

Czujniki położenia (przemieszczenia)

Pomiary wielkości geometrycznych.

Wyróżnić tu można następujące typowe zadania należące do najważniejszych i najczęściej spotykanych:

- a) pomiar wymiarów i położenia wyrobów (np. taśmy, folie, rury, pręty, druty) oraz elementów agregatu produkcyjnego;
- b) pomiar położenia i przemieszczenia kątowego wałów, osi i innych elementów obrotowych;
- c) pomiar poziomu cieczy i ciał sypkich w zbiornikach, bunkrach i obiektach przemysłowych, takich jak: piece, reaktory, młyny.

Pomiary wielkości geometrycznych.

Zakres wartości wielkości mierzonych jest bardzo obszerny, od ułamków milimetra (np. grubość folii metalowej czy plastikowej) aż do wielometrowych obiektów czy przesunięć. Obok zakresu wartości, kryteriami decydującymi o wyborze sposobu są: wymagana dokładność, rozdzielczość oraz oczekiwana szybkość zmian wartości mierzonej.

Pomiary wielkości geometrycznych.

Pierwszym stopniem decyzji jest wybór między analogowym a cyfrowym przetwarzaniem. Ogólnie biorąc, przy analogowym pomiarze wielkości geometrycznych, uzyskanie klasy dokładności lepszej niż 0,5 jest trudne.

Przy wyższych wymaganiach istnieją wskazania stosowania przetwarzania dyskretnego, jednak wiążą się z trudnościami i kosztami takiego przetwarzania.

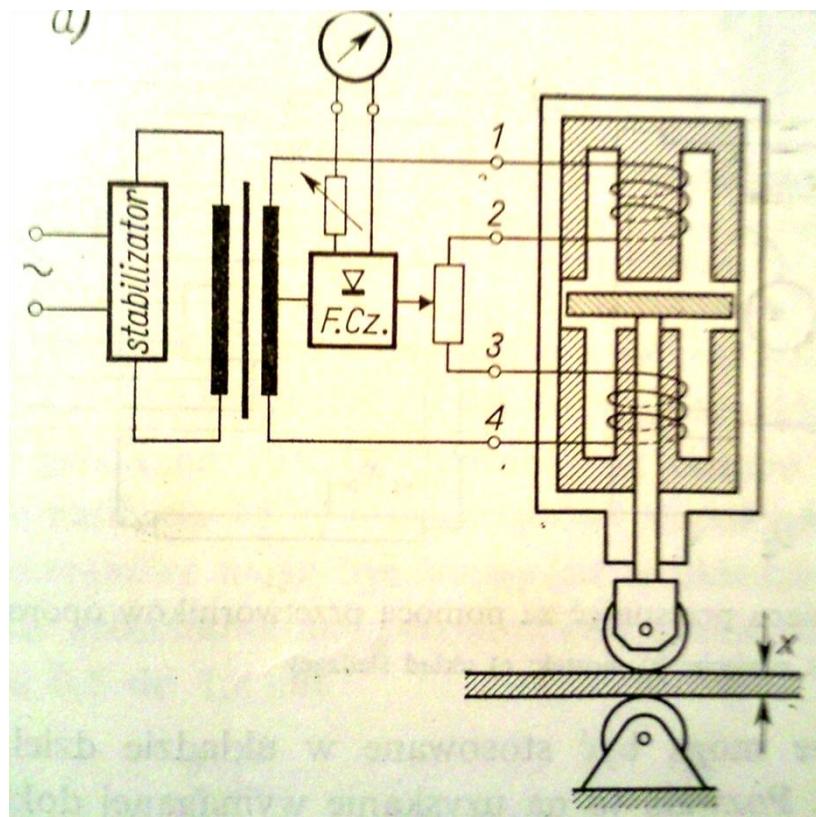
Analogowe pomiary wielkości geometrycznych.

Typowe zagadnienia pomiarowe można podzielić na pomiary małych i dużych przemieszczeń przy niewielkich prędkościach oraz pomiary zmian o dużych prędkościach czy częstotliwościach.

Do małych przemieszczeń nadają się dobrze przetworniki indukcyjnościowe różnicowe lub transformatorowe oraz pojemnościowe. Zwiększenie czułości można uzyskać za pomocą przekładni, jeżeli oddziaływanie mechaniczne nie stanowi ograniczenia.

Analogowe pomiary wielkości geometrycznych.

Przykład mikrometru indukcyjnego do pomiaru grubości taśmy z wyjściem stałoprądowym.



Mikrometry tego typu nadają się dobrze do pomiaru odchyleń od zadanej grubości, przy czym jego zakresy pomiarowe wynoszą od $10 \mu\text{m}$ wzwyż.

Rys. nr 1. Pomiary grubości taśmy przetwornikiem indukcyjnym.

Analogowe pomiary wielkości geometrycznych.

Błędy w tej konstrukcji mogą powstawać w części mechanicznej urządzenia, jak np. sprężyste ugięcia, luzy i niepewność styku (Δl_{SL}) oraz deformacje termiczne.

Błędy te można ująć w postaci wzoru:

$$\Delta l = l \left(\alpha \Delta t + \frac{\sigma}{E} \right) + \Delta l_{SL}$$

gdzie:

l - długość pręta przenoszącego ruch,

α – temperaturowy współczynnik rozszerzalności cieplnej,

σ, E – naprężenie i stała sprężystość drutu.

Analogowe pomiary wielkości geometrycznych.

Dla przykładu łatwo stwierdzić, że pręt stalowy o długości 200 mm wskutek przyrostu temperatury o 1 deg wydłuża się o $2,2 \mu\text{m}$, co przy zakresie pomiarowym $50 \mu\text{m}$ odpowiada niedokładność 4 %.

Do pomiaru małych przemieszczeń można również zastosować tensometry oporowe naklejone np. na odkształcalną belkę. Wadą takiego urządzenia jest stosunkowo duża siła oddziaływania.

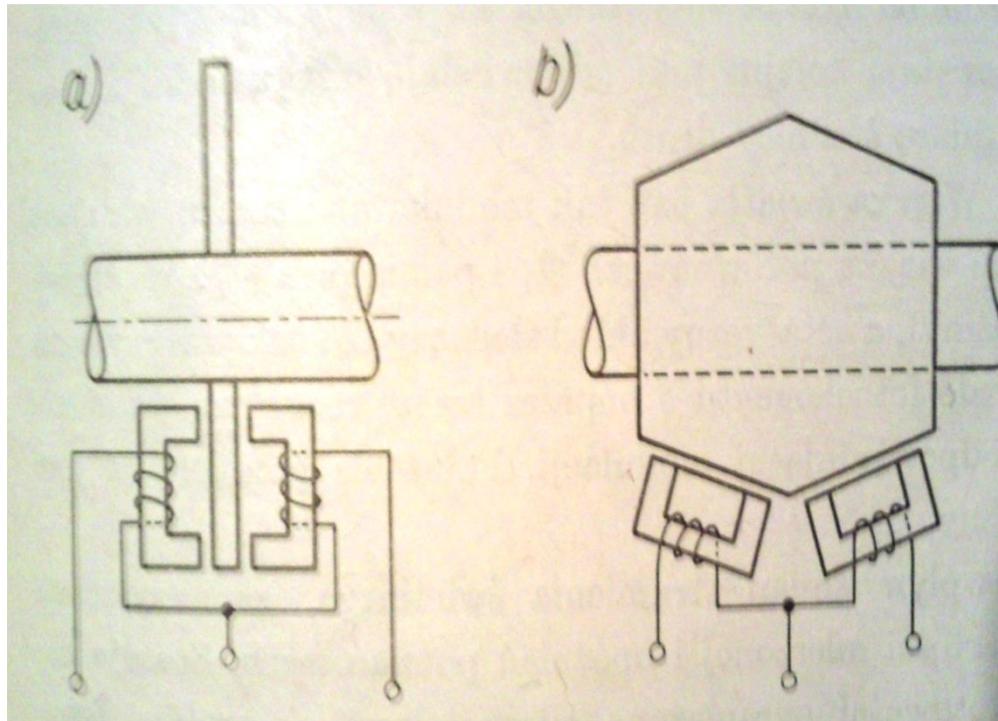
Przetworniki analogowe można adaptować praktycznie do wszelkich pomiarów przesunięć przez zastosowanie mechanicznych przekładni. Głównym ograniczeniem pomiaru szybkich, skokowych czy harmonicznych ruchów są własności mechanicznych elementów układu, a tylko wyjątkowo własności elektryczne.

Analogowe pomiary wielkości geometrycznych.

Przykładem ważnego i bardzo odpowiedzialnego zastosowania przetworników indukcyjnych jest pomiar parametrów turbin o dużej mocy, w szczególności przesuwu osiowego i względnego wydłużenia korpusu turbin.

W typowym urządzeniu zworę między rdzeniami tworzy element ferromagnetyczny w postaci tarczy na wale turbiny dla pomiaru przesuwu osiowego w granicach około +- 1mm albo w postaci dwóch stożków dla względnego wydłużenia w granicach około +- 5mm.

Analogowe pomiary wielkości geometrycznych.



Rys. nr 2. Zastosowanie przetwornika indukcyjnego do pomiaru przemieszczeń wału turbiny.

a) pomiar przesunięć b) pomiar wydłużenia

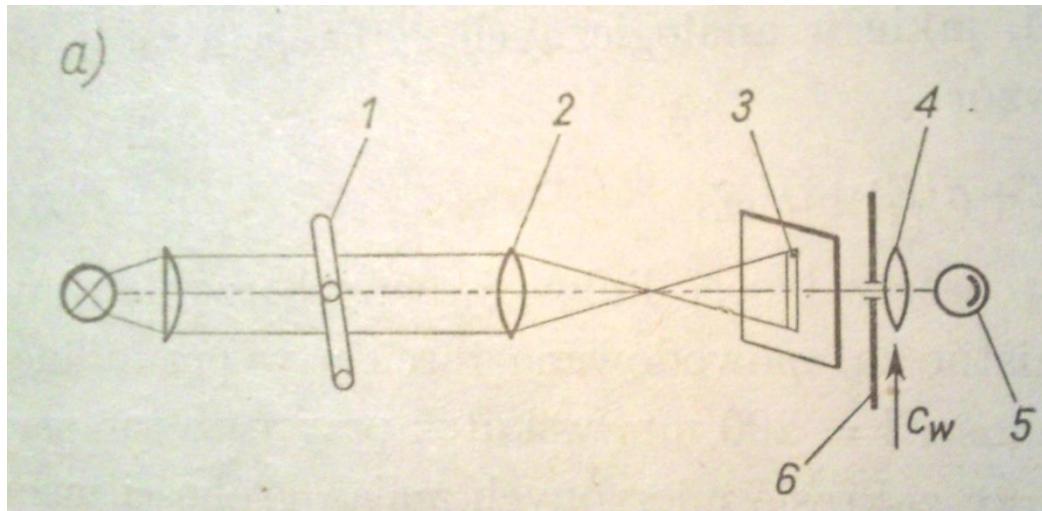
Analogowe pomiary wielkości geometrycznych.

Pomiary szerokości walcowanych taśm (metalowych, plastikowych, gumowych, a także średnicy drutów), nierzadko istotne wymagają stosowania metody bezstykowej, realizowanej fotoelektrycznie.

Najważniejsze stosowane sposoby pomiaru można podzielić na trzy grupy:

- 1) Polegające na pomiarze czasu zasłonięcia wiązki poruszającej się prostopadle do krawędzi obiektu ze znaną szybkością;
- 2) Polegające na pomiarze zmiany strumienia światła spowodowanej przez częściowe jej zasłonięcie przez obiekt;
- 3) Polegające na zliczaniu liczby światłowodów nie zasłoniętych przez przedmiot; jest to raczej pomiar dyskretny, nie analogowy, przy którym wykorzystano nową technikę światłowodów z włókien szklanych.

Analogowe pomiary wielkości geometrycznych.



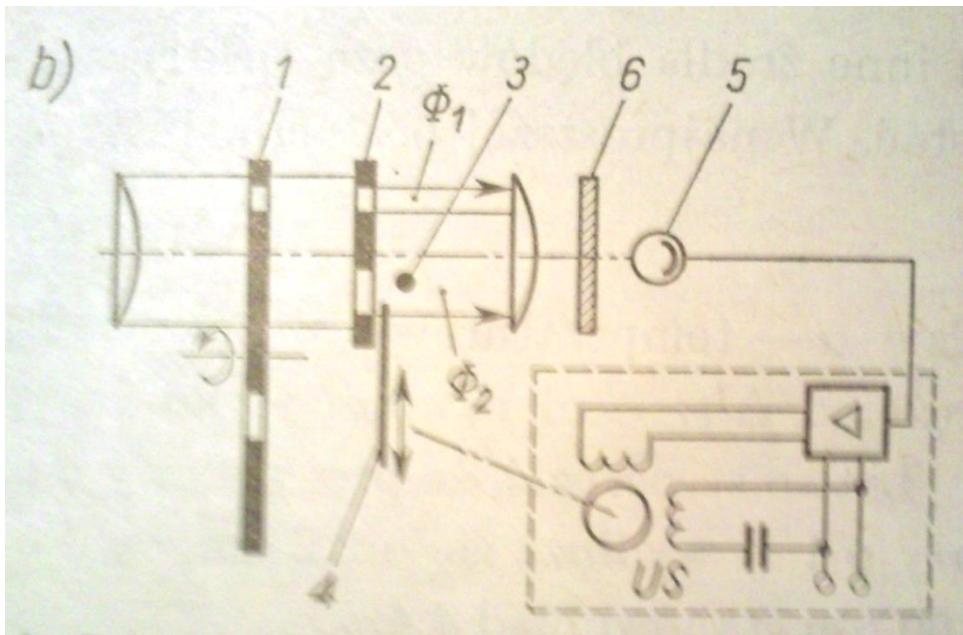
Opis:

- 1- drut
- 2- soczewka
- 3- szczelina
- 4- obiektyw
- 5- element fotoelektryczny
- 6- przesłona ze szczeliną

Rys. nr 3. Układ do pomiaru średnicy drutu działający na zasadzie pomiaru czasu.

Obraz drutu 1 znajdującego się w wiązce równoległych promieni rzutuje soczewka 2 poprzez szczelinę 3 i obiektyw 4 na element fotoelektryczny 5. Na drodze wiązki znajduje się przesłona ze szczeliną 6, która przemieszcza się z prędkością c_w (np. tarcza wirująca z promienistymi nacięciami). Powoduje to przerwę strumienia światła dochodzącego do detektora na czas $t=kd/c_w$, gdzie d – średnica drutu, k – stała proporcjonalności zależna od układu optycznego. Po wzmacnieniu i zróżniczkowaniu sygnału elementu fotoelektrycznego powstają kolejne piki odpowiadające narastaniu i opadaniu strumienia, których czasowy odstęp jest miarą średnicy drutu.

Analogowe pomiary wielkości geometrycznych.



Opis:

- 1-tarcza wirująca
 - 2-tarcza nieruchoma
 - 3-drut
 - 4-przesłona
 - 5-fotoelement
 - 6-tarcza rozpraszająca
- US - układ śledzący

Rys. nr 4. Układ zerowy działający na zasadzie pomiaru strumienia światła.

Wiązka światła jest tak modulowana tarczą wirującą 1 i nieruchomą 2, że co 180° przechodzi wiązka porównawcza ϕ_1 i pomiarowa ϕ_2 . W wiązce ϕ_2 znajduje się drut (lub krawędź taśmy, a astatyczny układ śledzący tak przemieszcza przeslonę 4, aby strumień świetlny dochodzący do fotoelementu 5 poprzez tarczę rozpraszającą 6 nie zawierał składowej zmiennej o częstotliwości odpowiadającej modulacji. Położenie przeslonego 4 jest miara grubości drutu lub położenia krawędzi taśmy.

Cyfrowe pomiary wielkości geometrycznych

Dyskretne sposoby przetwarzania znalazły zastosowanie szczególnie w następujących okolicznościach:

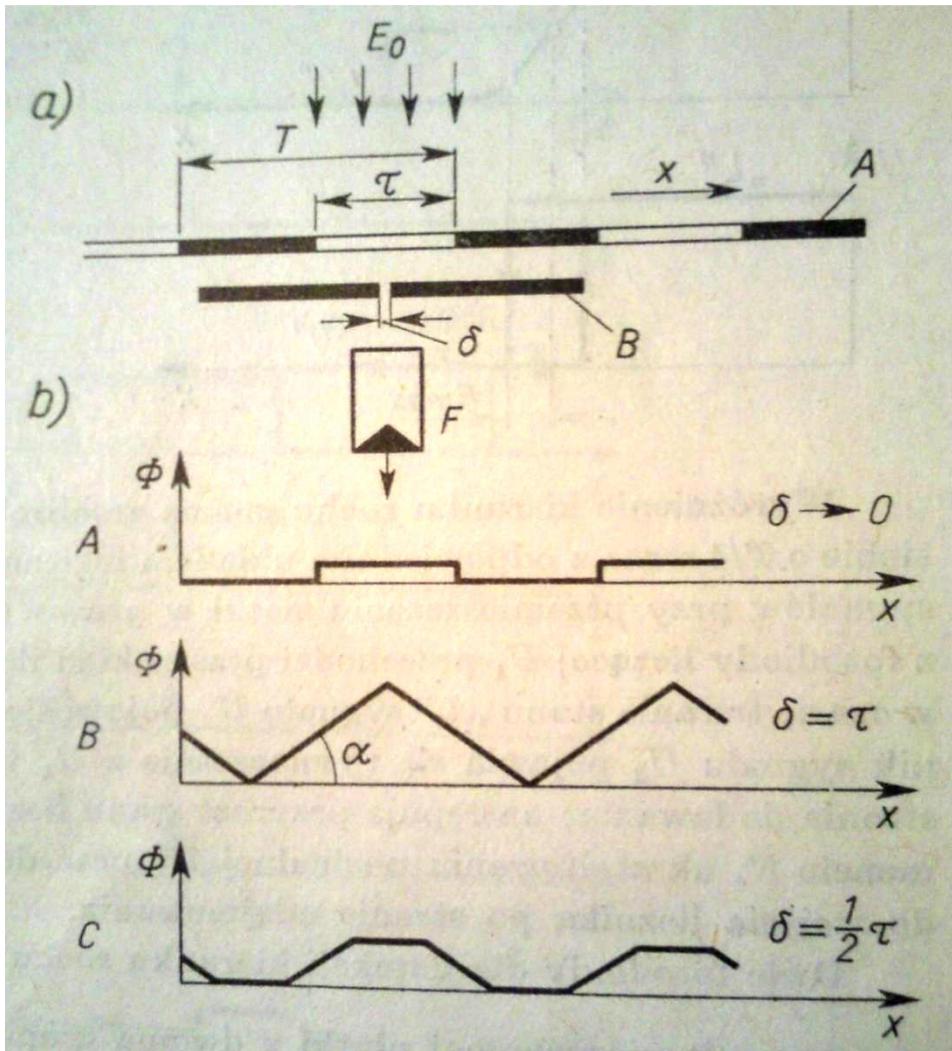
- 1) gdy wymagana jest duża rozdzielcość oraz bardzo wysoka dokładność; a więc pomiary położenia i przesunięcia narzędzi i przedmiotów przy obróbce, zwłaszcza na obrabiarkach skrawających, pomiary przemieszczeń kątowych przy wagach uchylnych i położenia osi wałów.
- 2) gdy obok wymaganej dużej rozdzielcości i dokładności, przedmioty mierzone mają bardzo duże wymiary lub podlegają dużym przemieszczeniom; typowym przykładem jest pomiar długości hutniczych produktów walcowanych, często istotny ze względu na cięcie na odcinki o optymalnej długości, tj. spełniającej potrzeby użytkownika przy minimalnych stratach na złom.

Cyfrowe pomiary wielkości geometrycznych

Pomiary dokładne przemieszczeń liniowych.

Dokładne pomiary dyskretne, najczęściej stosowane w obrabiarkach, realizuje się na zasadzie inkrementalnej, głównie ze względu na swobode wyboru punktu odniesienia (zera) oraz praktycznie nieograniczoną długość mierzalną.

Cyfrowe pomiary wielkości geometrycznych



Opis:

- a) schemat;
- b) zależność strumienia światła dochodzącego do fotodiody od szczeliny δ .

T – podział

τ – część jasna

δ – szerokość szczeliny

F – element światłoczuły (fotodioda)

E_0 – natężenie wiązki promieniowania

A – linijka z dyskretnym podziałem, ruchoma

B – układ odniesienia, nieruchomy

Rys. nr 5. Schemat układu inkrementalnego pomiaru przemieszczeń.

Cyfrowe pomiary wielkości geometrycznych

Linijka A z równomiernym podziałem na kwanty T przemieszcza się względem układu odniesienia B, złożonym ze źródła światła, szczeliny δ i elementu fotoelektrycznego, zwykle diody lub fototranzystora F.

Rozdzielcość wyrażona najmniejszym wyróżnialnym odcinkiem wynosi $T/2$. Ponieważ nowoczesne metody fotochemiczne pozwalają nanieść na szkło siatki mające nawet 100 do 500 linii na mm, osiągnąć można rozdzielcość rzędu $1\mu\text{m}$. Głównym ograniczeniem dokładności są inne błędy, powstające np. wskutek rozszerzalności cieplnej, o wartości bezwzględnej przekraczającej rozdzielcość.

Przewidywana górnna wartość częstotliwości impulsów, którą układ zdolny jest przenieść i bezbłędnie zliczyć:

$$f_{\max} = W_{\max} / T \quad \text{gdzie } W_{\max} \text{ oznacza największą przewidywaną prędkość przemieszczenia, } T - \text{najmniejszy podział.}$$

Cyfrowe pomiary wielkości geometrycznych

Przebieg strumienia światła ϕ dochodzącego do fotodiody przedstawia rysunek 5b w zależności od szerokości szczeliny δ . W celu uzyskania dostatecznej wartości sygnału korzystne jest zastosowanie szerokiej szczeliny $\delta \leq T/2$. Dla określonego pola A oświetlonego wiązka promieniowania o natężeniu E_0 , maksymalny skuteczny strumień świetlny dochodzący do fotodiody wynosi:

$$\phi = \eta E_0 A \frac{\delta}{T},$$

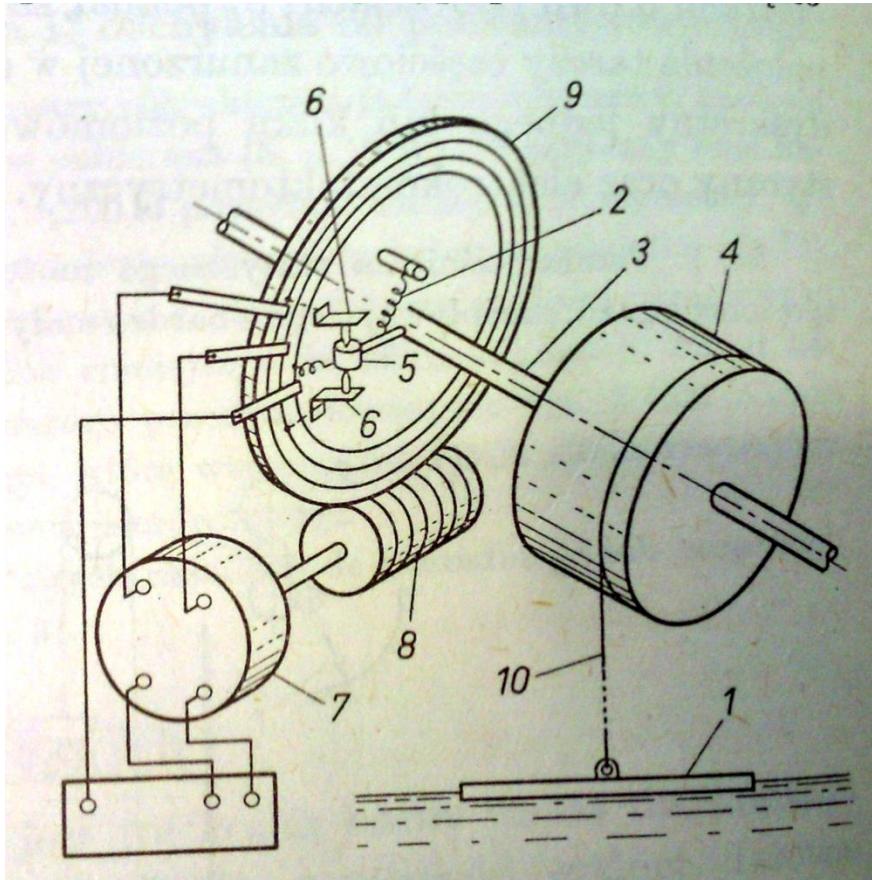
gdzie η oznacza optymalną sprawność układu optycznego pomiędzy siatką a fotodiodą.

Pomiar poziomu cieczy i ciał sypkich

Poziom cieczy i ciał szybkich w zbiornikach jest wielkością bardzo ważną dla kontroli procesów przemysłowych i zapasów surowców, a także dla gospodarki wodnej. Istotne są informacje o objętości lub masie substancji w zbiornikach lub poziomie jako takim, np. poziomie wody w walczakach kotłów energetycznych.

Objętość cieczy zawartej w zbiorniku jest nieliniową funkcją poziomu cieczy zależną od kształtu zbiornika. Wymagania dokładności są nieraz bardzo wysokie, a to ze względu na wartość substancji, nieliniową zależność między poziomem cieczy a objętością (np. w naturalnych zbiornikach wodnych) oraz ze względu na czasem krytyczne znaczenie poziomu. W tym ostatnim przypadku istotna jest również szybkość odpowiedzi.

Pomiar poziomu cieczy i ciał sypkich



Opis:

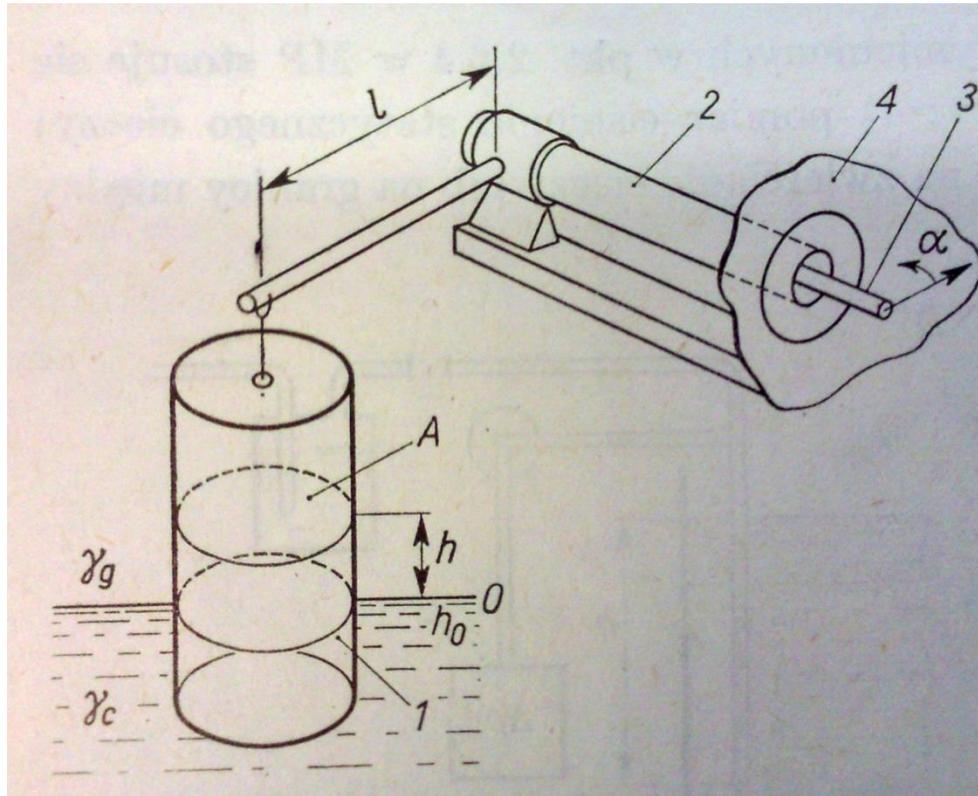
- 1-tarcza
- 2-sprzęzyna
- 3-wał
- 4-bęben
- 5,6 styki
- 7-silnik rewersyjny
- 8-przekładnia ślimakowa
- 9-tarcza
- 10-linka

Rys. nr 6. Schemat działania miernika poziomu z równoważoną tarczą.

Pomiar poziomu cieczy i ciał sypkich

Działanie poziomomierza z tarcza równoważoną na powierzchni cieczy jest następujące: położenie tarczy 1 w stanie częściowego zanurzenia utrzymuje siła sprężyny 2 za pośrednictwem wału 3, bębna 4 i linki 10. Przy zmianie poziomu następuje zwarcie styku 5 z jednym ze styków 6, co uruchamia silnik rewersyjny 7, który poprzez przekładnię ślimakową 8 obraca tarczą 9, obrotowo łożyskowaną na osi 3, aż do takiego naprężenia sprężyny 2, by ponownie nastąpiła równowaga między siłami ciężaru tarczy 1, wyporu i naprężenia linki 10. Położenie wału 3 jest miarą poziomu.

Pomiar poziomu cieczy i ciał sypkich



Opis:

- 1-ciało wyporowe
- 2-rurka skrętna
- 3-oś wyprowadzająca skręcenie
- 4-ściana zbiornika
- A-pole przekroju ciała
- γ_c, γ_g - ciężary właściwe cieczy i gazu

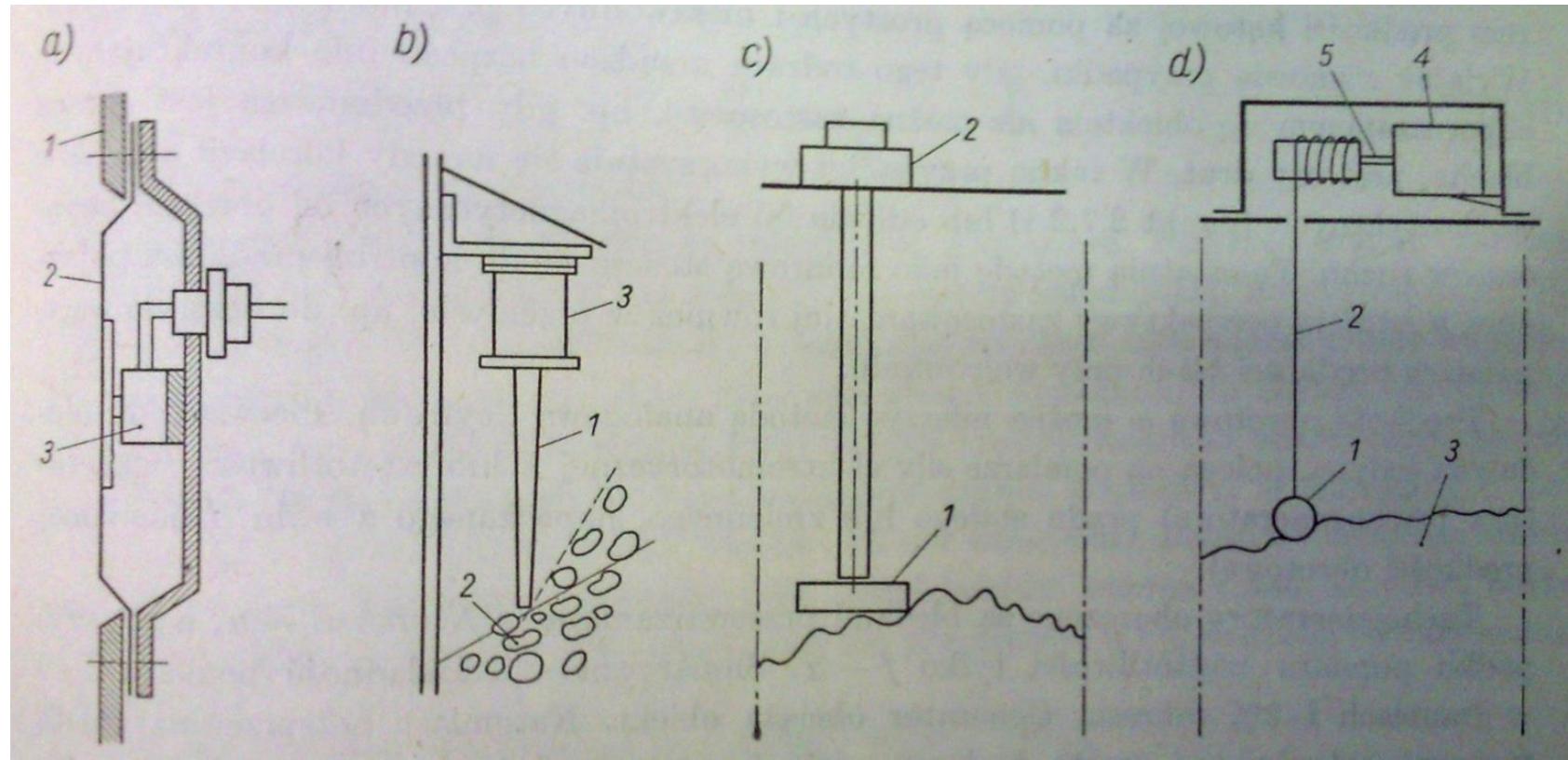
Rys. nr 7. Schemat wyporowego miernika poziomu.

Pomiar poziomu cieczy i ciał sypkich

Na ciało zanurzone w cieczy, w zasadzie nieruchome, działa siła wyporu $F=Ah(\gamma_c-\gamma_g)$, proporcjonalna do poziomu h mierzonego od poziomu odniesienia h_o . Przykładowo przedstawiono przekształcenie siły F na przemieszczenie kątowe α za pośrednictwem dźwigni l i rury skrętnej. Która jest równocześnie elementem ograniczającym przestrzeń pod ciśnieniem. Tego typu poziomomierz często jest stosowany do kotłów wysokociśnieniowych.

Pomiar poziomu cieczy i ciał sypkich

Do pomiaru poziomu ciał sypkich stosuje się wielką różnorodność urządzeń mechanicznych, z których 4 przykłady przedstawione są na kolejnym rysunku:



Rys. nr 8. Ilustracja sposobów pomiaru poziomu ciał sypkich.

Pomiar poziomu cieczy i ciał sypkich

Rys. a) membrana 2 wbudowana w ścianę zbiornika 1, która pod naporem materiału nasypowego przełącza mikro-wyłącznik 3;

Rys. b) pręt uchyłowy 1 pod naporem usypowego stożka 2 przełącza styk w mechanizmie 3 ;

Rys. c) wirująca łopatka 1, napędzana silnikiem w obudowie 2, która zablokowana powoduje wyłączenie silnika i zamknięcie obwodu sygnalizującego;

Rys. d) układ śledzący, w którym gdy masa opuszczona na lince 2 spocznie na usypowym materiale 3, następuje wyłączenie silnika 4, a liczba obrotów wału 5 jest miarą poziomu; układ ten wymaga dość rozbudowanego układu sterującego.

Pomiar poziomu cieczy i ciał sypkich

Trzy pierwsze układy, tj. a, b, c dają informację dyskretną, tj. stwierdzenie, czy określony poziom został przekroczony, a jedynie układ d) ma charakter sporadycznego, ale ciągłego pomiaru. Dokładność opisanych pomiarów jest ze względu na nierównomierność kształtu usypu i histerezę tarciową stosunkowo mała, zwłaszcza przy dużych bunkrach. Niepewność pomiaru, zależnie od okoliczności, leży w granicach od 0,1 do 1m

Literatura

1. „Miernictwo Przemysłowe”, Edmund Romer, PWN Warszawa
1978.

Dziękuję za uwagę.

Czujniki wilgotności



- Pomiar wilgotności za pomocą czujników jest pomiarem pośrednim ,polegającym na pomiarze zmian impedancji (rezystancji lub pojemności) materiałów czujnikowych pod wpływem zmian wilgotności.

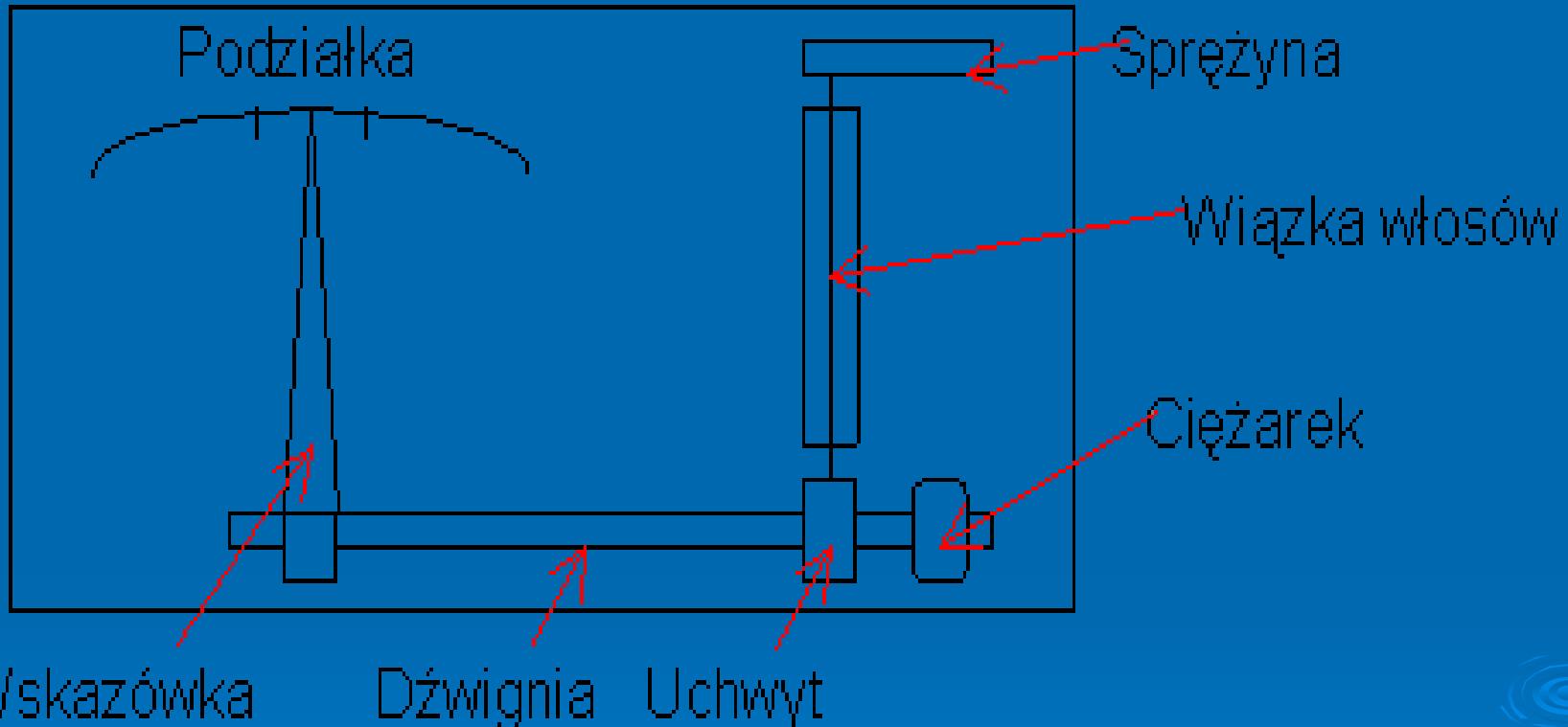
Zastosowanie czujników.

- Motoryzacja - okna samochodowe,
- Miernictwo - komory higrostatyczne, higrometry,
- Medycyna - przyrządy medyczne, inkubatory,
- Rolnictwo - cieplarniane,
- Przemysł - suszenie żywności ,zakłady tekstylne, produkcja urządzeń elektrycznych,
- Elektryczny sprzęt domowy - klimatyzacja ,suszarnie odzieży.

Wilgotność względna i bezwzględna powietrza.

- Pomiaru dokonujemy przy pomocy higrometrów i psychometrów.
- Wilgotnością względną powietrza nazywamy masę pary wodnej w pewnej objętości powietrza do masy pary potrzebnej do nasycenia tej objętości w tej samej temperaturze. Natomiast wilgotnością bezwzględną nazywamy masę pary wodnej zawartej w 1m^3 powietrza.

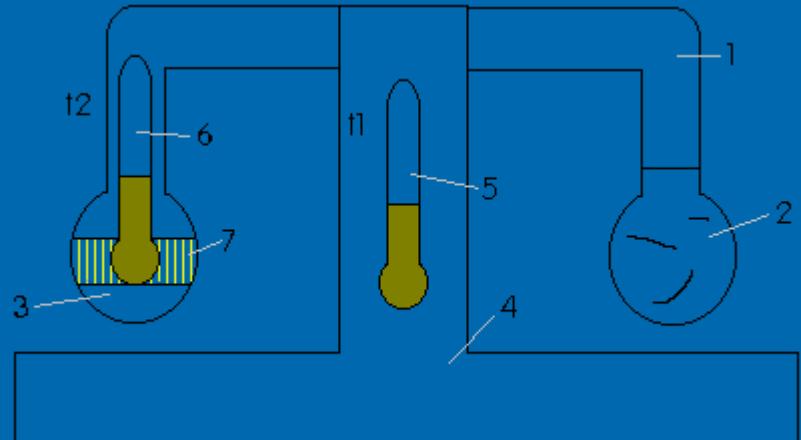
Higrometr włosowy



- Wykorzystywane jest tu zjawisko wydłużania się włosów ludzkich (nici syntetycznych) pod wpływem wzrostu wilgotności. Ta zmiana wywołuje przesunięcie wskazówki. Z podziałki odczytujemy wilgotność względną.

Higrometr Daniella

- (1) rurka szklana,
(2,3) kule,
(5,6) termometr umieszczony
jest wewnątrz jednej z kul,
która pokryta jest paskiem
polerowanego złota ,drugi
umocowany jest na stojaku
- Kula (2) obwinięta jest tkanina
higroskopijną (pochłaniającą
wodę).
- W kuli (3) znajduje się płynny
eter, jego opary wypełniają
rurkę.



Zasada działania:

- Po zwilżeniu eterem tkaniny higroskopijnej, nastąpi ochładzanie się par eteru wewnątrz kuli (2). Wzrośnie parowanie eteru wewnątrz kuli (3). Obniży się temperatura płynnego eteru. Na pasku złota pojawią się kropelki rosy. W tym momencie odczytujemy wskazania obu termometrów. Wilgotność powietrza obliczamy ze wzoru:

$$\varphi = P_2/P_1$$

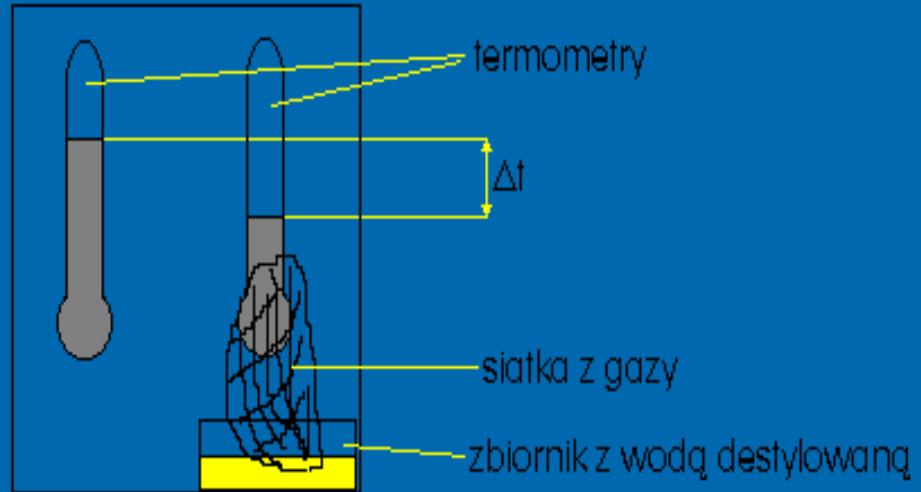
- gdzie P2 ciśnienie nasycenia pary w temperaturze t2, a P1 ciśnienie nasycenia pary w temperaturze t1. Obie wartości odczytujemy z tablic.

Higrometry absorpcyjne

- Składa się z zestawu naczyń przez które przepuszczane jest powietrze. W zestawie pierwszym (składającym się z dwóch naczyń) znajduje się substancja pochłaniająca parę wodną. Ilość pochłoniętej pary określa się przez dokładne zważenie naczyń. Znając ilość badanego powietrza można określić wilgotność bezwzględną. W kolejnym drugim zestawie (cztery naczynia) powietrze jest ponownie nawilżane do określonej wartości. W ostatnim trzecim zestawie (dwa naczynia) ponownie pochłaniana jest para wodna.
Stosunek pary pochłoniętej w pierwszym zestawie do pary pochłoniętej w trzecim zestawie jest wilgotnością względową badanego powietrza.

Psychometr Augusta

- Składa się z dwóch identycznych termometrów
- Jeden z nich zwilżany jest wodą destylowaną (nazywany jest mokrym).



- Zasada działania:
- Ciecz odparowując z powierzchni termometru powoduje jego oziębienie. Im mniejsza jest wilgotność względna tym szybsze parowanie wody i tym większa różnica wskazań termometrów. Korzystając z tablic psychometrycznych odczytujemy wynik.

Zalety i wady czujników wilgotności powietrza.

- **Higrometr włosowy:** podstawową zaletą tego czujnika jest prostota obsługi. Dokładność pomiaru wynosi od 3% do 5%.
- **Higrometr Daniella:** pomiary przy pomocy higrometru Daniella są bardzo dokładne, ale są dosyć uciążliwe. Stosuje się je raczej w laboratoriach.
- **Higrometry absorpcyjne:** z powodu bardzo uciążliwej obsługi stosuje się je do sprawdzania pomiarów laboratoryjnych.

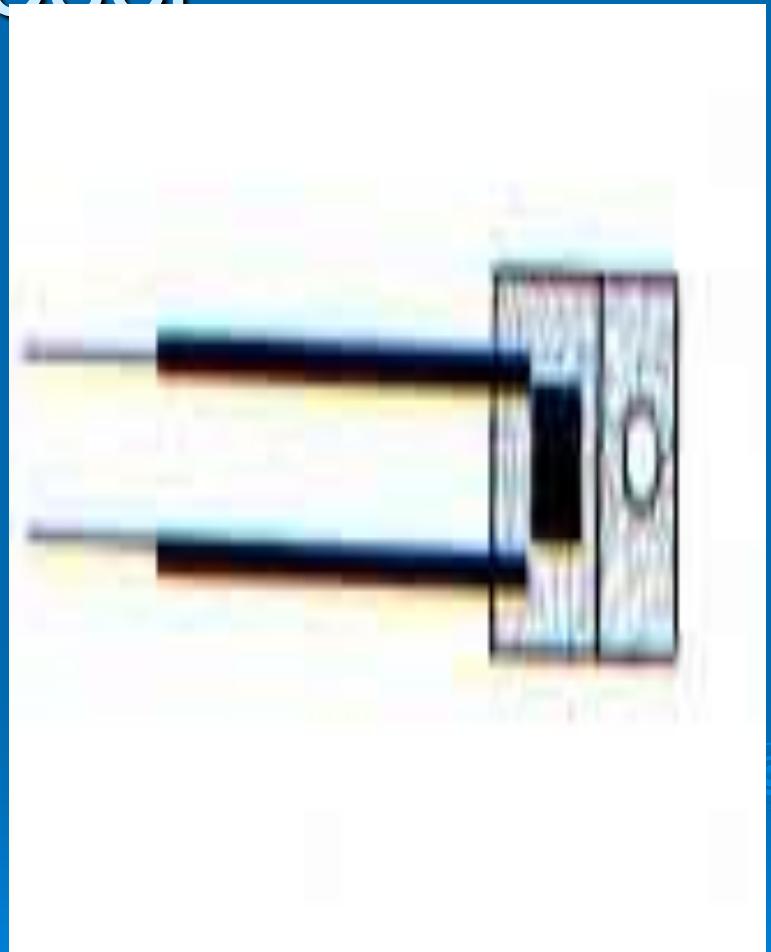
- Psychometr Augusta: Trudność sprawia tu określenie prędkości przepływu gazu wokół termometrów, co powoduje duże błędy pomiaru (ok.15%). Dokładniejszy pomiar wilgotności można uzyskać stosując psychometry z wymuszonym obiegiem powietrza tzw.: psychometry aspiracyjne. Termometry znajdują się w specjalnych rurkach. Wentylator zapewnia stałą określoną prędkość przepływu powietrza.

Różne typy czujników wilgotności:

- Opornościowy, rezystancyjny,
- Pojemnościowy,
- Elektrolityczne,
- Ceramiczne typu pojemnościowego, elektronowego, jonowego.

Opornościowy czujnik wilgotności

- Czujnik wilgotności jest opornościowym czujnikiem do rozpoznania wysokiej wilgotności powietrza oraz zjawiska rosy. Impedancja czujnika zmienia się w zależności od względnej wilgotności powietrza (zależność logarytmiczna).



Zastosowanie:

- videorecorder, obiekty sanitarne, łazienki, prysznice (sterowanie wentylacją), baseny kąpielowe, szyby wystawowe (niedopuszczanie do zamglenia), zakłady uzdatniania wody, urządzenia przemysłowe (zapobieganie "poceniu" się rur), hale przemysłowe, magazyny (rozpoznawanie kondensacji), sufity chłodzone (zapobieganie szkodliwego opadania skondensowanej wody), szafy rozdzielcze, maszyny (rozpoznanie kondensacji na wrażliwych elementach).

Rezystancyjny czujnik wilgotności

- Czujnik wilgotności jest rezystancyjnym czujnikiem polimerowym, który służy do rozpoznawania względnej wilgotności powietrza. W czujniku wykorzystuje się higroskopijne właściwości polimeru, którym pokryty jest ceramiczny substrakt. Charakteryzują się dużą czułością oraz liniowością charakterystyki, miniaturową i lekką obudową oraz małą histerezą i szerokim zakresem działania..



- Stosowane w nawilżaczach oraz osuszaczach powietrza, systemach klimatyzacji i wentylacji, oczyszczaczach powietrza, inkubatorach, miernikach wilgotności, szklarniach, samochodach, itp

Pojemnościowy czujnik wilgotności

- Czujnik wilgotności jest pojemnościowym czujnikiem polimerowym, który służy do precyzyjnego pomiaru względnej wilgotności w powietrzu i w gazach. Zastosowanie: urządzenia meteorologiczne, przemysł (wszędzie tam gdzie potrzebna jest wysoka stabilność)

Elektrolityczne czujniki wilgotności.

- Podstawowym składnikiem jest chlorek litu zawarty w porowatym spoiwie. Zmienia on swoją konduktywność jonową w zależności od otaczającej go atmosfery.
- Zaleta: duża stabilność odczytu mierzonej wartości.
- Wady: szybkie starzenie się, stosunkowo długi czas odpowiedzi, wąski przedział pomiarowy.

Czujniki ceramiczne

- Charakteryzuje je duża wytrzymałość mechaniczna, termiczna oraz odporność na narażenia chemiczne.
- Typ pojemnościowy: stosowany materiał - tlenek glinowy. Pojemność wzrasta wraz ze zwiększeniem się wilgotności otaczającej atmosfery. Spowodowane jest to dużą przenikalnością elektryczną adsorbowanej wody. Pojemność w dużym stopniu zależy od mikrostruktury, ponieważ ilość i rozkład wielkości porów mają główny wpływ na możliwości adsorpcyjne materiałów.

- Typ elektronowy : stosowany do pomiarów w podwyższonych temperaturach. Logarytm rezystancji elektronowej jest liniowo zależny od logarytmu koncentracji pary wodnej. Czujniki te mogą pracować przy stałym napięciu, a ich rezystancja nie zależy w istotny sposób od mikrostruktury.
- Typ jonowy : Impedancja zmienia się wskutek adsorpcji cząsteczek wody, dlatego silnie zależy od struktury stosowanego materiału. Wadą jest konieczność okresowego wygrzewania w celu usunięcia zanieczyszczeń , które dostają się do porowatego materiału wraz z zaabsorbowaną wodą.

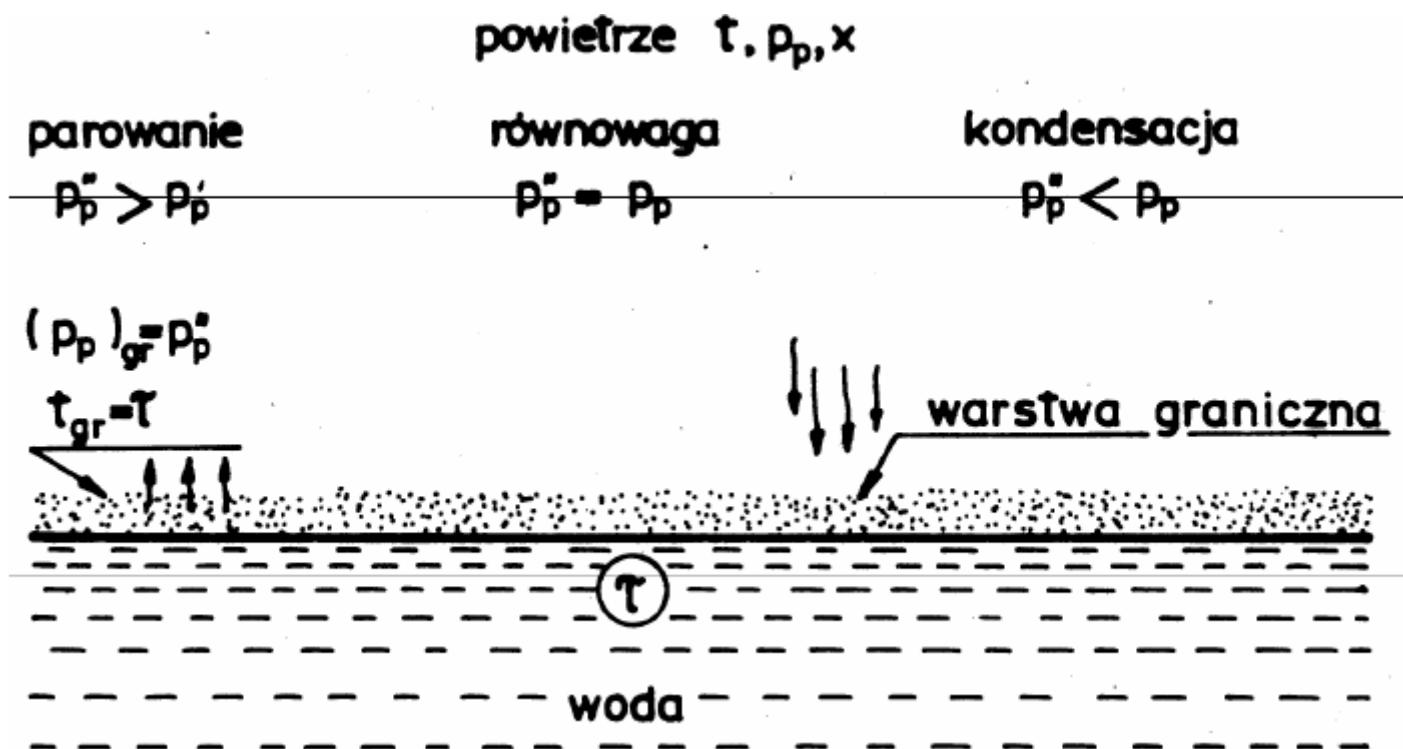


Politechnika Wrocławska

Temat pracy:

Czujniki wilgotności

Schemat procesów zachodzących między wodą a powietrzem.



p_p'' -ciśnienie nasycenia; p_p -ciśnienie cząstkowe pary wodnej; t -temperatura powietrza wilgotnego; t_{gr} -temperatura w warstwie granicznej; τ -temperatura pod powierzchnią wody; X -zawartość pary wodnej w powietrzu; X_g -zawartość pary wodnej w warstwie granicznej.



Podstawowe pojęcia

- **Powietrze atmosferyczne**- jest mieszaniną gazową zawierającą zawsze pewną ilość pary wodnej. Do celów praktycznych można więc traktować powietrze atmosferyczne jako mieszaninę powietrza suchego (składającego się z gazów) oraz pary wodnej. Ilość pary wodnej znajdującej się w jednostce objętości powietrza nie może przekroczyć pewnej wielkości maksymalnej, która jest zależna od temperatury.
- **Powietrze niedosycone**- jest to powietrze, które może jeszcze w danej temperaturze wchłonąć pewną ilość pary wodnej.
- **Powietrze nasycone**- jest to powietrz, które zawiera już w sobie ilość pary wodnej maksymalną w danej temperaturze



Podstawowe pojęcia

➤ **Wilgotność względna powietrza** φ - jest równa stosunkowi ciśnień pary wodnej w powietrzu nienasyconym i w powietrzu nasyconym, w tej samej temperaturze T.

$$\varphi = \frac{p_w(T)}{p_{wm}(T)}$$

➤ **Wilgotność bezwzględna objętościowa powietrza**- jest to ilość gramów pary wodnej zawartej w 1 m³ powietrza wilgotnego.

$$[\text{kgH}_2\text{O} / \text{m}^3 \text{pow.}] = \frac{\mathbf{m}_w}{V}$$

➤ **Stopień nasycenia (parą wodną) powietrza** Ψ jest określony stosunkiem wilgotności bezwzględnych masowych powietrza: nienasyconego X do nasyconego Xm, w tej samej temperaturze.

$$\Psi = \frac{X}{X_m} = \frac{\varphi \cdot (p_b - p_{wm})}{p_b - \varphi \cdot p_{wm}}$$



Przyrządy do pomiaru wilgotności powietrza

W zależności od budowy i zasady działania- można podzielić na następujące rodzaje:

- Higrometry absorpcyjne,
- Higrometry kondensacyjne czyli tzw. higrometry punktu rosy,
- Higrometry oparte na zjawiskach higroskopowych,
- Higrometry elektryczne,
- Psychrometry.

Metody higrometryczne wykorzystują zjawiska, w których zmiana ilości pary wodnej powoduje zmianę cech lub własności fizykochemicznych elementów pomiarowych czujników.

Metody psychrometryczne należą obecnie do powszechnie stosowanych, pośrednich sposobów pomiaru wilgotności powietrza. Pomiar wilgotności względnej opiera się na pośrednim pomiarze temperatury powietrza badanego - tzw. termometrem suchym i temperatury powietrza sztucznie nasyconego wilgocią - tzw. termometrem mokrym



Metody higrometryczne

➤ Higrometry absorpcyjne

W higrometrach tego typu wilgotność powietrza oznacza się metodą bezwzględną w wyniku pochłaniania pary wodnej z powietrza przez dowolny osuszacz i pomiar ilości tej pary oraz ilości powietrza suchego użytego do analizy

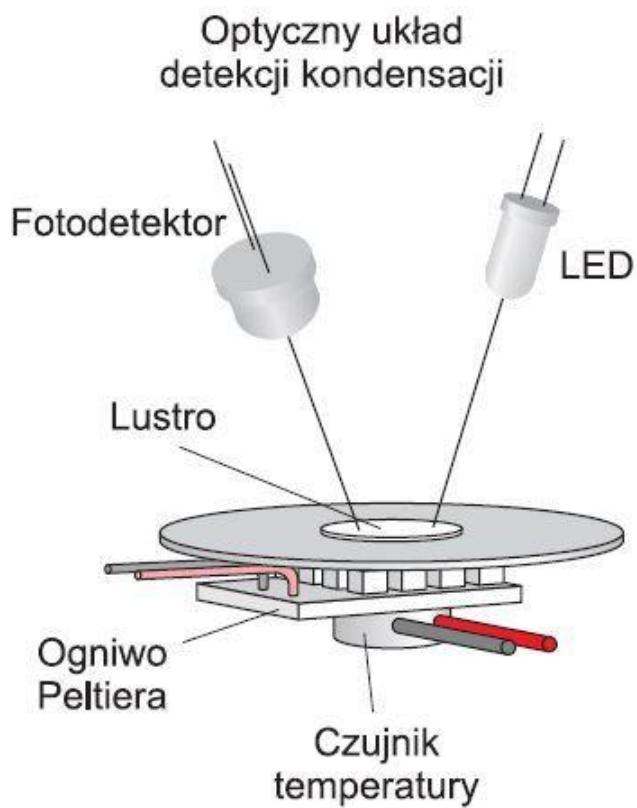
Jako środka pochłaniającego wodę używa się następujących substancji higroskopijnych: ciała porowate o silnie rozwiniętej powierzchni np.: węgiel aktywowany.

Substancje wiążące chemicznie wodę np. pięciotlenek fosforu, tlenek wapnia. Higrometry absorpcyjne są zbyt skomplikowane i kłopotliwe w użyciu do praktycznego stosowania w technice cieplnej ale są wykorzystywane do pomiarów laboratoryjnych oraz jako przyrządy wzorcowe.

Metody higrometryczne

➤ Higrometry kondensacyjne

Z przechłodzonego powietrza, które kontaktuje się np. z odpowiednio zimną powierzchnią, wykrapla się para wodna. W powietrzu o stałej zawartości wilgoci, początek wykraplania (zamglenie w punkcie rosy) pary wodnej na elemencie o regulowanej temperaturze, może służyć do wyznaczania wilgotności względnej powietrza. Temperatura punktu rosy pozwala pośrednio określić wilgotność względową powietrza.

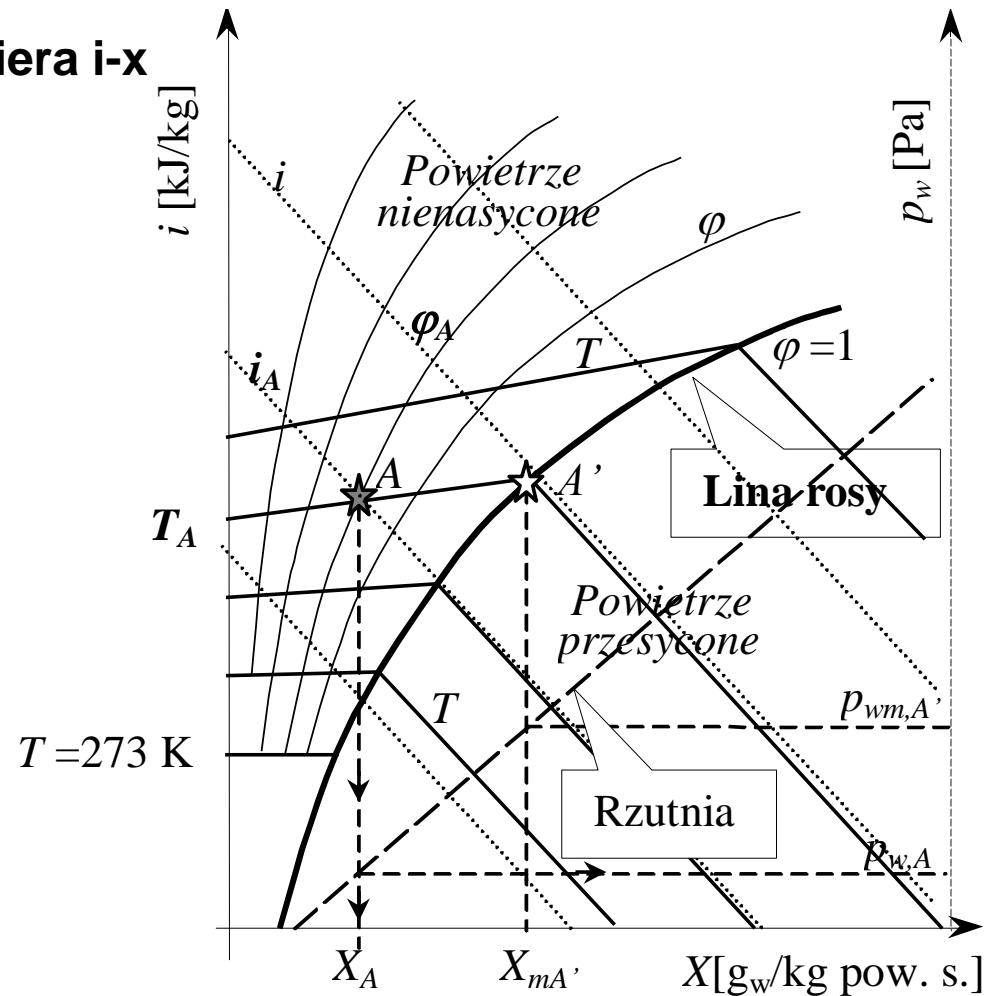


Czujnik wilgotności z chłodzonym lustrem

Metody higrometryczne

Fragmenty wykresu Mollier'a i-x

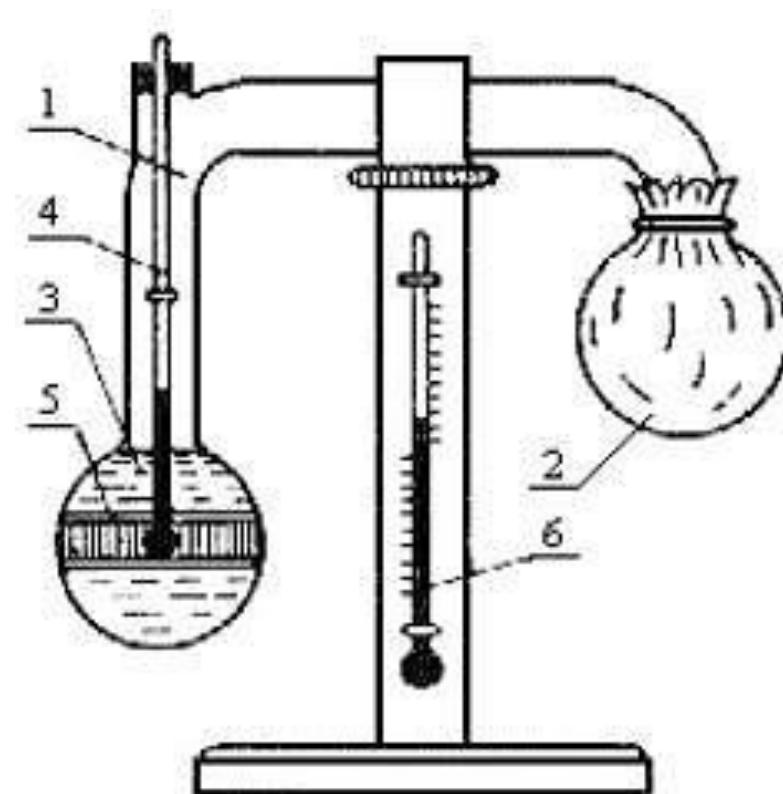
Przykładowo, na fragmencie wykresu punkt A reprezentuje powietrze nienasycone o temperaturze T_A i wilgotności względnej φ_A . Linie stałej entalpii oraz linia stałej wilgotności bezwzględnej masowej X, przechodzące przez ten punkt, umożliwiają odczytanie wartości i_A oraz X_A i p_{wA} tego powietrza.



Metody higrometryczne

➤ Higrometr kondensacyjny Daniella

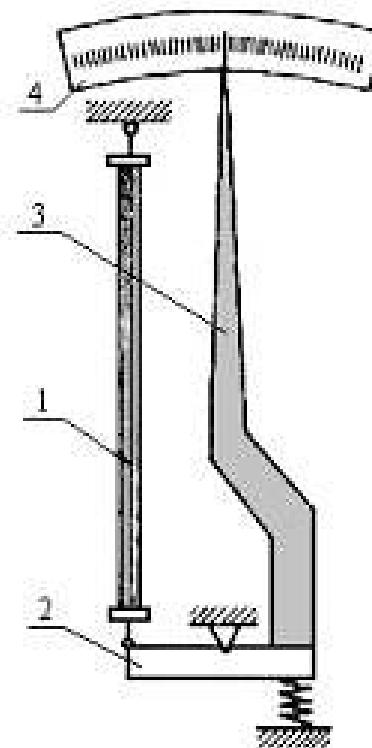
Po zwilżeniu eterem tkaniny higroskopijnej, nastąpi ochładzanie się par eteru wewnętrz kuli. Wzrośnie parowanie eteru wewnętrz kuli. Obniży się temperatura płynnego eteru. Na pasku złota pojawią się kropelki rosy. W tym momencie odczytujemy wskazania obu termometrów. Wilgotność powietrza obliczamy ze wzoru: $\varphi = P_p/P_n$



Metody higrometryczne

➤ Higrometry włosowe

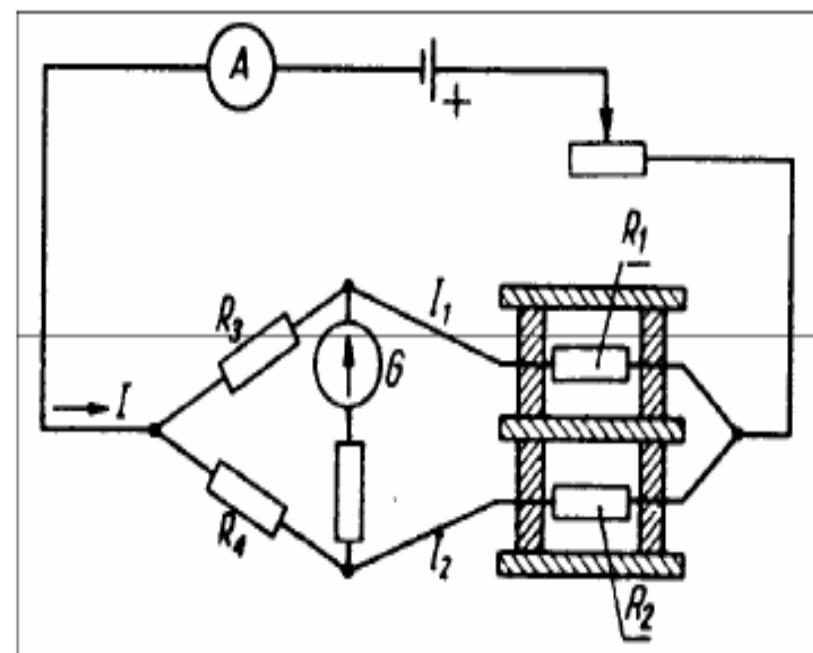
Działanie tych higrometrów jest oparte na zasadzie zmian pewnych własności ciał, zależnych od zmian wilgotności powietrza. Przyrządy te oparte są na własnościach włosów ludzkich, zwierzęcych oraz niektórych włókien syntetycznych, polegających na zmianie ich długości pod wpływem zmian wilgotności powietrza. Ze względu na prostotę budowy i działania, higrometry włosowe są powszechnie stosowane.



Metody higrometryczne

➤ Higrometry oparte na zasadzie przewodnictwa cieplnego

W układzie elektrycznego mostka Wheatstone'a występują rezystory $R_1 = R_2$; $R_3 = R_4$ (spirale platynowe). Zmiana wilgotności powietrza wokół rezystora R_1 lub R_2 powoduje zmianę temperatury spirali rezystora na skutek zmiany przewodnictwa cieplnego wokół rezystora. Wskazówka galwanometru wychyli się gdy $R_1 \neq R_2$. Wychylenie można wyskalować w % wilgotności względnej.

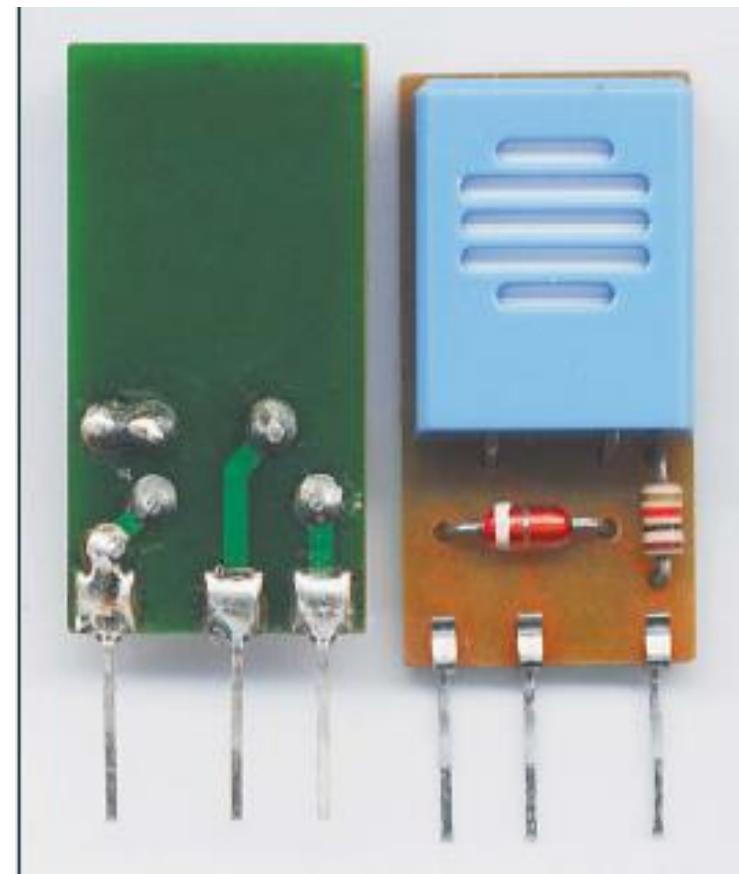


Schemat higrometru działającego na zasadzie zmiany przewodnictwa cieplnego wilgotnego powietrza

Metody higrometryczne

➤ Higrometry rezystancyjne

Czujnik wilgotności jest rezystancyjnym czujnikiem polimerowym, który służy do rozpoznawania względnej wilgotności powietrza. W czujniku wykorzystuje się higroskopijne właściwości polimeru, którym pokryty jest ceramiczny substrakt. Charakteryzują się dużą czułością oraz liniowością charakterystyki, miniaturową i lekką obudową oraz małą histerezą i szerokim zakresem działania.



Metody higrometryczne

➤ Higrometry pojemnościowe

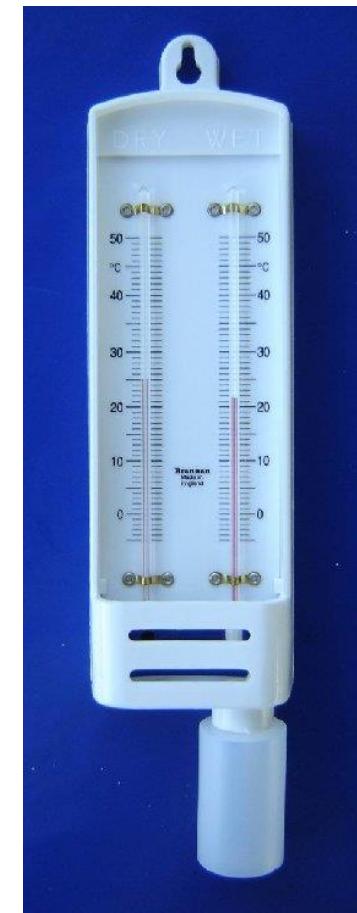
Czujniki tych higrometrów stanowi kondensator, w którym między dwiema elektrodami (okładkami kondensatora) okładkami umieszczono porowatą piankę z polimeru. Jeśli para wodna dostanie się do porów, pojemność elektryczna C kondensatora zmienia się wraz ze zmianą wilgotności otaczającego powietrza. Ponieważ polimer nie wchłania wody na stałe, przy małej wilgotności powietrza woda wyparowuje z pianki. Zmiany pojemności rejestruje elektroniczny miernik



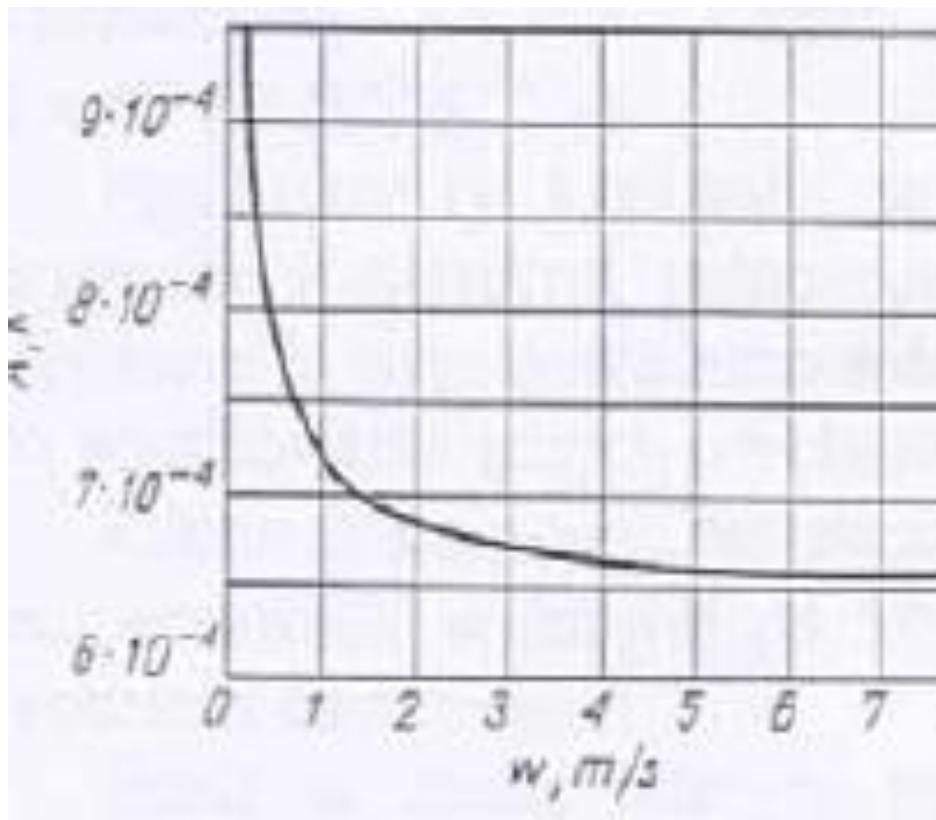
Metody psychrometryczne

- Psychometr Augusta
- Psychometr Assmanna

Różnią się one tylko sposobem wymuszania ruchu powietrza, w miejscach pomiaru jego temperatury. W psychometrze Augusta powietrze przepływa w warunkach konwekcji swobodnej. Natomiast w psychometrze Assmanna powietrze przepływa w warunkach konwekcji wymuszonej (z prędkością większą od 2,5 m/sc, gwarantującą praktyczną stałość wielkości A).



Metody psychrometryczne



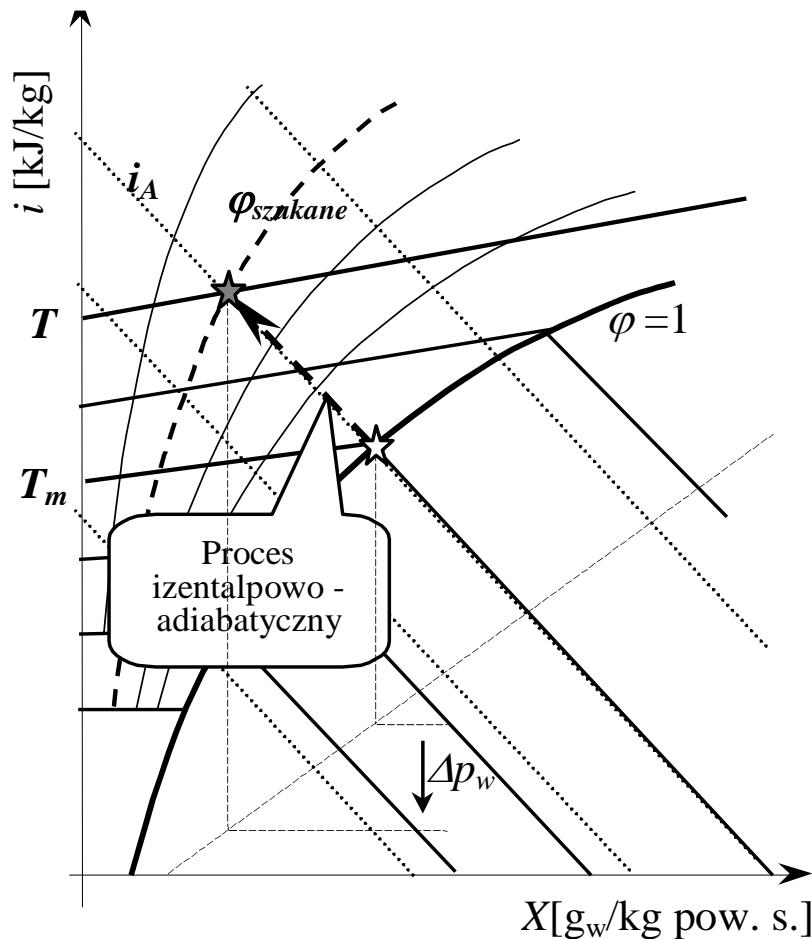
Wykres zależności stałej psychrometrycznej od prędkości przepływu powietrza

Przy założeniu, że proces parowania wody jest adiabatyczny i izentalpowy, wilgotność względna powietrza φ można obliczyć ze wzoru

$$\varphi = \frac{p_w(T)}{p_{wm}(T)} = \frac{p_{wm}(T_m) - A \cdot (T - T_m) \cdot p_b}{p_{wm}(T)} \cdot 100\%$$

Metody psychrometryczne

➤ Idea pomiaru wilgotności względnej φ metodą psychrometryczną



W miejscu przecięcia się izotermy **Tm** z linią rosy (w pobliżu szmatki wilgotność $\varphi = 1$), uzyskuje się punkt, przez który przeprowadza się izentalpię (zakłada się, że proces parowania wody z koszulki jest izentalpowy). Miejsce przecięcia tej izentalpy z izoterią **T** wskazuje punkt, przez który przechodzi linia stałej wilgotności względnej φ . Wyznaczenie tego punktu na wykresie Mollier pozwala odczytać pozostałe wielkości, charakteryzujące badane powietrze



Zastosowanie

Zastosowanie czujników:

- Motoryzacja - okna samochodowe,
- Miernictwo - komory higrostatyczne, higrometry,
- Medycyna - przyrządy medyczne, inkubatory,
- Rolnictwo - cieplarniane,
- Przemysł - suszenie żywności ,zakłady tekstylne, produkcja urządzeń elektrycznych,
- Elektryczny sprzęt domowy - klimatyzacja ,suszarnie odzieży.



Źródła:

- „Pomiary cieplne i energetyczne” Praca zbiorowa pod redakcją Mariana Mieszkowskiego Wydanie II WNT Warszawa 1985
- „Pomiary wilgotności” Praca zbiorowa WNT Warszawa 1993

Strony www

- *elektronikab2b.pl*
- *www.label.pl*



Politechnika Wrocławska

Dziękuję za uwagę

SENSORY WŁAŚCIWOŚCI I ZASTOSOWANIE

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

**Czujniki do pomiarów pH roztworów
(pH-metry)**
i
czujniki gazów

Skala pH – ilościowa skala kwasowości i zasadowości roztworów wodnych związków chemicznych. Skala ta jest oparta na aktywności jonów hydroniowych $[H_3O^+]$ w roztworach wodnych.

Wartość pH definiuje się jako:

$$pH = -\log_{10}[H_3O^+] ,$$

czyli: minus logarytm dziesiętny aktywności jonów hydroniowych wyrażonych w molach na decymetr sześcienny.

Oryginalnie pH zostało zdefiniowane jako

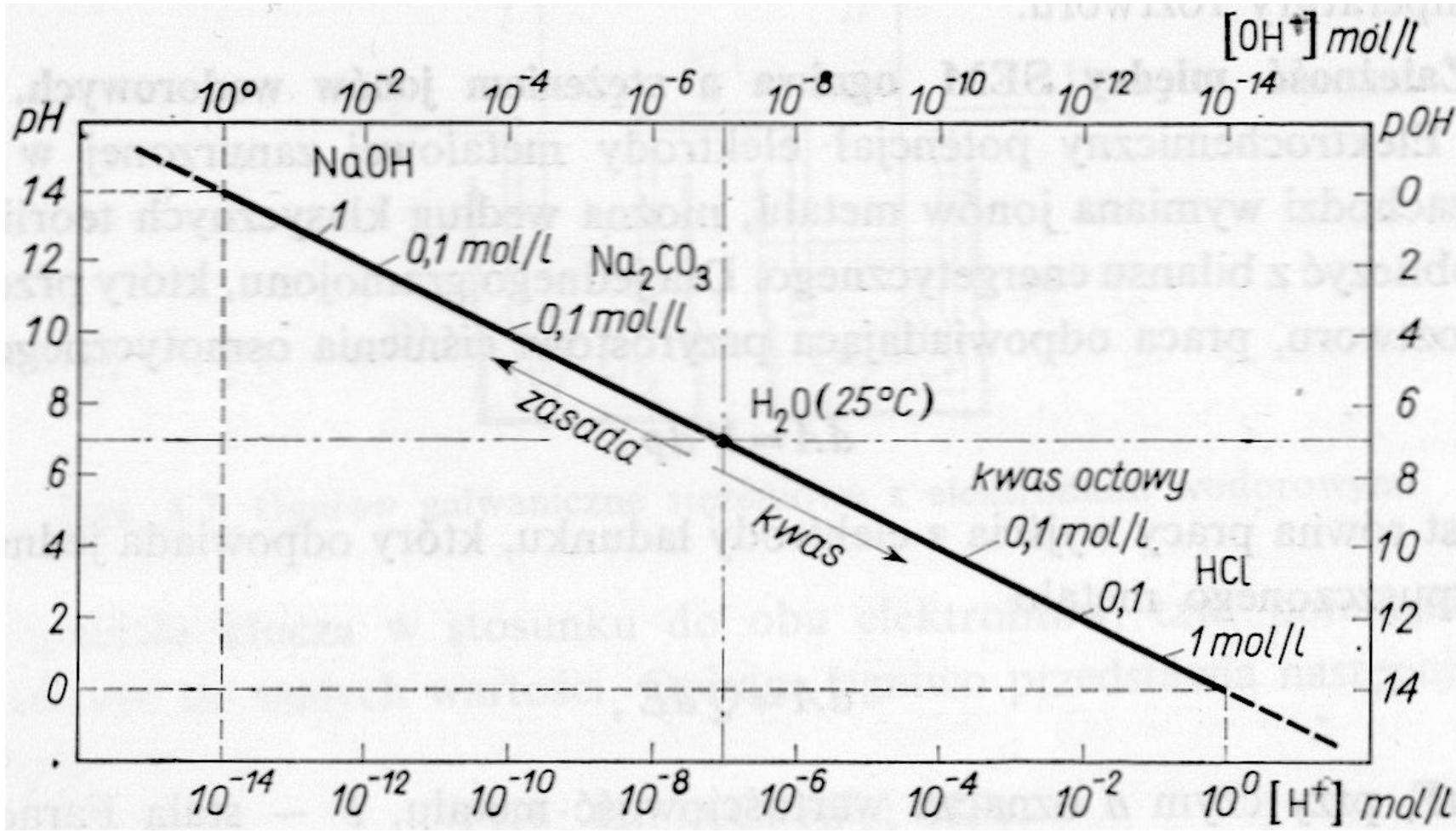
$$pH = -\log_{10}[H^+] ,$$

czyli: minus logarytm stężenia jonów wodorowych (H^+).

