



POMIARY WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH

Dr inż. Eligiusz PAWŁOWSKI
Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Prezentacja do wykładu dla EMST

Semestr letni

Wykład nr 2

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

Wymagania stawiane czujnikom

Czujniki generacyjne i parametryczne

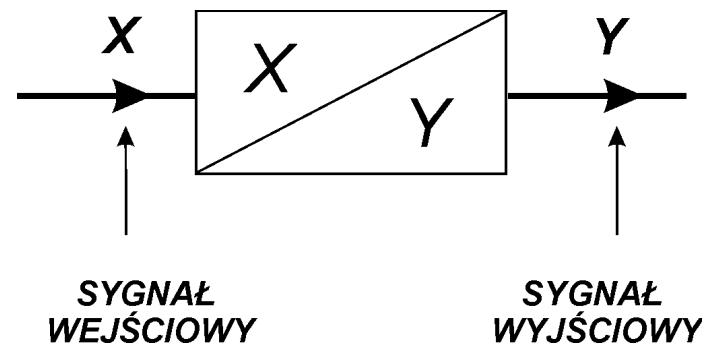
Układy pracy czujników

Właściwości statyczne czujników

Właściwości dynamiczne czujników

Wymagania stawiane czujnikom

1. Stałość charakterystyki w czasie i przy zmianie warunków pracy
2. Duża czułość na wielkość mierzoną
3. Mała czułość na wielkości wpływające
4. Duża moc sygnału wyjściowego czujnika
5. Liniowość charakterystyki
6. Szeroki zakres pomiarowy
7. Małe oddziaływanie na obiekt pomiaru
8. Niski koszt, łatwość instalacji, konserwacji, naprawy

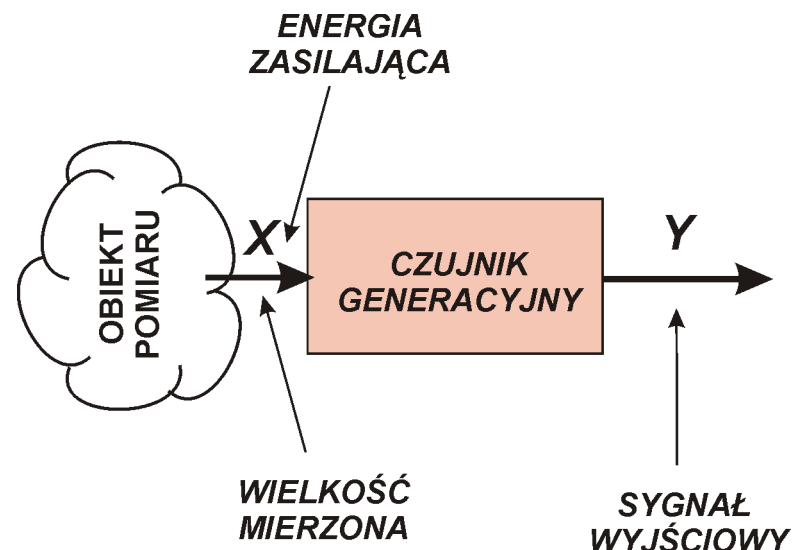


Podstawowe rodzaje czujników: generacyjne i parametryczne

1. **Czujniki generacyjne** (aktywne) – generują elektryczny sygnał wyjściowy dzięki energii pobranej z obiektu pomiaru (ściślej energii procesu związanego z wielkością mierzoną). Czujniki generacyjne do działania **nie wymagają zasilania.**
2. **Czujniki parametryczne** (pasywne) – nie generują same sygnału wyjściowego, pod wpływem wielkości mierzonej zmienia się jedynie określony parametr elektryczny czujnika (np.: rezystancja, pojemność, indukcyjność). Aby uzyskać sygnał wyjściowy czujniki parametryczne **wymagają zasilania.**

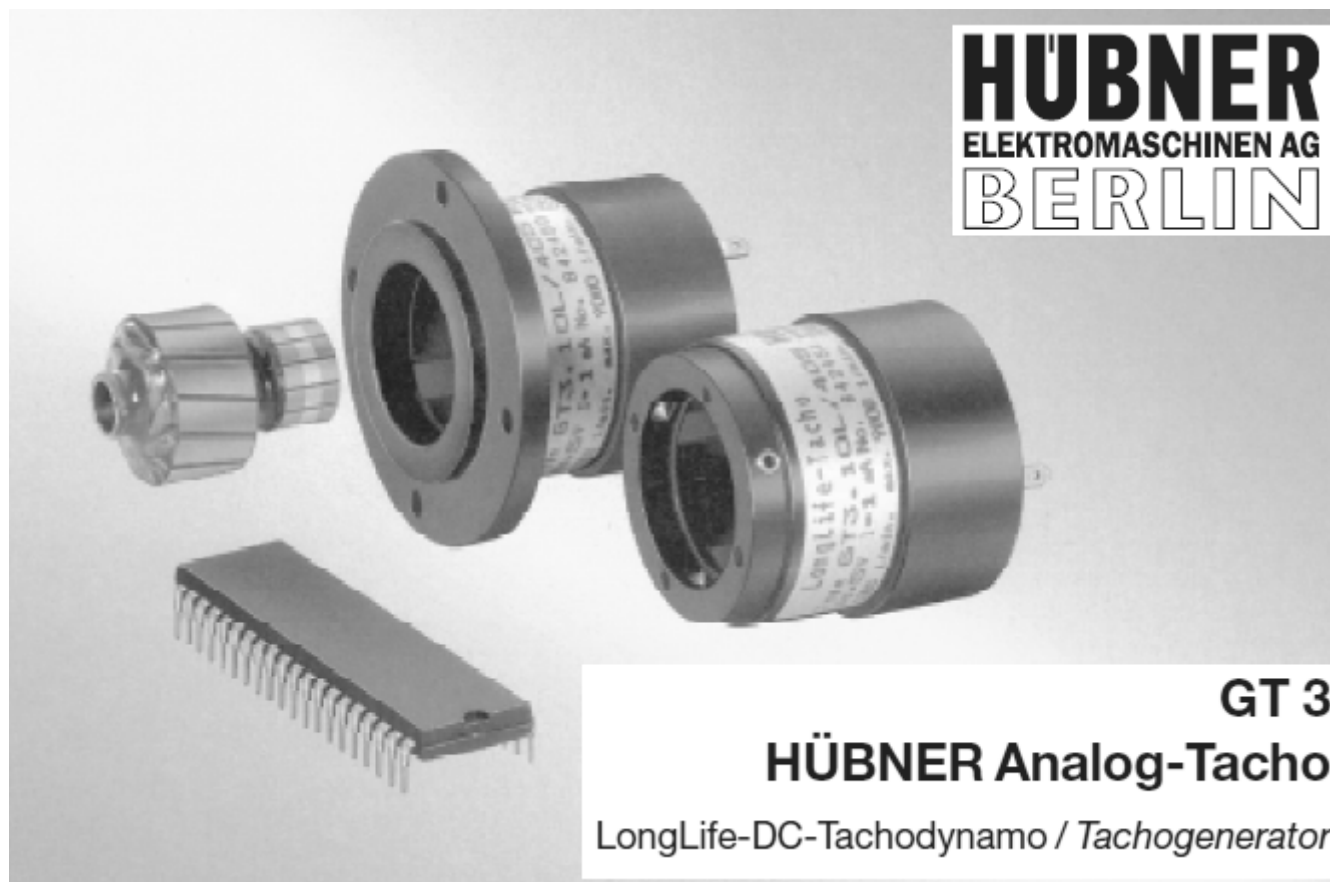
Nie należy mylić czujnika z czujką (detektorem)

Układ pracy czujnika generacyjnego



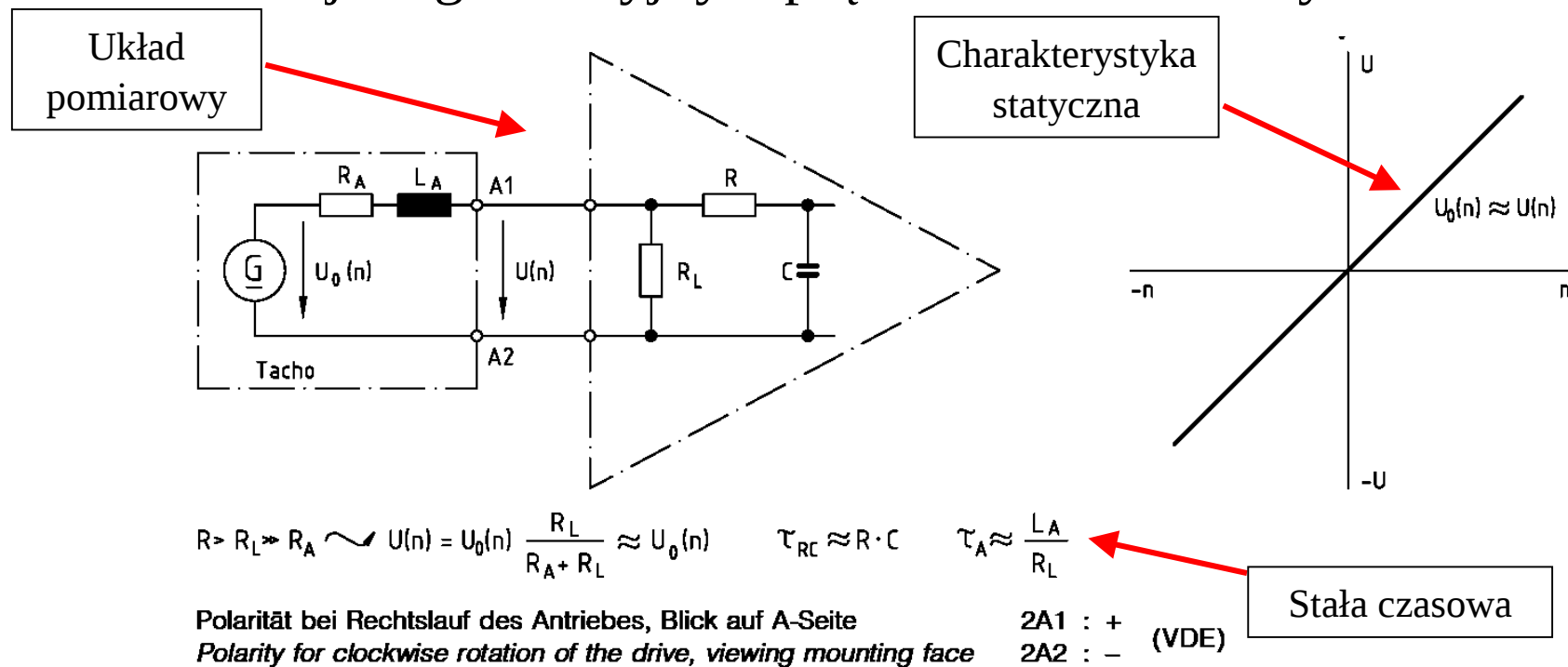
Czujnik generacyjny (aktywny) pobiera z obiektu energię procesu związanego z wielkością mierzoną X i generuje elektryczny sygnał wyjściowy Y bez potrzeby dodatkowego zasilania.

