \cdot \epsilon_0 \frac{S}{x^2}$$

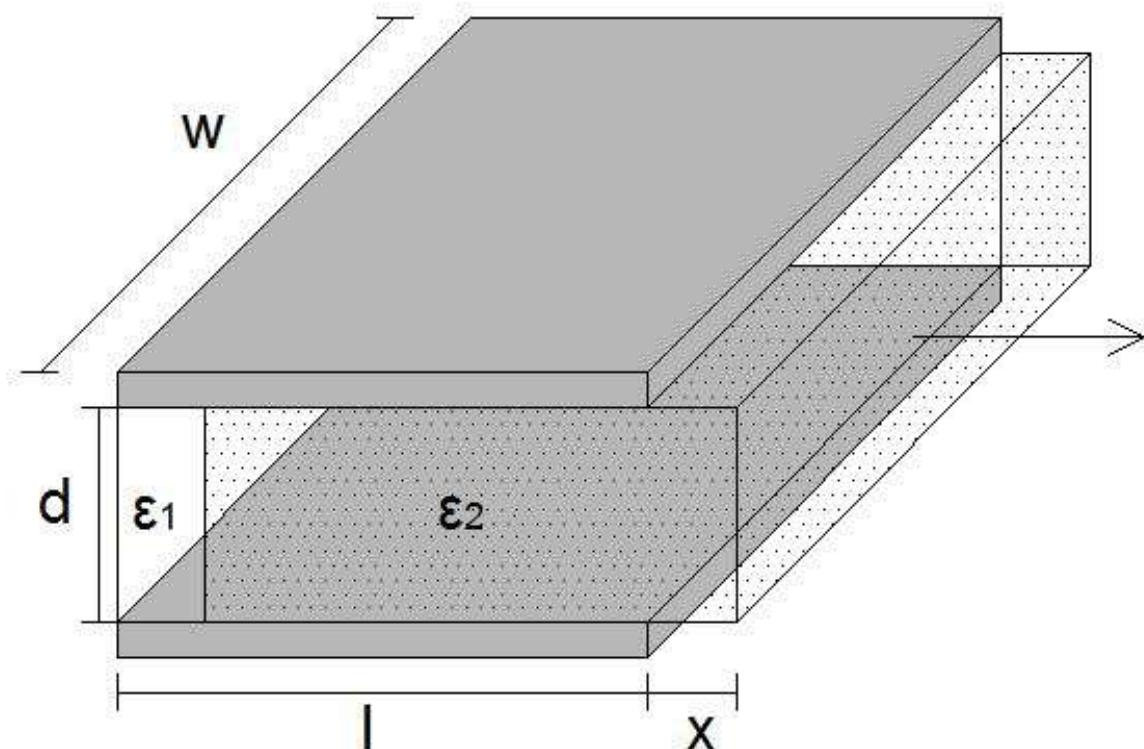
Czujnik pojemnościowy - zmiana powierzchni elektrod



$$C(x) = \epsilon \cdot \epsilon_0 \left(\frac{S - w \cdot x}{d} \right)$$



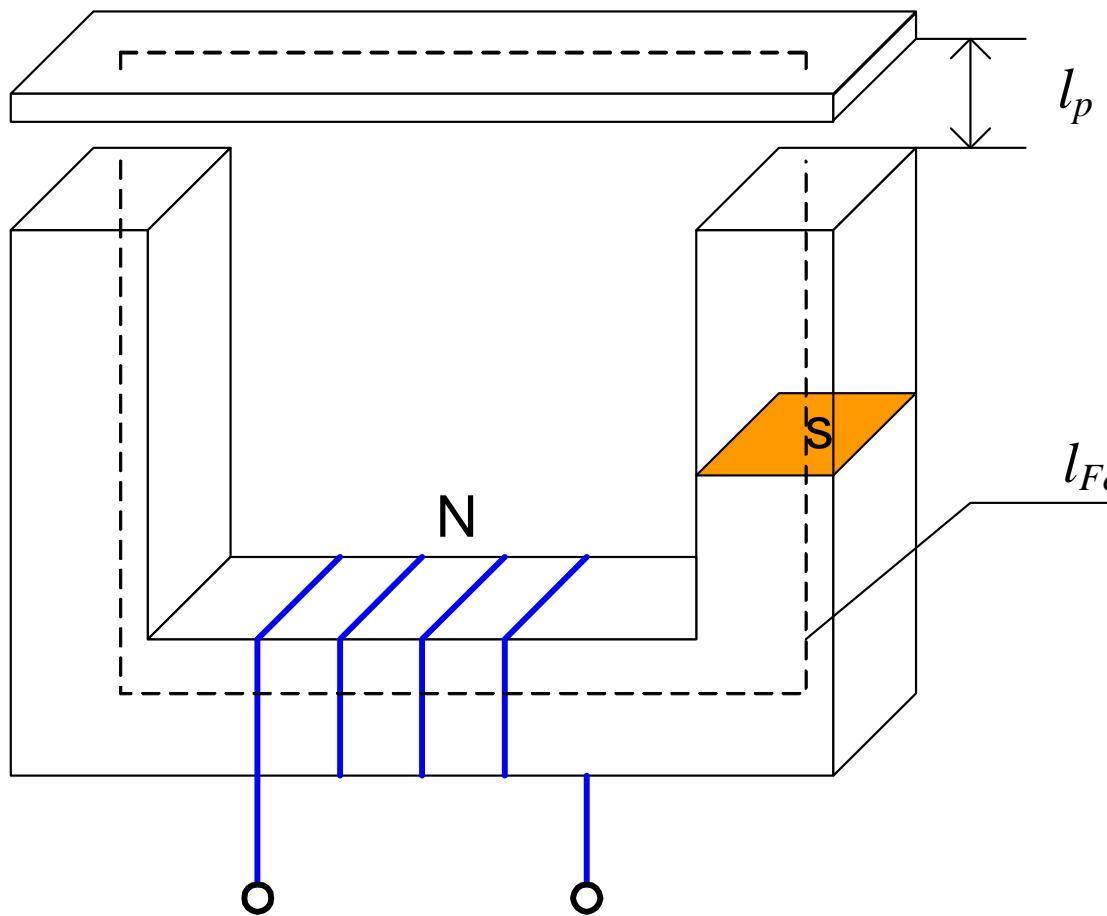
Czujnik pojemnościowy - zmiana materiału dielektrycznego



$$C(x) = \frac{\epsilon_0}{d} (\epsilon_1 \cdot w \cdot x + \epsilon_2 \cdot w(l - x))$$



Indukcyjnościový czujnik przemieszczenia

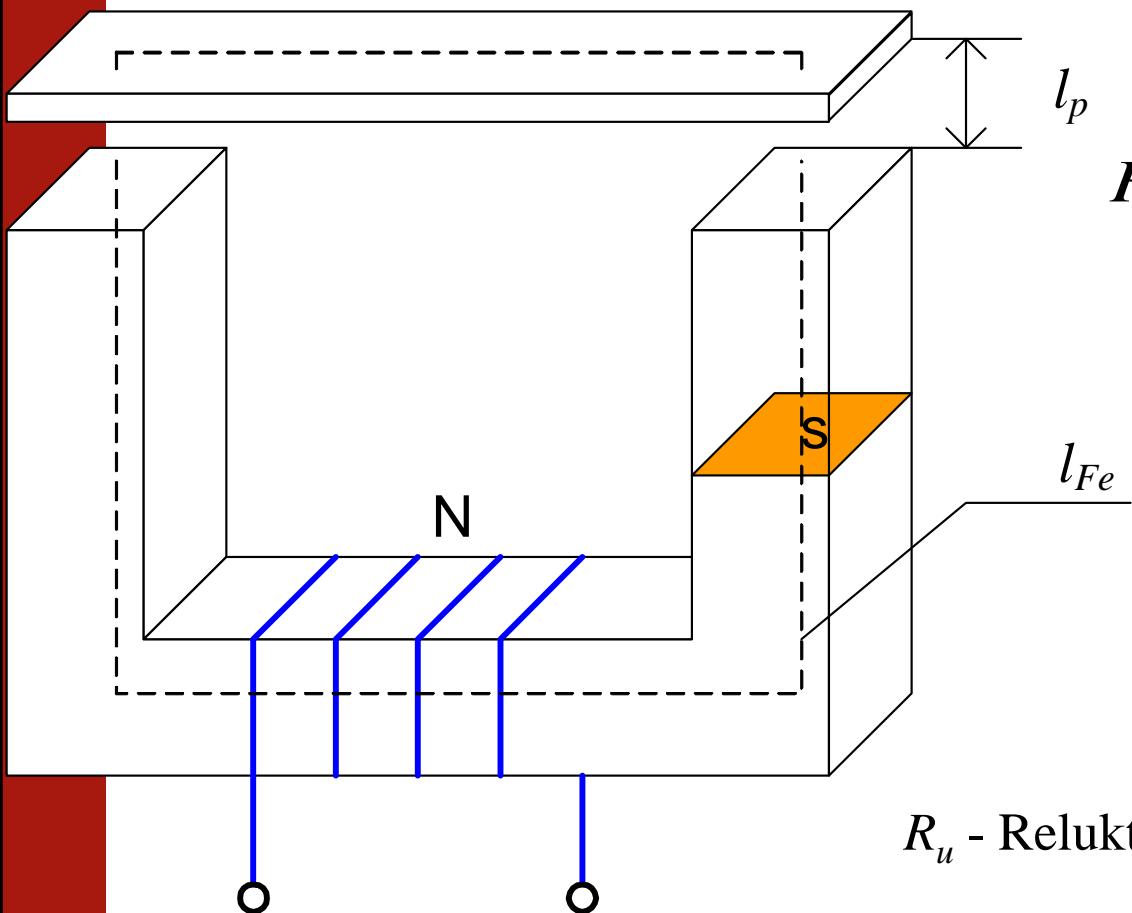


$$L \cong N^2 \frac{\mu_0 \mu S}{l}$$

μ_0 - $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m,
 μ - przenikalność magnetyczna względna,
S – średni przekrój poprzeczny strumienia magnetycznego,
l - średnia długość drogi strumienia magnetycznego



Indukcyjnościowy czujnik przemieszczenia

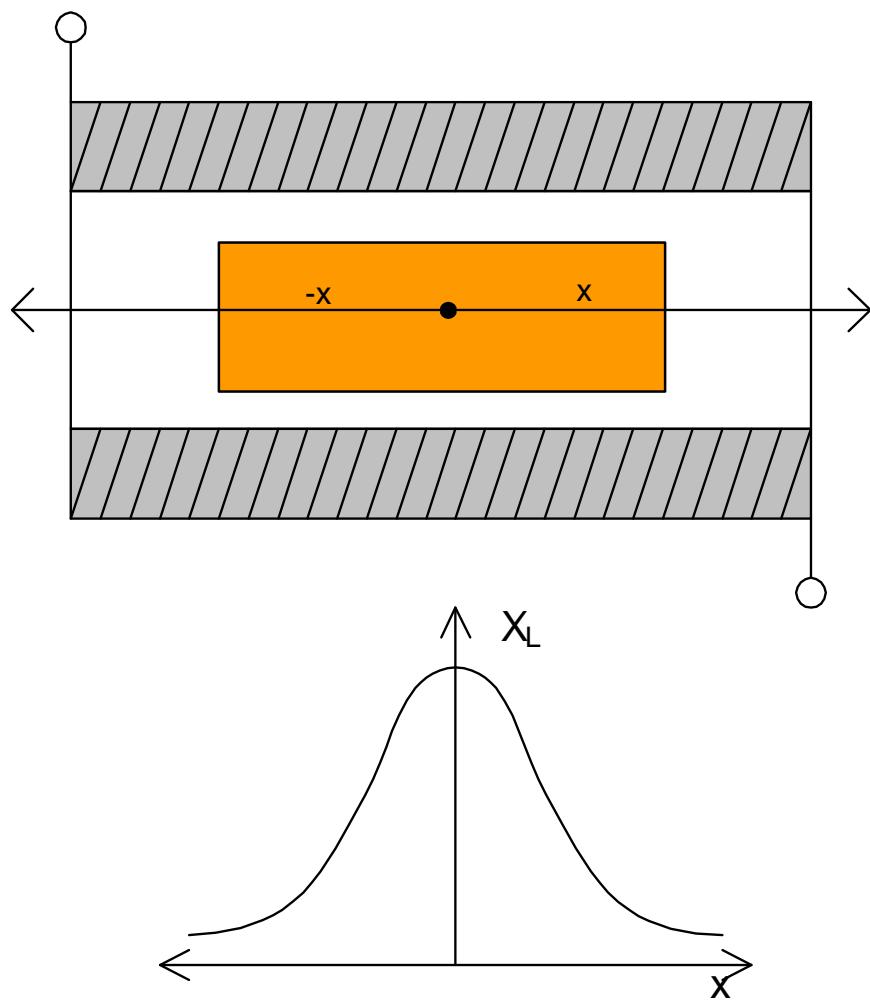


$$R_\mu = 2 \cdot \frac{l_p}{\mu_0 \cdot s} + \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe} \cdot \mu_0 \cdot s}$$