Współczesne badania wykazały jednak, że wolne jony wodorowe (wolny proton) nigdy nie występują w roztworach wodnych, gdyż ulegają natychmiast solwatowaniu wg równania:



W wielu podręcznikach jednak, dla uproszczenia, pomija się ten fakt i nadal podaje się starszą definicję skali pH.



Roztwór obojętny (H_2O) w temperaturze 25°C ma $p\text{H} = 7$, co odpowiada stężeniu jonów wodorowych $[\text{H}^+] = 10^{-7}\text{ mol/litr}$, a poprawniej - stężeniu jonów hydroniowych $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-7}\text{ mol/l}$.

Pomiar $p\text{H}$ polega na zanurzeniu elektrody pomiarowej do roztworu wodnego badanej substancji. Wartość SEM między elektrodą a roztworem jest miarą $p\text{H}$.

Wartość pH roztworu X, w którym jest zanurzone standardoweogniwo galwaniczne i dla którego zmierzono wartość siły elektromotorycznej E_x , wynosi:

$$pH(X) = pH(S) + \frac{(E_s - E_x)}{RT \ln 10}$$

gdzie:

E_s i $pH(S)$ – odpowiednio siła elektromotoryczna ogniwa standardowego zanurzonego w roztworze wzorcowym (np: w wodzie destylowanej) i pH tego roztworu w danej temperaturze,

F – stała Faradaja,

R – uniwersalna stała gazowa,

T – temperatura bezwzględna.

pH jest jednostką bezwymiarową i ma charakter jedynie porównawczy, nie przekładający się bezpośrednio na stężenie czy aktywność jonów hydroniowych.

Dla roztworów o stężeniach mniejszych niż $0,1 \text{ mol/dm}^3$, których $pH = 2 \div 12$ można przyjąć, że

$$pH = -\lg \gamma [H^+]$$

gdzie γ – współczynnik aktywności tych jonów.

Czyli w tym zakresie pokrywają się obydwie skale

Substancja	pH
<u>1 M kwas solny</u>	0
Kwas <u>akumulatorowy</u>	< 1,0
<u>Kwas żołądkowy</u>	1,5 – 2
Sok <u>cytrynowy</u>	2,4
<u>Coca-cola</u>	2,5
<u>Ocet</u>	2,9
Sok <u>pomarańczowy</u>	3,5
<u>Piwo</u>	4,5
<u>Kawa</u>	5,0
<u>Herbata</u>	5,5
<u>Kwaśny deszcz</u>	< 5,6
<u>Mleko</u>	6,5
Czysta <u>woda</u>	7
<u>Ślina</u> człowieka	6,5 – 7,4
<u>Krew</u>	7,1 – 7,4
<u>Woda morska</u>	8,0
<u>Mydło</u>	9,0 – 10,0
Woda amoniakalna	11,5

pH-metry

pH-metr składa się z miliwoltomierza, o bardzo dużej rezystancji wejściowej i elektrody wskaźnikowej. SEM ogniwka utworzonego z elektrody wskaźnikowej (zanurzonej w roztworze badanym) i elektrody porównawczej (zanurzonej w roztworze wzorcowym o znanym pH):

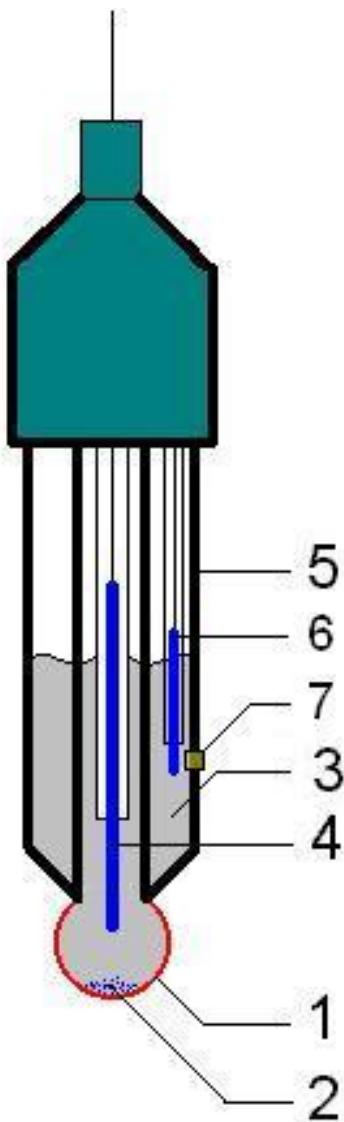
$$E = E^0 - \frac{2.303RT}{F} \text{pH}$$

gdzie: E = zmierzony SEM ogniwka,
E⁰ = potencjał elektrody wzorcowej,
R = stała gazowa,
T = temperatury,
F = stała Faradaja.

Bardziej złożone pH-metry są dodatkowo zaopatrzone w termometry, gdyż temperatura ma wpływ na pomiar. Prostsze pH-metry są zwykle wyskalowane na warunki standardowe (temperatura 25°C) i gdy pomiaru dokonuje się w zbliżonych warunkach (20 °C – 30 °C) błąd pomiaru wynikający ze zmiany temperatury nie jest bardzo istotny.

Sondy pH

Najbardziej rozpowszechnione są pH-metry ze zintegrowanymi elektrodami (wzorcową i pomiarową) w jednej, szklanej sondzie, o kształcie palca. Układ ten jest zwykle oparty na wzorcowym roztworze **chlorku srebra** i układzie elektrod wykonanych ze **srebra**.

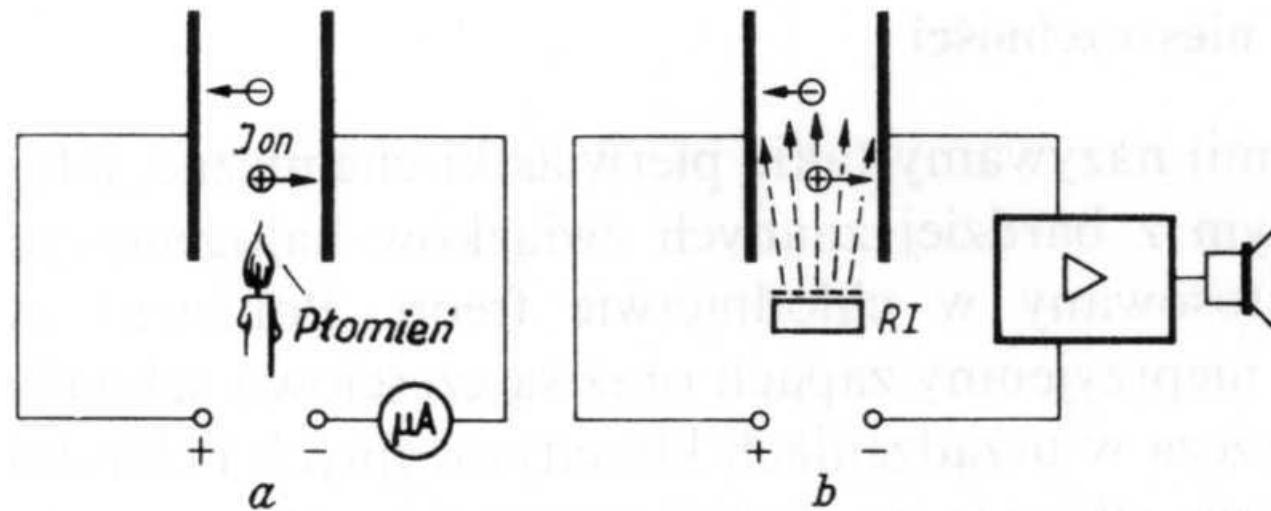


- 1) kulka z porowatego szkła, przez który mogą swobodnie przenikać jony hydroniowe odpowiadające za *pH* analizowanego roztworu,
- 2) czasami na dnie kulki zbiera się nieco stałego **chlorku srebra**, co jest zjawiskiem normalnym, nie wpływającym na czułość pomiaru,
- 3) wewnętrzny roztwór wzorcowy - zwykle 0,1 M HCl ($M=\text{mol}/\text{dm}^3$),
- 4) elektroda pomiarowa - wykonana ze **srebra**,
- 5) szklana obudowa całego układu elektrod,
- 6) elektroda wzorcową - wykonana ze **srebra** i zanurzona we wzorcowym roztworze **chlorku srebra**
- 7) membrana łącząca roztwór wzorcowy z roztworem, którego *pH* się mierzy - membrana ta jest zwykle wykonana z gęstego spieku **ceramicznego**, który zapobiega mieszanemu się obu roztworów ale zapewnia ich elektryczne połączenie.

Czujniki pomiarowe wykorzystujące zjawisko jonizacji

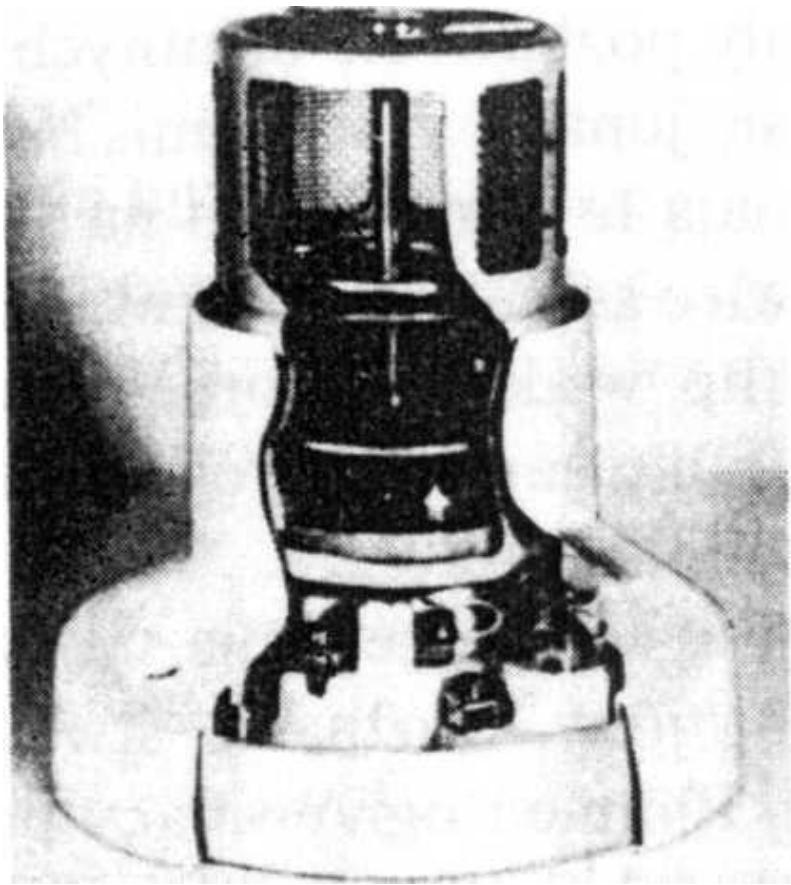
W wysokiej temperaturze cząsteczki gazu rozpadają się na jony. Płomień ogrzewający powietrze między okładzinami kondensatora powoduje przepływ niewielkiego prądu, gdyż jony podążają do ujemnej elektrody.

Podobnie promieniowanie jonizujące i rentgenowskie jonizuje powietrze i inne gazy.



- a) ciepło jonizuje powietrze znajdujące się w polu kondensatora,
- b) izotop radu RI jonizuje powietrze w polu kondensatora

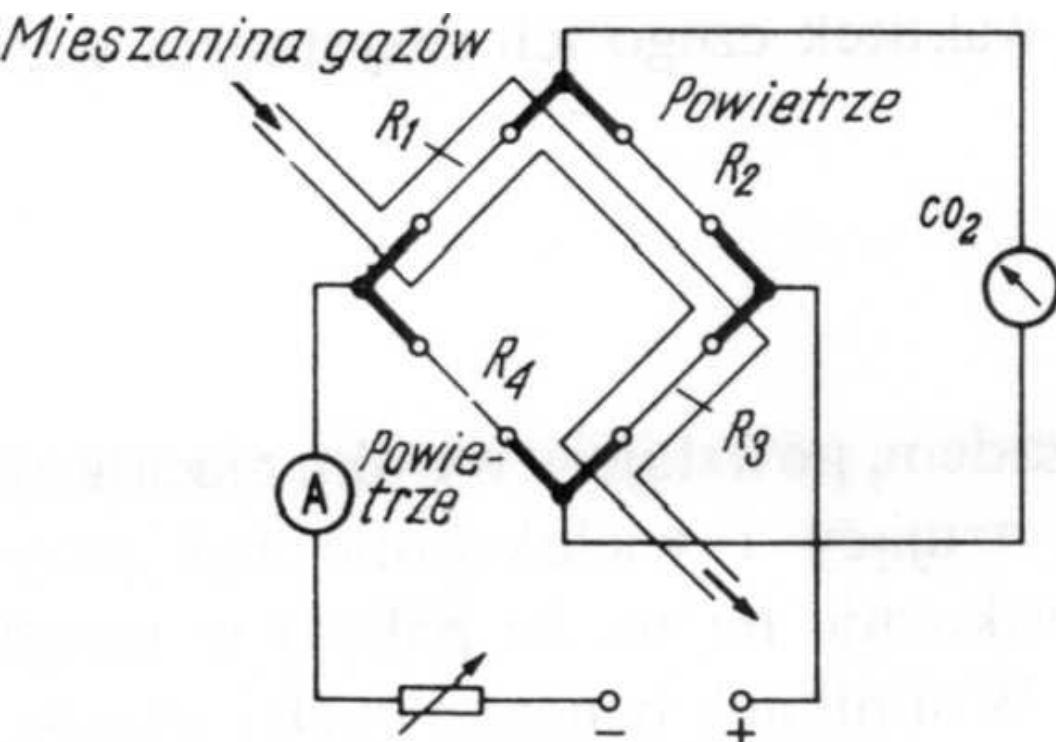
Jeżeli między okładziny kondensatora dostanie się inna substancja, np. dym, zmieni się stopień zjonizowania gazu i zmniejszy się prąd jonizacyjny, gdyż cząsteczki dymu mają większą bezwładność niż molekuły gazu. Czujnik taki można wykorzystywać jako sygnalizator przeciwpożarowy.



Przekrój jonizacyjnego sygnalizatora przeciwpożarowego firmy Cerberus AG. Jonizacja powietrza między okładzinami cylindrycznego kondensatora następuje pod wpływem umieszczonego poniżej radioizotopu.

Czujniki zawartości dwutlenku węgla

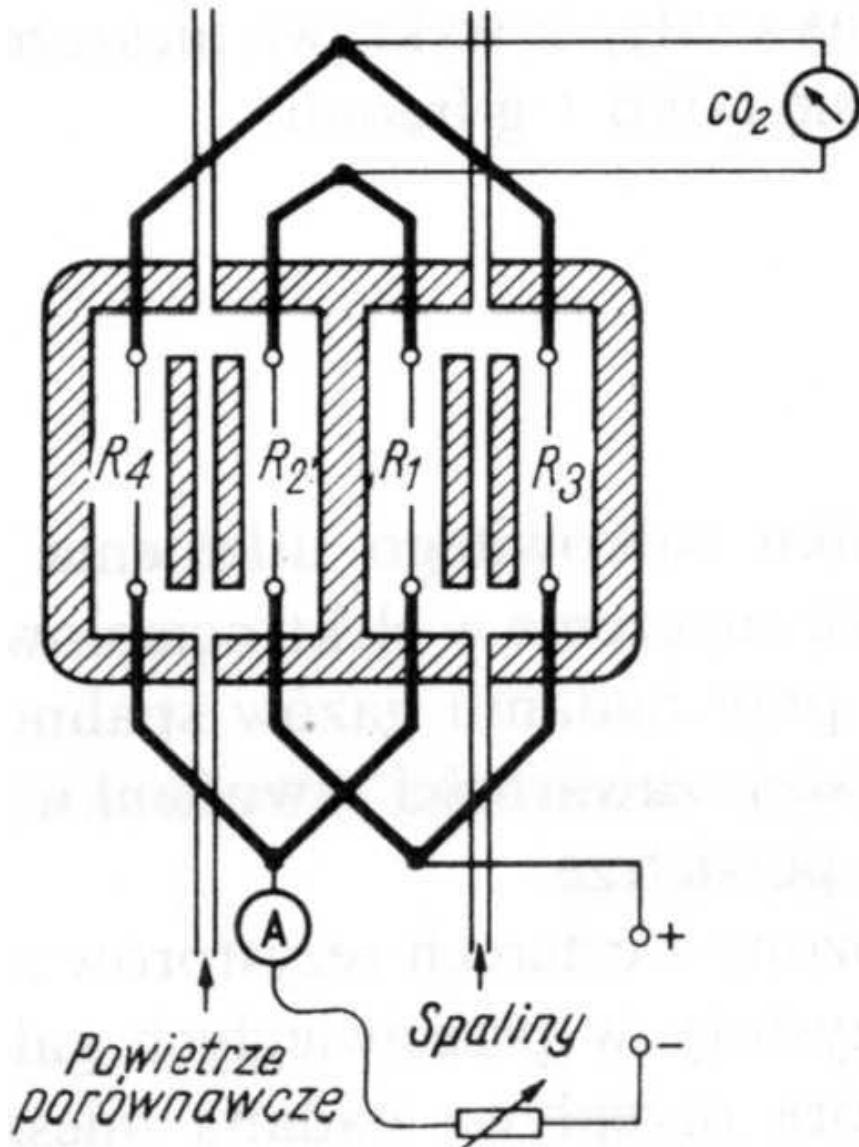
Dwutlenek węgla (CO_2) powstaje w wyniku całkowitego utlenienia węgla. Mieszanina gazów o większej zawartości dwutlenku węgla przewodzi ciepło znacznie gorzej niż czyste powietrze.



Wszystkie 4 druty platynowe są ogrzewane do temperatury ok. 100°C przepływającym przez nie prądem. Mostek równoważy się w stanie, gdy wszystkie jego gałęzie znajdują się w normalnym powietrzu. Gdy badana mieszanina gazów o gorszym przewodnictwie cieplnym dostanie się do komory, to rezystory R_1 i R_3 bardziej się rozgrzeją, gdyż będą lepiej izolowane przed stratami ciepła.

Mostek rozstroji się, a przyłączony do jego przekątnej przyrząd wskaże zawartość dwutlenku węgla.

Analizator spalin

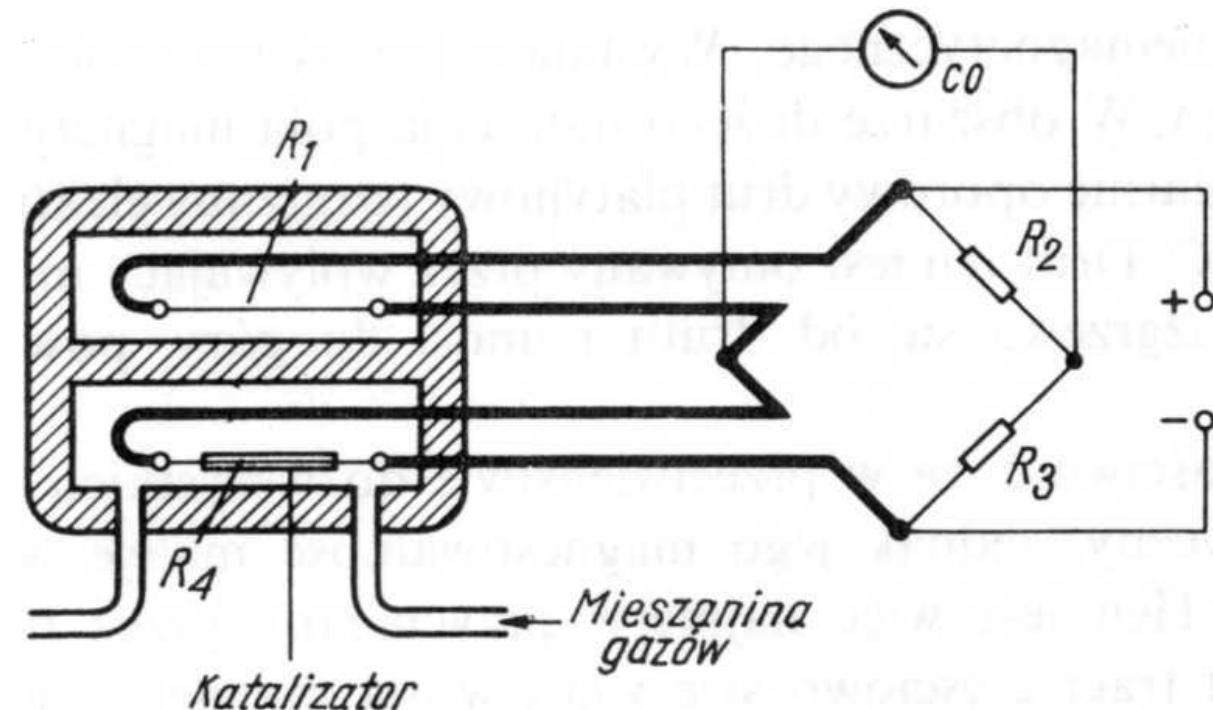


Aby uniknąć wpływów zewnętrznych, a zwłaszcza temperatury, dokładnie symetryczne gałęzie mostka umieszczone w dwóch komorach. Przez jedną z komór z rezystorami R_1 i R_3 przepływają spaliny, a przez drugą z rezystorami R_2 i R_4 czyste powietrze.

W urządzeniu tego typu produkcji firmy Siemens, 20 % objętości dwutlenku węgla w spalinach podnosi temperaturę rezystorów drutowych w komorze pomiarowej o 6 °C, wskutek czego ich rezystancja wzrasta o 0,2 Ω.

Czujniki zawartości tlenku węgla

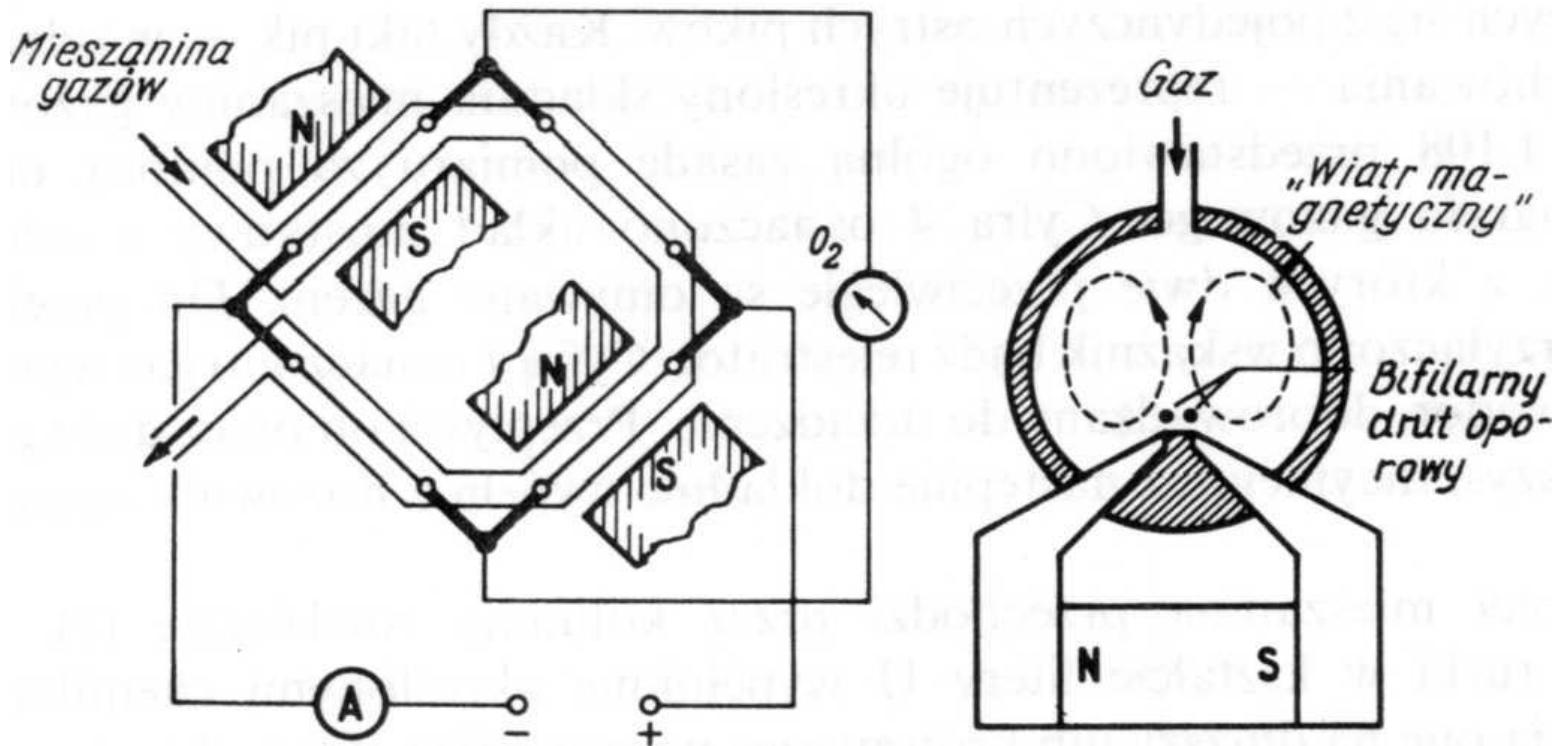
Tlenek węgla (CO), zwany potocznie czadem, powstaje w wyniku niecałkowitego spalenia węgla. Jego obecność wskazuje na to, że paliwo w urządzeniu grzewczym nie jest całkowicie spalane.



R_1 i R_4 - żarzone druty platynowe.
 R_4 - pomiarowy rezystor drutowy pokryty gąbką platynową, spełniającą rolę katalizatora (katalizatory to takie substancje, które zapoczątkowują lub przyspieszają reakcje chemiczne ale nie biorą w nich udziału).

Działanie porowatej platyny jako katalizatora powoduje, że przepływający przez nią tlenek węgla i powietrze rozgrzewają ją do temperatury ok. 500 °C i zwiększy się rezystancja R_4 , a mostek rozstroj się. Wskazania miernika w przekątnej mostka będą proporcjonalne do zawartości tlenku węgla w mieszaninie gazów.

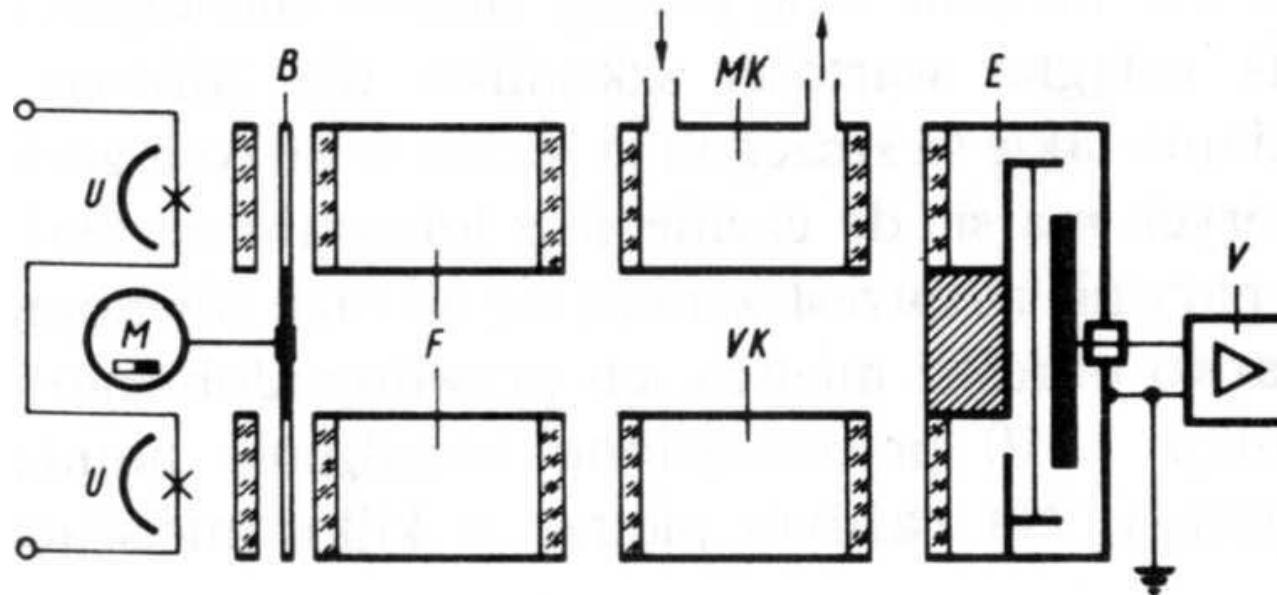
Czujnik zawartości tlenu



Drut platynowy rozgrzany jest elektrycznie do temperatury ok. 300 °C. Gaz rozgrzewa się i unosi do góry, powodując cyrkulację w komorze. Tlen jest paramagnetyczny, ale jego magnesowalność maleje wraz ze wzrostem temperatury. Tlen jest więc najpierw przyciągany przez magnes, a następnie po ogrzaniu traci częściowo swoje właściwości magnetyczne i jest wypychany przez silnie przyciągany zimny tlen. Wywołuje to dodatkową cyrkulację gazu nazywaną „wiatrem magnetycznym”. Ochłada on znacznie drut tak, że np. 21 % udziału objętościowego tlenu powoduje obniżenie temperatury o 5 °C. Odpowiednio zmienia się wówczas rezystancja elektryczna i wskazania miernika są proporcjonalne do zawartości tlenu.

Analizator gazu na podczerwień

Gazy absorbują i osłabiają promieniowanie podczerwone. Każdy rodzaj gazu, jak np. tlenek węgla, dwutlenek węgla, amoniak lub pary benzyny, pochłania promieniowanie podczerwone o ścisłe określonych długościach fal.



U – promiennik,
B - tarcza obrotowa
z przysłonami,
F - komora filtracyjna,
M - silnik napędowy,
MK - komora pomiarowa,
VK - komora wzorcowa,
E - komora odbiorcza,
V - wzmacniacz

Komora wzorcowa *VK* jest wypełniona gazem, o dokładnie znanym stężeniu. Promieniowanie dochodzi do komory odbiorczej *E*, która za pomocą membrany jest podzielona na dwie części. Membrana stanowi jedną elektrodę kondensatora, a druga łączy się ze wzmacniaczem *V*. Obydwa strumienie promieniowania podczerwonego padając na ścianki komory odbiorczej ogrzewają jej wnętrze. Badany gaz przepływający przez komorę *MK*, odpowiednio do swojego stężenia, osłabia promieniowanie. Jest to przyczyną różnego nagrzewania się obydwu części komory *E* i membrana wygina się zmieniając swoją pojemność, co wywołuje zmiany napięcia na wyjściu wzmacniacza.

CZUJNIKI I PRZETWORNIKI

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

p. 120, bud D-1

e-mail: michal.lisowski@pwr.edu.pl

**Konsultacje
środa - godz. 13-15
czwartek godz. 13-14**

Forma zaliczenia:

wykładu - kolokwium na ostatnim wykładzie

Wykład 1

**Rodzaje czujników i przetworników
oraz ich rola w łańcuchu pomiarowym.
Właściwości statyczne i dynamiczne.**

Cele przedmiotu

- C1. Poznanie fizycznych podstaw czujników i przetworników.
- C2. Poznanie najważniejszych parametrów czujników i przetworników mających wpływ na ich pracę.
- C3. Nabycie umiejętności stosowania czujników i przetworników w układach i systemach pomiarowych.

Przedmiotowe efekty kształcenia

W zakresie wiedzy (egzekwowane przy zaliczeniu wykładu):

PEK_W01 - Ma uporządkowaną podstawową wiedzę o działaniu, budowie i właściwościach czujników i przetworników.

PEK_W02 - Ma podstawową wiedzę o zastosowaniu czujników i przetworników w pomiarach różnych wielkości fizycznych.

PEK_W03 - Ma podstawową wiedzę o zastosowaniu czujników i przetworników w systemach pomiarowych.

PEK_W04 - Zna podstawowe zasady doboru czujników i przetworników do określonych zastosowań.

W zakresie umiejętności (egzekwowane przy zaliczaniu laboratorium):

PEK_U01 – Ma umiejętności wykonywania pomiarów z wykorzystaniem czujników i przetworników.

PEK_U02 – Potrafi ocenić przydatność czujników i przetworników w systemach pomiarowych na podstawie ich parametrów.

PEK_U03 – Potrafi zaprojektować i wykonać układ pomiarowy z wykorzystaniem czujników i przetworników.

PEK_U04 – Potrafi ocenić błędy przetwarzania czujników i przetworników.

LITERATURA

LITERATURA PODSTAWOWA

- [1] Walt Kester, *Przetworniki A/C i C/A: teoria i praktyka*, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2012.
- [2] Michał Lisowski, ***Podstawy metrologii, Wyd. II, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2015.***
- [3] Zdzisław Nawrocki, *Wzmacniacze operacyjne i przetworniki pomiarowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [4] Sławomir Tumański, ***Technika pomiarowa, Warszawa WNT 2007,***
- [5] Waldemar Nawrocki, *Sensory i systemy pomiarowe*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
- [6] Marian Miłek, ***Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2006.***
- [7] Andrzej Gajek, Zdzisław Juda, ***Czujniki, WKŁ, Warszawa 2011.***
- [8] Zdzisław Kaczmarek, *Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe*, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2006.
- [9] Jan Zakrzewski, Marian Kampik, ***Sensory i przetworniki pomiarowe. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013***

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA:

- [1] Patrick F. Dunn, Fundamentals of sensors for engineering and science, Boca Raton CRC/Taylor & Francis, 2011
- [2] Gardner J. W.: Microsensors. Principles and applications. John Wiley and Sons. Chichester, 1995.
- [3] Wagner E. i inni: Sensors. A comprehensive survey. Vol. 6. Optical sensors. VCH, Weinheim 1992.
- [4] Ohba R. i inni: Intelligent sensor technology. John Wiley and sons, Chichester
1992.
- [5] Fraden J.: AIP handbook of modern sensors. Physics, designs and applications. AIP, New York 1993.
- [5] Rylski A.: Sensory i przetworniki wielkości niewielkiej. Skrypt Pol. Rzeszowskiej, 1994.
- [6] Vetelino J., Reghu A., Introduction to sensors, Boca Raton : CRC Press/Taylor and Francis Group, 2011.
- [7] Fraden J., Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications, New York, Springer, 2010.

CZUJNIK = SENSOR (RECEPTOR)

Sensory są to elementy pobierające informację o stanie obiektu i warunkach otoczenia.

Obok sensorów technicznych, wytwarzanych przez człowieka, występują w przyrodzie sensory naturalne - biologiczne - nazywane **receptormi** lub **czujkami**.

Najliczniejszą grupą sensorów są **czujniki pomiarowe**, stosowane w pomiarach i automatyce.

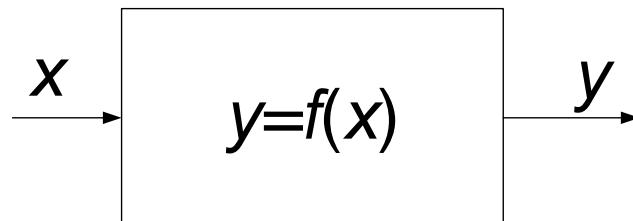
Ważną grupą są również **sensory przełączające (dwustanowe)**, stosowane na przykład:

- do otwierania drzwi, gdy zbliża się do nich człowiek ,
- do zapalania światła ulicznego o zmierzch,
- do zapalania światła gdy w przejściu pojawi się człowiek lub pies,
- w systemach świateł drogowych na skrzyżowaniach o małym natężeniu ruchu.

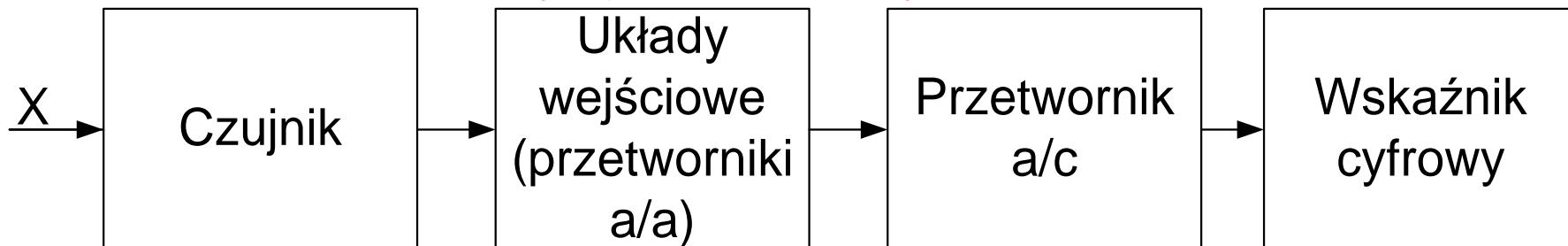
Do tej grupy należą **sensory przeciwpożarowe, alarmowe itp.**

Czujniki (sensory) pomiarowe

Czujnik pomiarowy przetwarza, zgodnie z określonym prawem, wielkość wejściową (nieelektryczną) na wielkość wyjściową (elektryczną). Czujnik pomiarowy ma ścisłe określoną charakterystykę przetwarzania.



Czujnik pełni w łańcuchu pomiarowym rolę pierwszego przetwornika, czyli jest pierwszym przetwornikiem.



Czujniki pomiarowe można podzielić na:

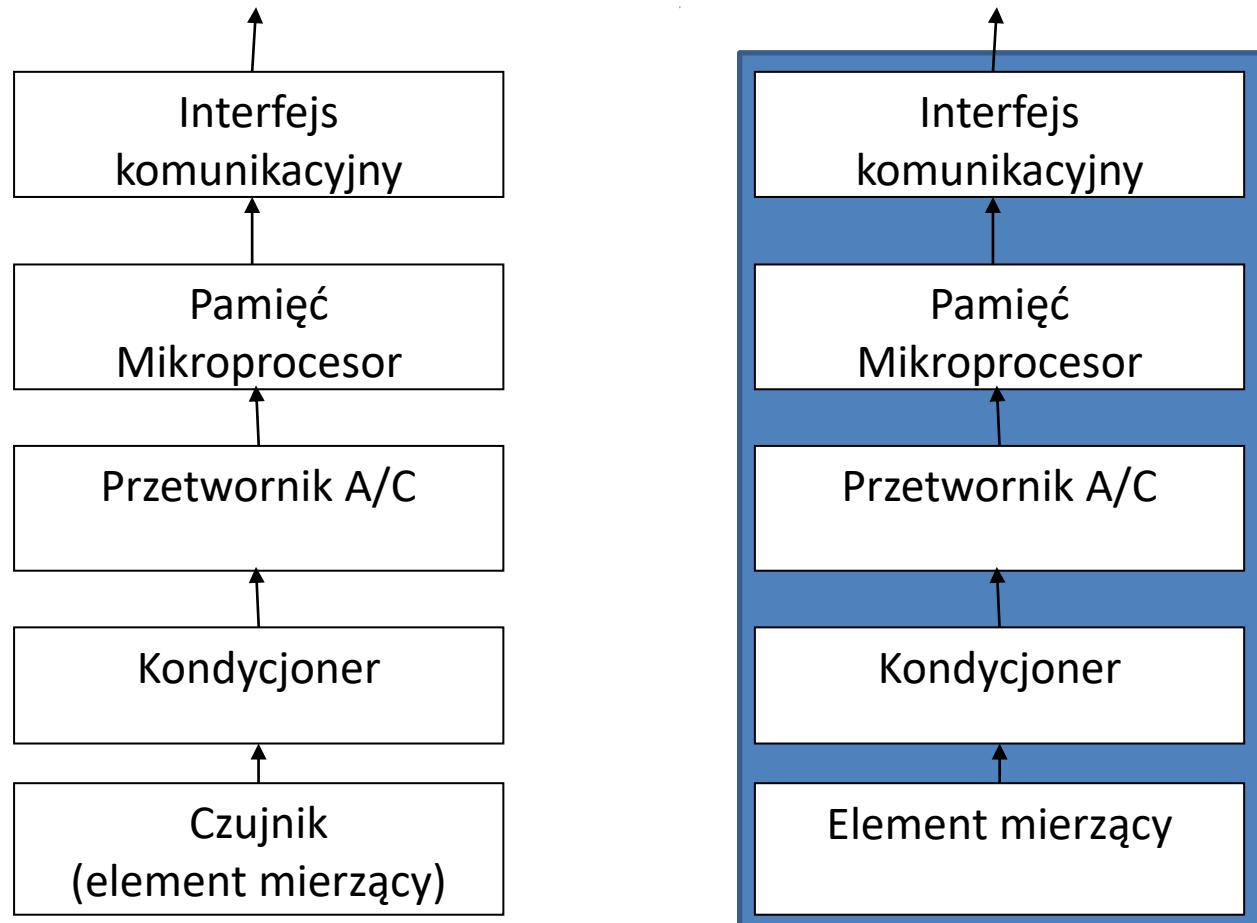
- 1) generacyjne (aktywne), np. termoelektryczne (termopary)
- 2) parametryczne (pasywne, bierne), np. termorezystory.

Czujniki intelligentne

Czujnik intelligentny jest to czujnik zawierający w jednej obudowie *element mierzący, układ kondycjonowania sygnału, przetwornik a/c, mikroprocesor, pamięć oraz interfejs komunikacyjny*.

Intelligentne czujniki posiadają intelligentne funkcje:

- autokalibracji,
- autodiagnostyki,
- autoadaptacji.



Autokalibracja

Funkcja autokalibracji, umożliwiająca automatyczną kalibrację czujnika, czyli korektę jego charakterystyki, bez konieczności demontażu czujnika. Jest ona niezbędna w przypadku stosowania czujników w trudnych czy zmiennych warunkach środowiskowych.

Autodiagnostyka

Funkcja autodiagnostyki skraca czas potrzebny do zdiagnozowania awarii. Czujniki inteligentne są w stanie automatycznie informować o uszkodzeniach ich układów elektronicznych, defektach czujnika, niestabilności parametrów czujnika czy nieprawidłowej konfiguracji urządzenia. Funkcje te uzyskuje się przez zastosowanie dodatkowego „wzorcowego” elementu mierzącego lub wykorzystanie odpowiednich algorytmów matematycznych.

Autoadaptacja

Autoadaptacja polega na tym, że sam czujnik inteligentny potrafi dobrać parametry pomiaru lub procedurę pomiarową, w zależności od stanu obiektu, którego właściwości mierzy.

Wykorzystuje się ją m.in. do:

- zmniejszenia poboru energii przez inteligentny czujnik, co szczególnie ważne jest przy zasilaniu baterijnym,
- zwiększenia i zmniejszania rozdzielczości pomiaru.

Pożądane właściwości przetworników pomiarowych

1. Wartość sygnału wyjściowego y powinna być zależna wyłącznie od wartości sygnału wejściowego x , czujniki powinny być więc selektywne, nie wrażliwe na wpływów innych wielkości niemierzonych i zakłócających oraz mieć odpowiednią dokładność.
2. Funkcja przetwarzania $y=f(x)$ powinna być jednoznaczna w możliwie szerokim zakresie wartości x oraz niezmienna w czasie (duży zakres pomiarowy, stabilność).
3. Pochodna dy/dx , czyli czułość, powinna mieć dużą wartość i powinna być najlepiej niezależna od wartości x , czyli $y=f(x)$ o charakterze liniowym.
4. Dogodna postać sygnału y , najlepiej o charakterze elektrycznym cyfrowym.
5. Niski poziom szumów i zakłóceń w stosunku do sygnału; warunkuje on dolny zakres pomiarowy.
6. Małe oddziaływanie czujnika na zmianę mierzonej wartości x obiektu.
7. Małe opóźnienie czasowe, tzn. małe przesunięcie w czasie między sygnałem y a sygnałem x . Określają to właściwości dynamiczne przetwornika.

Przetworniki mogą:

- gromadzić energię w postaci kinetycznej (ruchome masy w układach elektromechanicznych, indukcyjności w układach elektrycznych, bezwładności cieczy w układach pneumatycznych i hydraulicznych, masy kumulujące energię cieplną),
- gromadzić energię w postaci potencjalnej (sprężystość w układach mechanicznych, pojemność w układach elektrycznych, ściśliwość gazów w układach pneumatycznych),
- powodować straty energetyczne sygnału pomiarowego (tarcie w układach mechanicznych, rezystancja w układach elektrycznych, opory przepływu gazu i cieczy w układach pneumatycznych i hydraulicznych).

Statyczne i dynamiczne warunki pracy przetworników pomiarowych

Mierzone wielkości mogą być:

- niezależne od czasu – przebiegi statyczne,
- zależne od czasu – przebiegi dynamiczne, które mogą być okresowe (ustalone lub nieustalone) albo nieokresowe.

Pomiar odbywa się w warunkach statycznych jeżeli w czasie trwania pomiaru mierzona wielkość praktycznie nie zmienia swojej wartości.

Jeżeli wielkości mierzone są zmienne w czasie, wówczas mówi się o pomiarach dynamicznych. Związki między wielkościami wejściowymi i wyjściowymi czujników i przetworników są wówczas opisane równaniami różniczkowymi.

W warunkach statycznych wszystkie pochodne względem czasu są równe zero.

Jeżeli wielkości mierzone są niezależne od czasu, czyli gdy nastąpiło już ustalenie się sygnału, np. po włączeniu układu pomiarowego lub po zmianie sygnału pomiarowego, to mamy do czynienia z **pomiarami statycznymi**.

Wówczas właściwości czujników i przetworników określa statyczna funkcja przetwarzania

$$y=f(x)$$

Która nie uwzględnia czasu.

Natomiast gdy wielkość mierzona zmienia się tak szybko, że sygnał wyjściowy czujnika nie nadąża za sygnałem wejściowym mówimy o **pomiarach dynamicznych**.

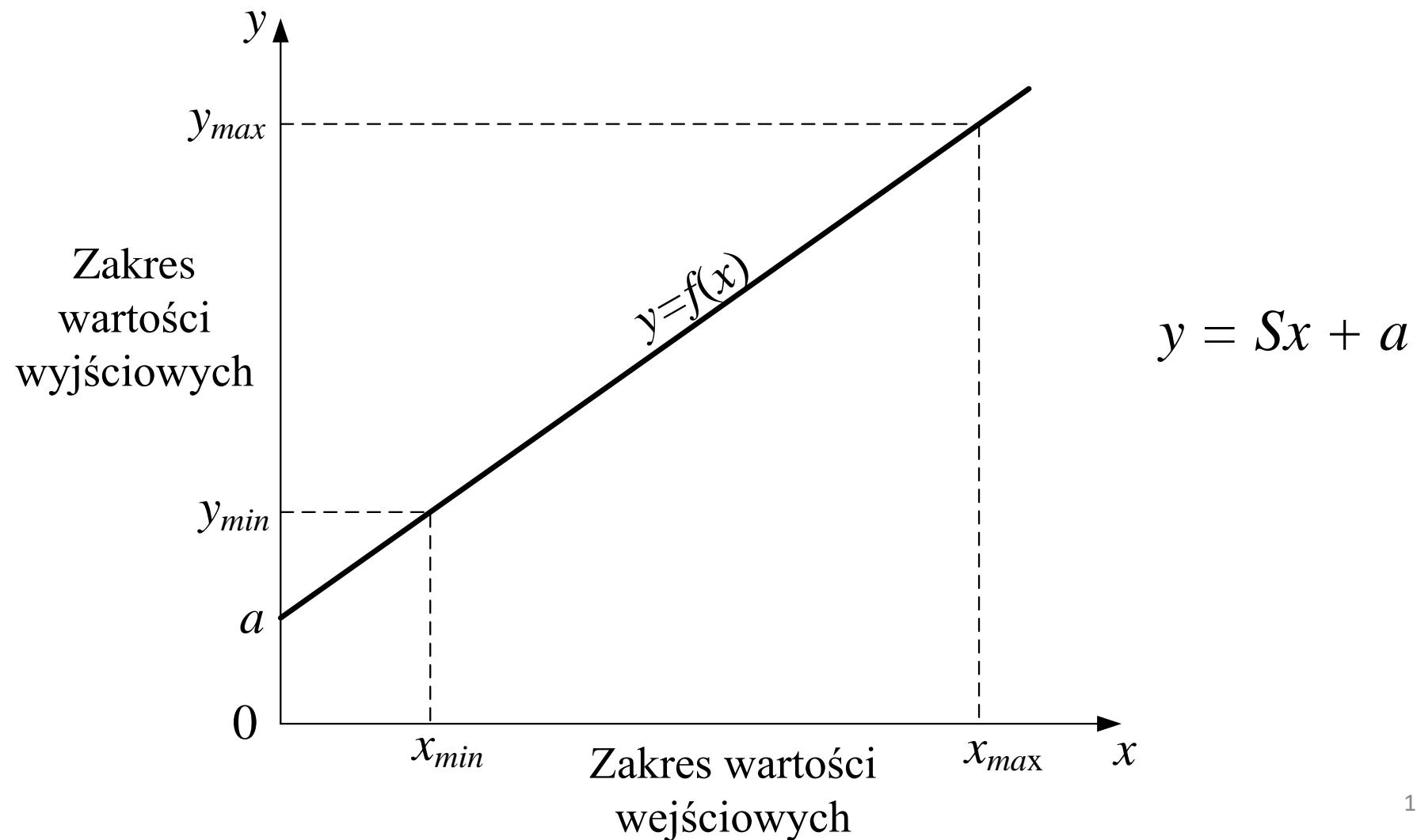
Wówczas właściwości czujników i przetworników określa dynamiczna funkcja przetwarzania

$$y(t)=f[x(t)]$$

która jest funkcją czasu.

Statyczne właściwości przetworników pomiarowych

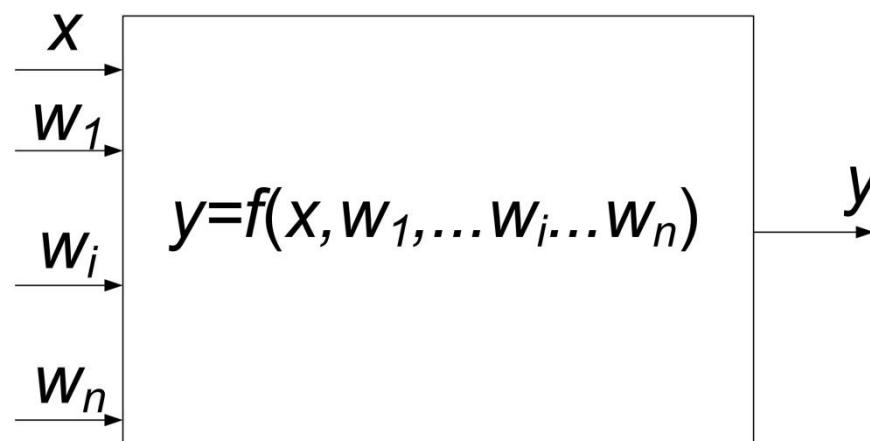
Charakterystyka przetwarzania $y = f(x)$ może mieć charakter liniowy – przetwarzanie liniowe,



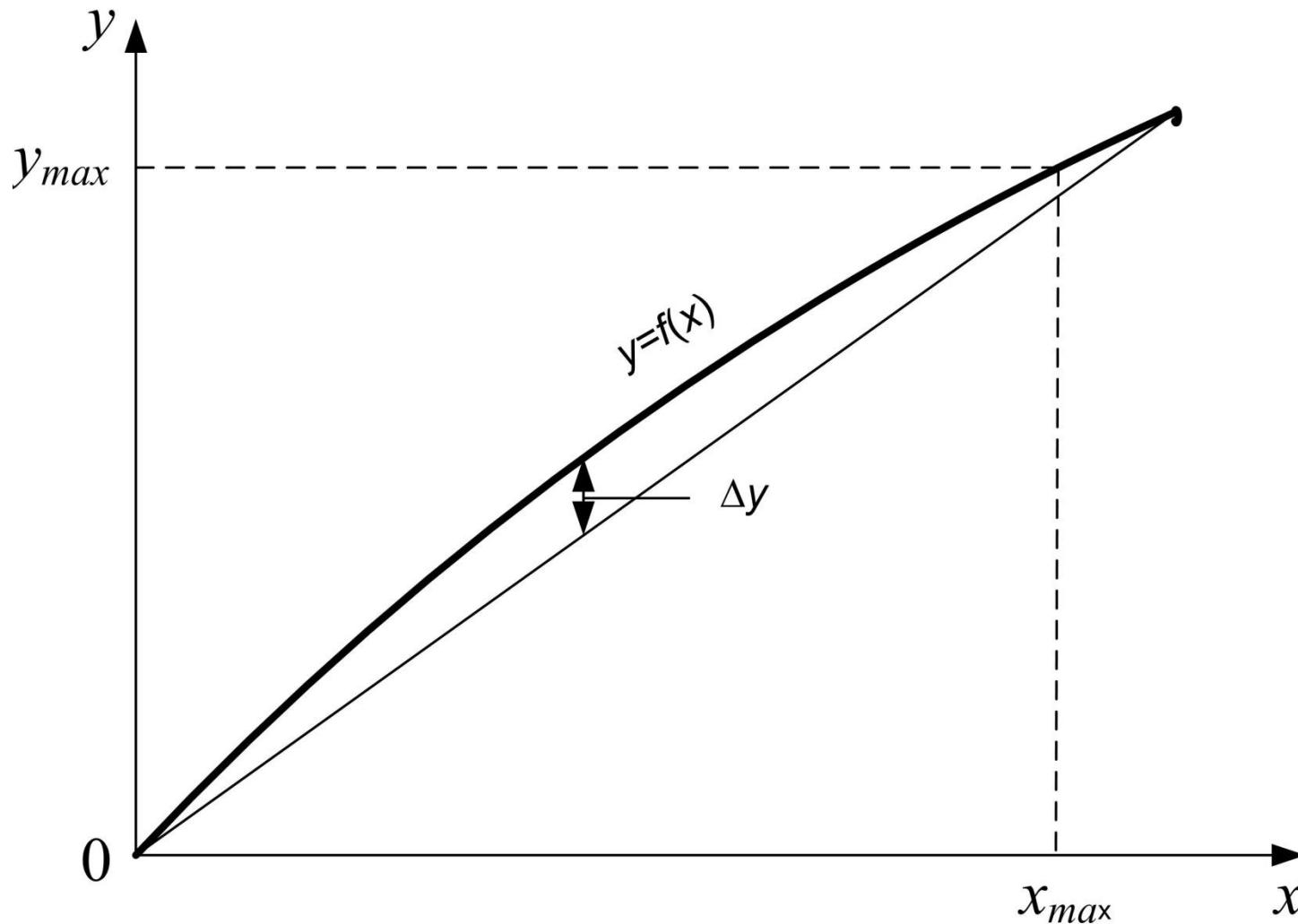
Czułość przetwornika $S = \frac{dy}{dx} = \frac{y_{max} - y_{min}}{x_{max} - x_{min}}$

Odwrotność czułości jest stałą przetwarzania: $c = \frac{1}{S}$

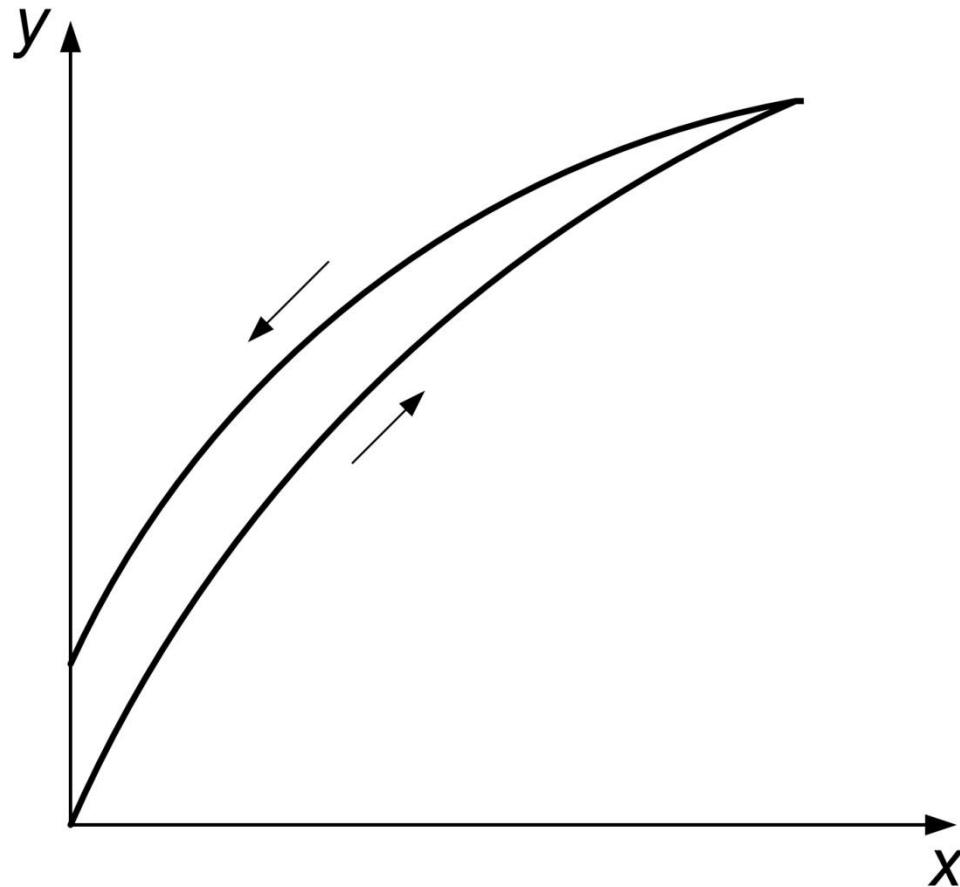
W rzeczywistości sygnał wyjściowy jest funkcją nie tylko sygnału mierzonego x , ale także wielu wielkości zakłócających $w_1 \div w_n$, czyli $y = f(x, w_1 \div w_n)$.



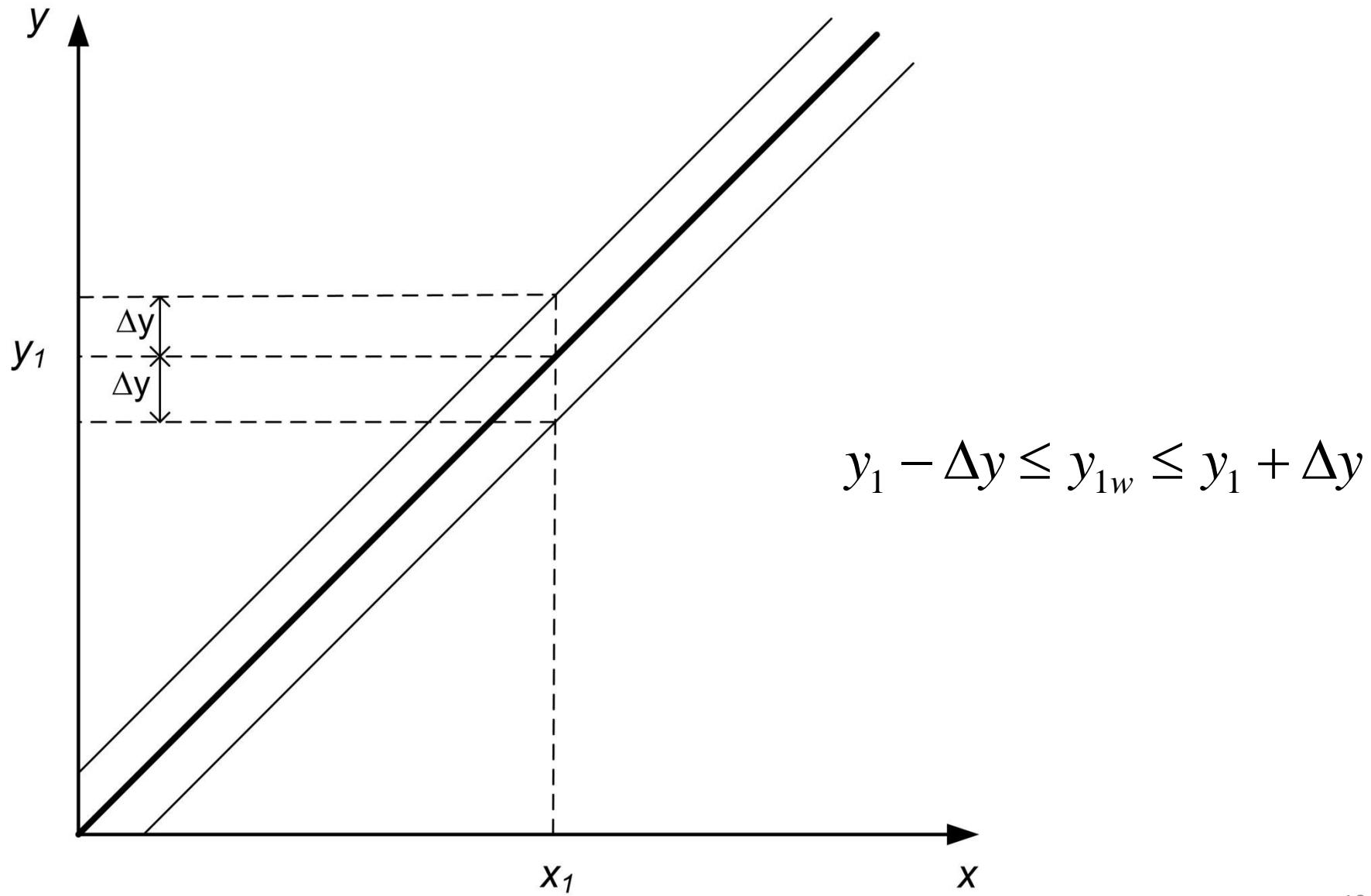
Czujniki mają najczęściej charakterystykę odbiegającą od liniowej.



Przetwornik może mieć inną charakterystykę dla sygnału rosnącego i inną dla sygnału malejącego, czyli mieć histerezę



Najważniejszym parametrem przetwornika jest niedokładność przetwarzania



DYNAMICZNE WŁAŚCIWOŚCI PRZETWORNIKÓW POMIAROWYCH

Dla wielkości zmiennych w czasie

$$y(t) = f[x(t)]$$

Przebiegi obu funkcji $x(t)$ i $y(t)$ nie są jednocześnie. Oprócz przesunięcia w czasie, także i kształt funkcji wyjściowej $y(t)$ nie jest w pełni zgodny z funkcją wejściową. Skutkiem tego są dodatkowe **błędy dynamiczne** przetwornika, które mogą być znacznie większe od błędów statycznych. **Błędy dynamiczne** przetwornika zależą od przebiegu czasowego wejściowej wielkości $x(t)$ oraz od dynamicznych właściwości przetwornika.

Większość przetworników (w tym i czujników) można opisać liniowym równaniem różniczkowym o stałych współczynnikach A i B w postaci:

$$B_0 y + B_1 \frac{dy}{dt} + B_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \dots = A_0 x$$

Przyjmując jako kryterium podziału przetworników rząd równania różniczkowego, opisującego model matematyczny przetwornika, można je podzielić na:

- zerowego rzędu,
- pierwszego rzędu,
- drugiego rzędu.

Przetworniki zerowego rzędu opisane są równaniem zerowego rzędu, w którym wszystkie pochodne po czasie są równe zero, czyli:

$$y(t) = kx(t)$$

gdzie $k = \frac{A_0}{B_0}$ jest współczynnikiem przetwarzania statycznego.

Przetworniki zerowego rzędu są bezinercyjnymi, czyli z punktu widzenia dynamiki, są idealnymi. Przetworniki rzeczywiste wymóg ten mogą spełniać tylko w przybliżeniu.

Przetworniki pierwszego rzędu opisuje równanie różniczkowe pierwszego rzędu:

$$B_0 y + B_1 \frac{dy}{dt} = A_0 x$$

lub

$$y + T \frac{dy}{dx} = kx$$

gdzie

$k = \frac{A_0}{B_0}$ - współczynnik przetwarzania statycznego,

$T = \frac{B_1}{B_0}$ - stała czasowa, która ma zawsze wymiar czasu.

Przetworniki te są zawsze inercyjne.

Przetworniki drugiego rzędu opisuje równanie różniczkowe drugiego rzędu:

$$B_0 y + B_1 \frac{dy}{dt} + B_2 \frac{d^2y}{dt^2} = A_0 x$$

Zawierają one trzy rodzaje elementów charakteryzujących układy liniowe:

- elementy magazynujące energię kinetyczną,
- elementy magazynujące energię potencjalną,
- elementy powodujące straty.

Charakterystyczną właściwością przetworników drugiego rzędu jest możliwość powstawania drgań, spowodowanych wymianą energii między postacią potencjalną i postacią kinetyczną. Drgania te zawsze są tłumione wskutek rozpraszania energii.

Przetworniki te po pewnym czasie są stabilne.

Przetworniki te charakteryzują następujące parametry:

$k = \frac{A_0}{B_0}$ - współczynnik przetwarzania statycznego,

$\omega_0 = \sqrt{\frac{B_0}{B_2}}$ - pulsacja drgań swobodnych nietłumionych
(pulsacja naturalna),

$\zeta = \frac{B_1}{2\sqrt{B_0 B_2}}$ - tłumienie względne (bezwymiarowe).

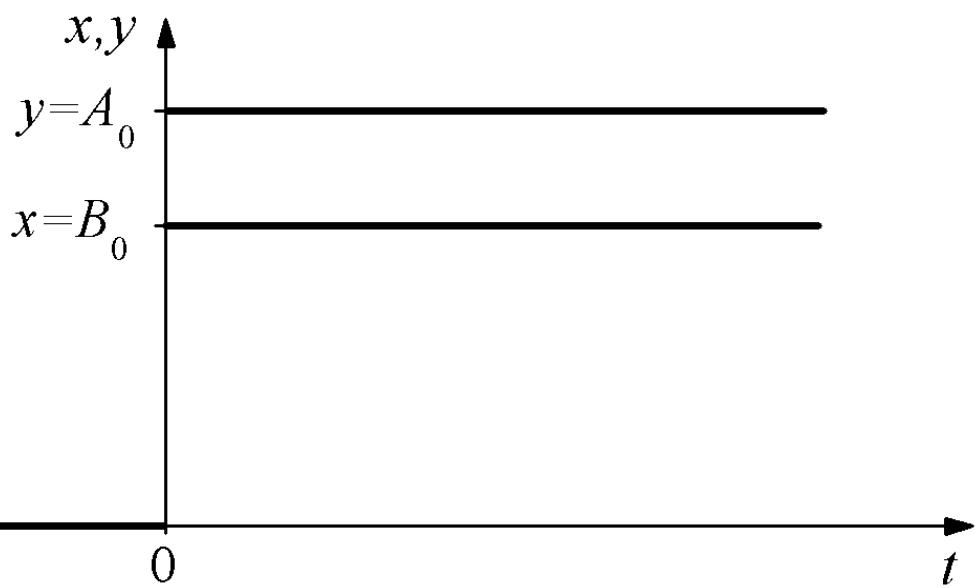
Uzgłędniając powyższe parametry równanie przetwarzania można zapisać w postaci:

$$\omega_0 y + 2\zeta\omega_0 \frac{dy}{dt} + \frac{d^2 y}{dt^2} = \omega_0^2 kx$$

Dla porównywania właściwości dynamicznych bada się odpowiedź $y(t)$:

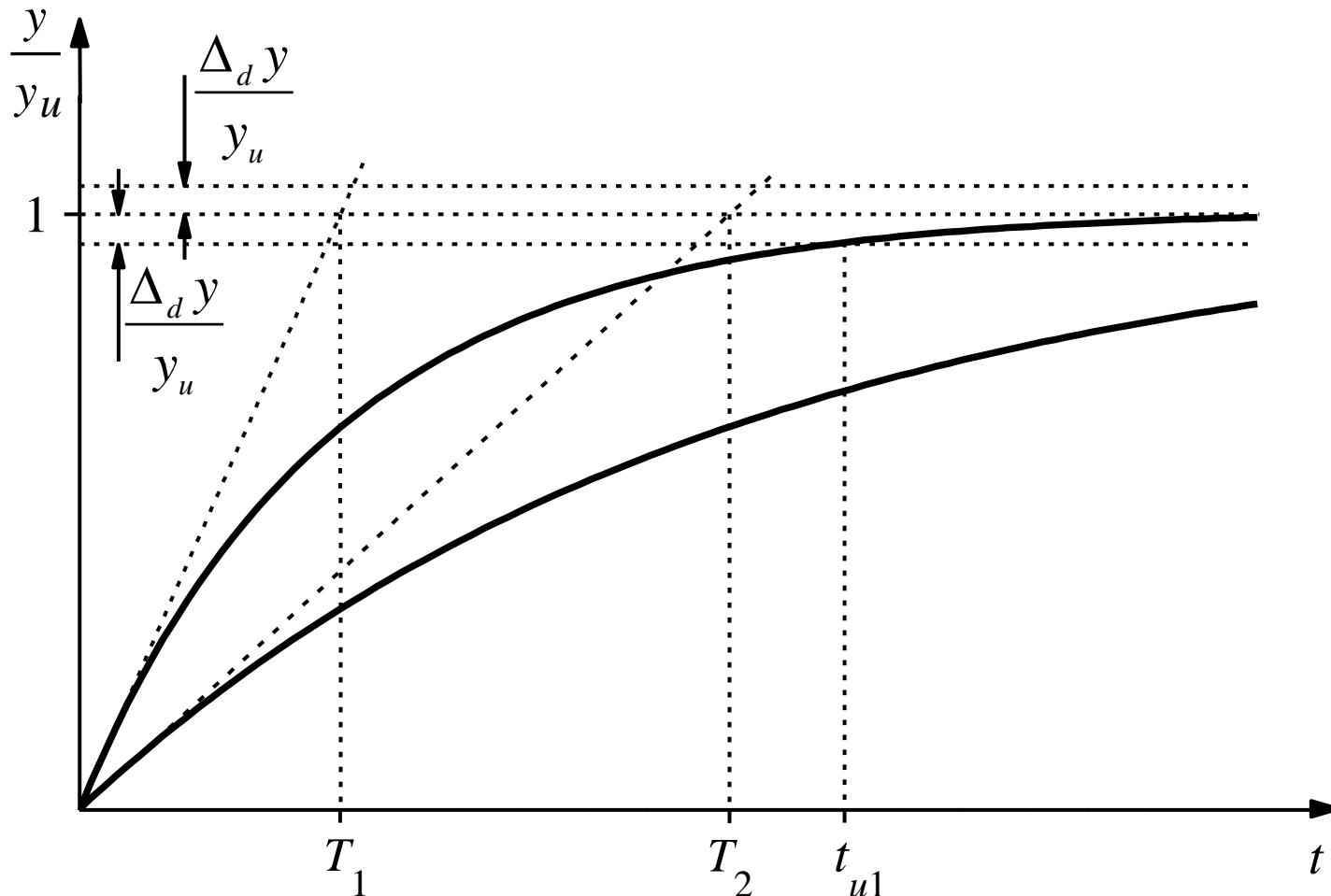
- na skok jednostkowy sygnału wejściowego $x(t) = B_o$
- na sygnał sinusoidalny $x(t) = B_o \sin \omega t$,
gdzie ω jest pulsacją, $\omega = 2\pi f$.

Przetwornik zerowego rzędu (bezineracyjny)



Odpowiedź na skok jednostkowy jest również skokowa, a odpowiedź na sygnał sinusoidalny również sinusoidalna bez opóźnienia czasowego (przesunięcia fazowego).

Przetwornik pierwszego rzędu



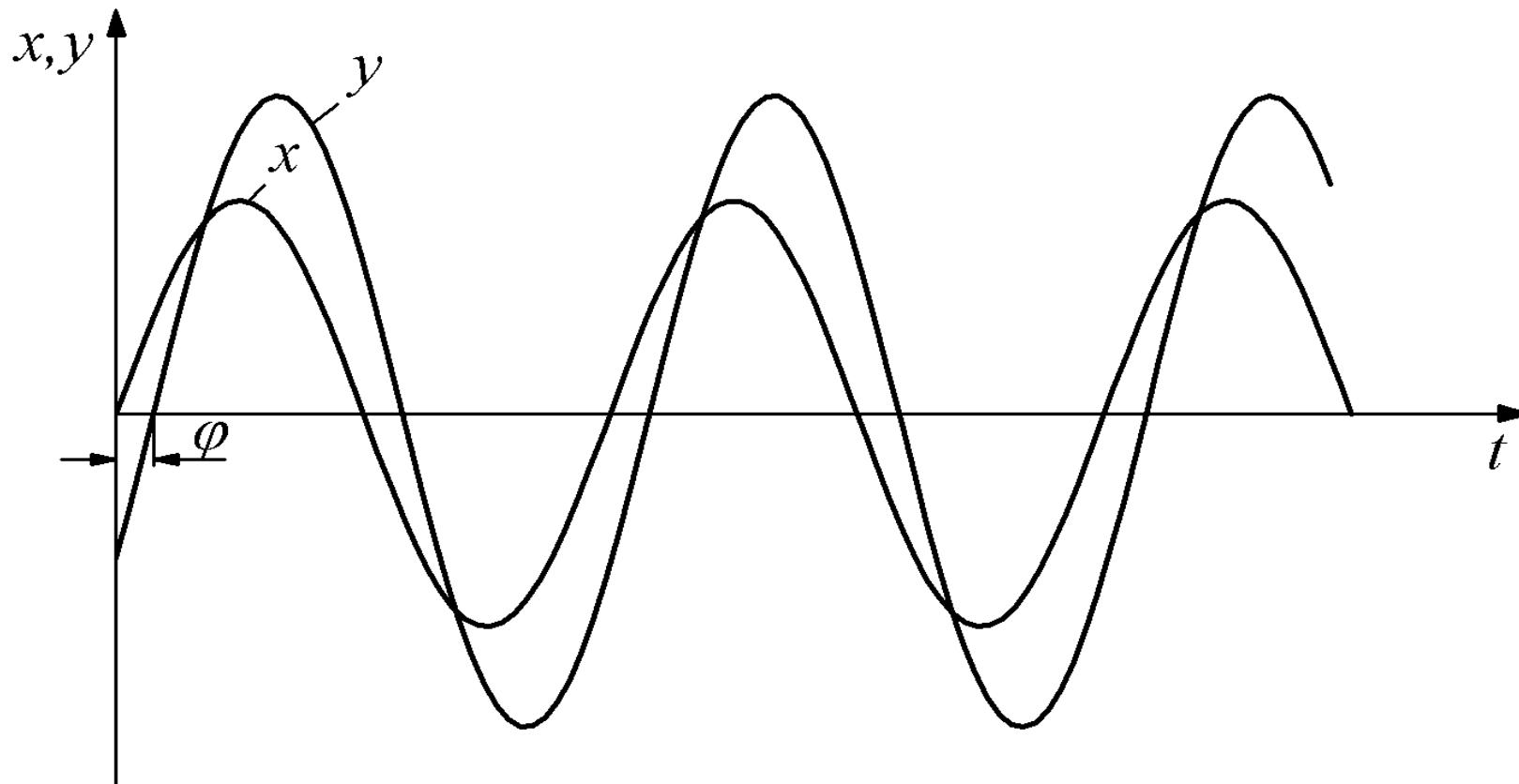
Czas ustalania się odpowiedzi t_u zależy od wartości stałej czasowej T przetwornika. Za czas ustalania się odpowiedzi uważa się czas, po którym sygnał wyjściowy znajdzie się w zadanym przedziale błędu dopuszczalnego $\Delta_d y/y_u$.

Odpowiedź $y(t)$ przetwornika pierwszego rzędu na sygnał wejściowy sinusoidalny

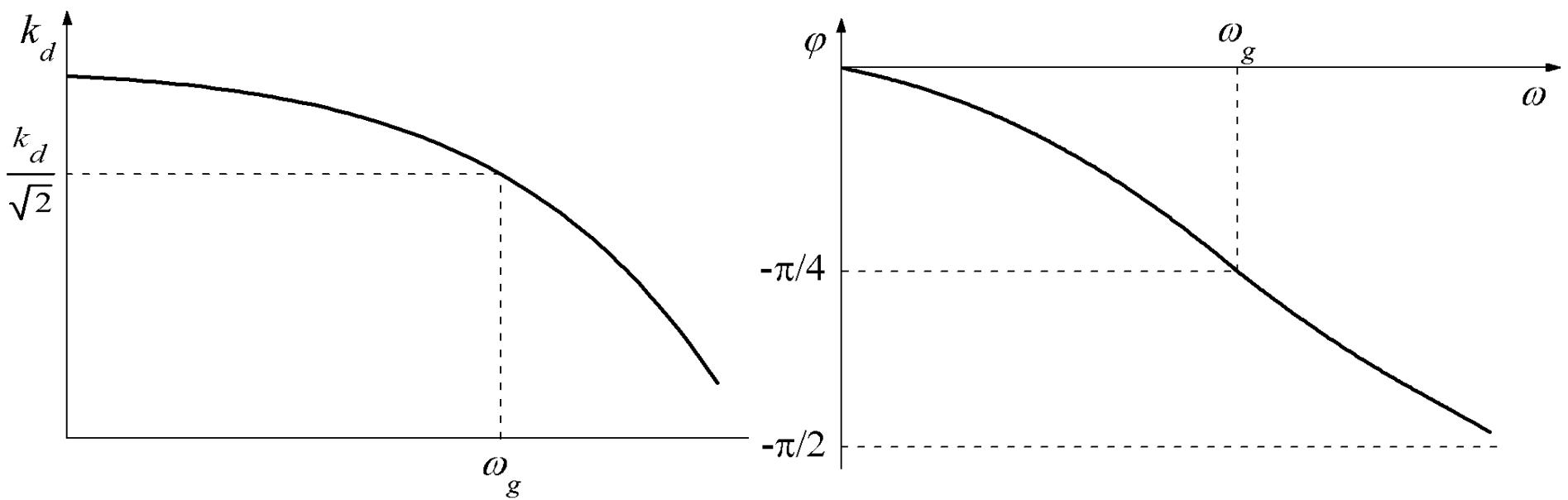
$$x(t) = B_0 \sin \omega t$$

jest również sinusoidalna, ale opóźniona w czasie (przesunięta o kąt φ), czyli

$$y(t) = A_0 \sin(\omega t + \varphi).$$

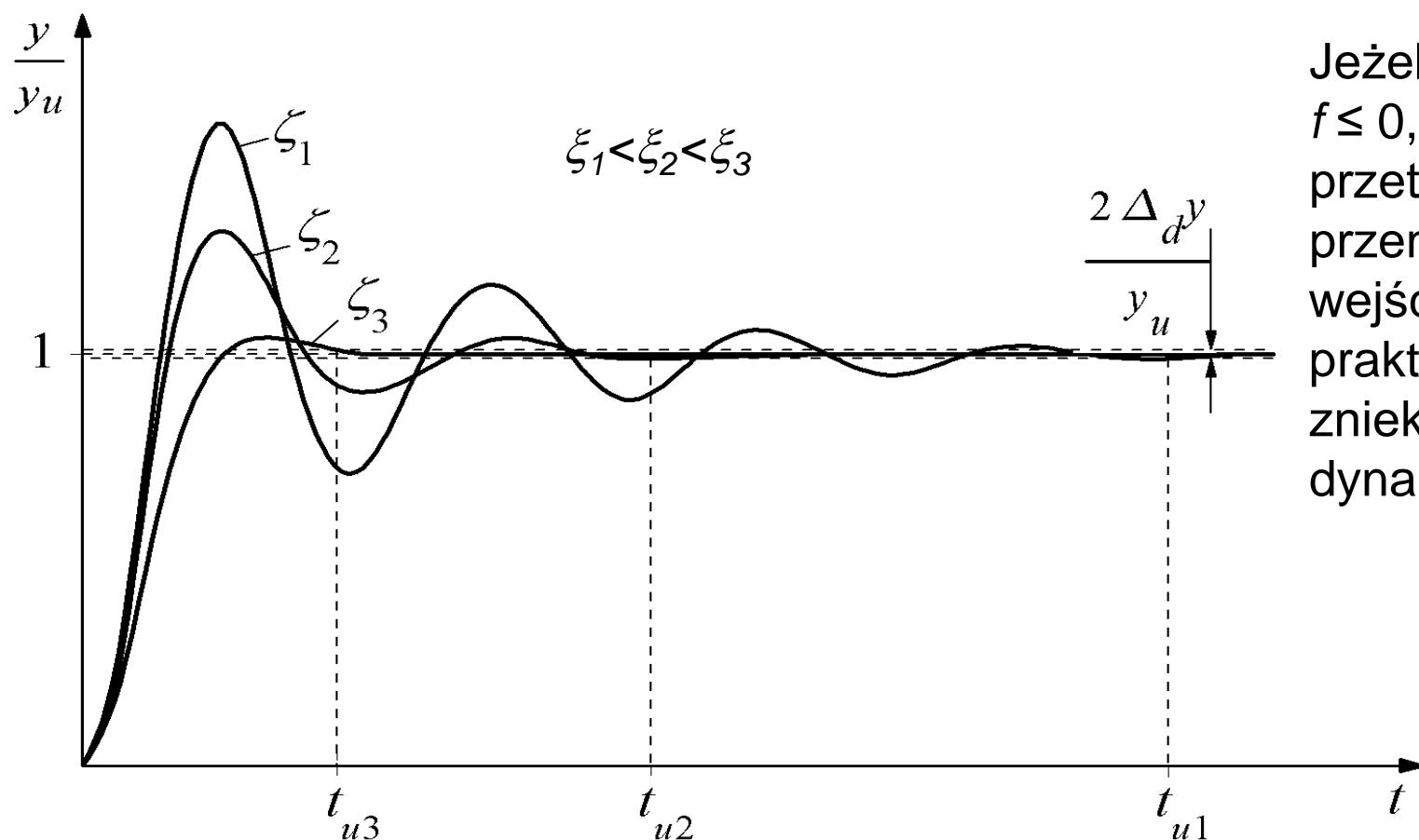


Najczęściej przetwornik przenosi sygnały od częstotliwości $f = 0$, czyli przenosi również składową stałą sygnału. Wraz ze wzrostem częstotliwości (pulsacja $\omega = 2\pi f$) maleje amplituda sygnału wyjściowego y , czyli maleje współczynnik przetwarzania dynamicznego $k_d = y/x$ oraz zwiększa się ujemne przesunięcie fazowe.



Przetworniki drugiego rzędu

Generują w sygnale wyjściowym drgania zanikające z czasem. Czas zaniku drgań i ustalania się wskazań t_u zależy od współczynnika tłumienia ξ . Dla małych współczynników ξ drgania zanikają wolno i czas ustalania się sygnału wyjściowego y jest długi. Dla krytycznego współczynnika tłumienia $\xi \approx 0,7$ uzyskuje się najkrótszy czas ustalania się sygnału wyjściowego.



Jeżeli $\xi \approx 0,7$, a $f \leq 0,3 f_g$, to przetwornik będzie przenosił sygnał wejściowy praktycznie bez zniekształceń dynamicznych.

CZUJNIKI I PRZETWORNIKI

Wykład 2

**Czujniki temperatury: rezystancyjne, diodowe,
kwarcowe, pojemnościowe**

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

Temperaturę zawsze mierzy się metodą pośrednią. Miedzy ciałem (środowiskiem), którego temperaturę mierzy się, następuje wymiana energii cieplnej na drodze:

- przewodnictwa,
- konwekcji,
- promieniowania.

Czujniki temperatury można podzielić na:

- **stykowe,**
- **bezstylkowe.**

Czujnik stykowy znajduje się w bezpośrednim styku (kontakcie) z ciałem lub ośrodkiem którego temperaturę się mierzy . Wykorzystują one zjawisko przewodzenia ciepła.

W czujnikach bezstylkowych (przyczepy pirometryczne, kamery termowizyjne) temperaturę ciała mierzy się poprzez pomiar emisji podczerwieni (promieniowania elektromagnetycznego).

Ze względu na postać sygnału wyjściowego czujniki stykowe dzieli się na:

- **nieelektryczne,**
- **elektryczne i optoelektryczne (światłowodowe).**

Wśród **czujników nieelektrycznych** najczęściej stosowane są czujniki:

- cieczowe (rtęć – -38 °C ÷ 750 °C;toluol – od -70 °C; alkohol – od -110 °C) , ±0,1 °C;
- bimetalowe (do 400 °C), ±1 °C

Czujniki elektryczne

- czujniki wykorzystujące zmianę rezystancji czujnika,
- czujniki wykorzystujące zjawisko termoelektryczne (termopary).

Czujniki rezystancyjne

• metalowe

- ✓ platynowe (do 850 °C), $W_{100}=1,3844$ – klasa A, 1,3838 – klasa B, 1,3831 – klasa C)
- ✓ niklowe (do 300 °C), $W_{100}=1,617$
- ✓ miedziane (-50 ÷ 150) °C, $W_{100}=1,425$

$$W_{100} = R_{100}/R_0$$

• półprzewodnikowe (termistorowe).

Czujniki platynowe

Są to rezystory termometryczne walcowe ceramiczne oraz cienkowarstwowe.

Do jednoczesnego pomiaru i regulacji stosuje się czujniki podwójne (dwuuzwojeniowe).

Dopuszczalne wartości prądu pomiarowego: od 1 mA (cienka warstwa) do 5 mA (rezystor ceramiczny).

Zakres pracy: -70 do 500°C (cienka warstwa) i - 200 do 850°C (rezystor ceramiczny).

Podstawowym typem rezystora jest **Pt100 o rezystancji 100 Ω w temperaturze 0°C**.

Produkowane są także rezystory Pt25, Pt500, Pt1000.

W zakresie: -200 °C do 0 °C

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100°C)t^3]$$

w zakresie : 0 °C do 850 °C

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$$

W przemysłowych termometrach rezystancyjnych:

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2} \quad C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

Współczynnik nachylenia $\alpha = (R_{100} - R_0)/(100 \times R_0) = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Czujniki niklowe

Stosowane są w mniej dokładnych pomiarach przemysłowych.