Czujnik generacyjny - przykład



Prądniczka tachometryczna – przykład czujnika generacyjnego

Czujnik generacyjny – prądniczka tachometryczna GT3



Zakres pomiarowy

	Leerlaufspannung	Drehzahlbereich [min ⁻¹] Speed range [rpm]			Max. Drehzahl	Anker-Widerstand	Anker-Induktivität
	No-load voltage	0 – 3 000	0 – 6 000	0 – 10 000	max. Speed	Armature Resistance	Armature Inductance
Typ Type	U ₀ [mV/min ⁻¹]	R _{Load} [kΩ]	R _{Load} [kΩ]	R _{Load} [kΩ]	n _{max} [min ⁻¹]	R _A (20 °C) [Ω]	L _A [mH]
GT 3.10 L / 405	5	≥ 15	≥ 36	≥ 100	10 000	310	30

Czujnik generacyjny – termopara

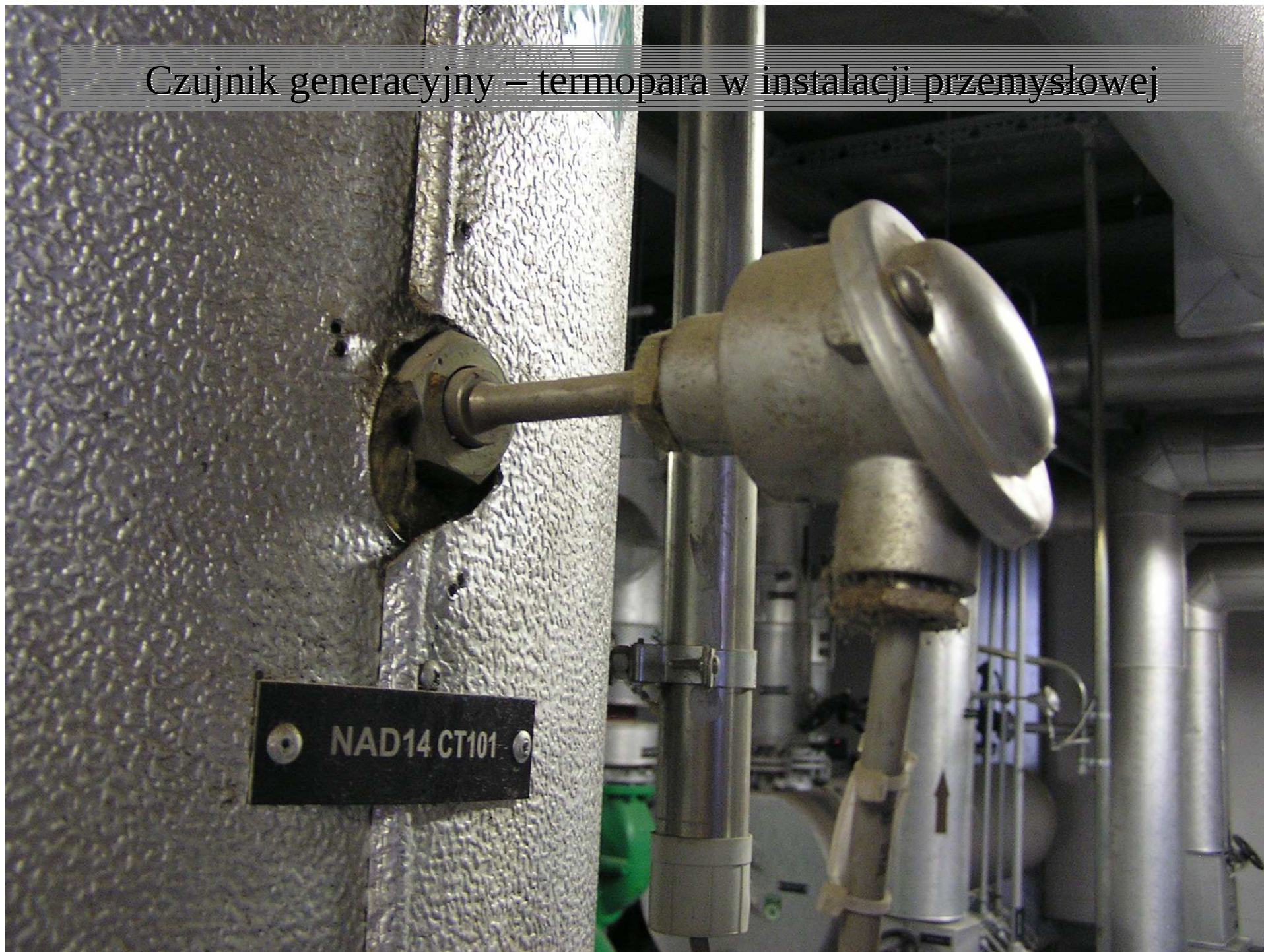
Wolne końce termopary,
spoina odniesienia

Wykonanie przemysłowe

Spoina pomiarowa
termopary

Czujniki **termoelektryczne** – różne wykonania

Czujnik generacyjny – termopara w instalacji przemysłowej

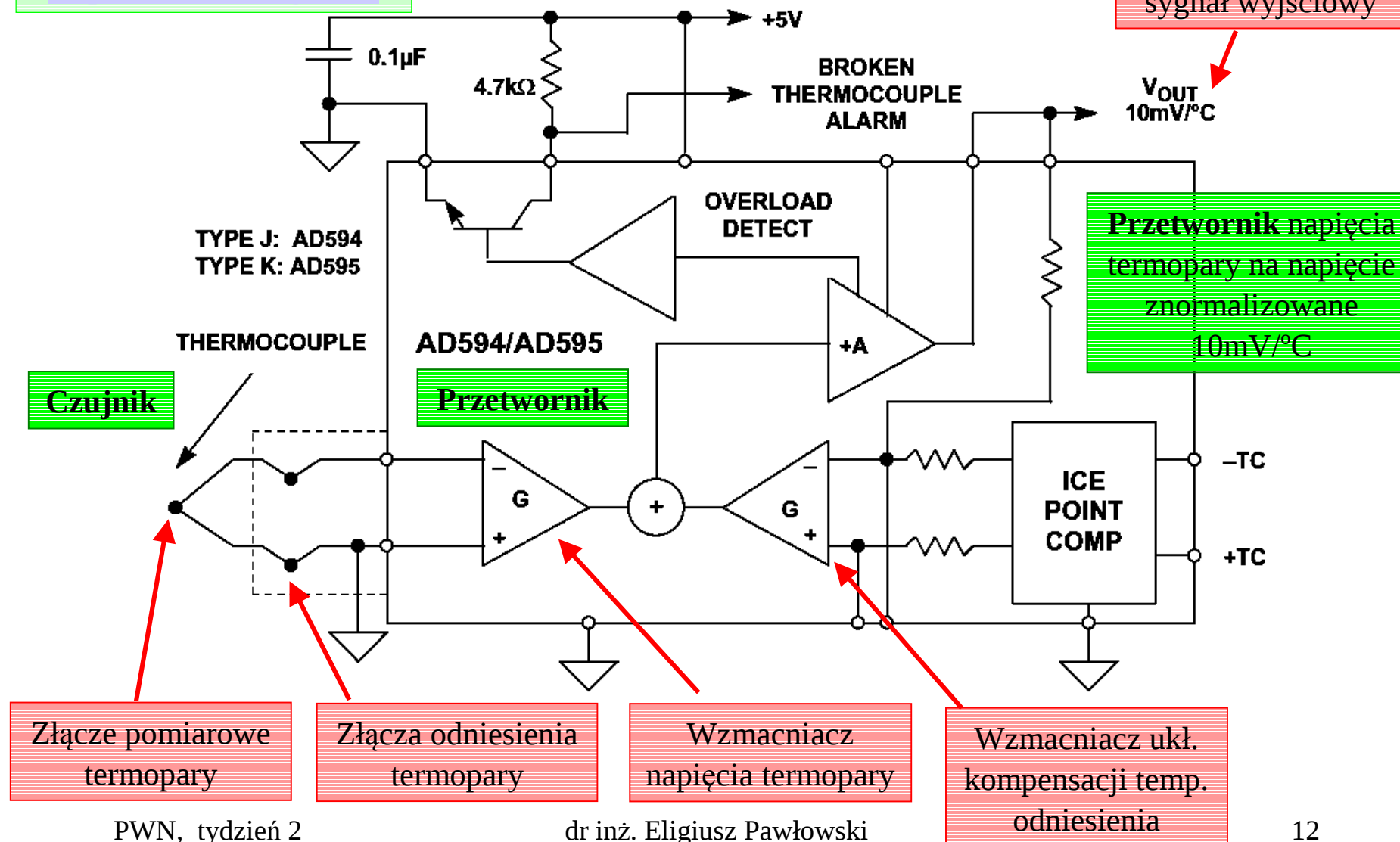


Czujnik generacyjny – termopara + przetwornik pomiarowy

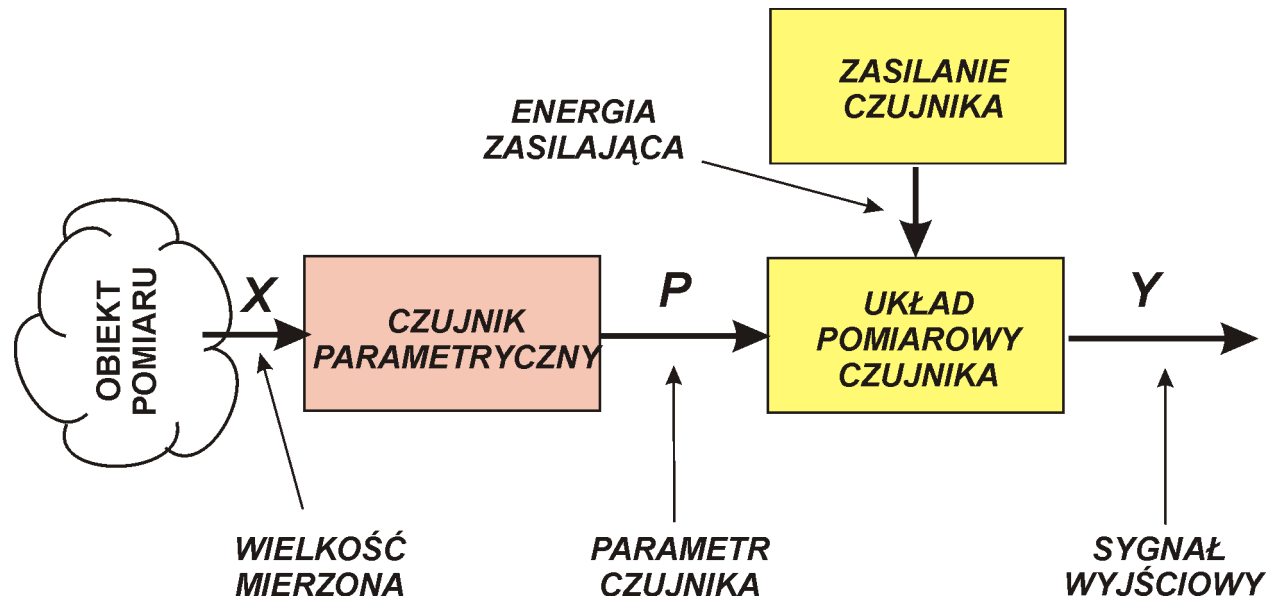
Źródło: Analog Devices

<http://www.analog.com/>

Wzmocniony
sygnał wyjściowy



Układ pracy czujnika parametrycznego

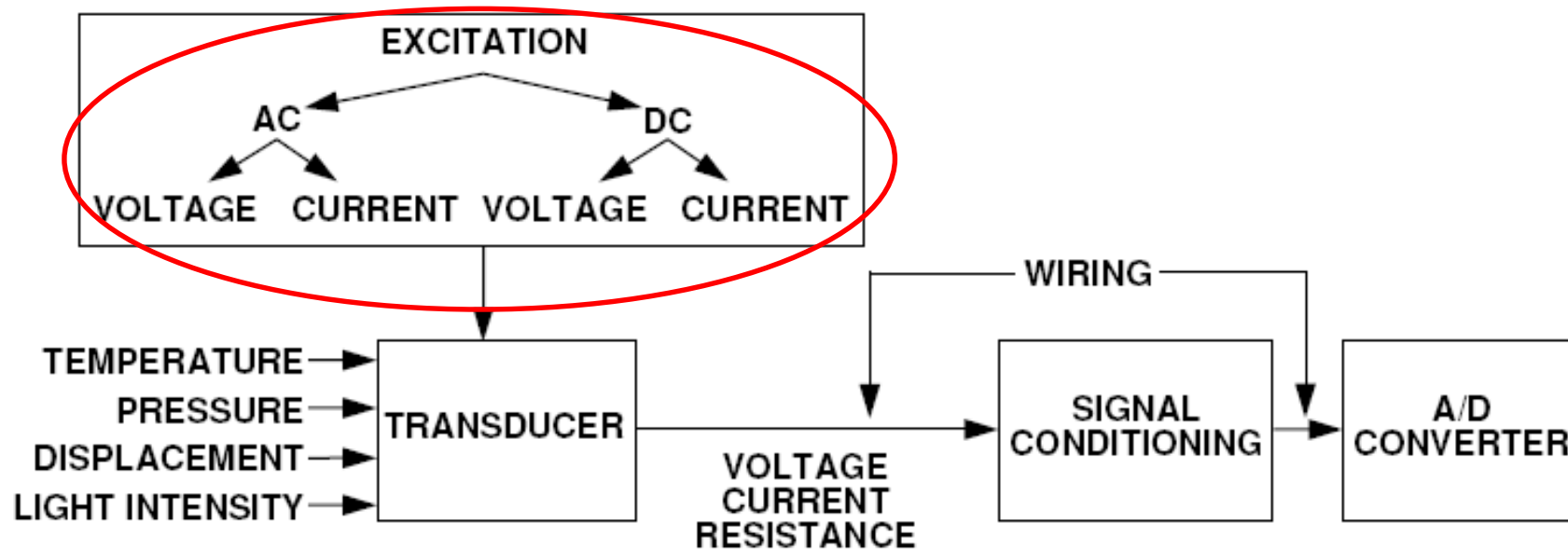


Czujnik parametryczny (pasywny) pod wpływem wielkości mierzonej X zmienia swój określony parametr elektryczny P , wyjściowy sygnał elektryczny Y jest generowany układzie pomiarowym czujnika dzięki energii pobranej ze źródła energii zasilającej.