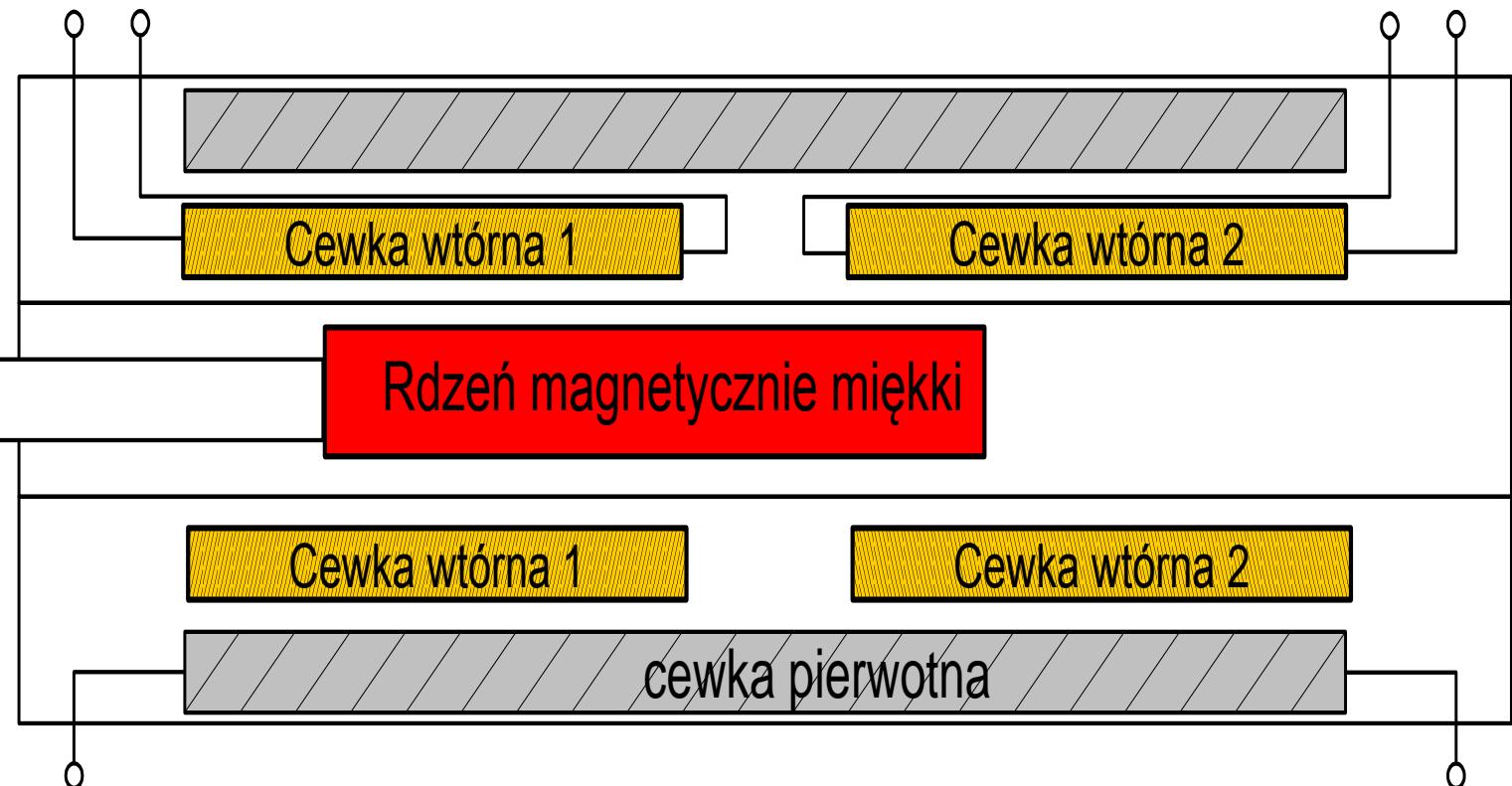
$$L = \frac{N^2}{R_\mu} = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot s}{2l_p + \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}}}$$

R_u - Reluktancja magnetyczna

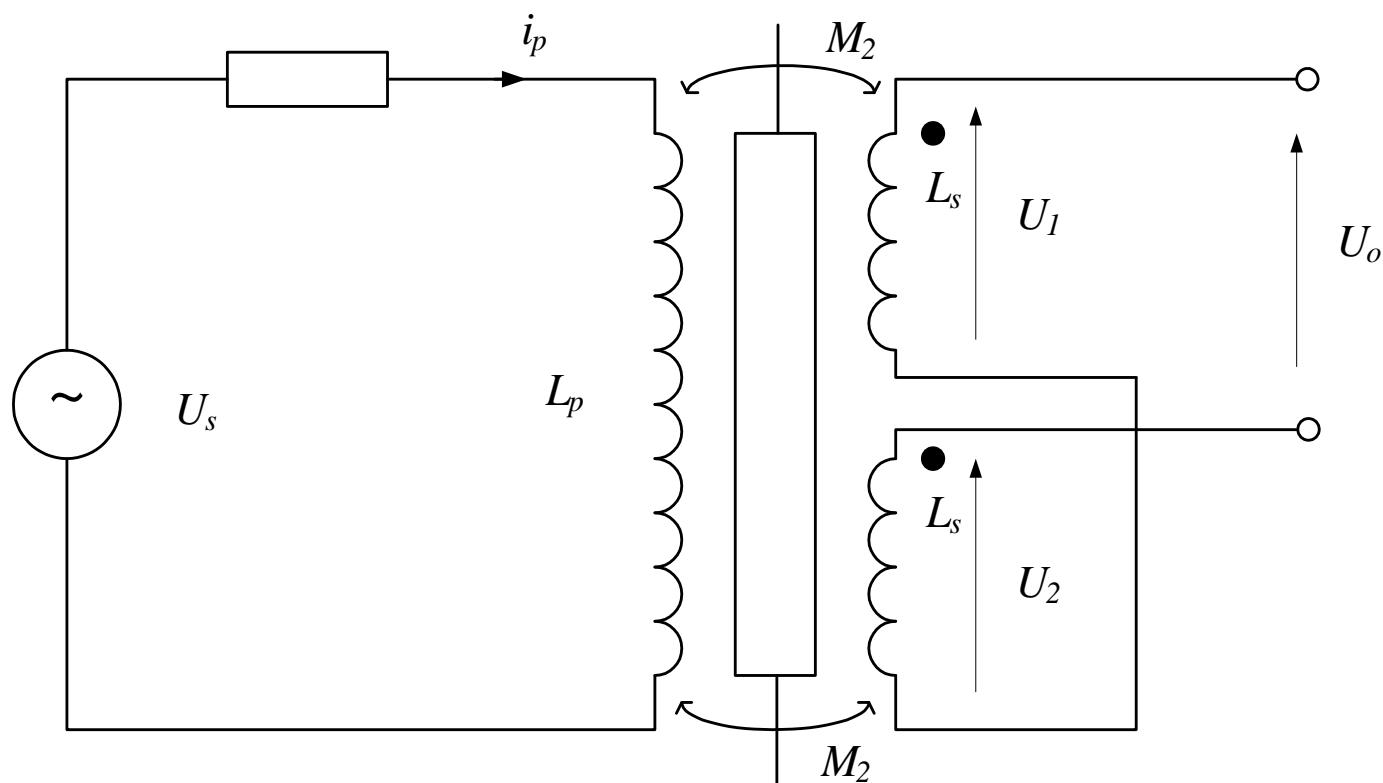
Indukcyjnościowy czujnik przemieszczenia



Transformator różnicowy LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*)

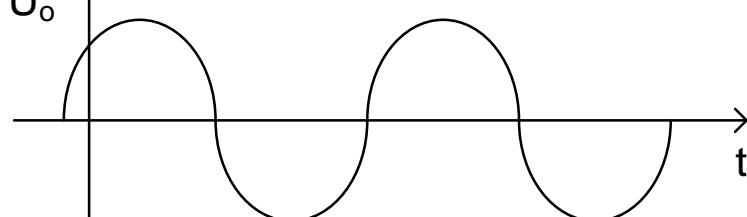
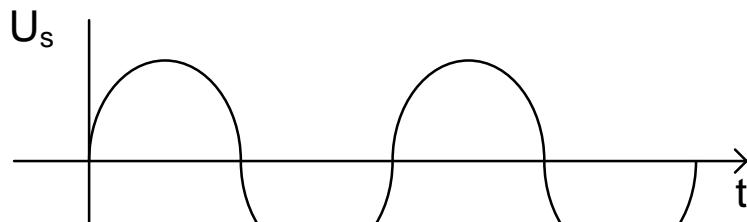


Transformator różnicowy LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

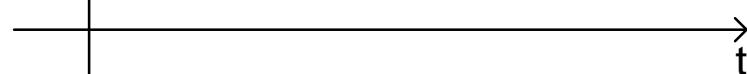




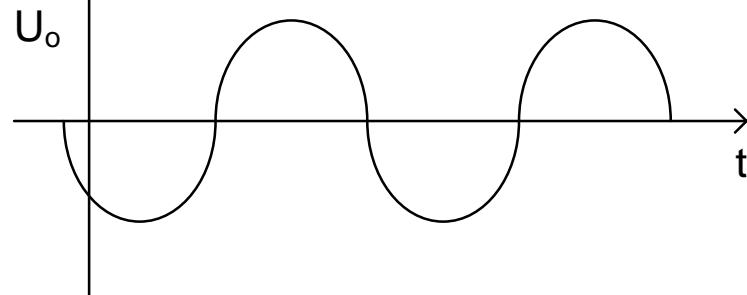
Transformator różnicowy LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*)



Rdzeń przesunięty w
prawo $M_1 > M_2$

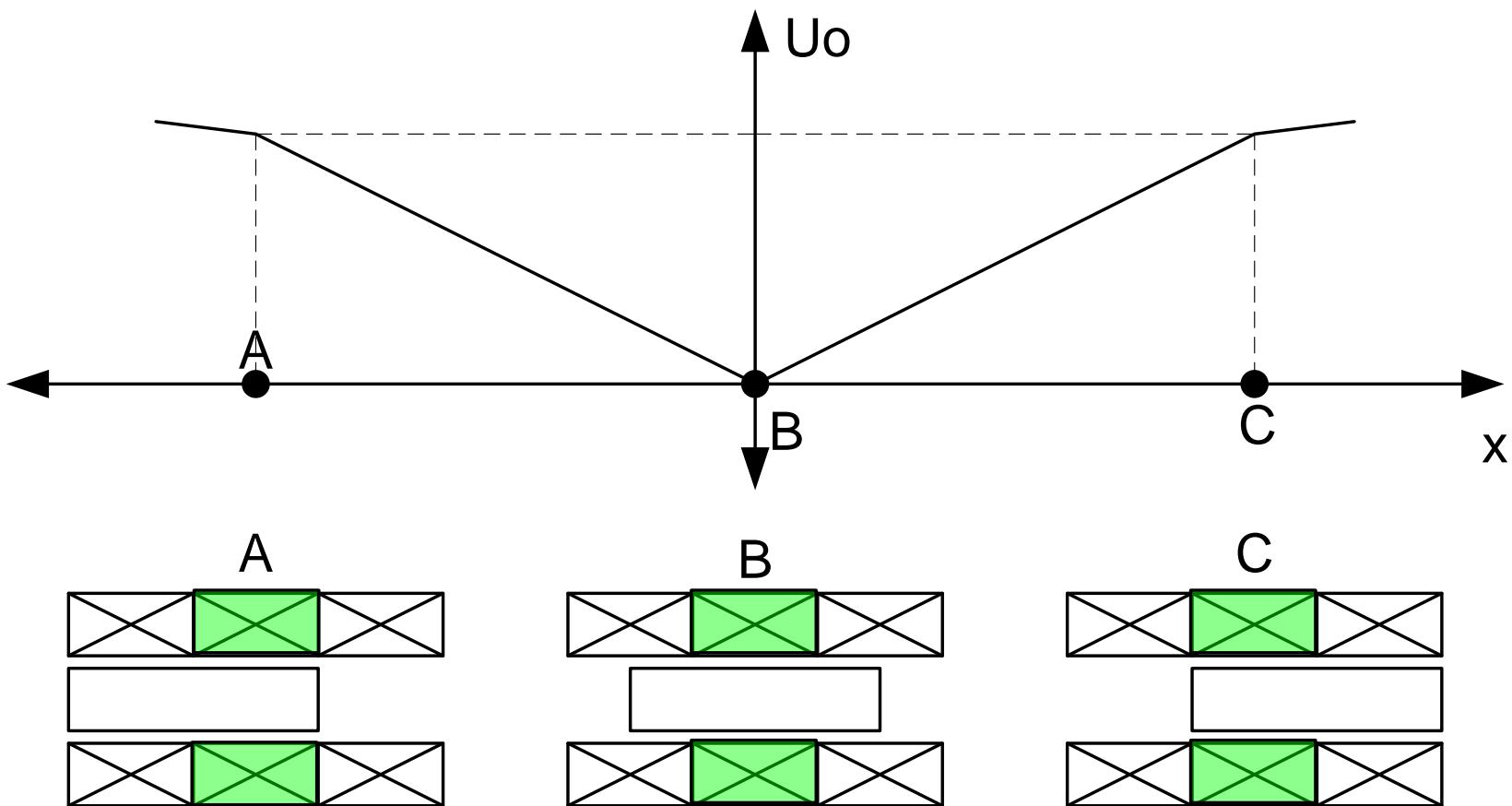


Rdzeń w pozycji
środkowej $M_1 = M_2$



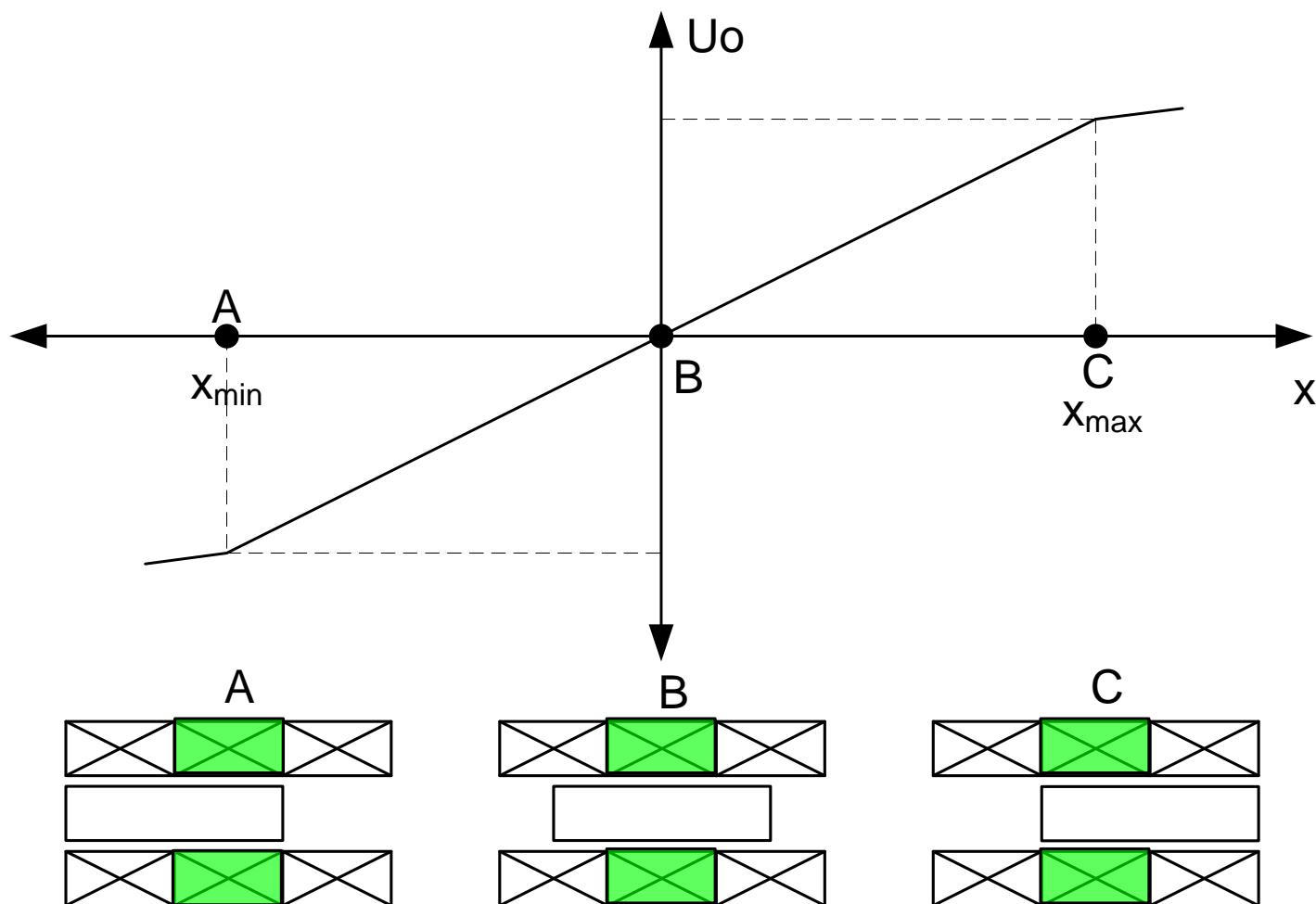
Rdzeń przesunięty w
lewo $M_2 > M_1$

Transformator różnicowy LVDT (Linear Variable Differential Transformer)