W zakresie $-60^{\circ}\text{C} \div 159^{\circ}\text{C}$: $R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + Ct^3 + Dt^4 + Et^5)$

$$A = 5,5009 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \quad B = 6,29 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}, \quad C = -4,086 \times 10^{-9} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3},$$
$$D = 1,1002 \times 10^{-10} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}, \quad E = -2,856 \times 10^{-13} \text{ } ^\circ\text{C}^{-5}$$

Czujniki miedziane

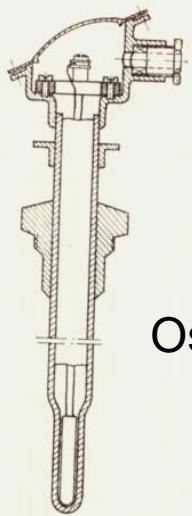
Stosowane są głównie w chłodnictwie.

W zakresie $-50^{\circ}\text{C} \div 180^{\circ}\text{C}$:

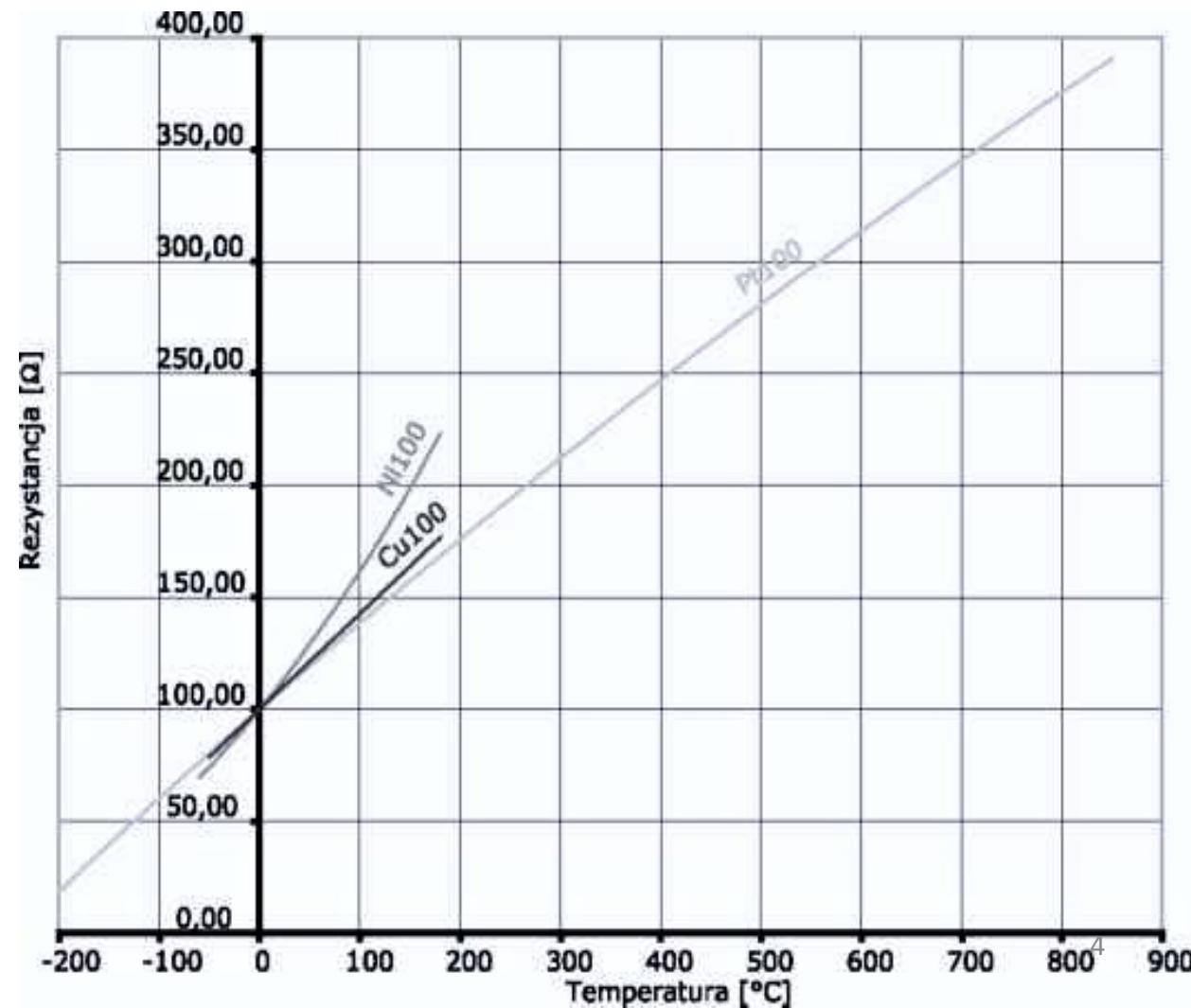
$$R_t = R_0 (1 + At)$$

$$A = 4,26 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Czujniki niklowe i miedziane są tańsze, lecz mniej dokładne i mniej stabilne.

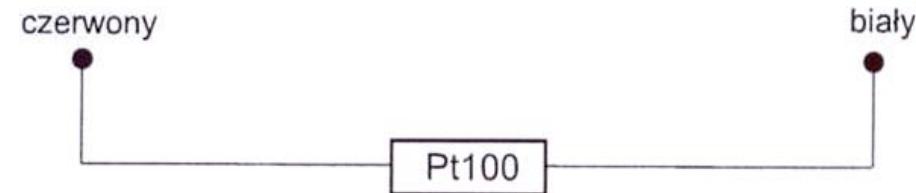


Osłona

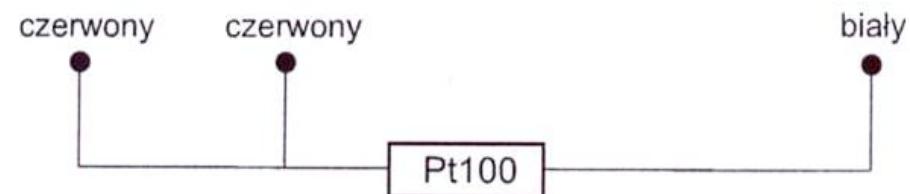


UKŁADY POMIAROWE WSPÓŁPRACUJĄCE Z CZUJNIKAMI REZYATANCYJNYMI

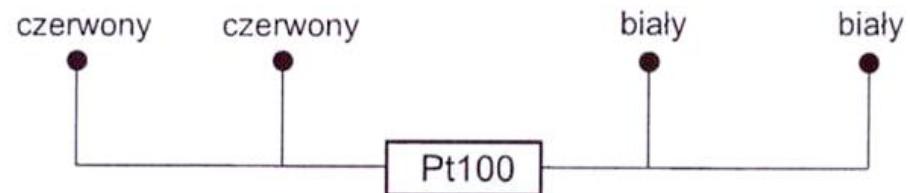
Czujniki rezystancyjne mogą być włączane do układów pomiarowych za pomocą linii 2-, 3- lub 4-przewodowej. Najczęściej stosowane jest podłączenie 2-przewodowe. Zaletą takiego podłączenia jest redukcja kosztów kabli, ale rezystancja przewodów i jej zmiana z temperaturą otoczenia powiększa błąd pomiaru. Zastosowanie linii 3- przewodowej ogranicza znacznie ten błąd, a linia 4- przewodowa eliminuje go całkowicie.



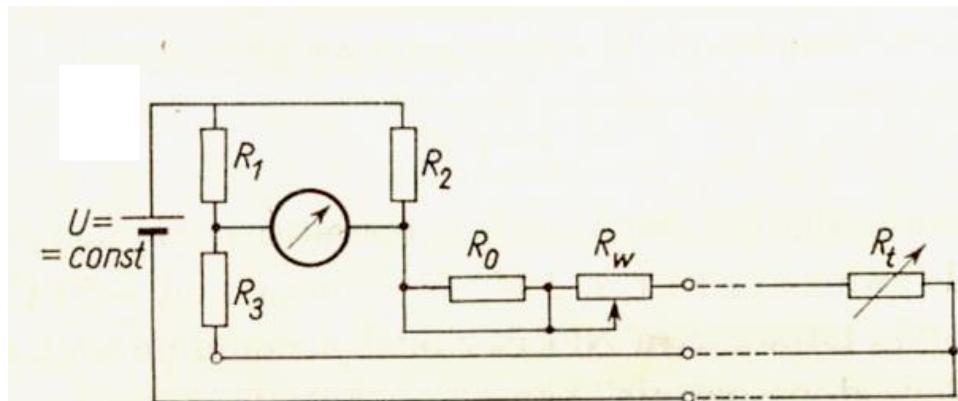
Linia 2-przewodowa: tylko klasa B



Linia 3-przewodowa: klasa A, B lub wyższa



Linia 4-przewodowa: klasa A, B lub wyższa



$$\frac{R_t + R_w + R_p}{R_3 + R_p} = \frac{R_2}{R_1}$$

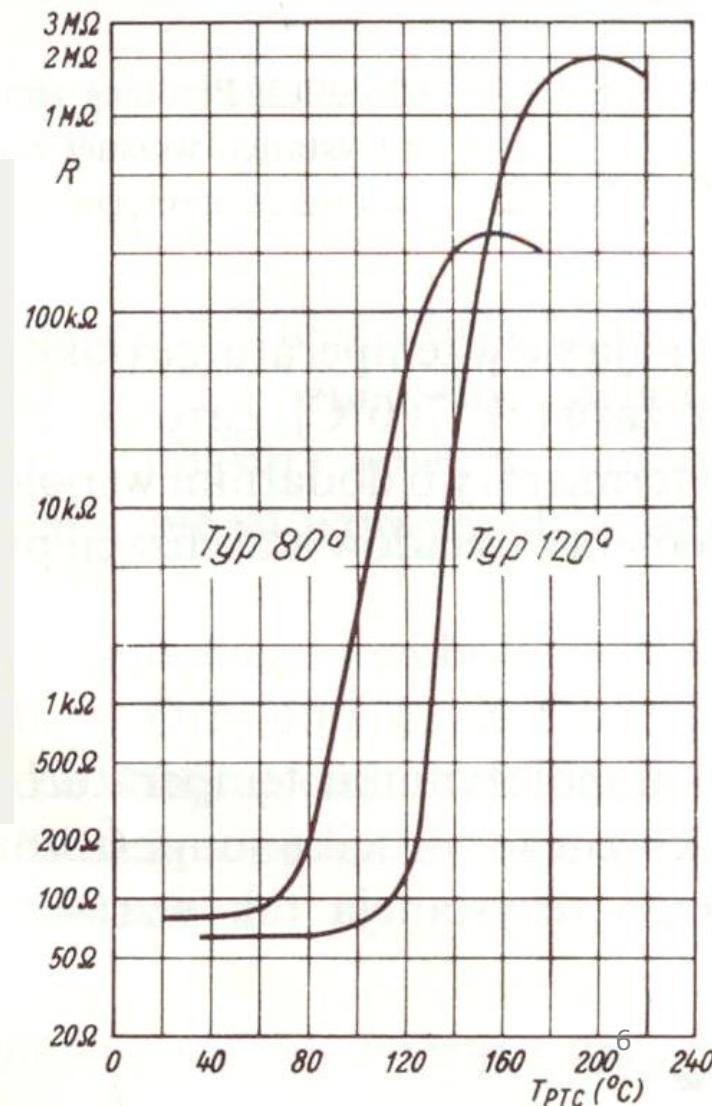
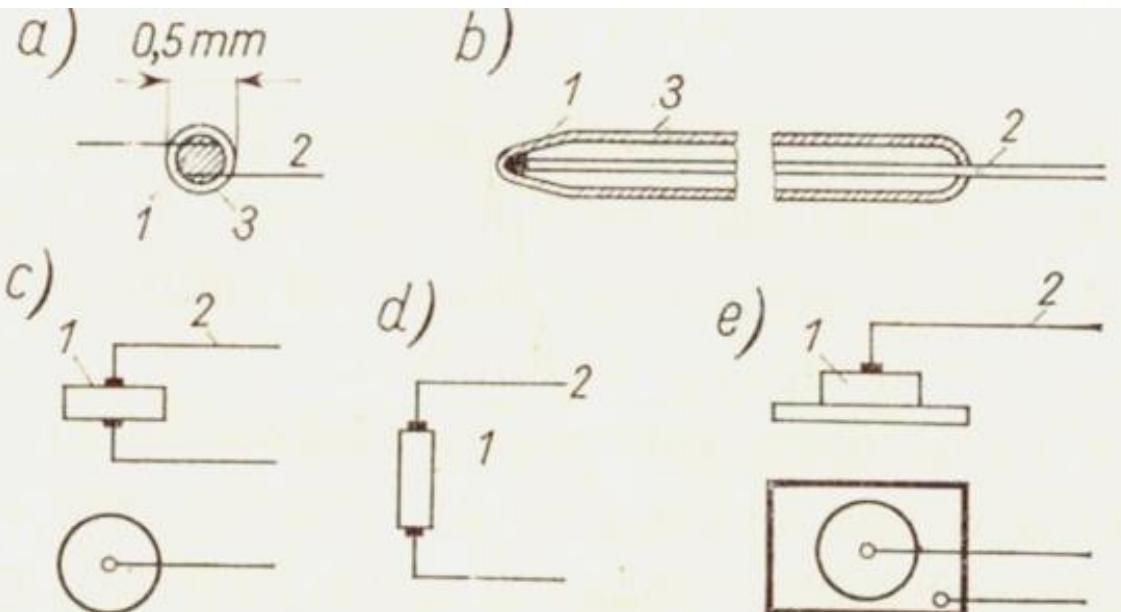
R_p – rezystancja przewodów do czujnika

TERMISTORY

Rozróżnia się termistory:

- o dodatnim temperaturowym współczynniku PTC (Positive Temperature Coefficient),
- o ujemnym temperaturowym współczynniku NTC (Negative Temperature Coefficient).

Termistory PTC wykonuje się najczęściej z tytanu baru BaTiO_3 .

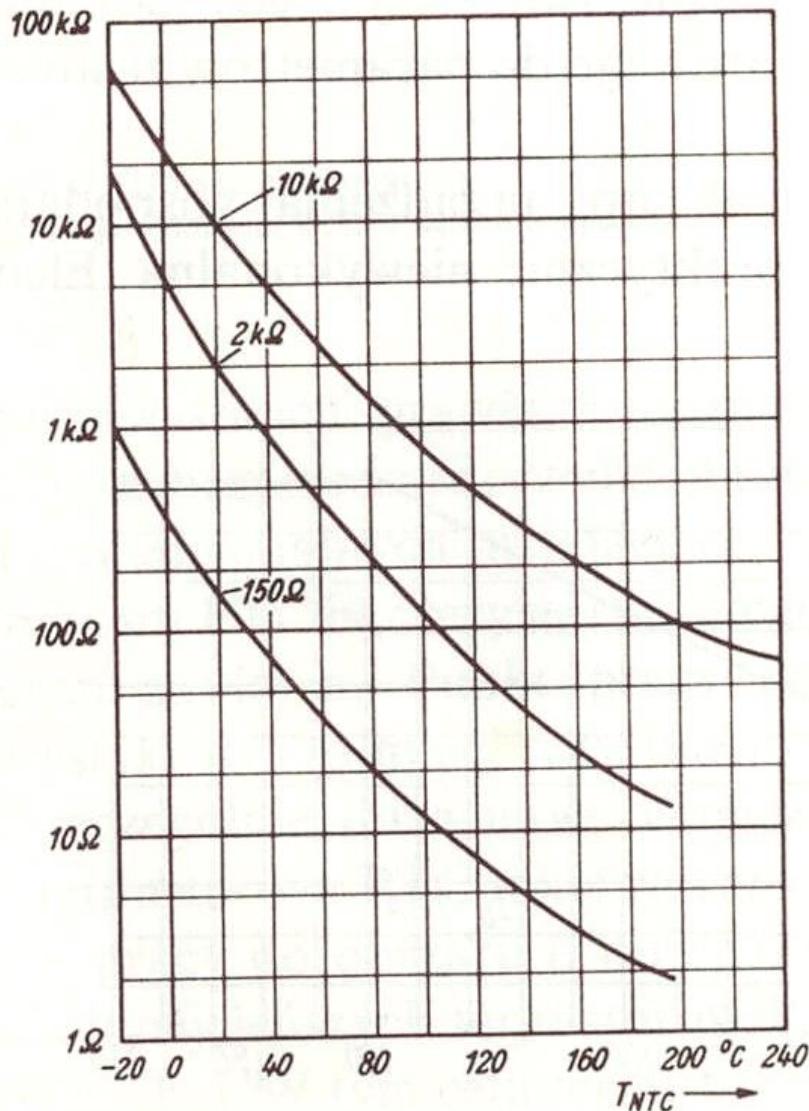


Termistory NTC (o ujemnym współczynniku temperaturowym)

Współczynnik temperaturowy od -3 %/ °C do -6 %/ °C.

Wykonuje się ze spiekanych proszków tlenków: Mg, Fe, Ni, Cu, Ti, Zn.

W temperaturze 20 °C rezystancja wynosi od 10 Ω do 1000 Ω .



$$R_T = R_{T_o} e^{\alpha_{T_o} (T - T_o) \frac{T_o}{T}}$$
$$\alpha_{T_o} = -(3 \div 6)\% / K$$

Charakterystyczne cechy czujników termistorowych

1. Małe gabaryty czujników, umożliwiające pomiary punktowe temperatury obiektów o małych wymiarach i pomiary temperatur szybkozmiennych.
2. Duża rezystancja czujników, umożliwiająca stosowanie długich przewodów doprowadzających.
3. Duży cieplny współczynnik zmian rezystancji, umożliwiający dokładne pomiary małych zmian lub różnic temperatur.
4. Duży rozrzut właściwości poszczególnych czujników ogranicza ich zastosowanie. Wypierane są przez miniaturowe czujniki rezystancyjne, termoelektryczne, kwarcowe i diodowe.

Czujniki diodowe i tranzystorowe

Dla diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia, gdy napięcie złącza osiągnie wartość bariery potencjału U_T (dla krzemu ok. 0,7 V, dla germanu ok. 0,2 V), warstwa zaporowa zostanie zlikwidowana, dioda zaczyna przewodzić. Wartość tego napięcia zależy od temperatury:

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

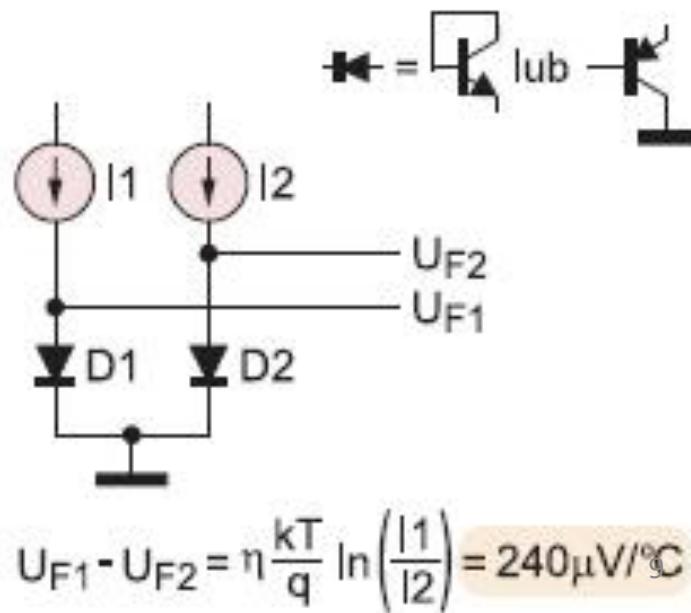
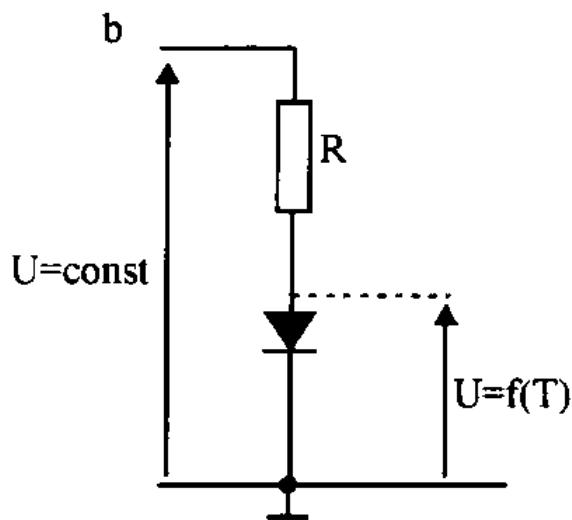
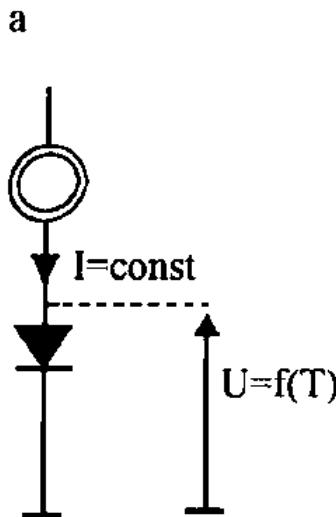
q – ładunek elektronu,

k – stała Boltzmanna,

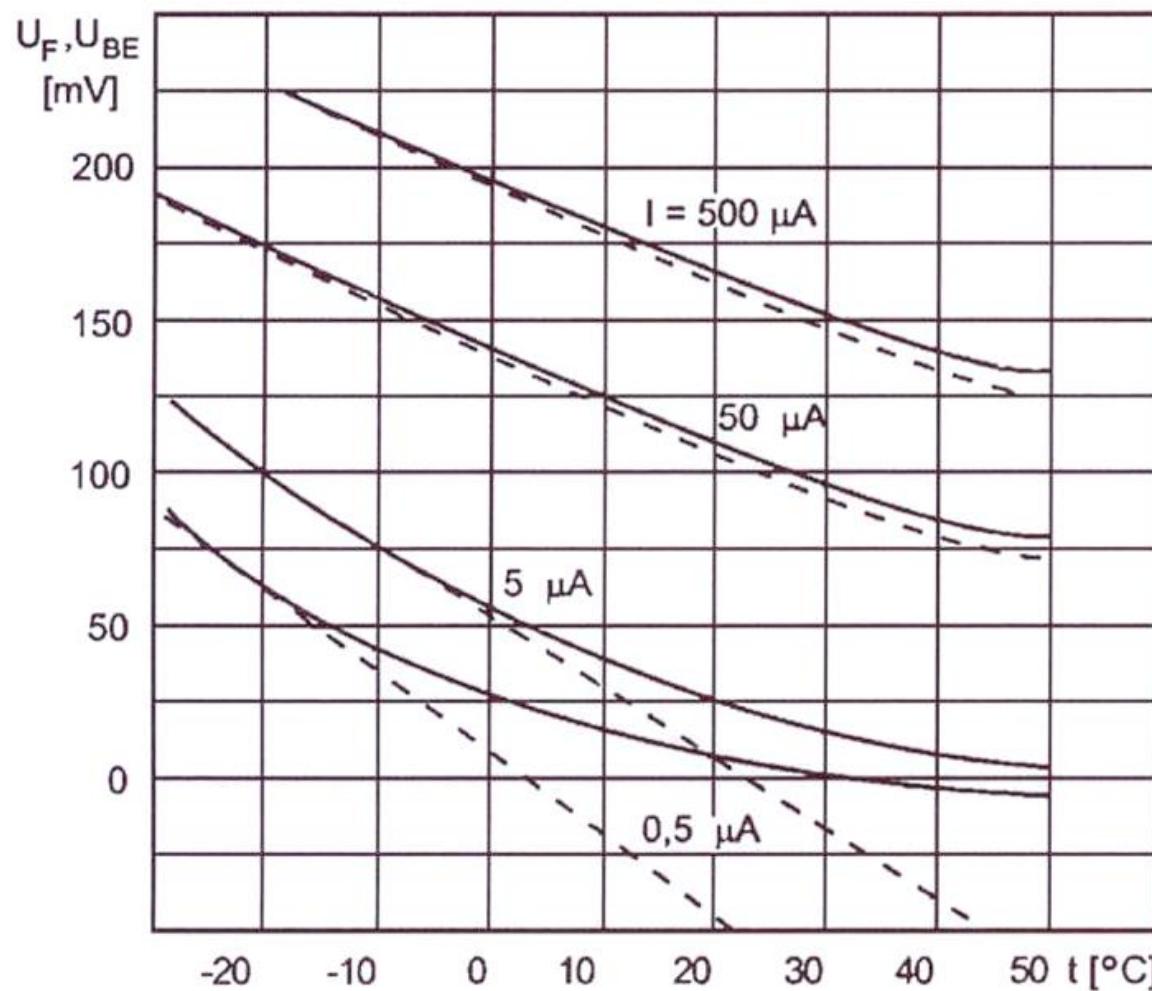
T – temperatura bezwzględna [K],

Ze wzrostem temperatury napięcie na diodzie zmniejsza się. Zmiana napięcia jest w przybliżeniu liniowa.

Zakres (-100 ... +150) °C,



Na liniowość charakterystyki w dużym stopniu ma wpływ wartość prądu, jaki płynie przez diodę.



Tranzystor jako czujnik temperatury

Prąd zerowy podwaja się przy wzroście temperatury o ok. 10 K, a napięcie baza – emiter maleje o ok. 2 mV/K. Te na ogół niekorzystne efekty można wykorzystać do pomiaru temperatury. W temperaturze pokojowej napięcie baza – emiter ma wartość ok. 600 mV. Przy wzroście o 100 K maleje o 200 mV.

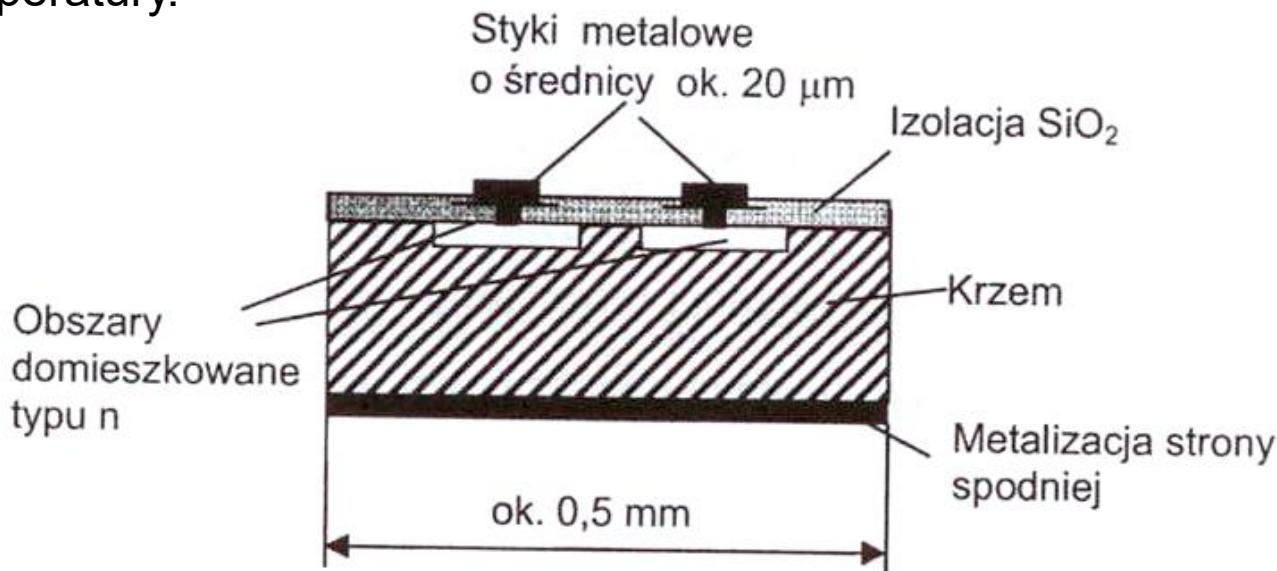
Rozrzut napięć przewodzenia i współczynników temperaturowych tranzystorów jest dość znaczny. Z tego względu pojedyncze tranzystory stosuje się obecnie do pomiarów temperatury tylko w przypadku niewielkich wymagań co do dokładności.

Czujniki pojemnościowe

Wykorzystują one zmiany przenikalności dielektryka umieszczonego między okładkami kondensatora. Wadą ich jest duża wrażliwość na zmianę wilgotności. Natomiast **zaletą – niewrażliwość na pole magnetyczne**. Stosowane w kriomagnesach.

Czujniki krzemowe

Działają na zasadzie zmiany promieniowo rozłożonej rezystancji kryształu krzemu, która zależy od temperatury.

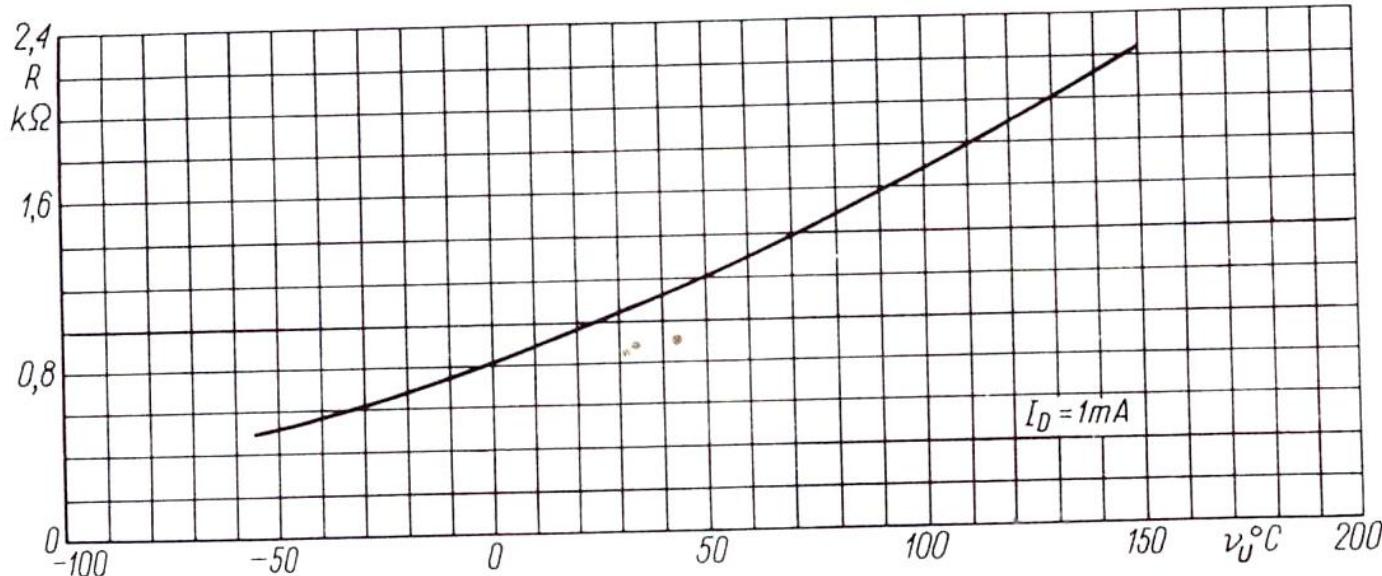


Działają podobnie jak termistory, mają dodatni współczynnik temperatury i charakterystykę o dość dobrej liniowości. Ich budowa jest oparta na półprzewodniku typu „n”.

- KTY 10 (Simens): zakres od -50 do +150, dokładność (2 %), **cena 2 zł 15 gr.**

Głównymi niekorzystnymi cechami są:

- zależność w niewielkim stopniu od prądu wymuszającego (najczęściej 0,1 mA i nie więcej niż 1 mA dla pracy do 150 °C),
- wymagana odpowiednia polaryzacja przy zasilaniu czujnika,
- przy przekroczeniu prądu znamionowego - samo nagrzewanie się czujnika.



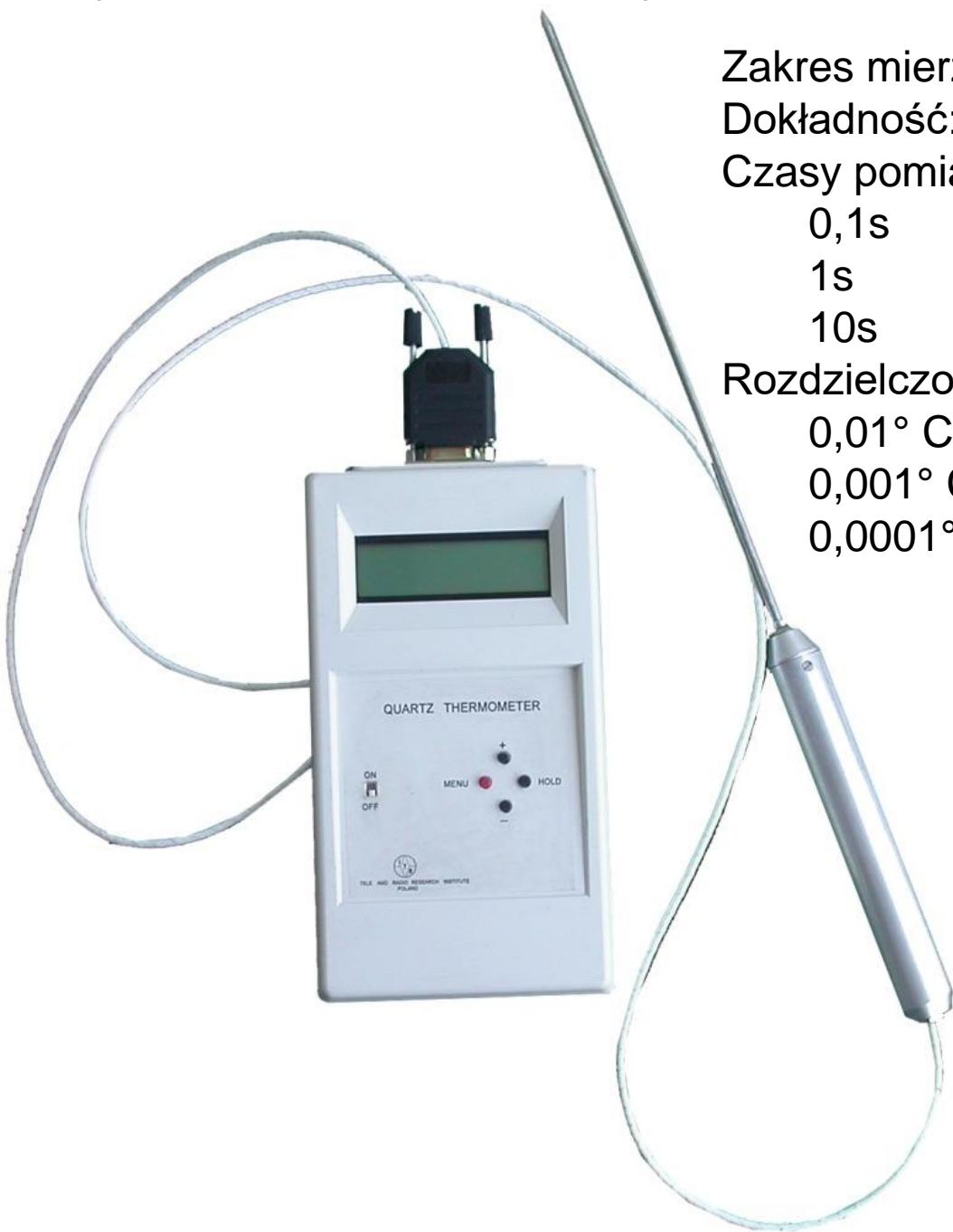
Rys. 1.12. Typowa charakterystyka temperaturowa krzemowego elementu czujnikowego

Czujniki kwarcowe

Wykorzystują zmiany częstotliwości drgań swobodnych pod wpływem zmian temperatury piezoelektrycznych kryształów kwarcu. Czułość temperatury znaczająco spada ze spadkiem temperatury.

Standardowy kwarcowy czujnik ma duże rozmiary i ulega histerezie.

Wytwarza się też czujniki kwarcowe metodą fotolitografii i wytrawiania anizotropowego. Uzyskuje się w ten sposób czujniki o małych rozmiarach o dokładności większej niż **0,5 K w zakresie od 4,2 K do 500 K i rozdzielczości 0,01 K.**



Zakres mierzonych temperatur: - 60° C ÷ +200 °C

Dokładność: 0,01° C

Czasy pomiaru:

0,1s

1s

10s

Rozdzielcość:

0,01° C (0,1s)

0,001° C (1s)

0,0001° C (10s)

WŁASNOŚCI DYNAMICZNE CZUJNIKÓW TERMOMETRYCZNYCH

Błędy dynamiczne pomiarów, są powodowane głównie bezwładnością czujników termometrycznych. Większość czujników może być w sposób uproszczony rozważana jako jednorodny walec, który można traktować jako człon inercyjny 1-rzędu o stałej czasowej

$$N_T = m c / F \alpha$$

gdzie:

N_T – czas po którym temperatura osiągnie wartość ϑ_m/e ,

m – masa czujnika (łącznie z osłoną), c - ciepło właściwe,

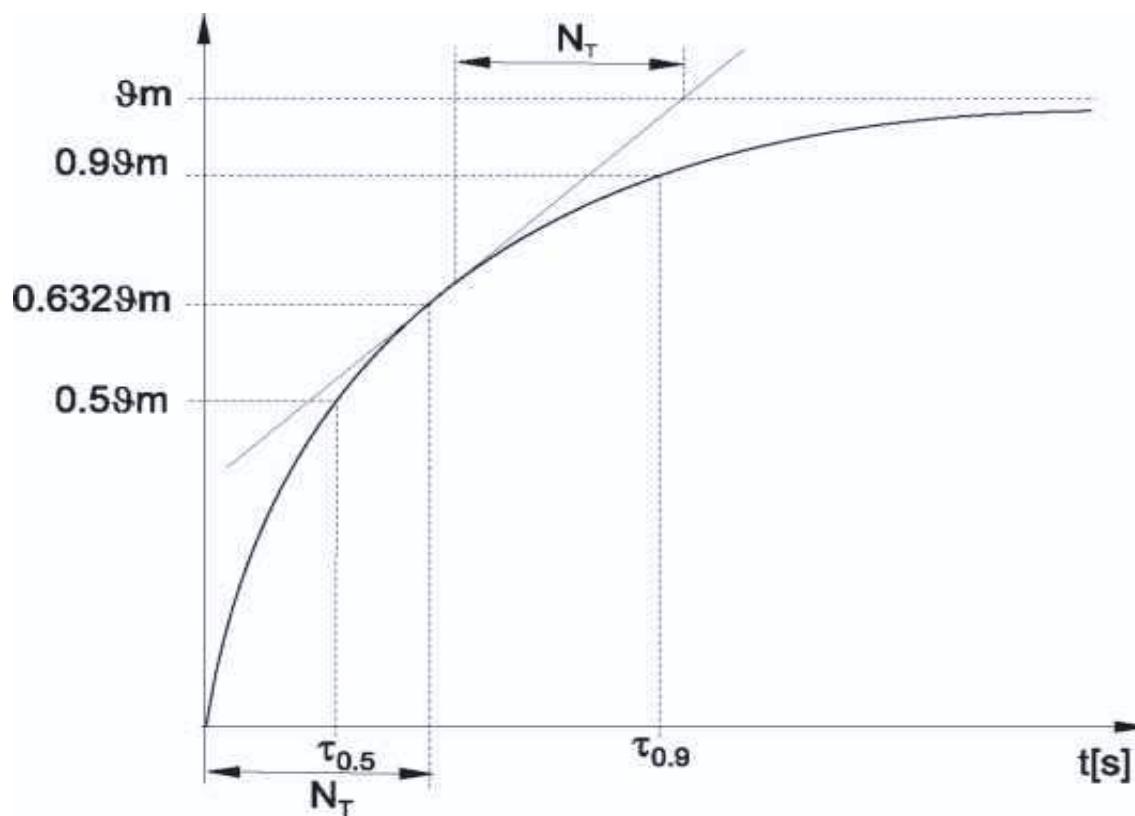
F - powierzchnia wymiany ciepła ze środowiskiem otaczającym, α - współczynnik wymiany ciepła.

Względny dynamiczny błąd
pomiaru

$$\Delta\vartheta = \vartheta_m - \vartheta_m(1 - e^{-t/N_T}) =$$

$$= -\exp(-t/N_T)$$

zależy od czasu przebywania
czujnika w badanym ośrodku.



CZUJNIKI I PRZETWORNIKI

Wykład 3

**Czujniki temperatury termoelektryczne i inne
Pirometry i kamery termowizyjne**

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

Wzdłuż przewodnika, na którego długości występuje gradient temperatury powstaje siła termoelektryczna Thomsona

$$E_T = \int_{t_1}^{t_2} \sigma dt = \sigma(t_2 - t_1)$$

gdzie σ jest współczynnikiem Thomsona dla danego materiału.

W temperaturze 0 °C σ wynosi dla:

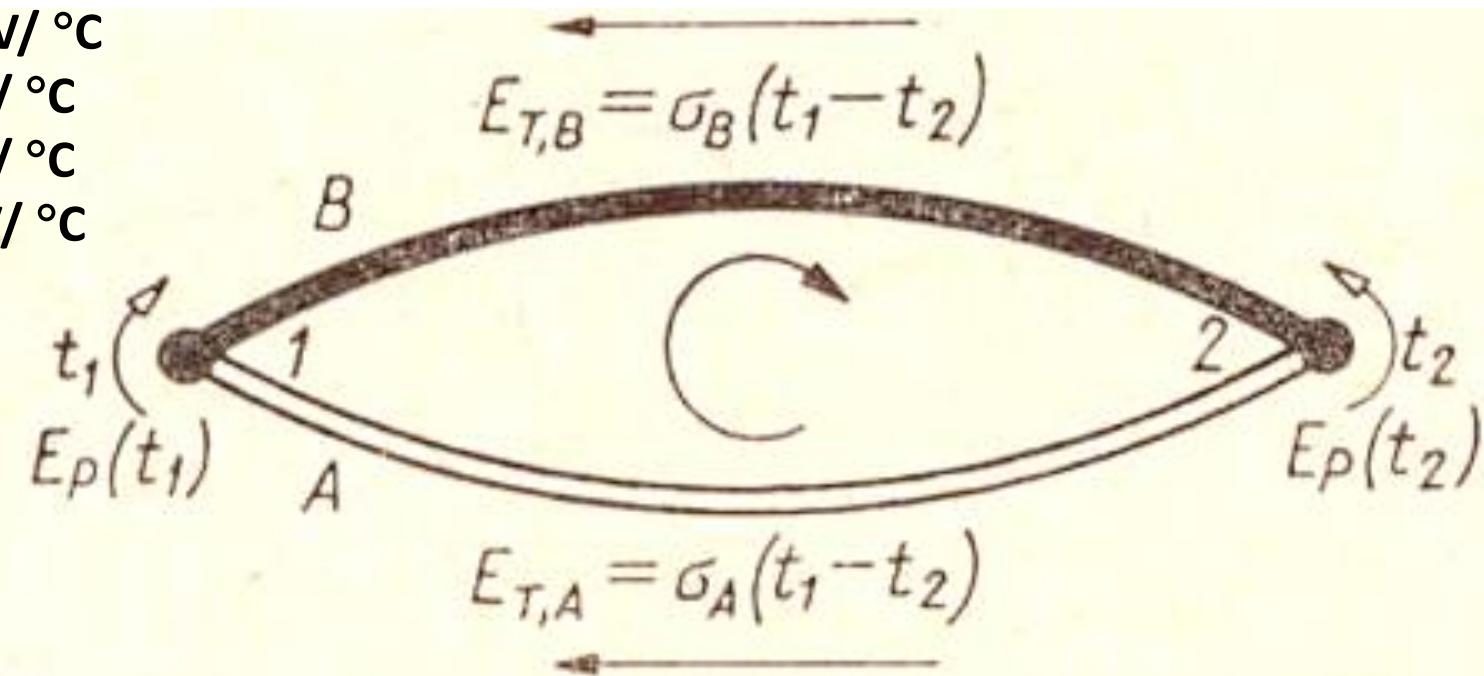
konst. -23 μV/ °C

PtRh -10 μV/ °C

Pt -9 μV/ °C

Fe -8 μV/ °C

Cu +2 μV/ °C

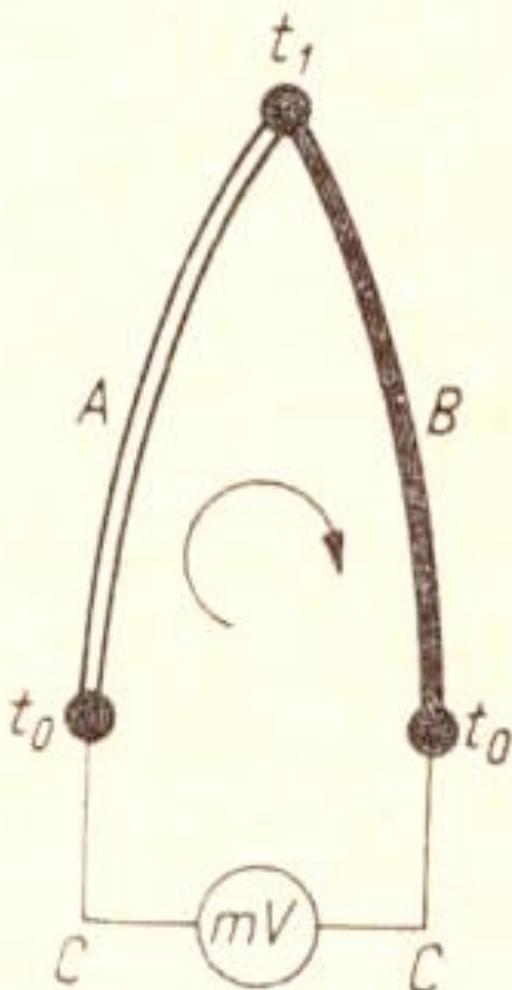


$E_{T,A}$, $E_{T,B}$ - siły termoelektryczne Thomsona

$E_p(t_1)$, $E_p(t_2)$ – siły termoelektryczne Peltiera,

Zakładając $t_2 = t_0 = \text{const}$ $E_{AB}(t_1, t_0) = E_{AB}(t_1) - E_{AB}(t_0) = f(t_1)$

Włączenie trzeciego metalu



$$E = E_{AB}(t_1) + E_{BC}(t_0) + E_{CA}(t_0)$$

Zakładając $t_1 = t_0$

$$0 = E_{AB}(t_0) + E_{BC}(t_0) + E_{CA}(t_0)$$

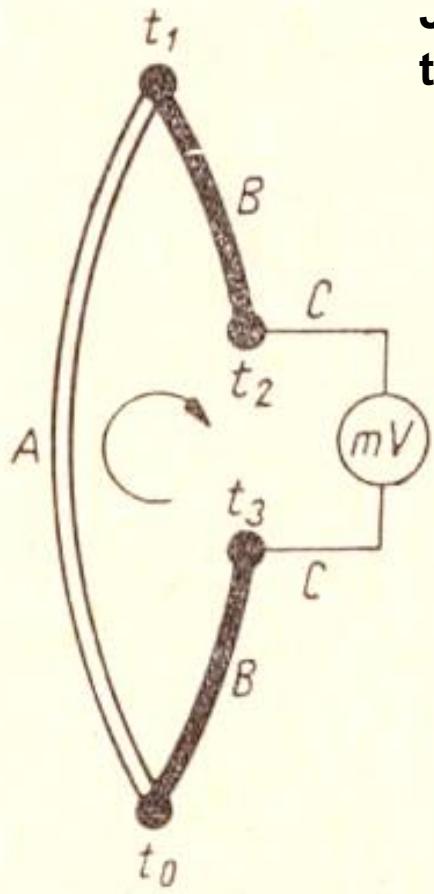
Stąd

$$-E_{AB}(t_0) = E_{BC}(t_0) + E_{CA}(t_0)$$

Zatem

$$E = E_{AB}(t_1) - E_{AB}(t_0)$$

Włączenie trzeciego metalu nie wpływa na wartość wypadkowej siły elektromotorycznej.



Jeżeli $t_3 = t_2$

to

$$E = E_{AB}(t_1) + E_{BC}(t_2) + E_{CB}(t_2) + E_{BA}(t_0)$$

Ponieważ $E_{BC}(t_2) = -E_{CB}(t_2)$

to $E = E_{AB}(t_1) - E_{AB}(t_0)$

Miejsce włączenia trzeciego metalu jest dowolne

Typy termopar

Termoelementy można podzielić na trzy grupy:

Grupa I: zakres od -200 °C do +1200°C, wykonane z materiałów nieszlachetnych

Typ "K" NiCr-Ni	Stosowany w zakresie temperatur od -200 do +1200°C. Zależność SEM od temperatury dla tego termoelementu jest prawie liniowa, a jego czułość wynosi $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.
Typ "J" oraz "L,, Fe-CuNi	Ma on mniejsze znaczenie w przemyśle ze względu na ograniczony zakres mierzonych temperatur (od -40°C do +750°C). Ich czułość wynosi $55\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.
Typ "E" NiCr-CuNi	Ze względu na wysoką czułość ($68\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), stosowany jest przede wszystkim w zakresie niskich temperatur kriogenicznych od -200 °C ora do +900 °C. Jest to materiał niemagnetyczny, co może być cenną zaletą w niektórych zastosowaniach specjalnych.
Typ "N" NiCrSi-NiSi	Ma on bardzo dobrą stabilność termiczną, porównywalną z termoparami platynowymi. Wykazuje także znakomitą odporność na utlenianie aż do wysokich temperatur. Jest idealnym narzędziem do dokładnych pomiarów temperatury w powietrzu do +1200 °C. Czułość wynosi $39\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.
Typ "T" Cu-CuNi	Jest to najrzadziej używany typ termoelementu. Jego zakres pomiarowy wynosi od -200°C do +350°C a czułość $30\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

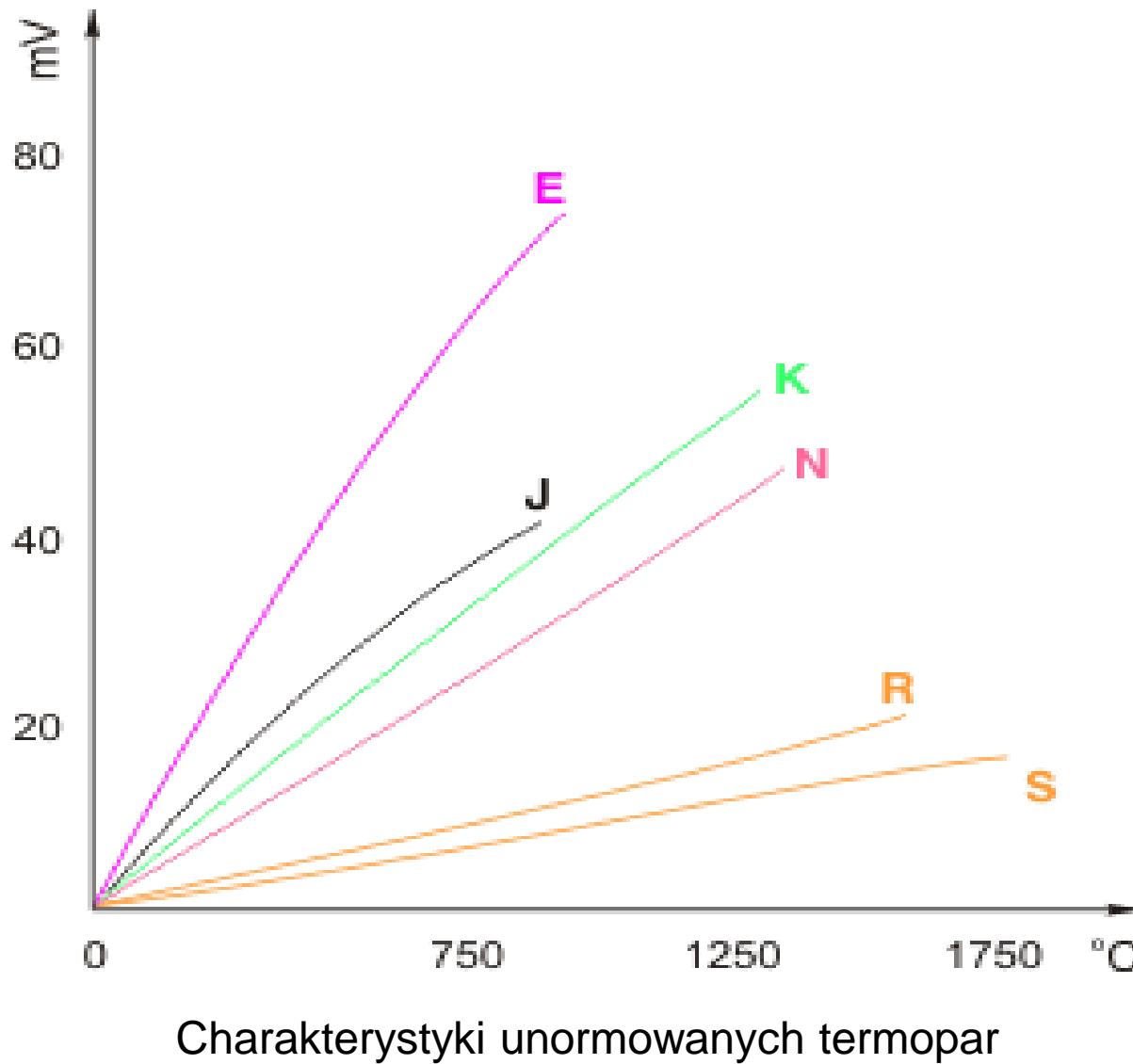
Grupa II: zakres 0 .. +1800°C, wykonane z materiałów platynowo-rodowych

Typ "S"	Są one używane zazwyczaj w atmosferze silnie utleniającej w zakresie
PtRh10-Pt	wysokich temperatur do +1600°C. Czułość około 10 µV/°C.
Typ "R"	Podobnie jak termoelement „S” używane w atmosferze silnie utleniającej
PtRh13-Pt	ale posiadają większą czułość - około 14 µV/°C.
Typ "B"	Umożliwiają pomiar temperatury do +1800 °C. Bardzo stabilny
PtRh30-	termoelement, ale mało czuły zwłaszcza w zakresie niższych temperatur.
PtRh6	

Grupa III: zakres od 0°C do +2200°C (wolframowo-renowe).

Typ "C"	Są używane do pomiaru bardzo wysokich temperatur do +2300°C, w
Wolfram-Ren	atmosferze redukującej, obojętnej lub w próżni.
/	
5% Wolfram	
Typ "D"	Są używane do pomiaru bardzo wysokich temperatur do +2300°C, w
Wolfram-Ren	atmosferze redukującej, obojętnej lub w próżni.
/	
25% Wolfram	

Charakterystyki termoelementów są podane w normie PN-EN 60584.



Klasy dokładności termopar według normy PN-EN 60584

Typ J (Fe-CuNi)

Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
1	-40 °C .. +375 °C	± 1.5 °C
	+375 °C .. +750 °C	± 0.0040 x t
2	-40 °C .. +333 °C	± 2.5 °C
	+333 °C .. +750 °C	± 0.0075 x t

Typ K (NiCr-Ni), Typ N (NiCrSi-NiSi)

Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
1	-40 °C .. +375 °C	± 1.5 °C
	+375 °C .. +1000 °C	± 0.0040 x t
2	-40 °C .. +333 °C	± 2.5 °C
	+333 °C .. +1200 °C	± 0.0075 x t

Typ T (Cu-CuNi)

Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
1	-40 °C .. +125 °C	± 0.5 °C
	+125 °C .. +350 °C	± 0.0040 x t
2	-40 °C .. +133 °C	± 1.0 °C
	+133 °C .. +350 °C	± 0.0075 x t

Typ E (NiCr-CuNi)

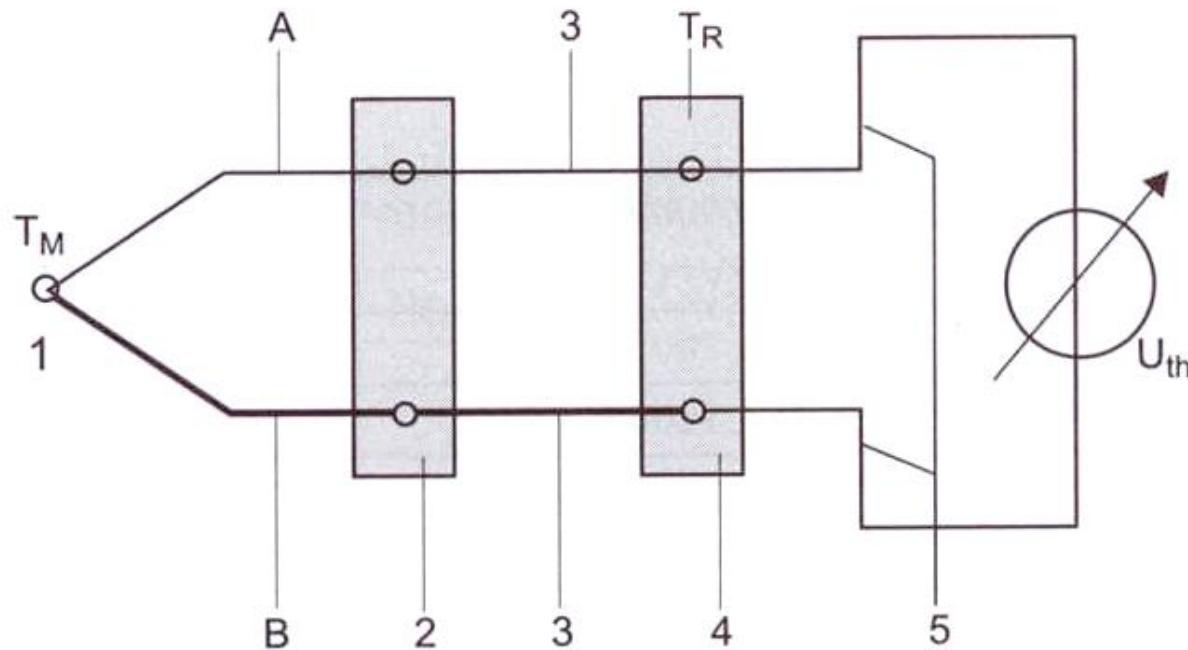
Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
1	-40 °C .. +375 °C	± 1.5 °C
	+375 °C .. +800 °C	± 0.0040 x t
2	-40 °C .. +333 °C	± 2.5 °C
	+333 °C .. +900 °C	± 0.0075 x t

Typ S (PtRh10-Pt), Typ R (PtRh13-Pt)

Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
1	0 °C .. +1100 °C	± 1.0 °C
	+1100 °C .. +1600 °C	± [1+0.003 (t-1100)]
2	0 °C .. +600 °C	± 1.5 °C
	+600 °C .. +1600 °C	± 0.0025 x t

Typ B (PtRh30-PtRh6)

Klasa	Zakres temperatury	Dopuszczalny błąd
2	+600 °C .. +1700 °C	± 0.0025 x t



Rys. 7-4. Układ pomiarowy termopary [11]

1 – miejsce pomiaru („gorące złącze”), 2 – przyłącza, 3 – przewody kompensacyjne, 4 – miejsce odbioru sygnału, 5 – przewody układu pomiarowego

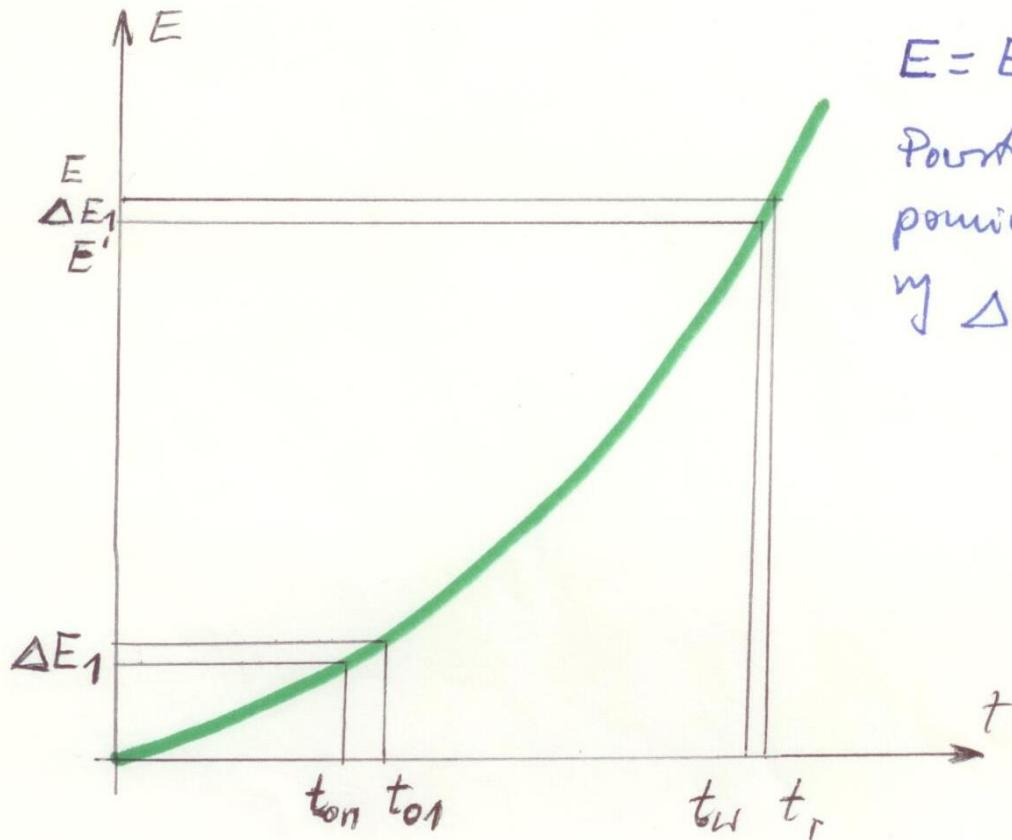
A i B – przewody termopary, U_{th} – napięcie termoelektryczne, T_M – temperatura mierzona,

T_R – temperatura odniesienia

Przewody kompensacyjne (3) powinny mieć charakterystykę termoelektryczną identyczną z charakterystyką termoelementu. Wówczas w miejscu połączenia z termoelementem nie powstają siły termoelektryczne.

Wykonuje się je z drutów o przekroju $1,5 \text{ mm}^2$ lub linki o przekroju $0,8 \text{ mm}^2$ i $1,5 \text{ mm}^2$. Przewody są izolowane włóknem szklanym, kauczukiem silikonowym, PCV, lub gumą.

Temperatura odniesienia



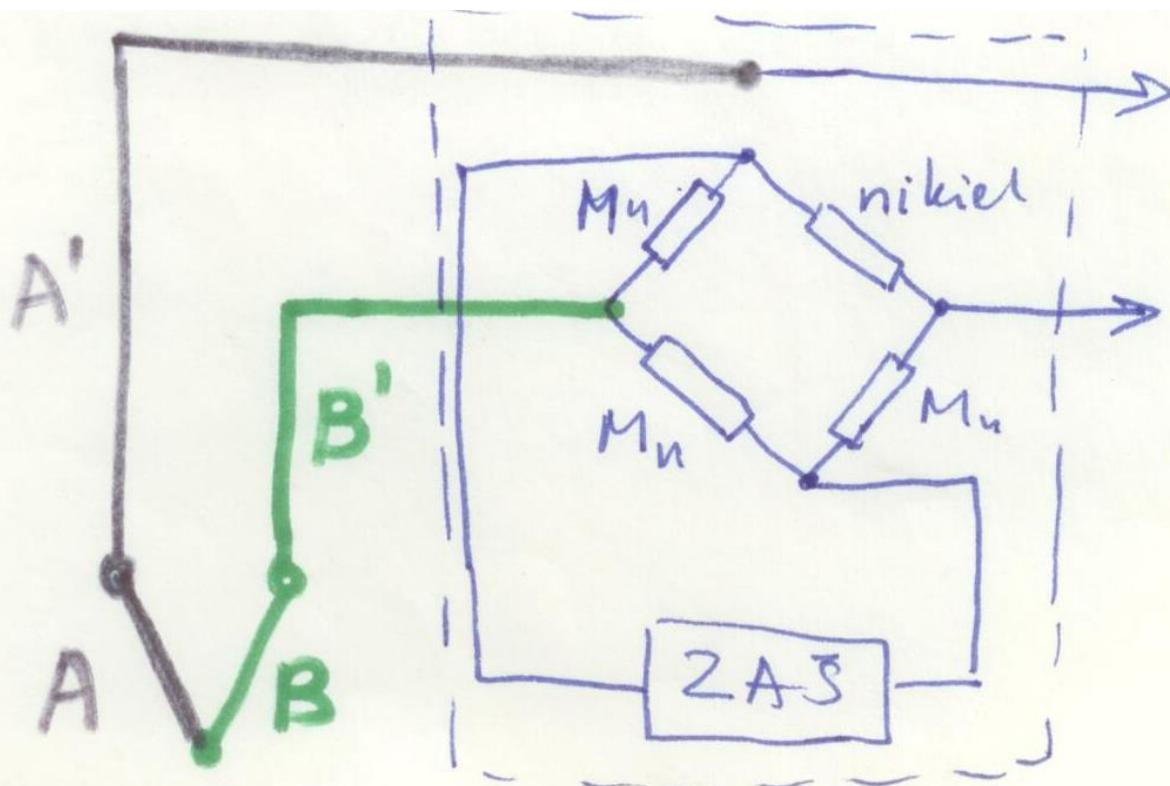
$$E = E' + \Delta E_1$$

Powstaje skok
powinem temperatu-
ry $\Delta t = t_r - t_w$

Punkt potrójny wody 0 °C – przewody umieszczone w próbówce napełnionej olejem umieszczonej w mieszaninie lodu i destylowanej wody.
Niedokładność stabilizacji - $\pm 0,1$ °C.

Zastosowanie termostatu o temperaturze 0 °C z elementami chłodzącymi najczęściej opartymi na elementach (płytkach) Peltiera ($\pm 0,1$ °C), lub innej, np. 50 °C, z elementami grzejnymi (± 1 °C).

Zastosowanie mostka kompensacyjnego

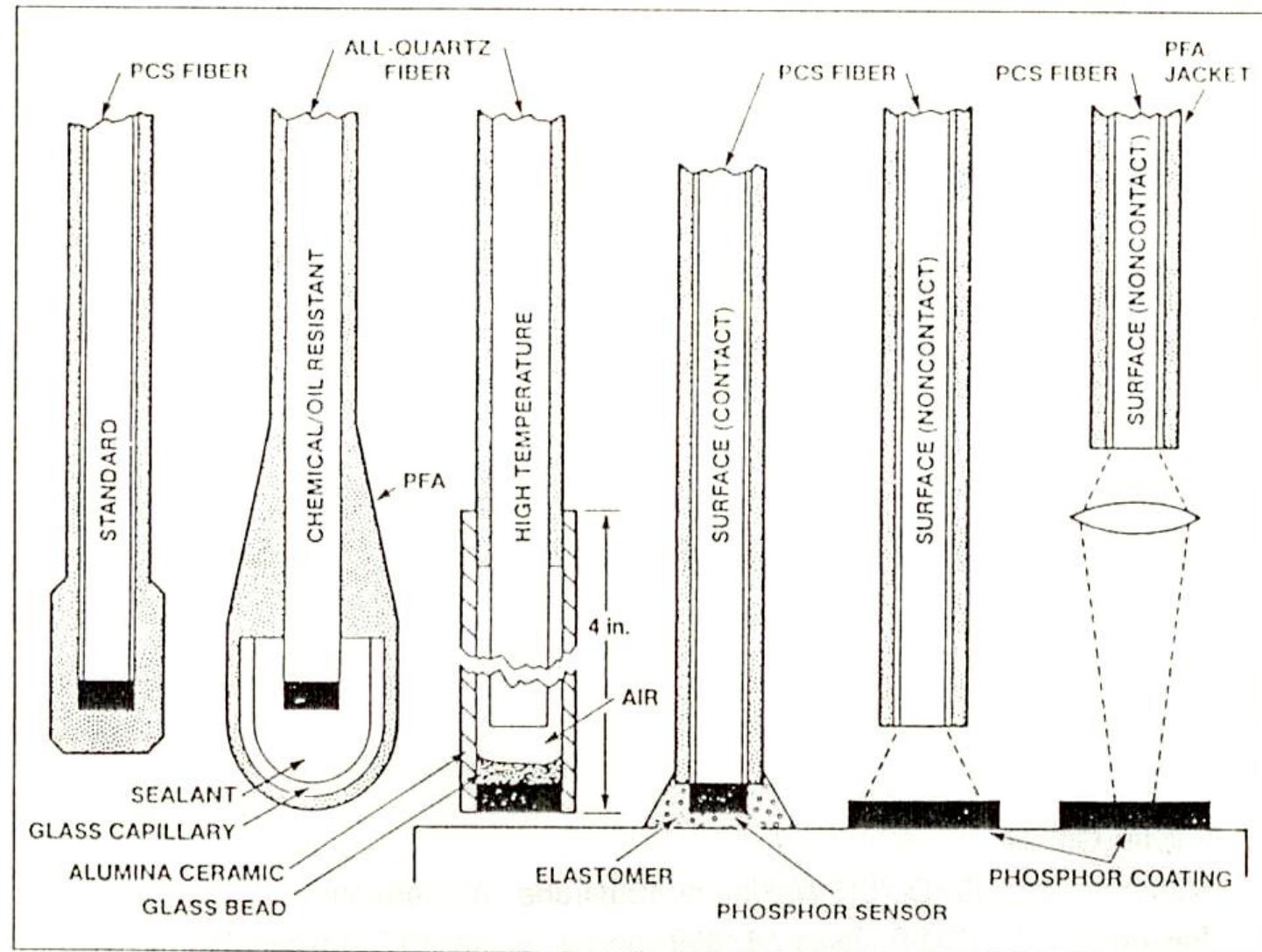


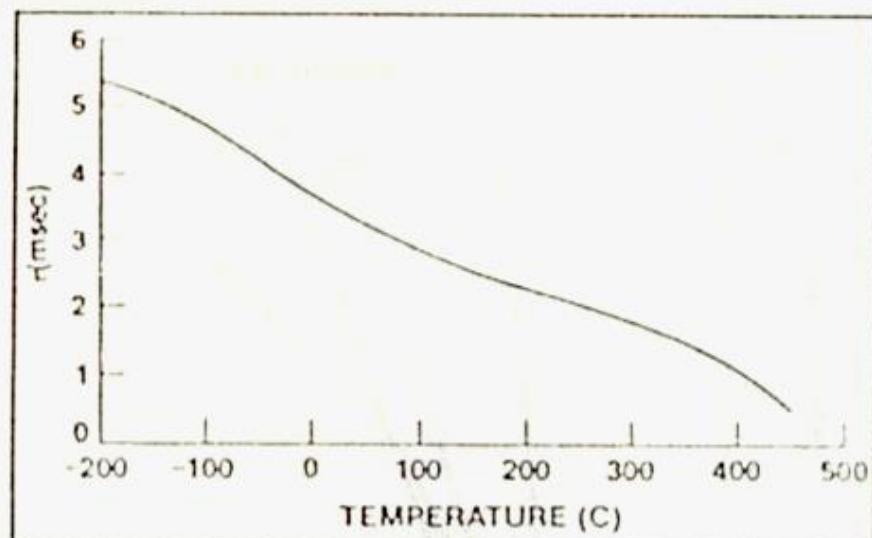
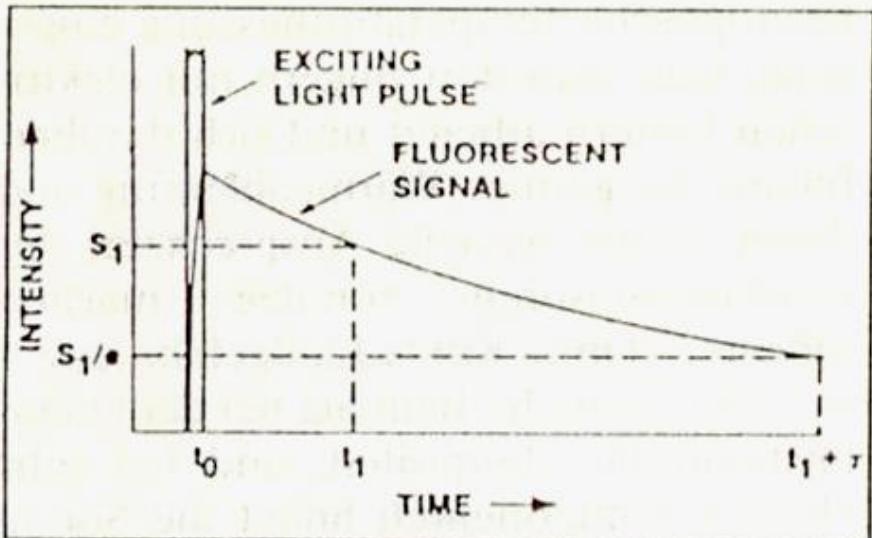
Mostek
z kompensacją
w temp. 20°C

Dokładność $\pm 0,5\%$
 $\pm 1^{\circ}\text{C}$

Czujniki światłowodowe fluoresencyjne

Koniec światłowodu pokryty jest materiałem fluoresencyjnym (fluoryzującym fosforem). Emisja świetlna fosforu wzbudzana jest impulsowo przez promień światła widzialnego lub ultrafioletowego





Zakres pomiarowy: $-200 \text{ }^{\circ}\text{C} \div +450 \text{ }^{\circ}\text{C}$,

Niedokładność: bez cechowania $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
po wycechowaniu $\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Rozdzielcość: $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ na polu odczytowym,
 $0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$ poprzez interfejs.

Zalety:

- Na brak wpływu postronnych pól elektromagnetycznych.
- Czujnik o małej średnicy i małej przewodności cieplnej.
- Iskrobezpieczny przy wysokim napięciu.
- Elektrycznie odizolowany od obiektu pomiarowego.
- nieczuły na zewnętrzne światło.

Inne czujniki kontaktowe temperatury

- ultradźwiękowe
- szumowe

Pirometry (bezkontaktowe pomiary temperatury)

Każde ciało o temperaturze T wysyła do otoczenia promieniowanie elektromagnetyczne lub pochłania je z otoczenia, w zależności od temperatury otoczenia.

Stosunek strumienia cieplnego (mocy promieniowania) $d\Phi$ wysyłanego przez element powierzchni do pola tej powierzchni dF jest **natężeniem promieniowania**, czyli:

$$M = \frac{d\Phi}{dF} \quad [\text{W/m}^2]$$

Zakres długości fali promieniowania cieplnego zawiera się w granicach $0,4 \div 20 \mu\text{m}$, a więc leży w granicach promieniowania widzialnego i podczerwonego.

Monochromatyczne natężenie promieniowania

$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})]$$

Monochromatyczne natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego wg prawa Plancka:

$$M_{0\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

$$C_1 = 3,7415 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$$

$$C_2 = 14388 \text{ } \mu\text{mK}$$

Współczynnik emisyjności

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0}$$

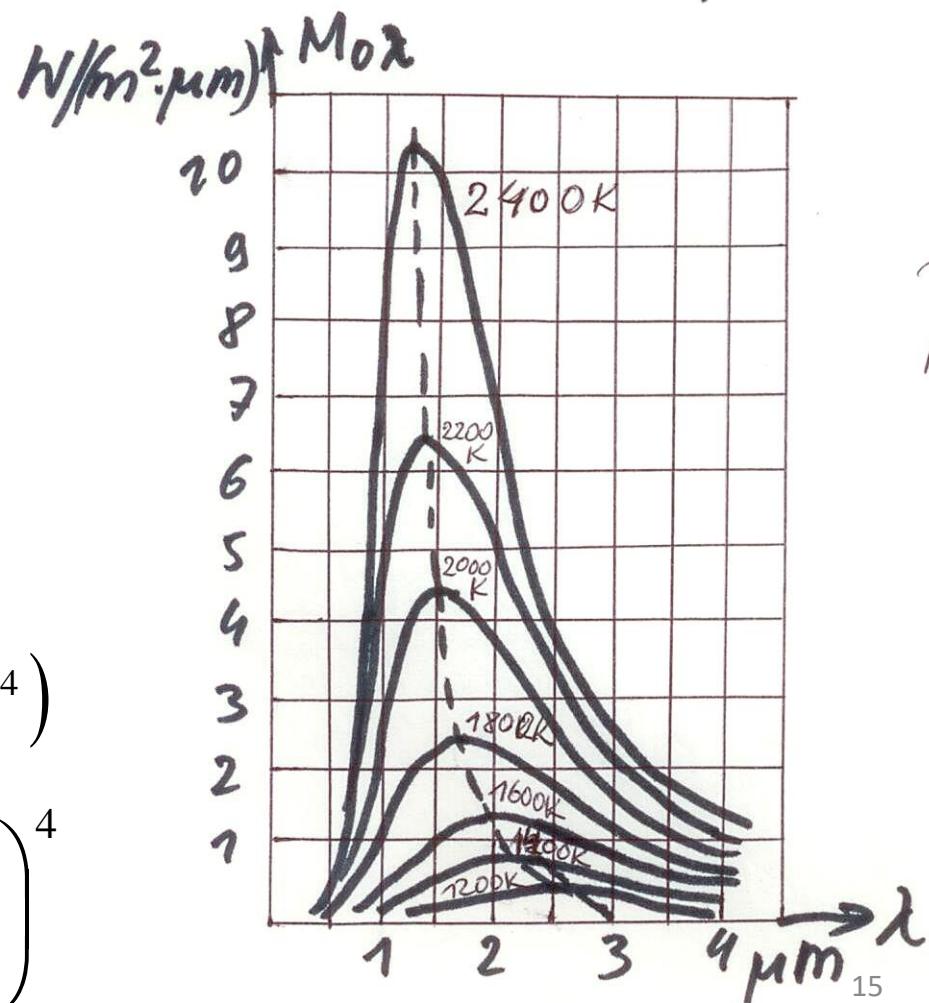
Według prawa Boltcmana

$$M_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

$$c_0 = 5,6697 \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$$

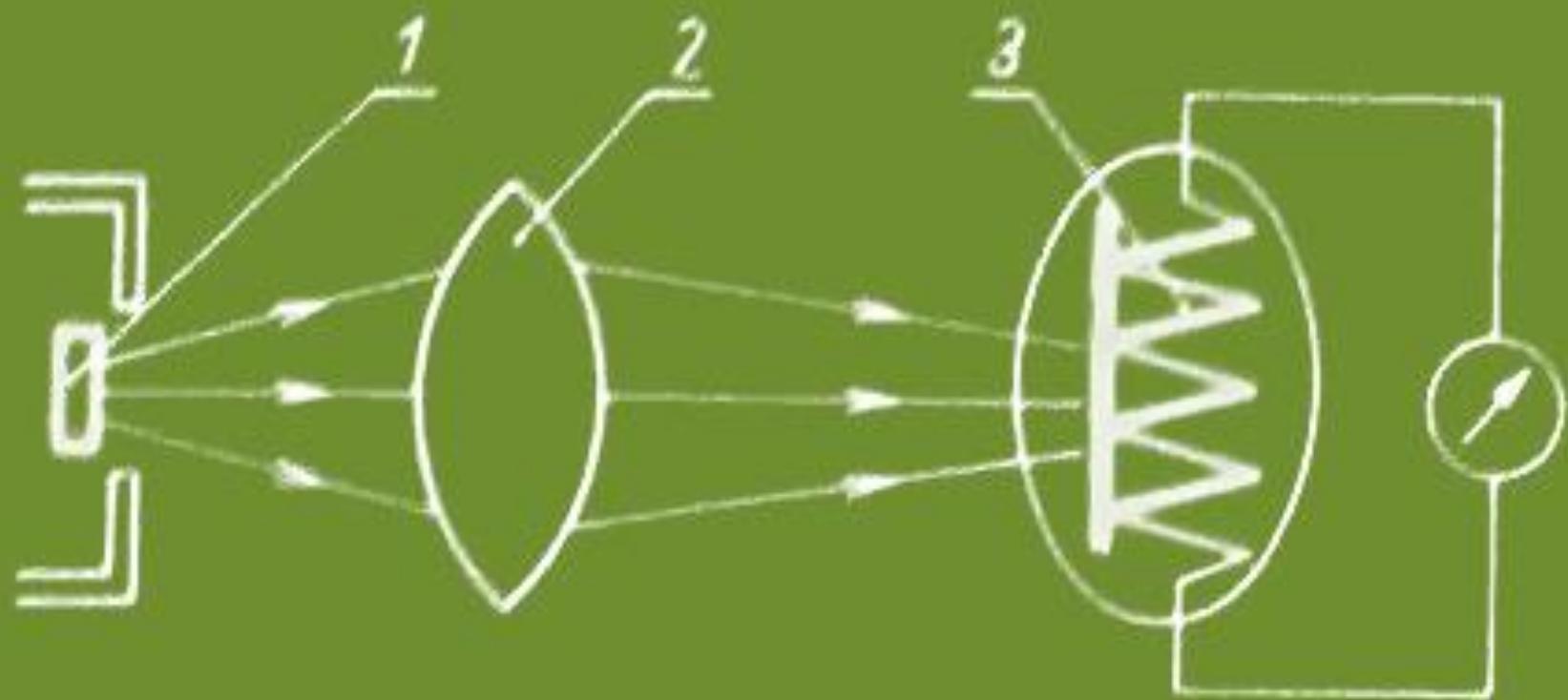
Dla ciała szarego

$$M = c_0 \varepsilon \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

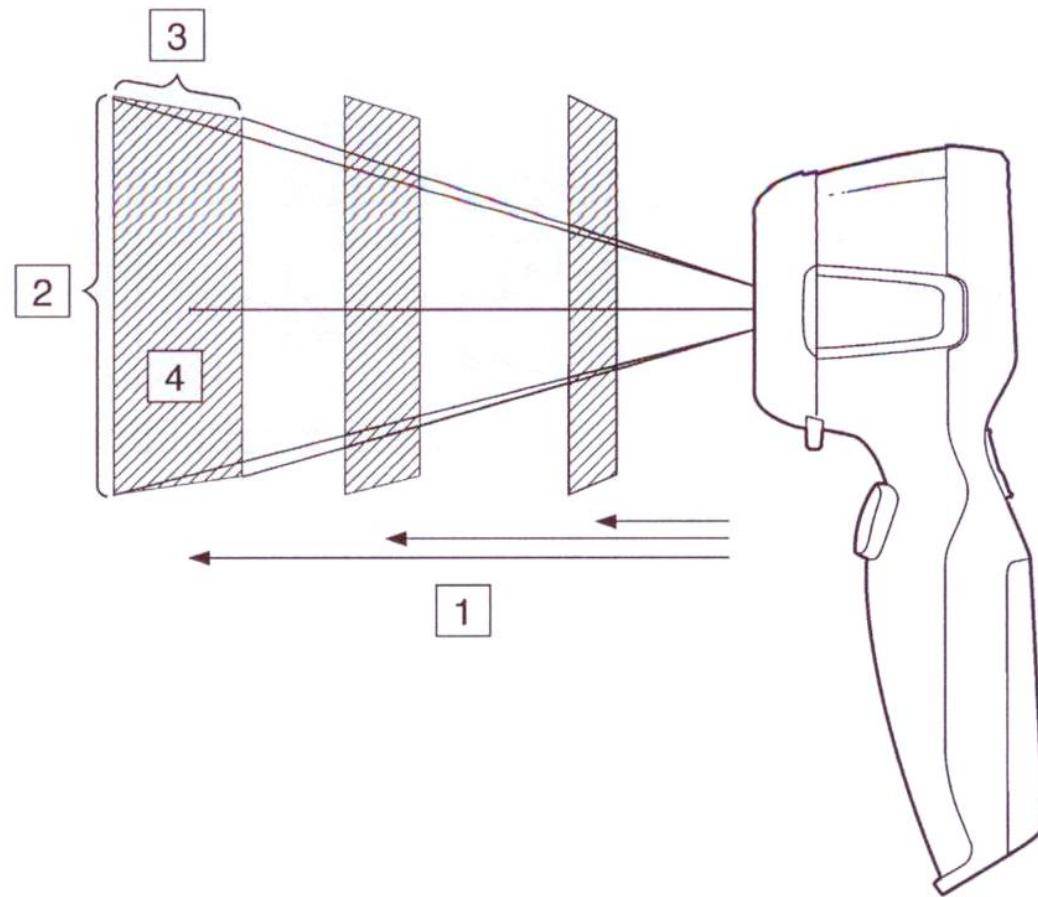


Rysunek 22.1 T: widmo całkowite; SW: 2–5 µm; LW: 8–14 µm, LLW: 6,5–20 µm; 1: Materiał; 2: Opis; 3: Temp. (°C); 4: Widmo; 5: Emisyjność; 6: Bibliografia

1	2	3	4	5	6
3M typ 35	Winylowa taśma izolacyjna (kilka kolorów)	< 80	LW	ok. 0,96	13
3M typ 88	Czarna, winylowa taśma izolacyjna	< 105	LW	ok. 0,96	13
3M typ 88	Czarna, winylowa taśma izolacyjna	< 105	MW	< 0,96	13
3M typ Super 33+	Czarna, winylowa taśma izolacyjna	< 80	LW	ok. 0,96	13
Aluminium	anodyzowane, czarne, matowe	70	LW	0,95	9
Aluminium	anodyzowane, czarne, matowe	70	SW	0,67	9
Aluminium	anodyzowane, jasnoszare, matowe	70	LW	0,97	9
Aluminium	anodyzowane, jasnoszare, matowe	70	SW	0,61	9
Aluminium	blacha, 4 różnie zarysowane próbki	70	LW	0,03–0,06	9
Aluminium	blacha, 4 różnie zarysowane próbki	70	SW	0,05–0,08	9
Aluminium	blacha anodyzowana	100	T	0,55	2
Aluminium	blacha nieobrobiona	100	T	0,09	2



Schemat ideowy radiacyjnego pirometru termoelektrycznego
1 – obiekt badany, 2 – układ optyczny, 3 – termostos



CZUJNIKI I PRZETWORNIKI

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

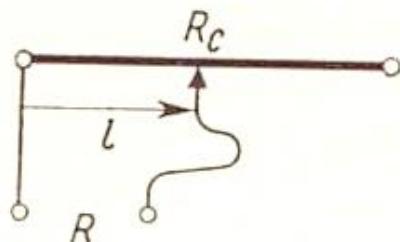
Wykład 4 – 5

CZUJNIKI WIELKOŚCI MECHANICZNYCH.
Czujniki przemieszczenia oraz prędkości obrotowej.
Czujniki tensometryczne.