Zasilanie czujnika parametrycznego

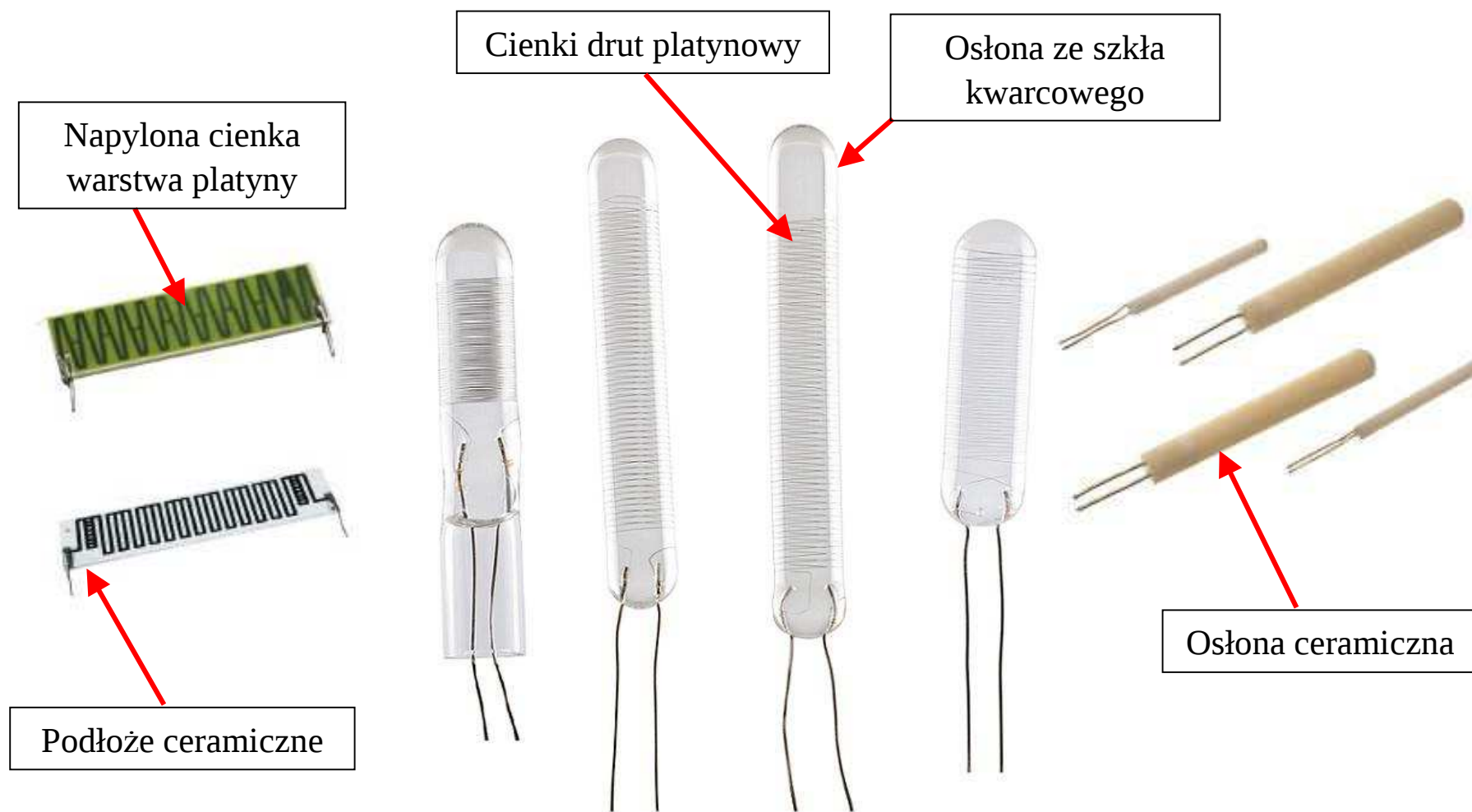
Źródło: Analog Devices

<http://www.analog.com/>



Sposoby zasilania czujnika parametrycznego

Czujnik parametryczny – przykład Pt100



Czujniki **termorezystancyjne Pt100** – różne wykonania

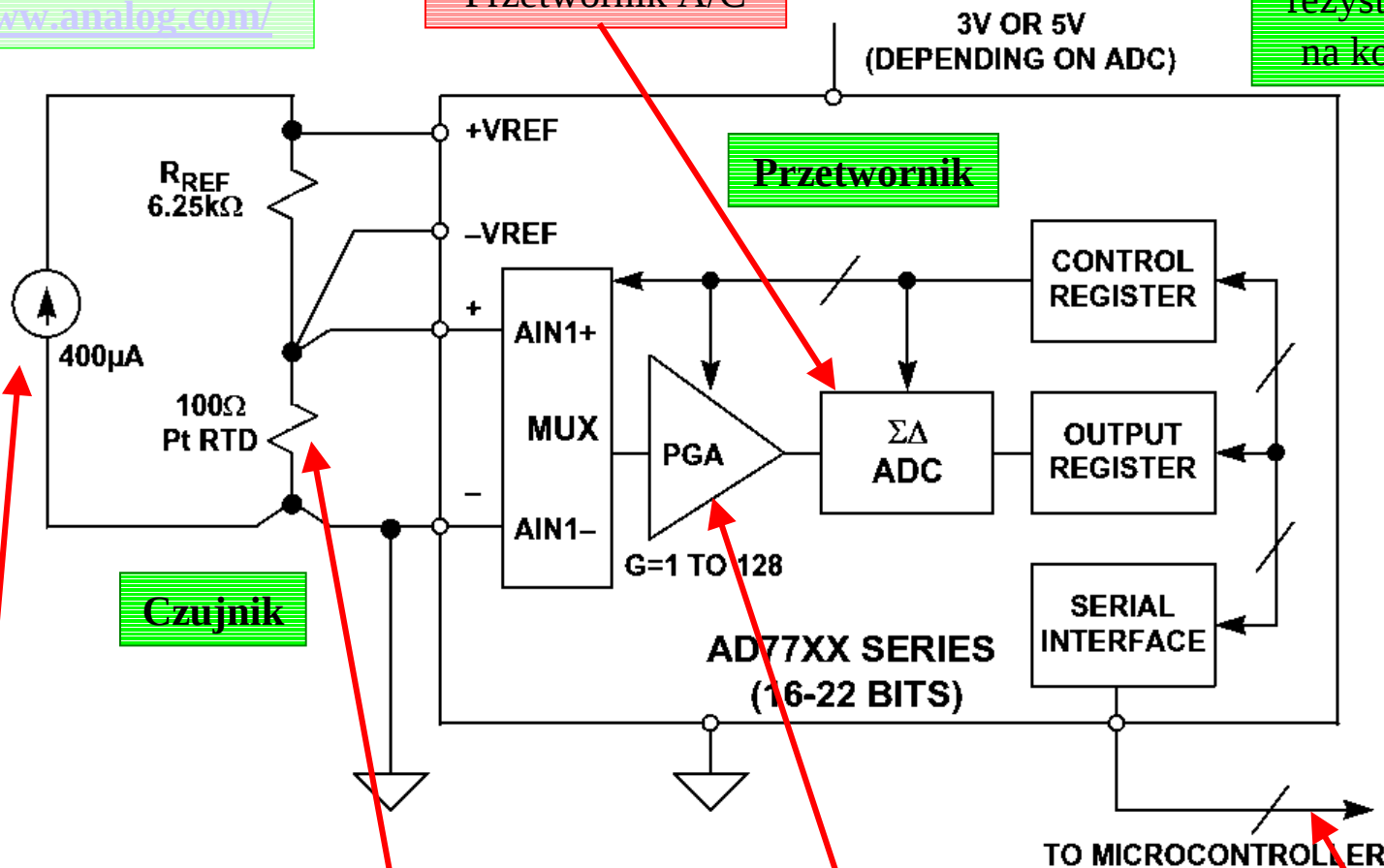
Czujnik parametryczny – Pt100 + przetwornik pomiarowy

Źródło: Analog Devices

<http://www.analog.com/>

Przetwornik A/C

Przetwornik rezystancji Pt100 na kod cyfrowy



Źródło prądowe zasilające czujnik

Czujnik termorezystancyjny

Wzmacniacz napięcia na czujniku

Cyfrowy sygnał wyjściowy

Statyczne i dynamiczne parametry czujników (przetworników)

Parametry statyczne – opisują właściwości czujnika w stanie **statycznym** (ustalonym), tzn. gdy sygnały: wejściowy i wyjściowy czujnika są stałe w czasie i nie zmieniają swoich wartości (lub zmieniają na tyle wolno, że parametry statyczne opisują zachowanie się czujnika wystarczająco dokładnie).

Parametry dynamiczne – opisują właściwości czujnika w stanie **dynamicznym**, tzn. gdy sygnały: wejściowy i wyjściowy zmieniają się w czasie. Stan dynamiczny może być **ustalony** (gdy określone parametry sygnału nie zmieniają się, np.: wartość średnia, skuteczna, amplituda itp.) lub **nieustalony** (gdy czujnik przechodzi z jednego stanu ustalonego do drugiego stanu ustalonego).

Statyczne parametry czujnika (wybrane)

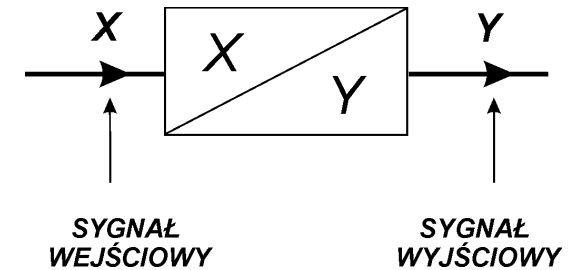
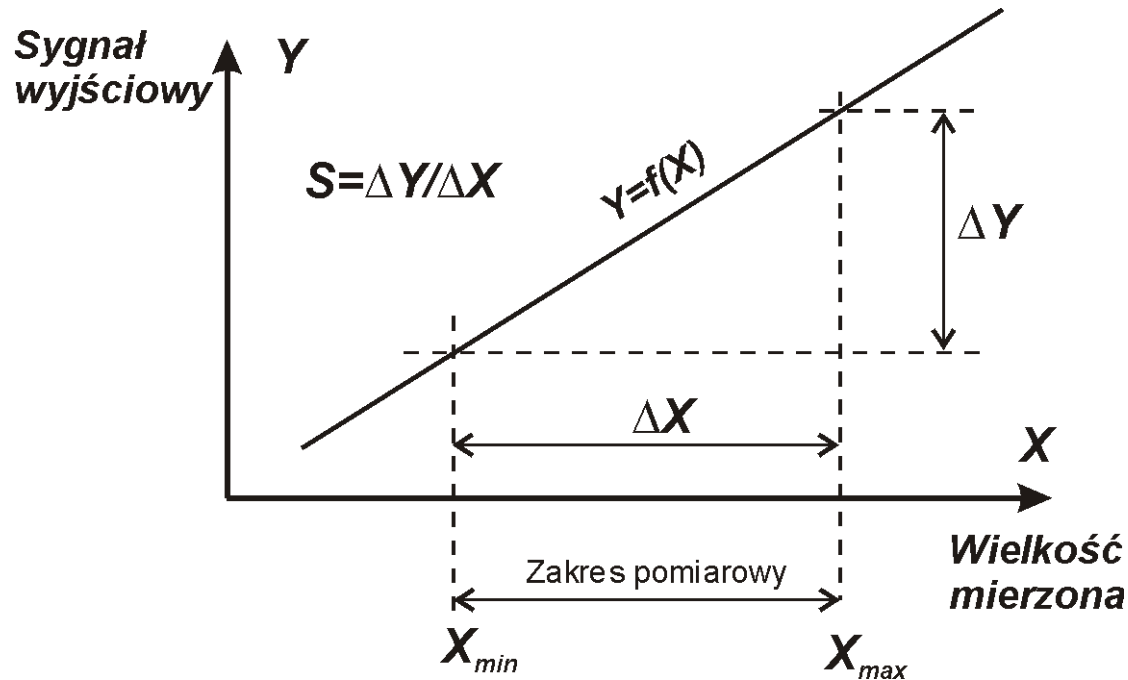
Czułość – iloraz przyrostu odpowiedzi czujnika przez odpowiadający mu przyrost sygnału wejściowego.