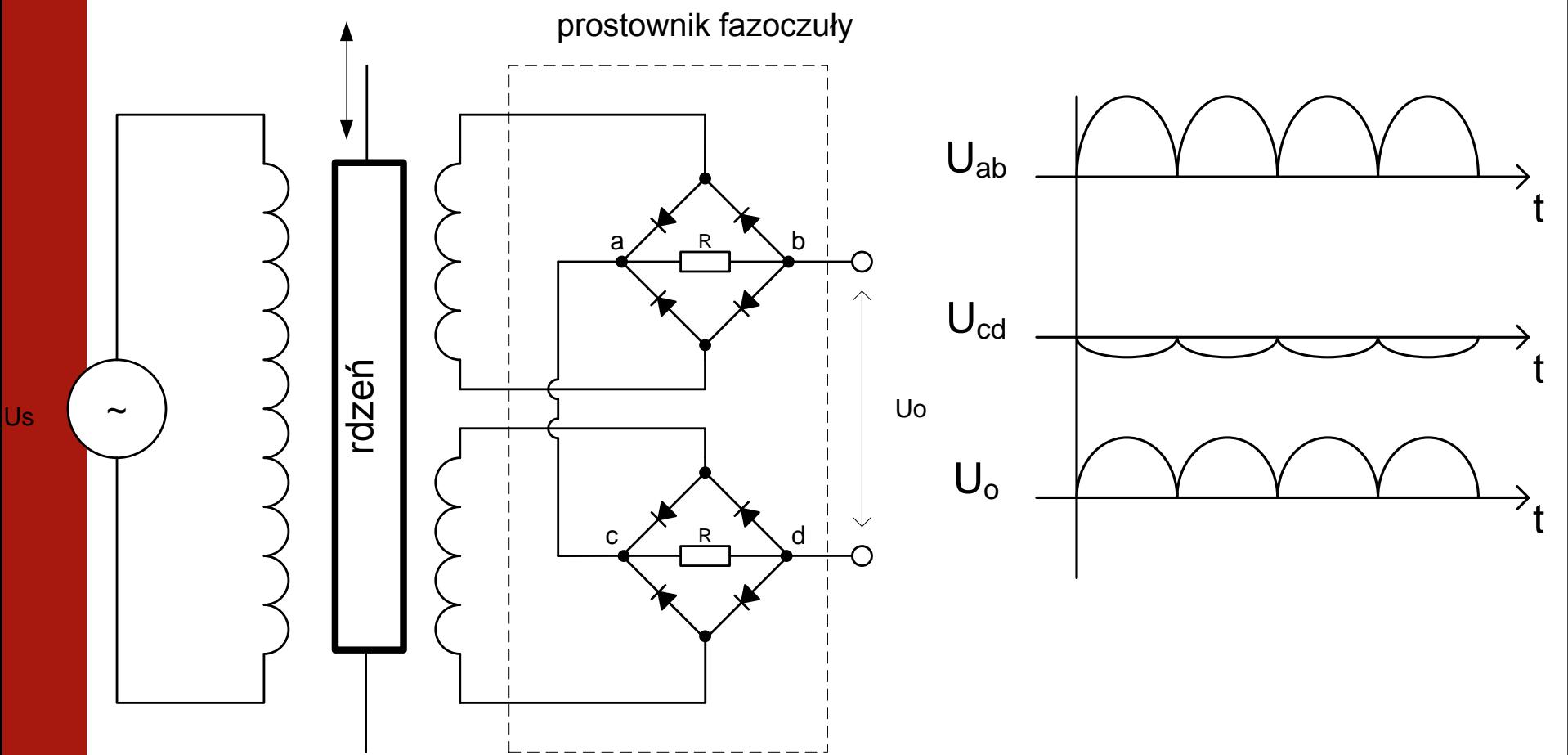




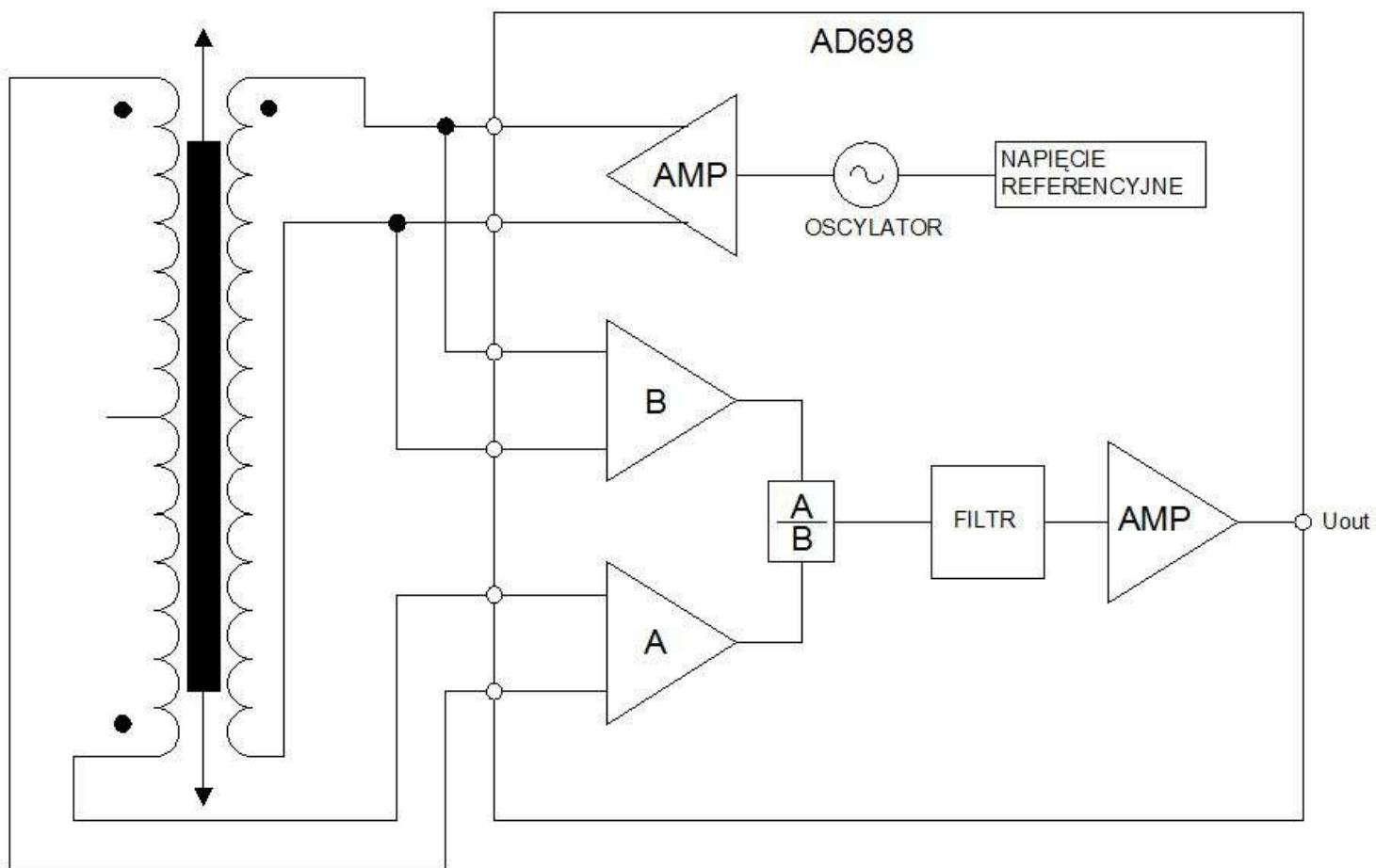
Transformator różnicowy LVDT (Układ z prostownikiem fazoczułym)



Transformator różnicowy LVDT - układ prostownika fazoczułego



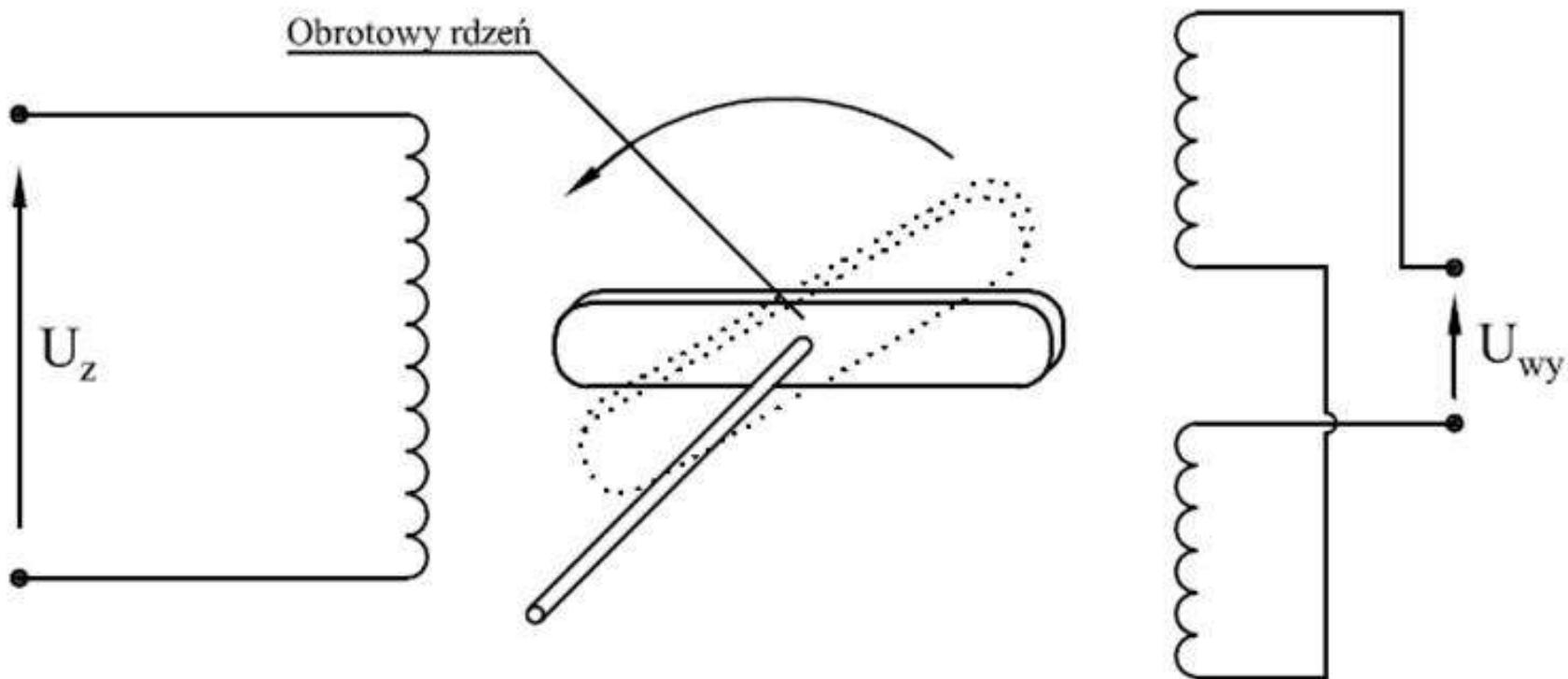
Kondycjoner do LVDT



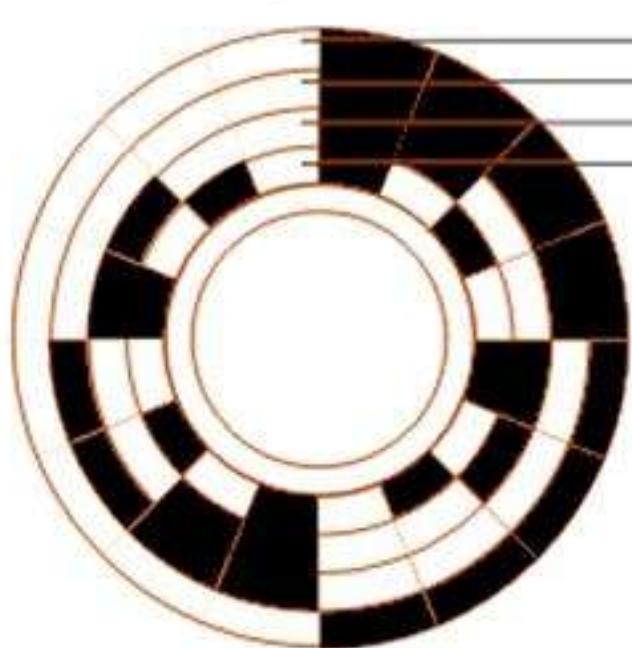
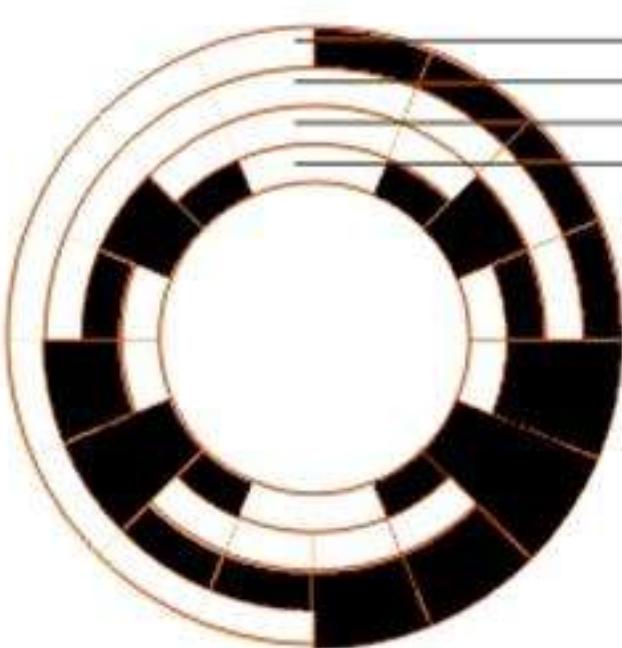
Transformatorowy czujnik przemieszczenia



Transformator różnicowy RVDT (*Rotary Variable Differential Transformer*)



Enkoder absolutny



Kod Gray'a

Wyznaczanie i-tego wyrazu n-bitowego kodu Gray'a

1. Zapisujemy numer i wyrazu kodu Gray'a w naturalnym kodzie dwójkowym na zadanej liczbie bitów. Brakujące bity uzupełniamy bitem 0.
2. Zapisujemy ten sam numer przesunięty w prawo o 1 bit (podzielenie przez 2).
3. Najmniej znaczący bit odrzucamy. Najstarszy bit przyjmuje wartość 0.
4. Nad odpowiadającymi sobie bitami wykonujemy operację logiczną (XOR – suma modulo 2)
5. Otrzymany wynik jest wyrazem w kodzie Gray'a.