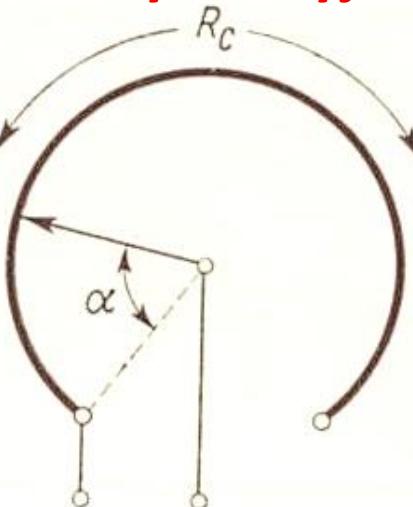
CZUJNIKI PRZEMIESZCZENIA

Czujniki rezystancyjne stykowe

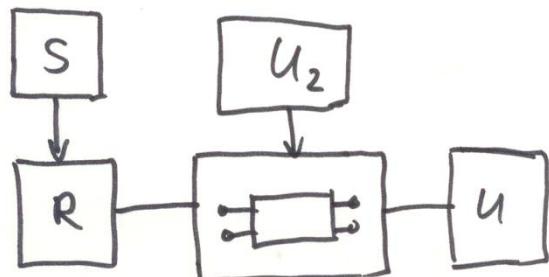
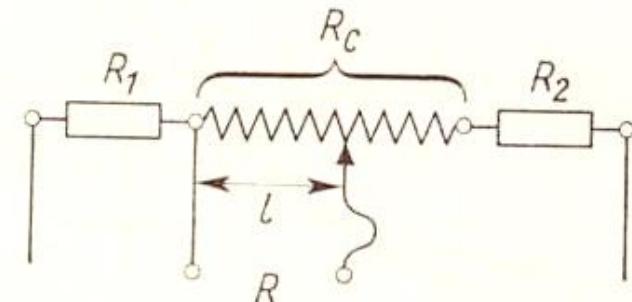
a)



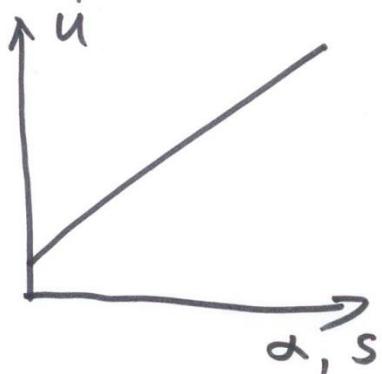
b)



c)



Schemat przetwarzania



Wielkość wejściowa: droga s lub kąt α

Wielkość wyjściowa: zmiana rezystancji ΔR ,

a właściwie napięcie: $U = k \cdot s$

Zakres wielkości wejściowej: $s = (0,01 - 1) \text{ m}$

$\alpha = (0,01 - 10) \text{ obr.}$

Niedokładność: $(0,5 - 2) \%$

Rezystancja wyjściowa: $100 \Omega - 1 \text{ k} \Omega$

Napięcie wyjściowe: $(0,1 - 10) \text{ V}$

Częstotliwość graniczna: $\sim 5 \text{ Hz}$

Czujniki indukcyjne

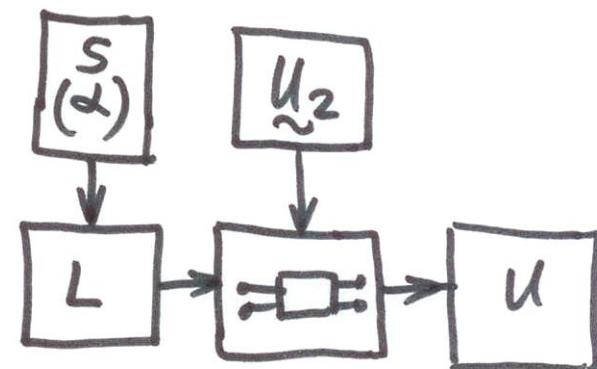
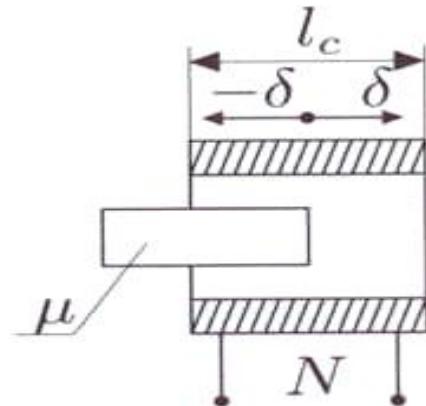
Bezpośrednią wielkością wejściową jest przemieszczenie (położenie, kąt), które wpływa na zmianę:

- indukcyjności własnej (przetworniki indukcyjnościowe),
- indukcyjności wzajemnej (przetworniki transformatorowe).

Z indukcyjnością własną pojedynczą

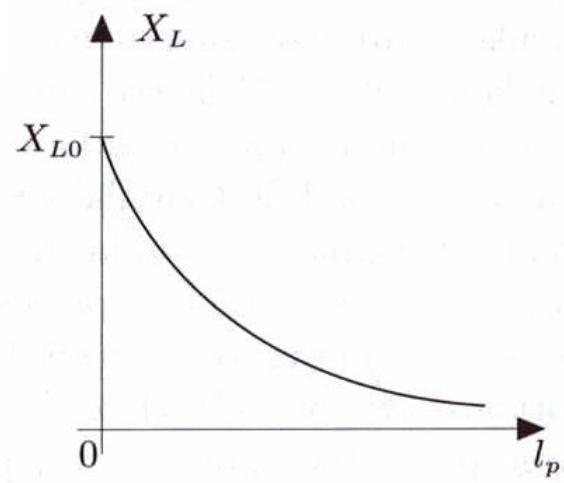
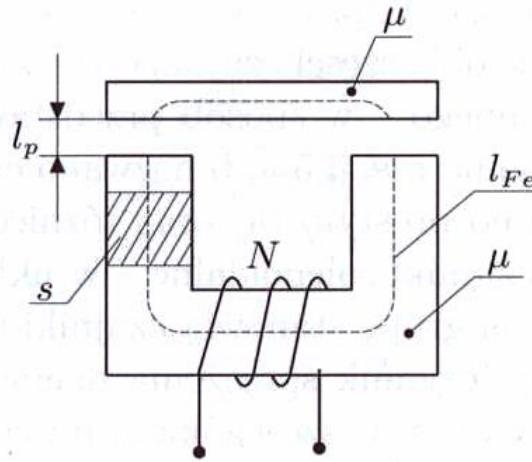
$$Z = R + j\omega L$$

Nurnikowe



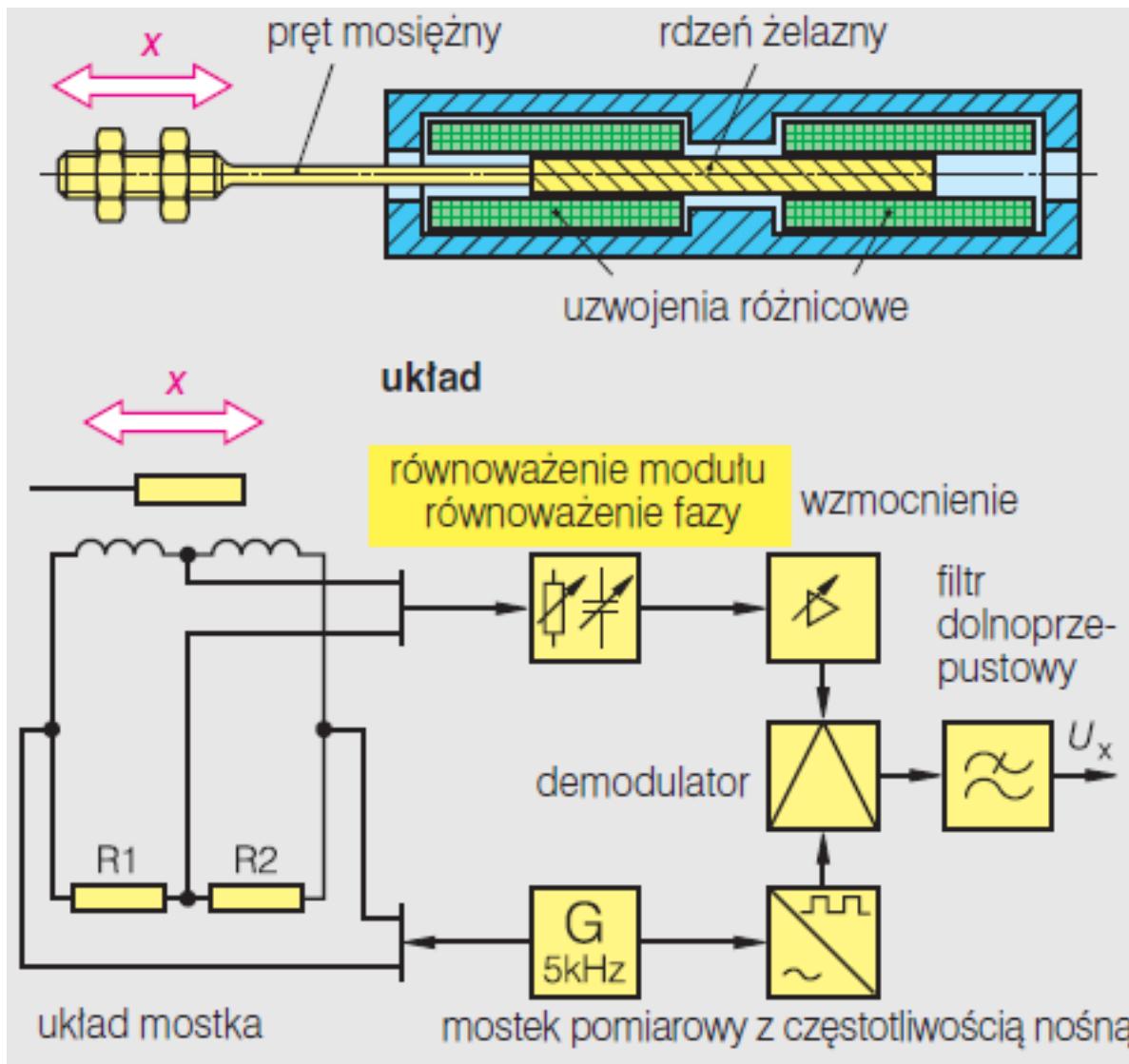
Ze zworą magnetyczną

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

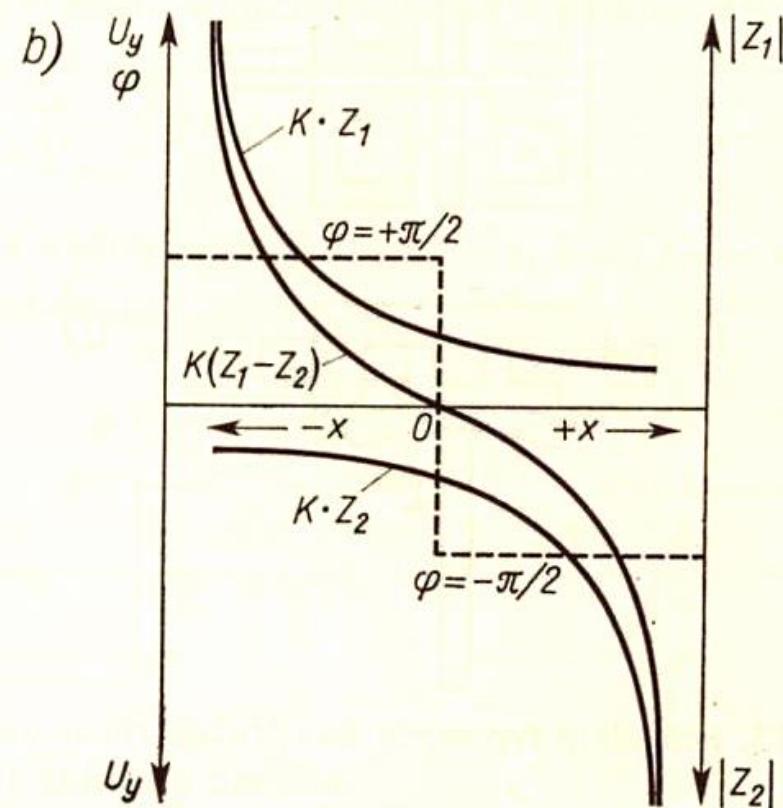
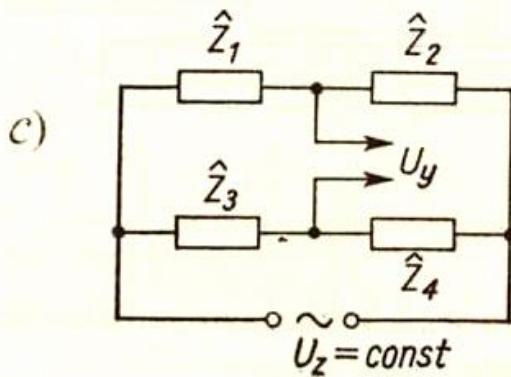
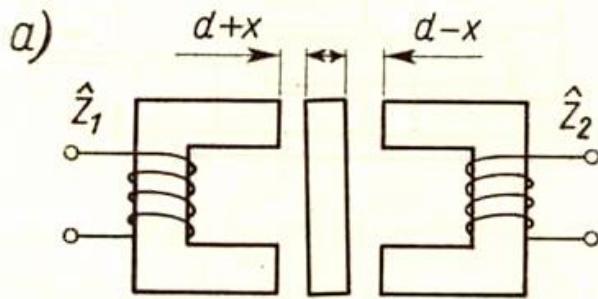


Z indukcyjnością własną podwójną (różnicowe)

Nurnikowe



Ze zworą



$$L = \frac{n^2}{Z_\mu + \frac{2d}{\mu_0 A}}$$

n – liczba zwojów

Z_μ - impedancja magnetyczna rdzenia ferromagnetycznego
 d, A - długość i pole szczeły powietrznej

Przy założeniu $R \ll \omega L$

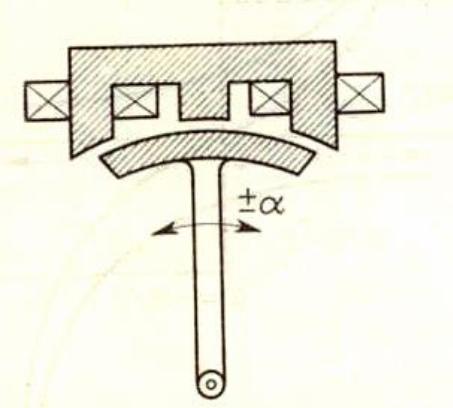
$$Z_\mu \ll \frac{2d}{\mu_0 A}$$

Impedancja cewki

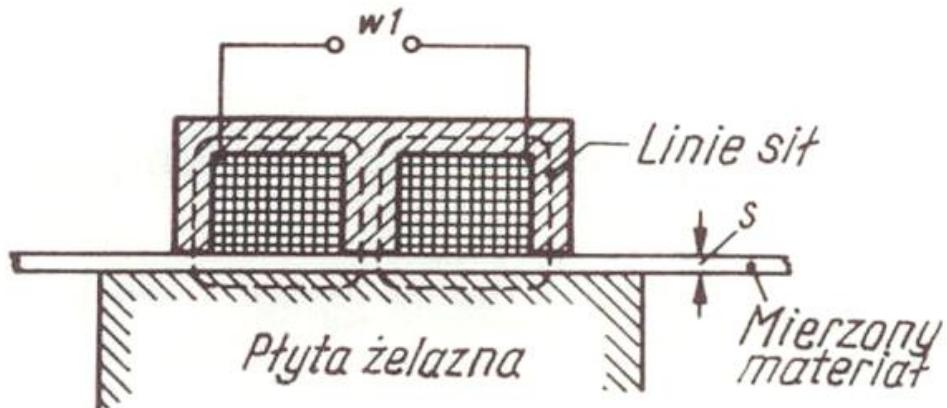
$$|Z| \approx \frac{k}{d} = \omega L$$

Sygnal wyjściowy mostka $U_y = k(|Z_1| - |Z_2|)$

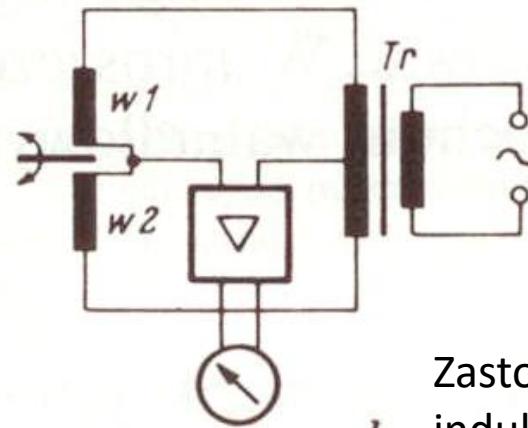
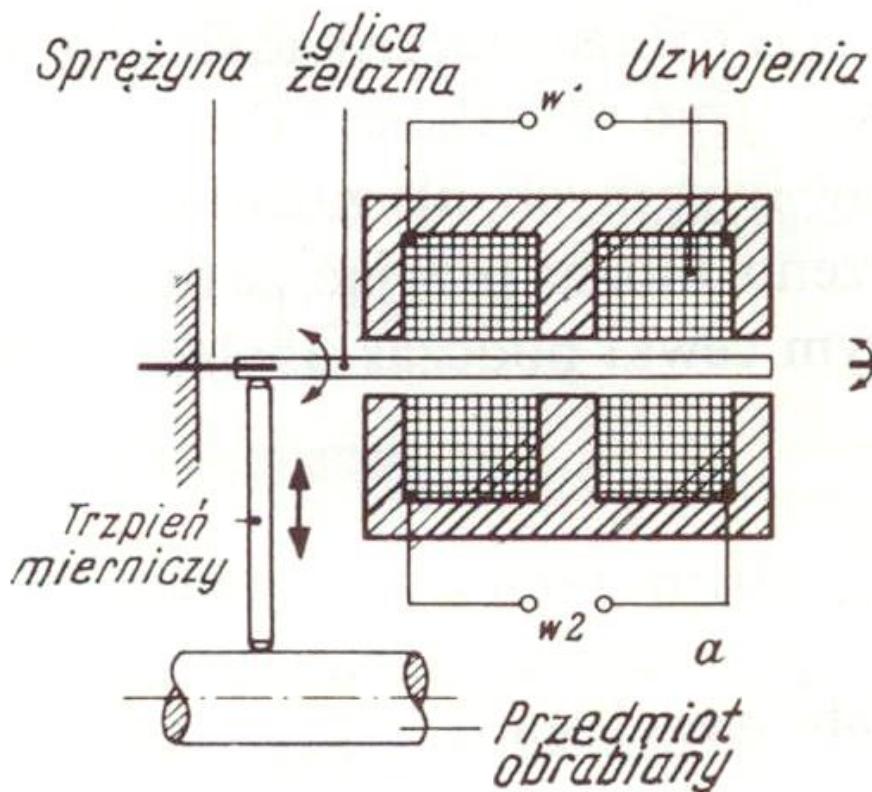
Zakres pomiarowy przetworników różnicowych: ze zworą <1 mm.
 z rdzeniem nurnikowym <1 m.



Czujnik do pomiaru kąta

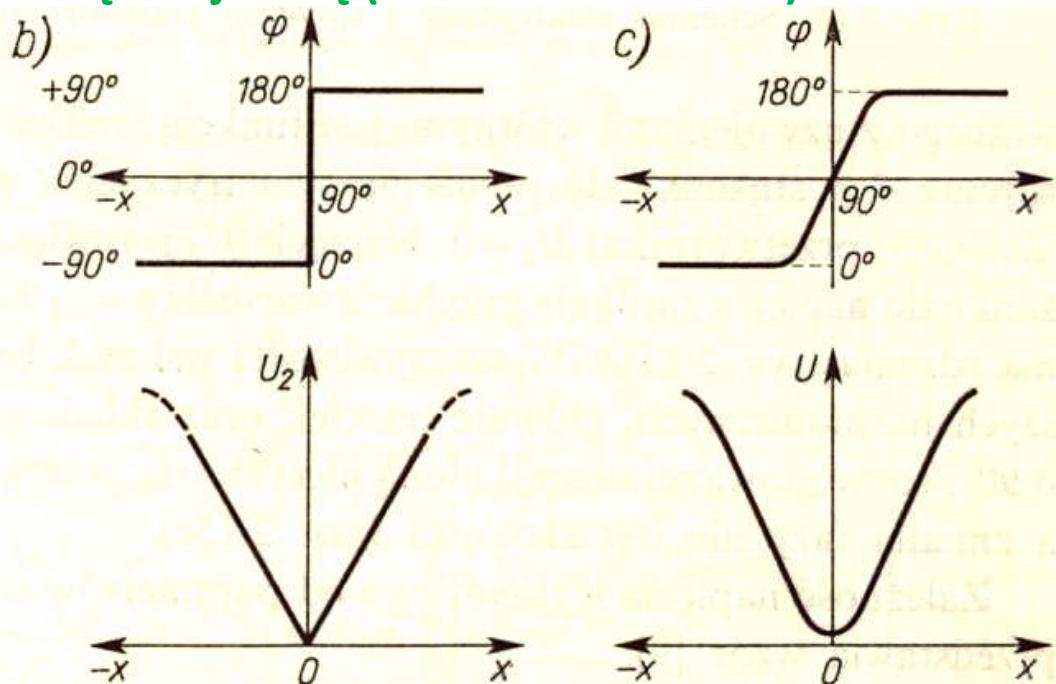
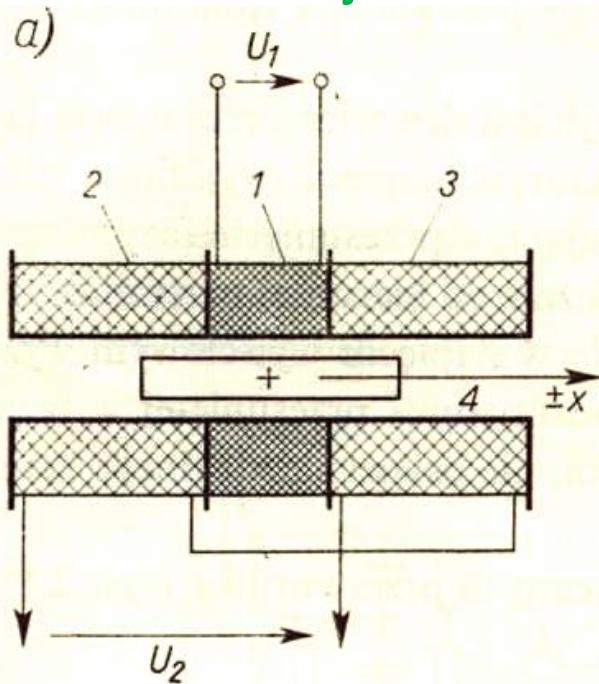


Czujnik do pomiaru grubości warstwy



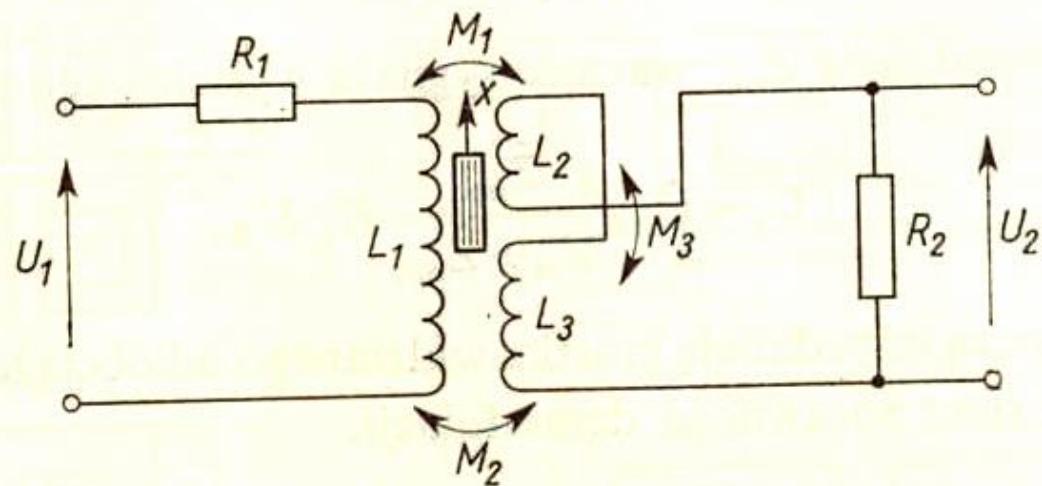
b
Zastosowanie czujnika indukcyjnego do pomiarów średnicy obrabianego przedmiotu

Czujniki z indukcyjnością wzajemną (transformatorowe)



Rys. 2.15. Przetwornik transformatorowy różnicowy

a) schemat budowy; b) idealne zależności; $U_2 = f(x)$; $\varphi = f(x)$; C — zależności rzeczywiste; 1 — uwojenie pierwotne; 2, 3 — uwojenie wtórne; 4 — rdzeń ferromagnetyczny

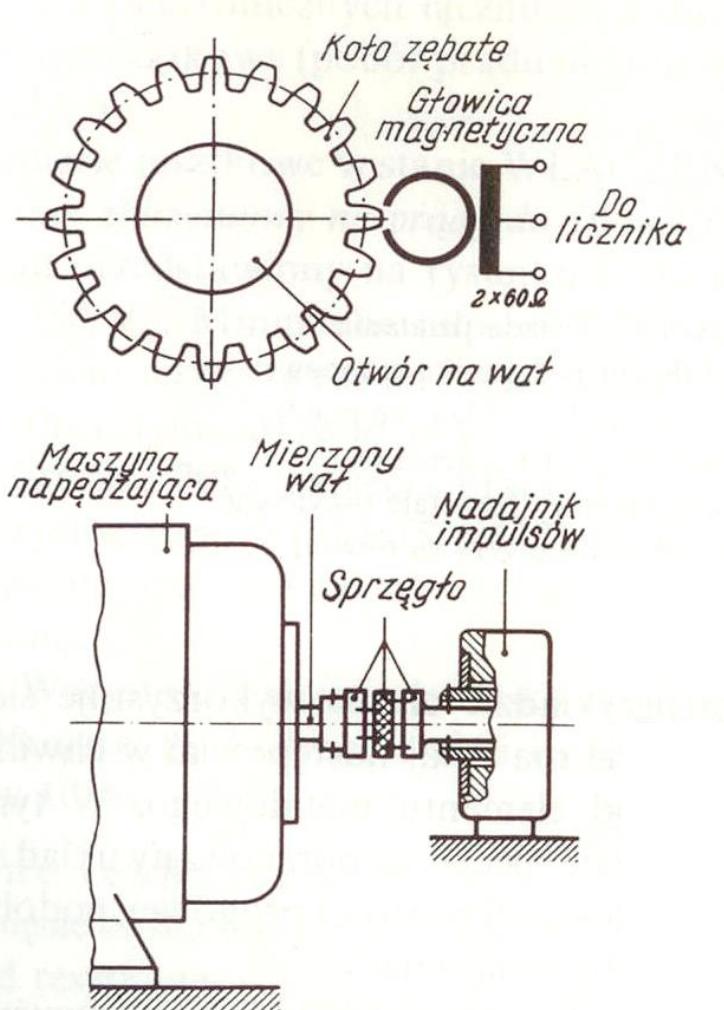


$$M_1 - M_2 = cx \text{ czyli } U_2 = f(x)$$

Czułość 500 mV/mm

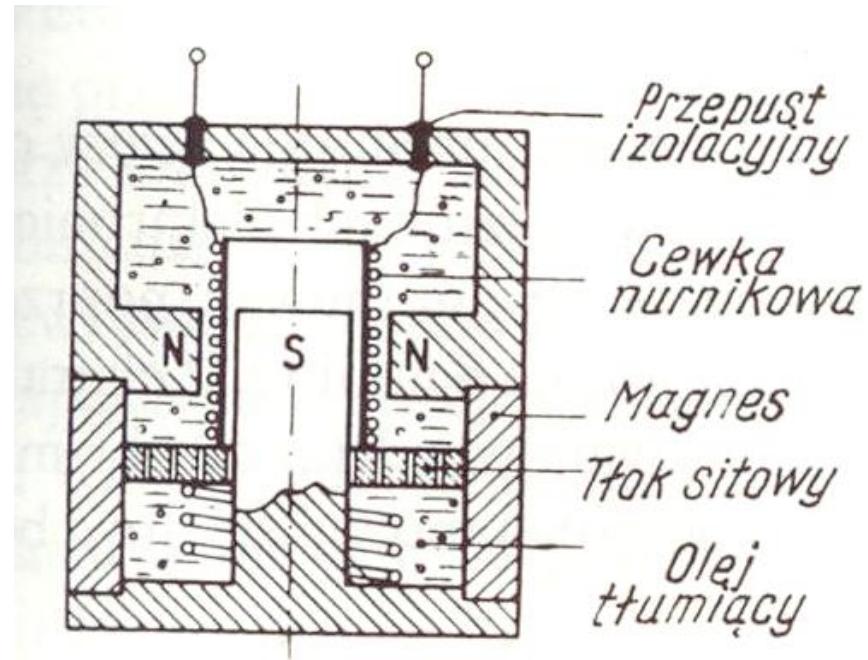
Częstotliwość zasilania do ok. 20 kHz

Czujniki indukcyjne w pomiarach impulsowych prędkości obrotowej



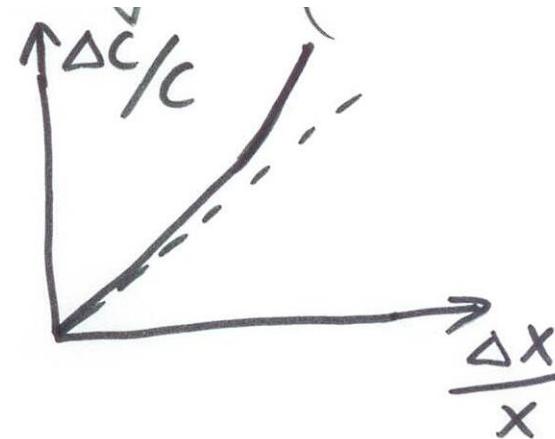
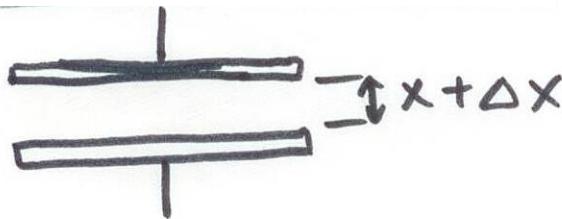
Przetworniki indukcyjne generacyjne

Stosowane są do pomiaru drgań



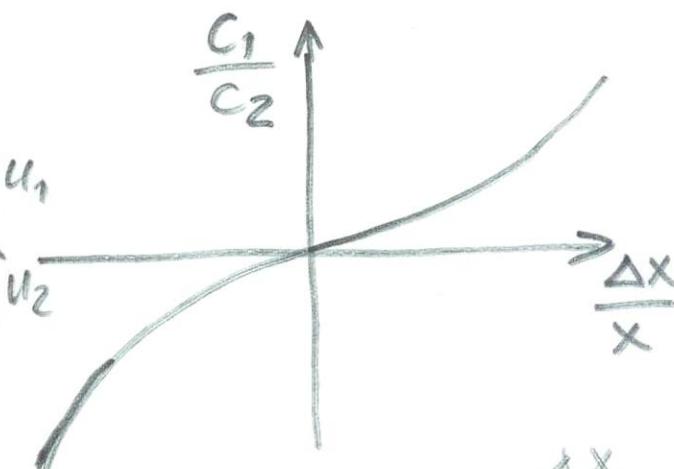
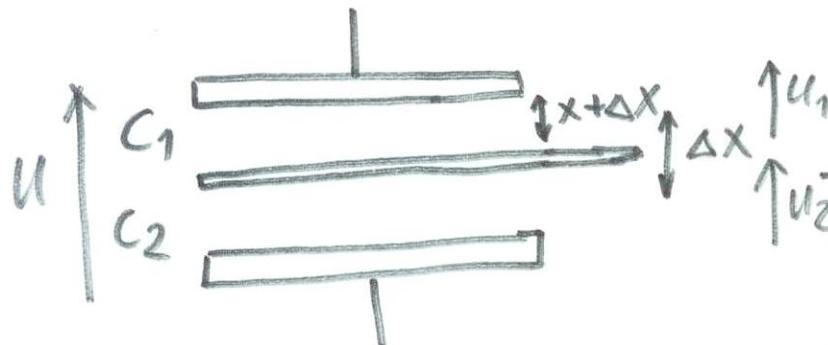
Czujniki pojemnościowe

Kondensator płaski



$$C = \epsilon \frac{s}{x}$$

Kondensator różnicowy



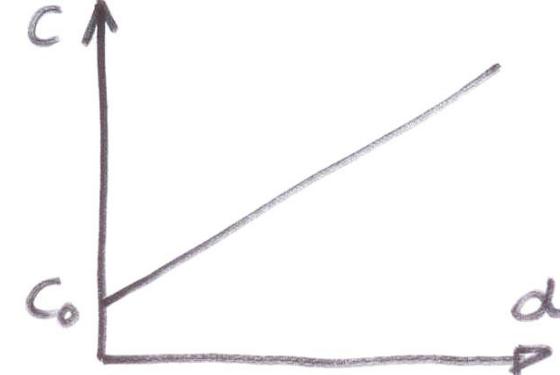
$$\frac{C_1}{C_2} \approx \frac{x_0 + \Delta x}{x_0 - \Delta x}$$

$$\Delta U = U_1 - U_2 \approx U \frac{\Delta x}{x_0}$$

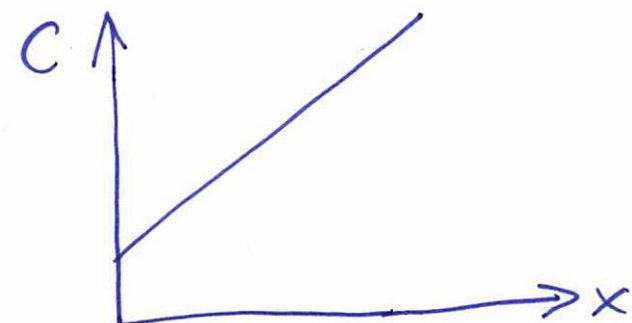
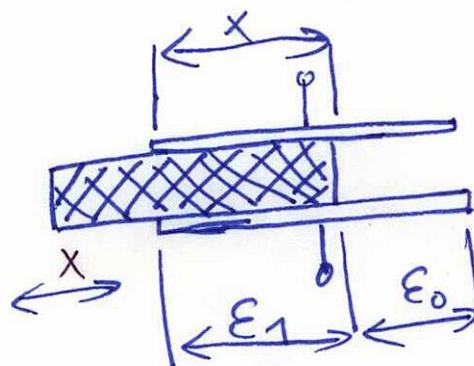
Kondensator pokrętny
(obrotowy)



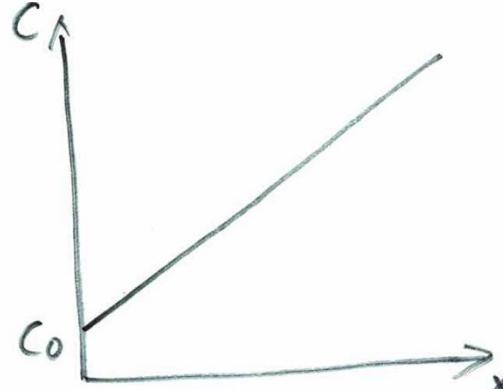
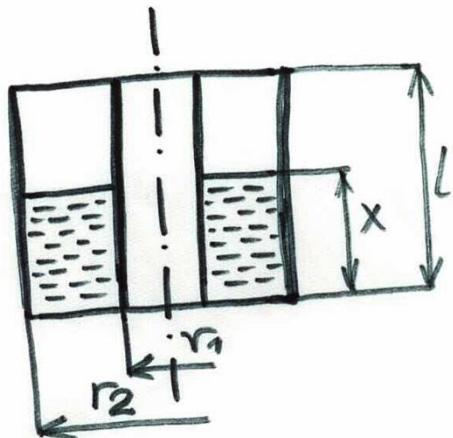
$$C = C_0 + d \Delta C_d$$



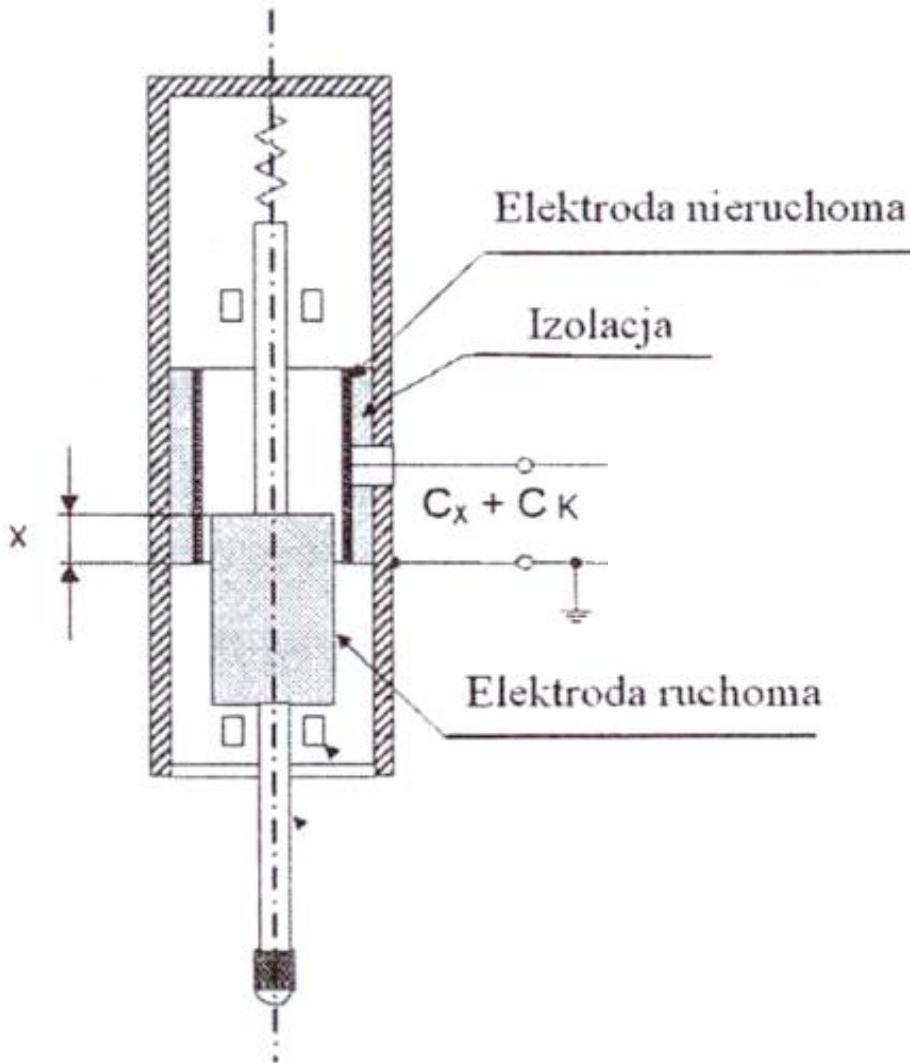
Kondensator o
zmiennym położeniu
dielektryka



Kondensator
cylindryczny



$$C = C_0 + \frac{2\pi k}{\ln r_2/r_1} [\epsilon_p l + (\epsilon_x - \epsilon_p) x]$$



C_k – pojemność kabla

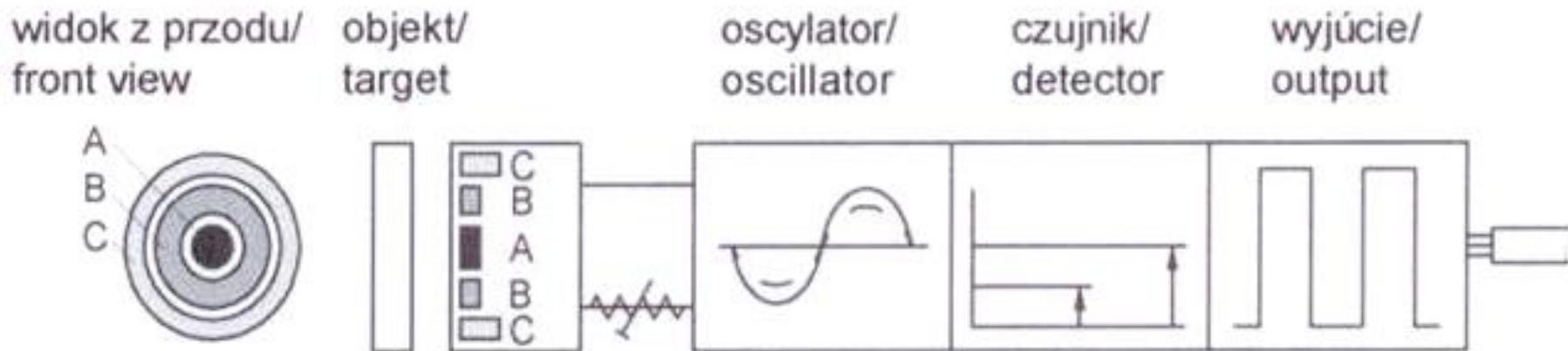
Czujniki firmy Thrimos – Sylvac,

Zakres: 2 – 50 mm

Rozdzielczość: 0,1 μm

Niepewność: 0,8 – 2,5 μm

Czujniki pojemnościowe zbliżeniowe



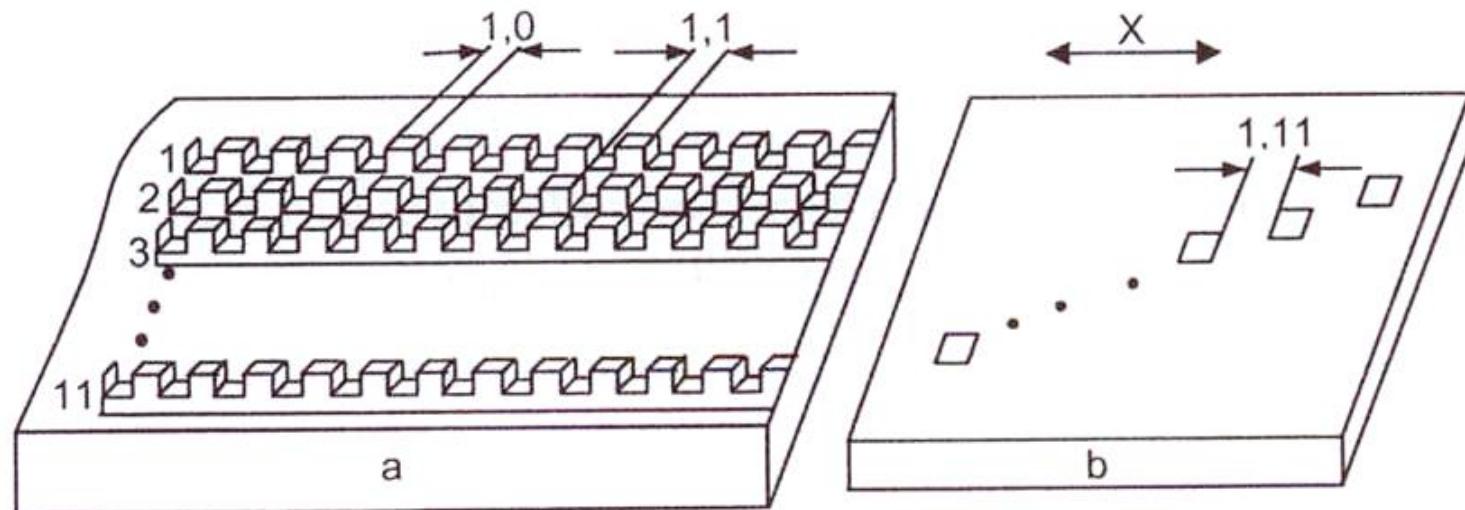
A, B: elektrody główne sensors electrodes

C: elektroda pomocnicza (kompensacyjna)/compensation electrodes

Czujnik pojemnościowy – zasada działania

Capacitive sensors – Operating principle

Czujnik pojemnościowy suwarki elektronicznej



Rys. 4.8. Elementy suwarki elektronicznej. a) taśma plastikowa z wtopionymi rzędami elementów zębatach, stanowiącymi jedne elektrody kondensatorów pomiarowych, b) przesuwny element odczytowy z 11 blaszkami, stanowiącymi drugie elektrody kondensatorów

W ramieniu prowadzącym suwarki umieszczona jest taśma plastikowa w której zatopiono 11 rzędów elektrod metalowych o długości 1 mm każdy. Poszczególne rzedy elementów przesunięte są względem siebie o 0,1 mm.

W zespole przesuwnym znajduje się 11 blaszek (elektrod) poprzesuwanych względem siebie o 1,11 mm. Tworzą one z elementami zatopionymi w taśmie plastikowej 11 kondensatorów o pojemnościach zmieniających się wraz z przesunięciem suwaka. Impulsy zmian pojemności są zliczane przez układ scalony. Pozwala to na odczyt cyfrowy przesunięcia z rozdzielcością 0,01 mm i niepewnością 0,03 mm.

Pomiary prędkości obrotowej

Tachometry

Tachometr - urządzenie służące do pomiaru prędkości obrotowej (z grec. **tachos** - prędkość, **metron** - mierzyć). Odczyt jest w postaci analogowej lub cyfrowej.

Metody:

- 1) kontaktowe (tachometryczne),
 - laboratoryjne,
 - Montowane na stałe (obrotomierze, szybkościomierze samochodowe)
- 2) bezkontaktowe:
 - optyczne (światło widzialne, podczerwień, laser),
 - elektromagnetyczne (indukcyjne, hallotronowe),
 - stroboskopowe.

Tachometry kontaktowe

Zakres od 20 do 20000 obr./min.

Wady :

- przerwy w kontakcie z badanym obiektem, wynikające z niewłaściwej siły docisku czujnika,
- brak możliwości pomiaru małych obiektów oraz poślizgi występujące przy zbyt dużych prędkościach obrotowych
- obciążenie wału maszyny badanej dodatkowym momentem.



1. Tachometry z prądniczką prądu stałego

Prądniczka prądu stałego (komutatorowe) + miernika napięcia magnetoelektryczny (analogowy) lub cyfrowy.

Siła elektromotoryczna $E = k\Phi n$,

gdzie $\Phi = \text{const}$ - strumień stałego pola magnetycznego wytwarzany przez ruchomy magnes.

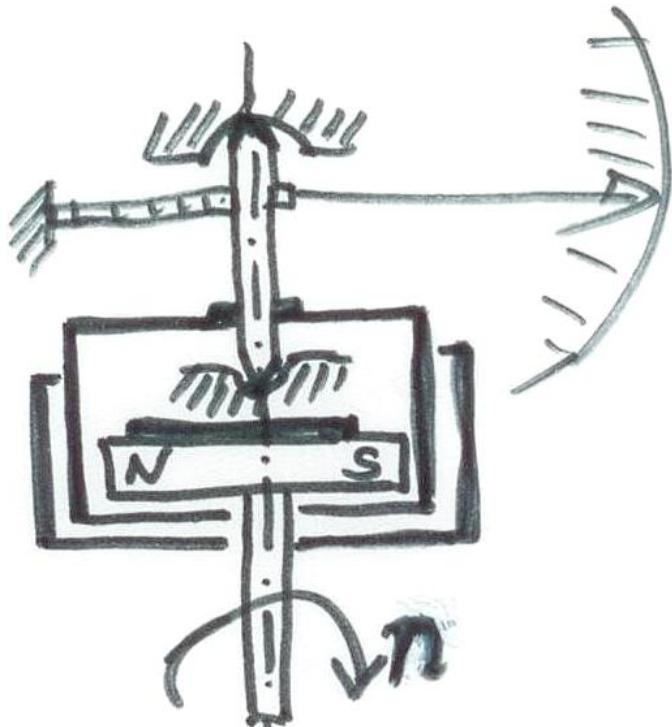
Pomiarysta zakłócone (działanie komutatora, zakłócenia zewnętrzne), szczególnie niekorzystne przy małych wartościach prędkości obrotowej, a co za tym idzie, niskich napięciach wyjściowych.

2. Tachometry z prądniczką prądu zmiennego

Prądniczka prądu zmiennego (z ruchomym magnesem) + prostownik + miernik napięcia analogowy lub cyfrowy.

$f_{min} > 4 - 10 \text{ Hz}$

3. Tachometry indukcyjne wiropędowe



Wirujący magnes z prędkością obrotową n wytwarza w aluminiowym ekranie prądy wirowe, pod wpływem których zaczyna się on przemieszczać z momentem

$$M_w = k_w B^2 n$$

Sprężynka wytwarza moment zwrotny

$$M_z = k_z \alpha$$

W stanie równowagi $M_w = M_z$

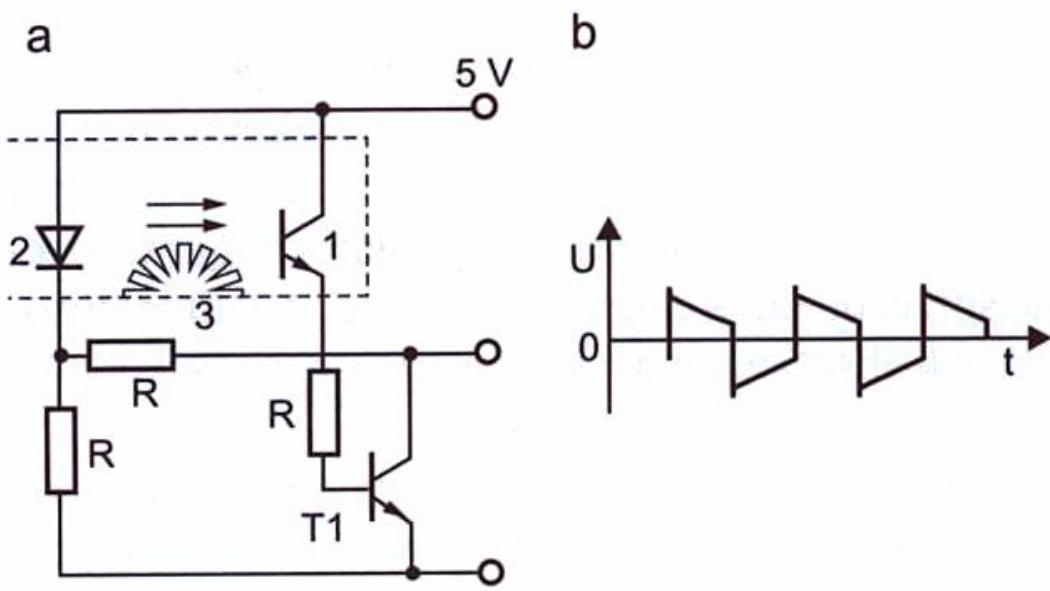
Stąd $\alpha = k \cdot n$



Dla zminimalizowania wpływu temperatury stosuje się bocznik magnetyczny z termopermu (jego przenikalność magnetyczna bardzo szybko maleje ze wzrostem temperatury).

Błąd temperaturowy – 1,5 %/50 °C.

Mety optyczne

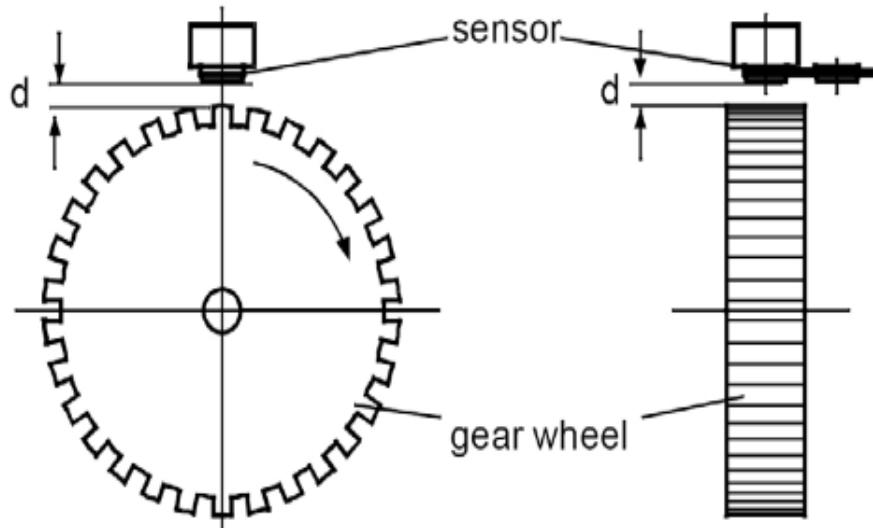


Rys. 14-19. Układ elektryczny przełącznika świetlnego [39]
a – schemat ideowy przełącznika
b – sygnał wyjściowy
1 – fototranzystor, 2 – dioda LED, 3 – koło z nacięciami,
 T_1 – tranzystor, R – rezystory



Miedzy diodą 2 (emitującą światło) a fototranzystorem 1 (odbiornikiem) umieszczone jest obracające się tarcza 3 z nacięciami lub otworami. Wirująca tarcza przerywa strumień światła i powoduje powstawanie impulsów na wyjściu fototranzystora, które są wzmacniane przez tranzystor T_1 . Częstotliwość impulsów jest proporcjonalna do liczby obrotów.

Metody indukcyjne



Metody stroboskopowa

Obiekt jest nieruchomy w oczach obserwatora w momencie gdy częstotliwość wyładowań szybkiej lampy stroboskopowej jest zsynchronizowana z prędkością obrotową obiektu.

Głównym elementem jest lampa błyskowa o regulowanej liczbie błysków w jednostce czasu. Regulacja ta odbywa się płynnie przez przestrajanie elektronicznego generatora impulsów zapłonowych.

Oświetlając stroboskopem wirujący wał maszyny, tak regulujemy częstotliwość błysków lampy aż uzyskamy pozornie nieruchomy wał.



Czujniki tensometryczne rezystancyjne

Każde ciało stałe wykazuje właściwości sprężyste, które opisane są zależnością naprężenia σ do wydłużenia względnego równego:

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

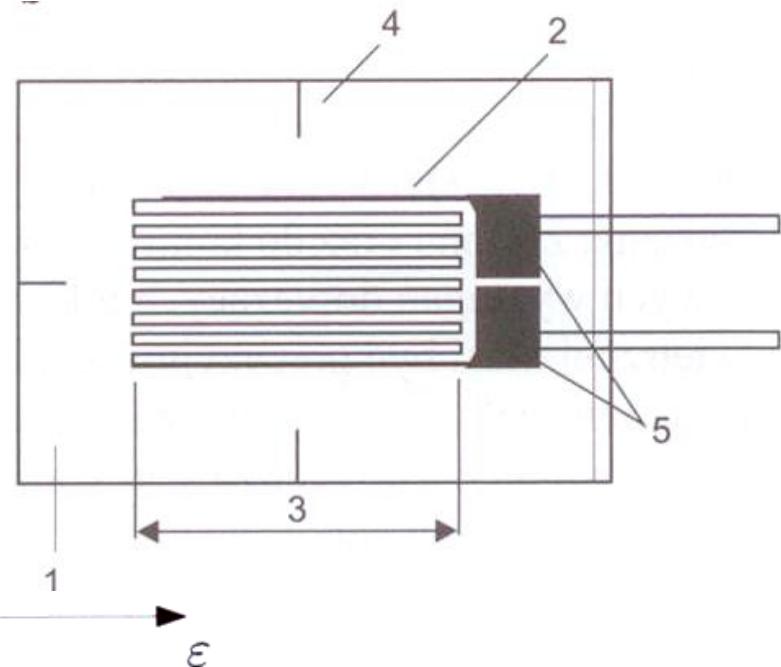
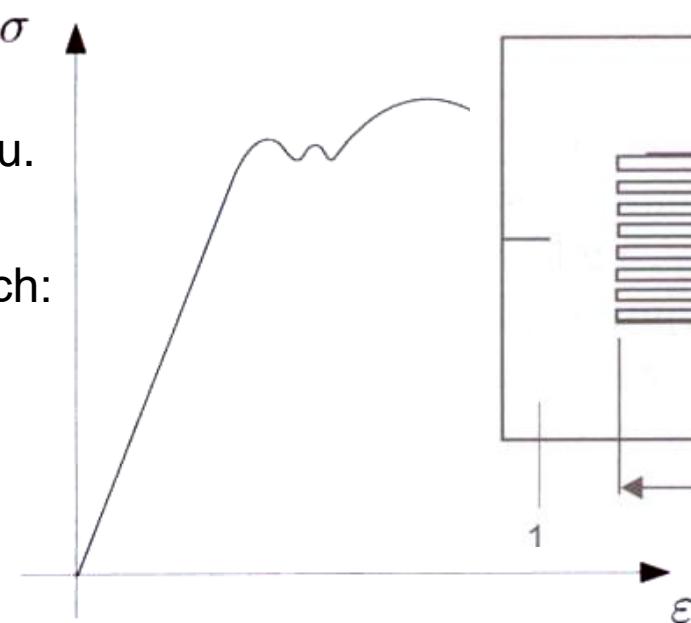
gdzie:

l – długość elementu sprężystego,

Δl – przyrost długości elementu sprężystego pod wpływem naprężenia σ .

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

F – siła, q – pole przekroju.



Zakres wielkości wejściowych:

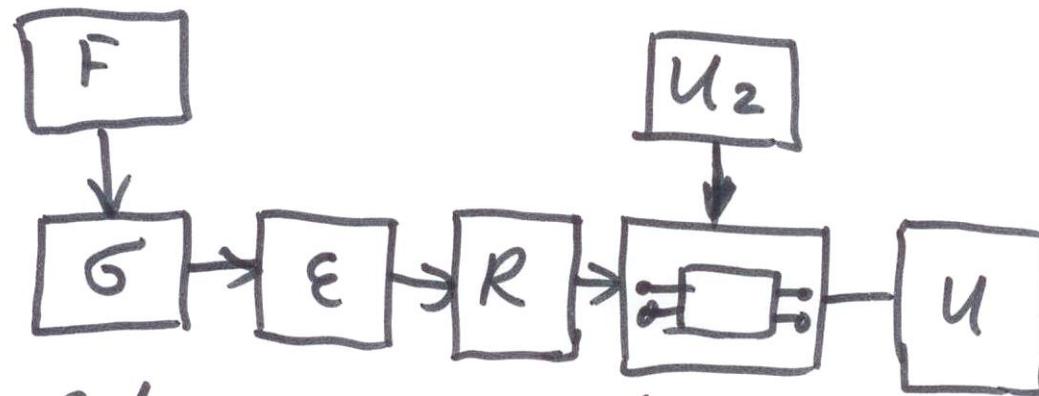
$$F = 10^{-1} \div 10^7 N$$

$$\varepsilon = 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-3}$$

Tabela 9.1. Parametry wybranych stopów stosowanych do produkcji tensometrów

Stop	k_t	$\alpha \times 10^{-5}$ K^{-1}	STE/Cu $\mu V/K$	$\varepsilon_{\max} \times 10^{-3}$
<i>Konstantan</i> (40%Ni, 60%Cu)	2,1	3	45	~ 4
<i>Nichrom</i> (80%Ni, 20%Cr)	2,1	30	20	~ 5
<i>Izoelastic</i> (Ni, Cr, Fe, Mo)	3,6	17,5	4	~ 8

k_t – stała tensometru, α - współczynnik termicznej zmiany rezystancji , STE – siła termoelektryczna, ε_{\max} – maksymalne odkształcenie



Schemat przetwarzania

Względne wydłużenie $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E}$ powoduje zmianę rezystancji $\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$

gdzie $\sigma = \frac{F}{q}$ $R = l \frac{\rho}{q}$ **k – współczynnik czułości tensometru (czułość)**

Przyrost rezystancji można określić z równania różniczkowego

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial q} dq + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho$$

stąd

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dq}{q} + \frac{d\rho}{\rho} \quad \text{lub} \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta q}{q} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$$\Delta R = Rk\varepsilon = Rk \frac{\sigma}{E}$$

Czułość $k = \frac{dR}{dl} = \frac{dR}{R} \frac{1}{\varepsilon} = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{\varepsilon}$

Ogólnie $k = 1,6 \dots 3,6$, dla tensometrów z konstantanu $k = 2,0 \dots 2,1$

Przykład: Jeżeli $R = 120 \Omega$ $k = \frac{\Delta R}{R\varepsilon} = 2$ $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$
 to $\Delta R = Rk\varepsilon = 120 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0,24 \Omega = 240 \text{ m}\Omega$

Niedokładność: $0,2 \div 1 \%$.

Najczęściej tensometry wykonuje się z konstantanu (40 % Ni, 60 % Cu), $k=2$.

Dla termometrów krzemowych $k \approx 120$.

Dopuszczalne wydłużenie $\varepsilon_{\max} = (1 \div 8)10^{-3}$

Główne źródła błędów:

- zmiana temperatury,
- pełzanie,
- skończona rezystancji izolacji i jej zmienność pod wpływem wilgoci,
- wysoka częstotliwość zmian naprężenia.

Zmiany temperatury powodują:

- zmiany rezystancji tensometru - α_R ,
- wydłużenie liniowe tensometru - α_d ,
- wydłużenie liniowe podłoża - α_p

$$\Delta R = R \left[\alpha_R + k(\alpha_p - \alpha_d) \right] \Delta t$$

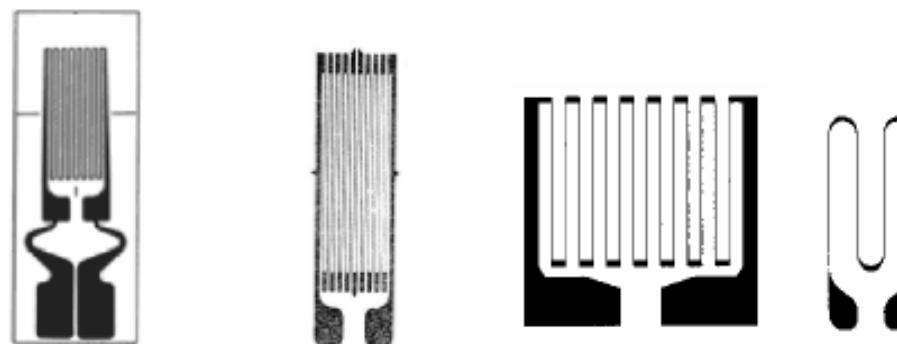
Błąd w postaci pozornego wydłużenia:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta R}{R} \frac{1}{k} = \left(\frac{1}{k} \alpha_R + \alpha_p - \alpha_d \right) \Delta t$$

Dla $\Delta t = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$, $k = 2$ przy względnym wydłużeniu $\varepsilon = 10^{-3}$,
tensometr umieszczony na stali,
błąd $\varepsilon_t = 1,5 \cdot 10^{-6}$

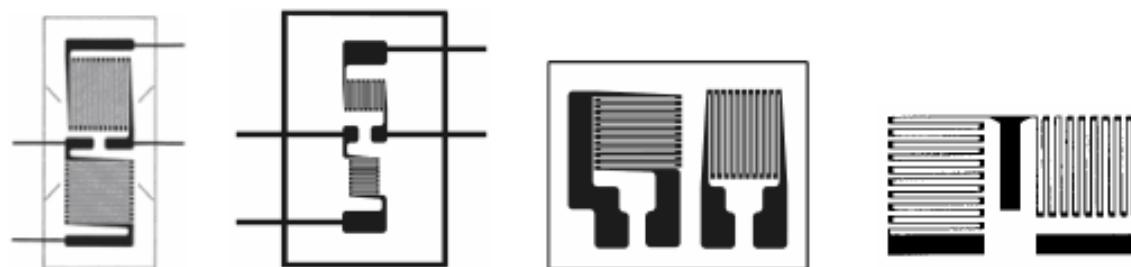
Konstrukcja tensometrów

Tensometry jednoosiowe (rys.9.12) – najprostsza konstrukcja tensometru, umożliwia pomiar odkształceń w jednym kierunku.



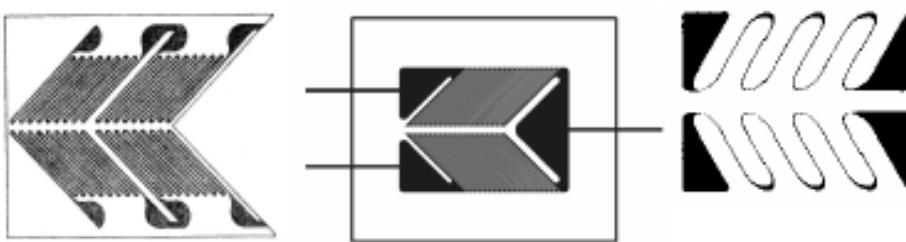
Rys. 9.12. Tensometry jednoosiowe

Tensometry dwuosiowe (rys.9.13) - stosowane tam gdzie istnieje potrzeba mierzenia odkształceń w dwóch kierunkach - np. powierzchnia zewnętrzna płaszcza naczyń cylindrycznych – rozstaw osi 90° , do pomiaru momentu skręcającego przenoszonego przez wały napędowe - rozstaw osi 45° względem osi wału.



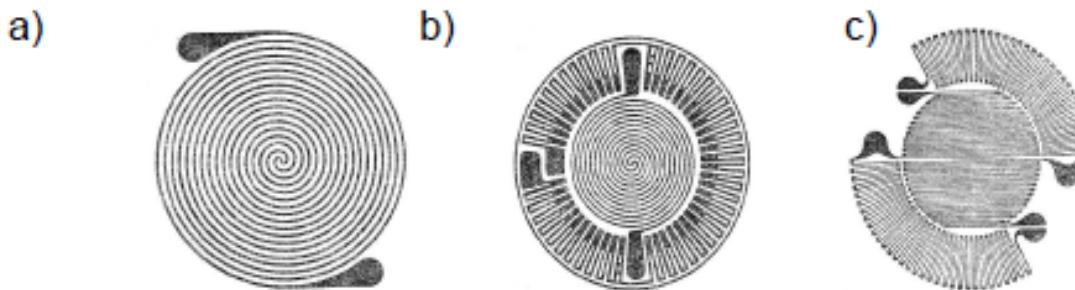
Rys. 9.13. Przykład tensometrów dwuosiowych

Tensometry do pomiarów odkształceń walów skrętnych (rys.9.16): siatka ukształtowana jest w kierunkach zgodnych z liniami odkształceń skręcanego wału.



Rys. 9.16. Tensometry do pomiarów wałów skrętnych

Tensometry foliowe do pomiaru odkształceń i ugięć membran (rys.9.17): siatka ukształtowana w kierunkach zgodnych z kierunkami odkształceń membran.

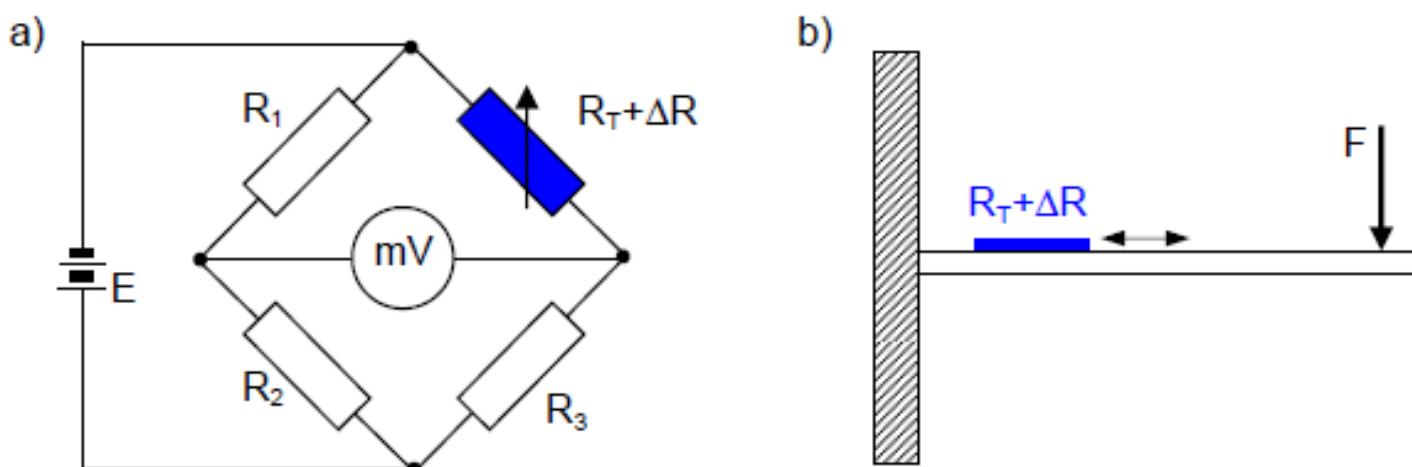


Rys. 9.17. Tensometry przeznaczone do pomiarów odkształceń membran: a) podwójna spirala, b) tensometr dwuczłonowy, c) tensometr czteroczłonowy,

Rodzaj tensometru	DRUTOWE	FOLIOWE	PÓŁPRZEWODNIKOWE
Material siatki	Konstantan (60%Cu+40%Ni) Nichrom (80%Ni+20%Cr) Elinwar (36%Ni+8%Cr+55%Fe+..)		Ge + domieszki n, p Si + domieszki n
Rezystancja [Ω]	120, 300, 350, 500, 600, 1000		10...100000
Długość bazy pomiarowej l_t [mm]	3...150	0.2...150	0.2...20
Czułość k	2.1 - Konstantan 2.1 - Nichrom 3.6 - Elinwar		- 100÷200
Liniowość [%]	± 0.1 dla $\varepsilon < 4\%$, ± 1 dla $\varepsilon < 10\%$,		1 przy $\varepsilon < 1\%$
Próg czułości odkształceń ε [μD] *	0.1	0.1	0.001
Zakres mierzonych odkształceń [%]	$\pm 3, \pm 5$	$\sim \pm 5$	$\pm 5, \pm 6$
Dopuszczalne odkształcenie ε [%]	1 przy $l_t < 5\text{mm}$ 1,2 przy $l_t > 5\text{mm}$	3 dla $l_t < 5\text{mm}$ 3,4 dla $l_t > 5\text{mm}$	0.5
Trwałość dla $\varepsilon = 100 \mu\text{m/m}$	10^7	10^7	10^6
Współczynnik temperaturowy rezystancji [$\Omega/\Omega/\text{deg}$]	$(-3.9 \dots 6) \cdot 10^{-6}$	$\pm 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-3}$
Współczynnik temperaturowy czułości [1/deg]	$\sim 5 \cdot 10^{-6}$ nie zmienia się dla konstantanu przy $T=150, 573 \text{ K}$	-	$6 \cdot 10^{-5} \dots 3.3 \cdot 10^{-3}$

* - μD - mikrodeformacja (odpowiada ona $\Delta l/l = 10^{-6}$)

Układ ćwierć-mostka (rys.9.25):



Rys. 9.25. Układ ćwierć-mostka, a) schemat mostka, b) rozmieszczenie tensometrów na badanym elemencie

Dla tego przypadku napięcie niezrównoważenia mostka wynosi:

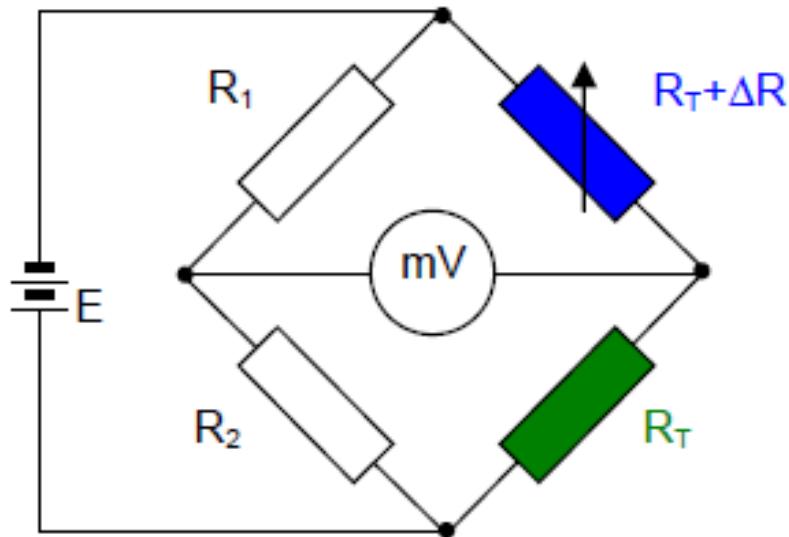
$$\Delta U = E \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_T + \Delta R} \right) \quad (9.33)$$

a dla przypadku, gdy R₁=R₂ oraz R₃=R_T:

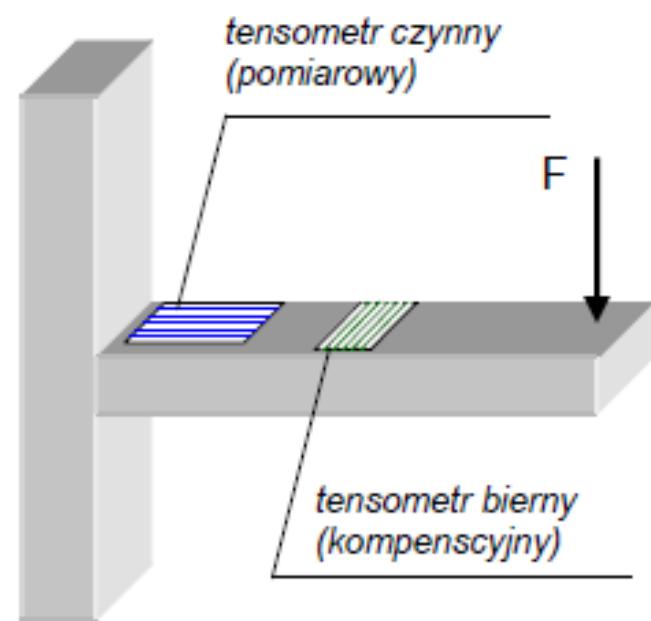
$$\Delta U = E \left(\frac{1}{2} - \frac{R_T}{2R_T + \Delta R} \right) \quad (9.34)$$

Przedstawiony układ nie zapewnia kompensacji temperatury. Może być wykorzystany np. do pomiaru zginania i rozciągania

a)

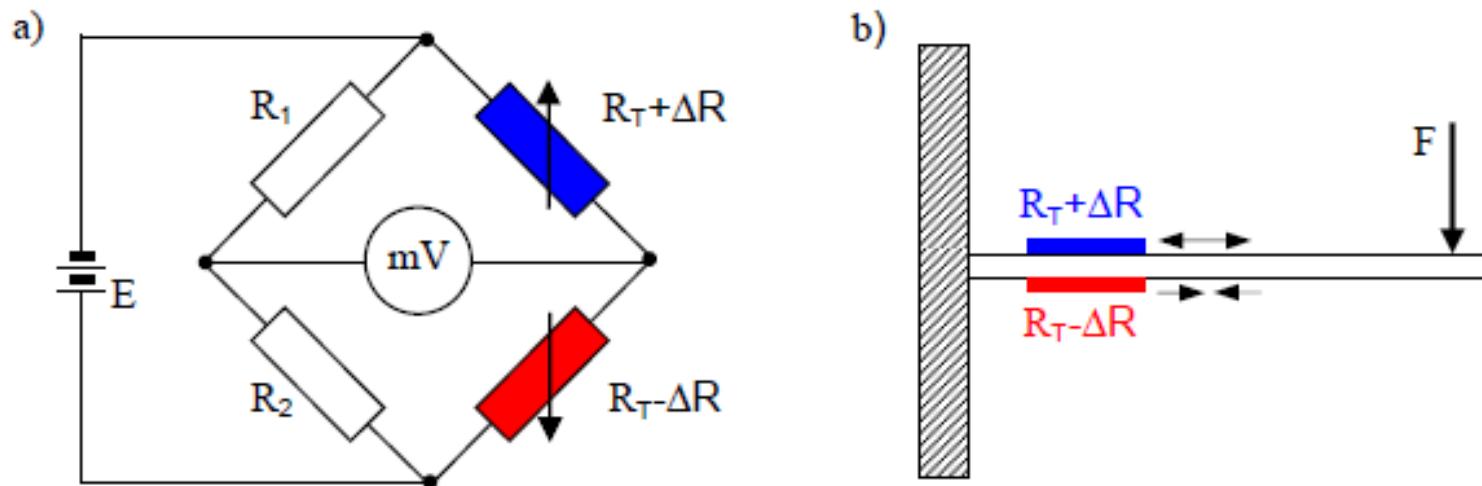


b)



Rys. 9.28. Układ mostka z kompensacją temperatury, a) schemat mostka, b) rozmieszczenie tensometrów na badanym elemencie

Układ pół-mostka (rys.9.26):



Rys. 9.26. Układ pół-mostka, a) schemat mostka, b) rozmieszczenie tensometrów na badanym elemencie

W tym przypadku napięcie niezrównoważenia mostka wynosi:

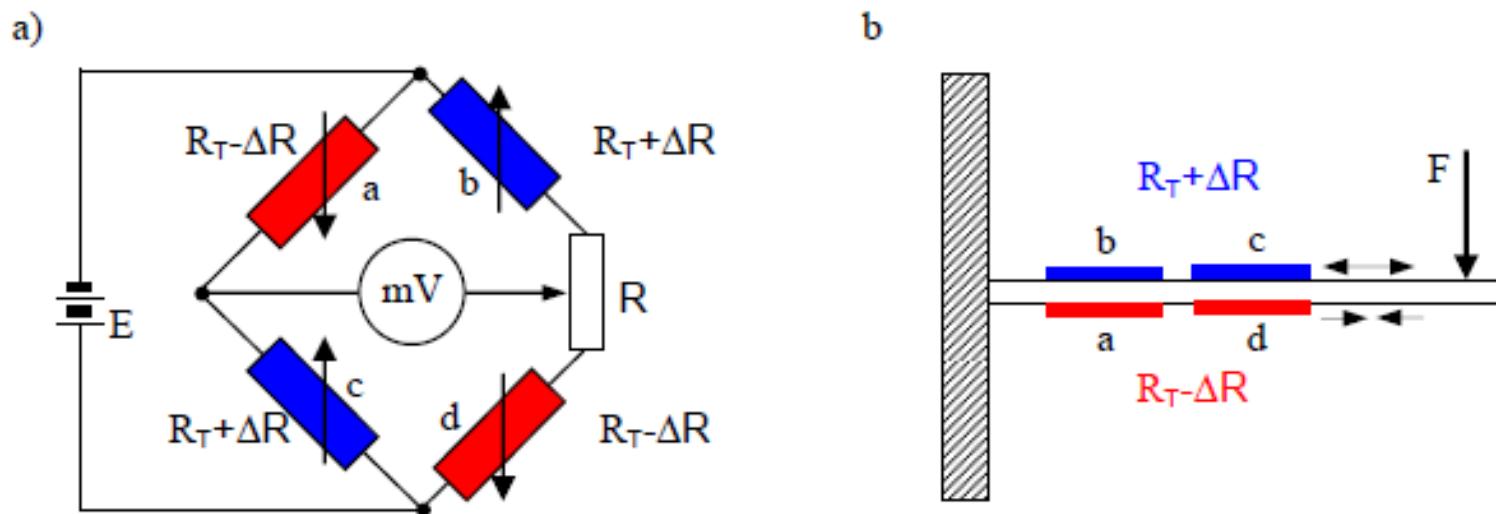
$$\Delta U = E \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_T - \Delta R}{2R_T} \right) \quad (9.35)$$

gdy $R_1 = R_2$ napięcie to wynosi:

$$\Delta U = \frac{E}{2} \left(\frac{1}{2} - \frac{R_T - \Delta R}{2R_T} \right) = \frac{E}{2} \left(1 - 1 + \frac{\Delta R}{R_T} \right) = \frac{E}{2} \frac{\Delta R}{R_T} \quad (9.36)$$

Układ ten zapewnia kompensację wpływu temperatury.

Układ pełnego mostka (rys.9.27):



Rys. 9.27. Układ pełnego mostka, a) schemat mostka, b) rozmieszczenie tensometrów na badanym elemencie

W tym przypadku napięcie niezrównoważenia mostka wynosi:

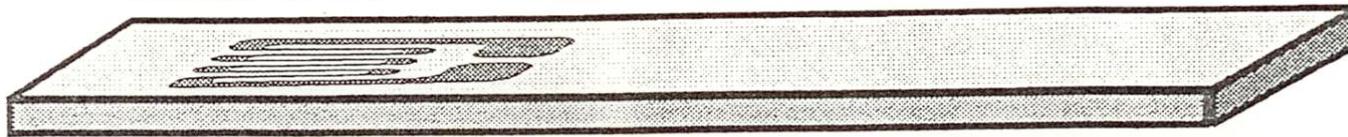
$$\Delta U = E \left(\frac{R_T + \Delta R}{2R_T} - \frac{R_T - \Delta R}{2R_T} \right) \quad (9.37)$$

czyli:

$$\Delta U = E \frac{\Delta R}{R_T} \quad (9.38)$$

FACTOR $N = 1$

QUARTER BRIDGE



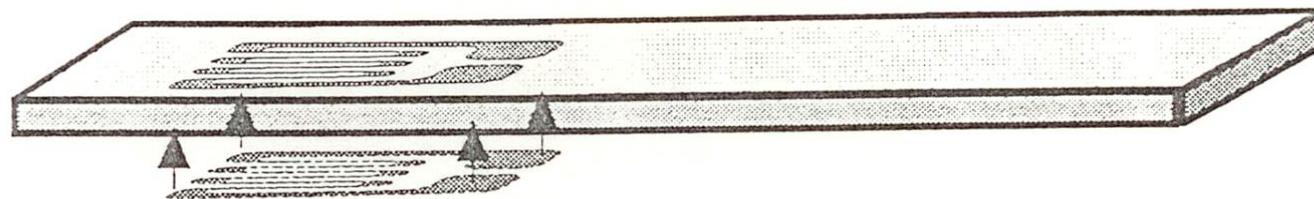
FACTOR $N = 1 + \nu$

HALF BRIDGE Adds Poisson's Strain



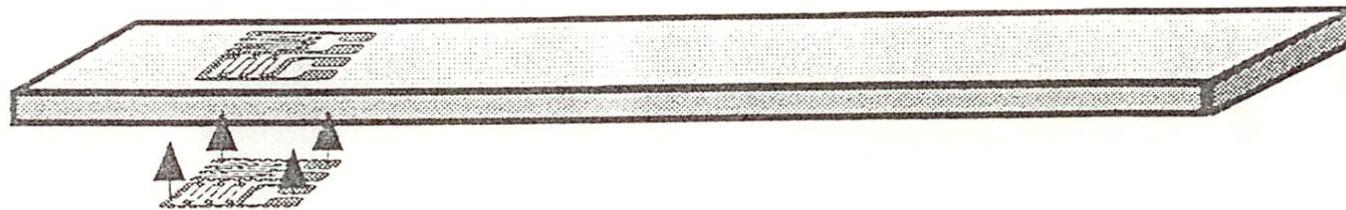
FACTOR $N = 2$

HALF BRIDGE



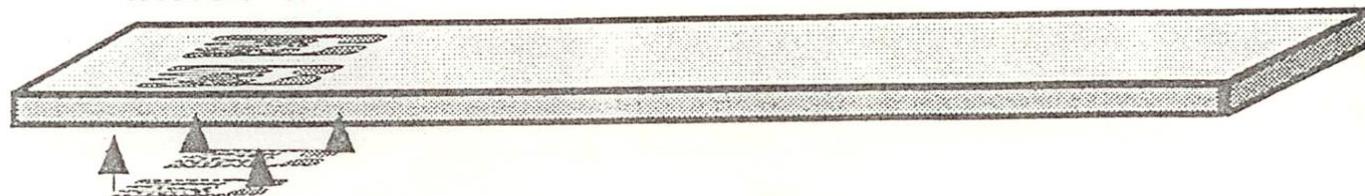
FACTOR $N = 2(1 + \nu)$ FULL BRIDGE

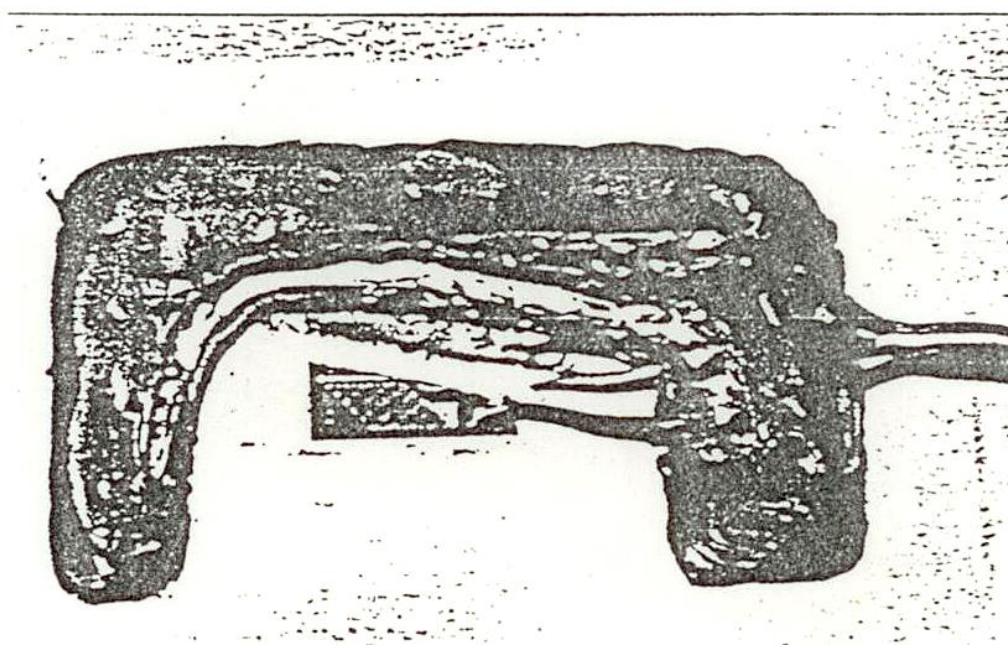
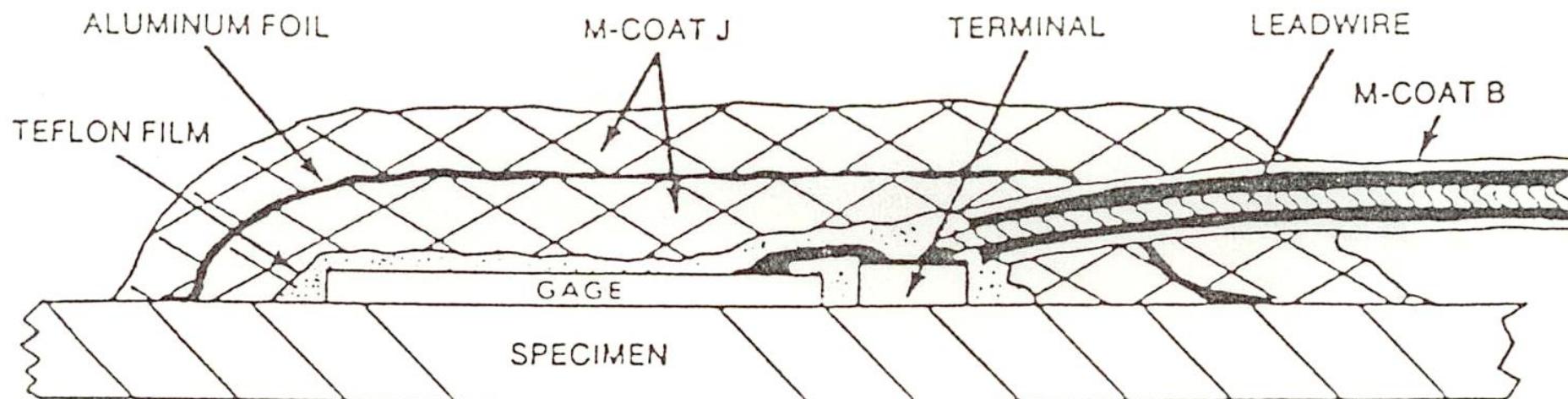
Adds Poisson's Strain.
Compensates bending in case of
tensile or compression strain.