Stała przetwarzania – odwrotność czułości.

Próg pobudliwości – największa zmiana sygnału wejściowego nie wywołująca zauważalnej zmiany odpowiedzi czujnika.

Strefa martwa – największy przedział, w którym wartość sygnału wejściowego może być zmieniana w obu kierunkach nie powodując wykrywalnej zmiany odpowiedzi czujnika.

Idealna charakterystyka statyczna czujnika (liniowa)



1. Czułość S przetwornika

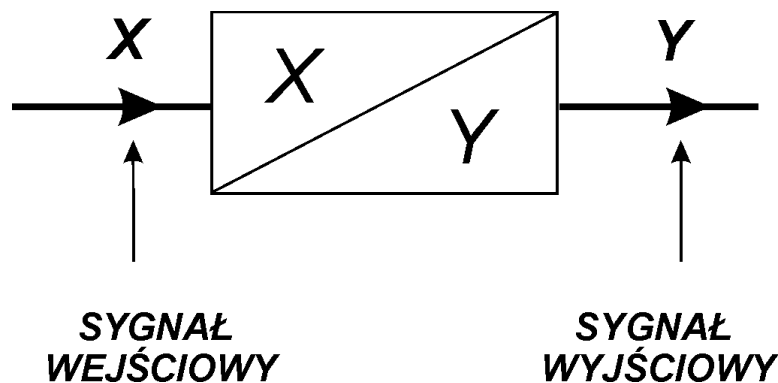
$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

2. Stała k przetwornika

$$k = \frac{1}{S} = \frac{\Delta X}{\Delta Y}$$

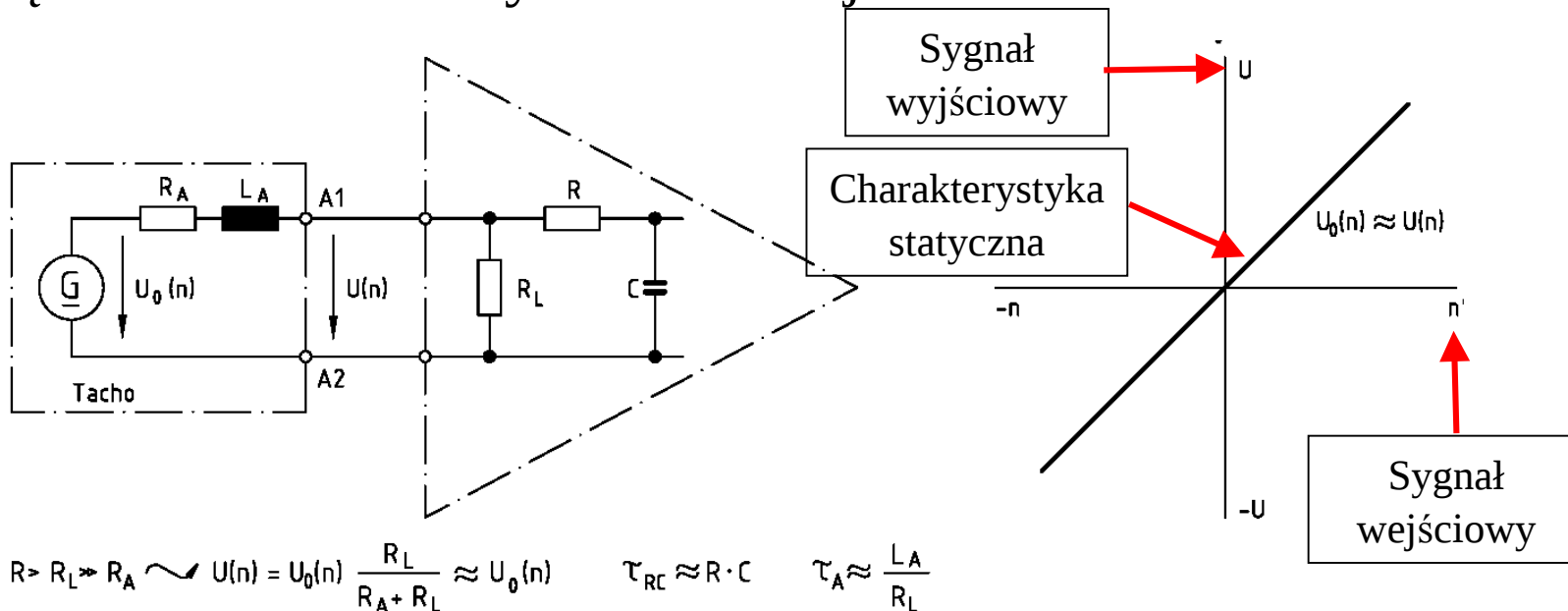
Czułość i stała przetwarzania - komentarz

1. Czułość S czujnika powinna być jak największa, wtedy małym zmianom ΔX sygnału wejściowego odpowiadają duże zmiany ΔY sygnału wyjściowego czujnika.
2. Stała k czujnika praktycznie jest przydatna do wyznaczenia wartości wielkości mierzonej X na podstawie sygnału wyjściowego Y czujnika:



$$X = k \cdot Y$$

Prądniczka tachometryczna GT3 – jeszcze raz dane techniczne



Polarität bei Rechtslauf des Antriebes, Blick auf A-Seite

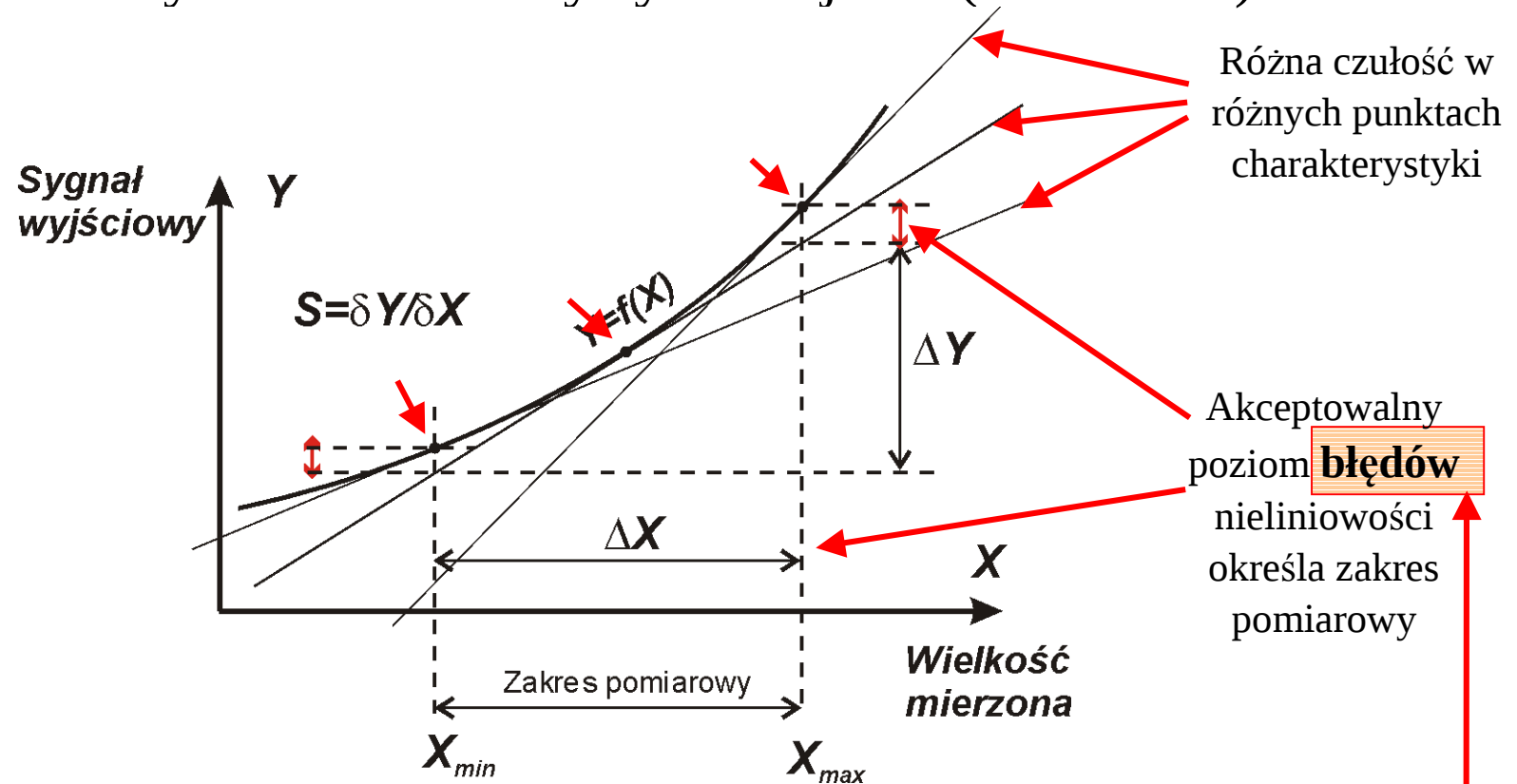
Polarity for clockwise rotation of the drive, viewing mounting face

2A1 : +
2A2 : - (VDE)

Zakres pomiarowy

	Leerlaufspannung	Drehzahlbereich [min ⁻¹] Speed range [rpm]			Max. Drehzahl	Anker-Widerstand	Anker-Induktivität
	No-load voltage	0 – 3 000	0 – 6 000	0 – 10 000	max. Speed	Armature Resistance	Armature Inductance
Typ Type	U ₀ [mV/min ⁻¹]	R _{Load} [kΩ]	R _{Load} [kΩ]	R _{Load} [kΩ]	n _{max} [min ⁻¹]	R _A (20 °C) [Ω]	L _A [mH]
GT 3.10 L / 405	5	≥ 15	≥ 36	≥ 100	10 000	310	30

Rzeczywista charakterystyka czujnika (nieliniowa)



Czułość S przetwornika

$$S = \frac{\partial Y}{\partial X}$$

Kluczowe słowo:
błąd

Błędy przetwarzania czujnika (przetwornika)

1. Błędy odniesione do wejścia i do wyjścia czujnika
2. Błąd przesunięcia charakterystyki – błąd zera.
3. Błąd nachylenia charakterystyki – błąd czułości (wzmocnienia).
4. Błąd liniowości (nieliniowości).
5. Błąd histerezy.
6. Błąd kwantowania.

Pojęcie błędu ogólnie – przypomnienie z podstaw metrologii

Błąd (*ang. error* [*'erə(r)*]) – rozbieżność między dwoma porównywanymi obiektami, z których jeden odtwarza lub zastępuje drugi, a drugi jest odniesieniem lub wzorcem dla pierwszego, inaczej w uproszczeniu i dużym skrócie:

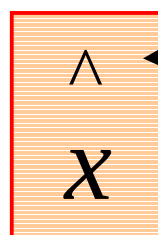
rozbieżność pomiędzy tym, co jest, a tym, co być powinno.

Uwagi

- Porównywanymi obiektami mogą być **cechy** przedmiotów i zdarzeń, twory abstrakcyjne, procedury postępowania itp. (np.: błąd ortograficzny, błąd aproksymacji, błąd logiczny).
- Jeśli porównywanymi obiektami są liczby (np.: wyniki pomiarów), to błąd również może być wyrażony odpowiednią **liczbą**, czyli może być wyznaczony **ilościowo**.
- Jeżeli występuje **nadmiar**, czyli jeśli czegoś jest za dużo w stosunku do tego, co powinno być, to błąd jest **dodatni** i odwrotnie, jeśli występuje **niedobór** to błąd jest **ujemny**.

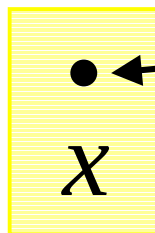
Definicje błędu pomiaru – przyjęte symbole

Wartość wielkości zmierzona (wartość zmierzona) – wartość wielkości wyrażająca wynik pomiaru, wartość uzyskana z pomiaru.



„Daszek” symbolizuje rozrzut wartości w pewnym przedziale

Wartość wielkości prawdziwa (wartość prawdziwa, rzeczywista) – wartość wielkości logicznie zgodna z definicją wielkości.