Metody badań współczynnika przewodzenia ciepła



Przewodzenie ciepła

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + F$$

T - temperatura ciała o współrzędnych kartezjańskich x, y, z ;

τ - czas ;

ρ - gęstość ciała ;

C_p - ciepło właściwe ;

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ - współczynnik przewodzenia ciepła w kierunkach x, y, z ;

F - funkcja opisująca wewnętrzne źródło ciepła

Przewodzenie ciepła - wzory uproszczone

$$\frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial \tau} + F$$

Przy założeniu niezależność parametrów ρ , λ , Cp od temperatury (ośrodek liniowy) oraz współrzędnych kartezjańskich (ośrodek izotropowy i jednorodny)

Prawo Fouriera

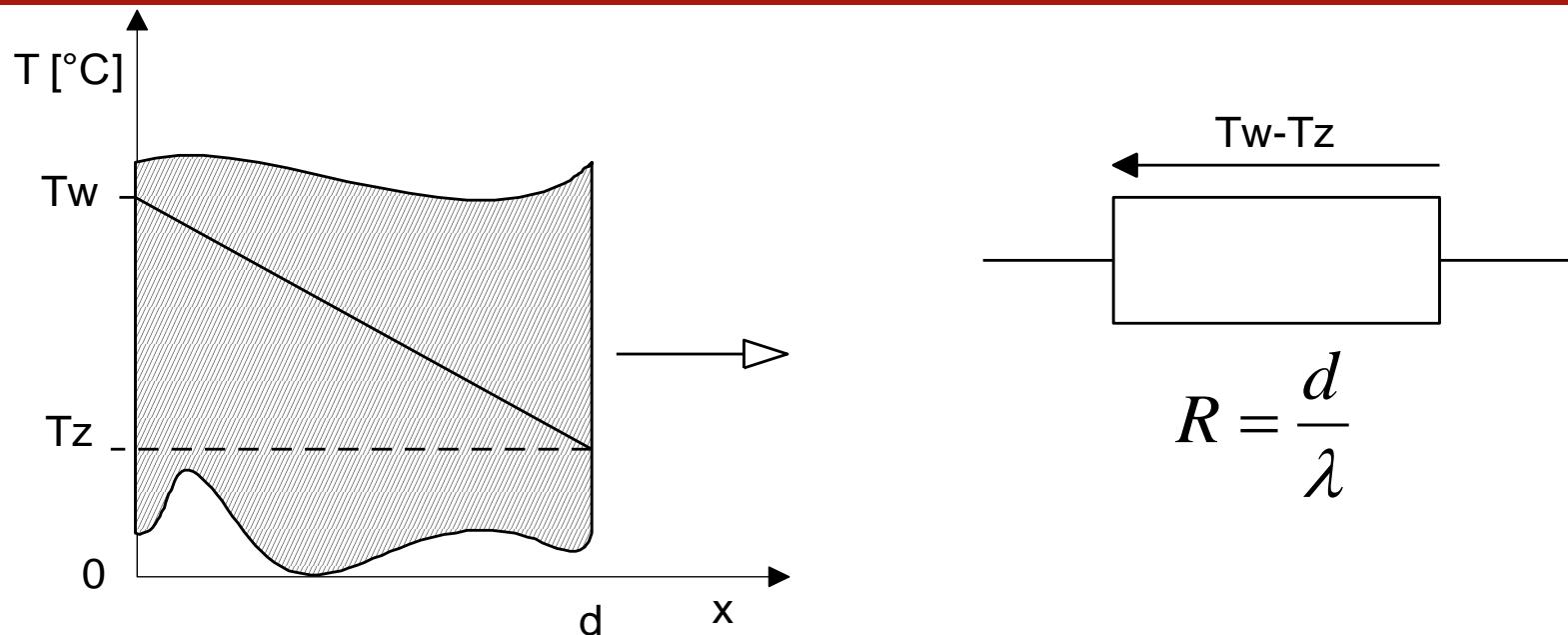
$$q = -\lambda grad T = \lambda \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda}{d}(T_w - T_z)$$

$$q = \frac{T_w - T_z}{R}$$

q - gęstość strumienia ciepła [W/m²]

R - opór cieplny przegrody [m²K/W]

Proces przewodzenia ciepła i jego analog elektryczny

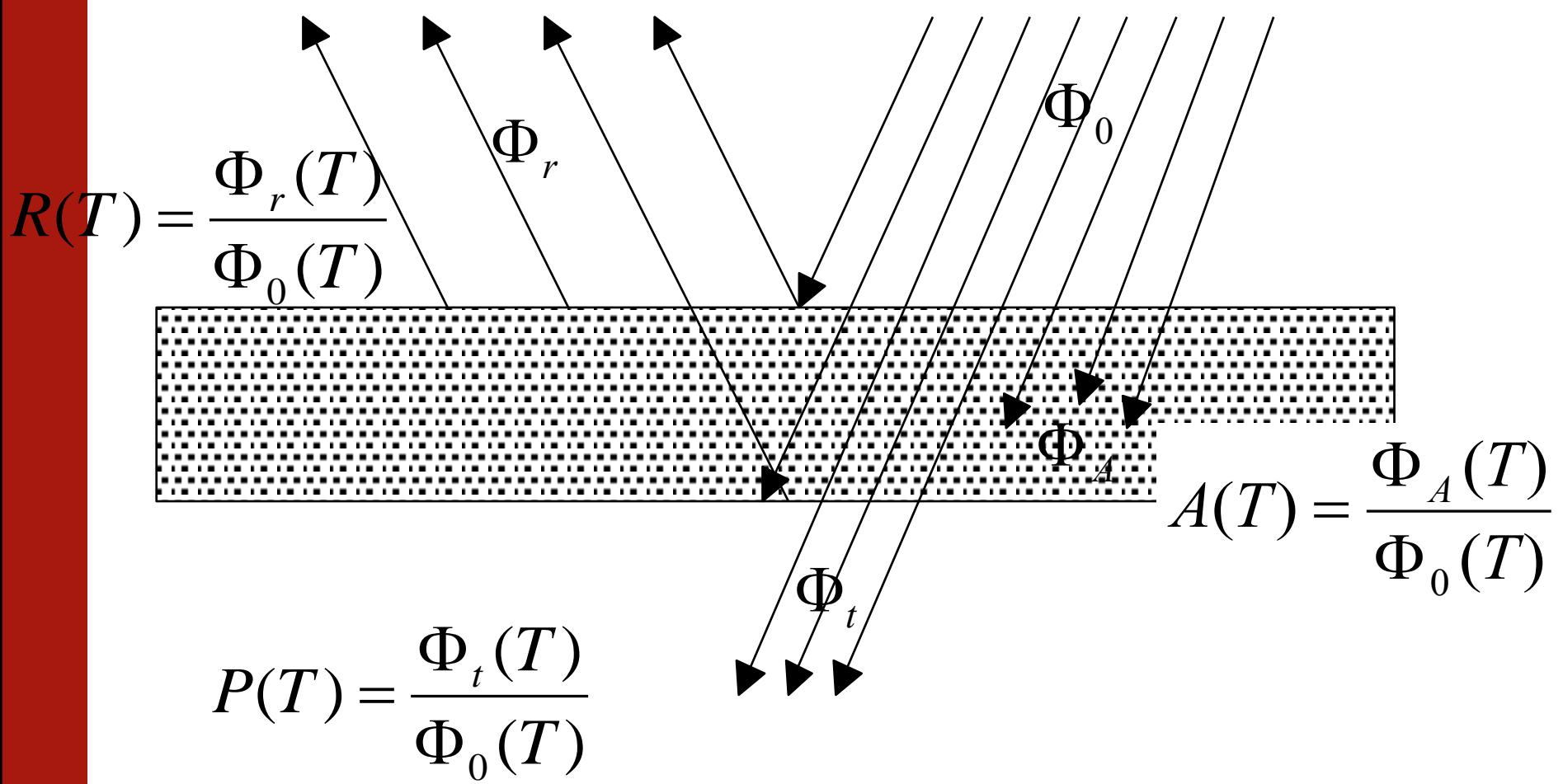


Stosując analogię z elektrotechniki:

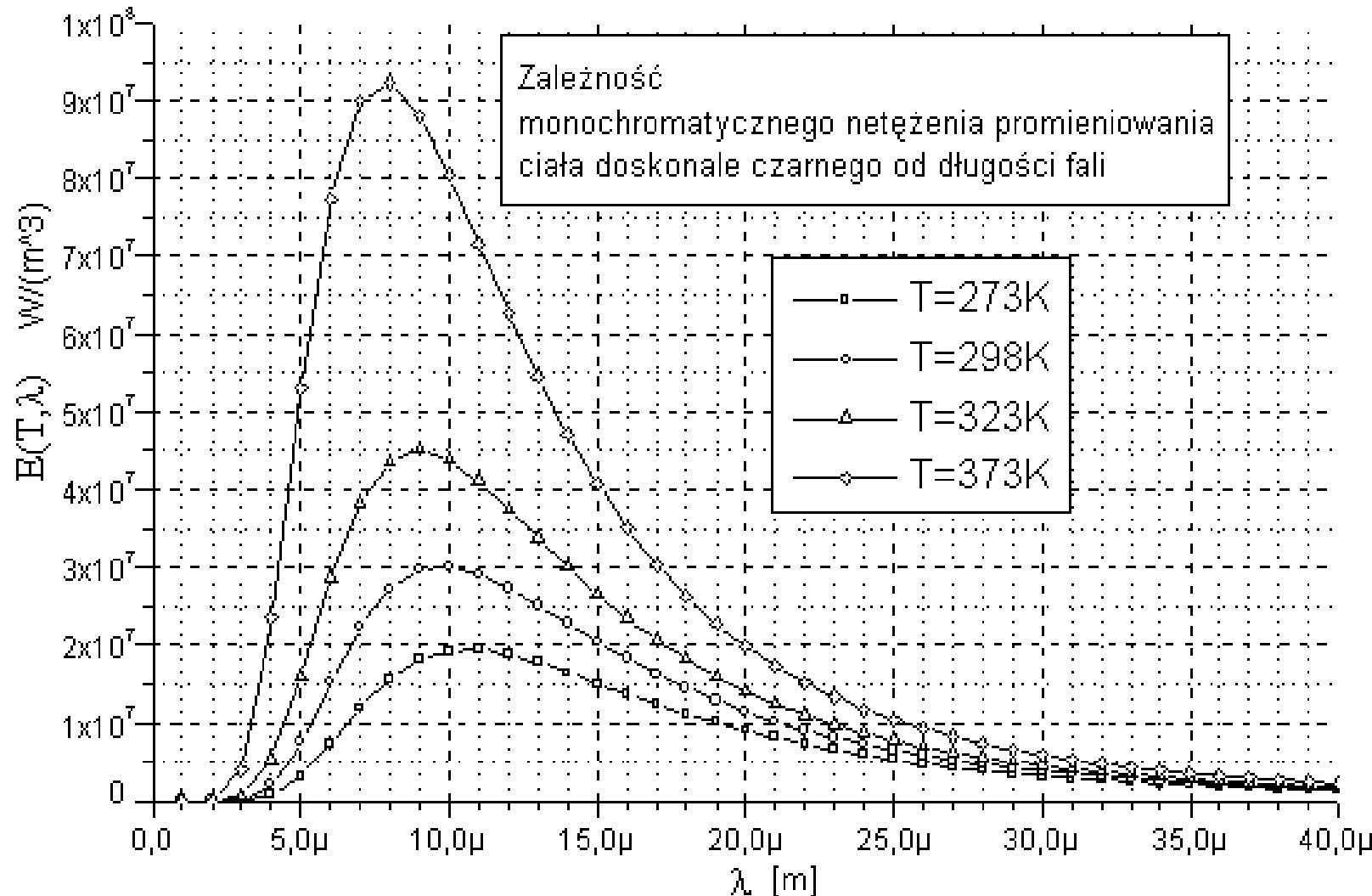
- Gęstość strumienia cieplnego q odpowiada prądowi i ;
- Temperatura T odpowiada potencjałowi elektrycznemu V a różnica temperatur napięciu elektrycznemu U
- Opór cieplny przegrody jest ekwiwalentem oporu elektrycznego



Współczynniki pochłaniania, przepuszczania i odbicia



Rozkład gęstości spektralnej strumienia energii



Wymiana ciepła przez konwekcję - równanie Newtona

$$q = \alpha_k (T_2 - T_1)$$

gdzie :

q to gęstość strumienia cieplnego [W/m^2];