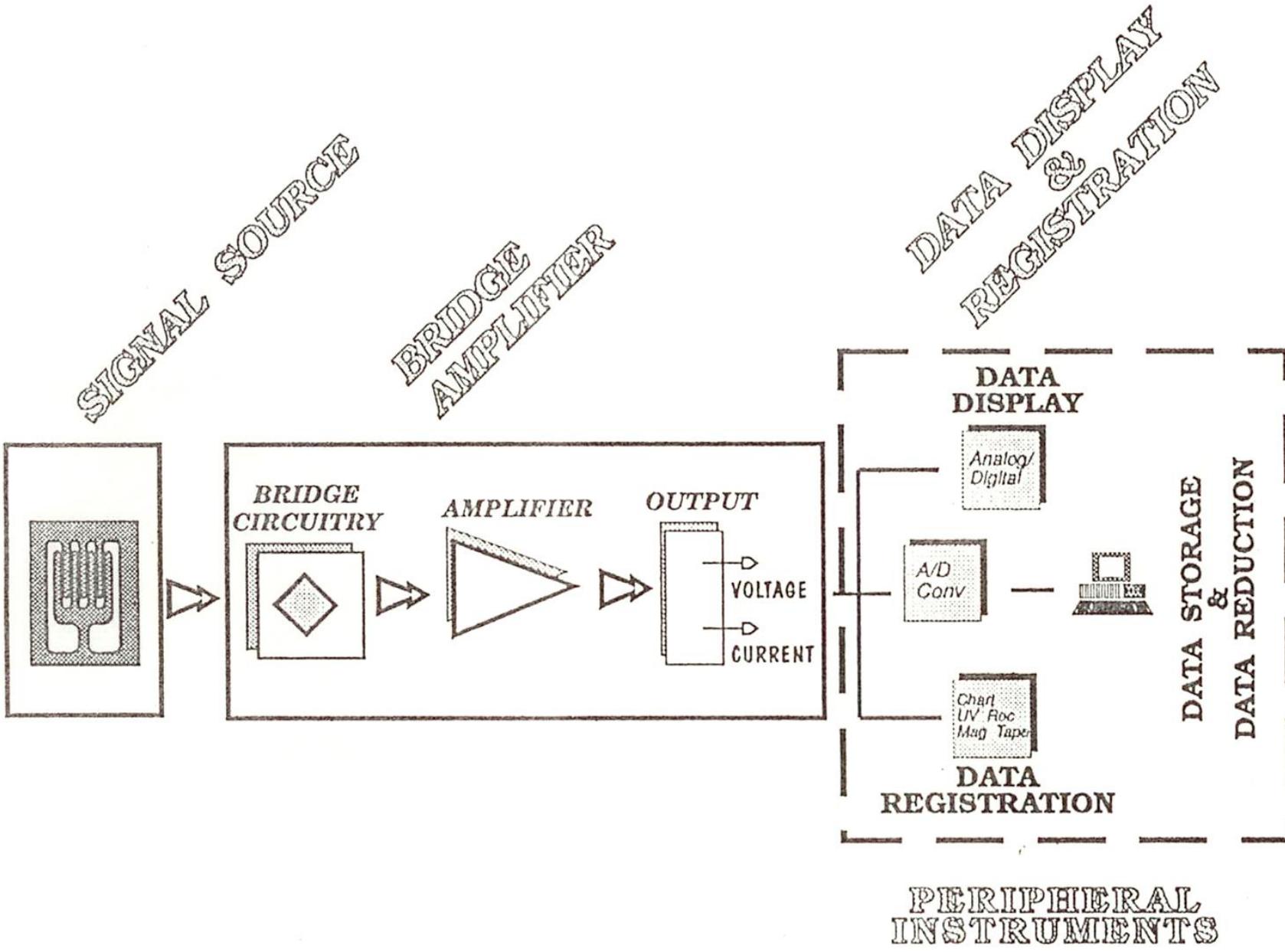


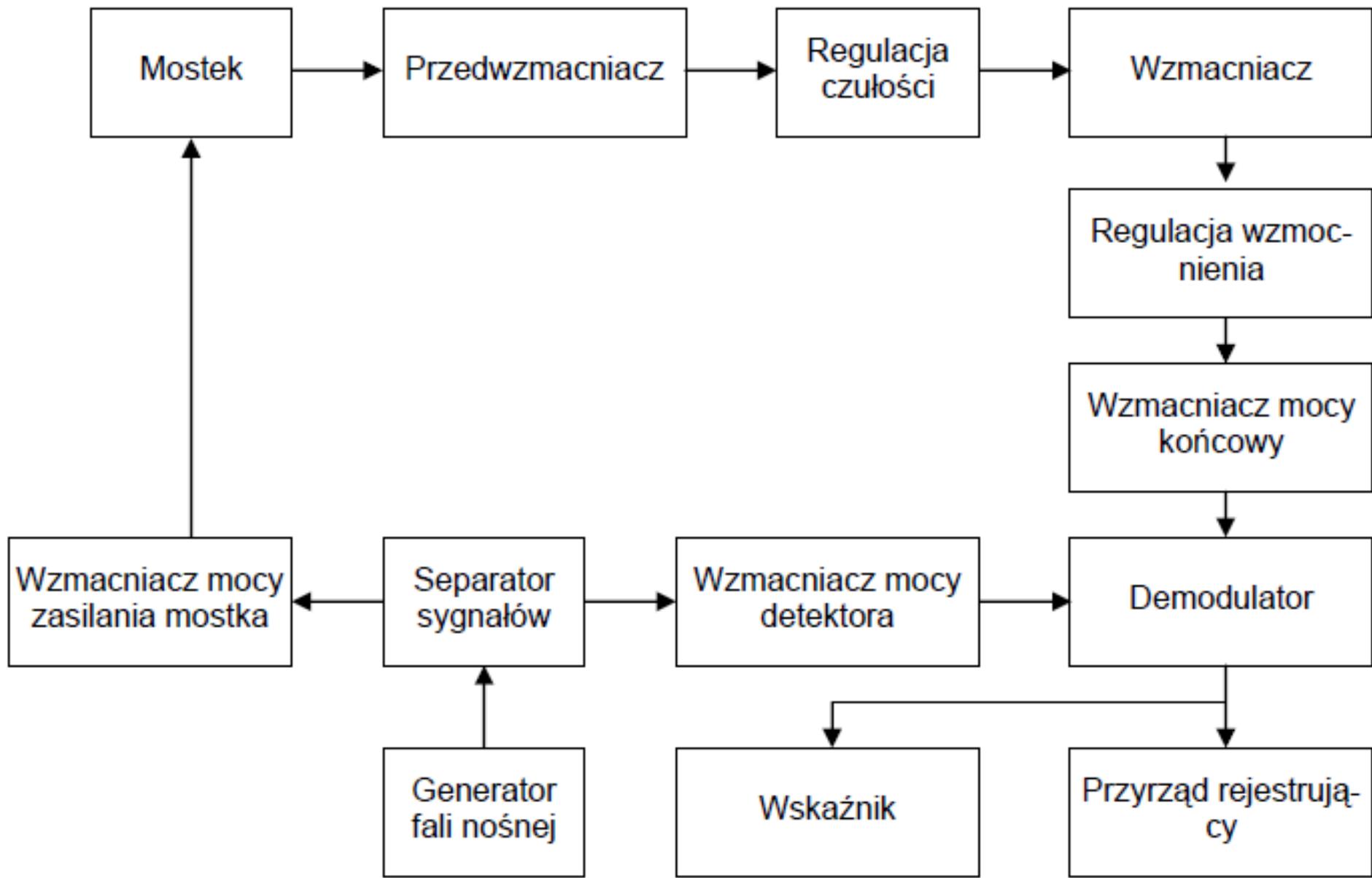
FACTOR $N = 4$

FULL BRIDGE







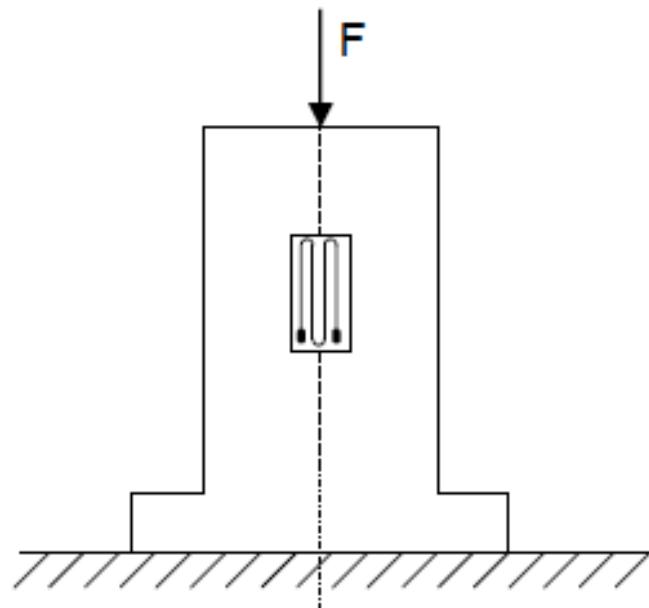


Rys.9.30. Schemat blokowy tensometrycznej aparatury wzmacniającej pracującej z falą nośną

PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA TENSOMERÓW DO POMIARÓW INNYCH WIELKOŚCI NIŻ NAPĘŻENIE MECHANICZNE

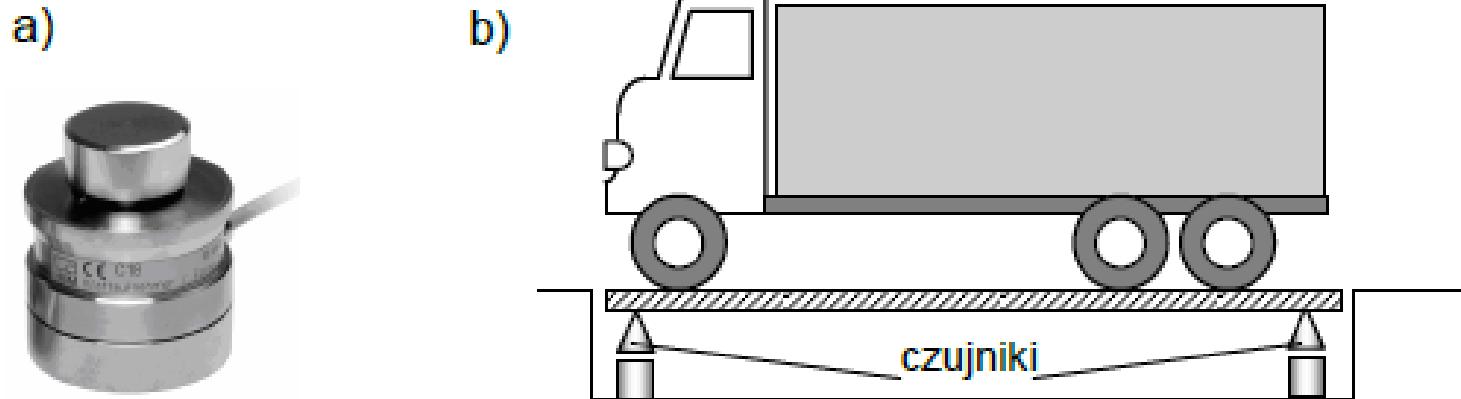
Pomiar siły

Najprostszym przykładem pomiarów wielkości mechanicznej przy wykorzystaniu techniki tensometrycznej jest pomiar siły. Schemat takiego układu przedstawiono na rysunku 9.34.



Rys. 9.34. Sposób umieszczenia tensometru na elemencie ściskanym

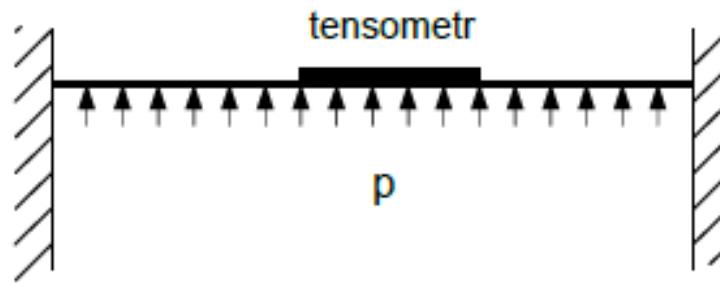
Mierzona siła powoduje odkształcenie elementu sprężystego o przekroju kołowym, cylindrycznym lub prostokątnym. Na elemencie tym jest naklejony tensometr. Odkształcenia tensometru są takie same, jak odkształcenia elementu, na którym tensometr jest naklejony, zaś odkształcenia elementu są proporcjonalne do wartości działającej siły.



Rys. 9.36. Przykład wykorzystania czujników siły a) widok czujnika siły [3], b) waga przemysłowa

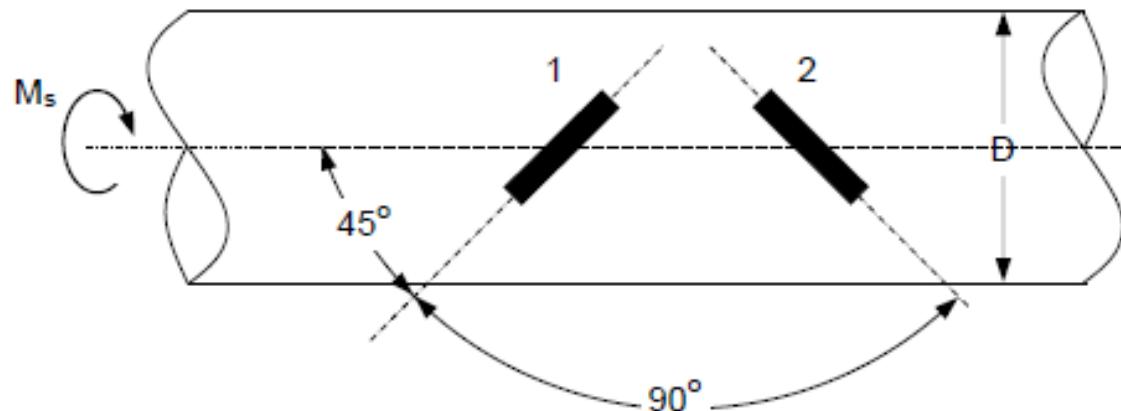
Pomiar ciśnienia

Pomiar ciśnienia metodą tensometryczną (rys.9.37) polega na pomiarze odkształceń metalowej płaskiej membrany. Pomiar taki charakteryzuje się dużą dokładnością a zakres pomiaru ciśnienia zależy głównie od grubości membrany.



Rys. 9.37. Schemat przetwornika do pomiaru ciśnienia z elementem sprężystym w kształcie membrany

Pomiar momentu skręcającego (obrotowego)



Rys. 9.40. Schemat układu do pomiaru momentu obrotowego

Pomiar ten pozwala określić moment skręcający M_s przenoszony w ruchu obrotowym przez wałek w przekroju kołowym o średnicy D . Zależność pomiędzy momentem M_s i naprężeniem stycznym w warstwie skrajnej τ :

$$M_s = \frac{\pi \cdot D^3}{16} \cdot \tau \quad (9.43)$$

Naprężenie styczne działa stycznie do obwiedni przekroju poprzecznego wałka i wywołuje stan czystego ściśnięcia. Wartości główne stanu naprężenia i odkształcenia są takie same co do wartości lecz znaków przeciwnych.

$$\sigma_1 = -\sigma_2 \quad (9.44)$$

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2. \quad (9.45)$$

Naprężenie ścinające

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (9.46)$$

gdzie:

G – moduł sprężystości postaciowej Kirchhoffa,

γ – kąt odkształcenia postaciowego,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad E - \text{moduł Younga} \\ \nu - \text{liczba Poisona} \quad (9.47)$$

a ze wzorów transformacyjnych wynika, że:

$$|\gamma| = |2 \cdot \varepsilon_1| = |2 \cdot \varepsilon_2| \quad (9.48)$$

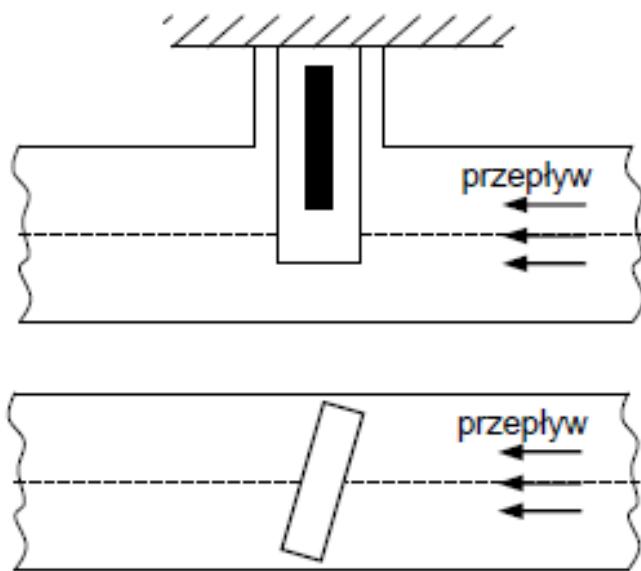
więc:

$$\tau = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_1 \quad (9.49)$$

czyli wartość momentu skręcającego:

$$M_s = \frac{\pi \cdot D^3}{8} \cdot G \cdot \varepsilon_1 \quad (9.50)$$

Pomiar prędkości przepływu



Rys. 9.43. Schemat układu do pomiaru natężenia przepływu

Ciśnienie dynamiczne przepływającego płynu powoduje powstawanie siły zginającej element sprężysty, na którym naklejone są tensometry. Siła zginająca jest tym większa im większa jest prędkość przepływu. Przy stałej prędkości przepływu siła ta będzie tym większa im większy kąt tworzy płaszczyzna elementu sprężystego z kierunkiem napływu strugi. Układ zatem pozwala na ewentualne zmiany zakresu pomiarowego. Jednak należy zwrócić uwagę, że siła gnąca jest proporcjonalna do kwadratu prędkości czynnika, a więc charakterystyka przetwornika jest nieliniowa.

Czujniki i przetworniki

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

Wykład 6

**Czujniki piezoelektryczne.
Pomiary lepkości
i natężenia przepływu płynów**

CZUJNIKI PIEZOELEKTRYCZNE

Niektóre kryształy, przede wszystkim kwarc, mają właściwości piezoelektryczne, charakteryzujące się tym, że wskutek odkształceń mechanicznych pojawia się na odpowiednich ściankach kryształu ładunek elektryczny

$$Q = d \cdot F$$

d – współczynnik piezoelektryczny w C/N.

Zależy on od rodzaju materiału i osi ułożenia kryształu do kierunku działania siły.

Napięcie

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{d \cdot F}{C_k + C_m}$$

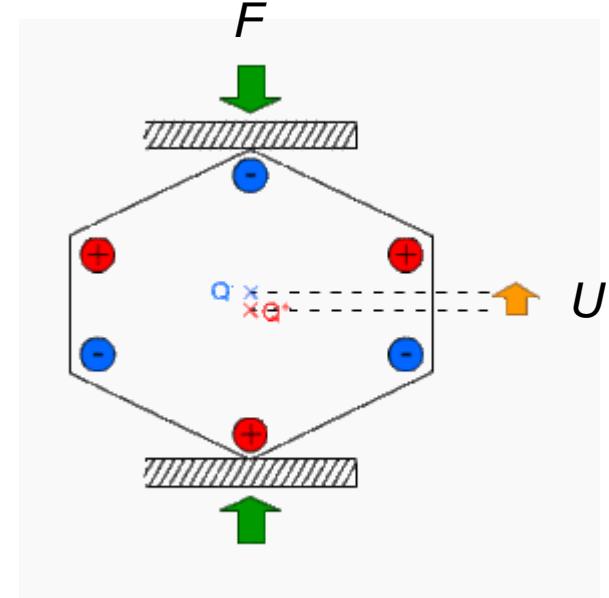
C_k – pojemność kryształu, C_m – pojemności układowe.

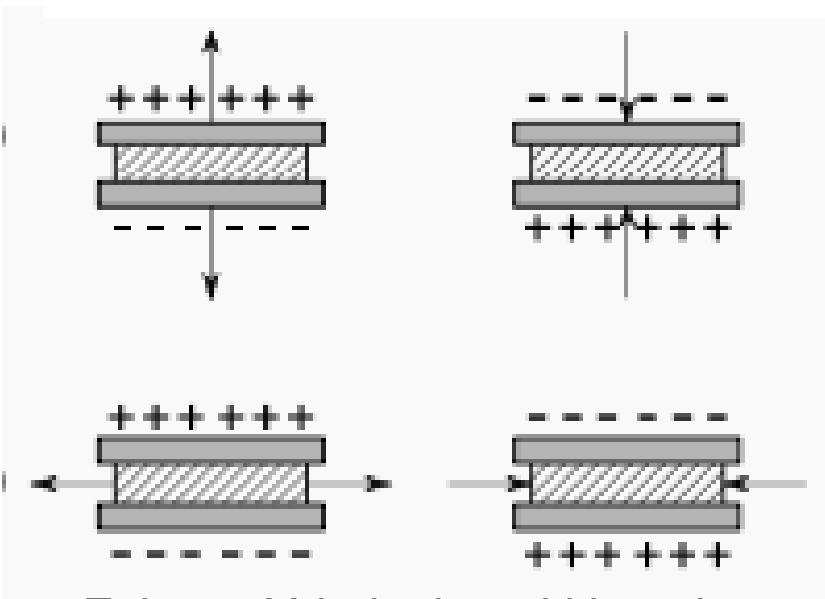
Kwarc (SiO_2) – $d_{11}=2,2 \cdot 10^{-12}$ C/N,

Turmalin ($\text{H}_3\text{Na}_4\text{Al}_{16}\text{B}_6\text{Si}_{12}\text{O}_{63}$) - $d_{11}=2,2 \cdot 10^{-12}$ C/N,

Materiały ceramiczne sztuczne (PZT PB[Zr,Ti] O_3) – $d_{33}= 400 \cdot 10^{-12}$ C/N,

Polifluorek winylidenu (PVDV) - $d_{33}= 40 \cdot 10^{-12}$ C/N

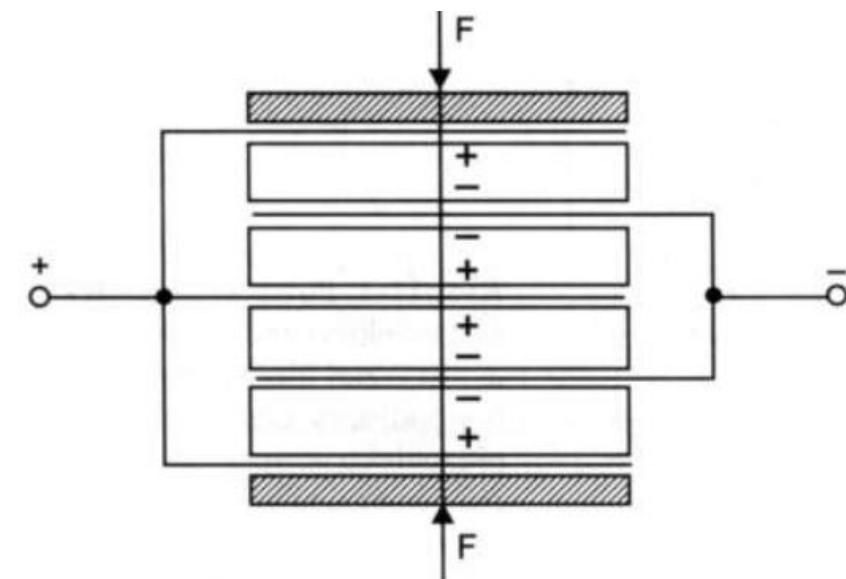




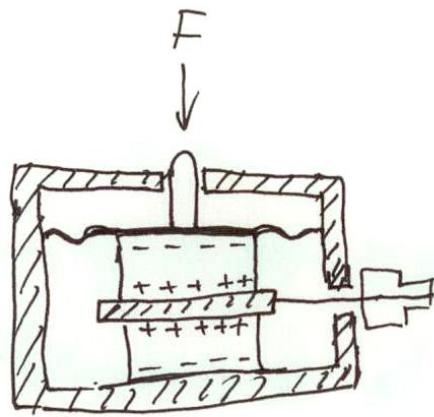
Zależność ładunku od kierunku działania siły



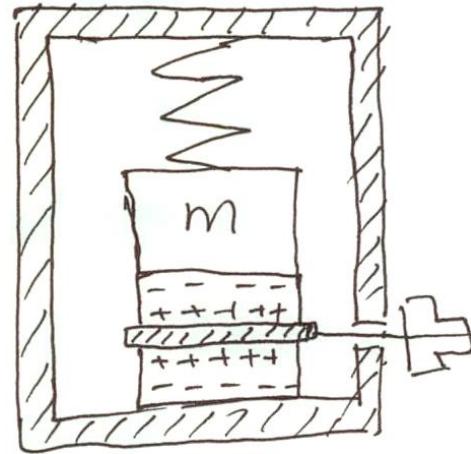
Czujnik do pomiaru siły nacisku kół pojazdu



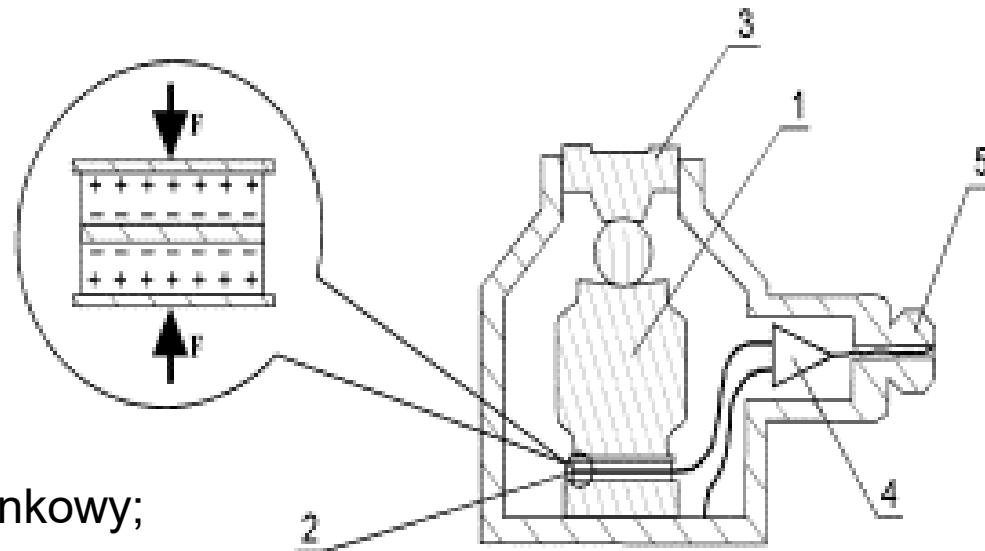
Czujnik piezoelektryczny wielowarstwowy



Czujnik do pomiaru
siły

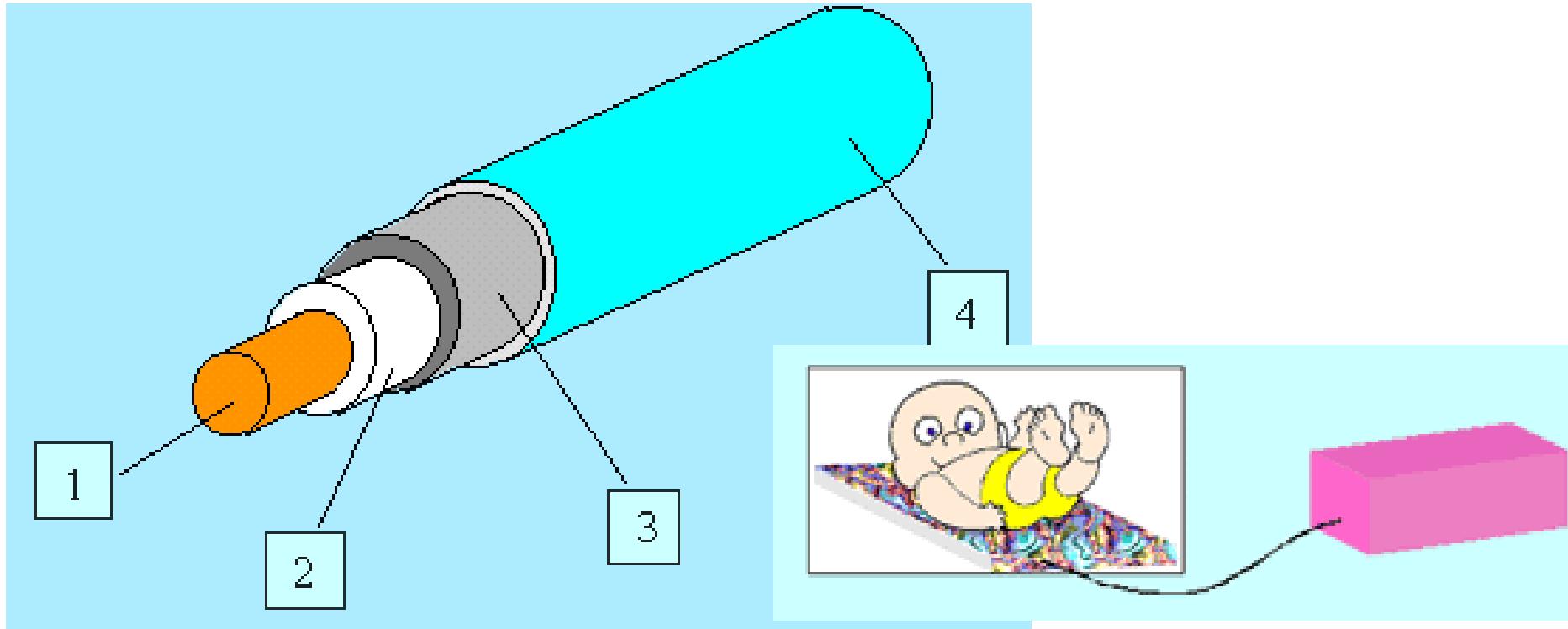


Czujnik do pomiaru
drgań sejsmicznych



- 1 masa bezwładna;
- 2 element piezoelektryczny;
- 3 element napinający;
- 4 zintegrowany wzmacniacz ładunkowy;
- 5 wyjście elektryczne.

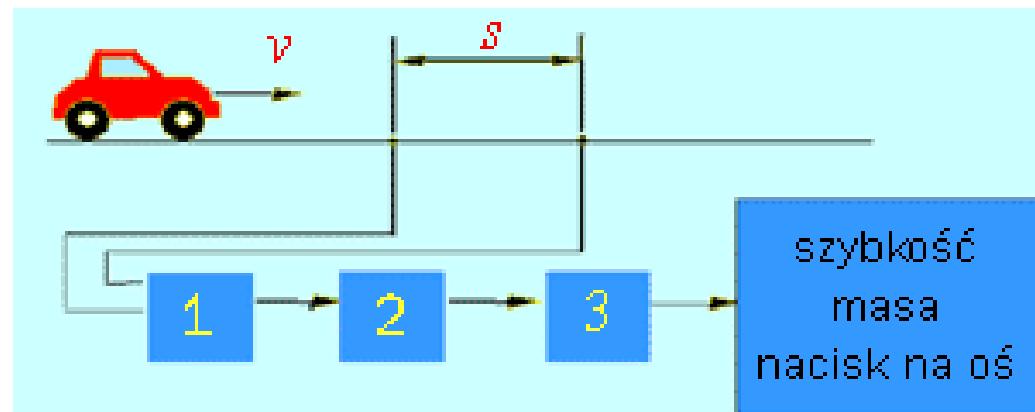
Polimerowy (PVDF) czujnik piezoelektryczny w formie przewodu



Do kontroli funkcji życiowych człowieka

Widok przewodu sensorowego PVDF:

- 1 - elektroda wewnętrzna,
- 2 - warstwa piezopolimeru,
- 3 - elektroda zewnętrzna,
- 4 - opona przewodu



Do monitoringu ruchu drogowego

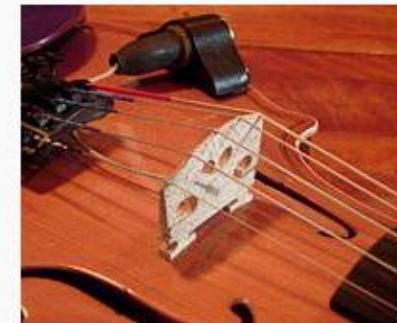
Piezoelektryczne przetworniki elektroakustyczne

Sygnalizatory akustyczne – w postaci cienkiej warstwy piezoelektryka – zapewniając duże natężenie dźwięku przy niewielkim poborze mocy, są stosowane w sprzęcie miniaturowym (brzęczyki), oraz w różnego rodzaju syrenach.

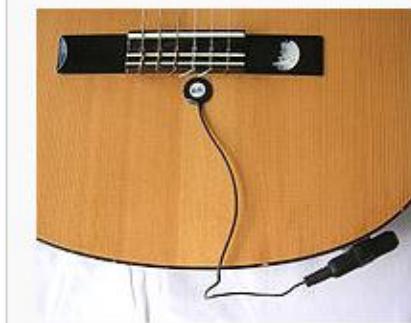
Wkładki gramofonowe w gramofonach z lat 1950-1990. Organia igły gramofonowej przenoszone są na kryształy piezoelektryka powodując powstanie napięć i uzyskanie sygnału elektrycznego odpowiadającego sygnałowi dźwiękowemu.

Głośniki – dwie płytki piezoelektryczne połączone w jedną całość. Dzięki zastosowaniu piezoelektryków mogą być zupełnie płaskie, a dźwięk nadawany jest jedynie w tym kierunku, w który głośnik jest zwrócony.

Mikrofony – są szeroko stosowane jako przetworniki w instrumentach akustycznych. Szczególnie wiernie odtwarzają wysokie tony i są również stosowane jako czujniki ultradźwięków.



Mostek skrzypiec z wbudowanym przetwornikiem



Piezoelektryczny przetwornik gitarowy



Mikrofon piezoelektryczny



Brzęczyk piezoelektryczny



FT-27T-4.0A BESTAR,
Przetwornik dźwięku: ...
2,68 zł



F/TCW05LF DIGISOUND,
Przetwornik dźwięku: ...
10,76 zł

Pomiary lepkości dynamicznej cieczy i gazów

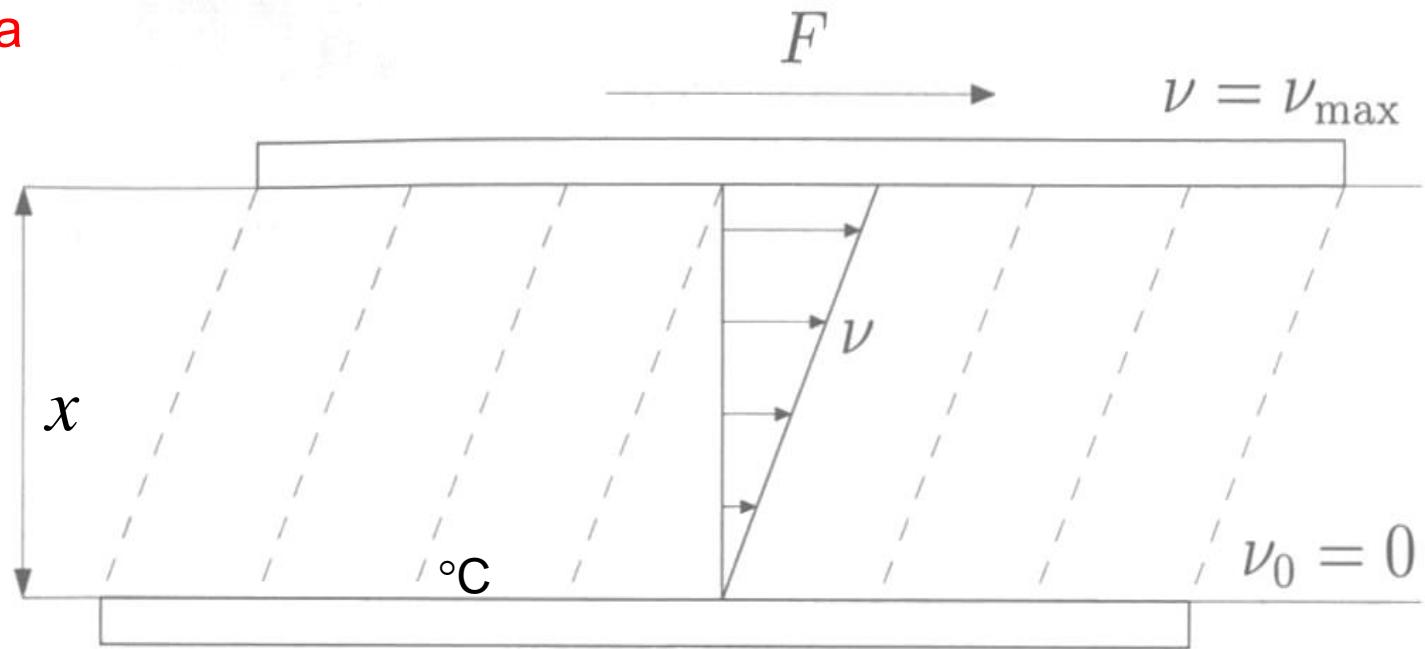
Lepkość dynamiczna

$$\eta = \frac{F}{S} \frac{x}{V_{max}}$$

S - powierzchnia

$\frac{F}{S} = \tau$ - styczne naprężenie ścinające

$[\eta] = \text{Nsm}^{-2} = \text{Pa} \cdot \text{s}$
(paskalosek unda)



Dla cieczy newtonowskich

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx}$$

τ - liniowo zależy od

$$\frac{dv}{dx}$$

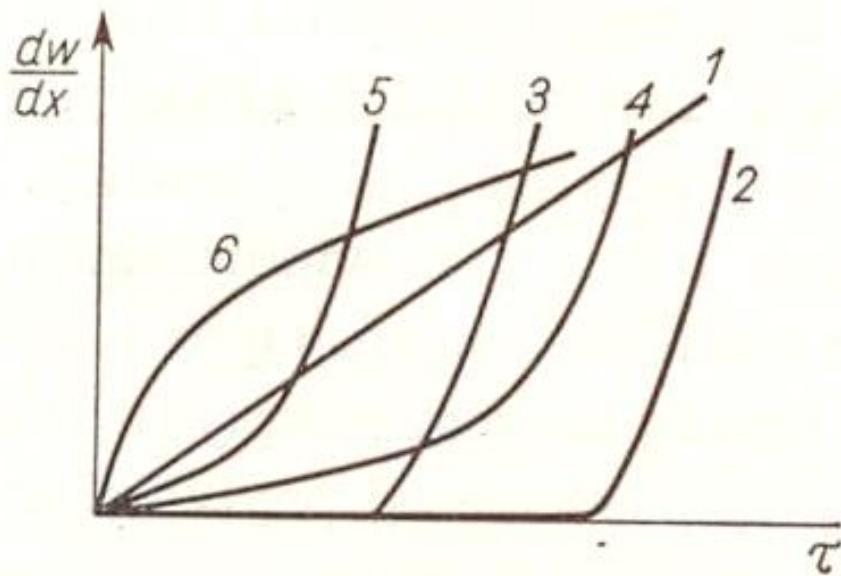
Lepkość statyczna (kinematyczna)

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad \rho - \text{gęstość płynu}$$

Lepkość cieczy maleje ze wzrostem temperatury, a dla gazów – rośnie.

Dla czystej wody przy 20°C $\eta = (1,0019 \pm 0,0003) \text{ cP}$

Dla powietrza przy 20°C $\eta = 181 \cdot 10^{-6} \text{ P}$



Charakterystyka cieczy newtonowskich i nie-newtonowskich

1 – ciecz newtonowskie, 2 – ciało Binghama (guma do żzucia, ter), 4 – majonez,
5 – papka papiernicza, 6 – krochmal

Metody pomiarów lepkości

Wiskozymetry kapilarne

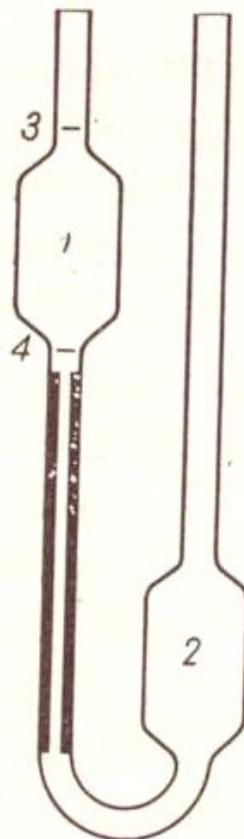
W rurce o okrągłym przekroju i małej średnicy r (kapilary) dla przepływu laminarnego cieczy spadek ciśnienia $p_1 - p_2$ na odcinku kapilary o długości L wyraża się zależnością:

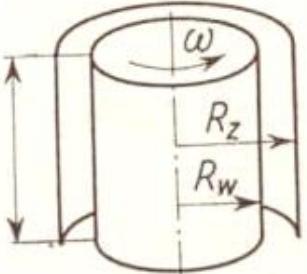
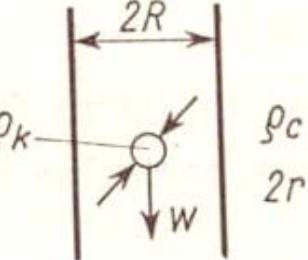
$$p_1 - p_2 = \eta \frac{8VL}{\pi r^4}$$

Zależność ta jest jednak w praktyce trudno realizowalna.

W praktyce stosuje się wiskozymetry Ostwalda, wykorzystujące metodę porównawczą.

Mierzy się czas przepływu określonej ilości cieczy ze zbiornika 1 do 2 obserwując przekroczenie menisku przez znaczniki poziomu 3 i 4 dla cieczy mierzonej x i wzorcowej w :



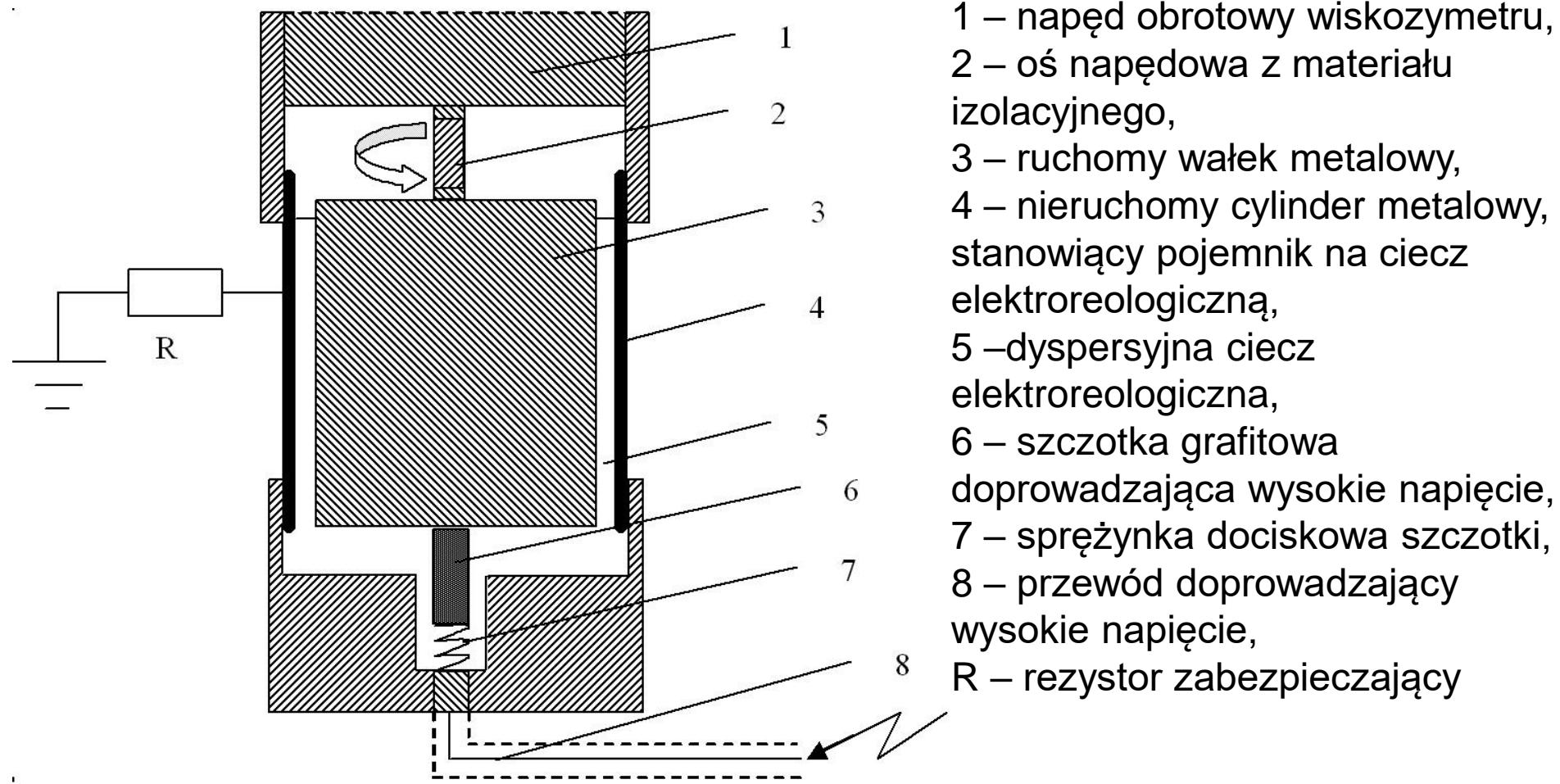
Schemat	Typ: Zależność:	Wielkość mierzona
	$\eta_x = \eta_w \frac{\rho_x t_x}{\rho_w t_w}$ <p>z współosiowymi cylindrami wewnętrzny wirujący</p> $\eta = \frac{M}{4\pi\omega L} \cdot \frac{1 - \left(\frac{R_w}{R_z}\right)^2}{R_w^2}$	moment M
	$\eta = \frac{2g}{g} \cdot \frac{\rho_k - \rho_c}{w \cdot \lambda} r^2$ <p>λ – współczynnik korekcyjny zależny od r i R</p>	prędkość w lub czas t

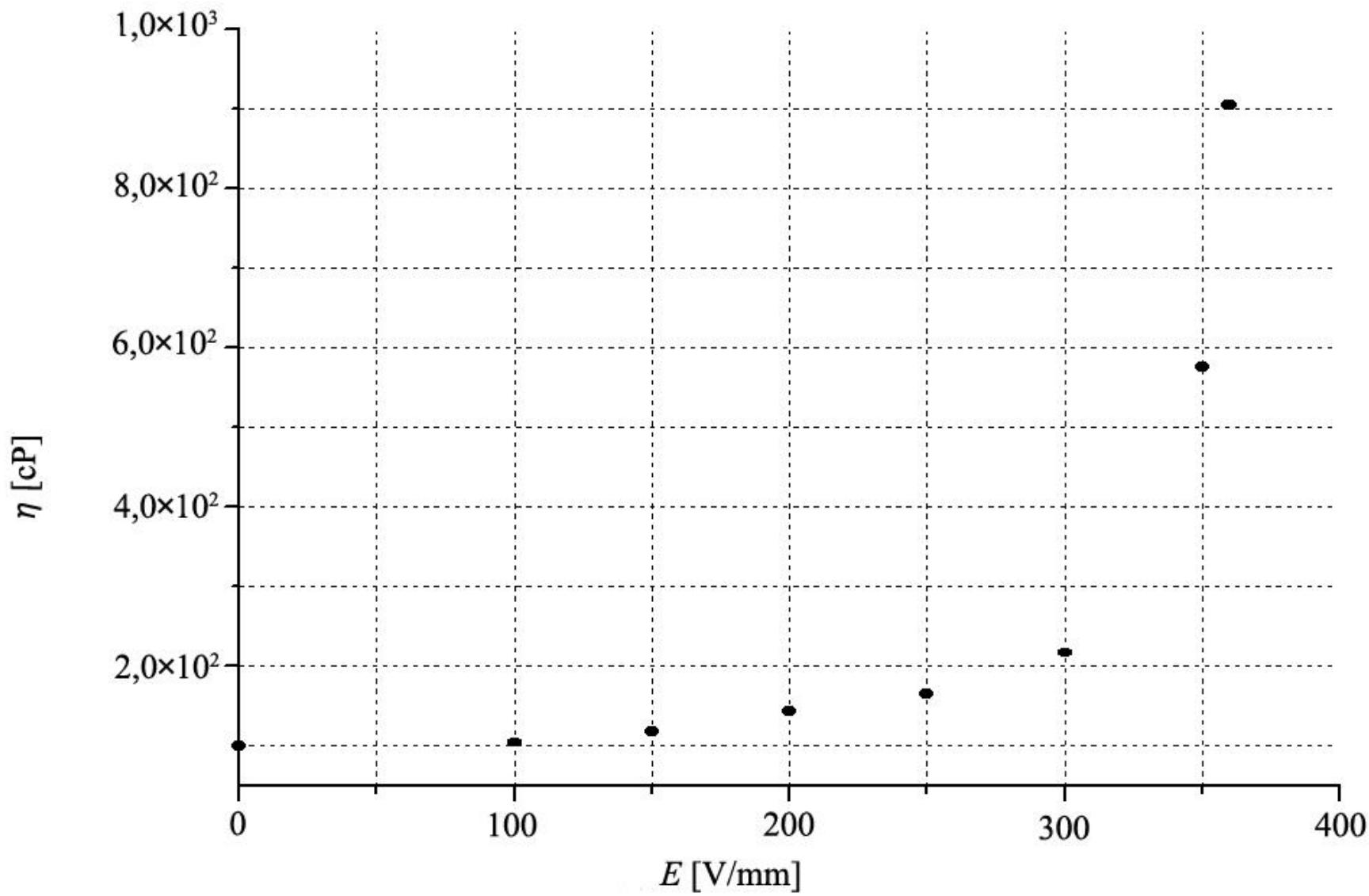
Rys. 5.27. Laboratoryjny wiskozymetr Ostwalda
1, 2 – zbiorniczki; 3, 4 – znaki poziomu

Rys. 5.28. Schematy i podstawowe wzory wiskozymetrów

Dyspersyjne ciecze elektroreologiczne

Dyspersyjne ciecze elektroreologiczne składają się z cząstek fazy stałej rozproszonych w nieprzewodzącej fazie ciekłej. Aktywność elektroreologiczną wykazuje układ dwufazowy, w którym zachodzi duża różnica pomiędzy przenikalnością elektryczną fazy stałej i fazy ciekłej.





Zależność lepkości η od pola elektrycznego E dla dyspersyjnej cieczy elektroreologicznej składającej się z 6% (wagowo) skrobi i oleju transformatorowego

Pomiary natężenia przepływu płynów

Masa lub objętość, która przepłynie przez przekrój rurociągu w jednostce czasu określa:

- masowe natężenie przepływu q_m (o wymiarze kg/s lub kg/h), lub
- objętościowe natężenie przepływu q_v (o wymiarze m³/s lub m³/h).

$$q_m = q_v \cdot \rho ,$$

gdzie ρ - masa właściwa (gęstość) wyrażona w kg/m³.

Wielkością wpływającą na rozkład prędkości w przekroju poprzecznym strugi płynu jest **lepkosć dynamiczna**.

Charakter przepływu zależy od wartości liczby Reynolds'a.

Dla liczby Reynolds'a $Re < 2300$ przepływ ma charakter laminarny, a dla $Re > 2800$ - turbulentny.

$$Re = \frac{\nu_{sr} D \rho}{\eta}$$

gdzie:

$D = 2r$ – średnica rurociągu w m,

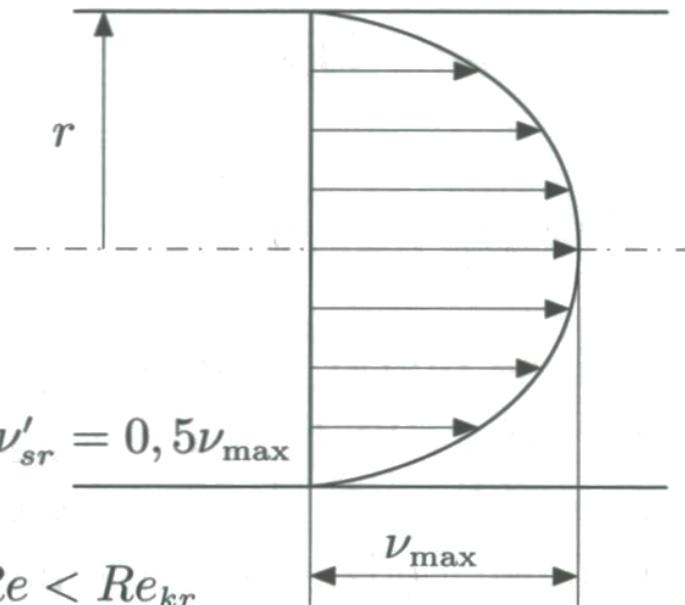
η - lepkość dynamiczna w Pa·s,

ρ - gęstość w kg/m².

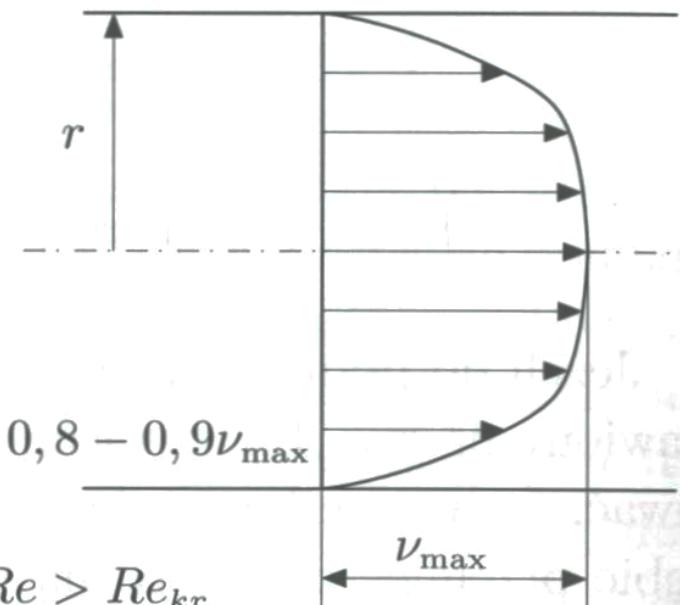
$\nu_{sr} = \frac{1}{S} \int v ds$ - średnia prędkość w m/s

s – przekrój poprzeczny rurociągu w m²

a



b



Rozkłady prędkości dla przepływów: a – laminarnego,
b – turbulentnego

Rozpatrując dwa przekroje I oraz II rurociągu należy zauważyć, że w każdym z nich dla różnych wysokości H_1 oraz H_2 wystąpią różne ciśnienia p_1 oraz p_2 oraz dla różnych powierzchni przekrojów - różne średnie prędkości v_1 oraz v_2 . W każdym z przekrojów energia jest sumą trzech energii (dla masy $m = 1 \text{ kg}$, czyli energii jednostkowych):

- potencjalnej $E_p = Hg,$

- kinetycznej $E_k = \frac{v^2}{2}$

- objętościowej $E_v = \frac{p}{g}$

gdzie g - przyspieszenie ziemskie.

Suma energii jednostkowych w obu przekrojach, przy pominięciu strat cieplnych, spowodowanych m.in. lepkością, jest stała:

$$E_{p1} + E_{k1} + E_{v1} = E_{p2} + E_{k2} + E_{v2}.$$

Po podstawieniu otrzymuje się równanie Bernouiego:

$$H_1g + \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = H_2g + \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

Mnożąc przez ρ otrzymuje się równanie ciśnień

$$p_1 + \frac{v_1^2 \rho}{2} + H_1 g \rho = p_2 + \frac{v_2^2 \rho}{2} + H_2 g \rho$$

Ciśnienie statyczne + ciśnienie dynamiczne + ciśnienie niwelacyjne = const.

Przepływomierze

Objętość lub masę płynu, który przepłynął w danym czasie określa się całkując natężenie objętościowe lub masowe przepływu.

Przyrządy służące do wyznaczania objętości płynu nazywamy licznikami płynu. Najbardziej znanymi licznikami płynu są m.in. gazomierze, wodomierze w gospodarstwach domowych oraz liczniki objętości paliwa na stacjach benzynowych.

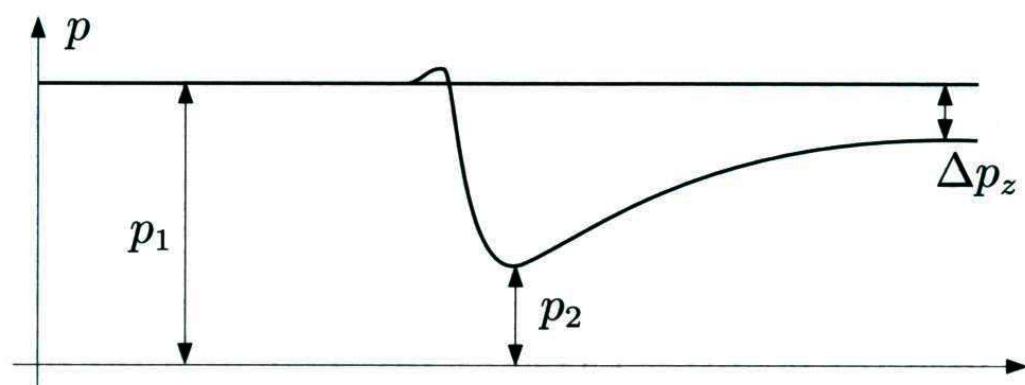
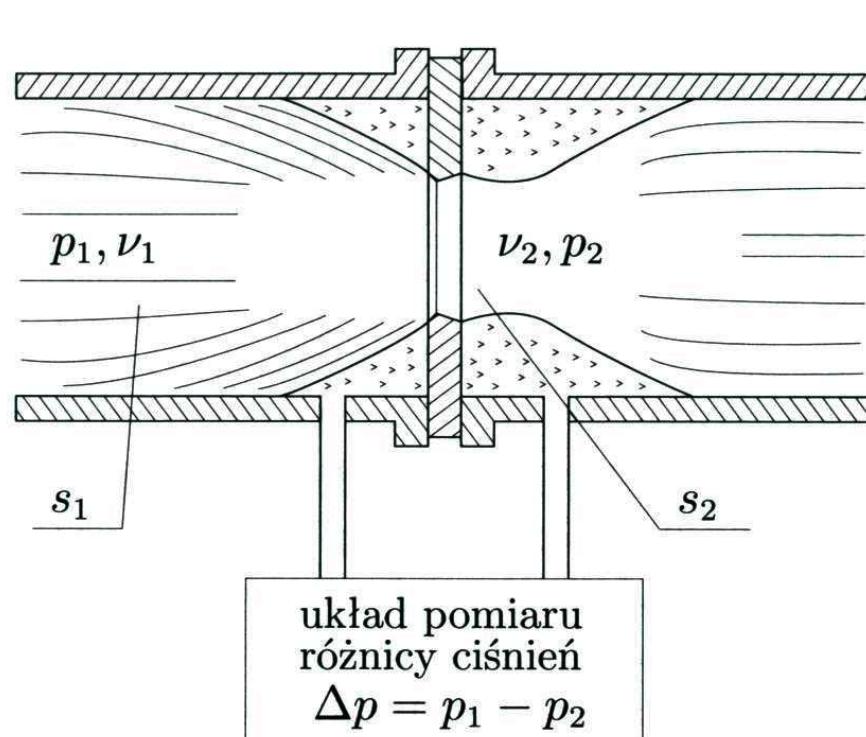
Przepływomierz zwężkowy

W przekroju rurociągu umieszcza się zwężkę (kształt: od kryzy do dyszy profilowanej). Przez każdy przekrój - rurociągu i dyszy - w jednostce czasu przepływa ta sama objętość płynu, równa natężeniu objętościowemu:

$$q_v = v_1 s_1 = v_2 s_2 \quad b$$

(prawo ciągłości przepływu)

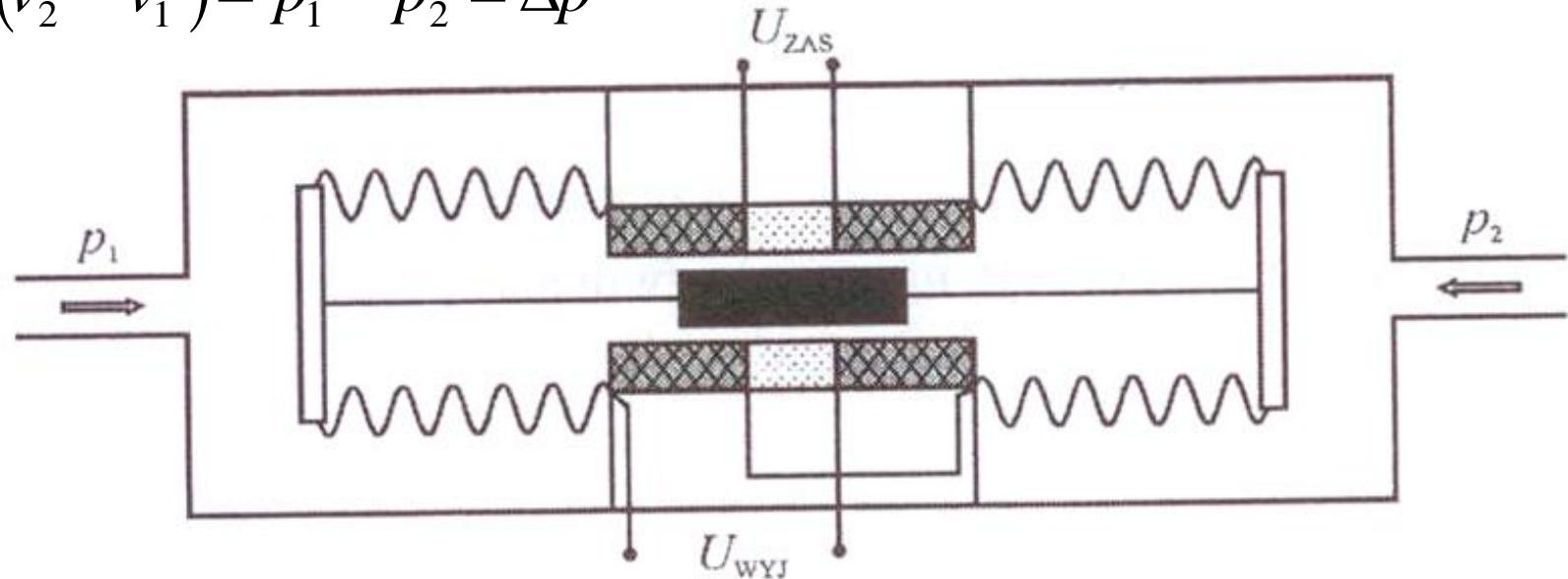
Stąd $\frac{v_1}{v_2} = \frac{s_2}{s_1}$



Przepływ płynu przez zwężkę:
a – ilustracja przepływu,
b – wykres ciśnień

Dla poziomo ułożonego rurociągu: $H_1 = H_2$, równanie ciśnień przyjmuje postać:

$$\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) = p_1 - p_2 = \Delta p$$



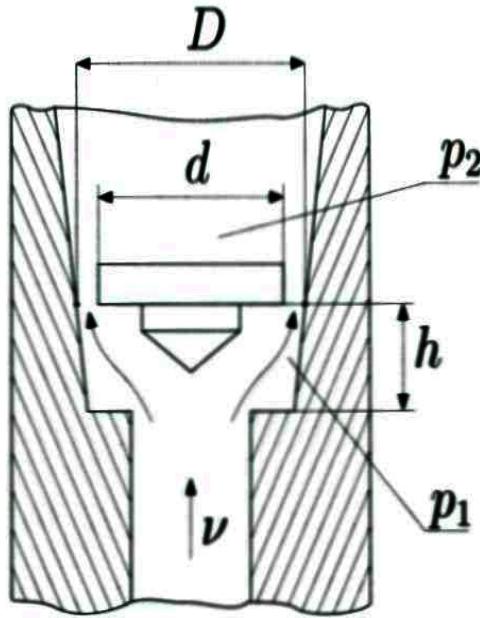
Stąd objętościowe natężenie przepływu:

$$q_v = s_1 \frac{m}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = s_1 \alpha_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

gdzie $m = \frac{s_2}{s_1}$ $\alpha_0 = \frac{m}{\sqrt{1-m^2}}$

Masowe natężenie przepływu: $q_m = q_v \rho = s_1 \alpha_0 \sqrt{2\rho \Delta p}$

Przepływomierz pływakowy – rotametr



W stanie równowagi

$$m_p g = \frac{\pi d^2}{4} (p_1 - p_2) = \frac{\pi d^2}{4} \Delta p$$

m_p – masa pływaka

Objętościowe natężenie przepływu

$$q_v = \alpha_p s \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

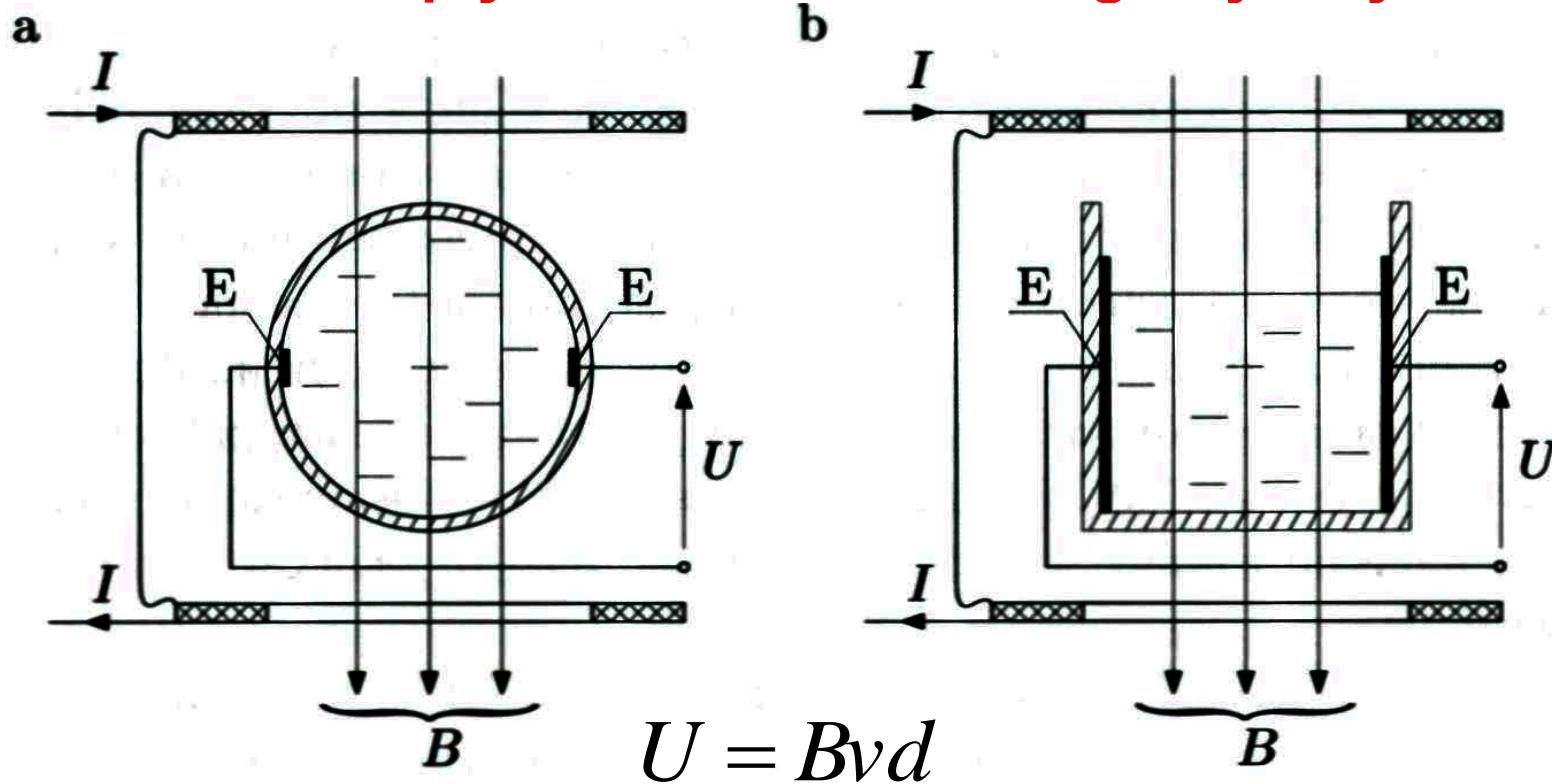
gdzie: α_p – współczynnik przepływu, $s = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$

Ilustracja zasady działania przepływomierza pływakowego

Przepływomierz turbinowy

Przy niewielkich natężeniach przepływów stosuje się przepływomierze skrzydełkowe, w których oś wirnika umieszczona jest prostopadle do kierunku przepływu płynu. Stosuje się je m.in. do pomiaru zużycia wody w gospodarstwach domowych oraz pomiaru paliwa na stacjach benzynowych. W przypadku dużych średnic stosuje się wirniki o łopatkach ukształtowanych śrubowo, obracających się wokół osi zgodnej z osią przepływu.

Przepływomierz elektromagnetyczny



Ilustracja zasady działania przepływomierzy elektromagnetycznych w przypadku: a – rurociągu, b – w kanale otwartym

Warunkiem indukowania się napięcia na elektrodach jest:

- wykonanie fragmentu rurociągu lub kanału - w którym znajdują się elektrody - z materiału izolacyjnego,
- przewodność cieczy większa niż $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ (woda w sieci wodociągowej ma przewodność $0,7 \mu\text{S}/\text{cm}$).

Czujniki i przetworniki

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

Wykład 7

**Czujniki ciśnienia i wilgotności.
Czujniki do pomiarów pH roztworów
(pH-metry)**

Pomiary ciśnienia

Ciśnienie – siła działająca na jednostkę powierzchni:

$$p = \frac{dF}{ds}$$

Jednostki ciśnienia:

$$\text{paskal Pa} = \text{N/m}^2$$

atmosfera techniczna at = kG/cm²

$$1 \text{ kG} = 9,80665 \text{ N}$$

$$1 \text{ at} = 9,81/\text{m} \cdot 10^{-4} = 98066,5 \text{ Pa} = 980,665 \text{ hPa} = 0,980665 \text{ bar}$$

$$1 \text{ hPa} = 10^2 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

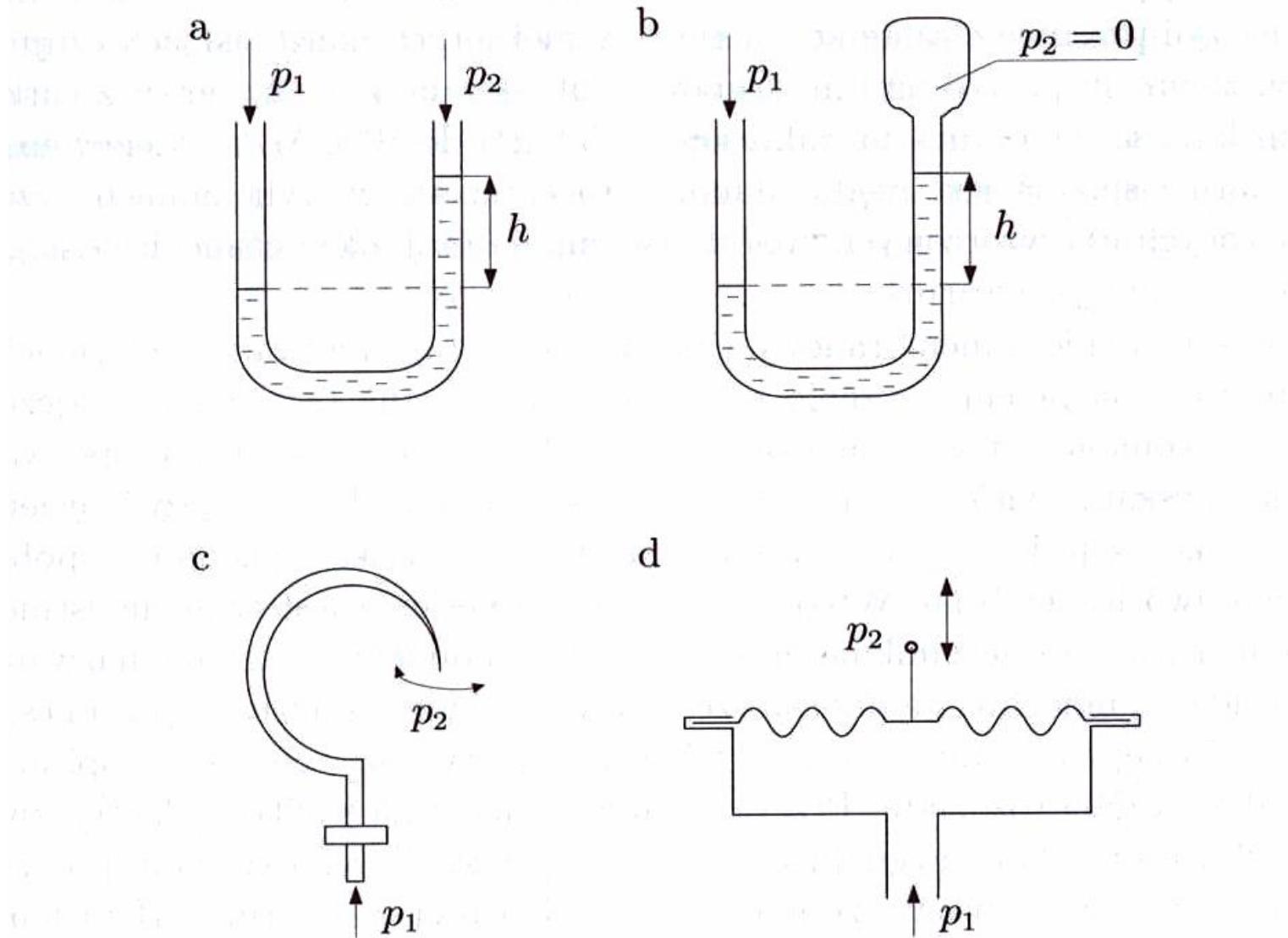
$$1 \text{ at} = 735,559 \text{ Tr} = 735,559 \text{ mmHg}$$

$$\text{tor , } 1 \text{ Tr} = 1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa}$$

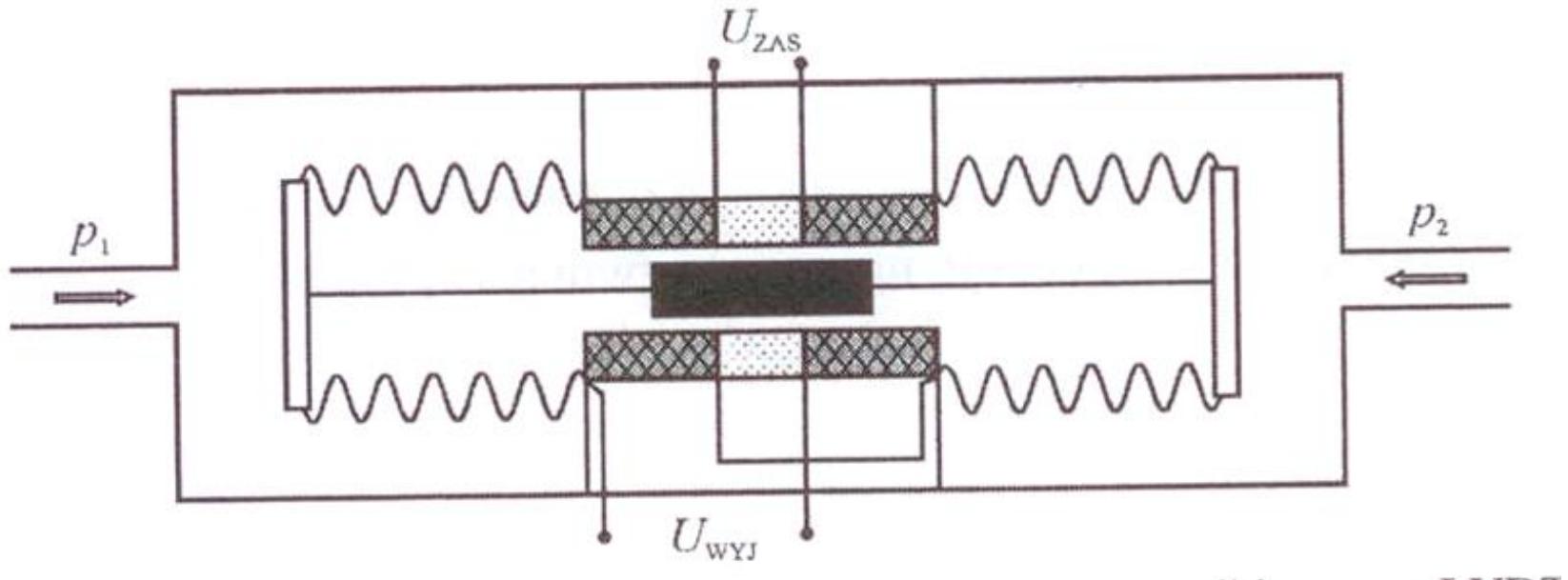
$$\text{atm, } 1 \text{ atm} = 760 \text{ Tr} = 760 \text{ mmHg} = 1,0332 \text{ at}$$

atm - atmosfera fizyczna (*atmosfera normalna*) równa ciśnieniu 760 mmHg w temperaturze 273,15 K (0 °C), przy normalnym przyspieszeniu ziemskim.

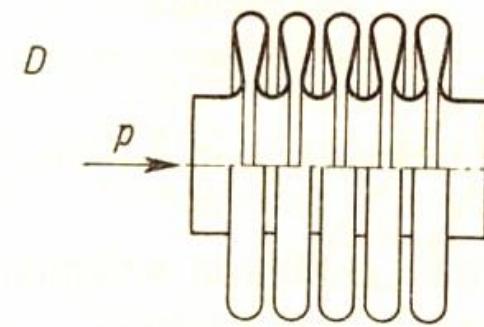
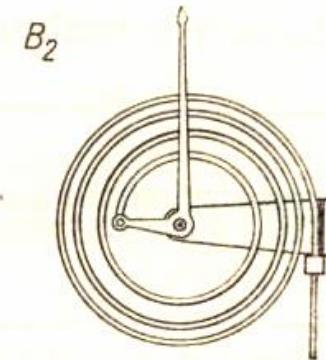
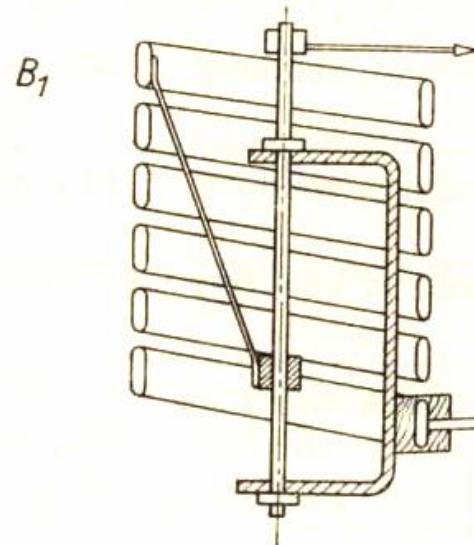
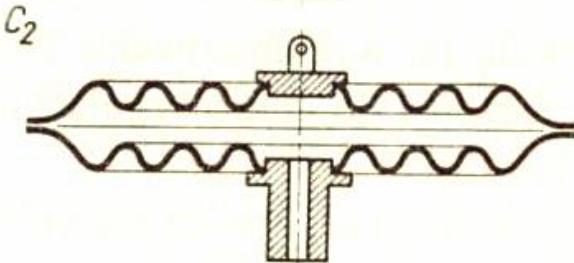
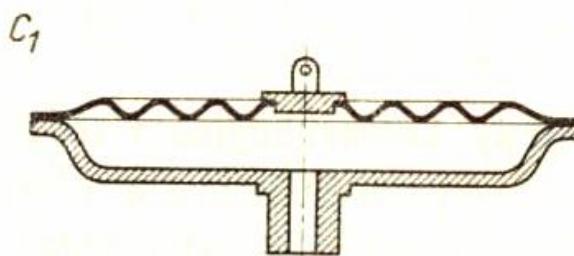
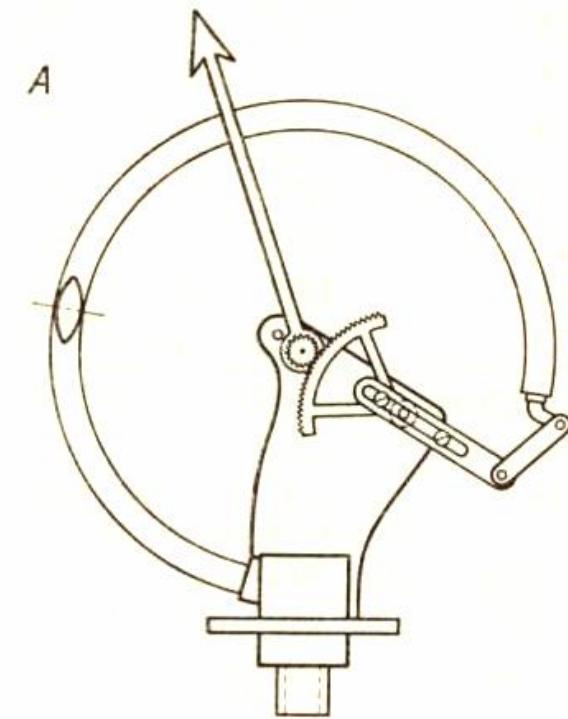
1 atm jest średnim ciśnieniem atmosferycznym na poziomie morza.