„Kropka” symbolizuje jedną dokładną konkretną wartość (punkt na osi liczbowej)

Błąd pomiaru (bezwzględny) – przypomnienie

Błąd pomiaru – różnica między wartością wielkości **zmierzona** (czyli wynikiem pomiaru) a wartością **prawdziwą** wielkości mierzonej.

$$\Delta x = x - x_0$$

Uwagi

- Tak zdefiniowany błąd nazywamy również błędem **bezwzględnym**, dla odróżnienia go od błędu **względego**.
- Błąd (bezwzględny) ma tę samą **jednostkę**, co wielkość mierzona.
- Jeśli wynik pomiaru jest **za duży** względem wartości prawdziwej, to znak błędu jest **dodatni.**, jeśli jest **za mały**, to znak błędu jest **ujemny** !
- Ponieważ wartość **prawdziwa** jest **nieznana**, w praktyce wartość **błędu** jest również **nieznana**.

Błąd (przyrządu pomiarowego) zredukowany – przypomnienie

Błąd zredukowany, unormowany, sprowadzony, zakresowy (przyrządu pomiarowego) – stosunek błędu pomiaru (bezwzględnego) przyrządu pomiarowego do wybranej wartości charakterystycznej tego przyrządu, **najczęściej do zakresu**.

$$\delta x_{zak}^{\wedge} = \frac{\Delta x^{\wedge}}{x_{zak}} = \frac{x - x^{\bullet}}{x_{zak}}$$

Uwagi

- Tak zdefiniowana wartość charakterystyczna bywa również nazywana **wartością umowną**.
- Wartością charakterystyczną może być górna granica zakresu pomiarowego (zakres), obszar pomiarowy lub inna jednoznacznie określona wartość (więcej na ten temat będzie mówione później).
- Błąd zredukowany, podobnie jak błąd względny, jest wielkością **bezwymiarową** i również dla wygody bywa wyrażany w **procentach %** lub w **ppm**.

Klasa przyrządu pomiarowego – przypomnienie

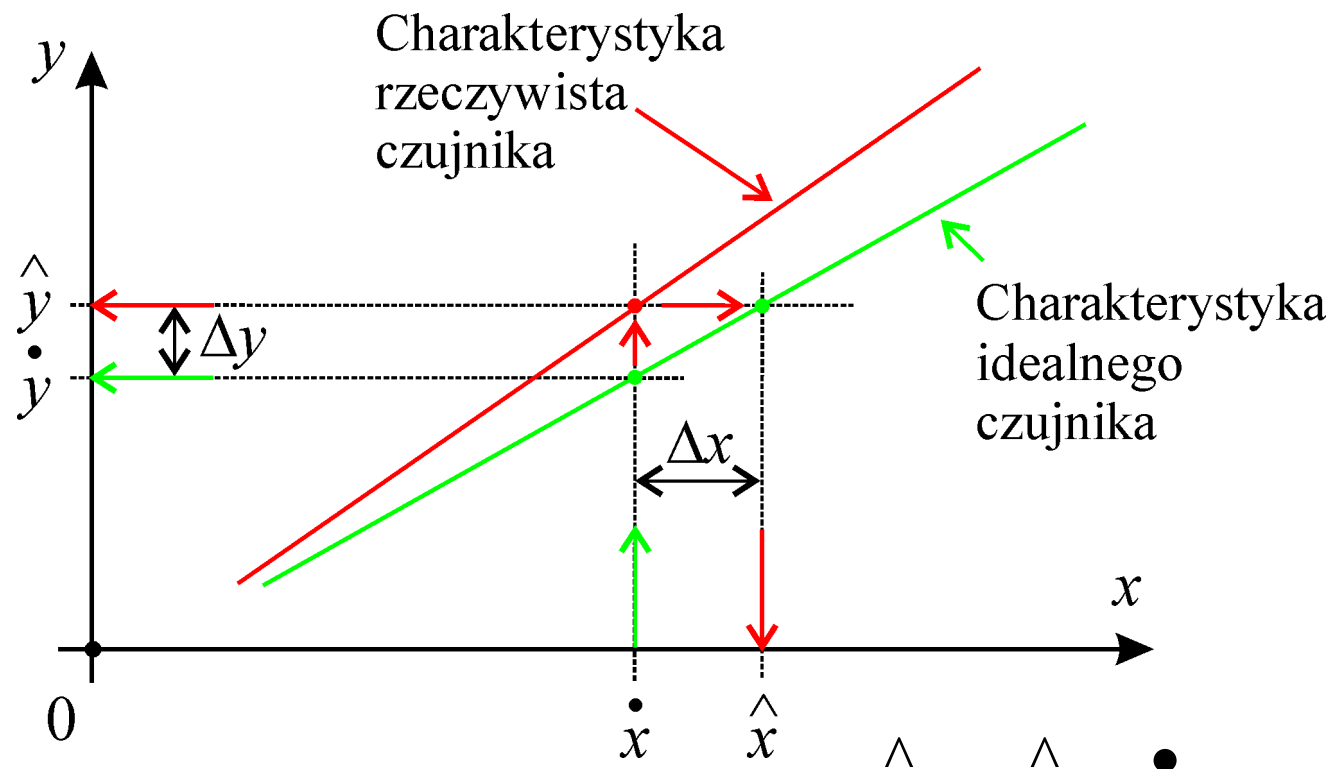
- 1 ← Najczęściej stosowany dla mierników analogowych wskaźnik klasy (tutaj: $kl = 1$) określa dopuszczalny błąd podstawowy miernika (błąd graniczny dopuszczalny, granice błędów dopuszczalnych) wyrażony w % **górnej granicy zakresu pomiarowego** (lub krócej: zakresu).

The diagram shows the formula for the measurement instrument class (kl) with several components circled in red and annotated with arrows:

- Oznaczenie klasy** (Class designation) points to the kl in the numerator.
- Dopuszczalny błąd podstawowy graniczny przyrządu pomiarowego** (Basic limit error of the measuring instrument) points to the $\Delta_{gr}^{\wedge} X$ in the numerator.
- Wartość odniesienia, tutaj zakres** (Reference value, here range) points to the X_{zak} in the denominator.
- Znak procentów w oznaczeniu klasy pomijamy** (We omit the percent sign in the class designation) points to the 100% in the formula.

$$kl = \frac{\Delta_{gr}^{\wedge} X}{X_{zak}} \cdot 100\%$$

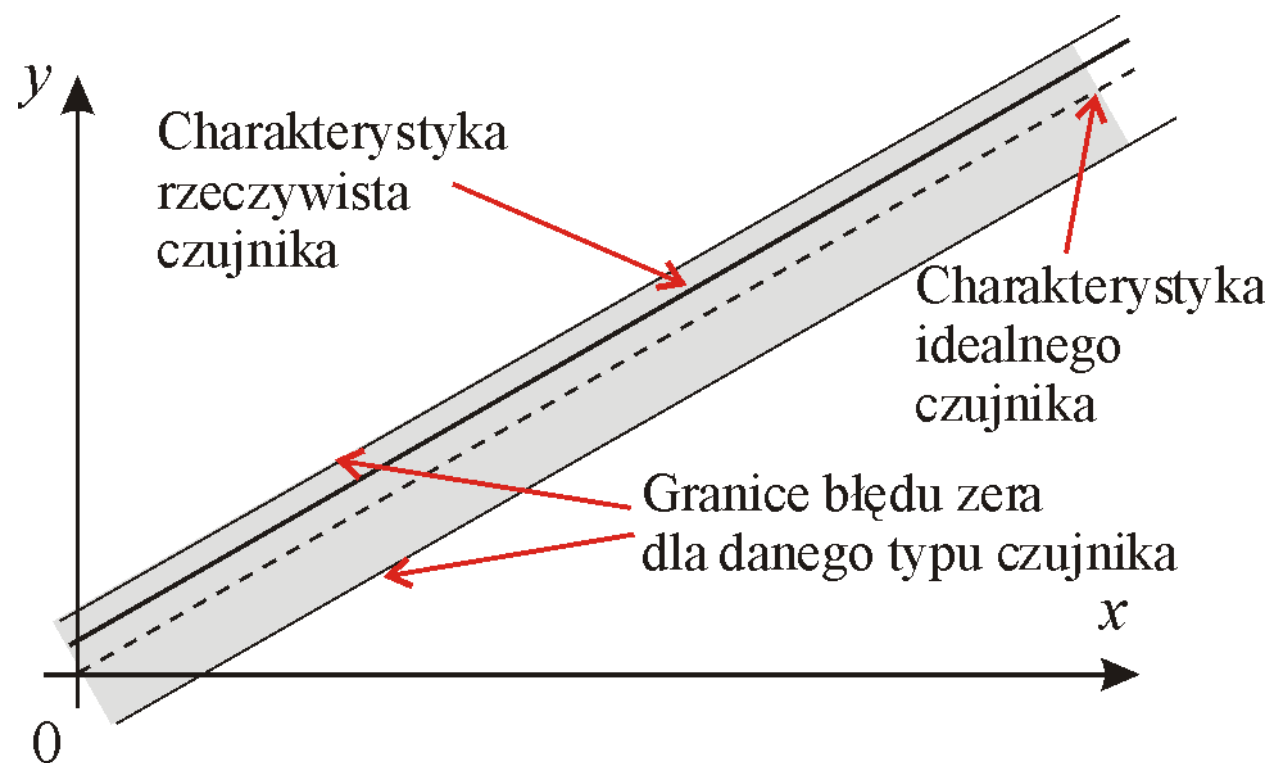
Błędy czujnika odniesione do wejścia i do wyjścia



Błąd odniesiony do wejścia $\Delta x = x - \tilde{x}$

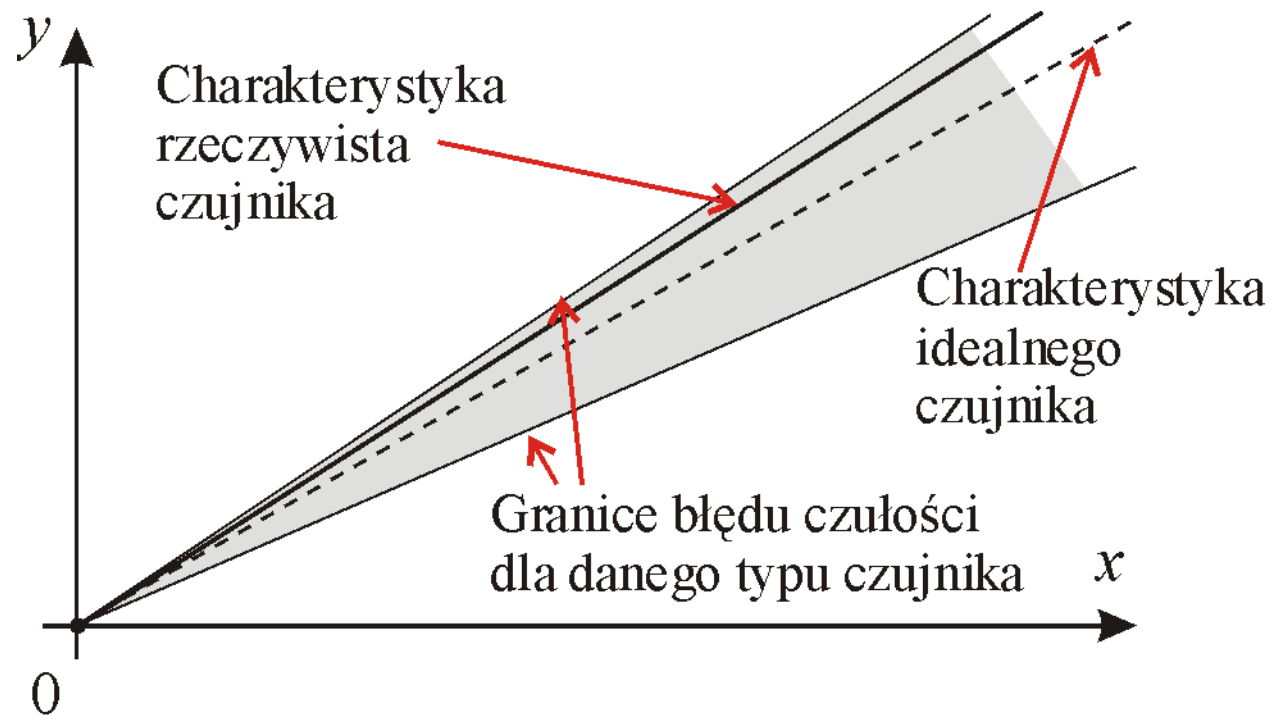
Błąd odniesiony do wyjścia $\Delta y = y - \tilde{y}$