$T_2 - T_1$ - różnica temperatury powierzchni ciała i otaczającego je gazu

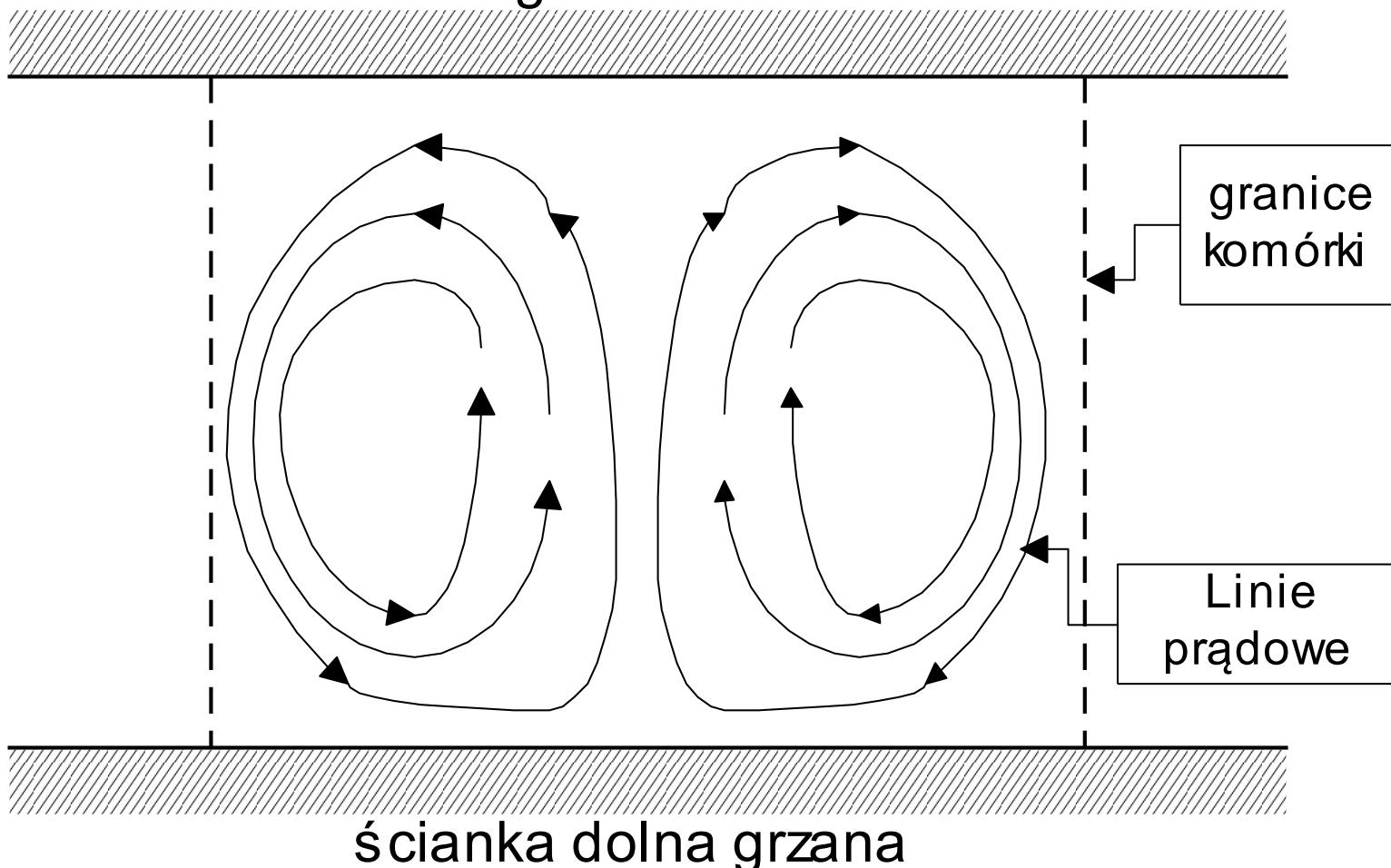
α_k - konwekcyjny współczynnik przejmowania ciepła [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]



Konwekcja na przegrodzie pionowej

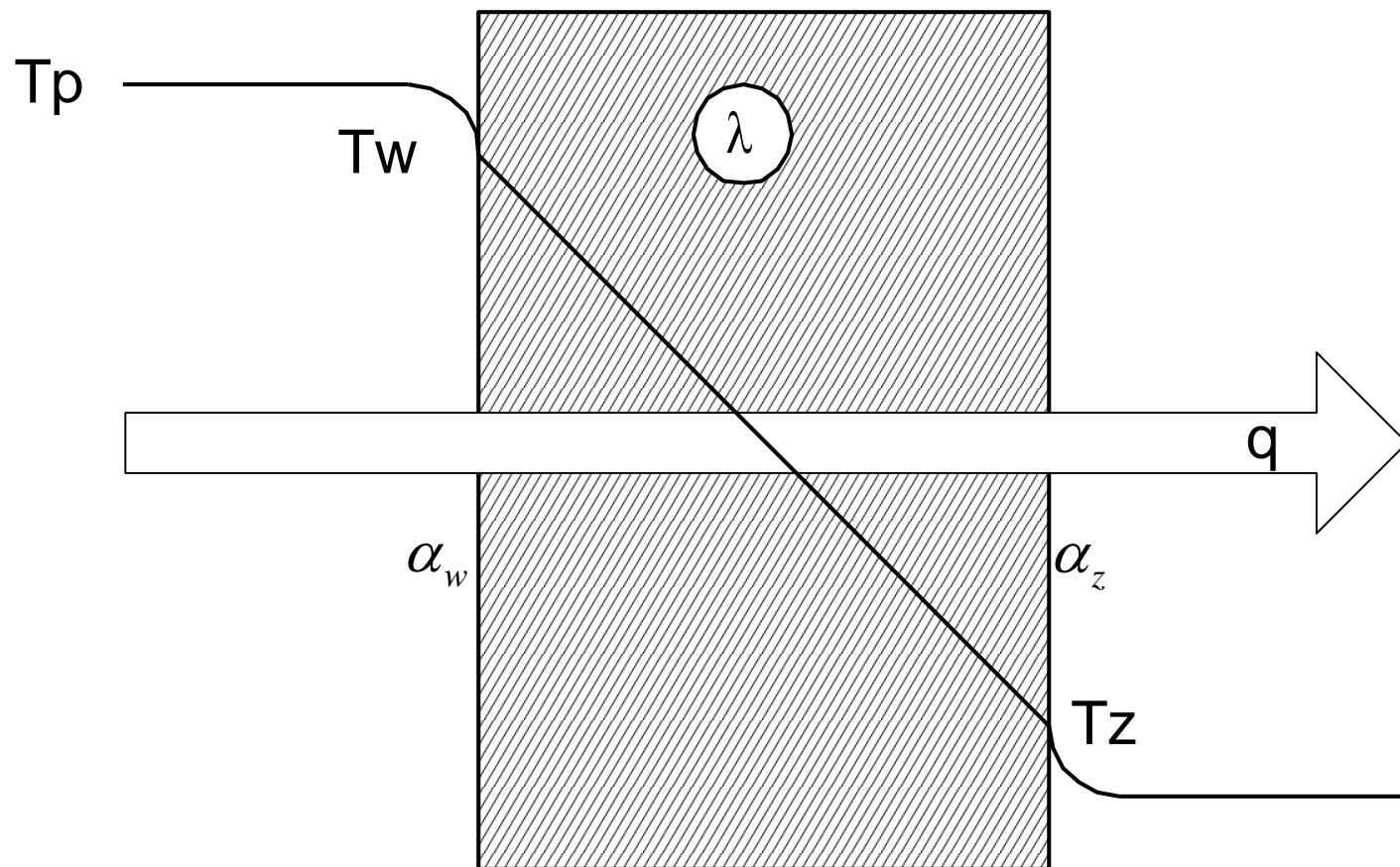
Konwekcja naturalna w szczelinie powietrznej

ścianka górna chłodzona



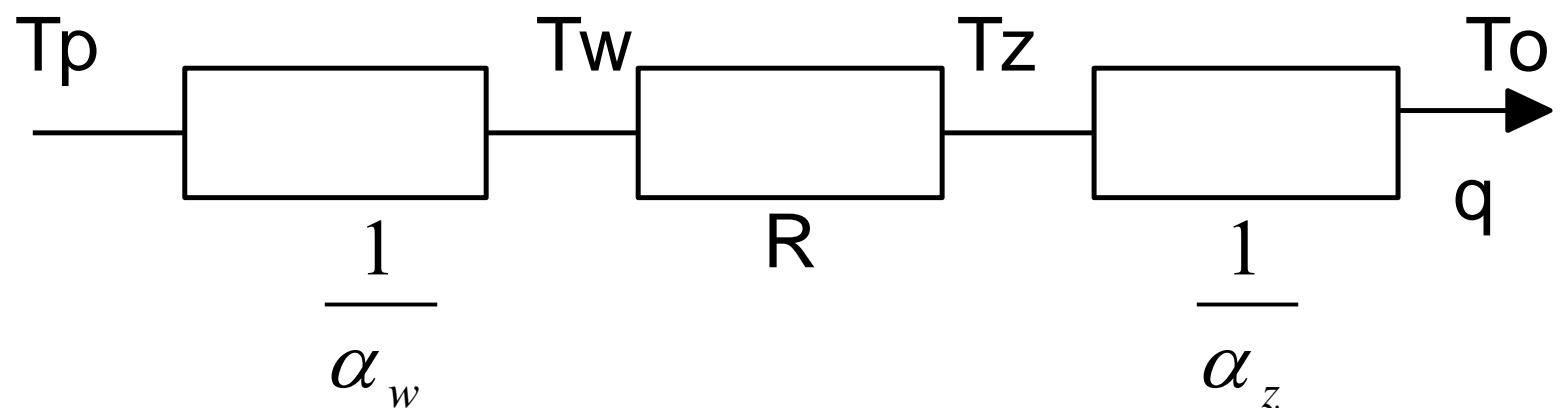


Przenikanie ciepła przez przegrody w stanie ustalonym





Model procesu przenikania ciepła



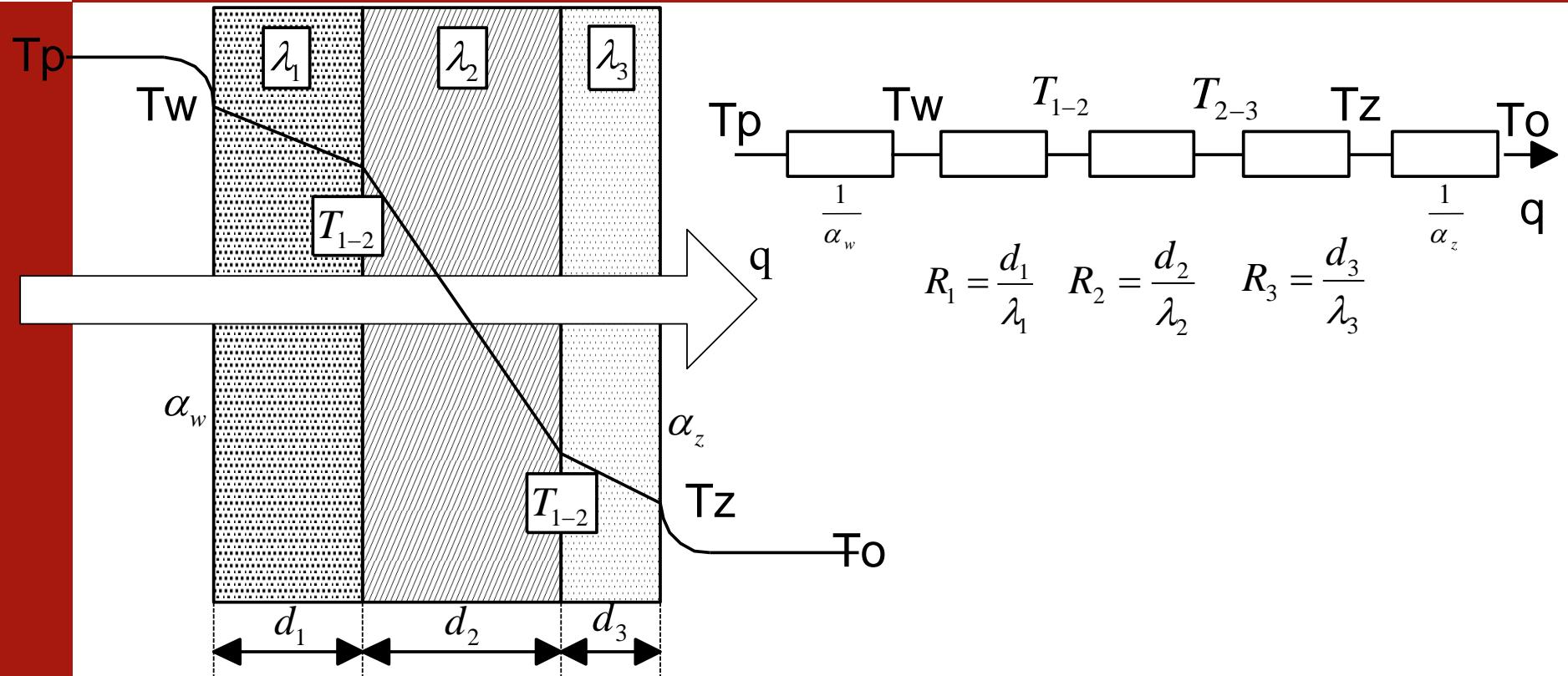
Współczynnik wnikania ciepła ma charakter lokalny odniesiony do powierzchni jednostkowej.

W praktyce wprowadza się współczynnik α uśredniony

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{A} \int_A \alpha dA$$



Przenikanie ciepła przez przegrodę wielowarstwową



$$R = \sum_i R_i = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i}$$

Przenikanie ciepła przez przegrodę wielowarstwową- cd.