Rys. 8.2. Podstawowe rodzaje manometrów (ciśnieniomierzy) z wielkością wyjściową mechaniczną: a – U-rurka do pomiaru różnicy ciśnień, b – U-rurka do pomiaru ciśnienia atmosferycznego, c – z rurką Bourdona, d – z membraną



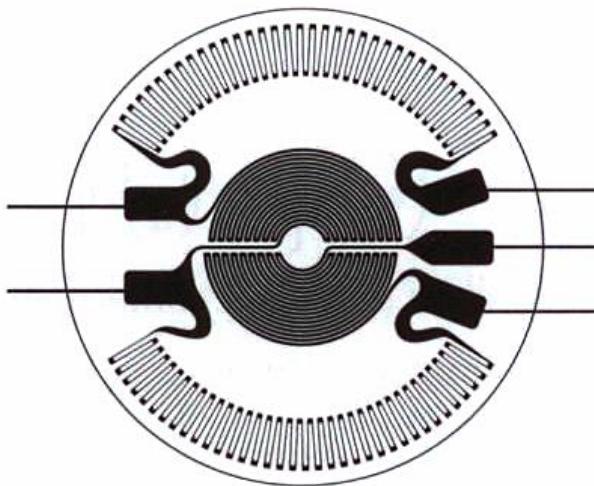
Manometr różnicowy z czujnikiem indukcyjnym



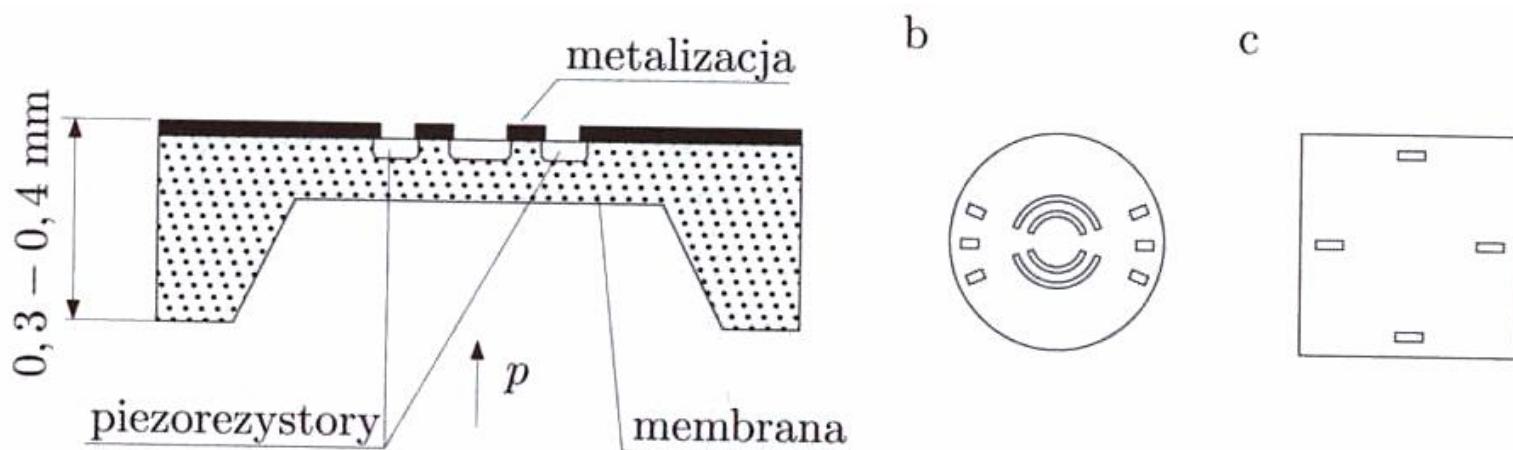
Element Nr.		A	B ₁ , B ₂	C ₁ , C ₂	D
Zakres bar	min.	10^{-2}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-3}
	max.	10^3	10^2	10	10

Rys. 2.63. Elementy sprężyste manometrów

a) pojedyncza turka Bourdona; B₁, B₂ – wielozwojowe rurki Bourdona; C₁, C₂ – membrana i puszka membranowa; D – mieszek



Rys. 8.5. Przykład tensometrów mostka umieszczonego na powierzchni membrany metalowej płaskiej



Rys. 8.6. Przykład: a – przetwornika ciśnienia z membraną krzemową i wdfundowanymi piezorezystorami, b – rozłożenia piezorezystorów na membranie kołowej, c – na membranie prostokątnej

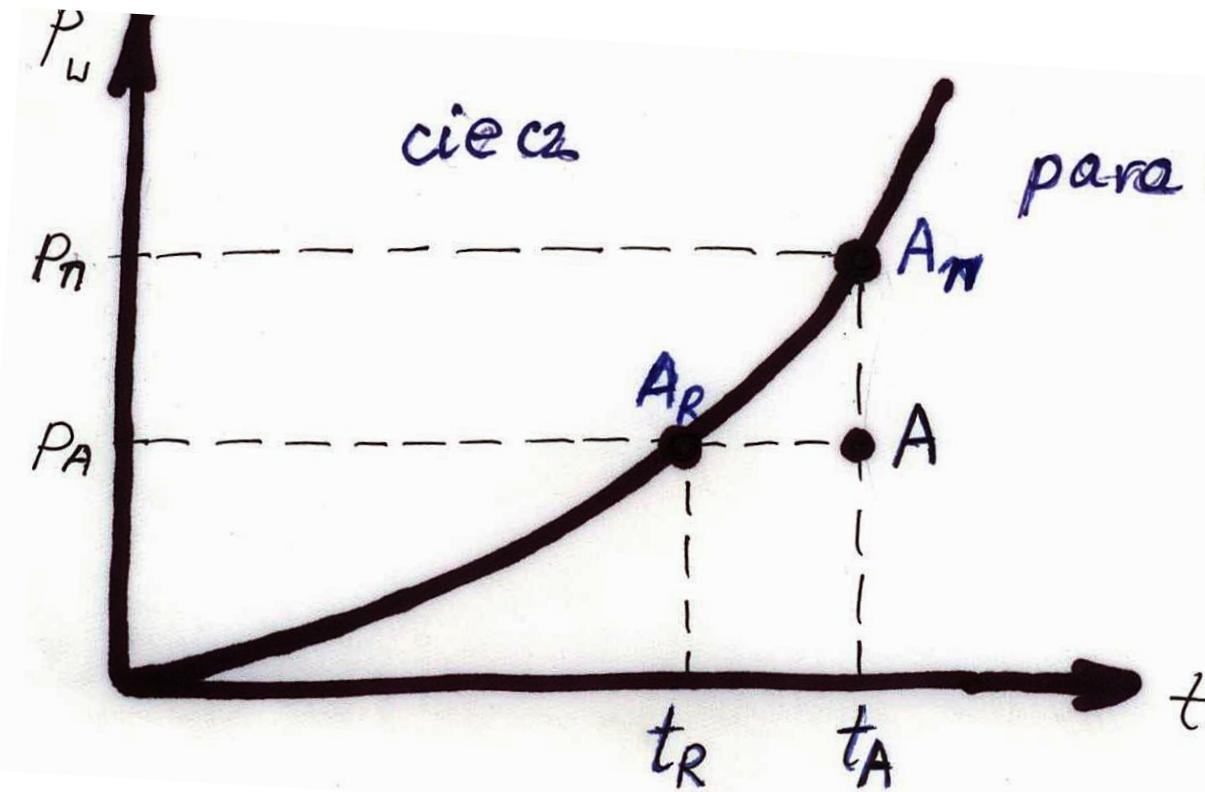
POMIARY WILGOTNOŚCI POWIETRZA

Wilgotność powietrza – zawartość pary wodnej w powietrzu.

Wilgotność bezwzględna - masa pary wodnej zawarta w 1 m^3 powietrza [g/m^3].

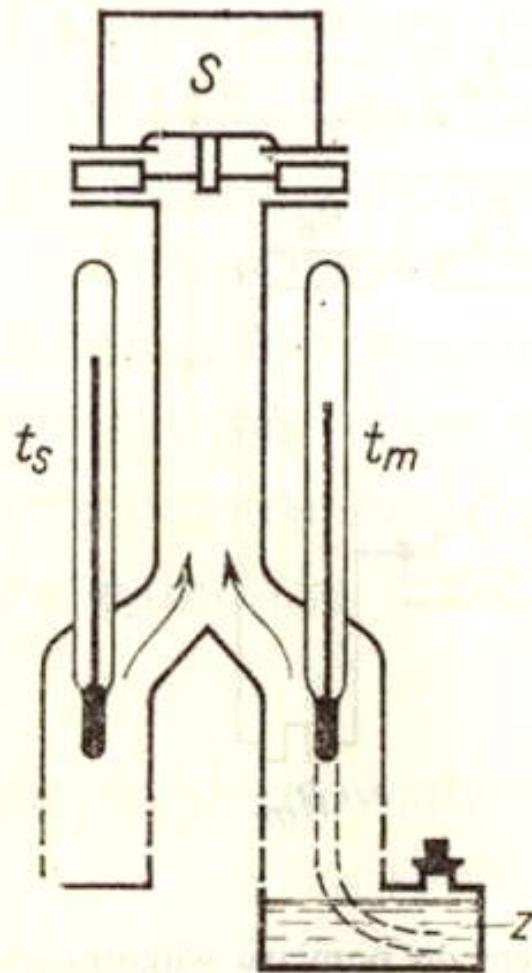
Wilgotność właściwa - masa pary wodnej przypadająca na 1 kg powietrza (powietrza ważonego razem z parą wodną).

Wilgotność względna - stosunek ciśnienia cząstkowego pary wodnej zawartej w powietrzu do ciśnienia pary wodnej nasyconej w tej samej temperaturze [%],



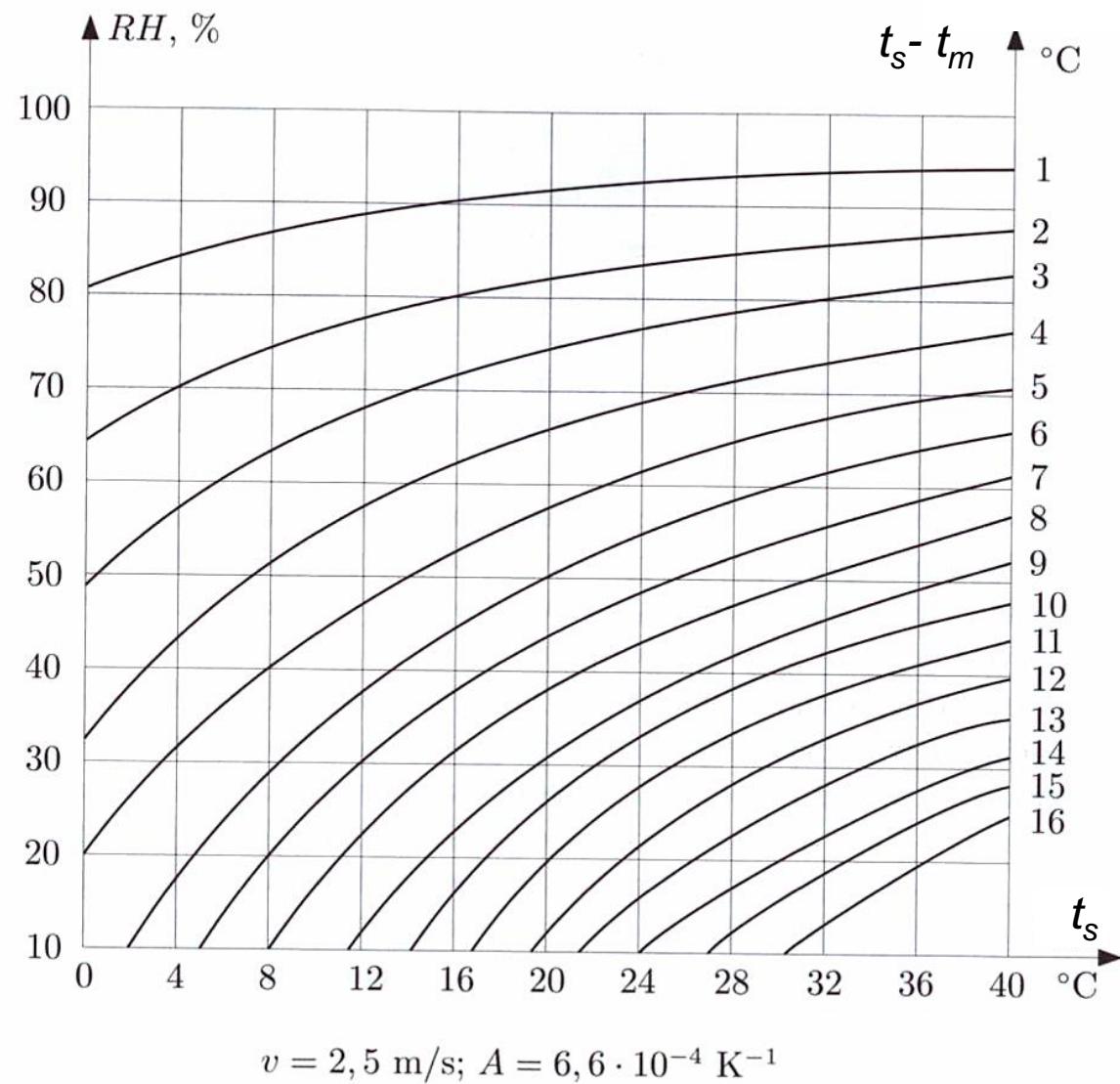
Wilgotność względna

$$RH = \frac{P_A}{P_n} 100 \quad [\%]$$

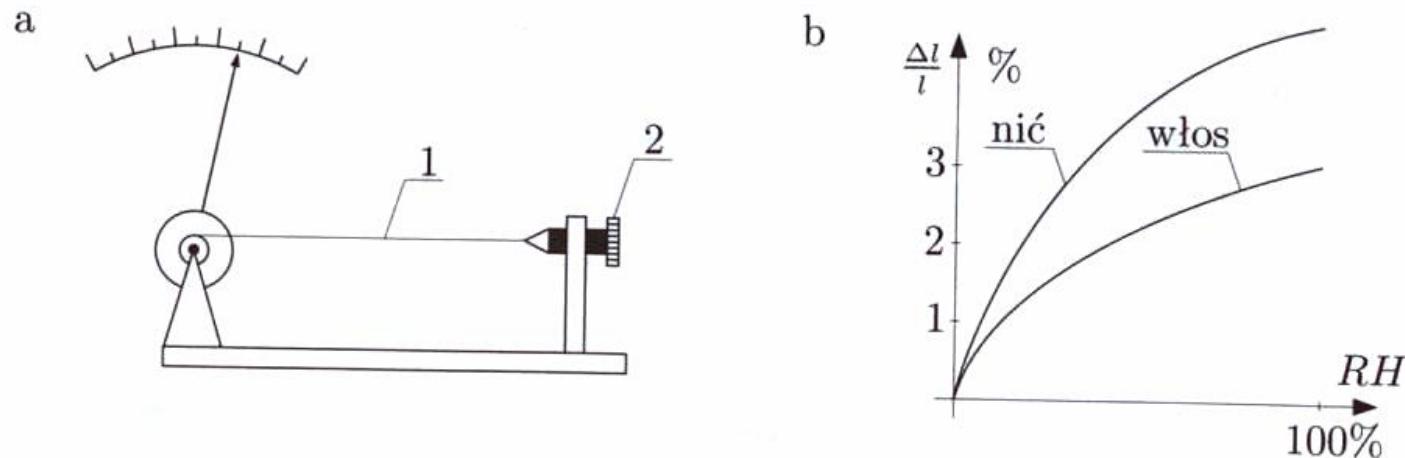


Rys. 4.128. Psychrometr Assmana
 t_s, t_m – termometry suchy i mokry; s – silniczek; z – zbiornik z wodą

$$\Delta t = t_s - t_m = f(\varphi)$$

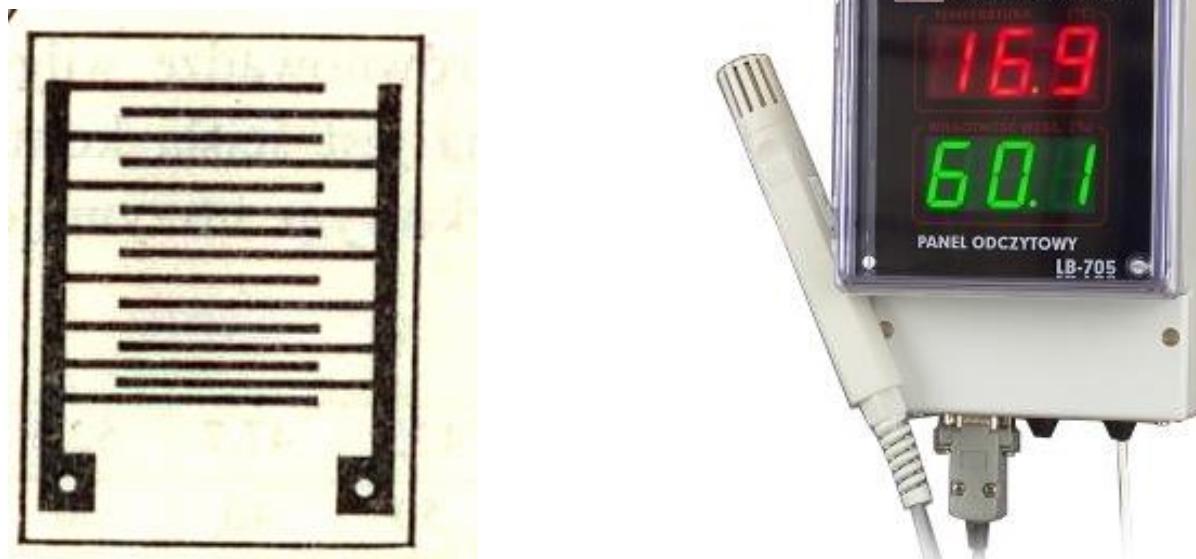


Higrometr włosowy



Rys. 11.1. Higrometr włosowy: a – przykład konstrukcji,
b – typowe charakterystyki

Rezystancyjne czujniki wilgotności



Czujniki do pomiarów pH roztworów (pH-metry)

Skala pH – ilościowa skala kwasowości i zasadowości roztworów wodnych związków chemicznych. Skala ta jest oparta na aktywności jonów hydroniowych $[H_3O^+]$ w roztworach wodnych.

Wartość pH definiuje się jako:

$$pH = -\log_{10}[H_3O^+],$$

czyli: **minus logarytm dziesiętny aktywności jonów hydroniowych $[H_3O^+]$ wyrażonych w mol/dm³.**

Oryginalnie pH zostało zdefiniowane jako:

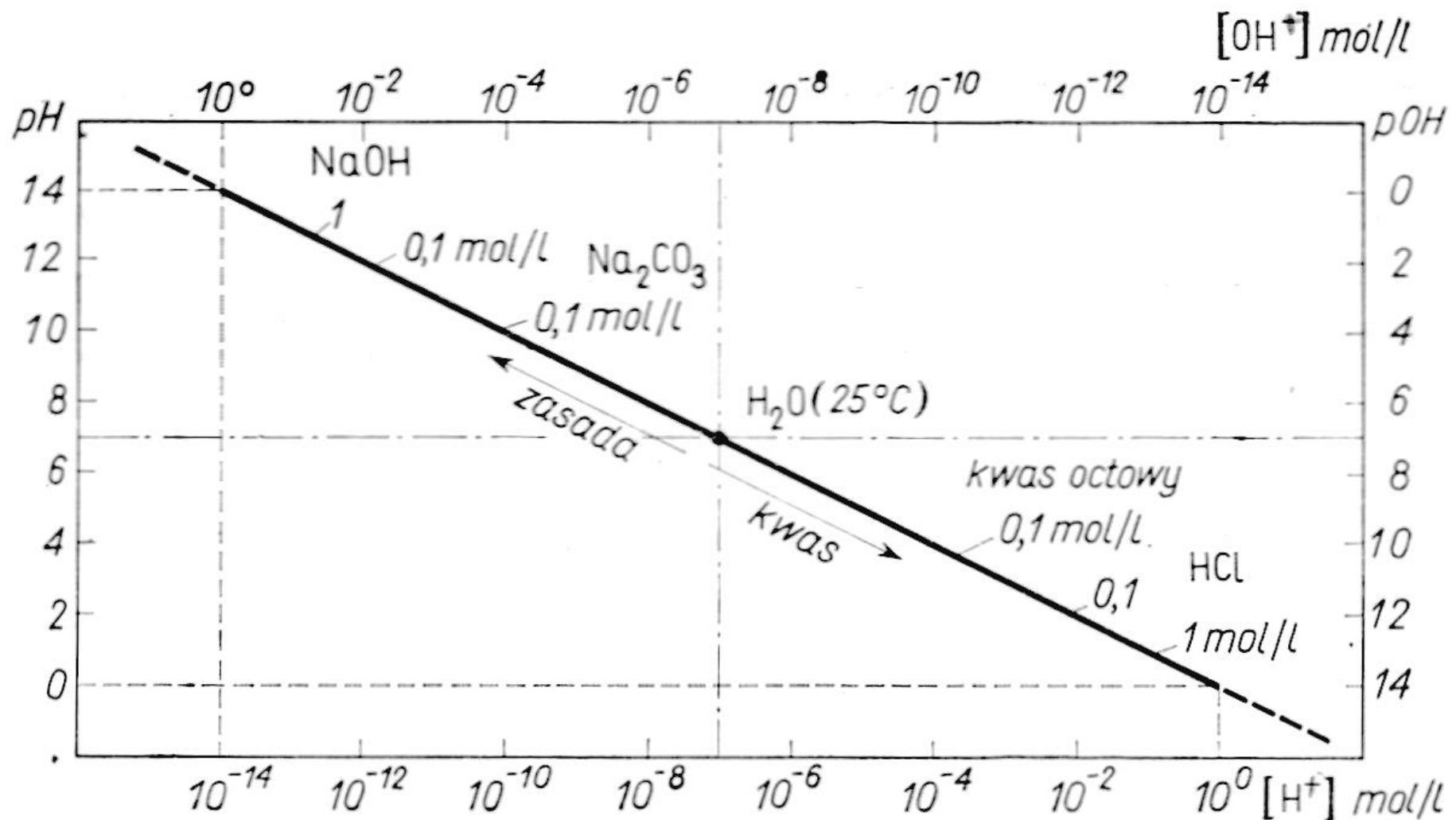
$$pH = -\log_{10}[H^+],$$

czyli: **minus logarytm stężenia jonów wodorowych (H^+).**

Współczesne badania wykazały jednak, że **wolne jony wodorowe (wolny proton) nigdy nie występują w roztworach wodnych**, gdyż ulegają natychmiast solwatowaniu wg równania:



W wielu podręcznikach jednak, dla uproszczenia, pomija się ten fakt i nadal podaje się starą definicję skali pH.



Roztwór obojętny (H_2O) w temperaturze 25°C ma $p\text{H} = 7$, co odpowiada stężeniu jonów wodorowych $[\text{H}^+] = 10^{-7}\text{ mol/litr}$, a poprawniej - stężeniu jonów hydroniowych $[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-7}\text{ mol/l}$.

Pomiar $p\text{H}$ polega na zanurzeniu elektrody pomiarowej do roztworu wodnego badanej substancji. Wartość SEM między elektrodą a roztworem jest miarą $p\text{H}$.

Wartość pH roztworu X, w którym jest zanurzone standardowe ogniwo galwaniczne i dla którego zmierzono wartość siły elektromotorycznej E_X , wynosi:

$$pH(X) = pH(S) + \frac{(E_s - E_x)}{RT \ln 10}$$

gdzie:

E_s i $pH(S)$ – odpowiednio siła elektromotoryczna ogniwa standardowego zanurzonego w roztworze wzorcowym (np: w wodzie destylowanej) i pH tego roztworu w danej temperaturze,

R – uniwersalna stała gazowa,

T – temperatura bezwzględna.

pH jest jednostką bezwymiarową i ma charakter jedynie porównawczy, nie przekładający się bezpośrednio na stężenie czy aktywność jonów hydroniowych.

Dla roztworów o stężeniach mniejszych niż $0,1 \text{ mol/dm}^3$, których $pH = 2 \div 12$ można przyjąć, że

$$pH = -\lg \gamma [H^+]$$

gdzie γ – współczynnik aktywności tych jonów.

Czyli w tym zakresie pokrywają się obydwie skale

Substancja	pH
<u>Kwas solny</u>	0
<u>Kwas akumulatorowy</u>	< 1,0
<u>Kwas żołądkowy</u>	1,5 – 2
<u>Sok cytrynowy</u>	2,4
<u>Coca-cola</u>	2,5
<u>Ocet</u>	2,9
<u>Sok pomarańczowy</u>	3,5
<u>Piwo</u>	4,5
<u>Kawa</u>	5,0
<u>Herbata</u>	5,5
<u>Kwaśny deszcz</u>	< 5,6
<u>Mleko</u>	6,5
<u>Czysta woda</u>	7
<u>Ślina</u> człowieka	6,5 – 7,4
<u>Krew</u>	7,1 – 7,4
<u>Woda morska</u>	8,0
<u>Mydło</u>	9,0 – 10,0
<u>Woda amoniakalna</u>	11,5

pH-metry

pH-metr składa się z miliwoltomierza, o bardzo dużej rezystancji wejściowej i elektrody wskaźnikowej. SEM ogniwą utworzonego z elektrody wskaźnikowej (zanurzonej w roztworze badanym) i elektrody porównawczej (zanurzonej w roztworze wzorcowym o znanym pH):

$$E = E^0 - \frac{2.303RT}{F} \text{pH}$$

gdzie: E - zmierzona SEM ogniwą,

E^0 - potencjał elektrody wzorcowej,

R - stała gazowa,

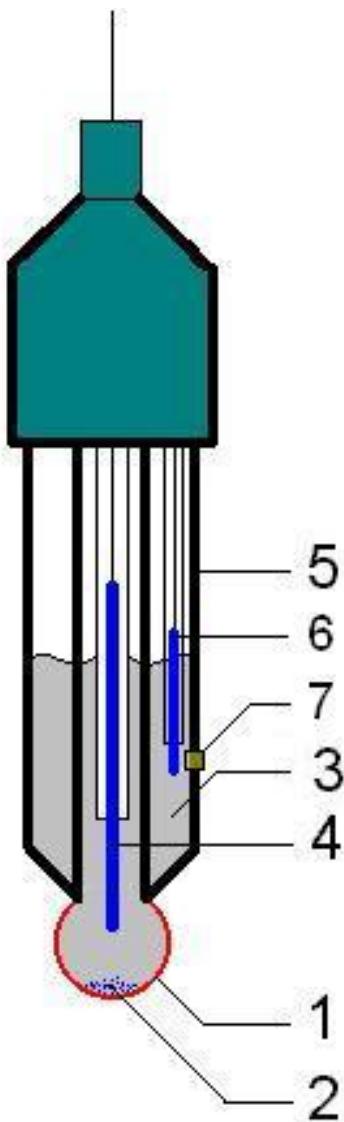
T - temperatura,

F - stała Faradaja.

Bardziej złożone pH-metry są dodatkowo zaopatrzone w termometry, gdyż temperatura ma wpływ na pomiar. Prostsze pH-metry są zwykle wyskalowane na warunki standardowe (temperatura 25°C) i gdy pomiaru dokonuje się w zbliżonych warunkach (20 °C do 30 °C) błąd pomiaru wynikający ze zmiany temperatury nie jest bardzo istotny.

Sondy pH

Najbardziej rozpowszechnione są pH-metry ze zintegrowanymi elektrodami (wzorcową i pomiarową) w jednej, szklanej sondzie, o kształcie palca. Układ ten jest zwykle oparty na wzorcowym roztworze **chlorku srebra** i układzie elektrod wykonanych ze **srebra**.



- 1) kulka z porowatego szkła, przez który mogą swobodnie przenikać jony hydroniowe odpowiadające za *pH* analizowanego roztworu,
- 2) czasami na dnie kulki zbiera się nieco stałego **chlorku srebra**, co jest zjawiskiem normalnym, nie wpływającym na czułość pomiaru,
- 3) wewnętrzny roztwór wzorcowy - zwykle 0,1 M HCl ($M=\text{mol}/\text{dm}^3$),
- 4) elektroda pomiarowa - wykonana ze **srebra**,
- 5) szklana obudowa całego układu elektrod,
- 6) elektroda wzorcową - wykonana ze **srebra** i zanurzona we wzorcowym roztworze **chlorku srebra**
- 7) membrana łącząca roztwór wzorcowy z roztworem, którego *pH* się mierzy - membrana ta jest zwykle wykonana z gęstego spieku **ceramicznego**, który zapobiega mieszanemu się obu roztworów ale zapewnia ich elektryczne połączenie.

CZUJNIKI I PRZETWORNIKI

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

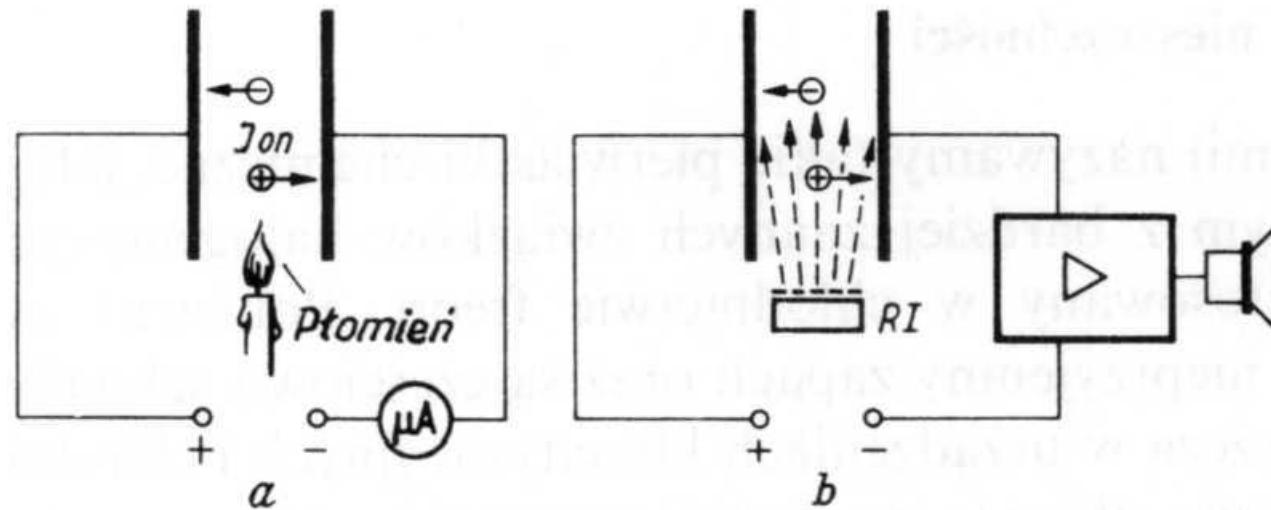
Wykład 8

**Czujniki gazów
Czujniki fotoelektryczne**

Czujniki gazów wykorzystujące zjawisko jonizacji

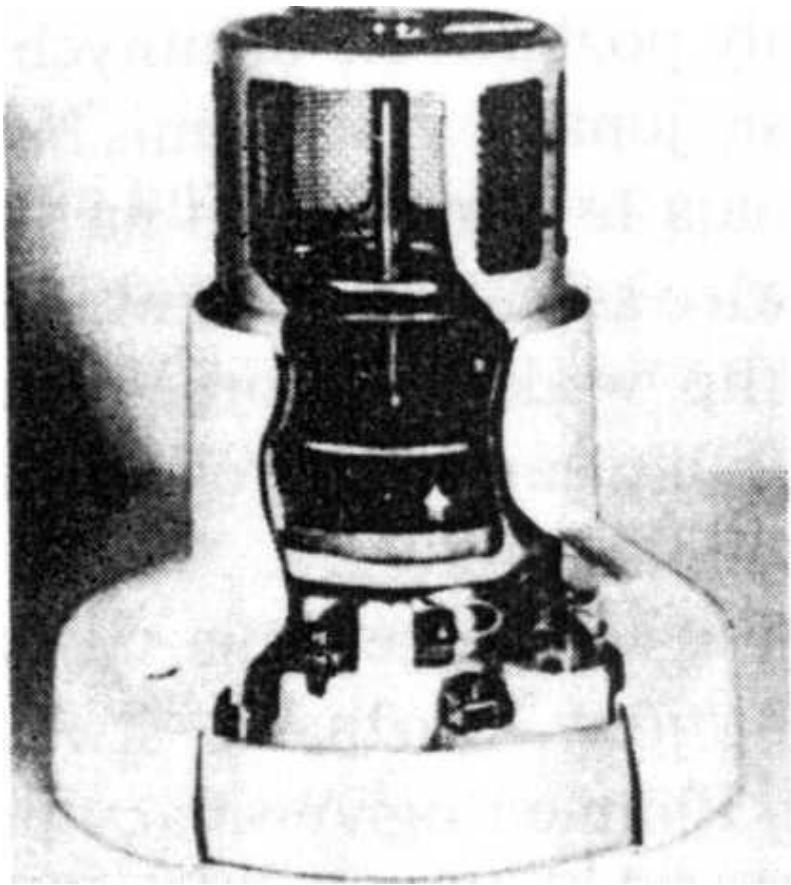
W wysokiej temperaturze cząsteczki gazu rozpadają się na jony. Płomień ogrzewający powietrze między okładzinami kondensatora powoduje przepływ niewielkiego prądu, gdyż jony podążają do ujemnej elektrody.

Podobnie promieniowanie jonizujące i rentgenowskie jonizuje powietrze i inne gazy.



- a) ciepło jonizuje powietrze znajdujące się w polu kondensatora,
- b) izotop radu RI jonizuje powietrze w polu kondensatora

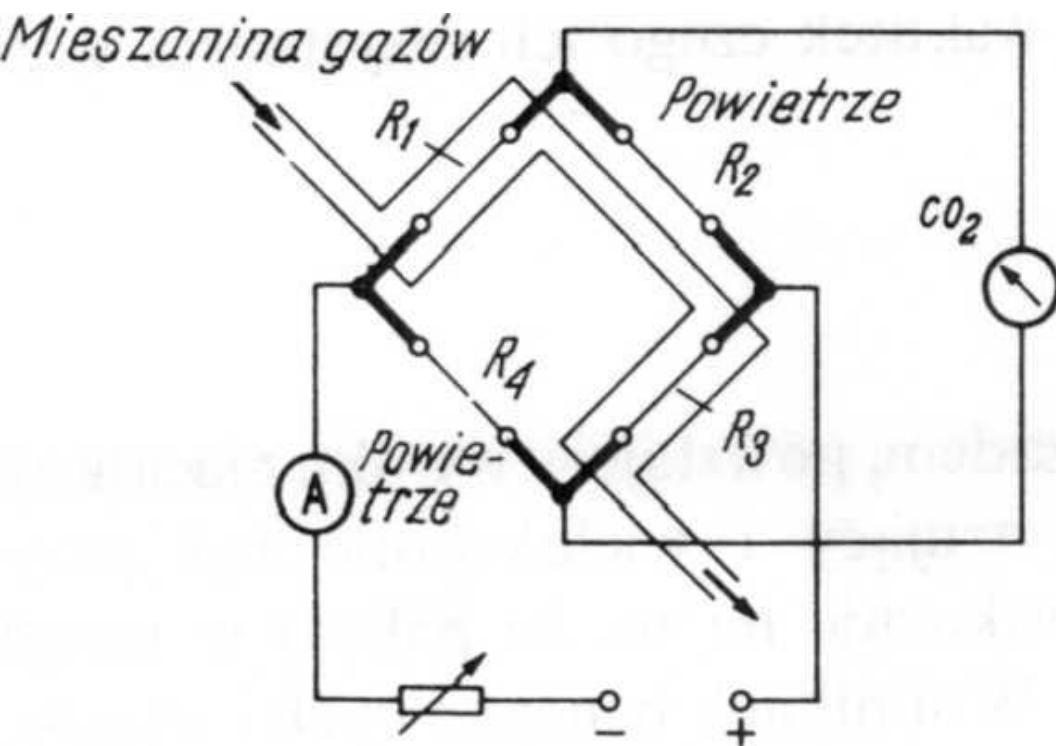
Jeżeli między okładziny kondensatora dostanie się inna substancja, np. dym, zmieni się stopień zjonizowania gazu i zmniejszy się prąd jonizacyjny, gdyż cząsteczki dymu mają większą bezwładność niż molekuły gazu. Czujnik taki można wykorzystywać jako sygnalizator przeciwpożarowy.



Przekrój jonizacyjnego sygnalizatora przeciwpożarowego firmy Cerberus AG. Jonizacja powietrza między okładzinami cylindrycznego kondensatora następuje pod wpływem umieszczonego poniżej radioizotopu.

Czujniki zawartości dwutlenku węgla

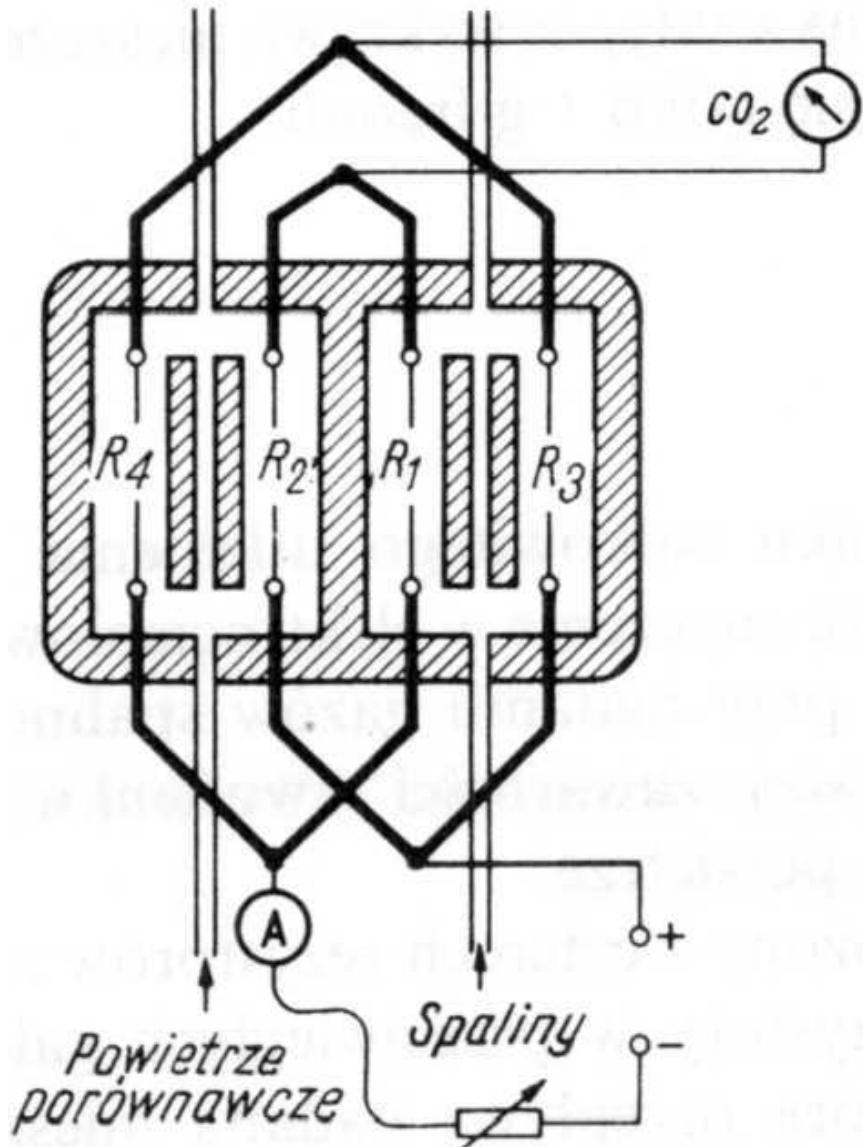
Dwutlenek węgla (CO_2) powstaje w wyniku całkowitego utlenienia węgla. Mieszanina gazów o większej zawartości dwutlenku węgla przewodzi ciepło znacznie gorzej niż czyste powietrze.



Wszystkie 4 druty platynowe są ogrzewane do temperatury ok. 100°C przepływającym przez nie prądem. Mostek równoważy się w stanie, gdy wszystkie jego gałęzie znajdują się w normalnym powietrzu. Gdy badana mieszanina gazów o gorszym przewodnictwie cieplnym dostanie się do komory, to rezystory R_1 i R_3 bardziej się rozgrzeją, gdyż będą lepiej izolowane przed stratami ciepła.

Mostek rozstroji się, a przyłączony do jego przekątnej przyrząd wskaże zawartość dwutlenku węgla.

Czujnik zawartości CO₂ w spalinach

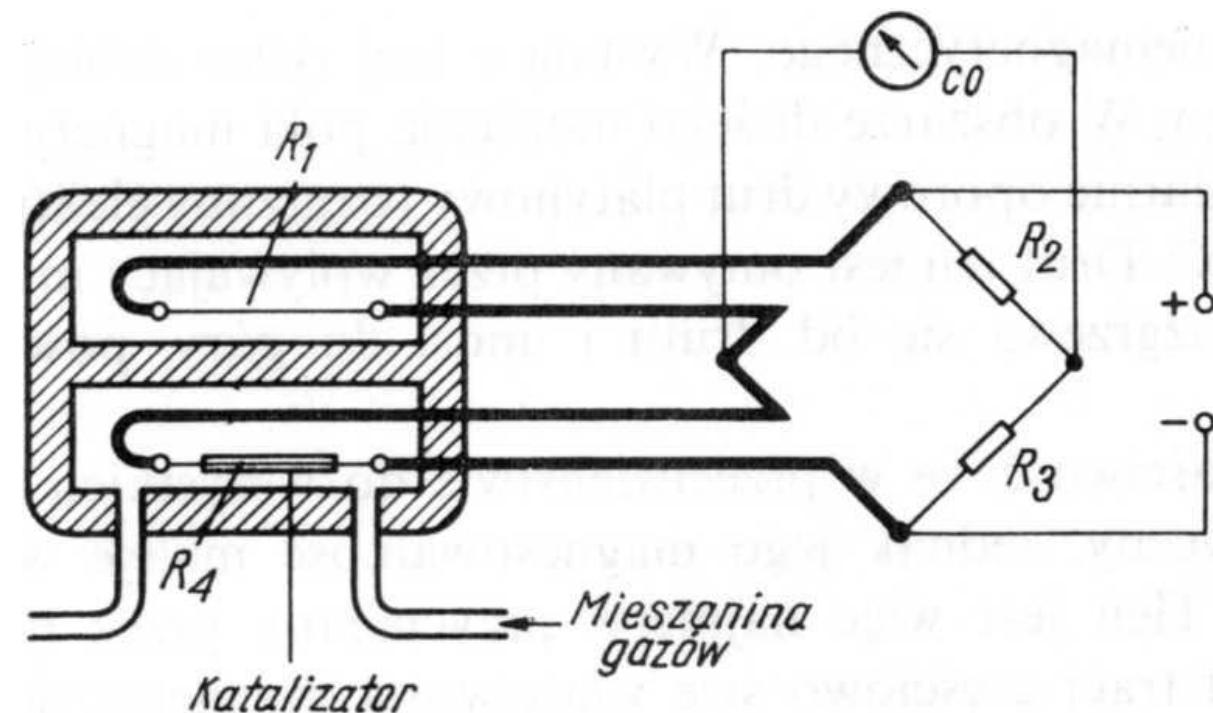


Aby uniknąć wpływów zewnętrznych, a zwłaszcza temperatury, dokładnie symetryczne gałęzie mostka umieszczone w dwóch komorach. Przez jedną z komór z rezystorami R_1 i R_3 przepływają spaliny, a przez drugą z rezystorami R_2 i R_4 czyste powietrze.

W urządzeniu tego typu produkcji firmy Siemens, 20 % objętości dwutlenku węgla w spalinach podnosi temperaturę rezystorów drutowych w komorze pomiarowej o 6 °C, wskutek czego ich rezystancja wzrasta o 0,2 Ω.

Czujnik zawartości tlenku węgla

Tlenek węgla (CO), zwany potocznie czadem, powstaje w wyniku niecałkowitego spalenia węgla. Jego obecność wskazuje na to, że paliwo w urządzeniu grzewczym nie jest całkowicie spalane.

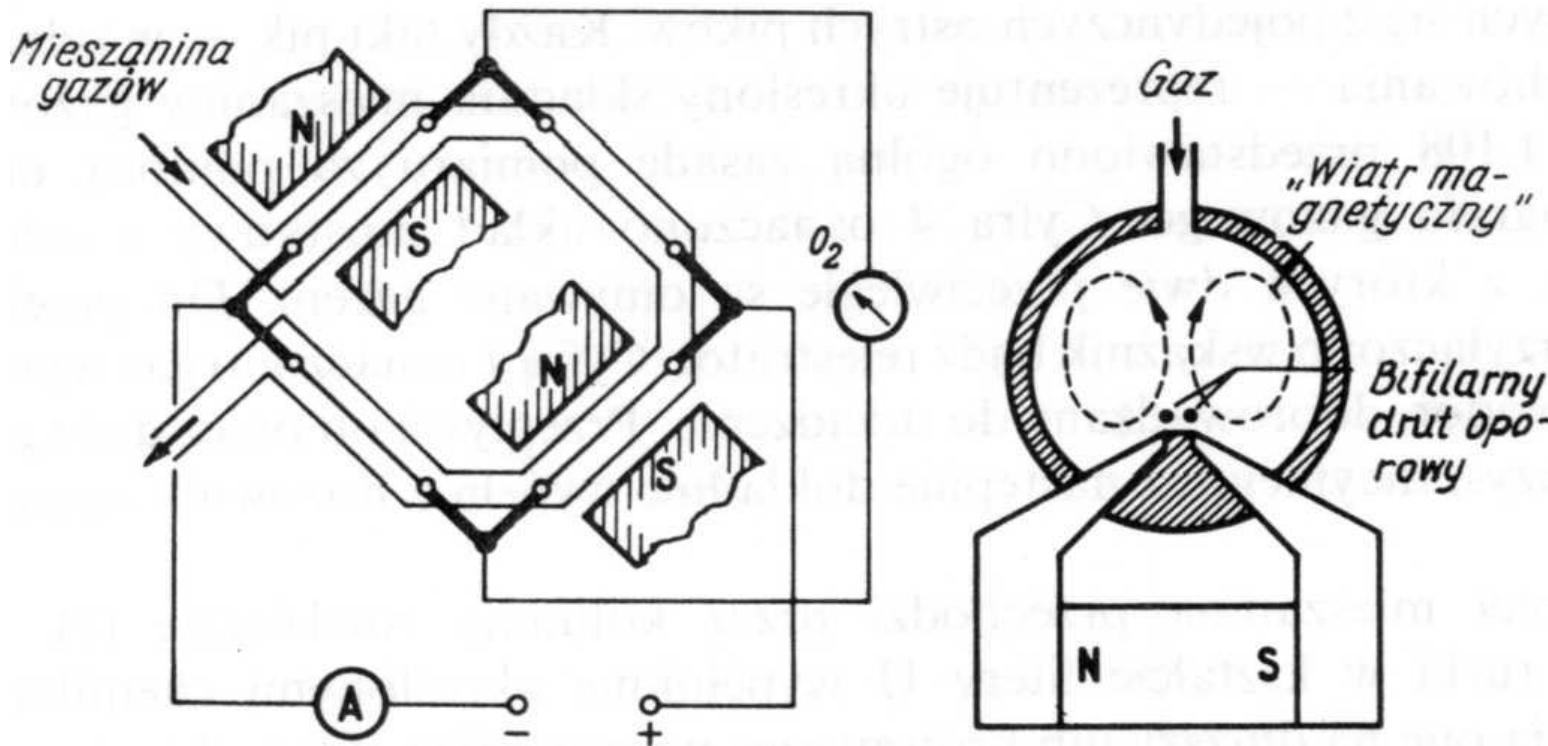


R_1 i R_4 - żarzone druty platynowe.

Pomiarowy rezystor drutowy R_4 pokryty jest gąbką platynową, spełniającą rolę katalizatora.

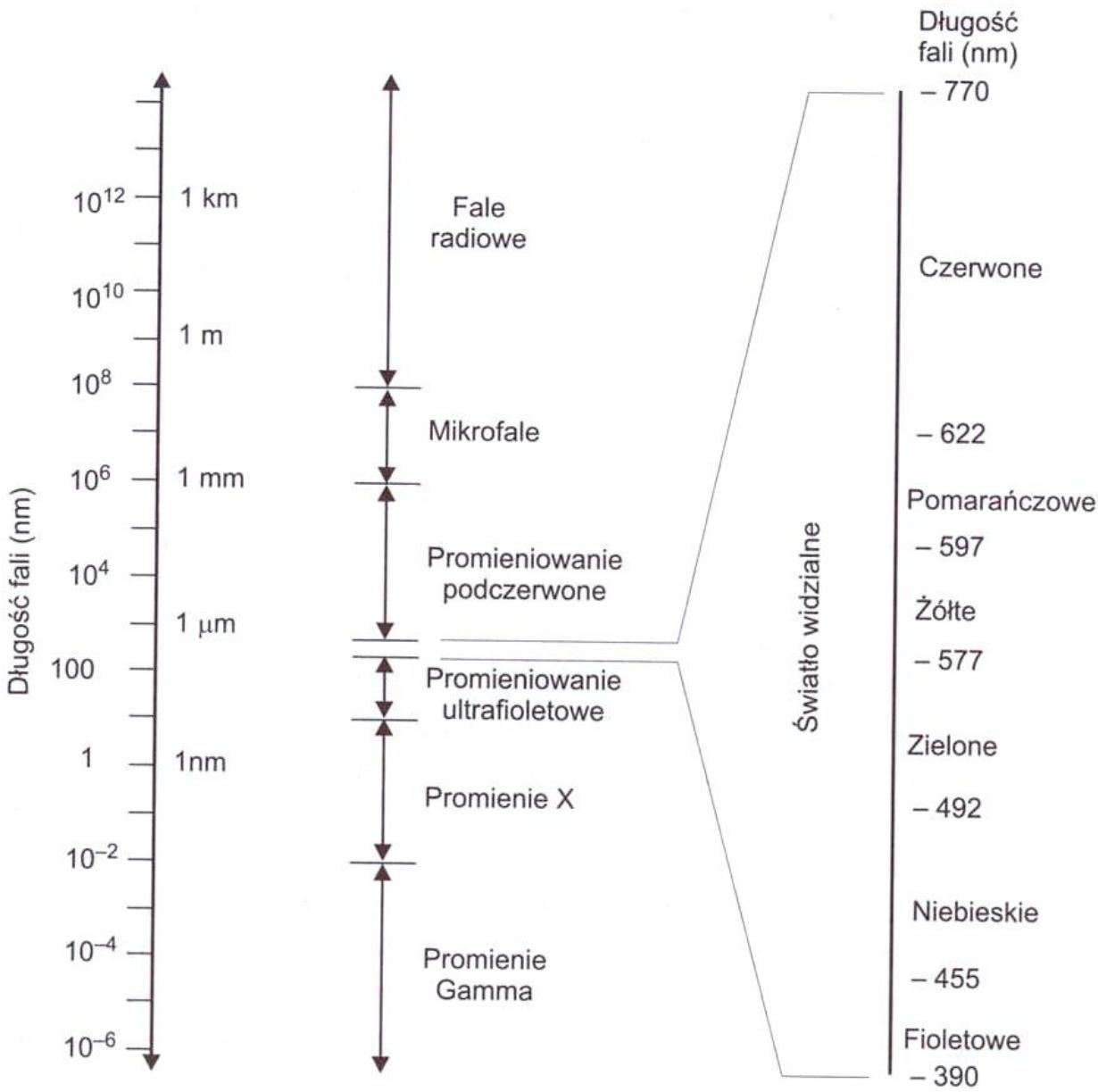
Działanie porowatej platyny jako katalizatora powoduje, że przepływający przez nią CO i powietrze rozgrzewają ją do temperatury ok. 500 °C, co powoduje wzrost rezystancji R_4 , i mostek rozstroj się. Wskazania miernika w przekątnej mostka będą proporcjonalne do zawartości tlenku węgla w mieszaninie gazów.

Czujnik zawartości tlenu

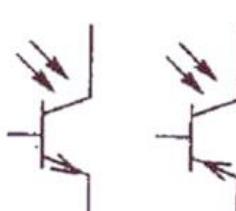


Drut platynowy rozgrzany jest elektrycznie do temperatury ok. 300 °C. Gaz rozgrzewa się i unosi do góry, powodując cyrkulację w komorze. **Tlen jest paramagnetyczny, ale jego magnesowalność maleje wraz ze wzrostem temperatury.** Tlen jest więc najpierw przyciągany przez magnes, a następnie po ogrzaniu traci częściowo swoje właściwości magnetyczne i jest wypychany przez silnie przyciągany zimny tlen. **Wywołuje to cyrkulację gazu nazywaną „wiatrem magnetycznym”.** Ochładza on znacznie drut tak, że np. 21 % udział objętościowy tlenu powoduje obniżenie temperatury o 5 °C. Odpowiednio zmienia się wówczas rezystancja elektryczna i wskazania miernika są proporcjonalne do zawartości tlenu.

Czujniki fotoelektryczne (optoelektroniczne)



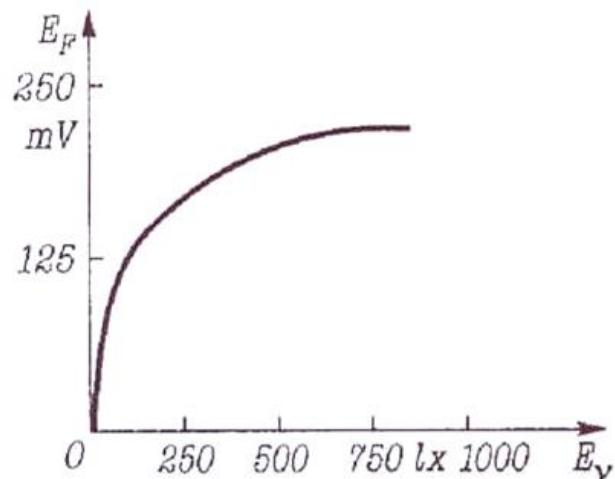
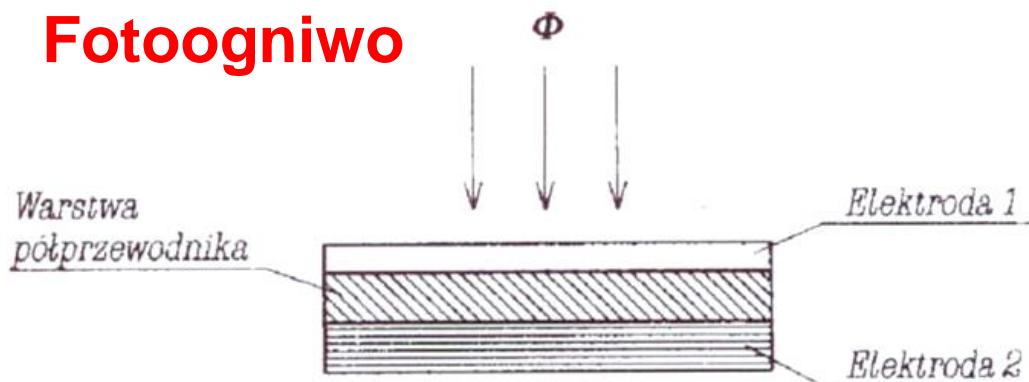
Rys. 14-1. Światło widzialne jako część spektrum promieniowania elektromagnetycznego



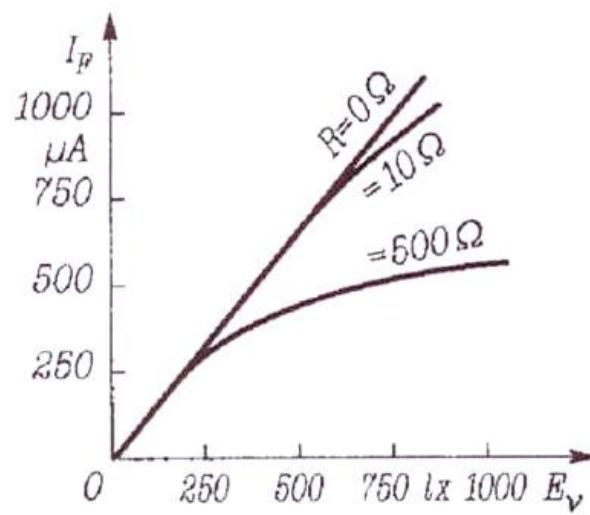
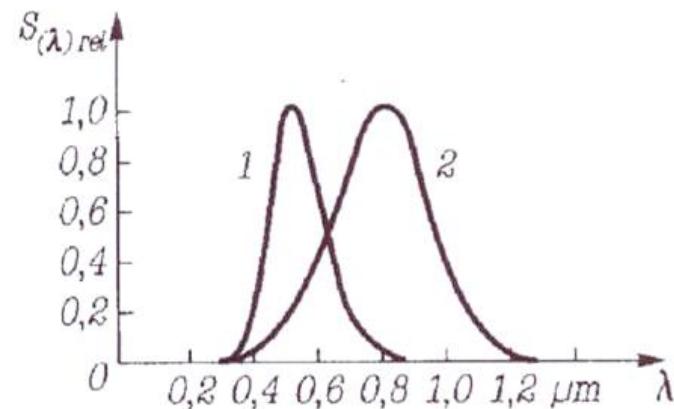
Fotoogniwo **Fotorezystor** **Fotodioda**

Fototranzystor

Fotoogniwo

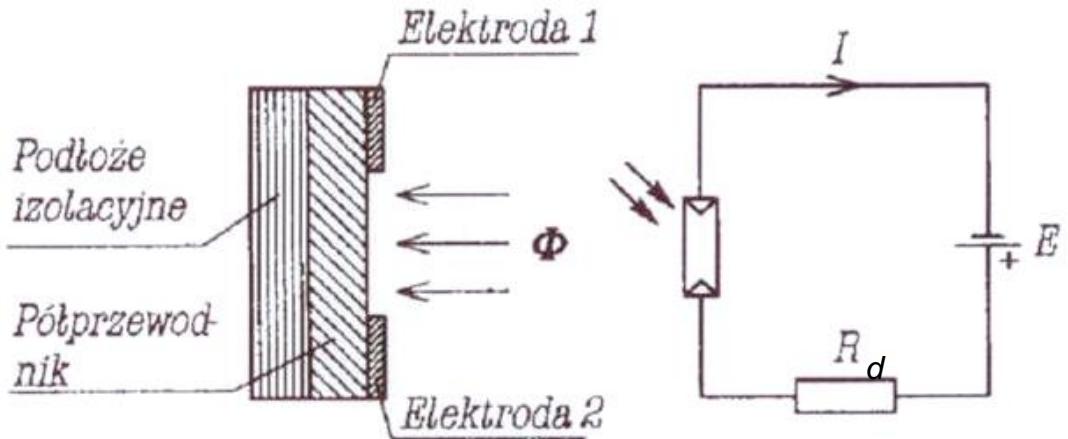


Rys. 10.4. Przykładowa charakterystyka oświetleniowa ogniwka fotoelektrycznego nie obciążonego

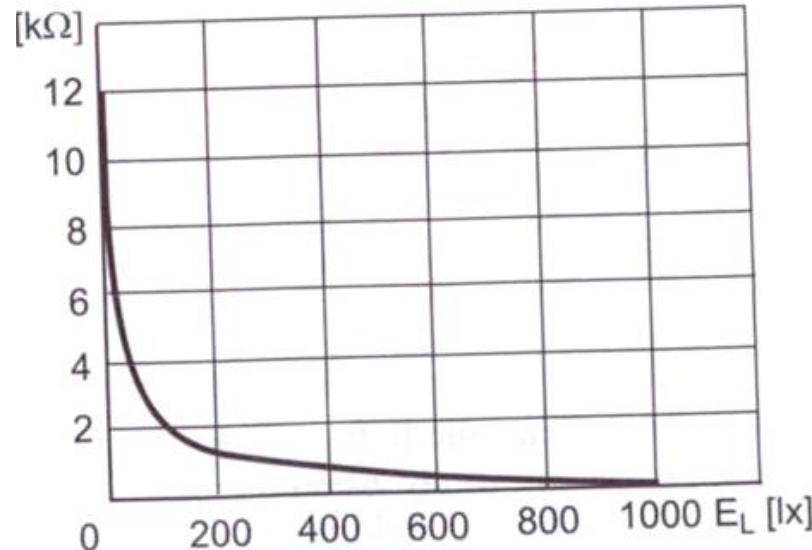


Rys. 10.5. Przykładowa charakterystyka oświetleniowa ogniwka fotoelektrycznego obciążonego

Fotorezyststor



Rys. 10.7. Budowa i podstawowy układ pracy fotorezystora

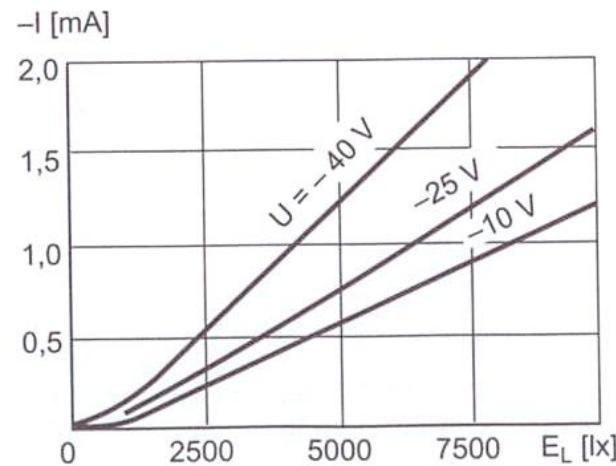
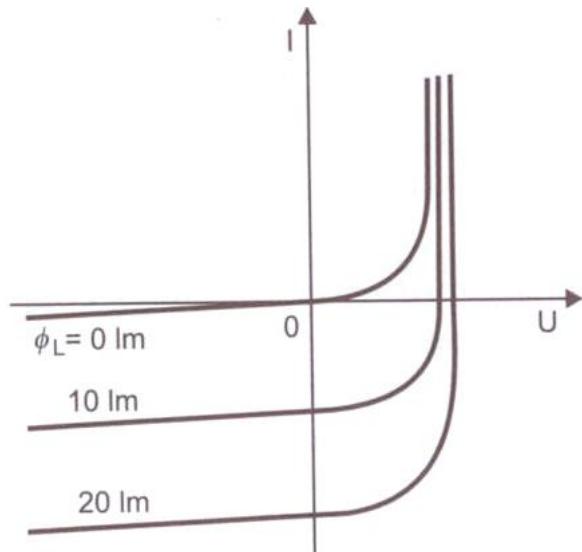
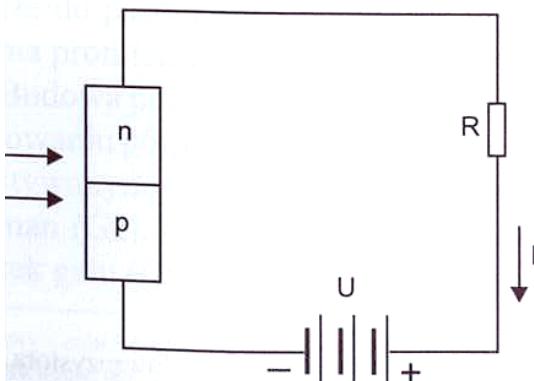


Rezystancja fotorezystora

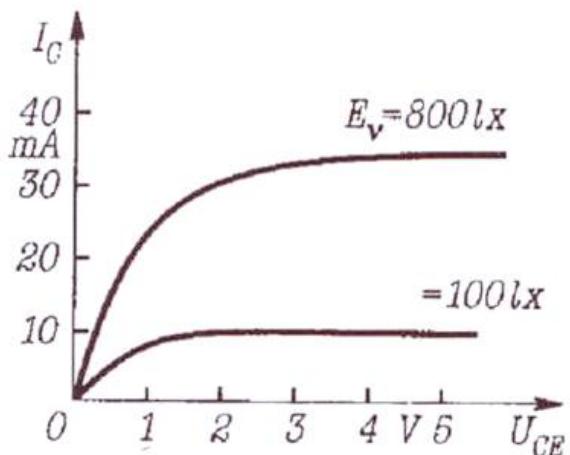
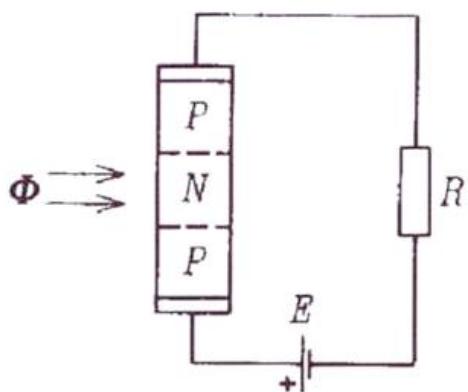
$$R = R_0 \left(\frac{E_0}{E_L} \right)^g$$

R_0 – rezystancja przy natężeniu oświetlenia E_0 , (zwykle 10 lx),
 g – stała zależna od rodzaju materiału rezystora (zwykle 0,5 ... 1,0)

Fotodioda

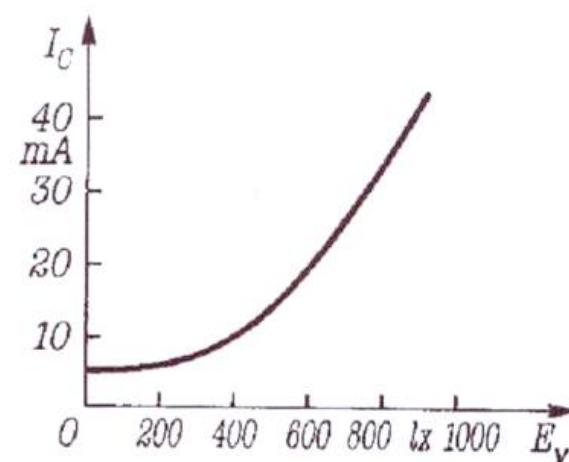


Fototranzystor



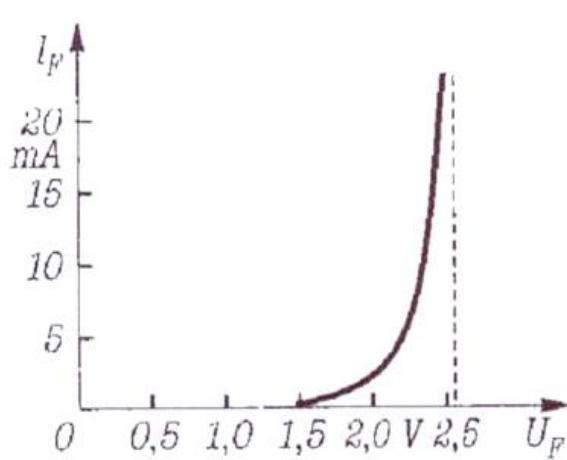
Rys. 10.12. Budowa i podstawowy schemat układu pracy fototranzystora

Rys. 10.13. Przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe fototranzystora w układzie WE

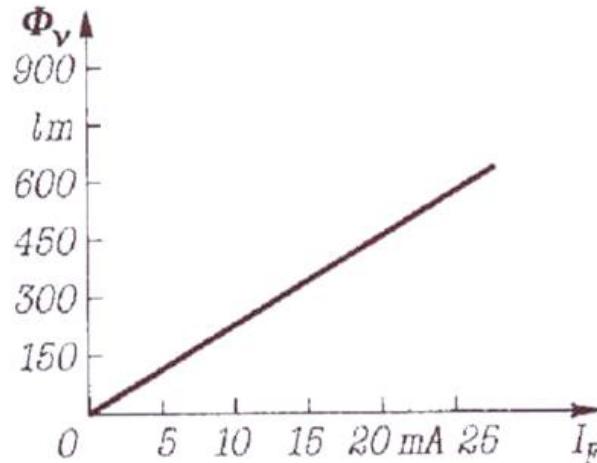


Rys. 10.14. Przykładowa charakterystyka oświetleniowa fototranzystora

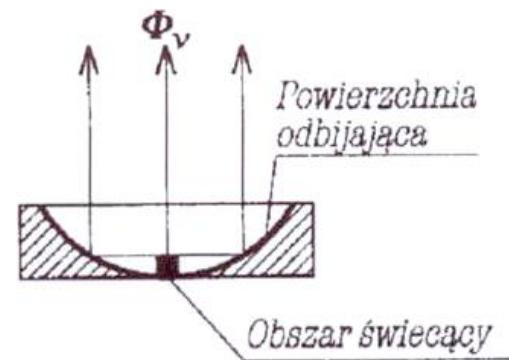
Dioda elektroluminescencyjna (LED)



Rys. 10.15. Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa diody elektroluminescencyjnej

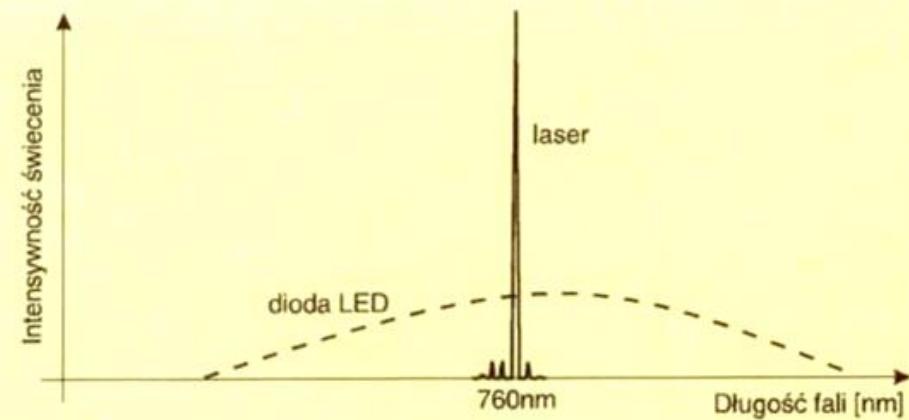
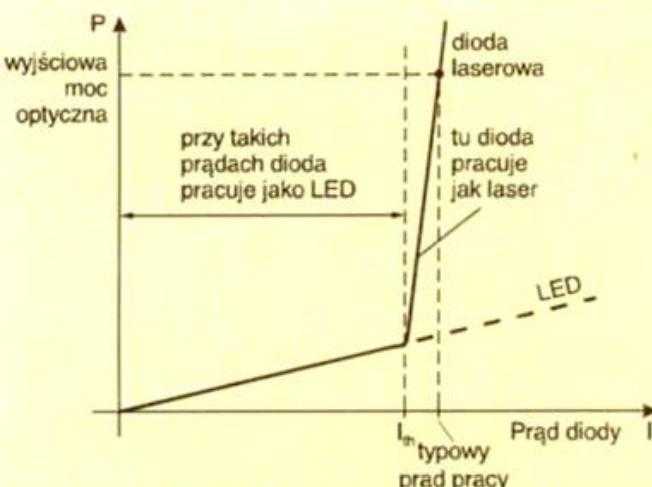


Rys. 10.16. Charakterystyka świecenia diody elektroluminescencyjnej



Rys. 10.17. Budowa wskaźnika diodowego

Dioda laserowa



Rys. 8. Widmo promieniowania diody laserowej

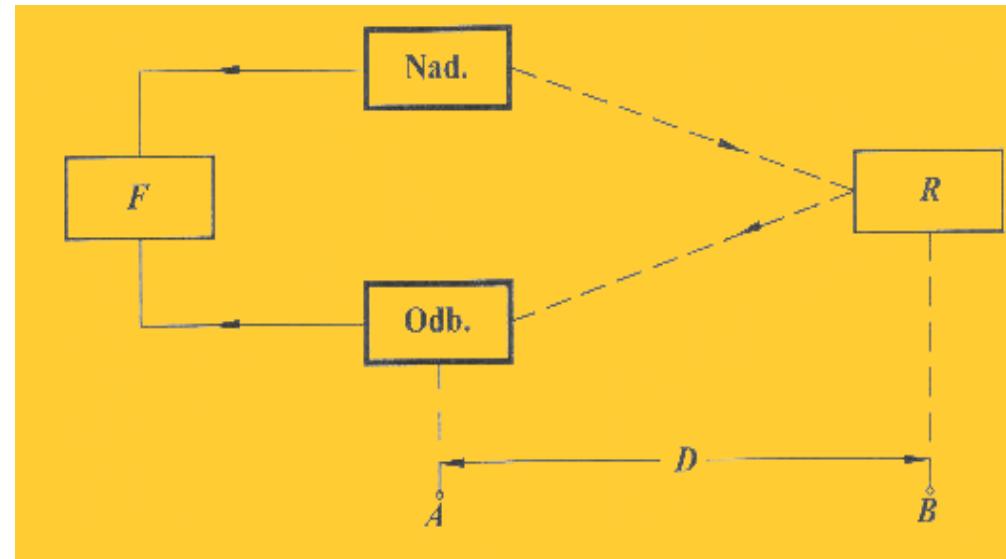
Dalmierze laserowe

Pomiar odległości D sprowadza się do pomiaru czasu τ , w ciągu którego sygnał pomiarowy emitowany z punktu A przebywa drogę $2D$. Można, zatem napisać:

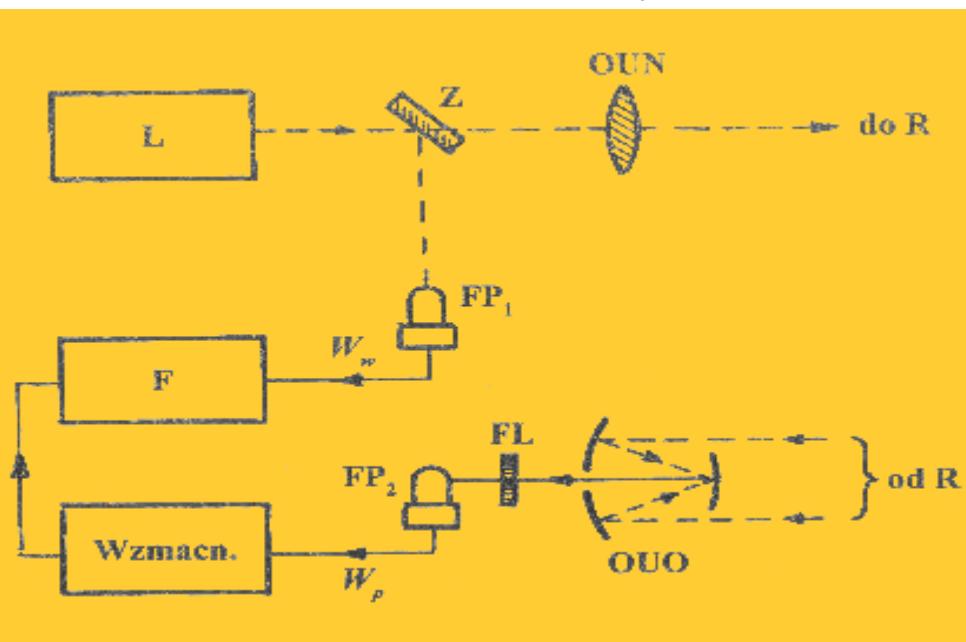
$$2D = v \cdot \tau$$

$$D = \frac{1}{2} v \cdot \tau$$

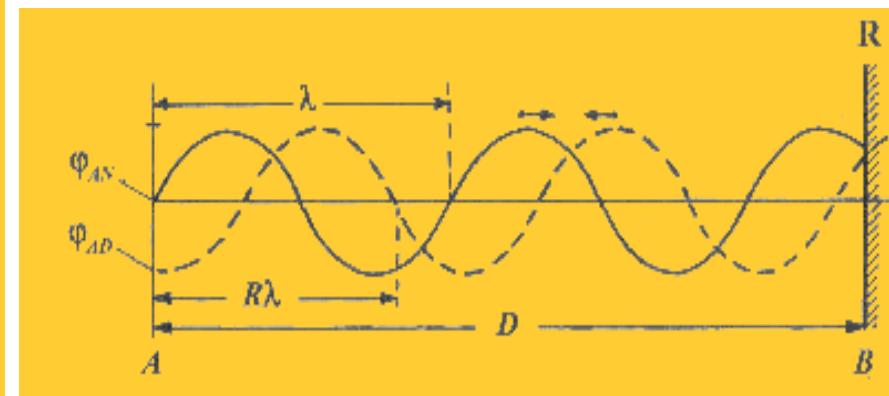
$$v = 299\ 792\ 358 \text{ m/s}$$



Dalmierz impulsowy

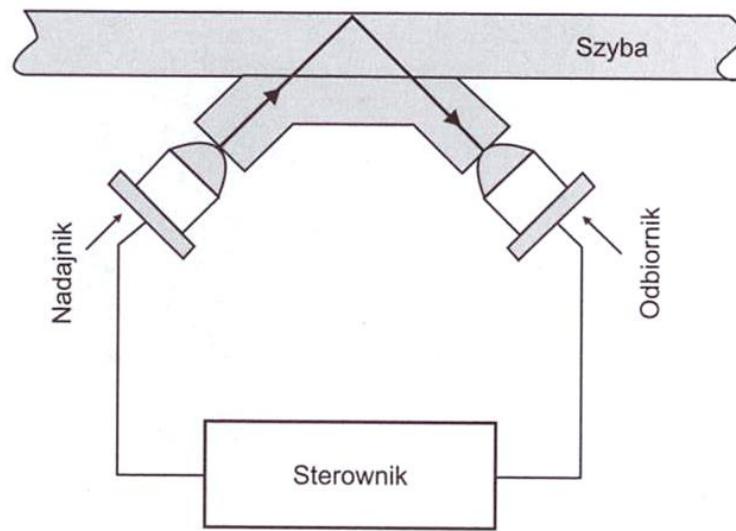


Dalmierze fazowe

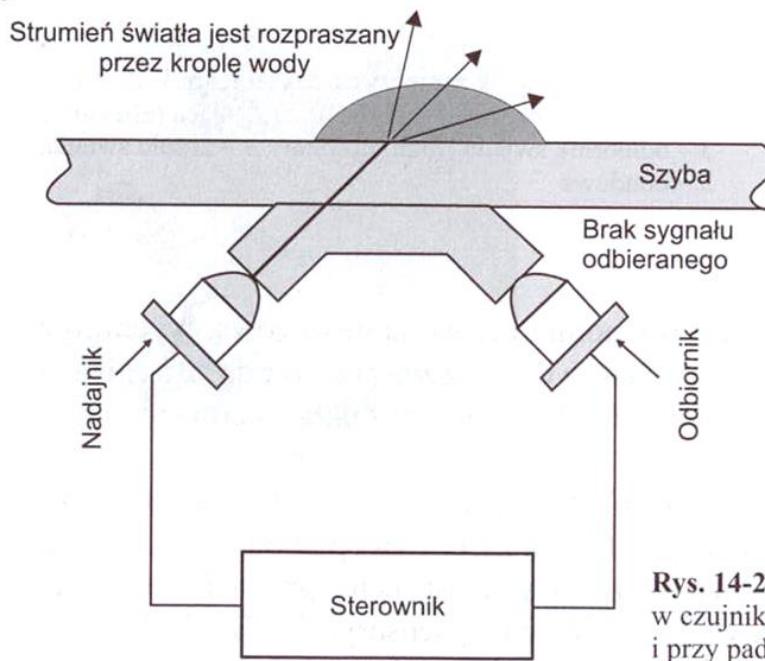


Samochodowy czujnik deszczu

a



b



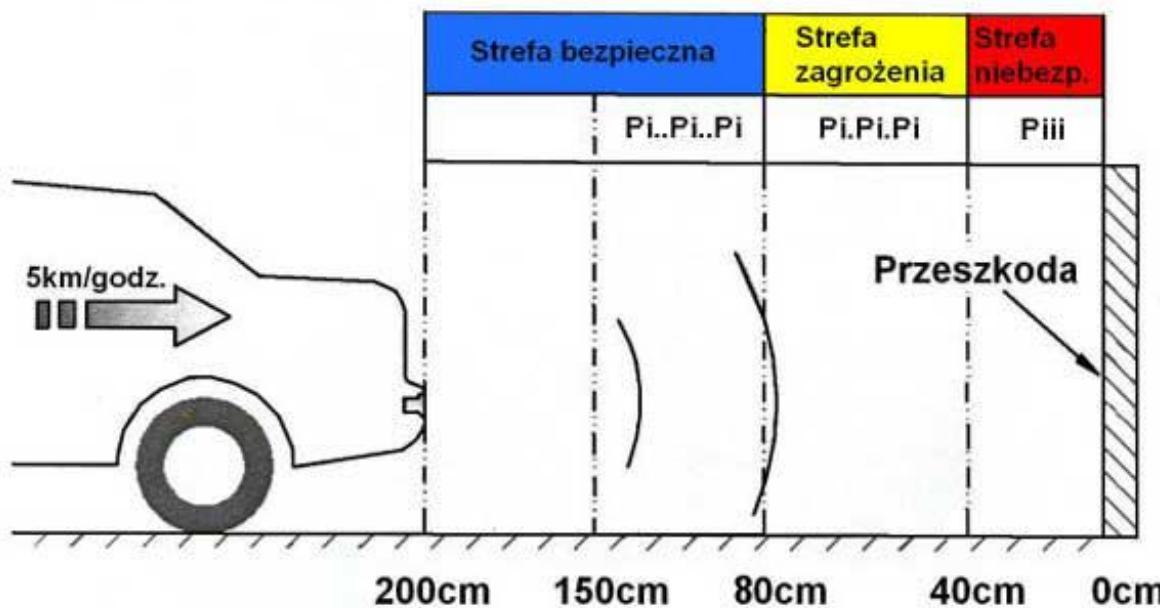
Rys. 14-26. Przebieg promienia światła w czujniku deszczu przy suchej szybie (a) i przy padającym deszczu (b)

Czujniki ultradźwiękowe

Ultradźwięki są niesłyszalne dla człowieka (powyżej 20 kHz), ale może je słyszeć pies, szczur, delfin, wieloryb, nietoperz. Jeżeli napotyka on na przeszkodę to powstaje echo. Piezoelektryczny czujnik pracujący jako głośnik wysyła w czasie 100 μ s – 1 ms dźwięk o częstotliwości 40 – 400 Hz. Po napotkaniu przeszkody wraca on do czujnika, który pracuje jako mikrofon. Mierząc czas, w którym dźwięk przebył drogę tam i z powrotem można wyznaczyć odległość obiektu od czujnika.

$$D = \frac{1}{2} v \cdot \tau$$

Czujniki parkowania



Czujnik ruchu



Pasywne czujniki ruchu na podczerwień

Najczęściej spotykanyimi i wykorzystywanyimi czujnikami ruchu są czujniki działające na podczerwień. Wykrywają one zmiany promieniowania cieplnego. Są wyposażone w soczewkę, która kształtuje obszar działania w zależności od typu soczewki. Wejście człowieka albo zwierzęcia jest przez nie wykrywane jako zmiana promieniowania cieplnego.

Aktywne czujki wykorzystują:

- fale elektromagnetyczne (mikrofale) oraz
- efekt Dopplera, czyli zmianę częstotliwości fali na skutek zmiany wzajemnego położenia źródła fali i jej odbiornika.

Człowiek pojawiający się w tej przestrzeni powoduje zmianę częstotliwości odbitej fali.

Czujki mikrofalowe

Ponieważ mikrofale przenikają przez plastik, drewno, szkło i cienkie przegrody, można je zamontować w miejscach niewidocznych dla intruza, na przykład za cienką ścianą lub za oknem chronionego pomieszczenia. Główną zaletą czujników mikrofalowych w porównaniu z czujkami na podczerwień jest ich niewrażliwość na zmiany temperatury otoczenia lub poruszającego się obiektu, wadą – wyższa cena.

CZUJNIKI I PRZETWORNIKI

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

Wykład 9

**Przetworniki pola elektrycznego
i magnetycznego**

Woltomierze fazoczułe

Przetworniki pola elektrycznego stałego

Wartości natężenia pola elektrycznego dla typowych zjawisk elektrostatycznych

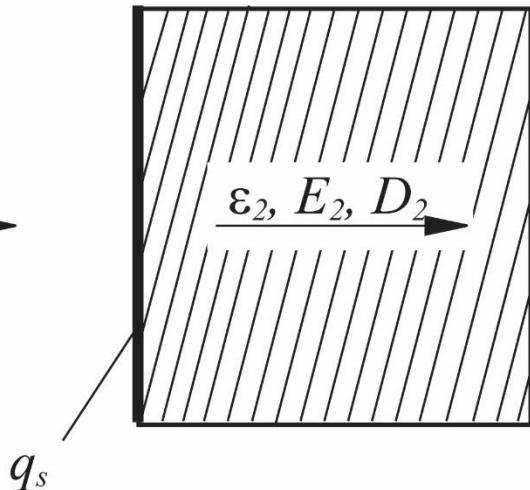
Zjawisko	Natężenie pola [V/m]
Naturalne pole elektryczne przy powierzchni ziemi w pogodny dzień	$10^2 - 10^3$
Pola elektryczne przy powierzchni ziemi w obecności chmur burzowych (bez wyładowań)	$10^3 - 10^4$
Wzmożone przyciąganie drobin kurzu,	$>2 \times 10^4$
Efekt „stawania” włosów	$>2 \times 10^5$
Efekt „klejenia się” taśm do uziemionych obiektów	$>1 \times 10^6$
Wyładowania w polu jednorodnym pod ciśnieniem atmosferycznym	3×10^6

1 (powietrze)

2 (metal)

Na granicy ośrodków (1) i (2)

$\underline{\epsilon}_1, E_1, D_1$



$$D_{1n} - D_{2n} = q_s$$

$$E_{1s} = E_{2s}$$

gdzie składowe normalne

$$D_{1n} = \epsilon_0 \epsilon_{r1} E_{1n}$$

$$D_{2n} = \epsilon_0 \epsilon_{r2} E_{2n}$$

Jeżeli ośrodek (2) jest przewodnikiem

to składowe styczne $E_{1s} = E_{2s} = 0$

i składowa normalna $E_{2n} = 0$

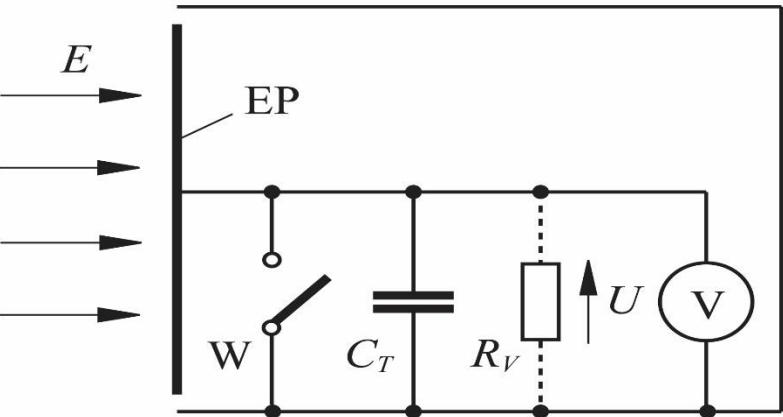
Stąd

$$q_s = \epsilon_{r1} \epsilon_0 E_{1n} \quad \text{Dla powietrza } \epsilon_r \approx 1, \text{ więc } q_s = \epsilon_0 E_{1n}$$

Pole elektryczne przy powierzchni przewodnika (metalu) działa tylko w kierunku normalnym i indukuje w nim ładunek o gęstości powierzchniowej q_s , proporcjonalnej do jego natężenia.

Tworzy to podstawę działania wszystkich indukcyjnych mierników natężenia stałych i wolnozmiennych pól elektrycznych.