Błędy charakterystyki czujnika – **błąd zera**



Błąd zera jest błędem **addytywnym**

Błędy charakterystyki czujnika – **błąd czułości**



Błąd czułości jest błędem **multiplikatywnym**

Wejście

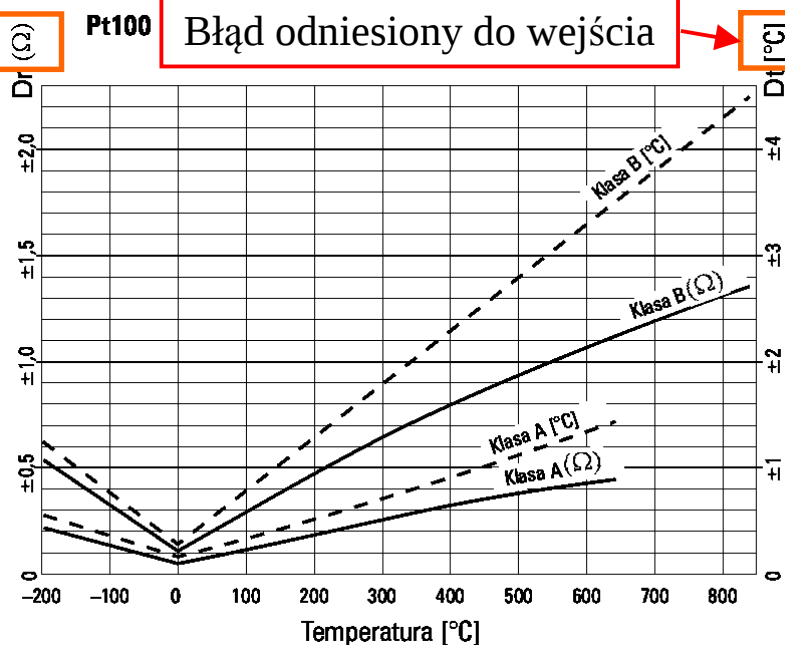
Wyjście

Przykład - błędy czujnika temperatury Pt100

CHARAKTERYSTYKI REZYSTORÓW TERMOMETRYCZNYCH (dane skrócone)

Rezystor Pt100 PN-EN 60751+A2 (Pt500 = 5xPt100, Pt1000 = 10xPt100)									
T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)	T (°C)	R (Ω)
-100	60,26	10	103,90	120	146,07	230	186,84	340	226,21
-90	64,30	20	107,79	130	149,83	240	190,47	350	229,72
-80	68,33	30	111,67	140	153,58	250	194,10	360	233,21
-70	72,33	40	115,54	150	157,33	260	197,71	370	236,70
-60	76,33	50	119,40	160	161,05	270	201,31	380	240,18
-50	80,31	60	123,24	170	164,77	280	204,90	390	243,64
-40	84,27	70	127,08	180	168,48	290	208,48	400	247,09
-30	88,22	80	130,90	190	172,17	300	212,05	450	264,18
-20	92,16	90	134,71	200	175,86	310	215,61	500	280,98
-10	96,09	100	138,51	210	179,53	320	219,15	550	297,49
0	100,00	110	142,29	220	183,19	330	222,68	600	313,71

Błąd odniesiony do wyjścia


PN-EN 60751+A2
Dopuszczalne odchyłki rezystancji D_r i temperatury D_t

Klasa tolerancji	Tolerancja
A	$0,15 + 0,002 \cdot t $
B	$0,3 + 0,005 \cdot t $

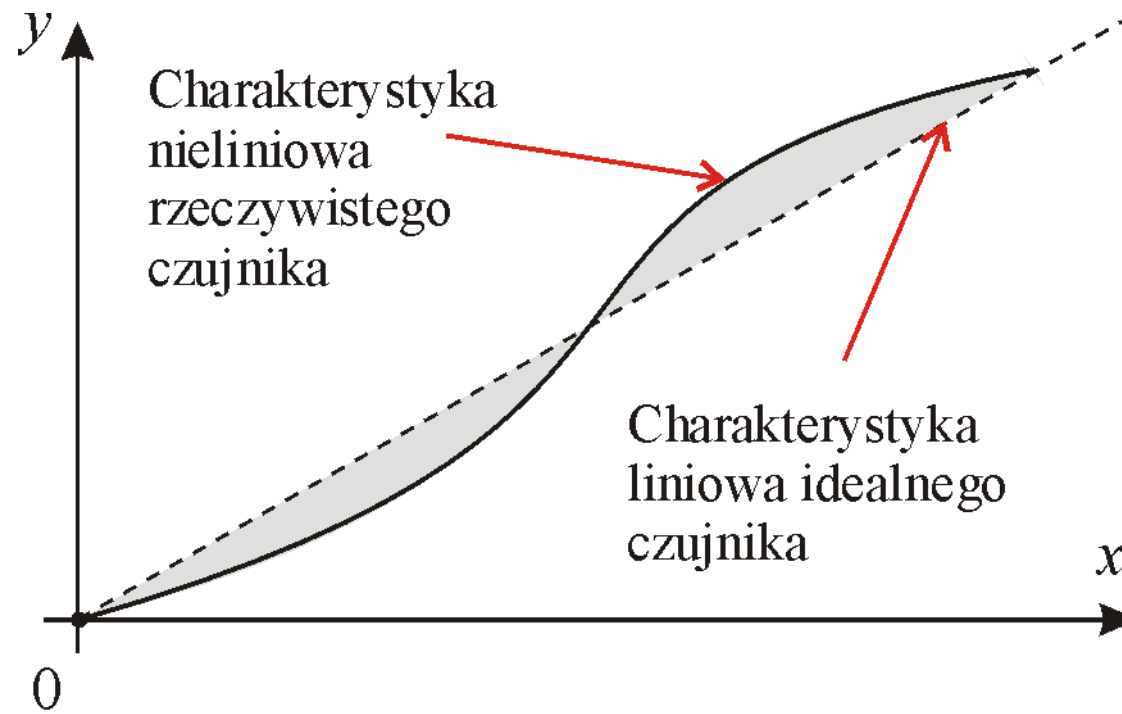
 gdzie $|t|$ oznacza moduł temperatury w stopniach Celsjusza
(bez uwzględnienia znaku)

Błąd zera

Błąd czułości

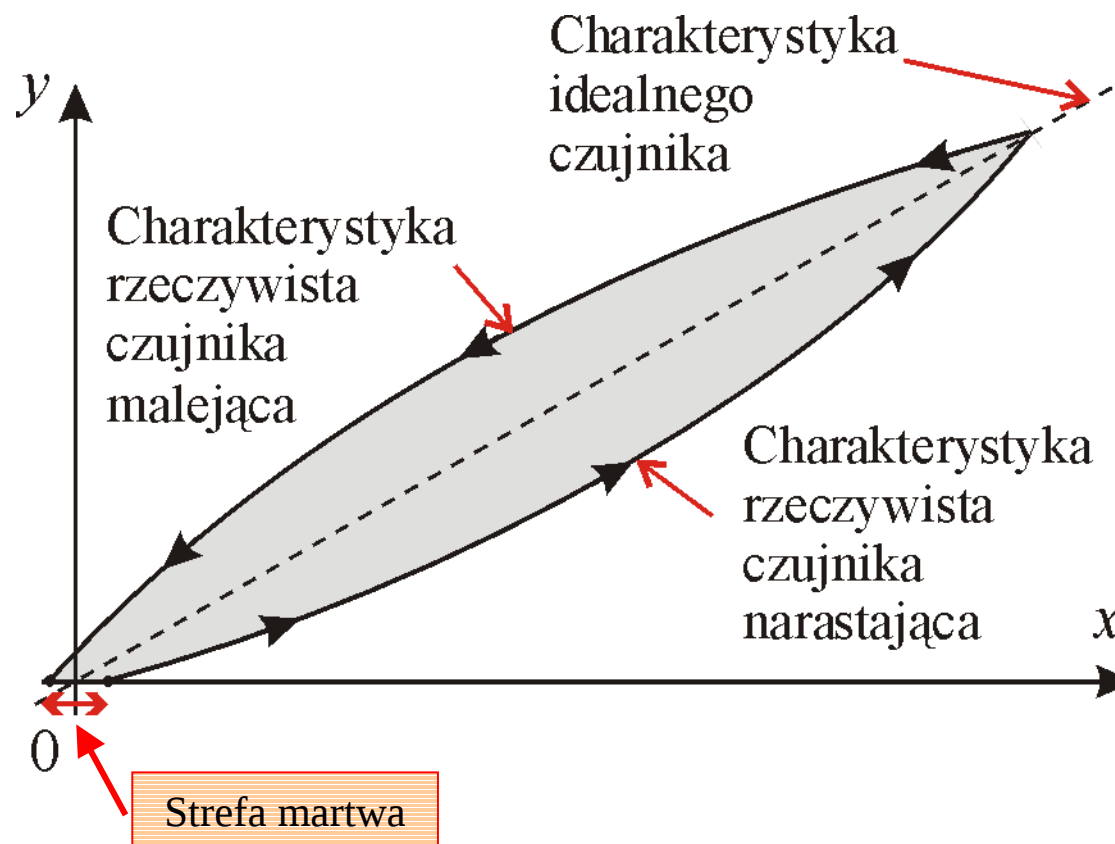
$$\Delta t = 0,15^{\circ}\text{C} + 0,2\% \cdot t$$

Błędy charakterystyki czujnika – błąd liniowości



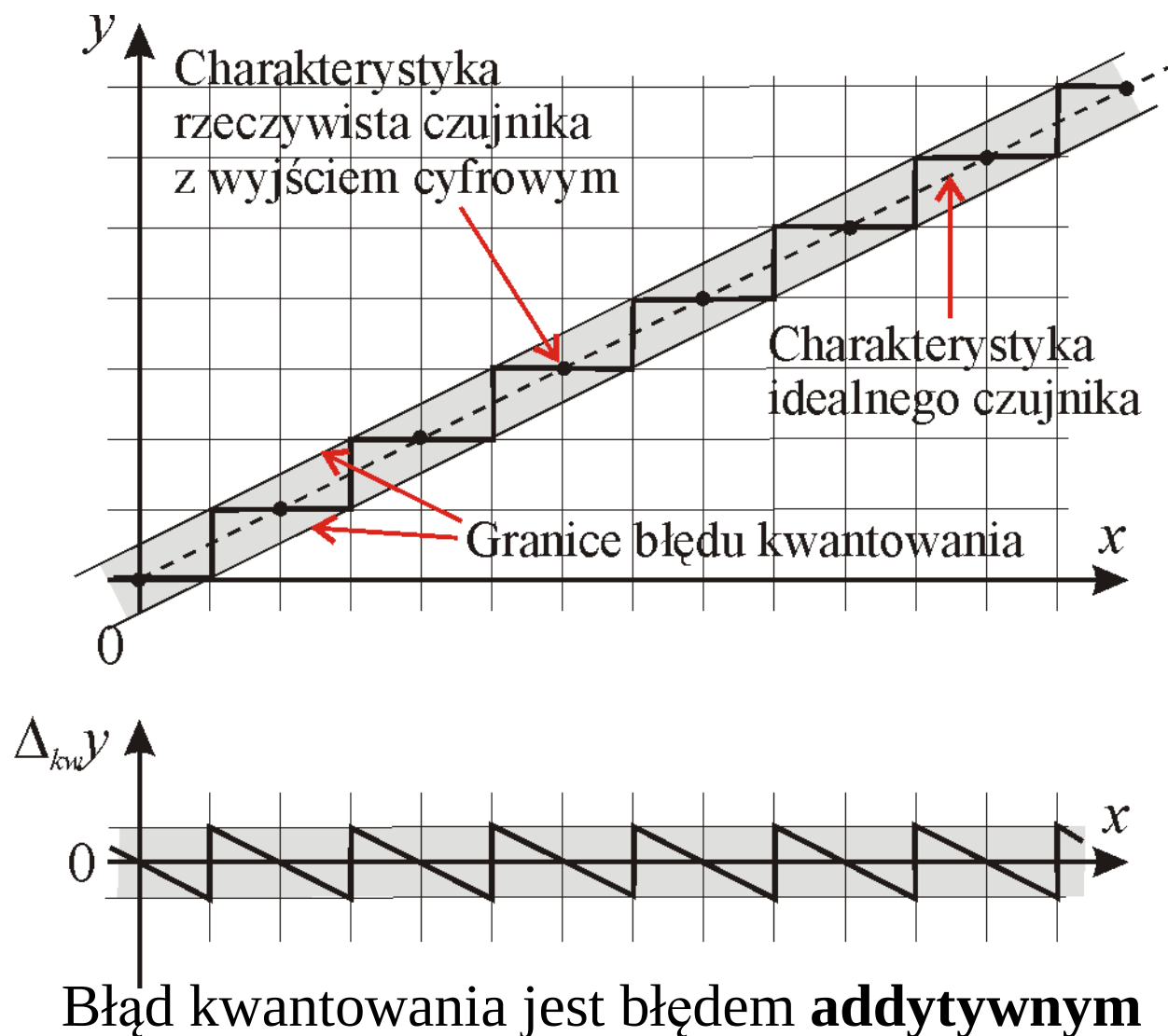
Błąd liniowości występuje gdy **charakterystyka nie jest linią prostą**