$q = \alpha_w (T_p - T_w)$ dla powierzchni wewnętrznej,

$q = \alpha_z (T_z - T_o)$ dla powierzchni zewnętrznej,,

$q=R_1(T_1-T_w)$ dla warstwy 1,

$q=R_2(T_2-T_1-T_w)$ dla warstwy 2,

$q=R_3(T_z-T_2-T_w)$ dla warstwy 3,

$R=R_1+R_2+R_3$ opór cieplny przegrody,

$q=K(T_p - T_o)$ strumień uwzględniający całą ścianę

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_w} + R_1 + R_2 + R_3 + \frac{1}{\alpha_z}}$$



Przenikanie ciepła przez przegrodę wielowarstwową- cd.2

R : opór cieplny przegrody [$(m^2 \text{ } ^\circ\text{C}) / W$]

Λ : przewodność cieplna przegrody [W/ $(m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$]

$$R = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{K} - \left(\frac{1}{\alpha_w} + \frac{1}{\alpha_z} \right)$$

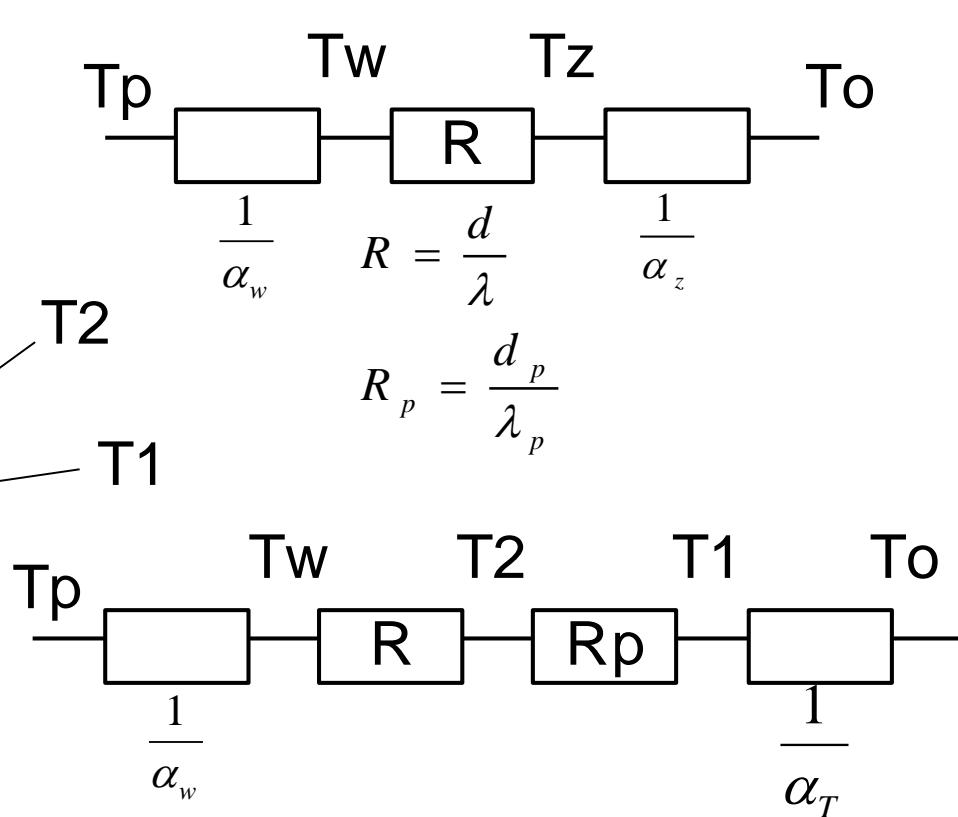
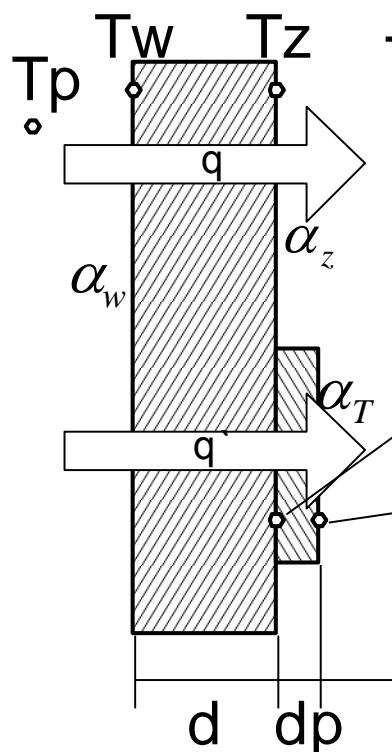
R_k : opór przenikania ciepła (izolacyjność cieplna) [$(m^2 \text{ } ^\circ\text{C}) / W$]

$$R_k = \frac{1}{\alpha_w} + R_1 + R_2 + R_3 + \frac{1}{\alpha_z}$$



Pomiar gęstości strumienia cieplnego - metoda „ścianki pomocniczej”

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_p}$$



T1 i T2 to temperatura powierzchni ścianki pomocniczej

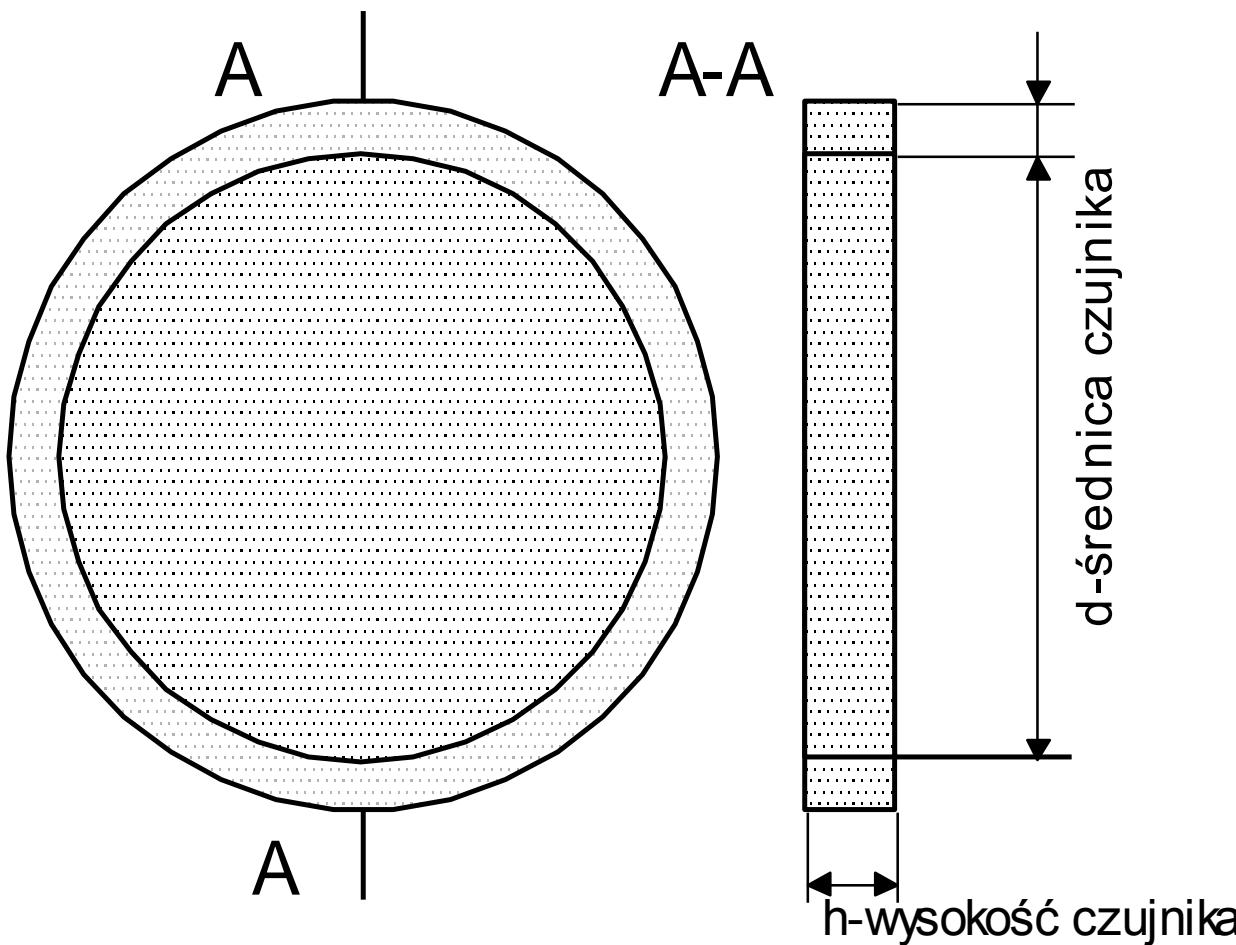
Rp to opór cieplny ścianki obliczony ze znajomości grubości dp i współczynnika przewodzenia ciepła lp : $R=dp/\lambda p$



Wymagania stawiane ściance pomocniczej

1. Strumień ciepła po dołożeniu ścianki nie powinien zmaleć. Należy stosować ściankę o małym oporze R_p czyli cienką i z materiału dobrze przewodzącym ciepło.
2. Spadek temperatury na ściance pomocniczej powinien być łatwomierzalny tzn. jak największy. Należy zastosować ściankę o dużym oporze cieplnym czyli grubą i z materiału umiarkowanie przewodzącym ciepło.
3. Strumień powinien przepływać jednokierunkowo (zazwyczaj prostopadle) przez powierzchnię miernika. Tę właściwość w przybliżeniu spełniają czujniki o dużej powierzchni styku i cienkie.
4. Ścianka powinna mierzyć wartość lokalną strumienia. Musi więc mieć niewielkie wymiary.

Czujnik strumienia cieplnego



Parametry czujnika MGS-3

Typowe parametry techniczne:

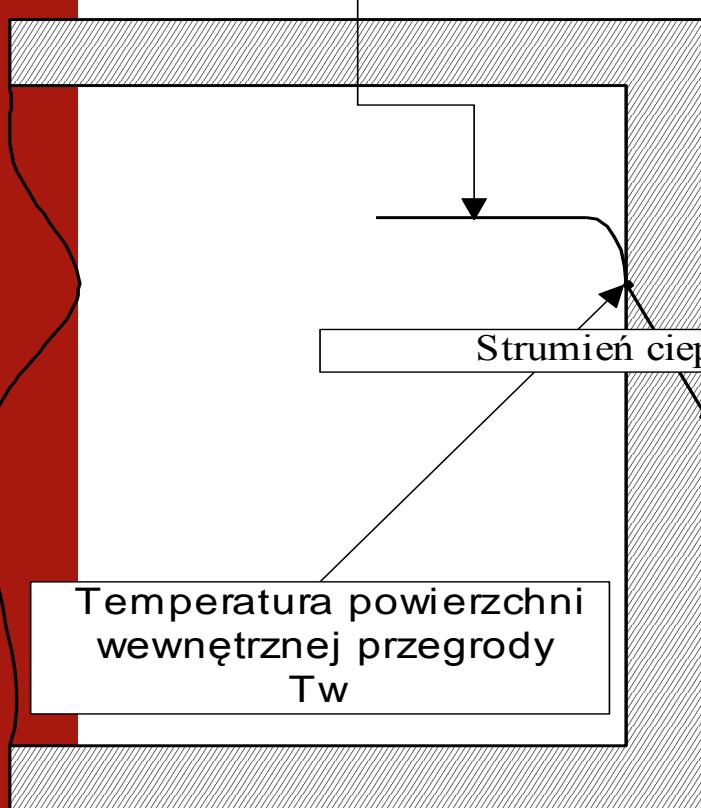
- Stała kalibracji C : $15\ldots30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{mV})$
- Dokładność kalibracji: $\pm 5\%$
- Rezystancja wewnętrzna: $40\ldots70\Omega$
- Przewodność cieplna λ : $0,6\ldots0,8 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$
- Zakres temperatur pracy: $-20^\circ\ldots70^\circ\text{C}$
- Wymiary (średnica x grubość) : $\Phi50 \times 4,3 \text{ mm}$

Gdy mierzymy mur z pustaków o grubości 29cm i przyjmując opór przenikania ciepła $R_k = 0,61 \text{ m}^2\text{K/W}$ to strumień cieplny zmniejsza się o 1%. Jest to wartość którą można pominąć zważywszy na 5% dokładność kalibracji czujnika.

Czujnik MGS-3 mimo małej masy po zamocowaniu przy użyciu przewodzącego smaru silikonowego wskazuje poprawną wartość po kilkunastu minutach.

Pomiar współczynnika przenikania ciepła K metodą trzech temperatur

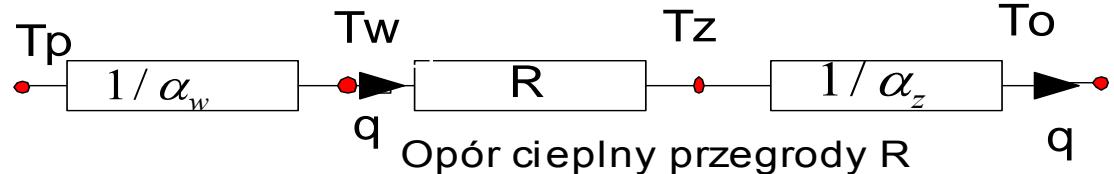
Temperatura w pomieszczeniu T_p



Temperatura powierzchni zewnętrznej przegrody
 T_z

Temperatura otoczenia
 T_o (np. na dworze)

Temperatura powierzchni wewnętrznej przegrody
 T_w



Pomiar współczynnika przenikania ciepła K metodą trzech temperatur cd.