Indukcyjne mierniki natężenia pola elektrycznego bez przetwarzania

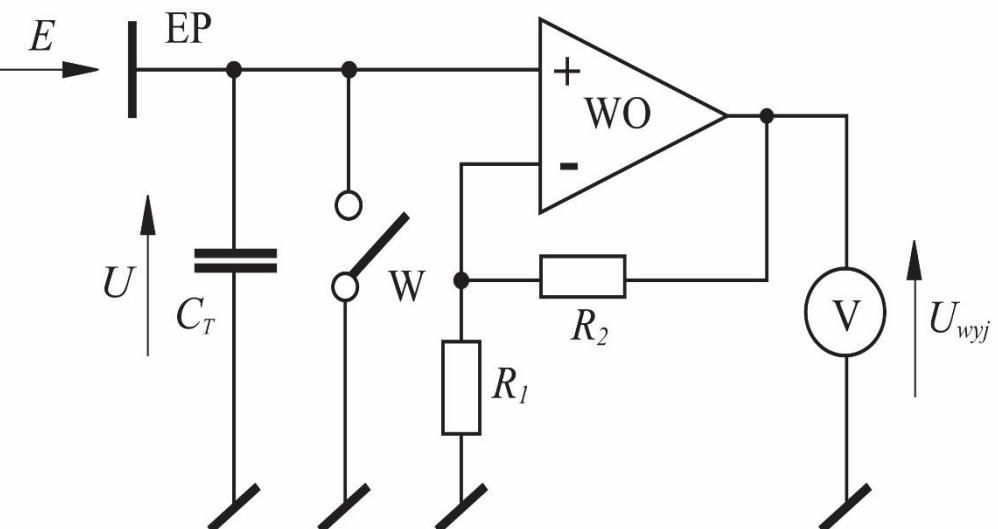


Jeżeli wyłącznik W, po rozładowaniu pojemności C_T (po wyzerowaniu miernika) zostanie otwarty i elektroda EP zostanie wprowadzona w obszar mierzonego pola, to całkowity ładunek Q indukowany na powierzchni elektrody s będzie równy

$$Q = s \varepsilon_0 E$$

Napięcie na kondensatorze $U = \frac{\varepsilon_0 s E}{C_T}$

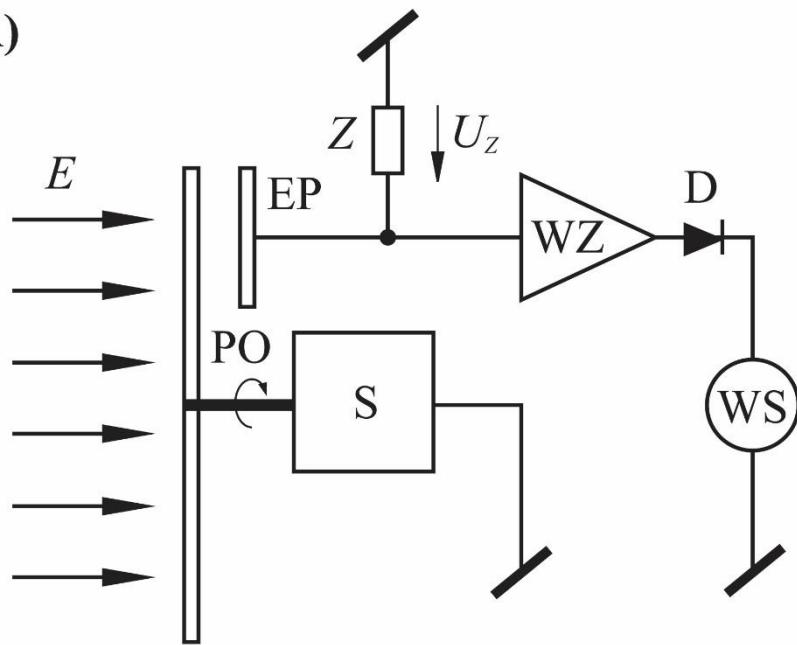
Wzmocniacz operacyjny WO pracuje w układzie konwertera ładunek – napięcie (Q-U)



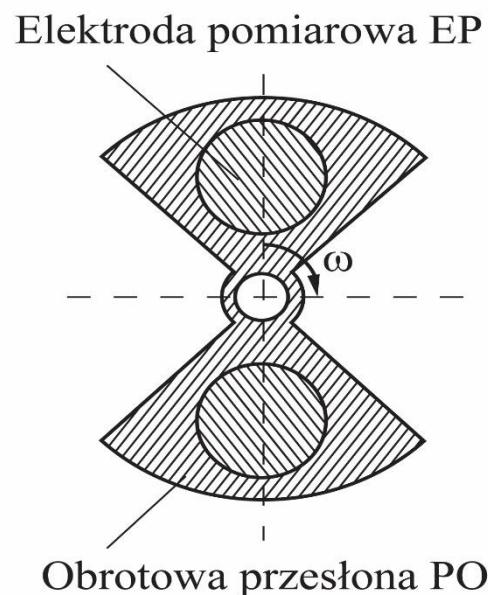
Mierniki te mają duży dryft wskazań wynikający z rozładowania pojemności C_T przez skończoną rezystancję wewnętrzną woltomierza oraz z ciągłego ładowania pojemności C_T prądem wejściowym wzmacniacza operacyjnego.

Indukcyjne mierniki natężenia pola elektrycznego z przetwarzaniem

A)



B)



Obrotowa, metalowa i uziemiona przesłona P powoduje okresowe przesłanianie elektrody pomiarowej EP przed działaniem mierzonego pola elektrycznego E , co powoduje indukowanie na elektrodach pomiarowych EP zmiennego ładunku elektrycznego, którego maksymalną wartość

$$Q_{\max} = \epsilon_0 s E$$

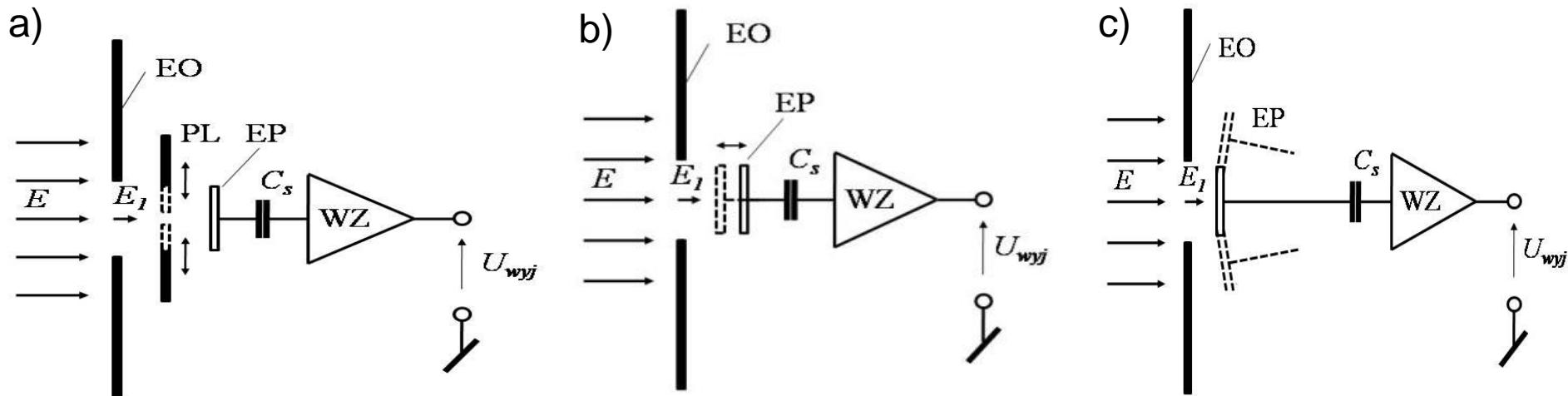
co powoduje na impedancji obciążenia Z wystąpienie zmiennego napięcia

$$U_Z = \frac{\epsilon_0 s E \omega R_W}{2}$$

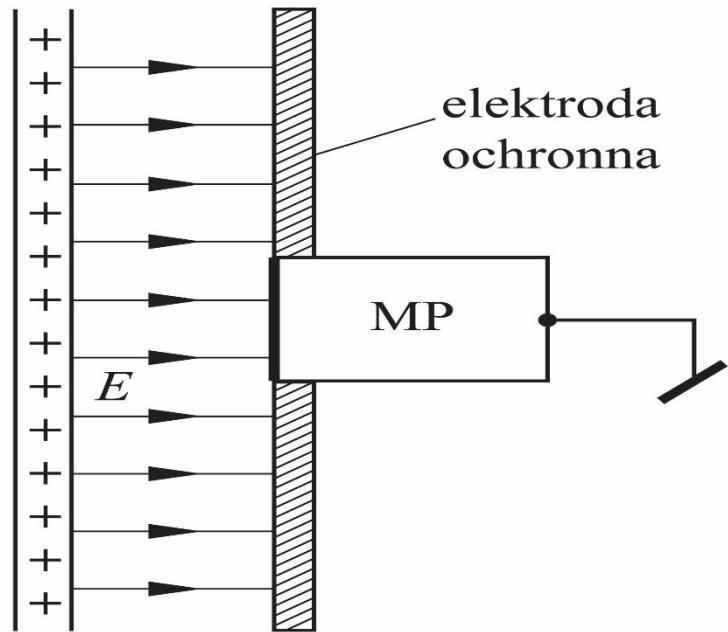
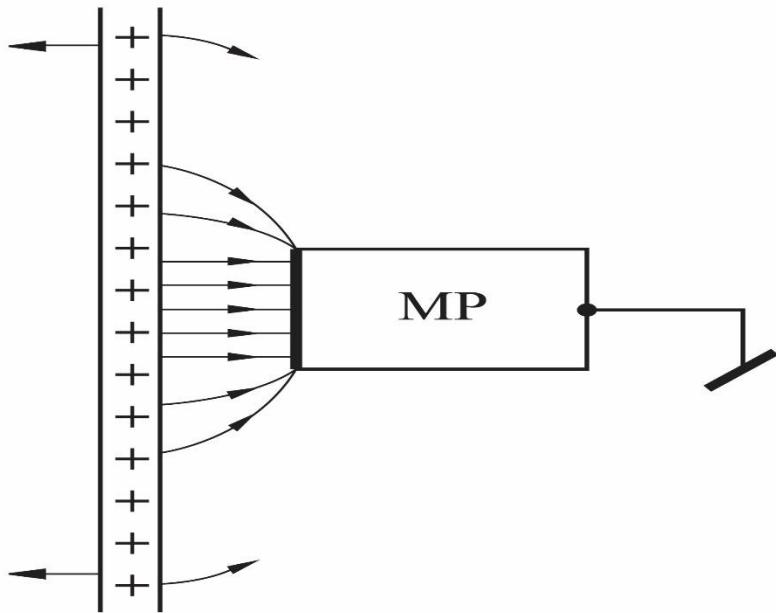


Miernik pola z przetwarzaniem typu „młynek polowy”

Wibracyjne przetworniki natężenia pola



Konfiguracje układu modulacji natężenia pola elektrycznego, wykorzystywane w wibracyjnych miernikach i przetwornikach pola: a) dwuelementowa przesłona (widełki) wykonująca poprzeczny ruch nożycowy przed nieruchomą elektrodą pomiarową, b - ruchoma elektroda pomiarowa wykonująca posuwisto-zwrotny ruch poosiowy, c - ruchoma elektroda pomiarowa wykonująca ruch wahadłowy.

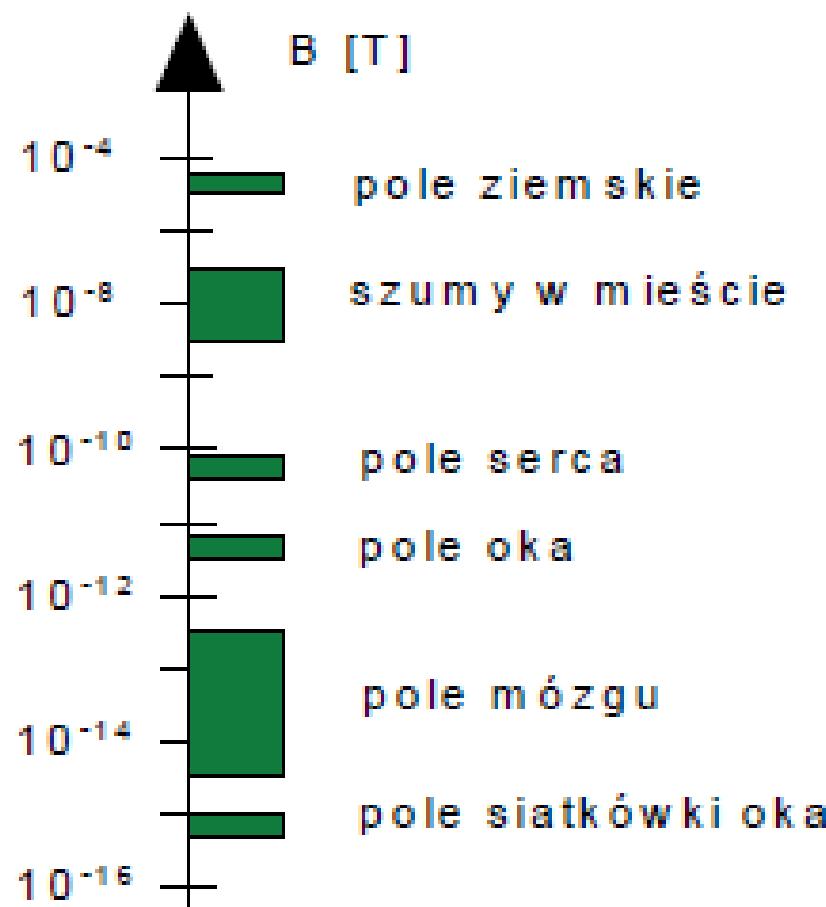


Rozkład natężenia pola elektrycznego w otoczeniu obiektu w formie jednorodnie naładowanej nieprzewodzącej płyty po zbliżeniu uziemionego miernika pola (a) oraz miernika z elektroda ochronną (b).

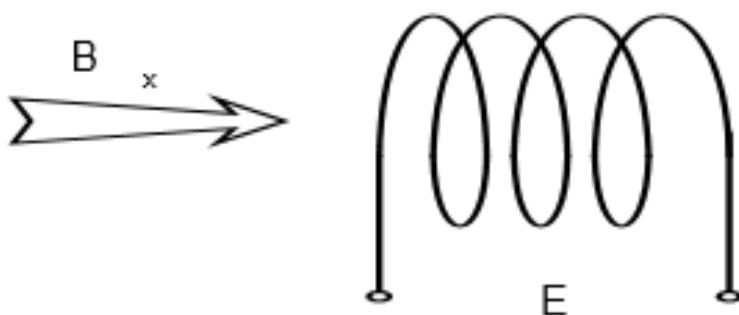
CZUJNIKI NATĘŻENIA POLA MAGNETYCZNEGO

Tabela 1. Współczynniki konwersji między najczęściej używanymi jednostkami magnetycznymi

	tesla T	A/m	gauss G	oersted Oe
A/m	$1,256 \cdot 10^{-6}$	1	$12,56 \cdot 10^{-3}$	$12,56 \cdot 10^{-3}$
Oe	10^4	79,6	1	1
T	1	$7,96 \cdot 10^5$	10^4	10^4
G	10^{-4}	79,6	1	1



Czujniki indukcyjne



$$e = z \frac{d\Phi}{dt} = zS \frac{dB}{dt}$$

$$B = \mu H = \mu_o \mu_r H$$

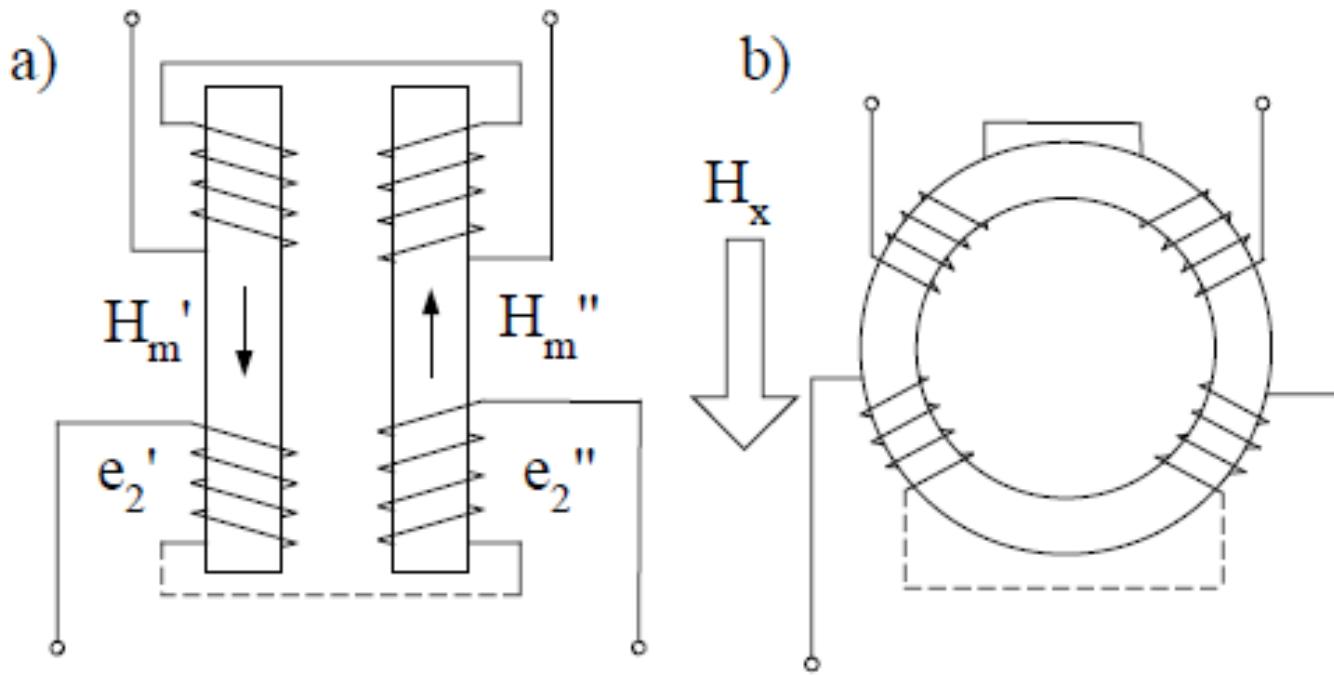
Dla pola sinusoidalnie zmiennego

$$e = 2\pi f z s B_m \cos \omega t$$

Sygnal wyjściowy czujnika zależy od pochodnej indukcji magnetycznej po czasie. Konieczne jest więc stosowanie na wyjściu czujnika układu całkującego.

Typowa czułość wynosi 10 V/mT przy $f = 0,01$ Hz, a przy $f = 200$ Hz – 500 mV/nT

Czujnik transduktorowy



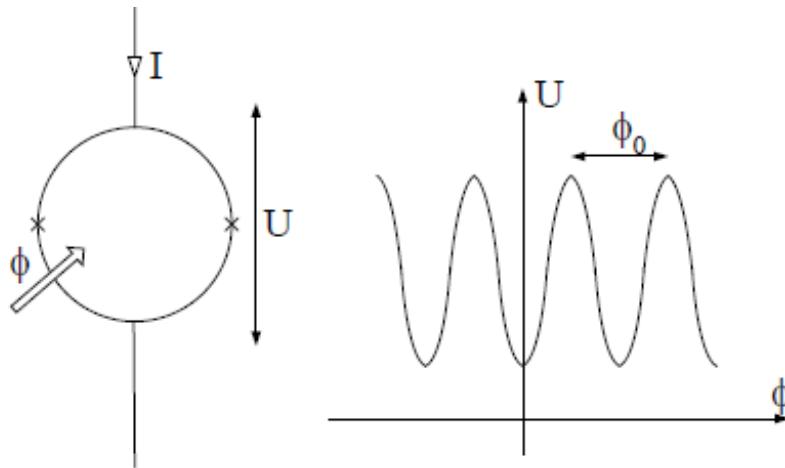
Dwa rdzenie ferromagnetyczne w postaci pasków (rys. a) lub pierścieni (rys. b) są magnesowane polem przemiennym w granicach do pola nasycenia H_m . Jeżeli zewnętrzne pole $H_x = 0$, to

$$e_2' = -e_2'' \quad \text{i} \quad e_2' + e_2'' = 0$$

Jeżeli pojawi się zewnętrzne pole magnetyczne H_x , to punkt pracy na charakterystyce $B = f(H)$ ulegnie przesunięciu o wartość H_x . Spowoduje to pojawienie się w sygnale wyjściowym e_2 harmonicznych parzystych, z których największą wartość ma 2-ga harmoniczna, która jest miarą pola H_x .

Czułość: 10 mV/nT... 10 μ V/nT.

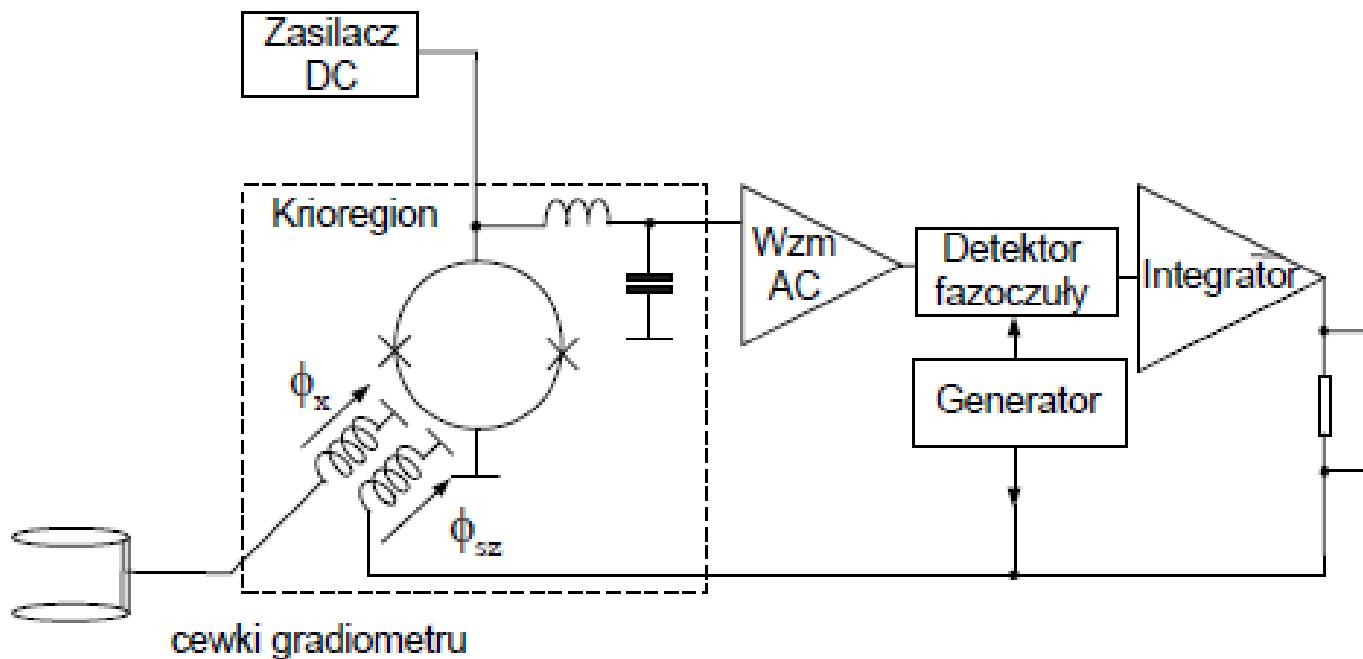
Czujniki SQUID-owe



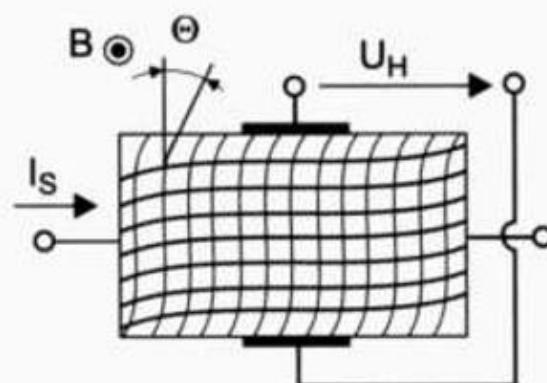
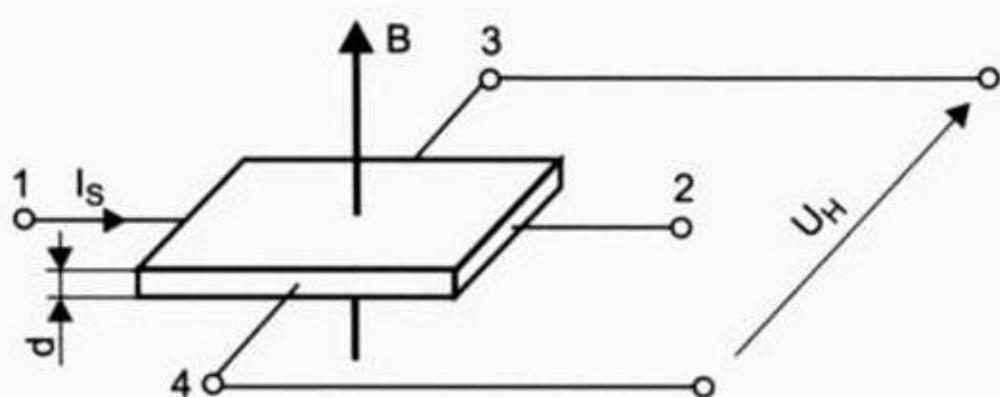
Złącze SQUID-we składa się z dwóch nadprzewodników (najczęściej niob) rozdzielonych bardzo cienką warstwą izolacji. Umieszcza się je w temperaturze ciekłego helu. Jeżeli przez złącze przepływa prąd I , to na złączu w polu magnetycznym o strumieniu Φ pojawi się napięcie, którego okres jest równy kwantowi strumienia

$$\Phi_0 = h/2e = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$$

Odpowiada to indukcji 0,1 – 1 T.



Czujniki Hallotronowe



$$U_H = \frac{R_H I_S B}{d}$$

gdzie:

R_H – współczynnik Halla zależny od materiału półprzewodnika [$\text{m}^2/\text{A}\cdot\text{s}$],

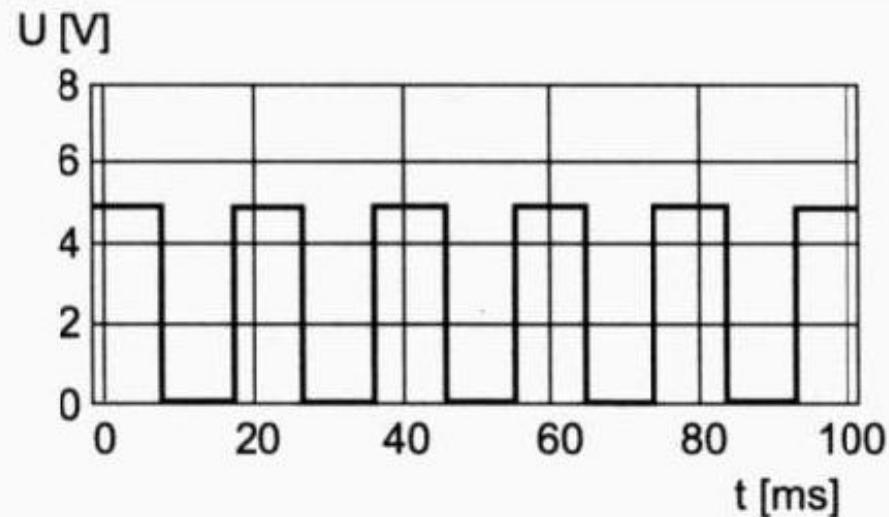
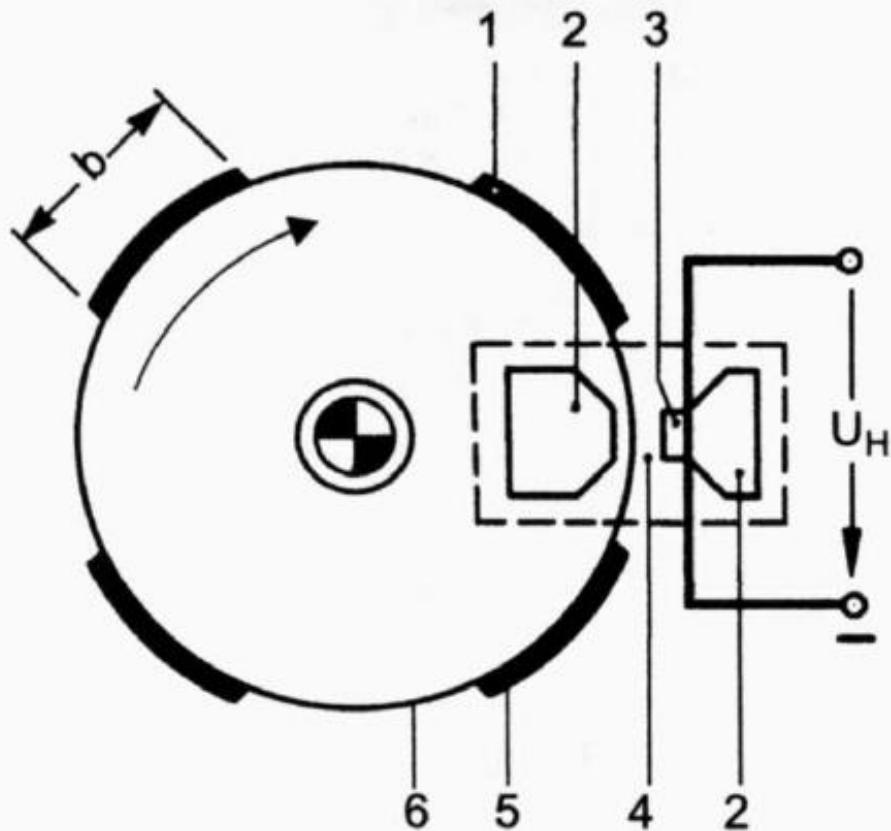
d – grubość płytki [m],

I_S – natężenie prądu sterującego [A],

B – indukcja pola magnetycznego [T].

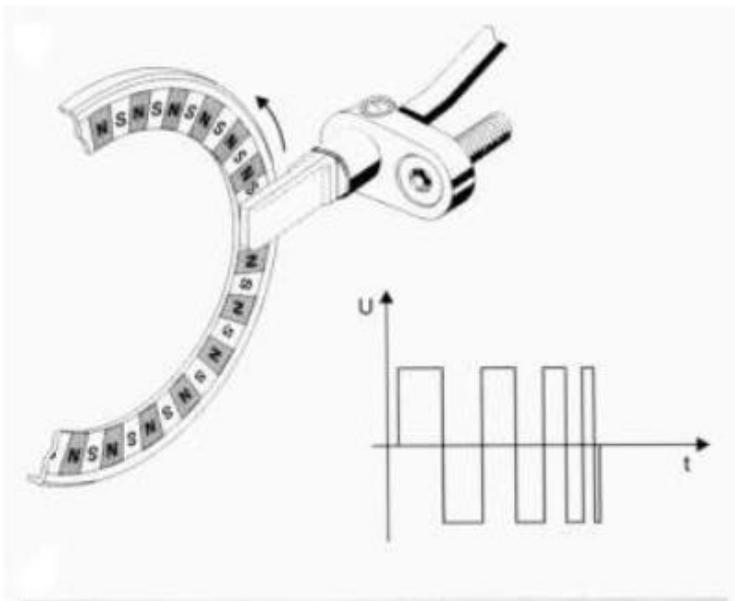
Czujniki hallotronowe

Hallotronowy czujnik wbudowany w aparat zapłonowy

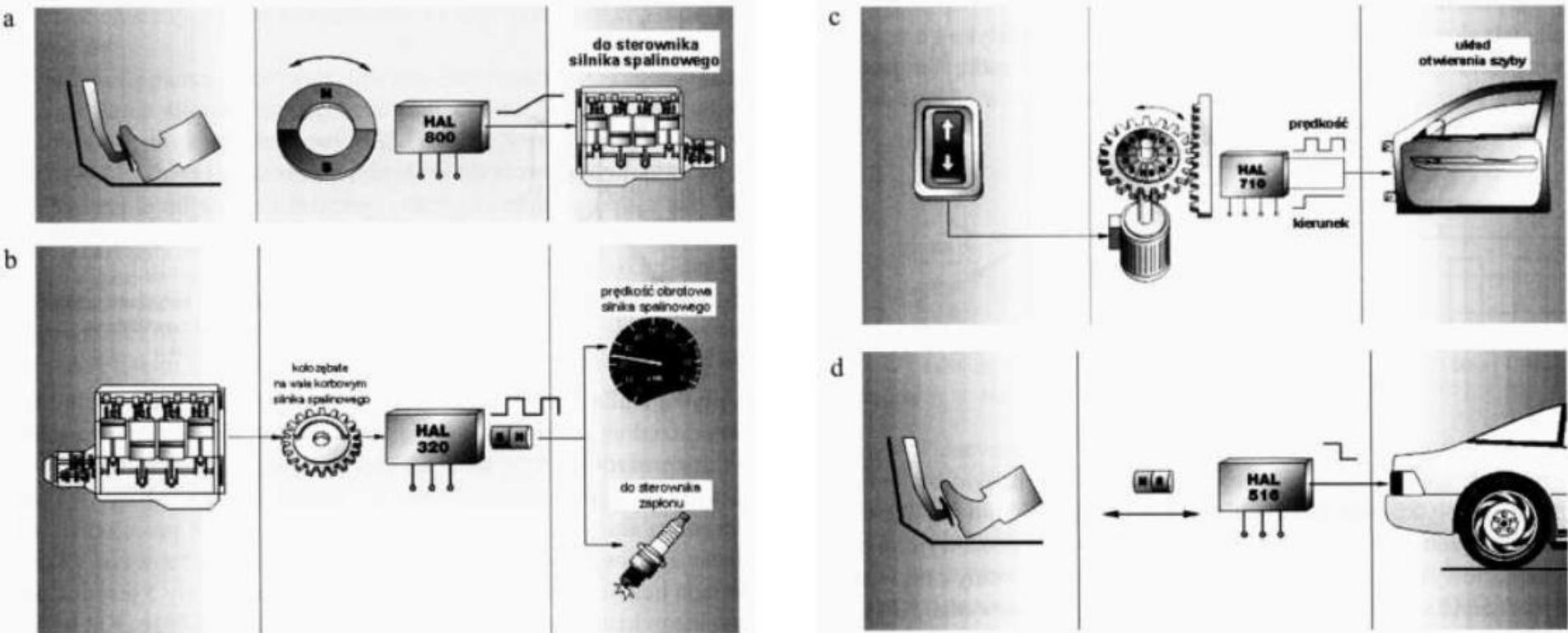


Czujniki hallotronowe

Hallotronowy czujnik prędkości obrotowej w układzie ABS



Czujniki hallotronowe

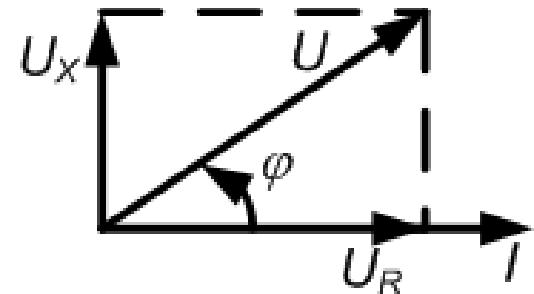
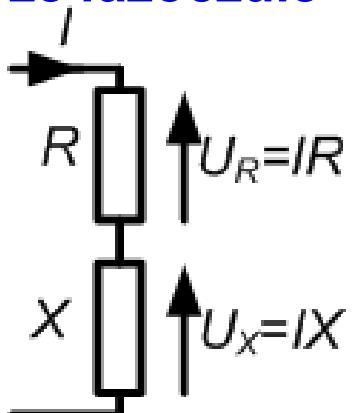
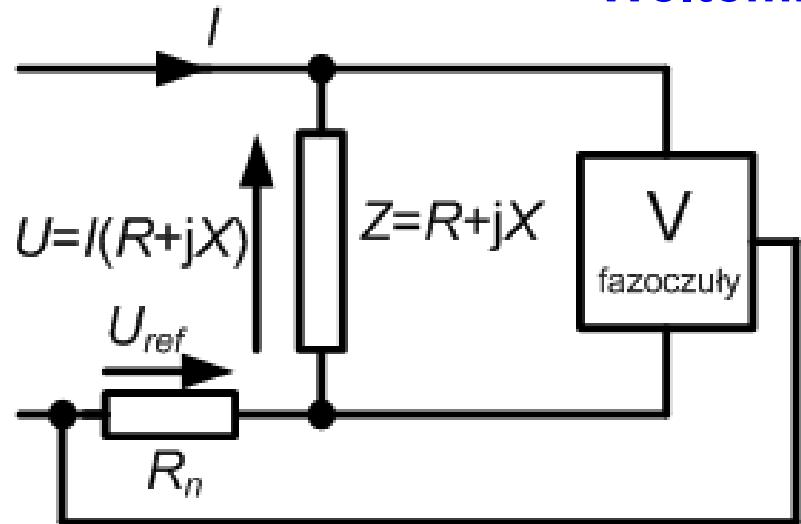


a – czujnik położenia pedału przyspieszenia, b – czujnik prędkości obrotowej silnika (czujnik różnicowy z dwiema płytami Halla), c – czujnik stopnia otwarcia szyby w drzwiach samochodu, d – czujnik włączenia światel hamowania

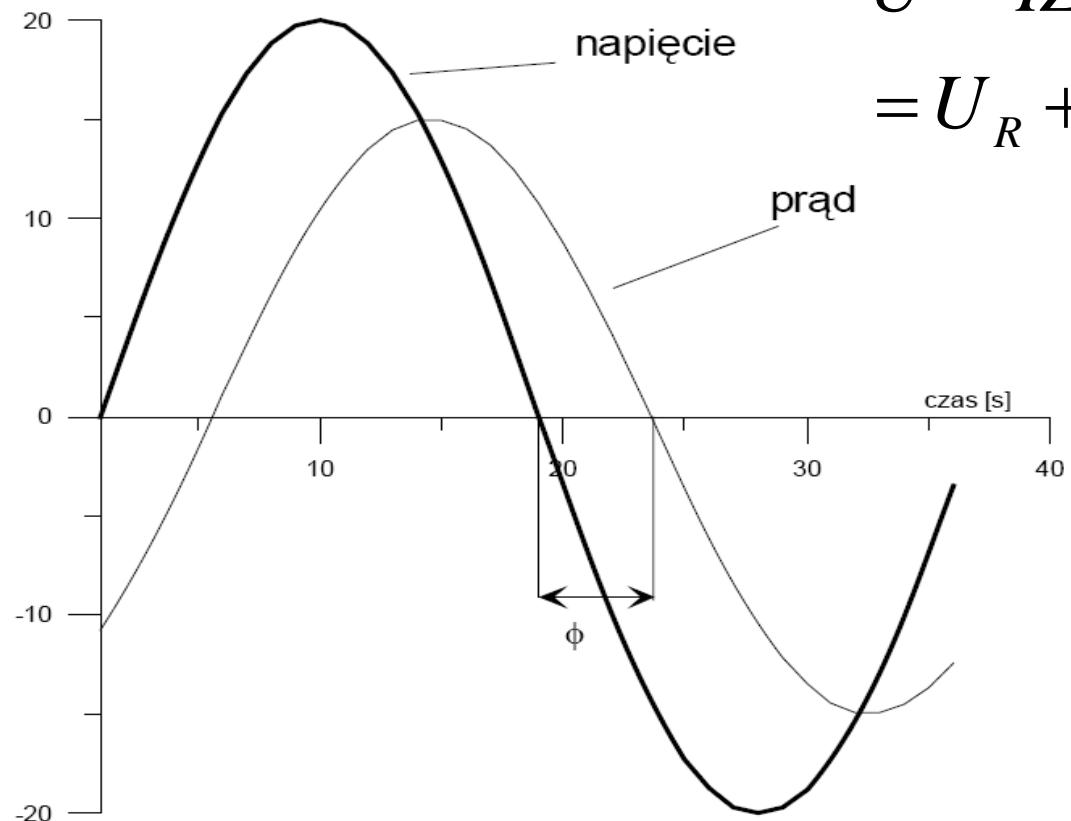
Czujniki magnetorezystancyjne

Wykorzystują zależność rezystancji materiału od wartości natężenia pola magnetycznego.

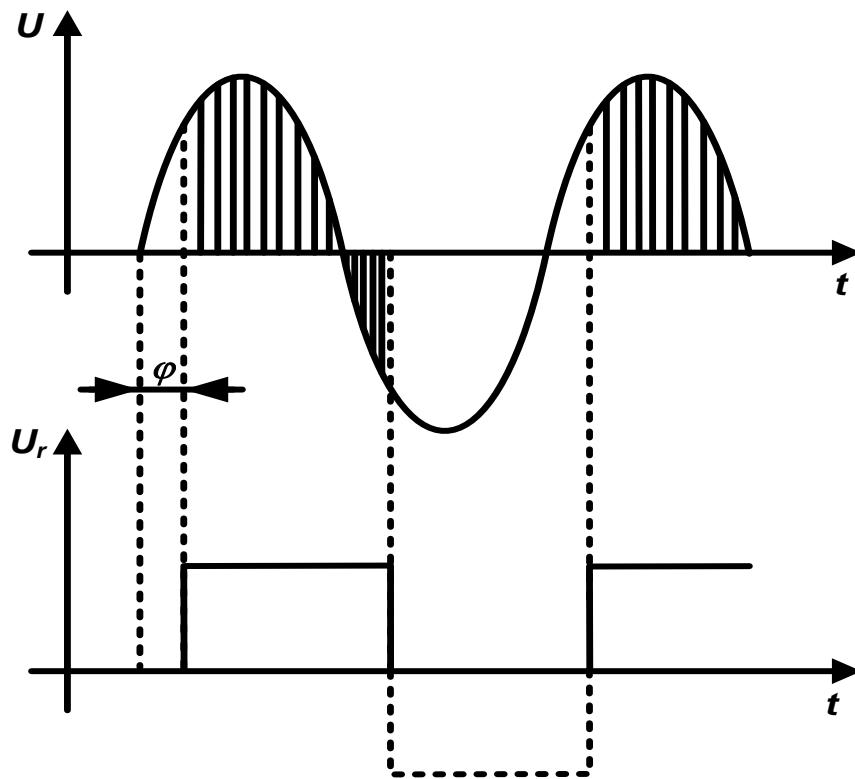
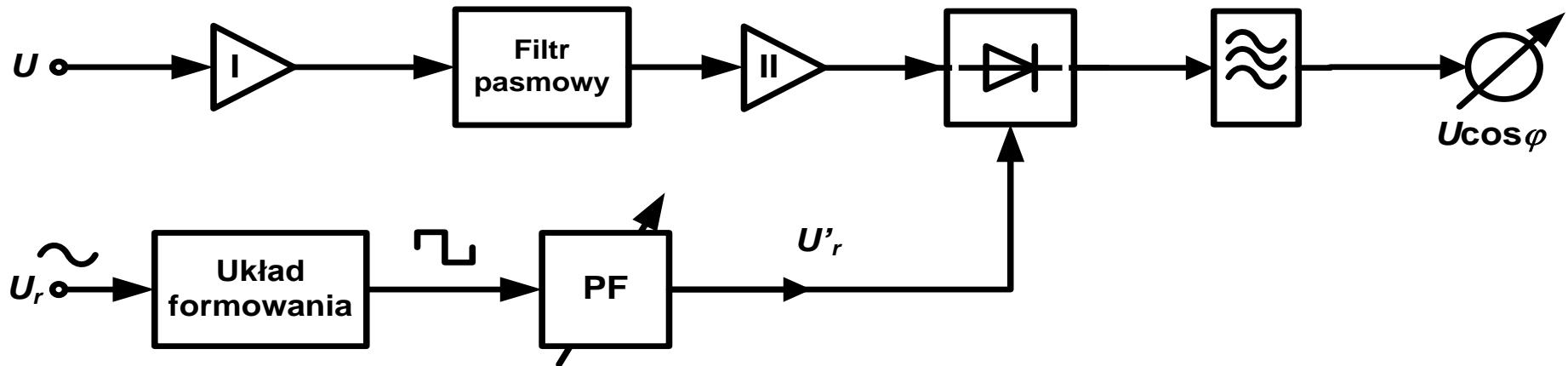
Woltomierze fazoczułe



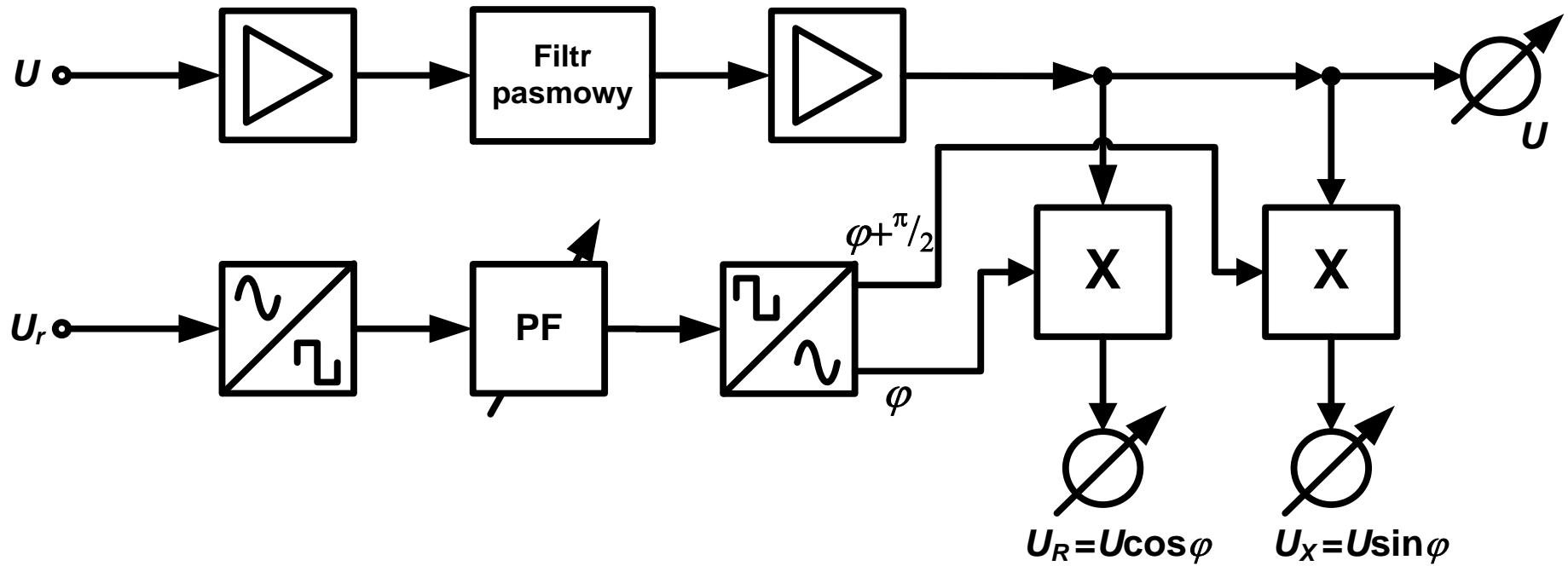
$$U = IZ = I(R + jX) = IR + jIX = \\ = U_R + jU_X = U\cos\varphi + jU\sin\varphi$$



Fazoczuły woltomierz homodynowy



Fazoczuły woltomierz ilorazowy



Czujniki i przetworniki

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

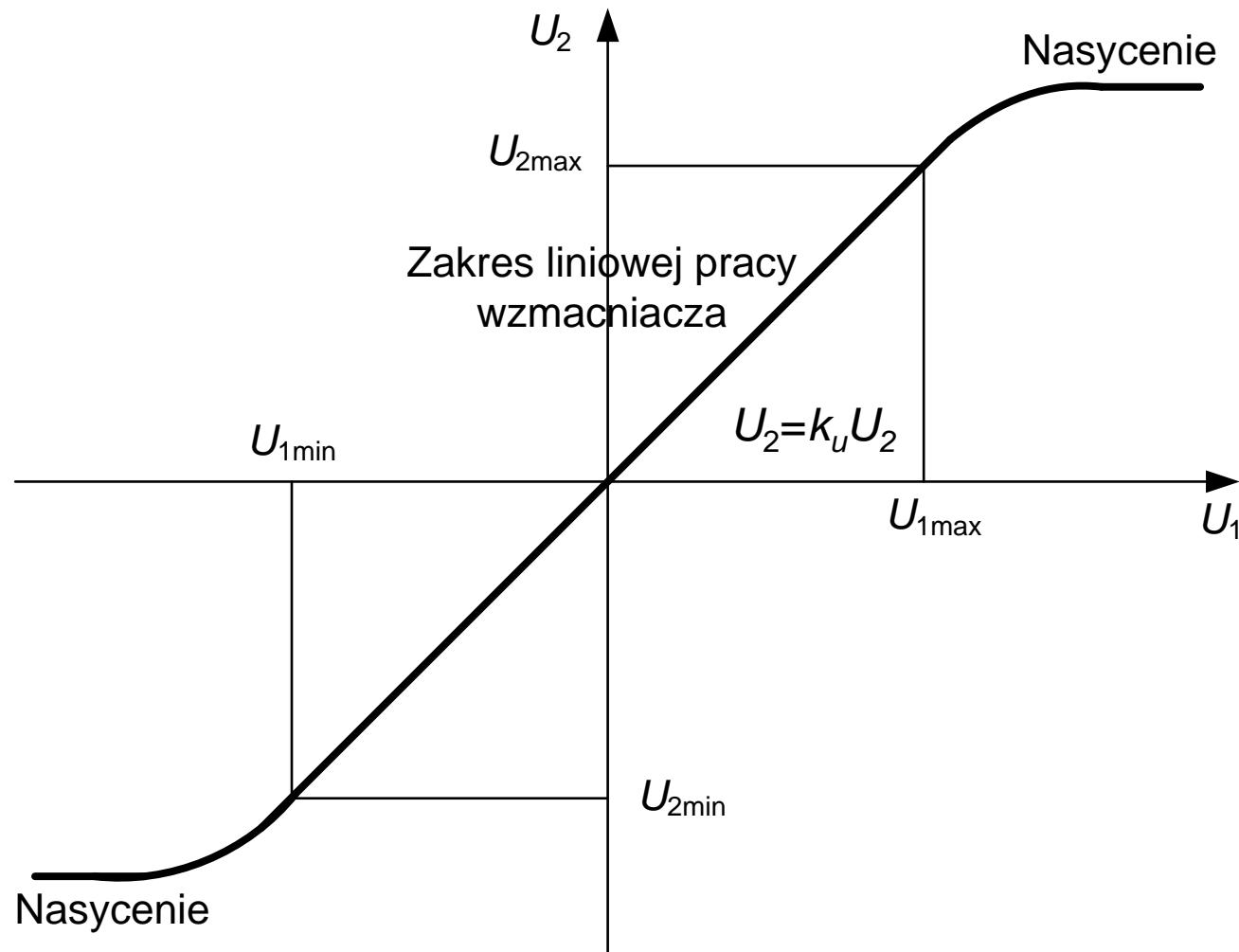
Wykład 10

Wzmacniacze pomiarowe cz. I

Wzmacniacze pomiarowe

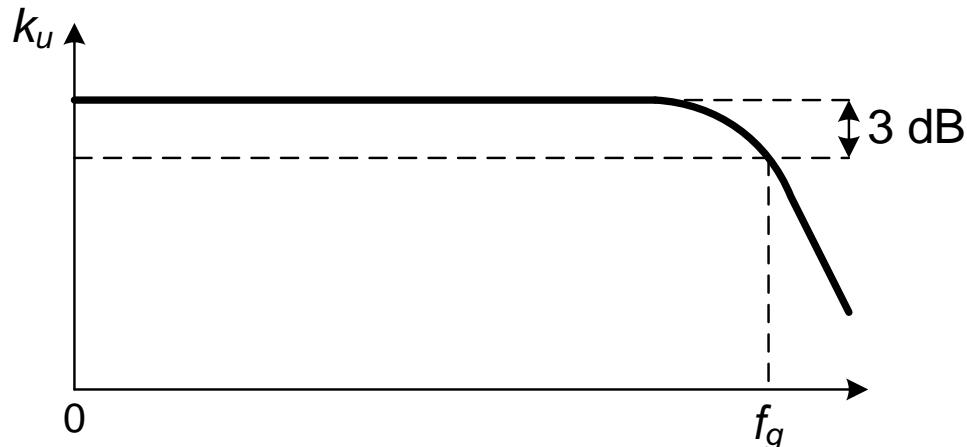
Wzmocnienie wzmacniaczy pomiarowych, w przeciwieństwie do wzmacniaczy akustycznych, ma wartość ścisłe określoną wartość wzmocnienia k_u z jakąś niepewnością $U(k_u)$.

Charakterystyka amplitudowa wzmacniacza $U_2=f(U_1)$

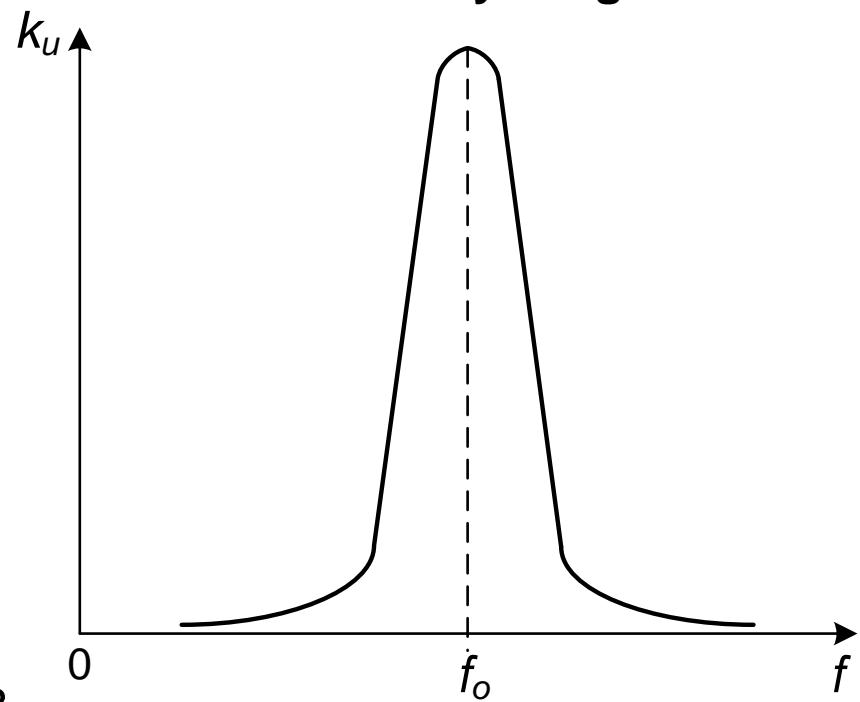


Charakterystyki wzmacnienia w funkcji częstotliwości wzmacniaczy pomiarowych

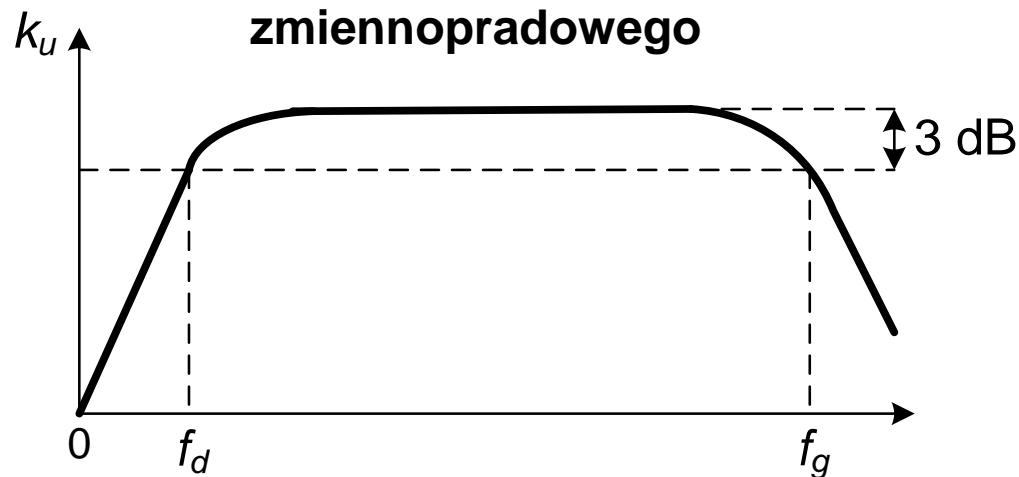
Charakterystyka wzmacniacza stałoprądowego



Charakterystyka wzmacniacza selektywnego



Charakterystyka wzmacniacza zmiennoprądowego



Wzmacniacze mogą przetwarzać:

$$U \rightarrow U$$

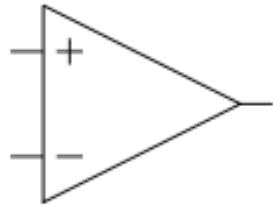
$$U \rightarrow I$$

$$I \rightarrow U$$

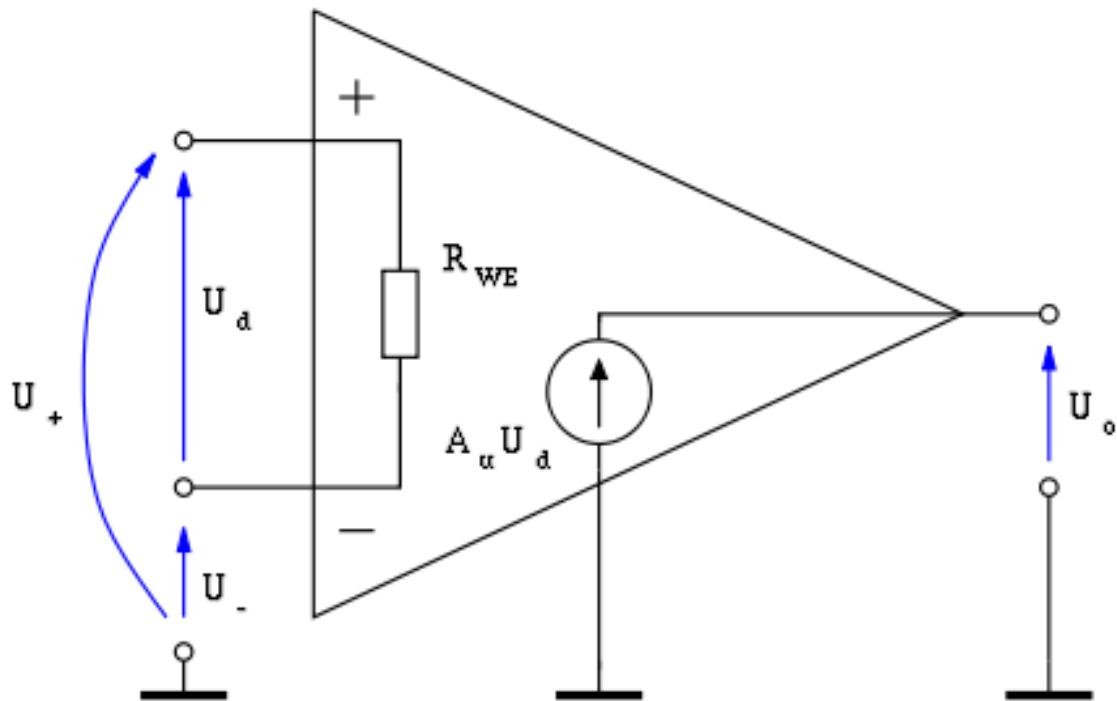
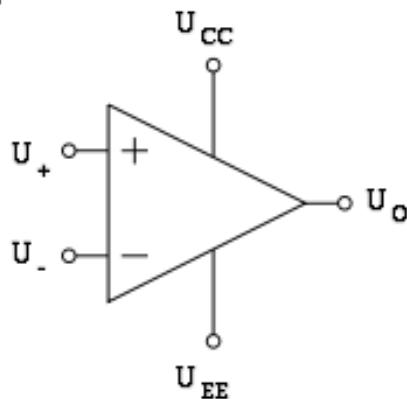
$$I \rightarrow I$$

Wzmacniacze operacyjne

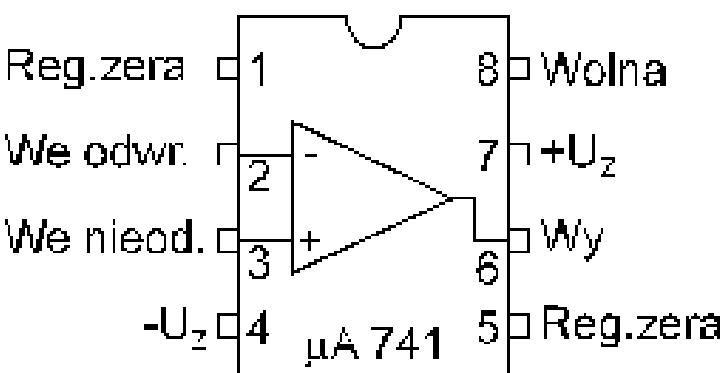
a)



b)

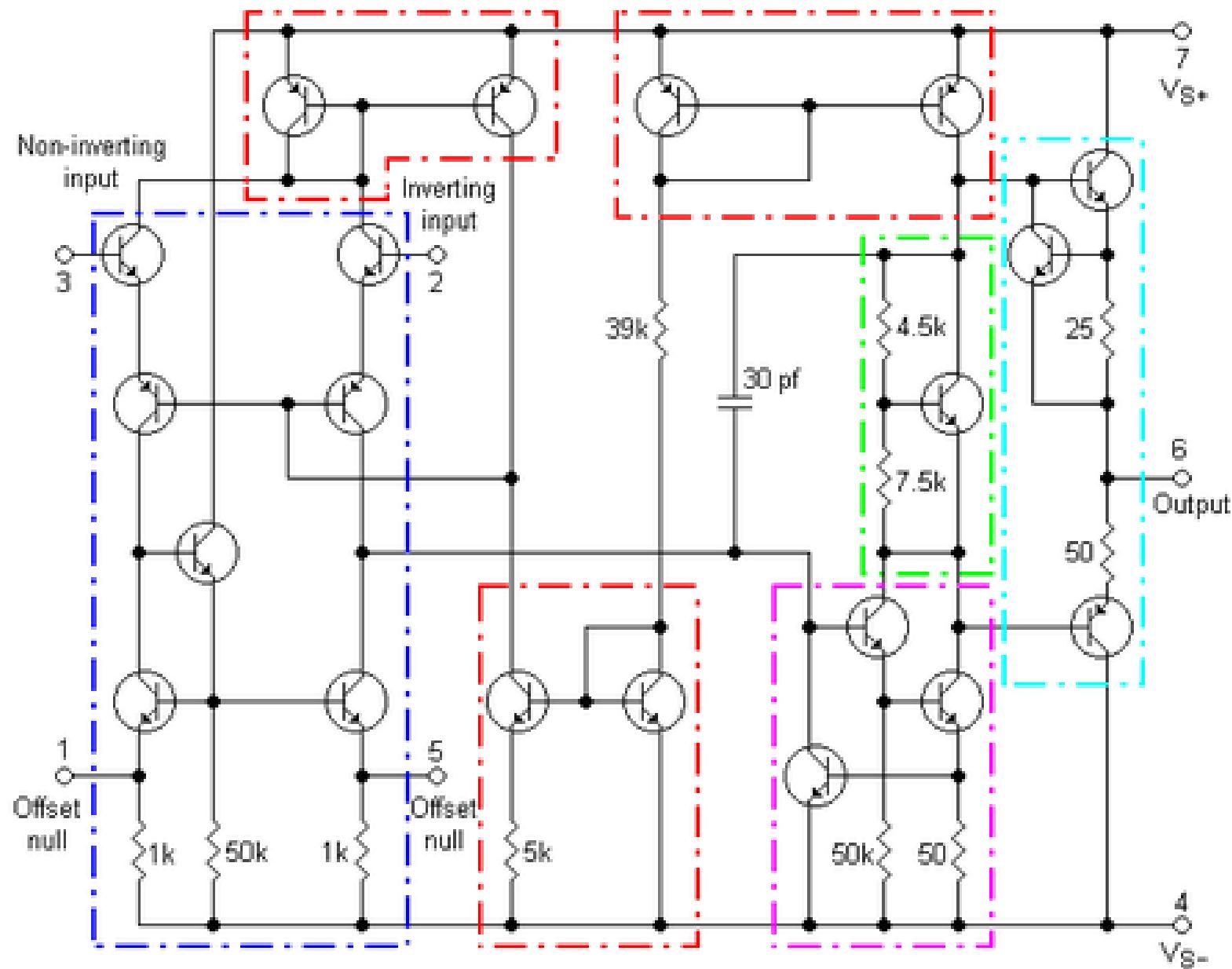


Obudowa 8-nóżkowa
(widok z góry)



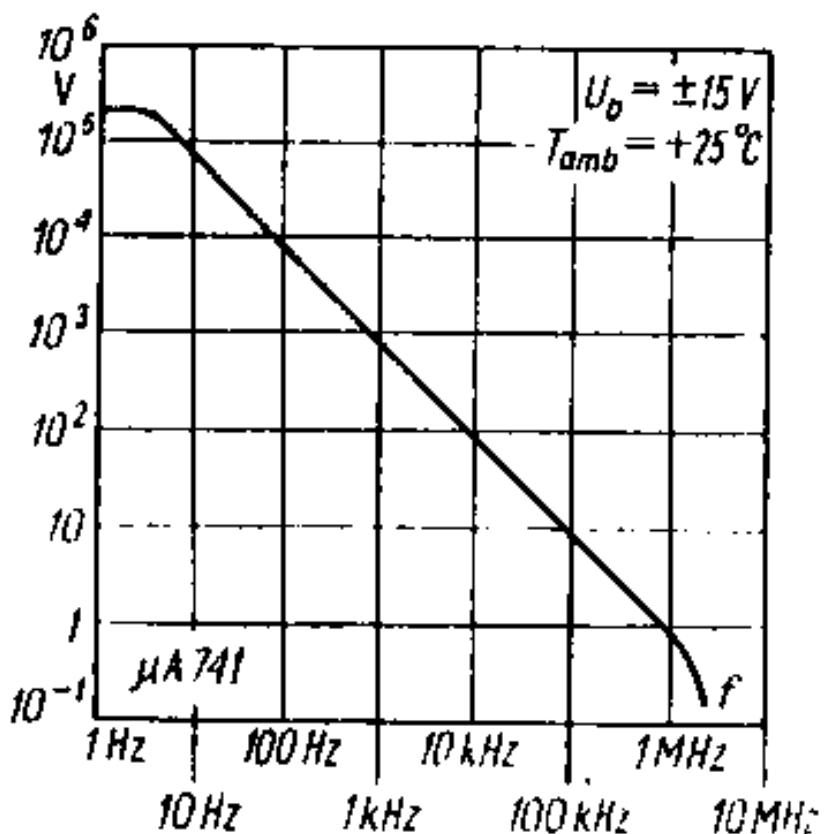
Wyprowadzenie
końcówek



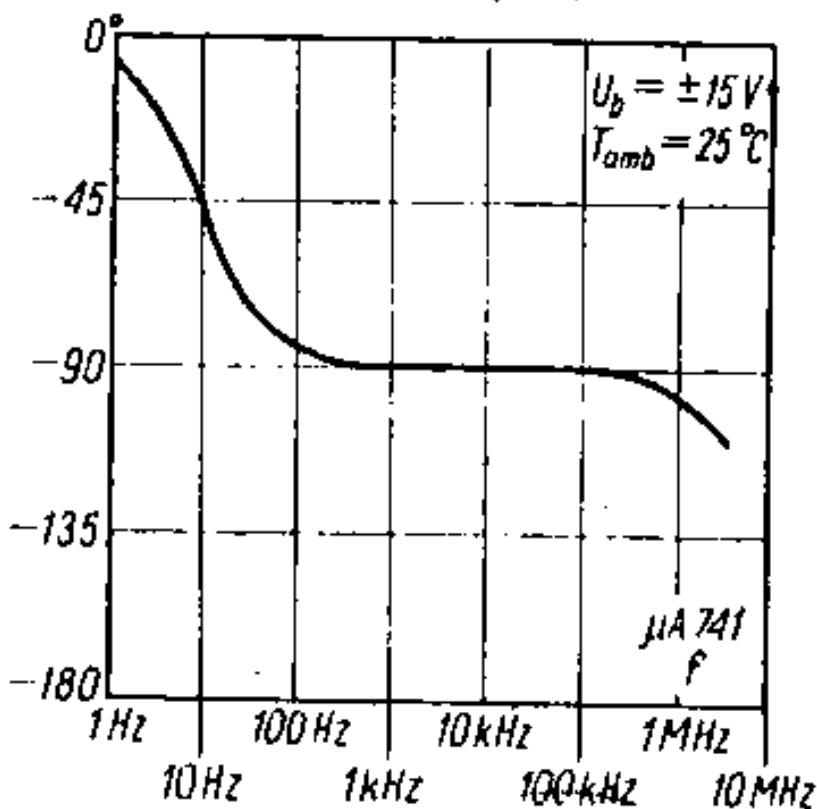


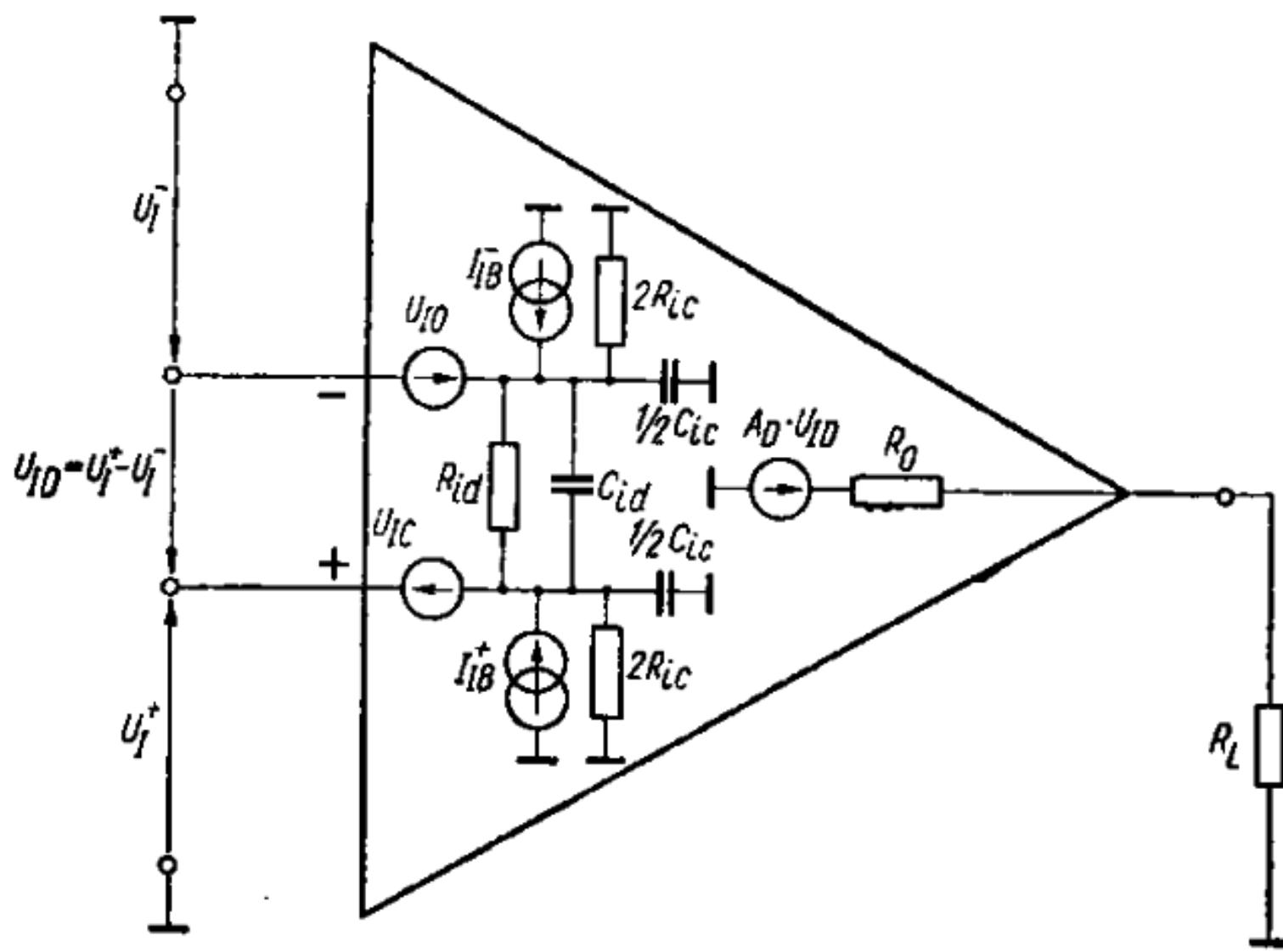
Schemat wzmacniacza operacyjnego μ A741

Wzmacnienie napięciowe wzmacniacza z otwartą pętlą w funkcji częstotliwości

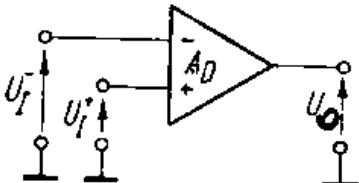
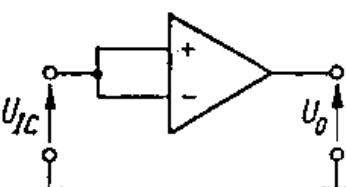
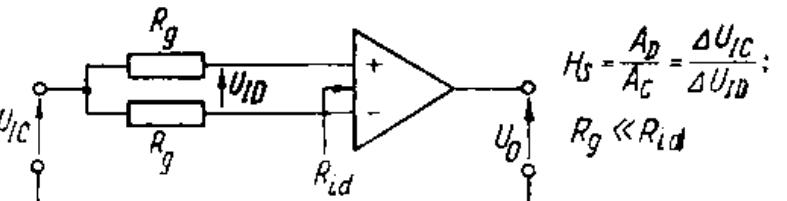


Charakterystyka fazowa wzmacniacza z otwartą pętlą w funkcji częstotliwości

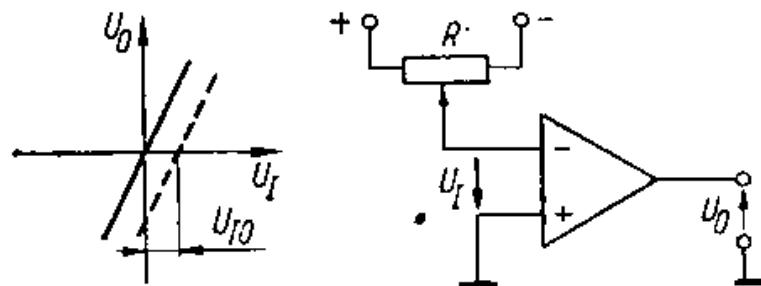




Schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego

Nazwa i określenie parametru	Oznaczenie	Jednostka
Napięciowe wzmacnienie różnicowe z otwartą pętlą (open loop voltage gain)	A_D	V/V, dB
	$A_D = \frac{\Delta U_o}{\Delta(U_f - U_I)}$	
Stosunek zmiany napięcia wyjściowego do wywołującej ją zmiany różnicowego napięcia na wejściu bez sprzężenia zwrotnego		.
Napięciowe wzmacnienie sumacyjne (common mode gain)	A_C	V/V, dB
	$A_C = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_{IC}}$	
Stosunek zmiany napięcia wyjściowego do wywołującej ją zmiany wejściowego napięcia sumacyjnego (współbieżnego)		.
Współczynnik tłumienia sumacyjnego rodzaju pracy (common mode rejection ratio)	CMRR (H_s)	V/V, dB
	$H_s = \frac{A_D}{A_C} = \frac{\Delta U_{IC}}{\Delta U_{ID}} ;$ $R_g \ll R_{ID}$	
Stosunek wzmacnienia różnicowego do wzmacnienia sumacyjnego (stosunek zmiany sumacyjnego napięcia wejściowego do zmiany różnicowego napięcia wejściowego, które powoduje taką samą zmianę napięcia wyjściowego)		.

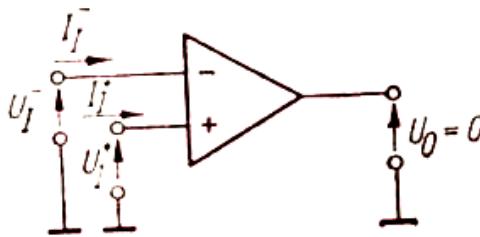
Wejściowe napięcie niezrównoważenia (input offset voltage)

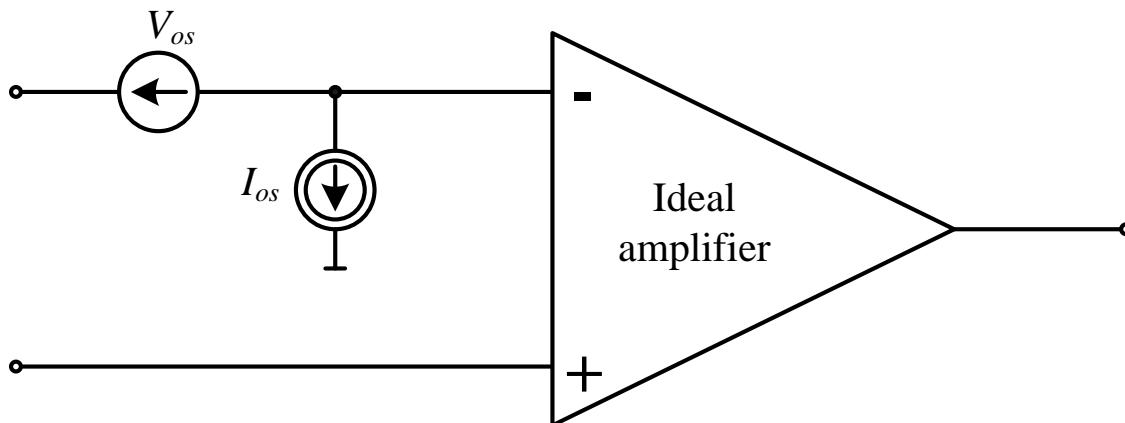


U_{I0}

mV

Wartość stałego napięcia, jaka musi być doprowadzona do wejścia różnicowego, aby uzyskać zerową wartość stałego napięcia na wyjściu

Nazwa i określenie parametru	Oznaczenie	Jednostka
Wejściowy prąd polaryzacji (input bias current)	I_{IB}	nA
Średnia arytmetyczna wartości dwóch prądów wpływających do zacisków wejściowych (odwracającego i nieodwracającego fazy) zrównoważonego wzmacniacza		
Wejściowy prąd niezrównoważenia (input offset current)	I_{IO}	nA
		
Różnica między wartościami stałych prądów wpływających do wejścia nieodwracającego fazy i odwracającego fazę, gdy stałe napięcie wyjściowe jest równe zeru (lub napięciu odniesienia)		
Maksymalne napięcie wejściowe (input voltage range — zakres zmian napięcia wejściowego)	$U_{I\max}$	V
Wartość napięcia pomiędzy każdym z wejść wzmacniacza a masą, przy którym wzmacniacz pracuje prawidłowo		



Maksymalne napięcie wyjściowe (output voltage swing)

Napięcie na wyjściu układu przy napięciu wejściowym przewyższającym o założoną wartość napięcie powodujące nasycenie. Parametr ten określa się dla napięć dodatnich i ujemnych

Maksymalne międzyszczytowe napięcie wyjściowe

Maksymalna wartość międzyszczytowego napięcia wyjściowego, przy której nie ma widocznych zniekształceń (gdy współczynnik zniekształceń nie przekracza określonej wartości)

Minimalne napięcie wyjściowe

Najmniejsza wartość napięcia na wyjściu, która zapewnia zadany stosunek mocy sygnału do mocy szumu

$U_{O \max}$	V
U_{OPP}	V
$U_{O \min}$	mV

Idealny wzmacniacz operacyjny charakteryzuje następujące parametry:

- Nieskończenie duże wzmacnienie $A \rightarrow \infty,$
- Nieskończenie małe wejściowe napięcie offsetowe $V_{os} \rightarrow 0,$
- Nieskończenie mały prąd polaryzacji wejściowe
 $I_{B1} = I_{B2} \rightarrow 0,$
- Nieskończenie dużą wejściową:
 - między wejściami różnicowymi $Z_d \rightarrow \infty,$
 - między każdym wejściem a masą $Z_s \rightarrow \infty,$
- Nieskończenie małą impedancję wyjściową $Z_o \rightarrow 0,$
- Niekończone pasmo przenoszonych częstotliwości $f \rightarrow \infty,$
- Nieskończone tłumienie sumacyjnego sygnału sumacyjnego $CMRR \rightarrow \infty.$

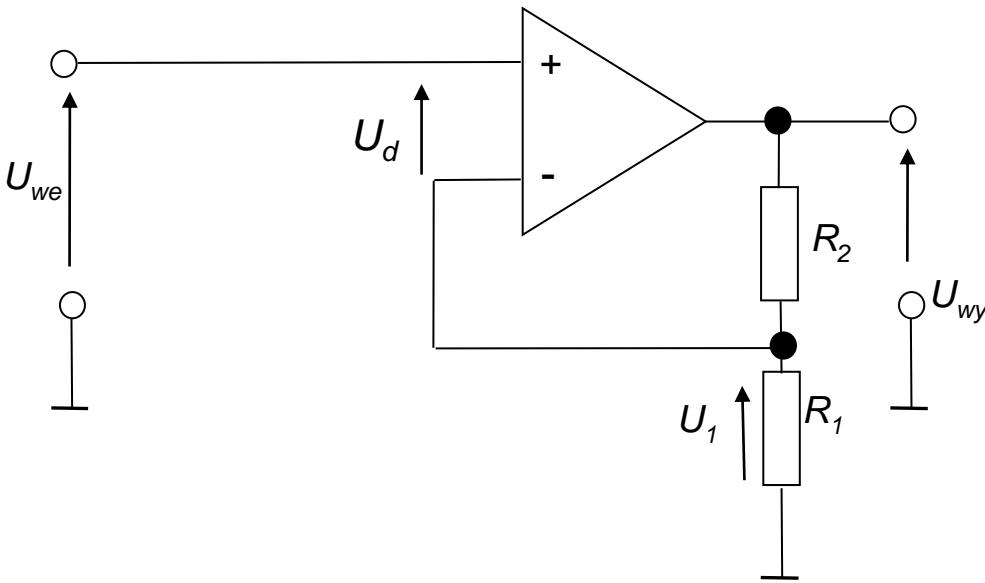
Rodzaje wzmacniaczy operacyjnych:

- **ogólnego przeznaczenia** (np. μ A 709, μ A 741),
- **szerokopasmowe** (tzw. szybkie, np. μ A 715, AD 509),
- **do zastosowań dokładnych** (o dużej rezystancji wejściowej, małe dryfy i szумy, np. μ A 777, LM 108, CA 3130, AD 504),
- **do zastosowań specjalnych** (technika kosmiczna, biomedyczna, np. μ A 735, AD 515).

Rodzaje wzmacniaczy specjalnych:

- precyzyjne
- szybkie
- superszybkie
- o szczególnie małych prądach wejściowych
- niskoszumowe
- o zwiększonej mocy wyjściowej.