Błędy charakterystyki czujnika – błąd histerezy, strefa martwa

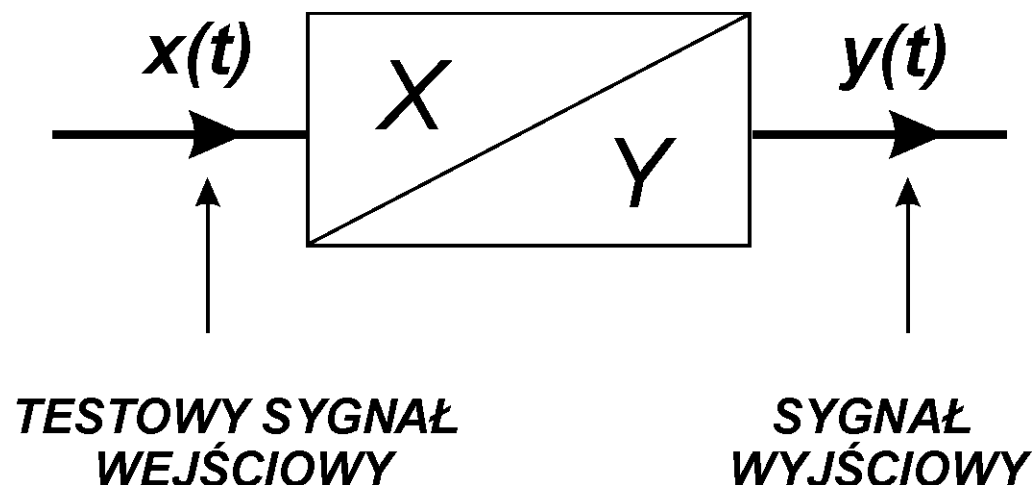


Błąd histerezy występuje, gdy **charakterystyka zależy od kierunku** zmian wielkości wejściowej przetwornika

Błędy charakterystyki czujnika – błąd kwantowania



Wyznaczanie dynamicznych parametrów czujników



Wyznaczanie właściwości dynamicznych czujnika polega na podaniu na jego wejście **znanego sygnału testowego** (wzorcowego) $x(t)$ i zbadaniu otrzymanego sygnału wyjściowego $y(t)$.

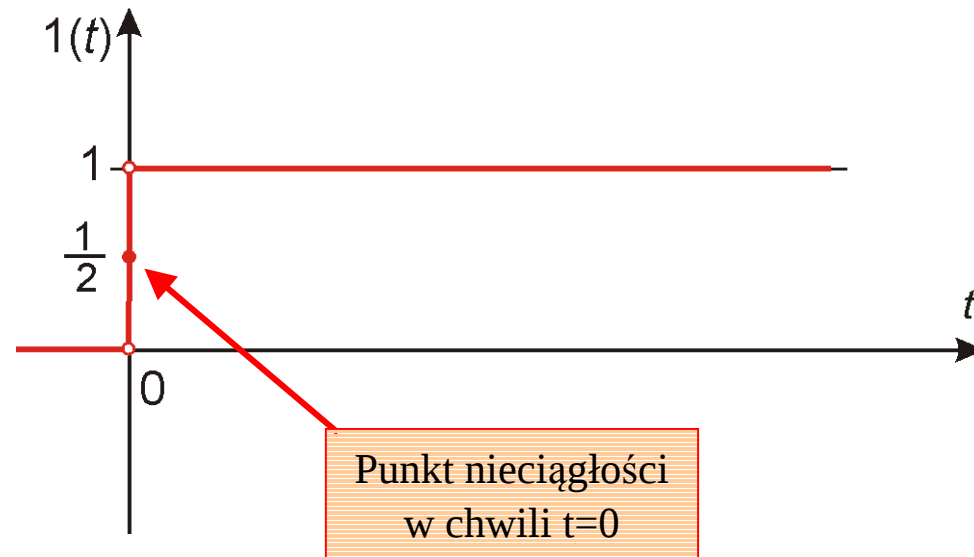
Wzorcowe sygnały testowe – najczęściej stosowane

1. Skok jednostkowy (funkcja skokowa, funkcja Heaviside'a, jedynka Heaviside'a).
2. Impuls delta Dirac'a (dystribucja Dirac'a, funkcja impulsowa, pseudofunkcja $\delta(t)$).
3. Funkcja harmoniczna (sinusoidalna).

Wzorcowe sygnały testowe – skok jednostkowy

1. **Skok jednostkowy** (funkcja skokowa, funkcja Heaviside'a, jedynka Heaviside'a).

$$1(t) = \begin{cases} 1 & \text{dla } t > 0 \\ \frac{1}{2} & \text{dla } t = 0 \\ 0 & \text{dla } t < 0 \end{cases}$$

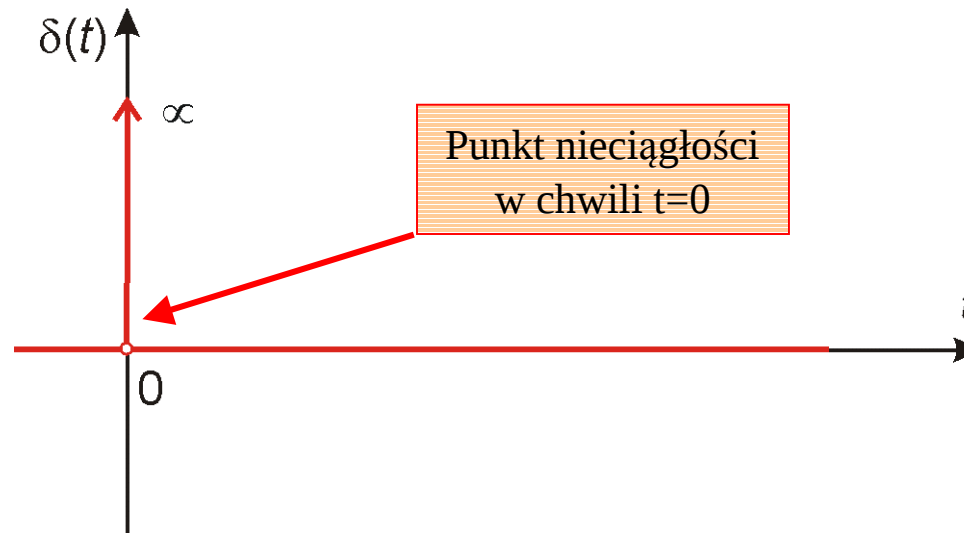


Wzorcowe sygnały testowe – impuls delta Dirac’a

2. Impuls delta Dirac’a (dystrybucja Dirac’a, funkcja impulsowa, pseudofunkcja $\delta(t)$).

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t \neq 0 \\ \infty & \text{dla } t = 0 \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$$



Wzorcowe sygnały testowe – funkcja harmoniczna

3. Funkcja harmoniczna (sinusoidalna).

$$x(t) = X_m \sin \omega t \cdot 1(t)$$

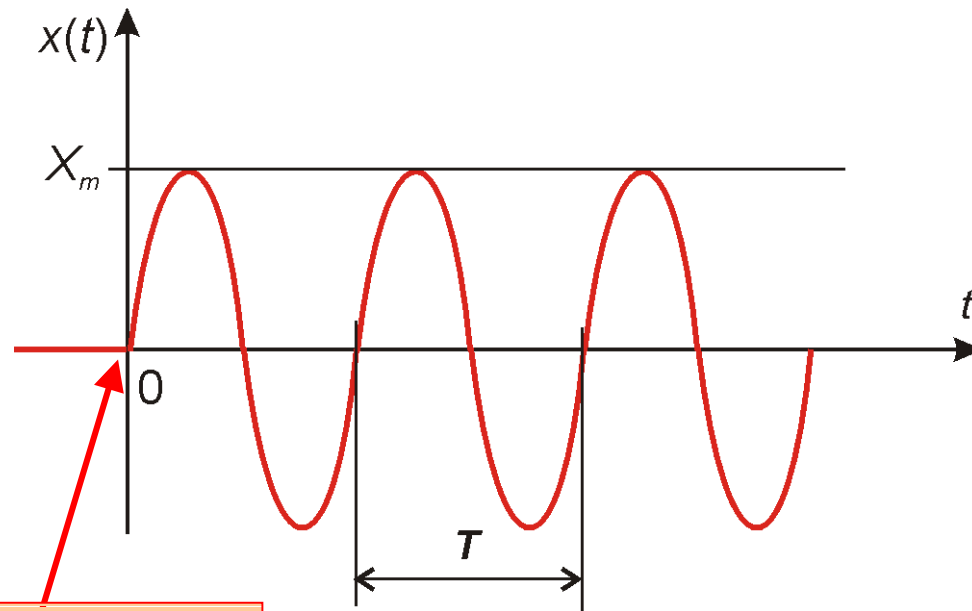
$$\omega = 2 \pi f$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2 \pi}{\omega}$$

ω - pulsacja

f - częstotliwość

T - okres



Sinusoida rozpoczyna się w chwili $t=0$

Charakterystyki dynamiczne przetworników

1. **Charakterystyki czasowe** – funkcja czasu na wyjściu przetwornika po podaniu na jego wejście sygnału testowego, najczęściej skoku jednostkowego lub impulsu delta Dirac’a.
2. **Charakterystyki częstotliwościowe** – charakterystyka amplitudowa i fazowa wyznaczone po podaniu na wejście przetwornika sygnału harmonicznego.
3. **Charakterystyki operatorowe** – opisywane transmitancją operatorową układu $K(s)$ zdefiniowaną jako iloraz transformaty Laplace’a $Y(s)$ sygnału wyjściowego $y(t)$ i transformaty Laplace’a $X(s)$ sygnału wejściowego $x(t)$.

$$K(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

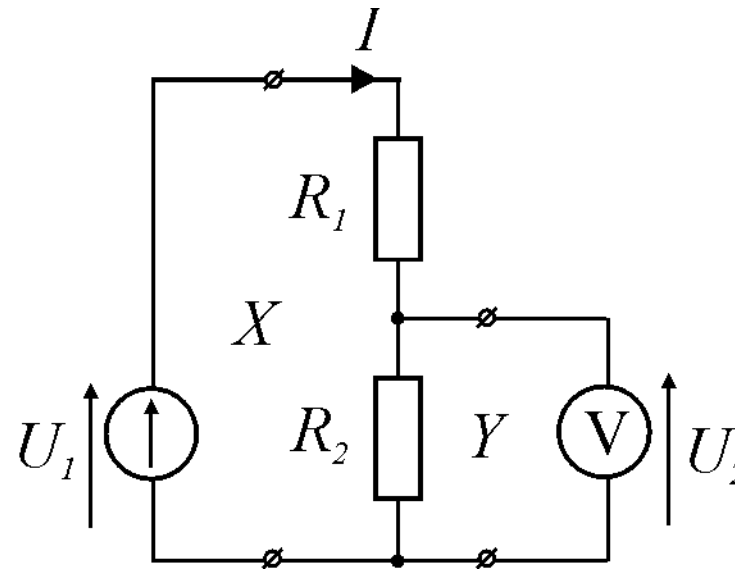
Przykład - przetwornik bezinercyjny zerowego rzędu

Równanie przetwarzania: $y(t) = k x(t)$

$$u_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1(t)$$

$$u_2(t) = k u_1(t)$$

$$k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



Przykład elektryczny przetwornika bezinercyjnego

k - współczynnik przetwarzania statycznego.

Uwaga: w tym przykładzie zawsze $k < 1$, ale dla innych przetworników **k może być dowolne !**

Uwaga na oznaczenia !!!