$$q = \alpha_w (T_p - T_w)$$

dla powierzchni wewnętrznej,

$$q = \alpha_z (T_z - T_o)$$

dla powierzchni zewnętrznej,

$$q = R(T_w - T_z) = (\lambda/d) (T_w - T_z) \quad \text{dla przegrody,}$$

$$q = K(T_p - T_o) \quad \text{strumień uwzględniający całą ścianę}$$

gdy założymy znajomość α_w to znamy strumień cieplny $q = \alpha_w (T_p - T_w)$

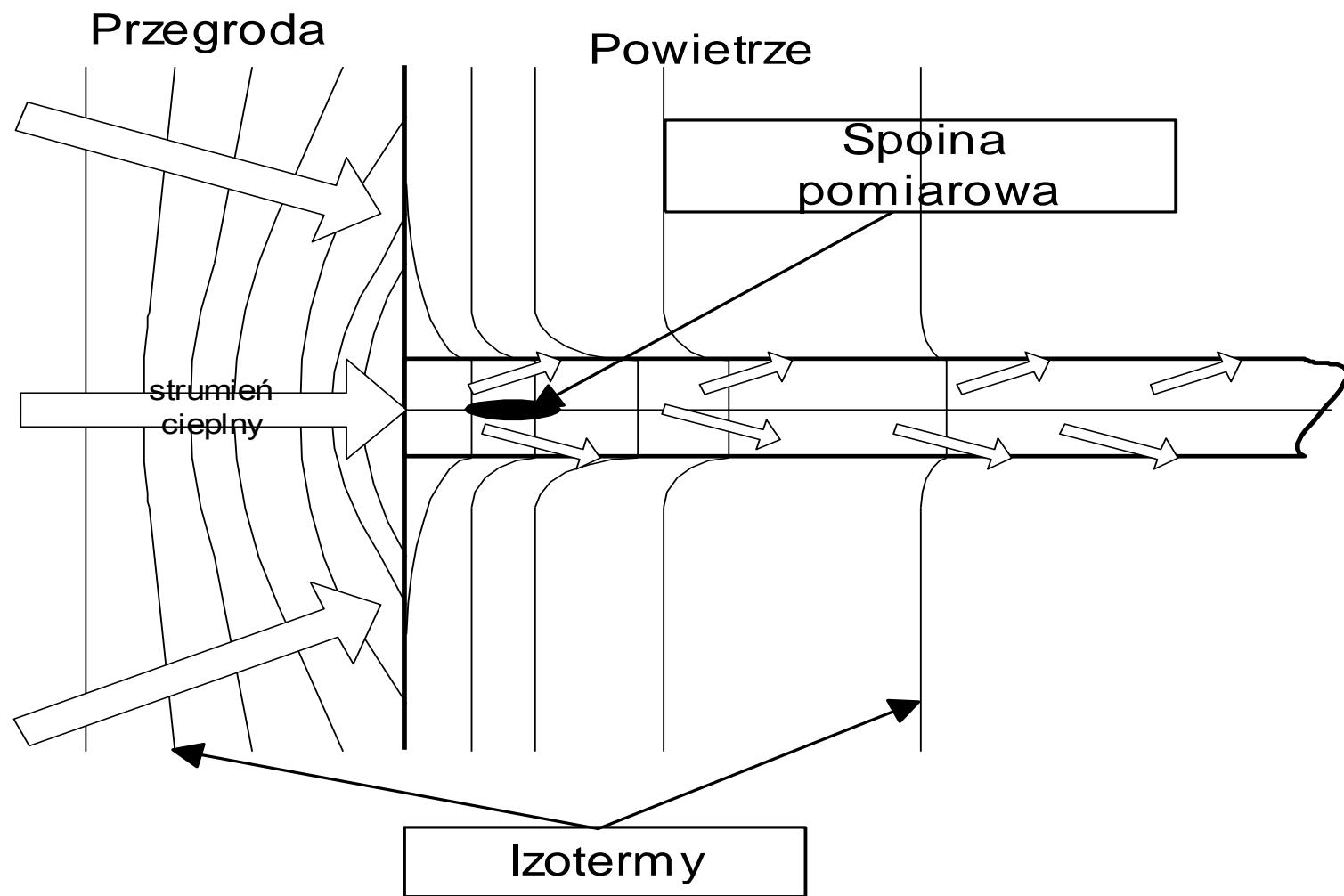
Przenikalność cieplna przegrody

$$K = \frac{q}{T_p - T_o} = \alpha_w \frac{T_p - T_w}{T_p - T_o}$$

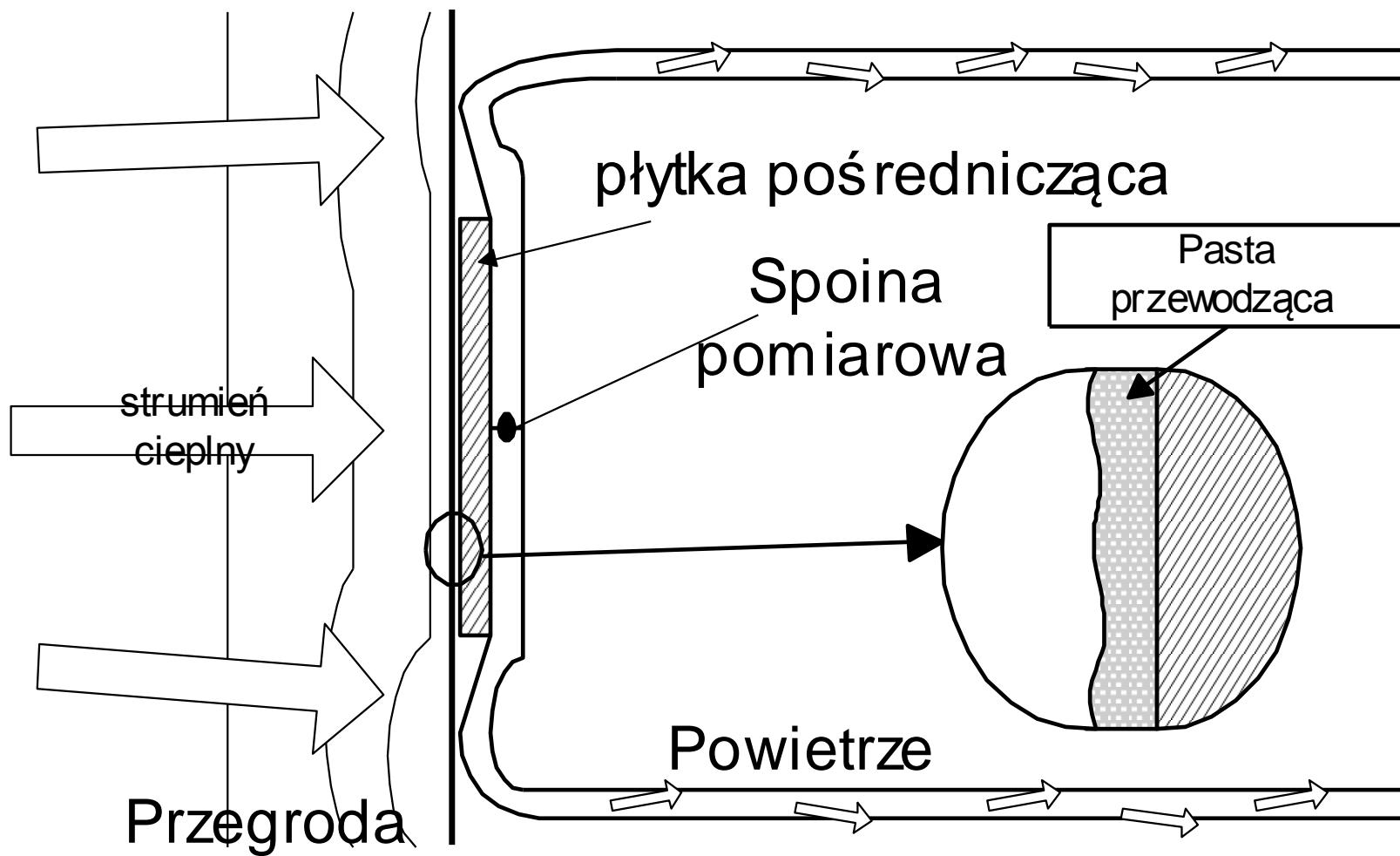
Opór cieplny przegrody

$$R = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{K} - \left(\frac{1}{\alpha_w} + \frac{1}{\alpha_z} \right)$$

Stykowy pomiar temperatury powierzchni przegrody



Stykowy pomiar temperatury powierzchni przegrody cd1

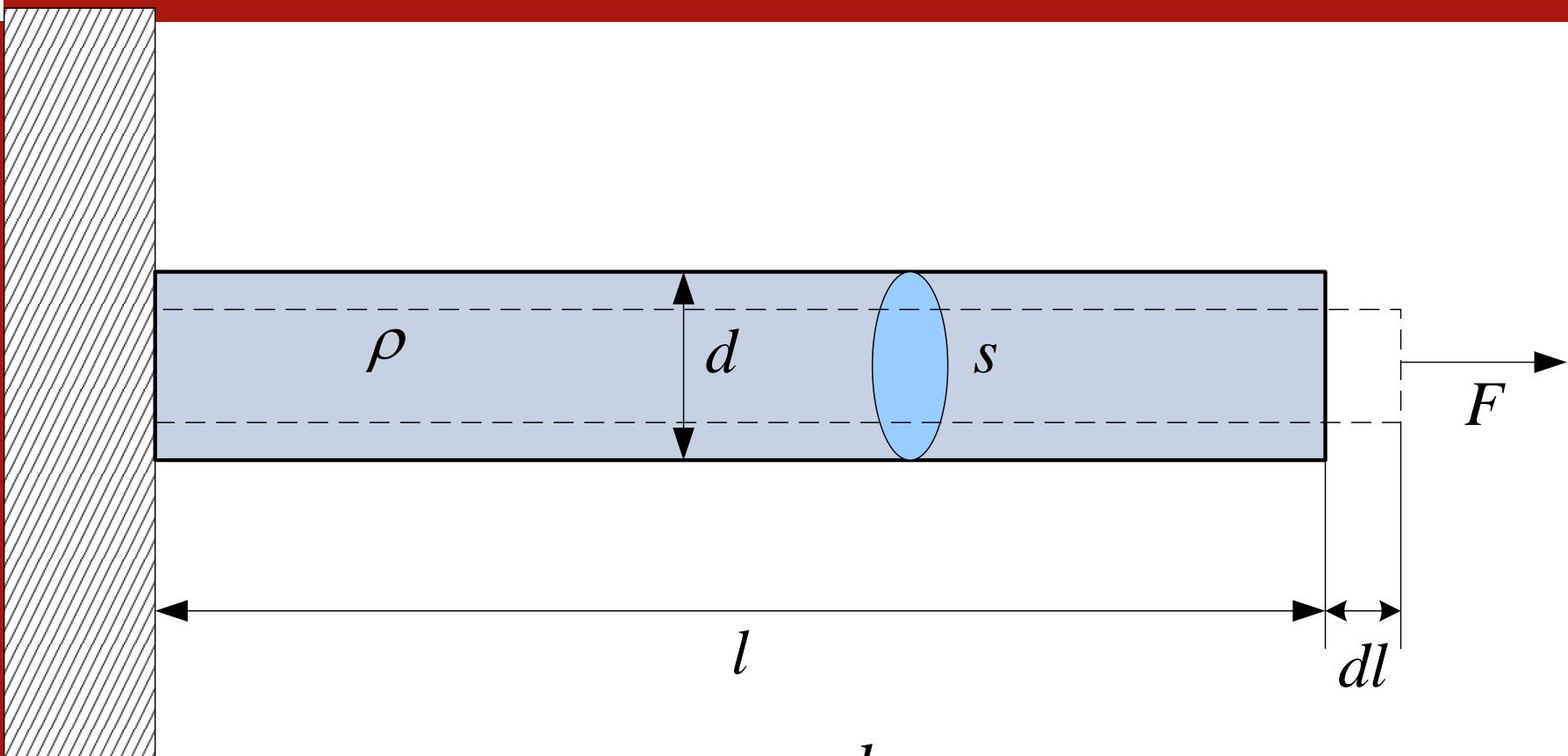




Cechy metody pomiarowej z wykorzystaniem pirometru

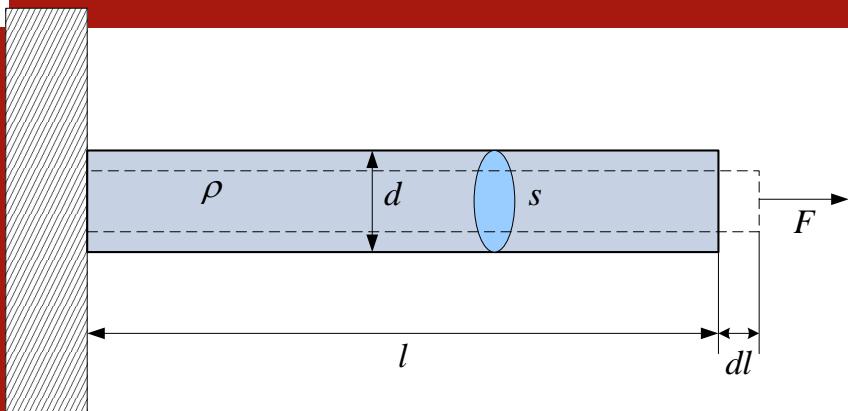
- Szybki pomiar ☺
- Brak zakłócenia pola temperaturowego ☺
- Możliwość zbadania całej powierzchni przegrody i wykrycie istniejących nieciągłości w izolacji cielnej (mostki termiczne) ☺
- Metoda pomiarowa nie uszkadza obiektu ☺
- Należy przyjąć współczynniki przejmowania ciepła powierzchni ☹, główna przyczyna błędu.

Tensometria oporowa



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

Tensometria oporowa



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

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - \ln s$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{ds}{s}$$

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

Tensometria oporowa

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

ε – względne
wydłużenie
tensometru

$$\nu = -\frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta l}{l}}$$

ν – współczynnik
Poissona

$$s = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\frac{\Delta s}{s} = 2 \frac{\Delta d}{d} = -2\nu \frac{\Delta l}{l}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$



Tensometria oporowa

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$$\frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon}$$

$$K_t = 1 + 2\nu + \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{1}{\varepsilon}$$

K_t – współczynnik czułości tensometru

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

Parametry wybranych materiałów stosowanych do produkcji tensometrów

materiał	K _t	$\alpha \times 10^{-5}$ [°C ⁻¹]	ste do Cu uV/°C	ε_{max} $\times 10^{-3}$
Manganin	0,5	3	0,4	4
Konstantan (40%Ni, 60% Cu)	2,1	3	45	4
Nichrom (80%Ni, 20%Cr)	2,1	30	20	5
Izoelastic (Ni, Cr, Fe, Mo)	3,6	17,5	4	8

Naprężenie na elemencie z naklejonym tensometrem

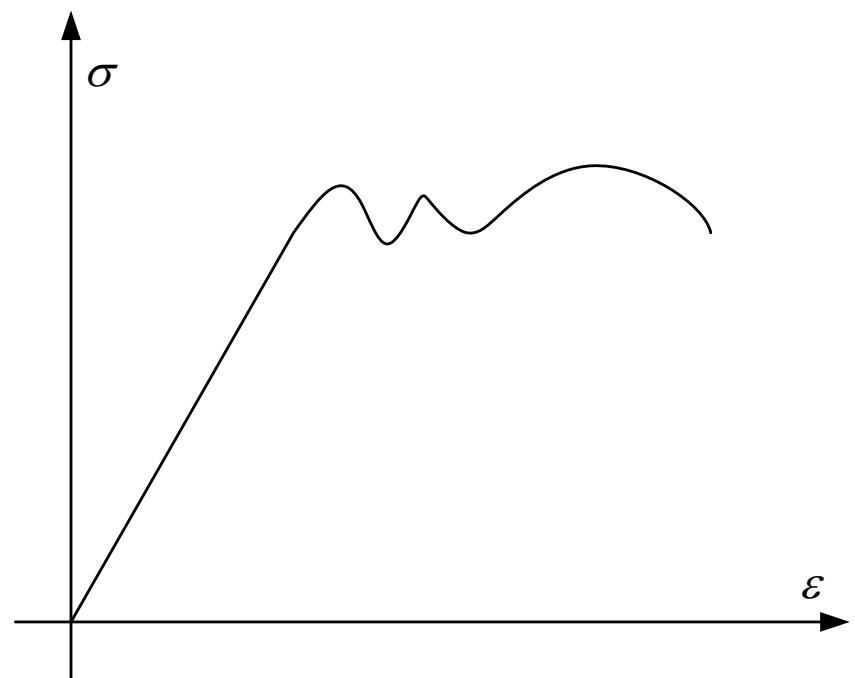
$$\sigma = E_Y \varepsilon$$

σ - naprężenie

ε – względne wydłużenie tensometru

E_Y – moduł sprężystości Younga

przykład obliczeniowy





Wartości modułu Youanga wybranych materiałów

Materiał	E [GPa]	Materiał	E [GPa]
Beton (ściskany)	>27	Poli(tereftalan etylenu) (PET)	2,0–2,5
Cyna (Sn)	47	Polietylen (LDPE)	0,2
Cynk (Zn)	84	Polipropylen (PP)	1,5–2,0
Diament (C)	1050–1200	Polistyren (PS)	3,0–3,5
Drewno dębowe (wzdłuż włókien)	11	Stop glinu (aluminium) (Al)	69
Guma	0,01–0,10	Szkło ($\text{SiO}_2, \text{Na}_2\text{CO}_3, \text{CaCO}_3$)	72
Kompozyt z włókna węglowego	150	Tytan (Ti)	105–120
Magnez (Mg)	45	Węglik krzemu (SiC)	450
Miedź (Cu)	100–115	Węglik tytanu (TiC)	450–650
Mosiądz (Cu, Zn) i Brąz (Cu, Sn)	103–124	Wolfram (W)	400–410
Nylon	2–4	Żelazo kute i stal	190–210
Ołów (Pb)	16		

Efekt piezorezystancyjny - tensometry półprzewodnikowe

Zmiana rezystancji półprzewodników domieszkowanych spowodowana deformacją sieci

$$j = \frac{E}{\rho(1 + p_p \sigma)}$$

σ - naprężenie

ρ - rezystywność półprzewodnika przy braku naprężenia

p_p - współczynnik piezorezystywności wzdluznej (stała piezorezystywności)

E- Natężenie pola elektrycznego

Efekt piezoresystancyjny - tensometry półprzewodnikowe

$$\frac{E}{j} = \rho(1 + p_p \sigma) = \rho + \Delta\rho$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = p_p \sigma = p_p E_Y \varepsilon$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta s}{s} = \varepsilon(1 + 2\nu + p_p E_Y) = \varepsilon K_t$$

Efekt piezorezystancyjny - tensometry półprzewodnikowe

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta s}{s} = \varepsilon (1 + 2\nu + p_p E_Y) = \varepsilon K_t$$

$$K_t = 1 + 2\nu + p_p E_Y$$

Dla półprzewodników $p_p E_Y \gg 1 + 2\nu$

$$K_t = p_p E_Y$$

Wartość K_t wynosi od 40 do 400

Zastosowanie tensometrów:

- Czujniki siły
- Czujniki momentu
- wagi
- pomiar ciśnienia
- Pomiary przepływu
- Pomiary drgań (przetwornik z masą sejsmiczną)
- pomiary przesunięcia

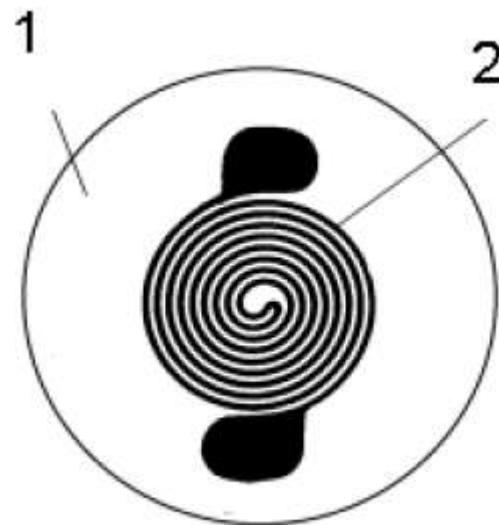
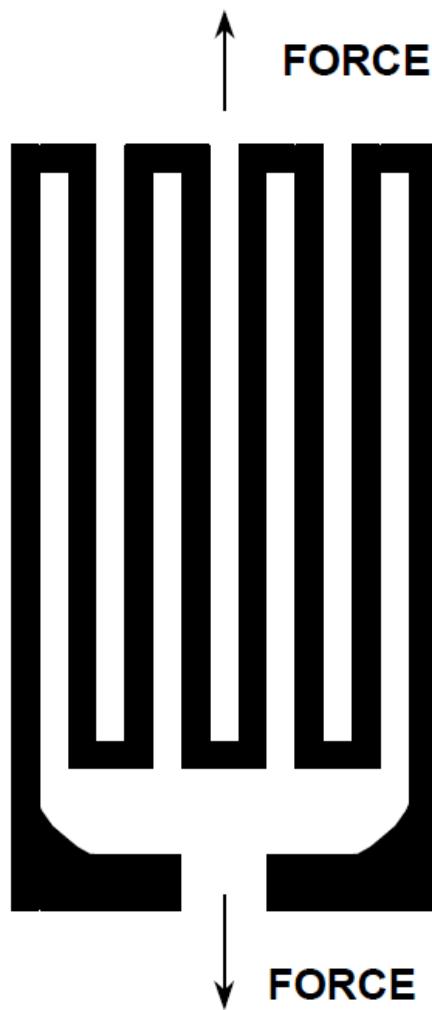


Przykład obliczeniowy:

Porównanie tensometrów

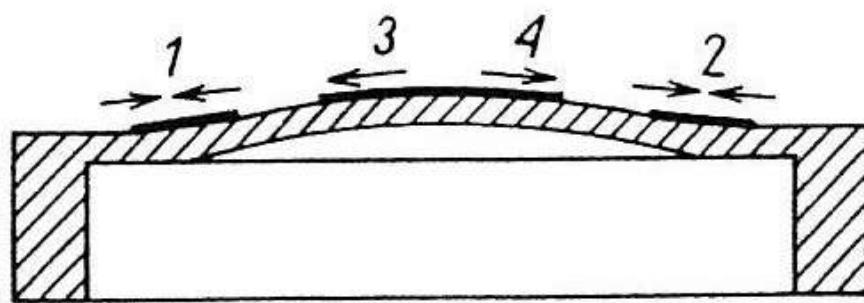
Parametr	metalowy	półprzewodnikowy
Zakres pomiarowy	0,1 ...40 000 $\mu\epsilon$	0,001 ...3000 $\mu\epsilon$
stała tensometru (czułość)	2 ...4	40...400
Rezystancja	120,350,600...5000 $k\Omega$	1k...5k Ω
Tolerancja rezystancji	0,1% do 0,2%	1% do 2%
wymiary	0,4 do 150mm typowo 3 do 6mm	1...5mm

Tensometr foliowy

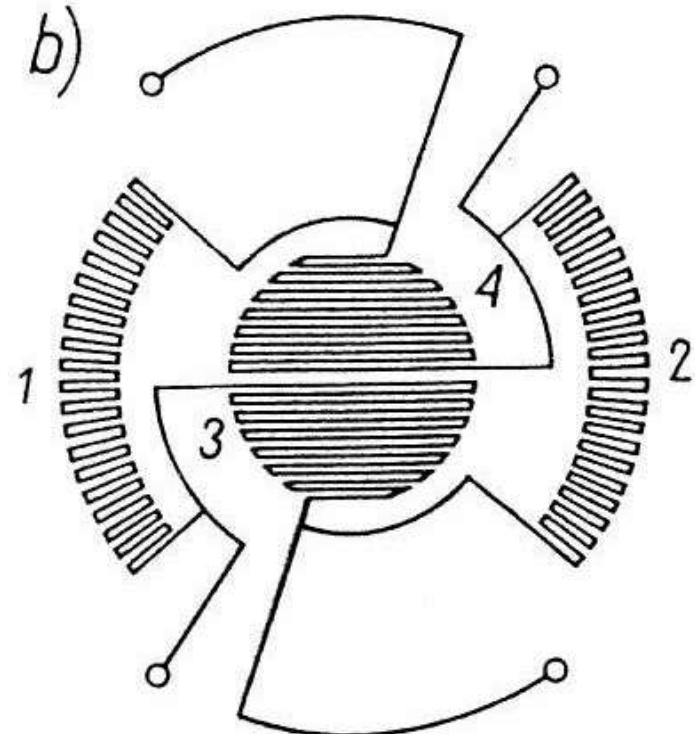


Przykłady wykorzystania tensometrów do pomiaru ciśnienia

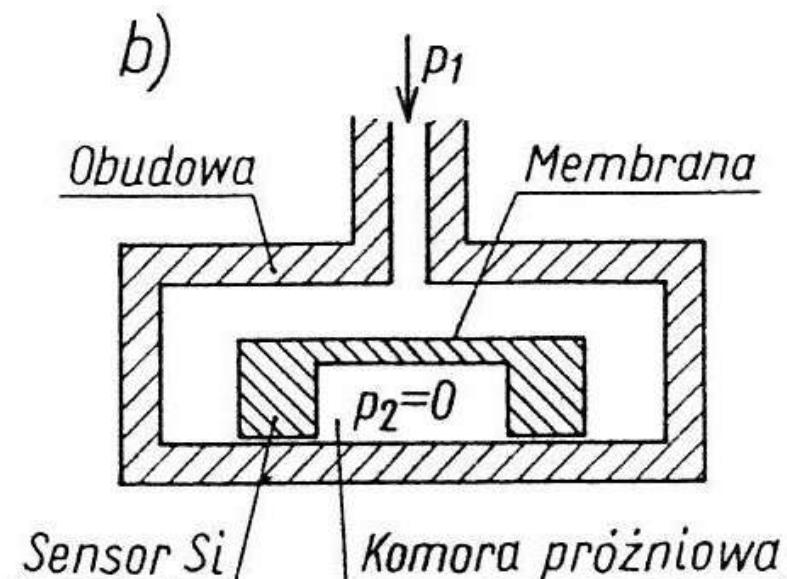
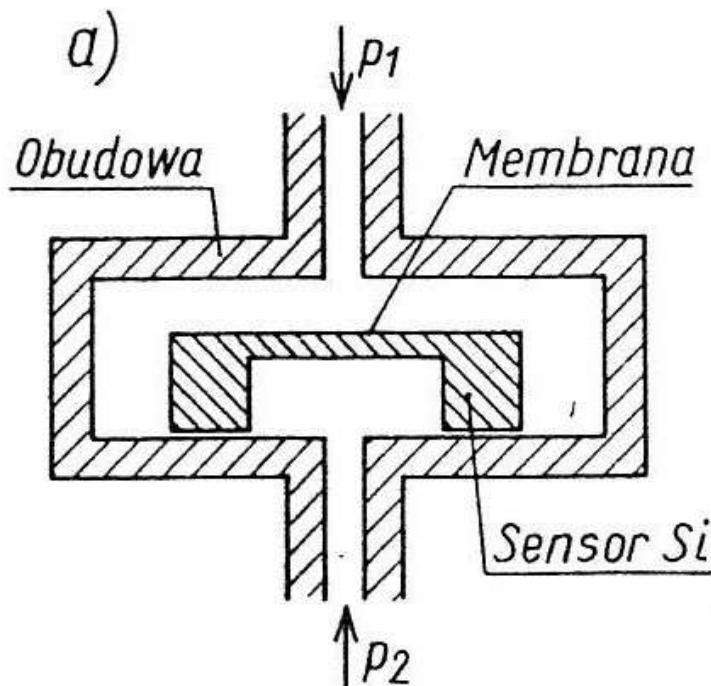
a)



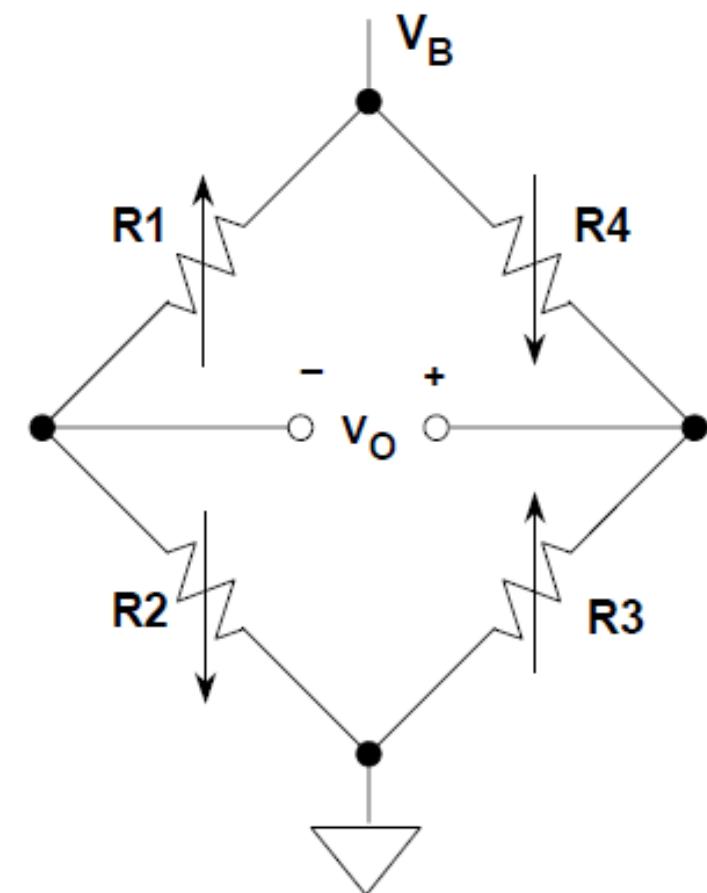
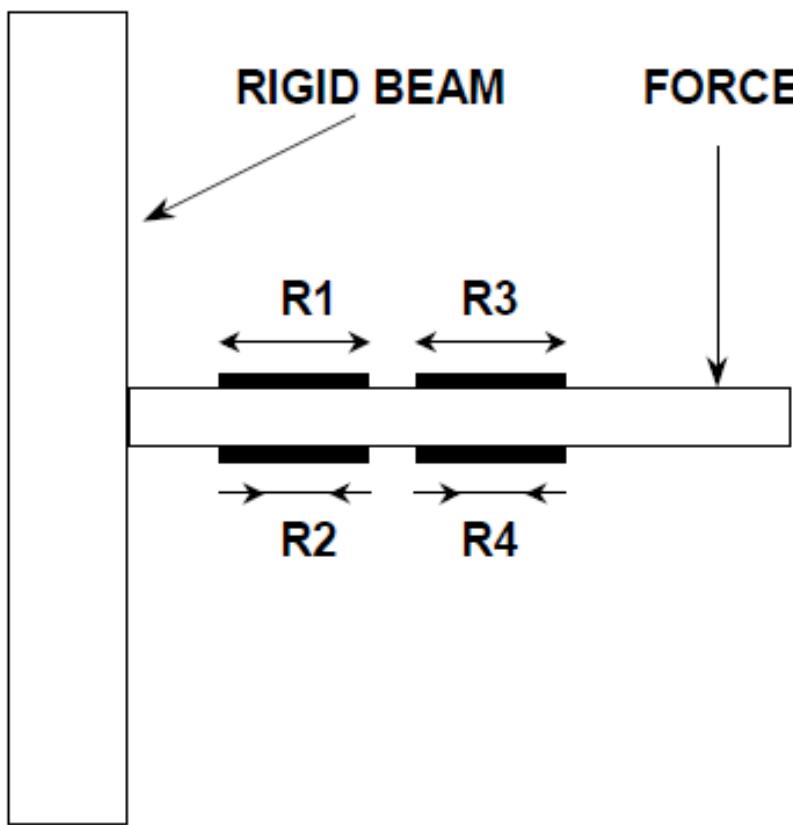
b)



Przykłady wykorzystania tensometrów do pomiaru ciśnienia



Przykłady wykorzystania tensometrów do pomiaru siły



Przykłady wykorzystania tensometrów do pomiaru siły