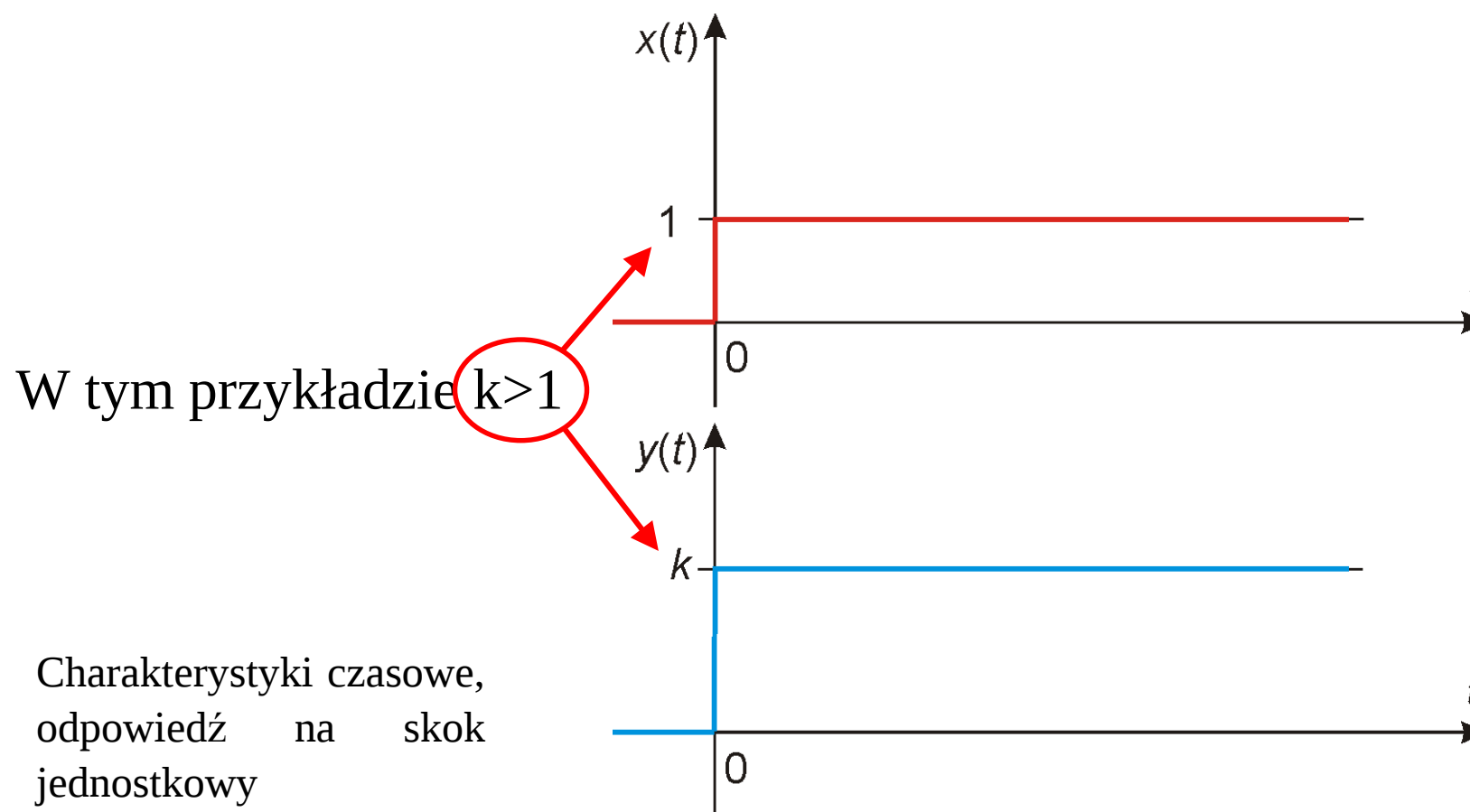
W równaniu przetwarzania przetwornika bezinercyjnego:

$$y(t) = k x(t)$$

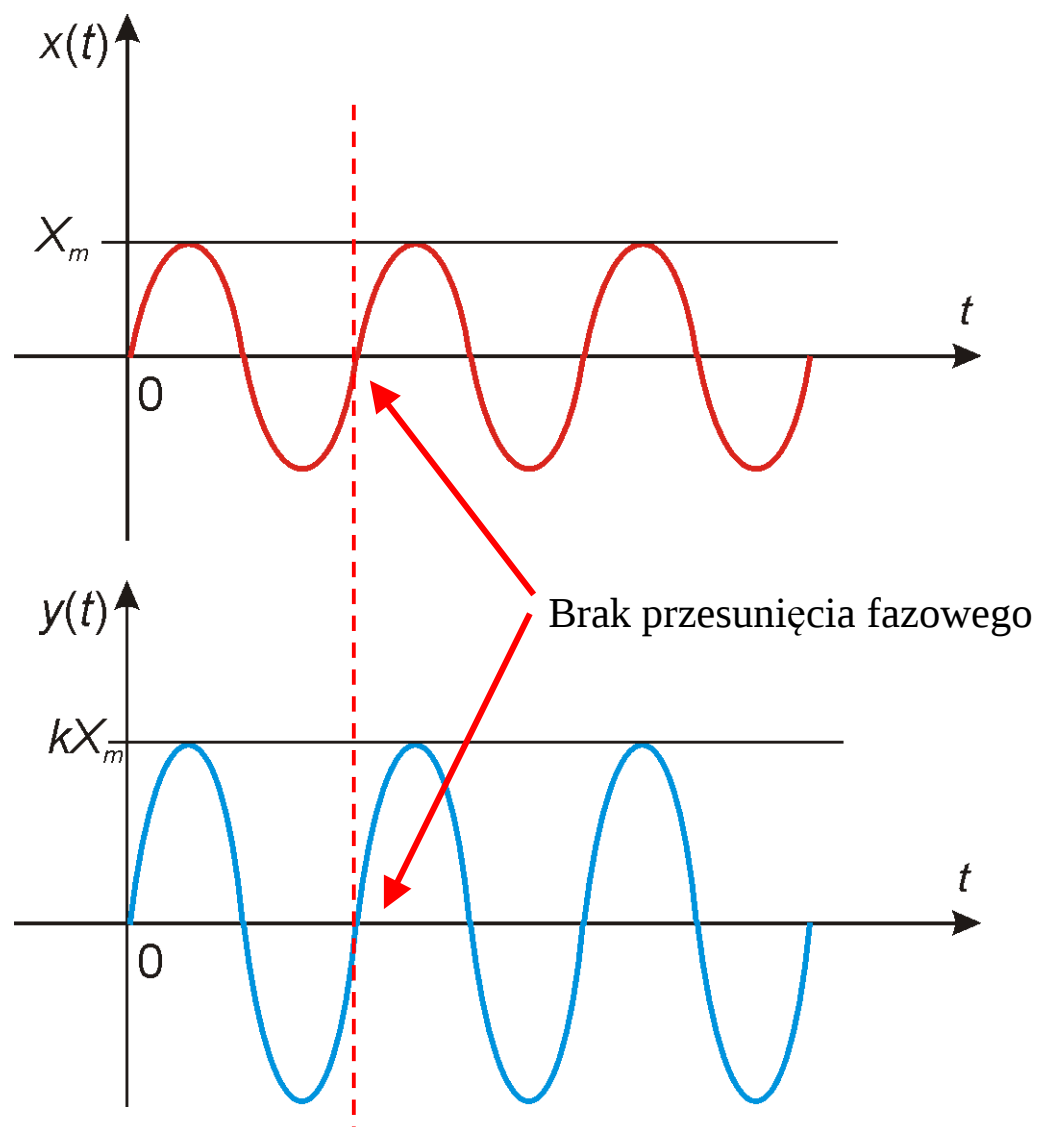
Symbol ***k*** oznacza **współczynnik przetwarzania statycznego**.

UWAGA! Niestety, tym samym symbolem ***k*** bywa również w literaturze oznaczana **stała przetwornika**, a to nie jest to samo co **współczynnik przetwarzania statycznego**, nie należy mylić tych pojęć. Łatwo je rozróżnić na podstawie kontekstu zdania, w którym zostały użyte.

Przetwornik bezinercyjny zerowego rzędu

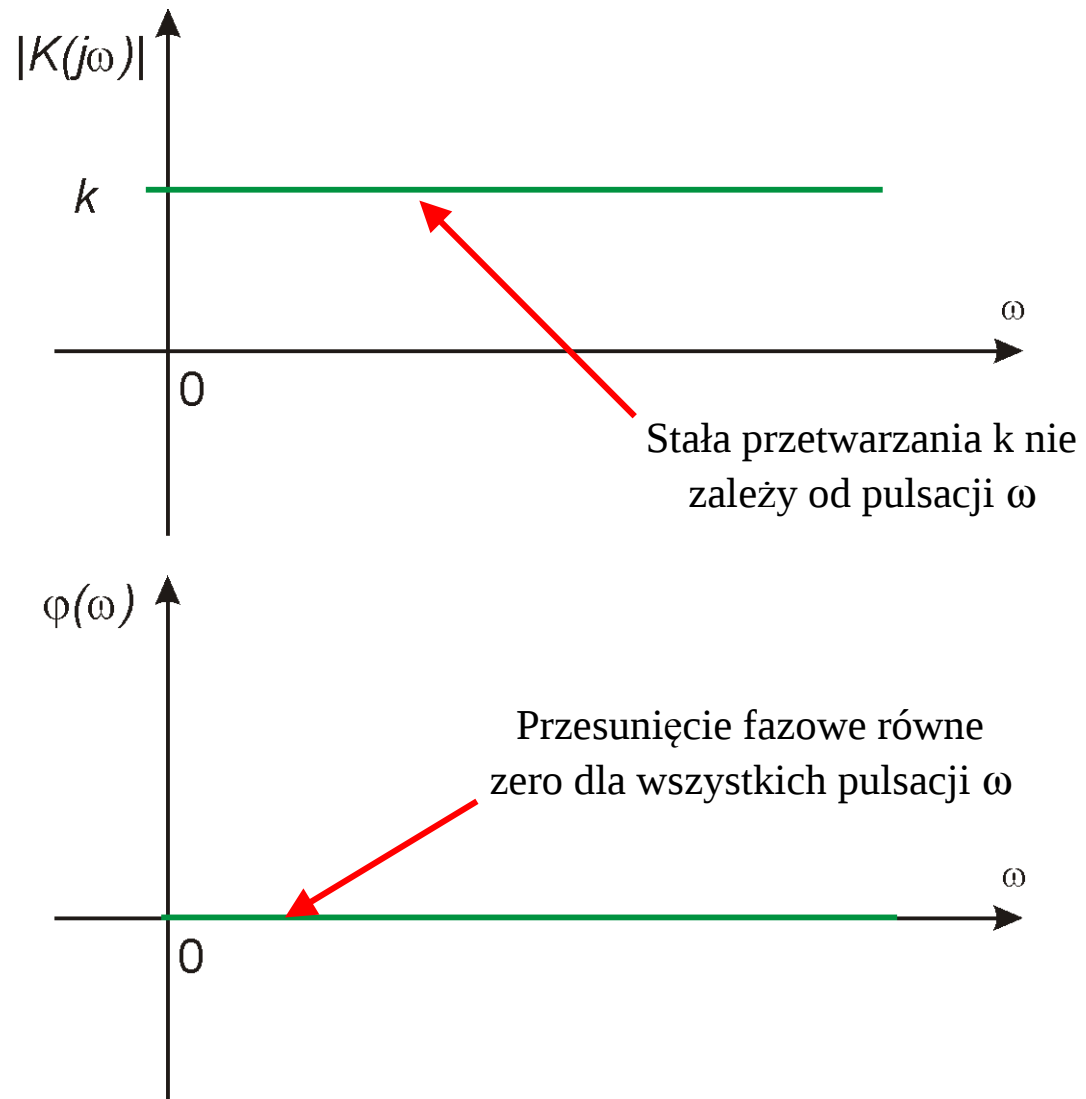


Przetwornik bezinercyjny zerowego rzędu



Charakterystyki czasowe,
odpowieź na sygnał
harmoniczny

Przetwornik bezinercyjny zerowego rzędu



Charakterystyki
częstotliwościowe
amplitudowa i fazowa

Przykłady przetworników bezinercyjny zerowego rzędu

W rzeczywistości przetworniki całkowicie bezinercyjne nie występują. W ograniczonym zakresie można jednak za bezinercyjne uważać:

1. Dzielniki rezystancyjne napięcia
2. Tensometry rezystancyjne
3. Układy dźwigni mechanicznych
4. Układy optyczne

Podsumowanie

1. Wszystkie rodzaje czujników dzielimy przede wszystkim na dwie grupy: generacyjne i parametryczne, ze względu na źródło energii niezbędnej do ich zasilania.
2. Właściwości czujników są opisane parametrami statycznymi i dynamicznymi.
3. Najwygodniejsze do praktycznego stosowania są czujniki posiadające liniową charakterystykę statyczną.
2. Charakterystyki rzeczywistych czujników wykazują liczne błędy.
3. Właściwości dynamiczne czujników można opisywać na kilka sposobów.
4. Stosuje się różne wzorcowe sygnały testowe do badania właściwości dynamicznych czujników.
5. Najprostszym dynamicznie układem jest człon bezinercyjny zerowego rzędu.