Wzmacniacz nieodwracający



Wzmocnienie użyteczne

$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{A}{1 + A\beta} \quad \text{gdzie} \quad \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

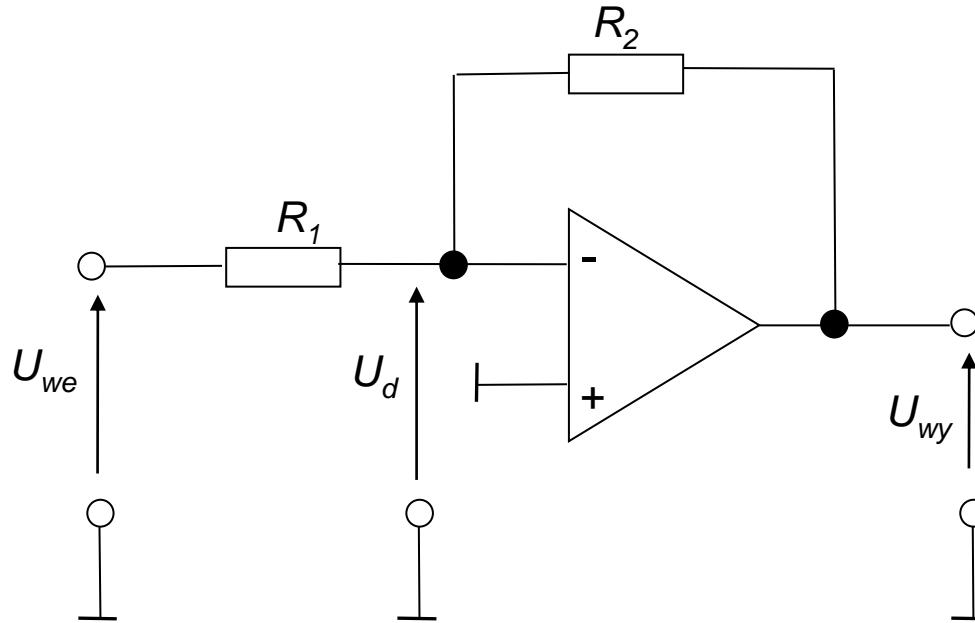
Dla idealnego wzmacniacza operacyjnego $A \rightarrow \infty$ $U_d = 0$ i $R_{id} \rightarrow \infty$

Wówczas: $k_u = \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

W rzeczywistości $k_u = \frac{1}{\beta}(1 - \varepsilon)$, gdzie $\varepsilon = \frac{1}{A\beta}$

Wzmacniacz ten ma dużą rezystancję wejściową

Wzmacniacz odwracający

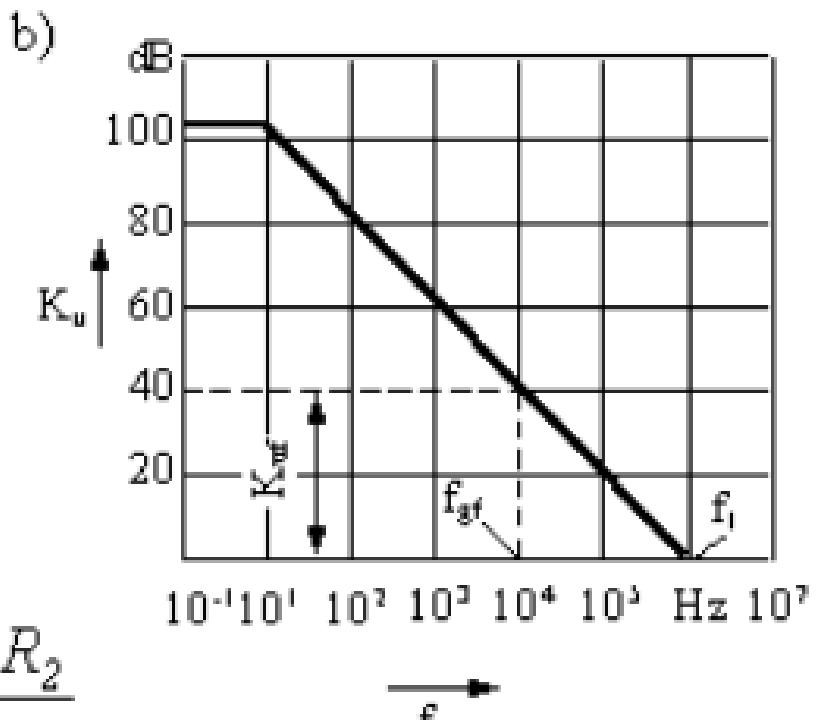
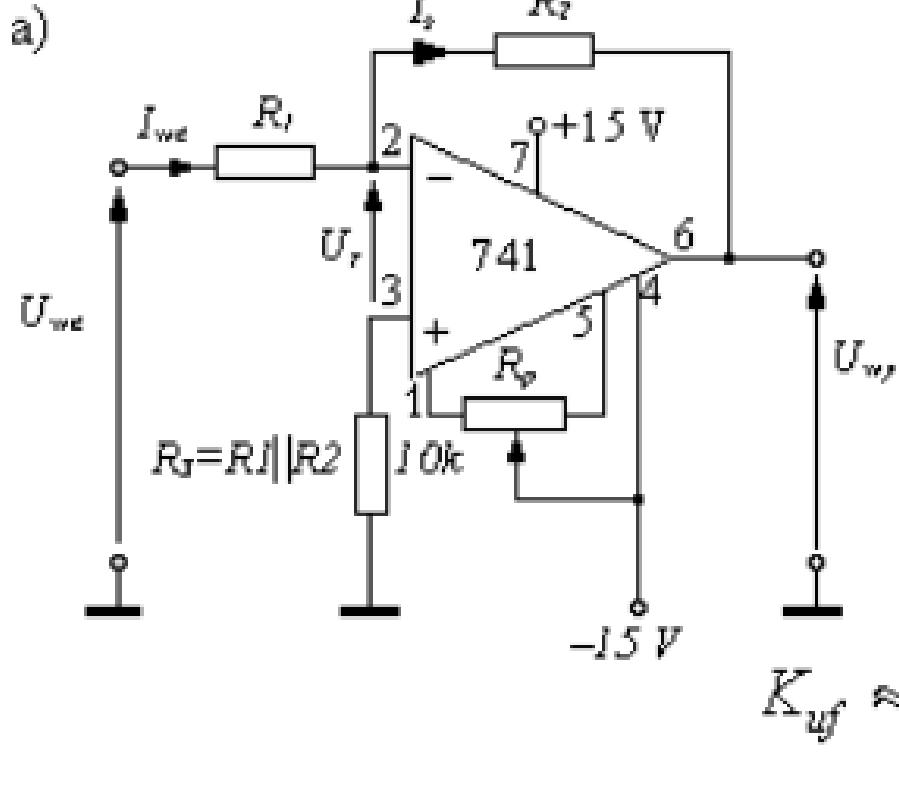


Wzmocnienie użyteczne $k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = -(1 - \beta) \frac{A}{1 + A\beta}$ gdzie $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

Jeżeli $A \rightarrow \infty$ to $k_u = 1 - \frac{1}{\beta} = -\frac{R_2}{R_1}$

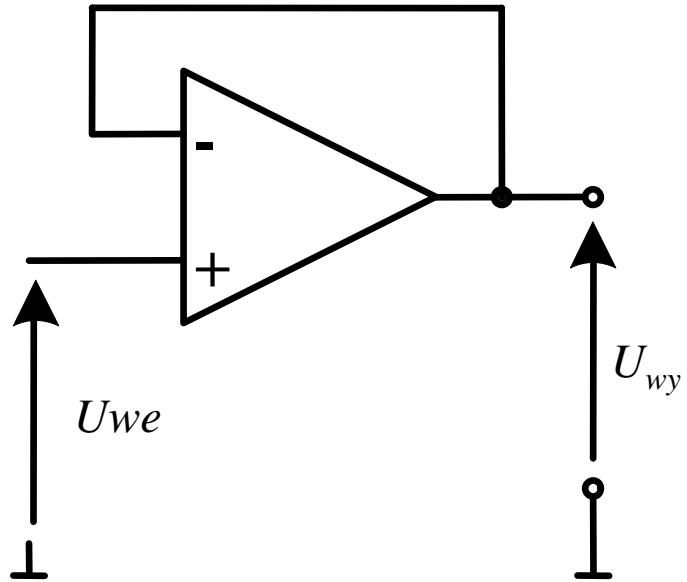
W rzeczywistości $k_u = \frac{1 - \beta}{\beta} (1 - \varepsilon) = \frac{R_2}{R_1} (1 - \varepsilon)$, gdzie $\varepsilon = \frac{1}{A\beta}$

Rezystancja wejściowa praktycznie równa się R_1



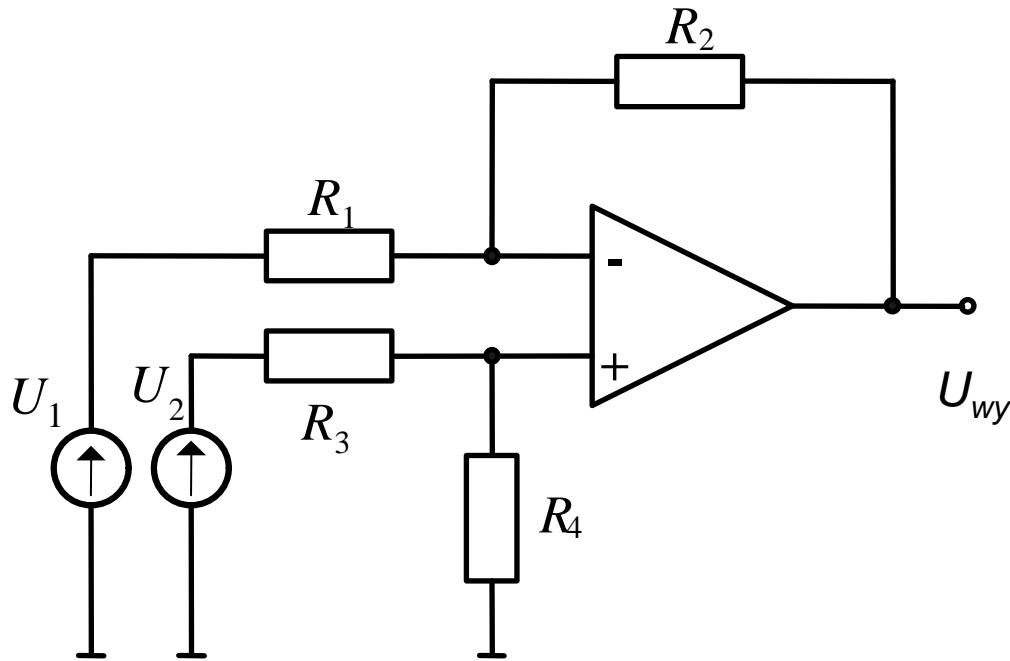
Przykładowy schemat wzmacniacza odwracającego (a)
i jego charakterystyka częstotliwościowa (b)

Wtórnik napięciowy



Jeżeli $A \rightarrow \infty$ to $U_d \rightarrow 0$ $k_u \rightarrow 1$, $\beta = 1$ $k_u = 1(1 - \varepsilon)$, gdzie $\varepsilon = \frac{1}{A}$

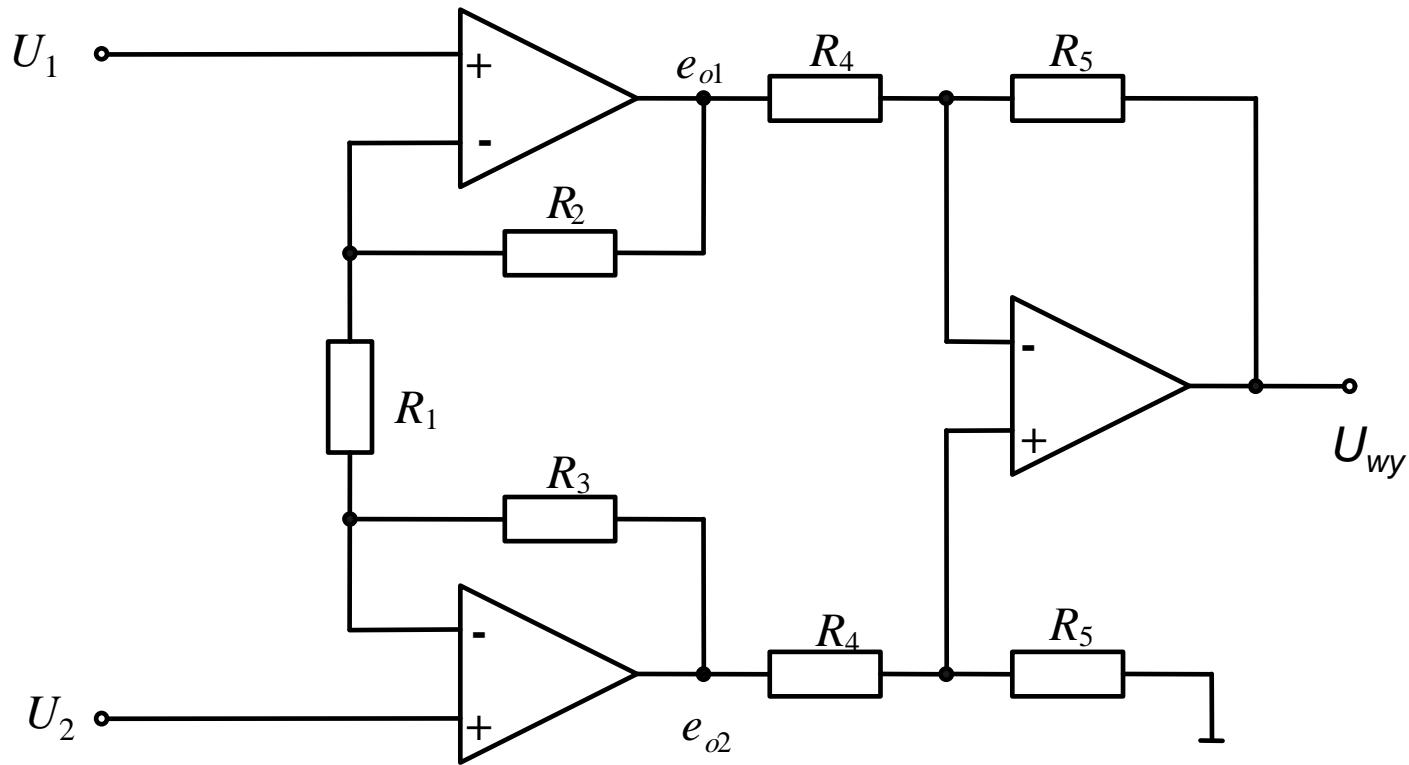
Wzmacniacz różnicowy



Jeżeli wzmacniacz jest idealny to
$$U_{wy} = \frac{R_1}{R_2} (U_2 - U_1)$$

Rezystancja na wejściu „+” wynosi $R_3 + R_4$, a na wejściu „-” R_1

Wzmacniacz różnicowy o dużej rezystancji wejściowej



W przypadku idealnych wzmacniaczy operacyjnych

$$U_{wy} = \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_5}{R_4} (U_2 - U_1)$$

Czujniki i przetworniki

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

Wykład 10

**Wzmacniacze pomiarowe cz. II
i kondycjonery**

Przetwarzanie wzmacniaczy

Równanie przetwarzania

$$y = abxk$$

gdzie:

$$a = \frac{1}{1 + \frac{S_z}{S_1}}$$

$$b = \frac{1}{1 + \frac{S_2}{S_{ob}}}$$

Parametry charakteryzujące:

S_z – Źródło wielkości mierzonej,

S_1 – wejście układu przetwarzania,

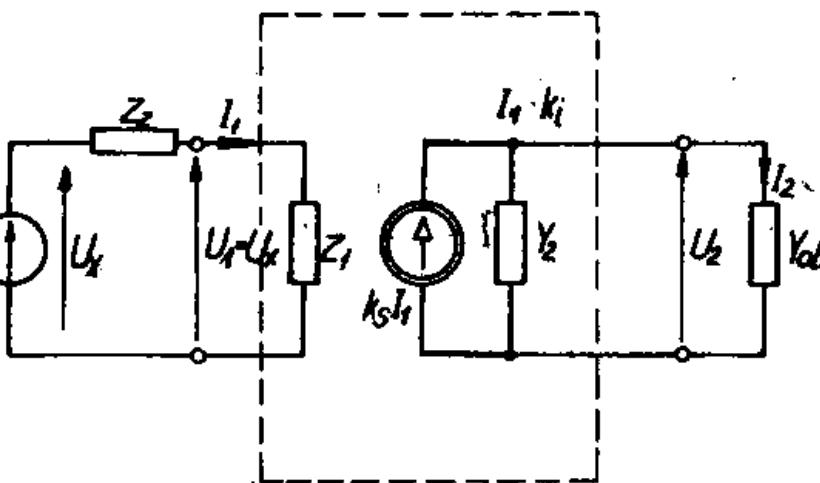
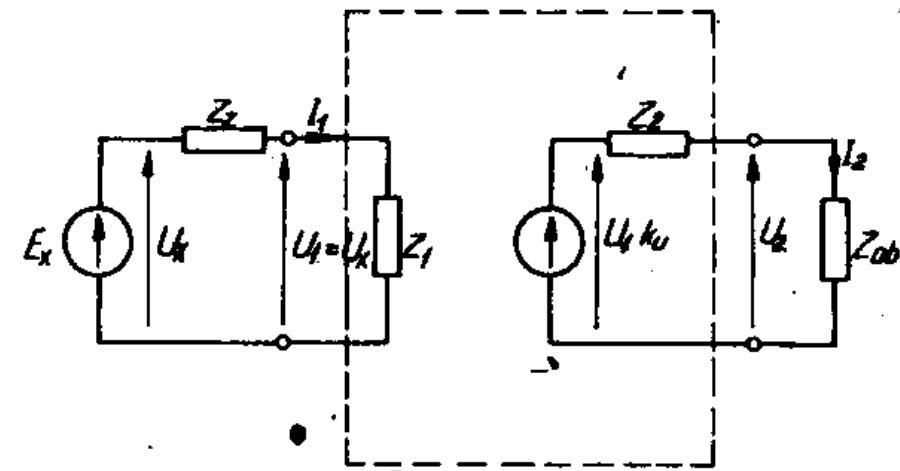
S_2 – wyście układu pomiarowego,

S_{ob} – obciążenie układu przetwarzania.

W zależności od układu przetwarzania są to wartości odpowiedniej impedancji Z lub admitancji $Z=1/Z$.

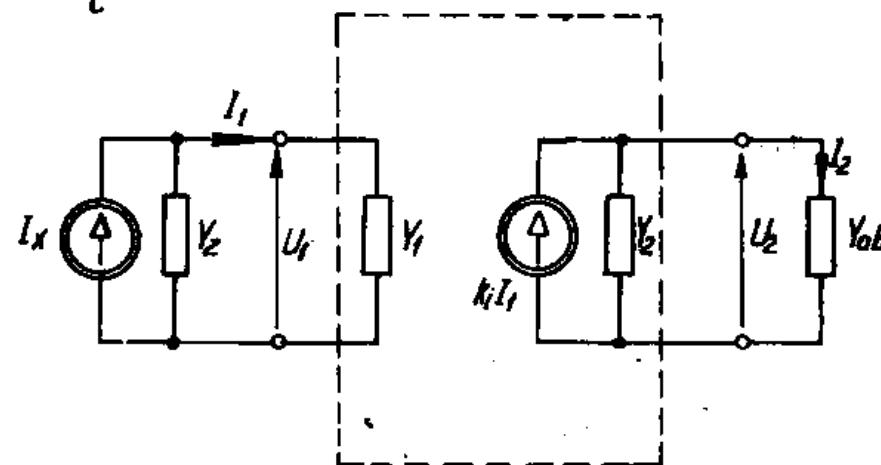
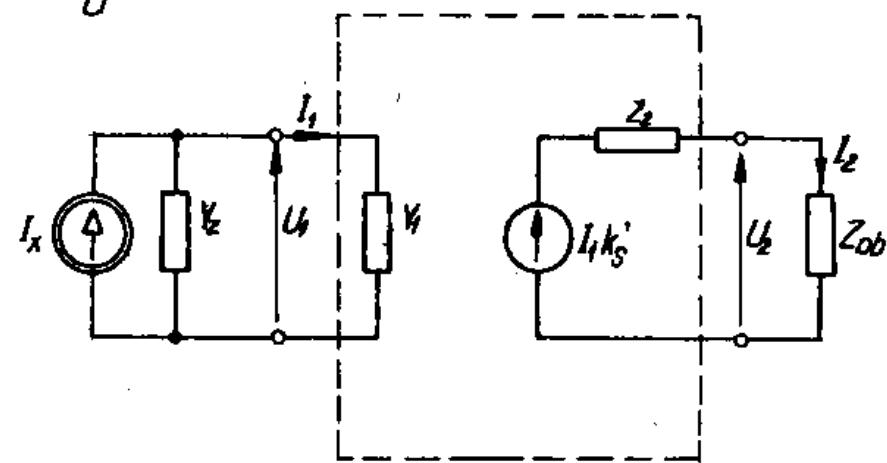
Gdy $S_z = 0$ i $S_{ob} \rightarrow \infty$

$$y = xk$$

a**b**

Przetworzenie: napięcie - prąd

Przetworzenie: napięcie - napięcie

Dla idealnego wzmacniacza $Z_1 \rightarrow \infty$, $Y_2 = 1/Z_2 \rightarrow \infty$ $Z_1 \rightarrow \infty$, $Z_2 = 0$ **c****d**

Przetworzenie: prąd - prąd

Przetworzenie: prąd - napięcie

 $Y_1 = 1/Z_1 \rightarrow \infty$, $Y_2 = 1/Z_2 \rightarrow \infty$ $Y_1 = 1/Z_1 \rightarrow \infty$, $Z_2 = 0$

Ujemne sprzężenie zwrotne

Ujemne sprzężenie zwrotne wpływa korzystnie na parametry wzmacniaczy:

- poprawia stabilność wzmacnienia (układ jest mniej wrażliwy np. na wahania napięć zasilających i zmianę temperatury);
- zmniejszają się szумy i zniekształcenia;
- zwiększa się górną częstotliwość graniczną (czyli ulega poszerzeniu pasmo);
- modyfikuje korzystnie impedancję wejściową i wyjściową.

Sprzężenie zwrotne klasyfikuje się zależnie od sposobu pobierania sygnału zwrotnego z wyjścia układu oraz sposobu doprowadzenia go na wejście. Sygnał sprzężenia zwrotnego może być proporcjonalny do napięcia wyjściowego (**napięciowe**) lub prądu wyjściowego (**prądowe**). Gdy sygnał sprzężenia zwrotnego jest doprowadzany do wejścia szeregowo z sygnałem wejściowym, takie sprzężenie nazywa się **szeregowym**, gdy zaś równolegle - **równoległym**. Rozróżnia się cztery podstawowe typy ujemnego sprzężenia zwrotnego:

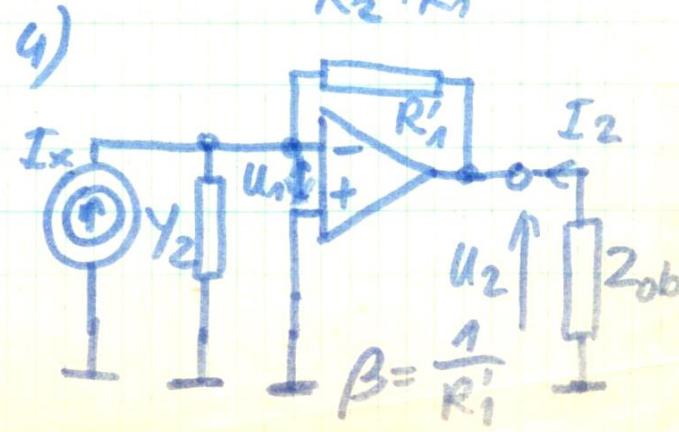
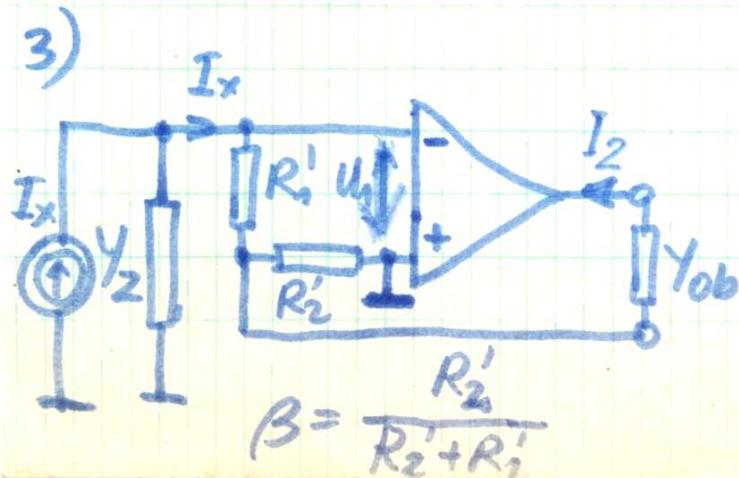
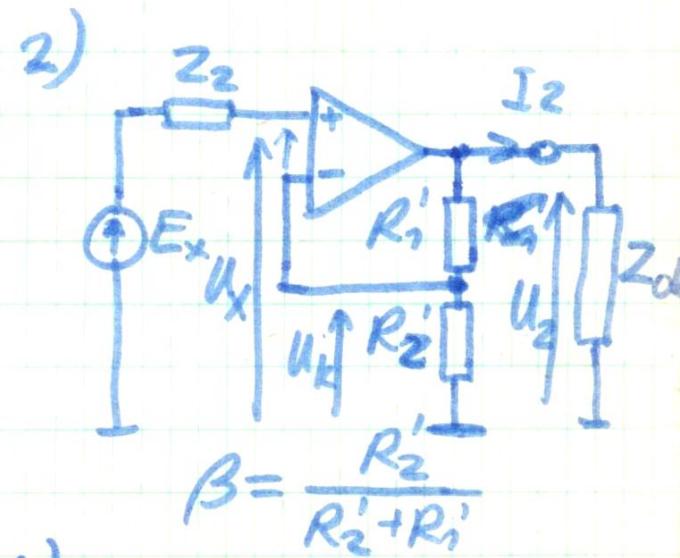
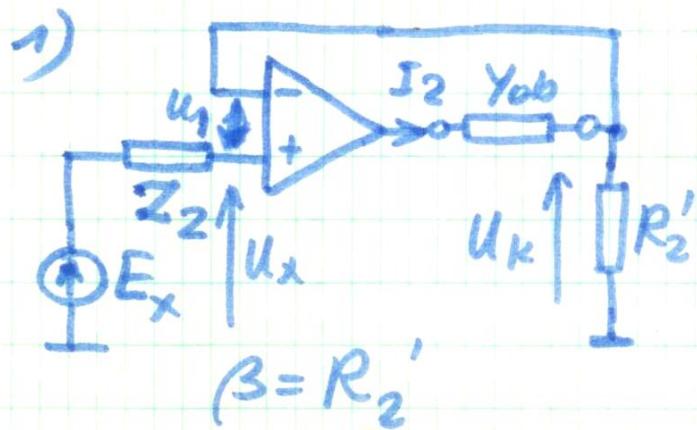
1. **Prądowo-szeregowe – przetwarzanie $U \rightarrow I$.** Sygnał sprzężenia zwrotnego jest proporcjonalny do prądu wyjściowego i doprowadzany na wejście szeregowo z sygnałem wejściowym.

Skuteczność tego sprzężenia zwiększa się gdy admitancja obciążenia Y_{ob} rośnie (impedancja obciążenia Z_{ob} maleje), natomiast rezystancja źródła Z_z maleje.

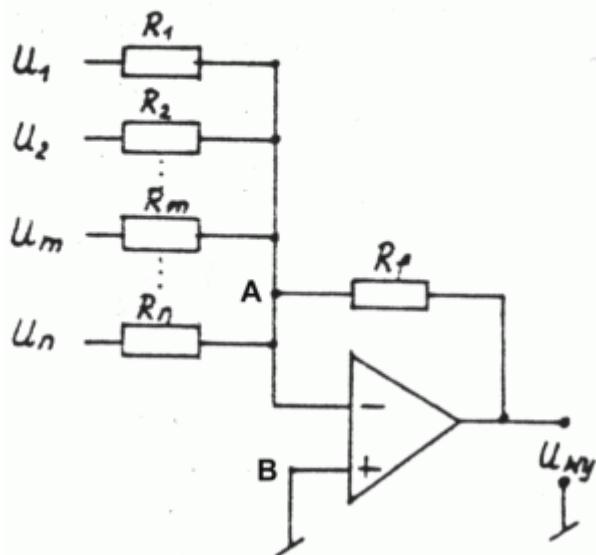
2. **Napięciowo-szeregowe - przetwarzanie $U \rightarrow U$.** Sygnał sprzężenia zwrotnego jest proporcjonalny do napięcia wyjściowego. Doprowadzany jest on na wejście szeregowo z sygnałem wejściowym. Skuteczność tego sprzężenia zwiększa się gdy impedancja obciążenia Z_{ob} rośnie, a impedancja źródła Z_z maleje.

3. Prądowo-równoległe - przetwarzanie $I \rightarrow I$. Sygnał sprzężenia zwrotnego jest proporcjonalny do prądu wyjściowego i doprowadzany na wejście równolegle z sygnałem wejściowym. Skuteczność tego sprzężenia zwiększa się gdy admitancja obciążenia Y_{ob} rośnie (impedancja Z_{ob} maleje), natomiast admitancja źródła Y_z maleje (impedancja Z_z rośnie).

4. Napięciowo-równoległe – przetwarzanie $I \rightarrow U$. Sygnał sprzężenia zwrotnego jest proporcjonalny do napięcia wyjściowego i doprowadzany na wejście równolegle z sygnałem wejściowym. Skuteczność tego sprzężenia zwiększa się gdy impedancja obciążenia Z_{ob} i źródła Z_z rosną (admitancja źródła Y_z maleje).



Wzmacniacz sumujący (sumator napięć)



$$1) I_1 + I_2 + \dots + I_n + I_f = 0$$

$$2) U_{AB} = 0$$

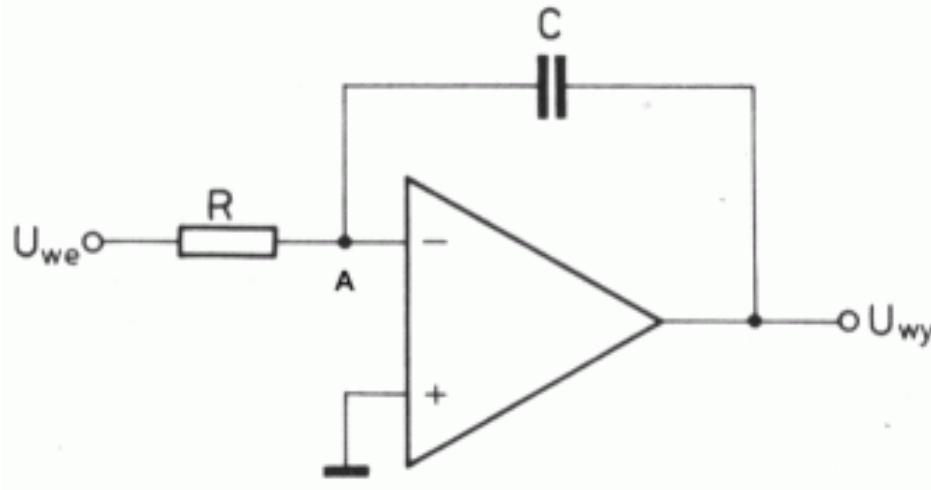
$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} + \frac{U_{wy}}{R_f} = 0$$

$$U_{wy} = -R_f \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right)$$

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_f$$

$$U_{wy} = - (U_1 + U_2 + \dots + U_n)$$

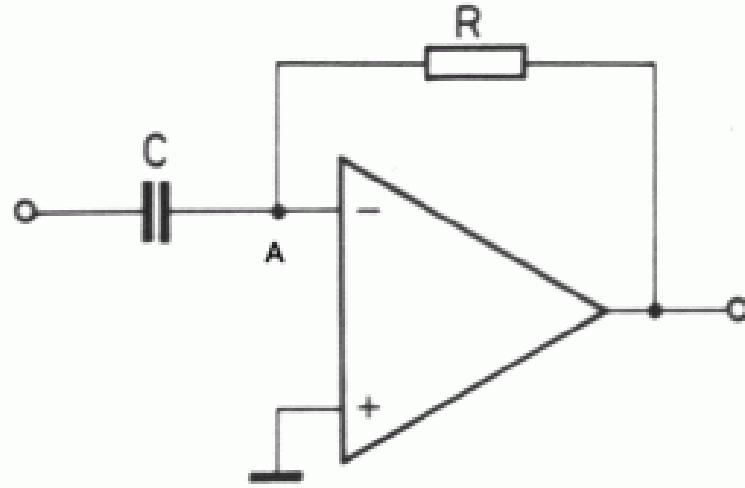
Wzmacniacz całkujący



$$\frac{U_{we}}{R} + C \frac{dU_{wy}}{dt} = 0$$

$$U_{wy} = -\frac{1}{RC} \int U_{we} dt + U_0$$

Wzmacniacz różniczkujący



$$\frac{U_{wy}}{R} + C \frac{dU_{we}}{dt} = 0$$

$$U_{wy} = -RC \cdot \frac{dU_{we}}{dt}$$

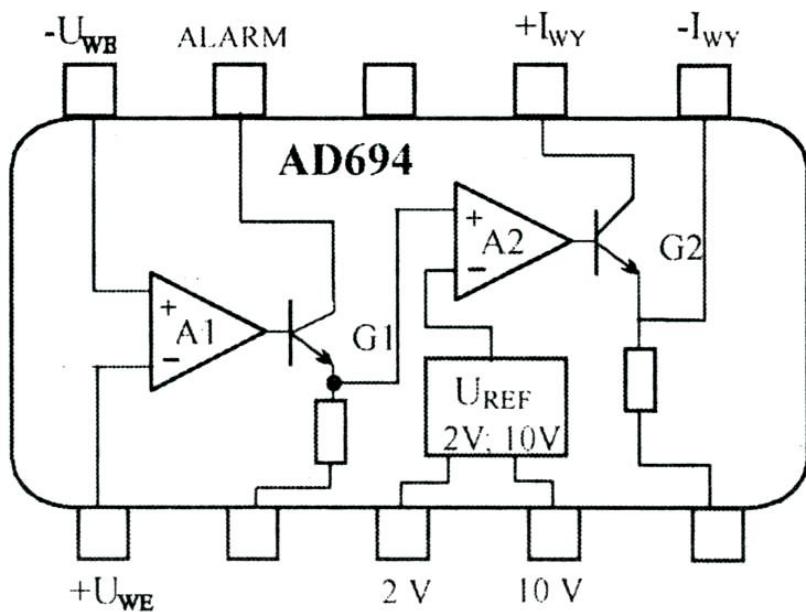
Inne przetworniki analogowe

1. Rezystory $I \rightarrow U$ lub $U \rightarrow I$
2. Dzielniki napięcia i prądu
3. Przekładniki prądowe
4. Przekładniki napięciowe
5. Przetworniki prostownikowe wartości średniej
6. Fazoczułe prostowniki wartości średniej
7. Prostowniki wartości szczytowej
8. Przetworniki wartości skutecznej
 - a) termoelektryczne
 - b) realizujące operacje matematyczne (podnoszenie do kwadratu, całkowanie i pierwiastkowanie)
9. Przetworniki mocy
 - a) TDM (Time Division Multiplication)
 - b) halotronowe
 - c) magnetorezystancyjne
10. Przetworniki częstotliwości
11. Przetworniki przesunięcia fazowego

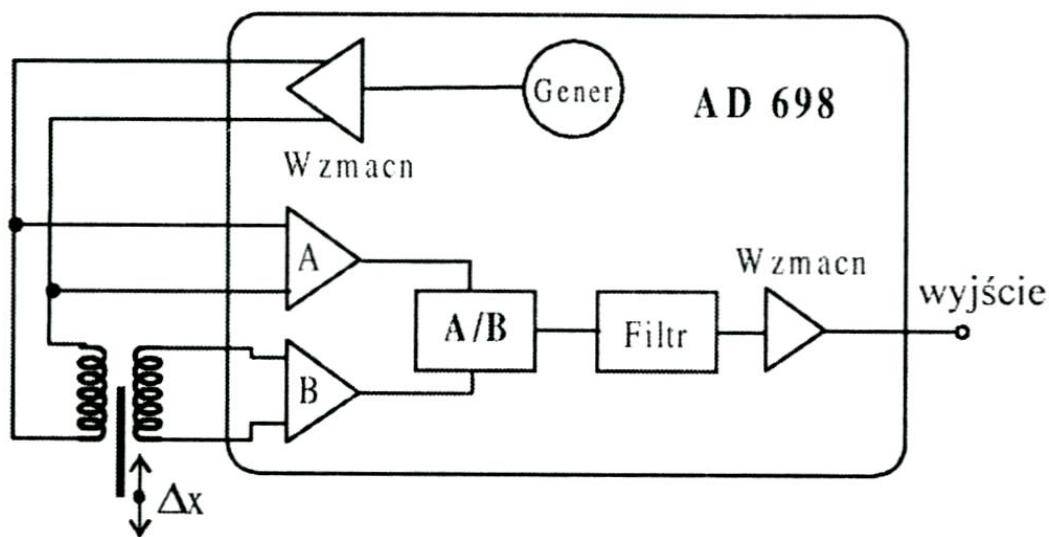
Kondycjonery

Sygnal z czujnika wymaga przetworzenia i dostosowania do zakresu pomiarowego przetwornika analogowo-cyfrowego. Układy służące do tego celu nazywa się **kondycjonerami** (ang. *conditioners*). Typowe sygnały wyjściowe kondycjonerów: (0, +5 V), (-5 V, +5 V), (0, 20 mA), (4 mA, 20 mA).

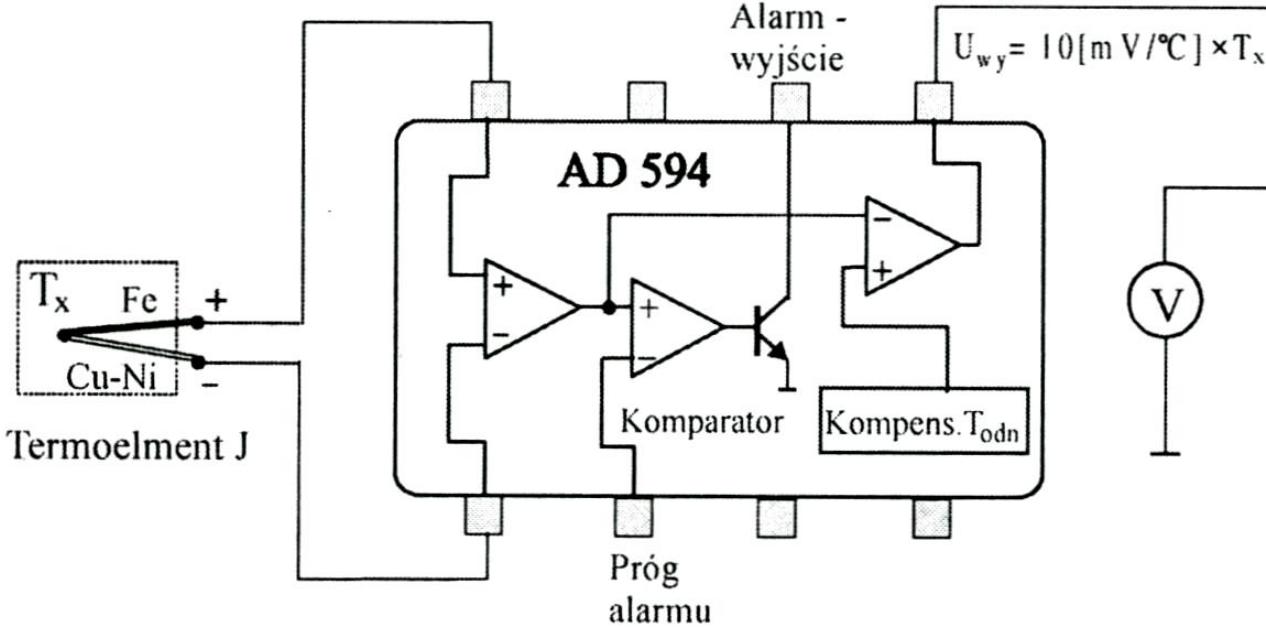
Kondycjonery budowane są w postaci scalonej z przeznaczeniem ogólnym lub do współpracy z określonym czujnikiem, np. temperatury, przemieszczenia itp.



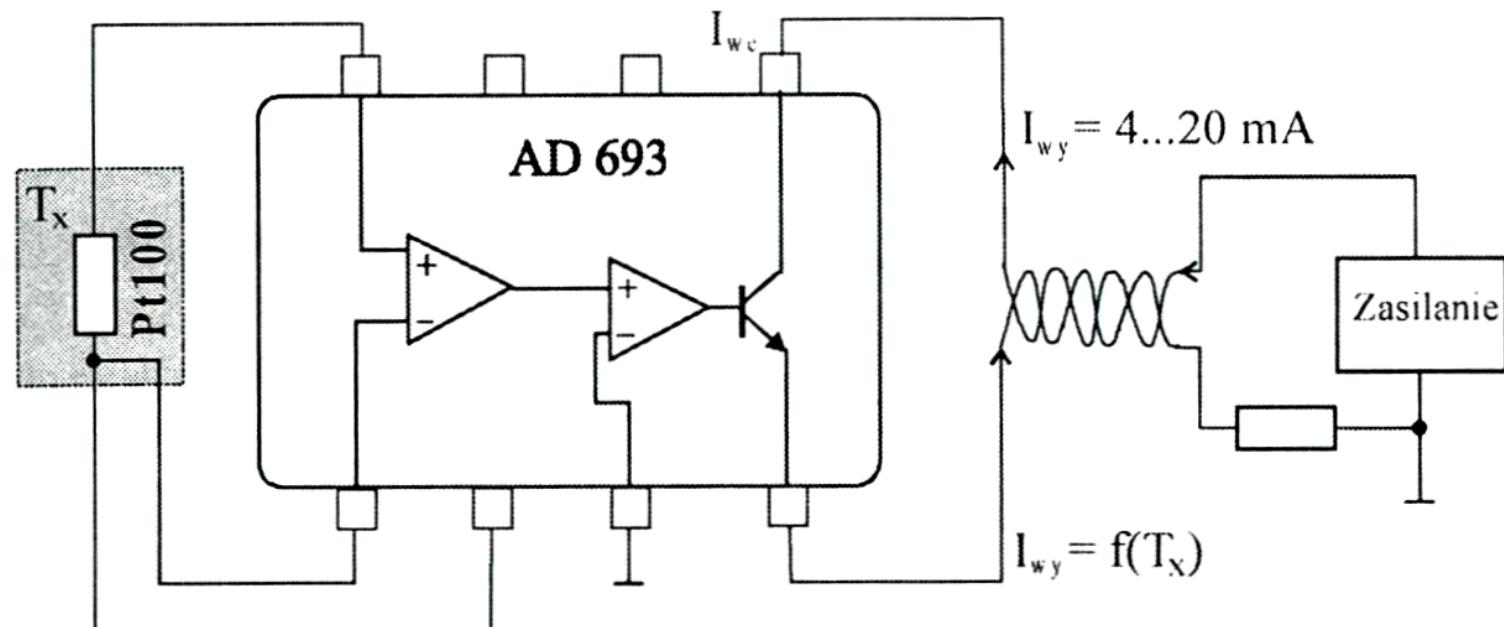
Kondycjoner z przeznaczeniem ogólnym. Sygnały wejściowe 0÷2 V i 0÷10 V zamienia na sygnał wyjściowy 4÷20 mA przesyłany do 2 km.



Kondycjoner do pomiaru przemieszczenia Δx zawiera generator napięcia sinusoidalnego, wzmacniacze napięcia przemiennego A i B, detektor fazy A/B, filtr dolnoprzepustowy i wyjściowy wzmacniacz napięcia stałego.



Kondycjoner współpracujący z czujnikiem termoelektrycznym



Kondycjoner współpracujący z czujnikiem rezystancyjnym Pt-100

Czujniki i przetworniki

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

Wykład 12

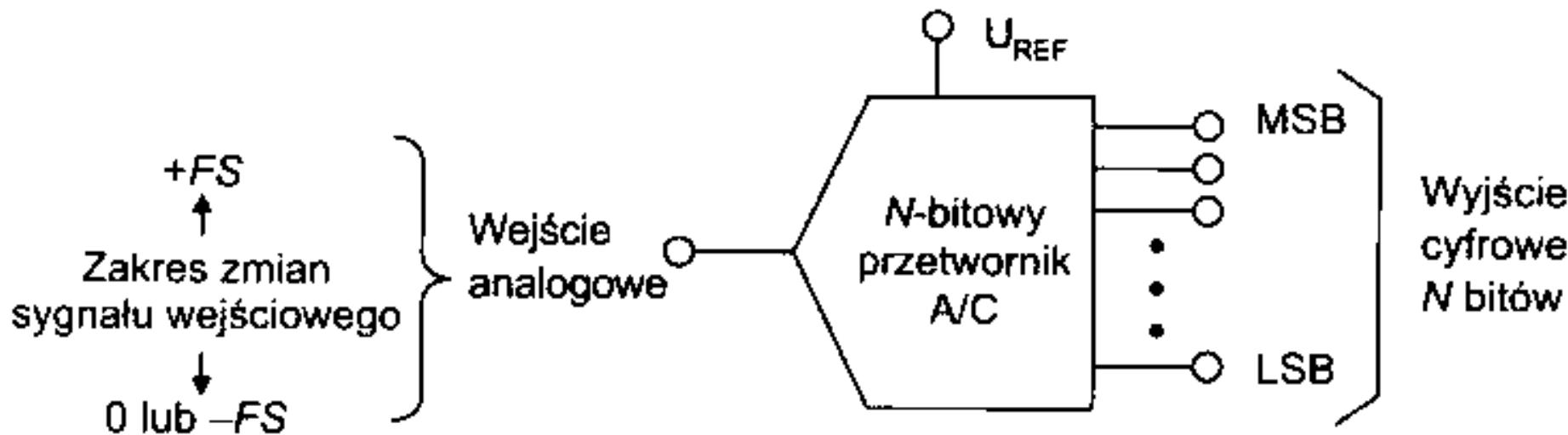
**Przetworniki analogowo-cyfrowe
(A/C , a/c)
(Ang.: A/D)**

Przetwornik A/C (ang. A/D converter - ADC)

Definicja

Przetwornik analogowo-cyfrowy realizuje proces przetwarzania sygnału analogowego na sygnał cyfrowy. Jest to układ z jednym wejściem i wieloma (n) wyjściami. Rezultatem konwersji jest cyfrowy kod proporcjonalny wartości analogowego sygnału referencyjnego:

$$U_I = U_{REF} \left(\frac{a_1}{2^1} + \frac{a_2}{2^2} + \dots + \frac{a_n}{2^N} \right) \quad a_1 \dots a_n = \{0, 1\}$$

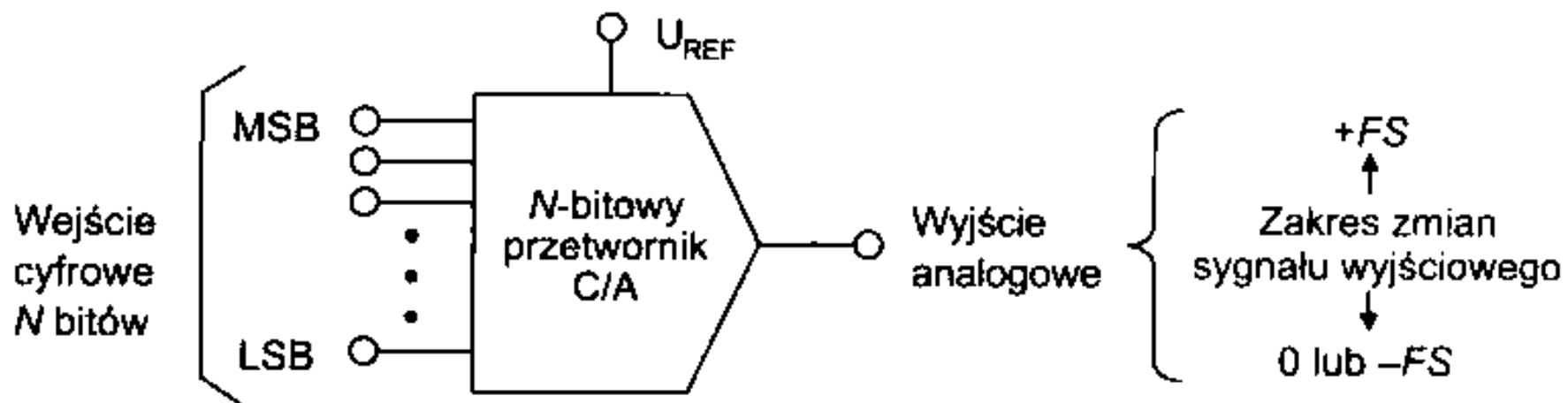


Przetwornik C/A (ang. D/A converter - DAC)

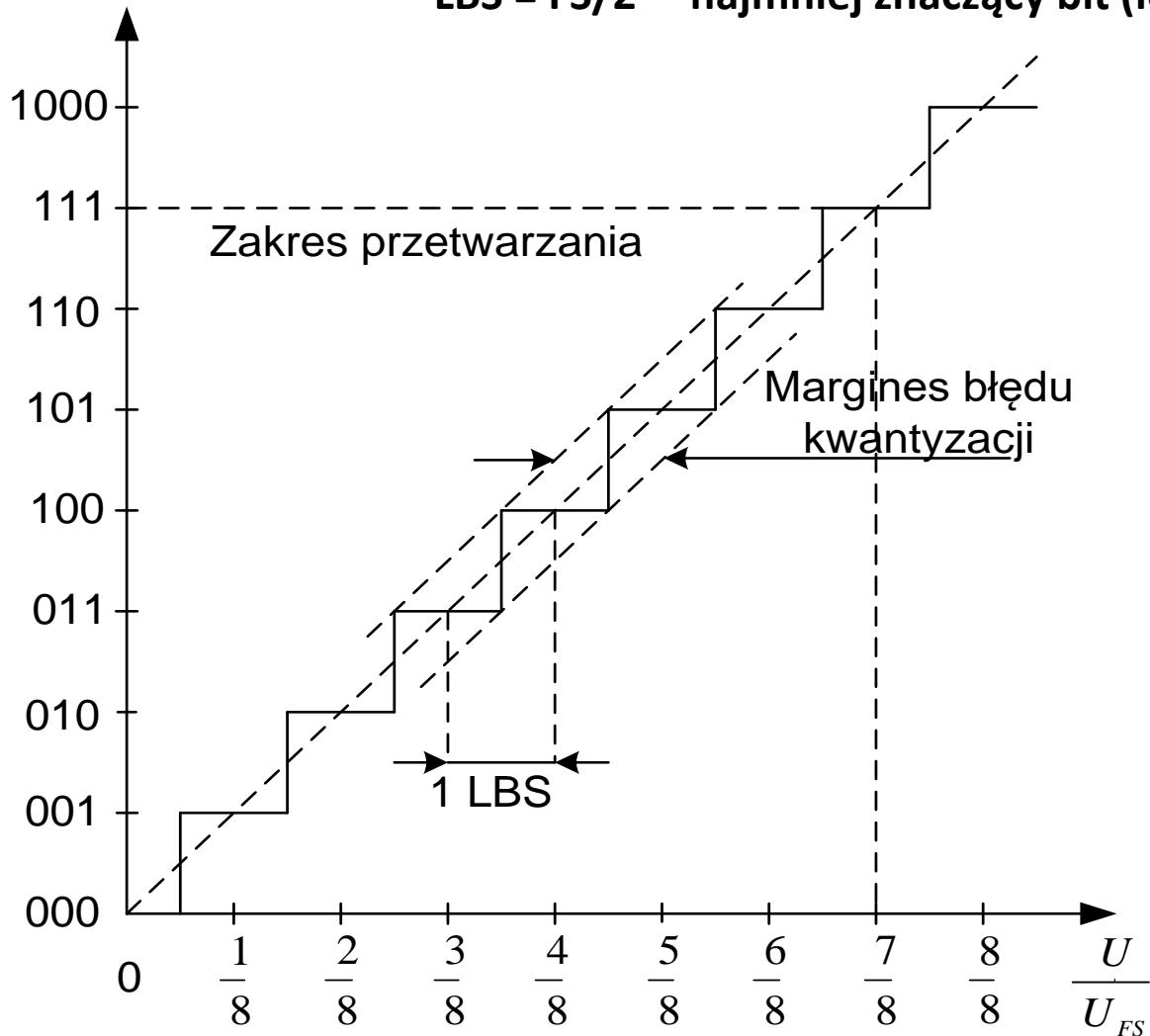
Definicja

Przetwornik cyfrowo-analogowy realizuje proces przetwarzania sygnału cyfrowego na sygnał analogowy. Jest to układ z wieloma (n) wejściami i jednym wyjściem .

Są one używane do sterowania w automatyce i generowania sygnałów analogowych (generatory cyfrowe).



Wyjściowy sygnał cyfrowy



U_{FS} – pełny zakres przetwornika (FS – full scale),

n – liczba bitów słowa,

$LBS = FS/2^n$ - najmniej znaczący bit (least significant bit).

Długość słowa wyjściowego w bitach (n) decyduje o rozdzielczości przetwornika.

Rzdzielcość wyraża najmniejszą wartość sygnału wyjściowego rozróżnialną przez przetwornik. Może być wyrażona w mV jako wartość przedziału kwantyzacji, odpowiadająca najmniej znaczącemu bitowi słowa wyjściowego:

$$LBS = U_{FS}/2^n$$

Czas przetwarzania - czas potrzebny do całkowitego przetworzenia sygnału przez przetwornik analogowo-cyfrowy.

Rozdzielczość (zdefiniowana na poprzednim slajdzie) jest zwykle wyrażona w bitach, gdzie liczba kodów cyfrowych jest równy 2^n . Na przykład, przetwornik 10-bitowy odwzorowuje sygnał analogowy w $2^{10} = 1024$ kodów cyfrowych.

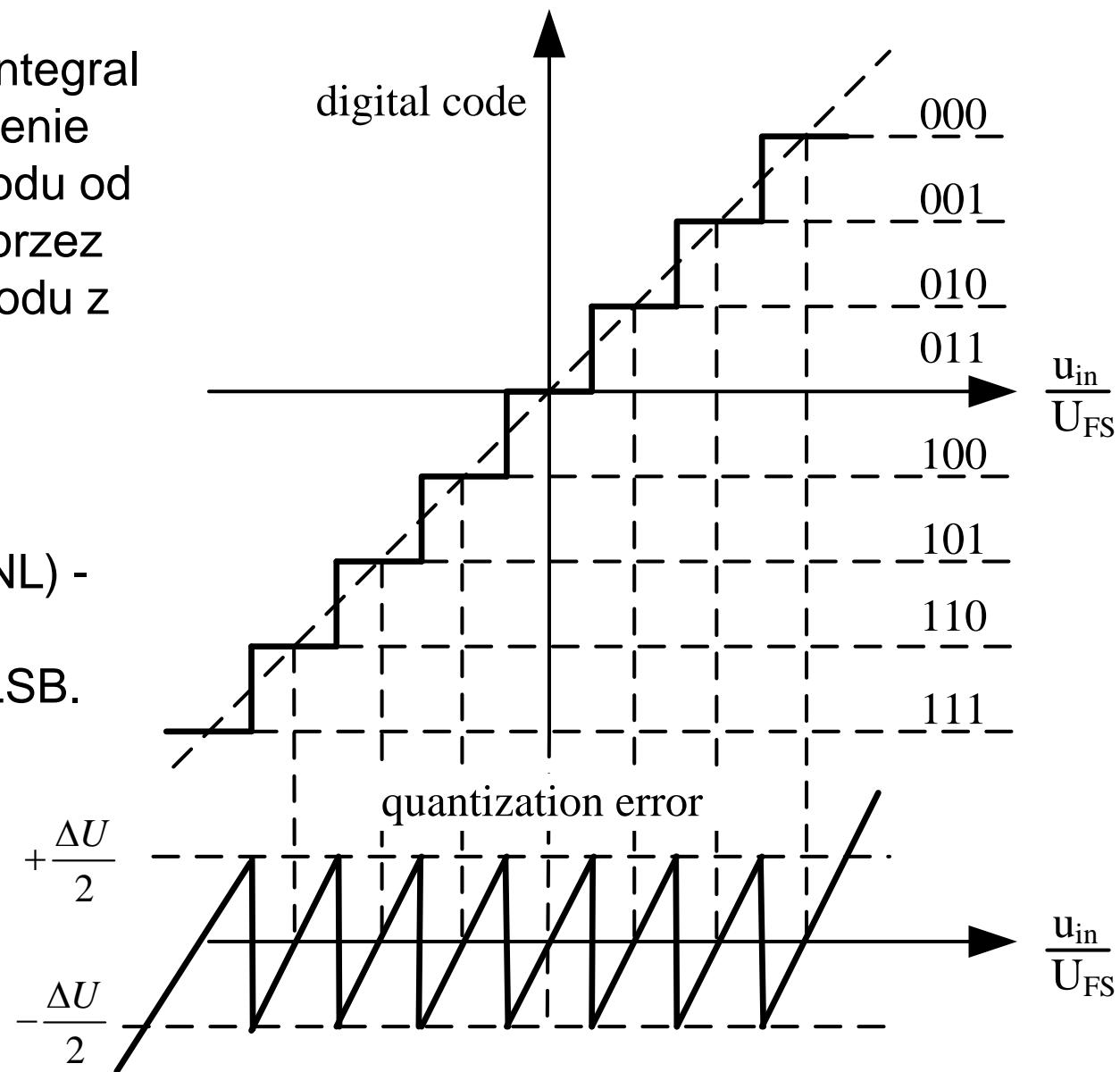
Błąd kwantyzacji - wynika on ze skończonej rozdzielczości przetwornika A/C. przetwornik nie jest w stanie rozróżnić żadnego napięcia analogowego, które mieści się pomiędzy dwoma sąsiednimi kodami wyjścia..

Wynosi on równy $\frac{1}{2}$ najmniej znaczącemu bitowi słowa wyjściowego (LSB):

$$q = \pm \frac{\text{LSB}}{2}$$

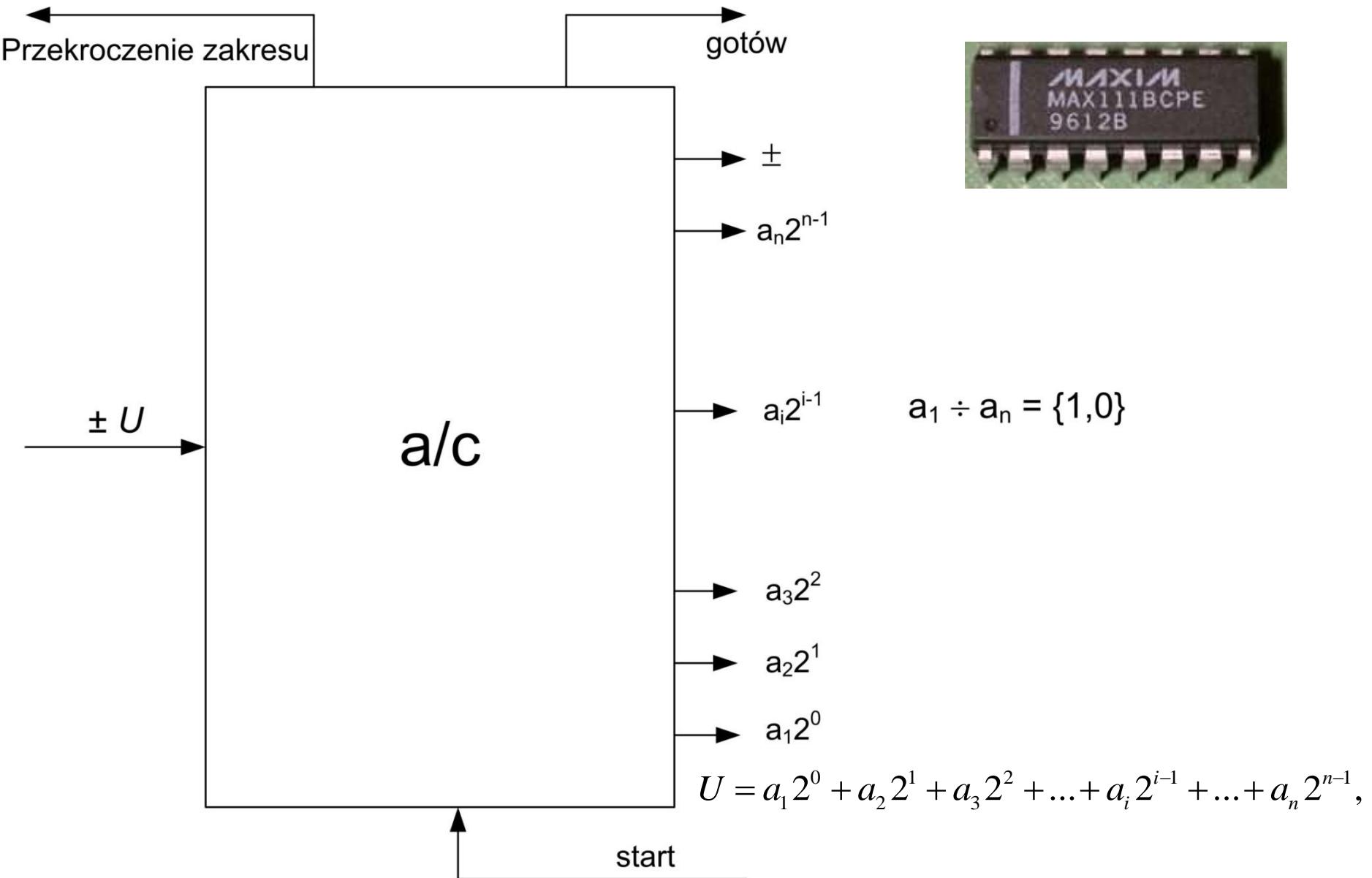
Integralna nieliniowość (integral non-linearity - INL) - odchylenie każdego indywidualnego kodu od linii prostej przechodzącej przez zero. Odchylenie danego kodu z tej prostej jest mierzona od środka tej wartości kodu.

Różnicowa nieliniowość (differential non-linearity DNL) - maksymalne odchylenie od idealnej wielkości kroku 1 LSB.



Pasmo wejściowego sygnału analogowego (analog input bandwidth) - zakres częstotliwości, przy której sygnał wyjściowy spada o 3 dB.

Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe



Parametry określające właściwości scalonych przetworników A/C:

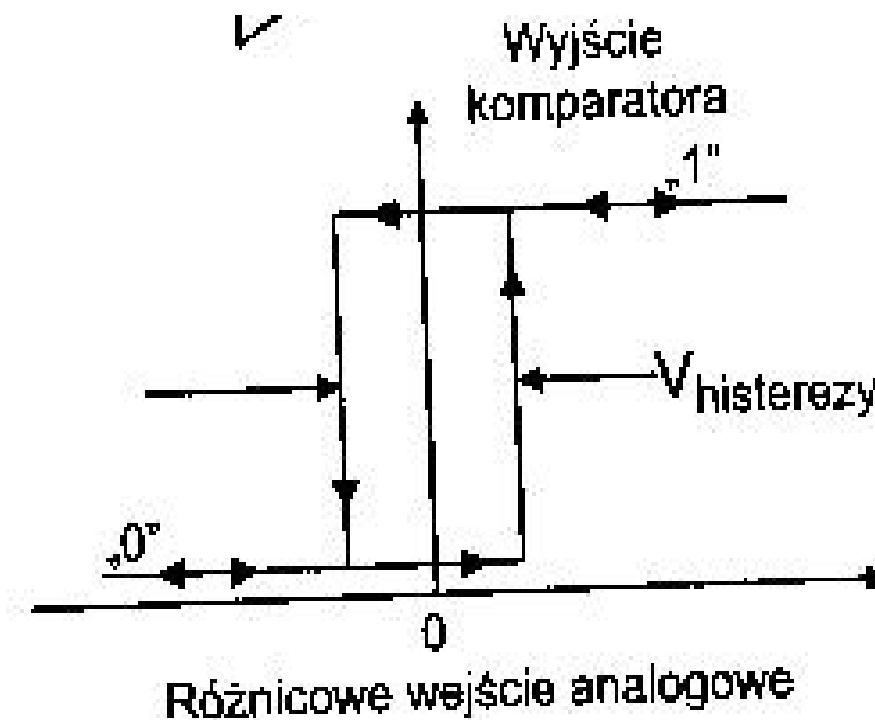
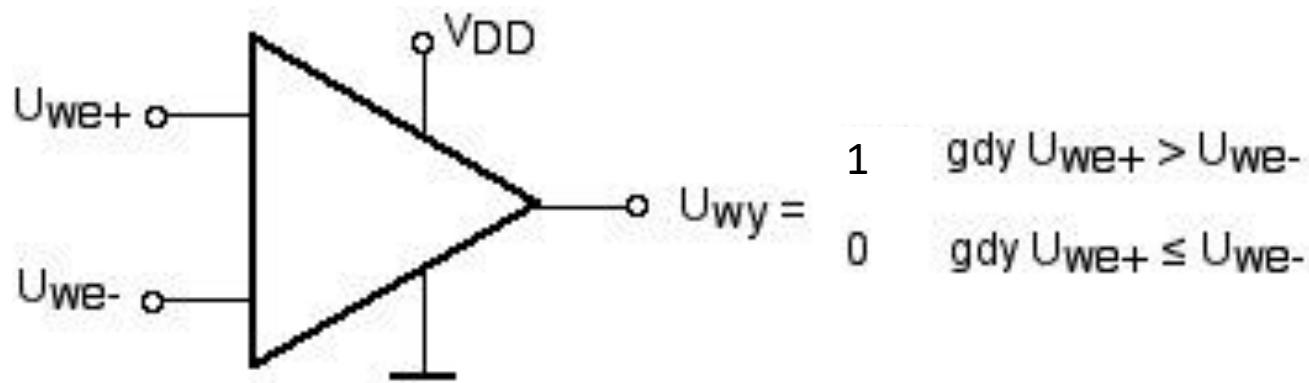
- zakres napięcia wejściowego, od ± 200 mV do ± 10 V,
- rezystancja wejściowa, przeważnie rzędu $10^9 \Omega$,
- przeciążalność (napięcie wejściowe, które nie powoduje jeszcze uszkodzenia przetwornika), przeważnie (50 \div 100) %
- niedokładność, przeważnie $\pm(0,002 \div 0,1)$ %,
- rozdzielcość (liczba bitów), 4, 8, 16 bitów,
- czas przetwarzania, od 0,1 s (wolne) do 10 ns (bardzo szybkie),
- rodzaj kodu, najczęściej binarny,
- obciążalność wyjścia przeważnie określana jest liczbą bramek, które można przyłączyć do jednego wyjścia przetwornika,
(zakres temperatury i wilgotności),
- warunki użytkowania
- zasada przetwarzania,
- technologia wykonania,
- topografia
- rozmiary,
- masa (rodzaj i rozmieszczenie wyprowadzeń),

Metody przetwarzania analogowo-cyfrowego

Przetworniki a/c najczęściej działają w oparciu o jedną z dwóch metod przetwarzania:

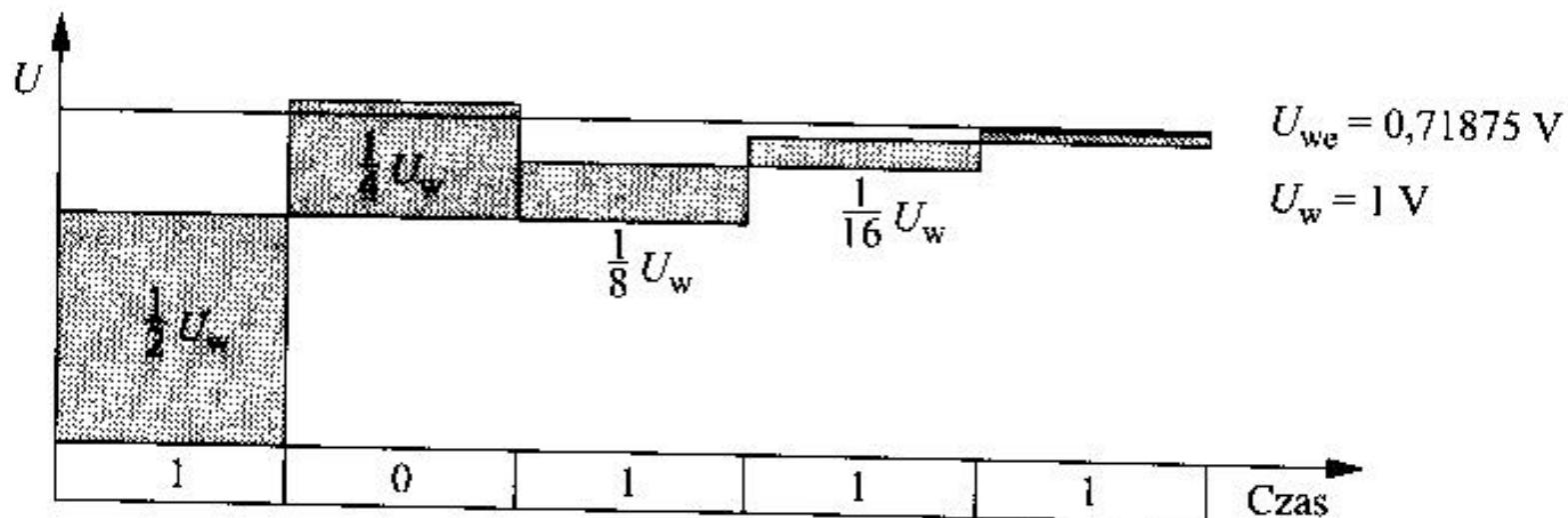
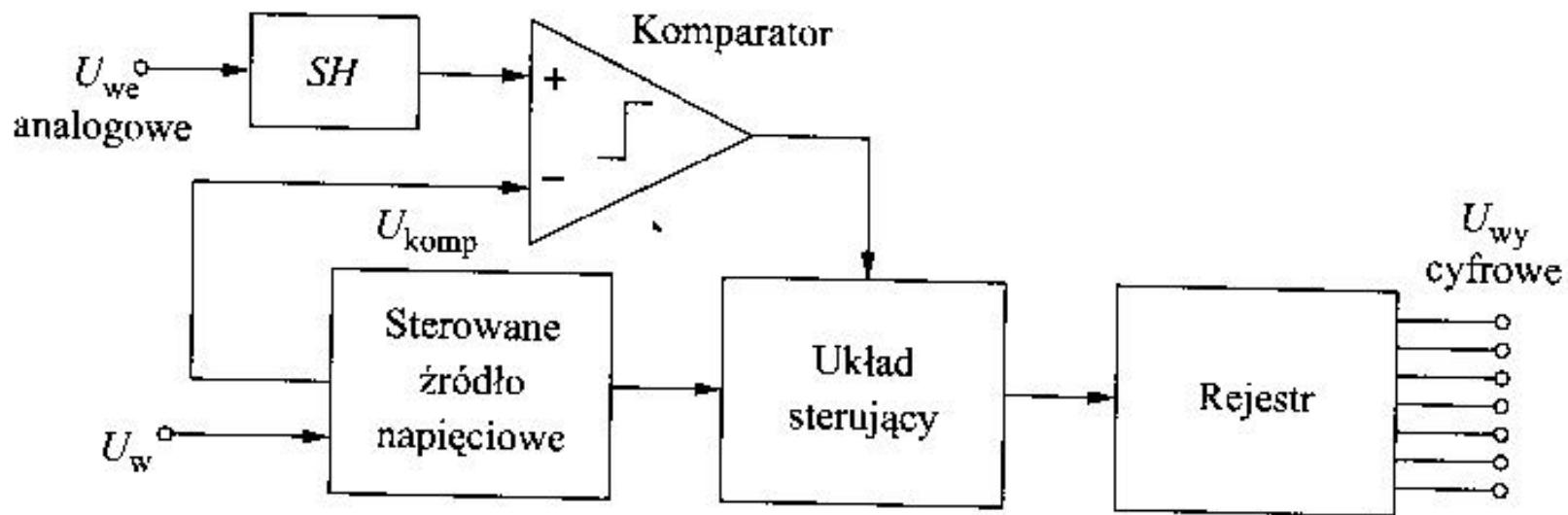
- **bezpośredniego przetwarzania, w której napięcie mierzone porównywane jest bezpośrednio ze skwantowanym napięciem wzorcownym (przetworniki kompensacyjne),**
- **pośredniego przetwarzania, w których proces przetwarzania przebiega w dwóch etapach:
 - 1) napięcie mierzone przetwarzane jest na odstęp czasu,
 - 2) w tym odstępie czasu następuje zliczanie impulsów mających stały czasu taktowania.**

Komparator – 1-bitowy przetwornik A/C

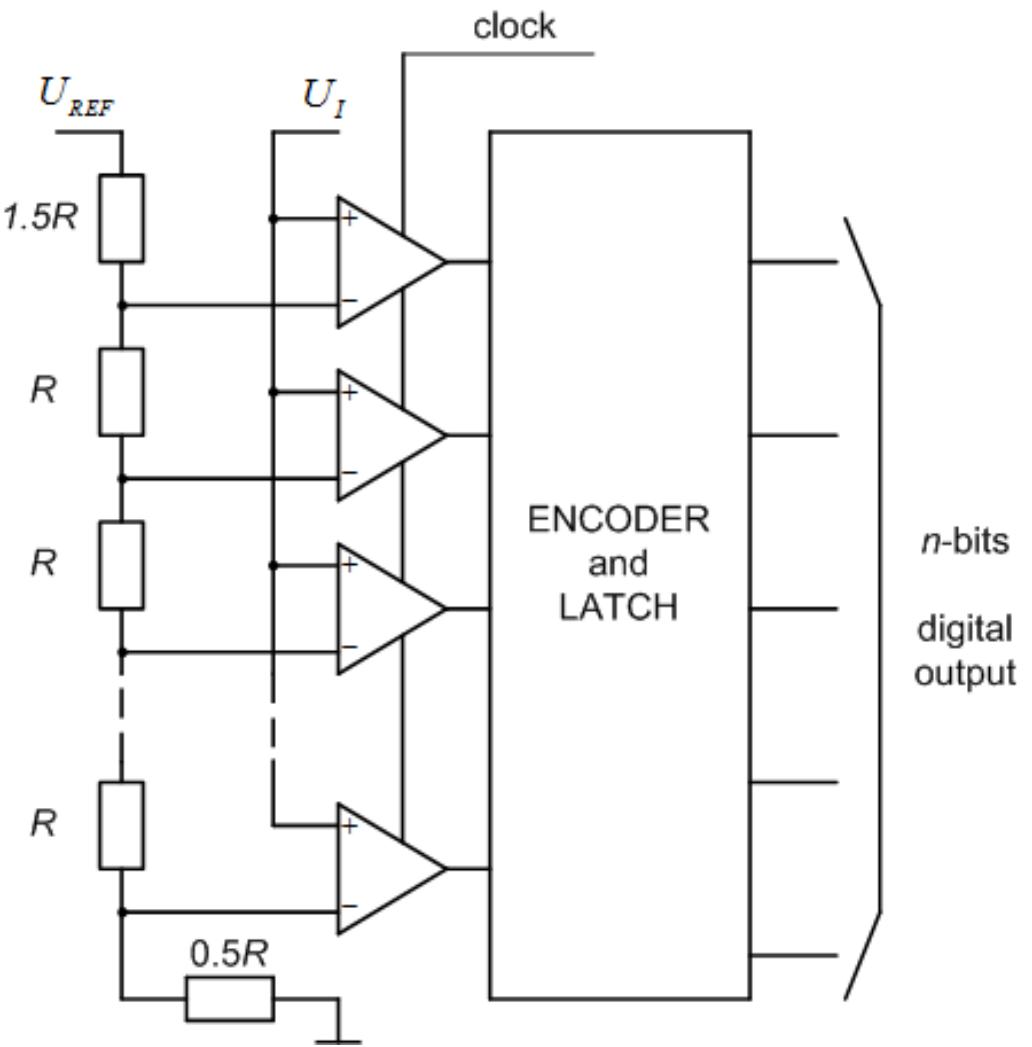


Przetwornik A/C z kompensacją wagową

Najczęściej stosowana zasada w przetwornikach 16 i 18 bitowych przy próbkowaniu 0,5-5 MSPS (mega-samples per sekund). Czas przetw. 1- 10 μ s



Przetworniki bezpośredniego kodowania typu flesz



Zaleta:

Duża szybkość przetwarzania - 1ns, co umożliwia przetwarzanie sygnałów nawet o częstotliwościach 1 GHz.

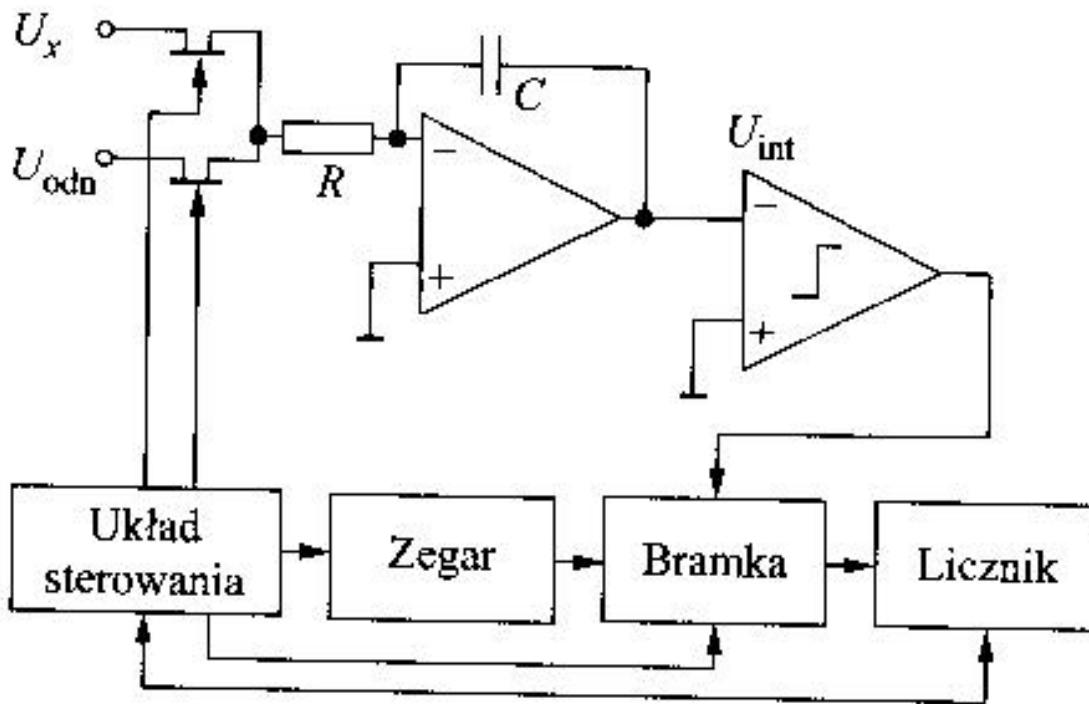
Wady:

- duża liczba napięć referencyjnych i porównawczych (dla 8-bitowego przetwornika potrzebnych jest 255 komparatorów, a dla 16-bitowego – 65350 komparatorów),
- duża struktura i wysokie straty mocy,
- użytkownicy muszą korzystać z zewnętrznych układów zegarowych.

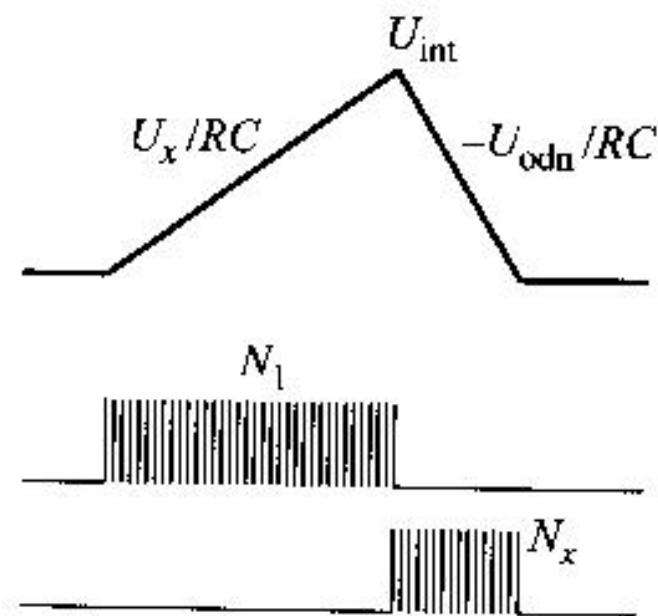
Dlatego mają rozdzielcość nie więcej niż 8 bitów

Przetwornik A/C z podwójnym całkowaniem

a)



b)



Rysunek 5.30. Przetwornik z podwójnym całkowaniem: a) schemat, b) sygnały na wyjściu integratora i licznika

Cykl 1.

Napięcie U_x dołączone jest na czas T_1 i do licznika dołączony jest generator wzorcowy (zegar) o częstotliwości f_{gen} . Licznik w tym czasie wskaże N_1 impulsów. Na wyjściu integratora narasta napięcie do wartości:

$$U_{int} = \frac{1}{RC} \int_0^{T_1} U_x dt = \frac{U_x}{RC f_{gen}} N_1$$

Cykl 2.

Do wejścia integratora zostaje dołączone napięcie odniesienia U_{odn} o przeciwnej polaryzacji i licznik zlicza impulsy N_x . Napięcie na wyjściu integratora zmniejsza się do zera, co wykrywa komparator. Wówczas spełniony jest warunek:

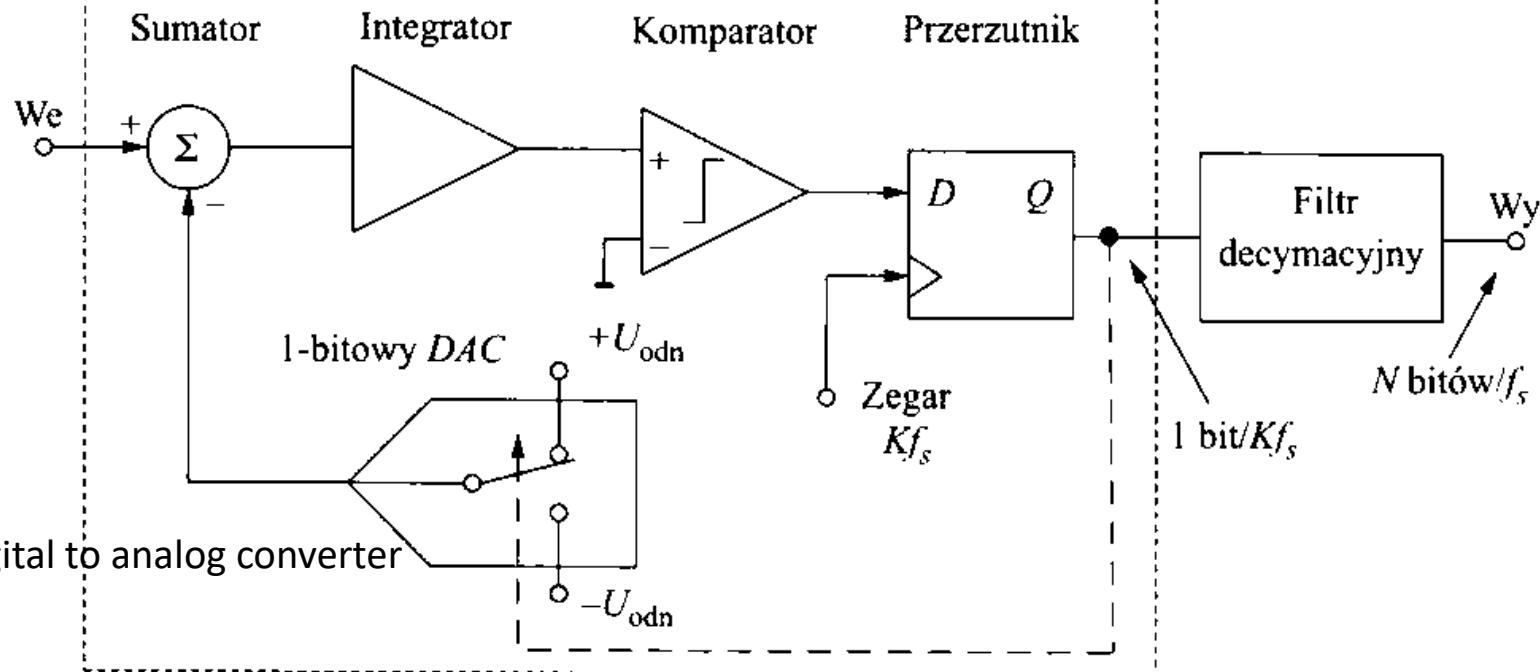
$$\frac{U_x}{RCf_{gen}} N_1 = \frac{U_{odn}}{RCf_{gen}} N_x$$

Stąd liczba zliczonych impulsów:

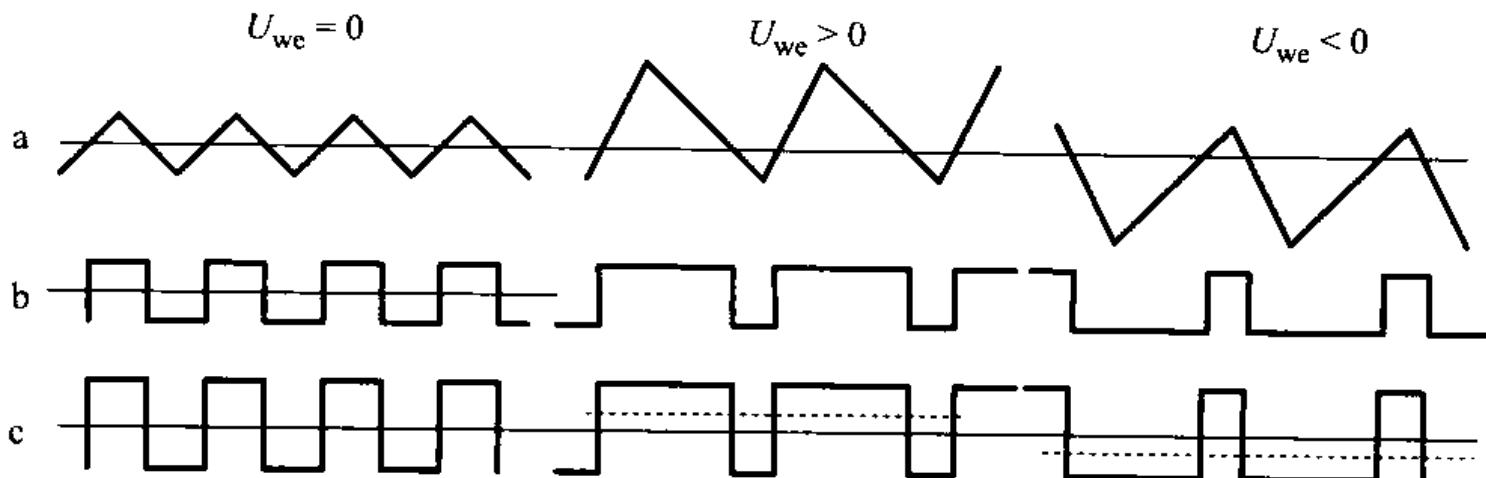
$$N_x = \frac{N_1}{U_{odn}} U_x$$

jest proporcjonalna do napięcia wejściowego przetwornika U_x .

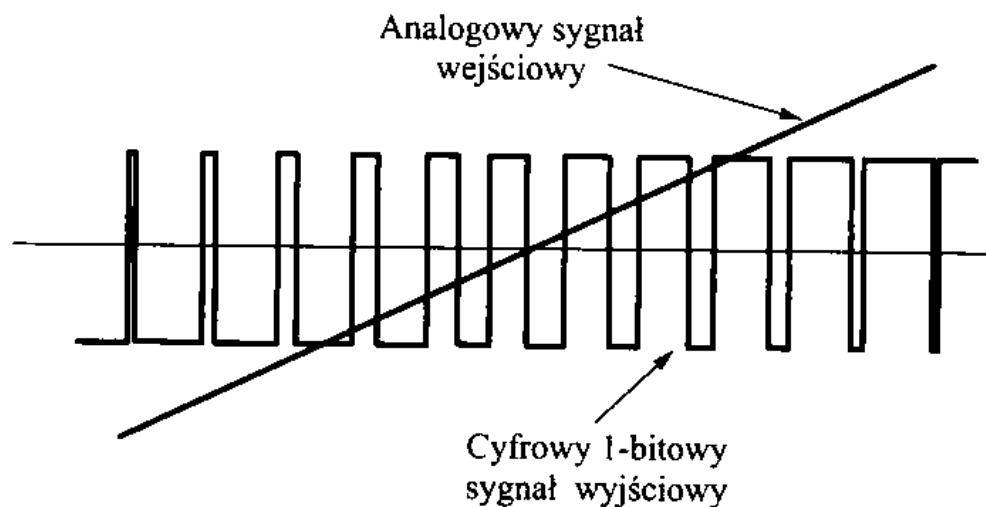
Przetwornik A/C typu delta-sigma



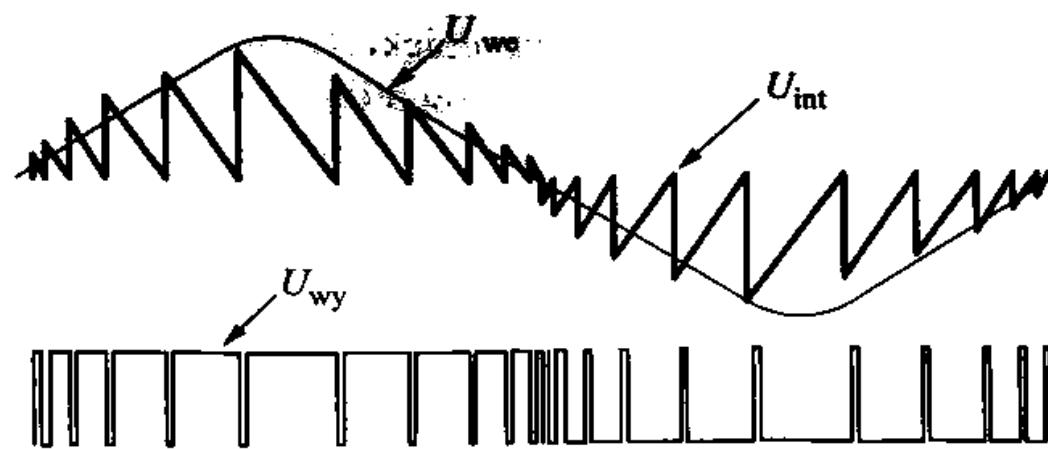
DAC – digital to analog converter



Rysunek 5.21. Sygnał wyjściowy przetwornika delta-sigma w zależności od wartości napięcia wyjściowego: a – sygnał integratora, b – sygnał komparatora, c – sygnał 1-bitowego przetwornika C/A w pętli sprzężenia zwrotnego



Rys. 5.22. Cyfrowy 1-bitowy sygnał wyjściowy przetwornika delta sigma w zależności od wartości napięcia wejściowego



Rys. 5.23. Przykład przetwarzania sygnału sinusoidalnego na cyfrowy sygnał 2-bitowy

Zaletą przetworników $\Delta\Sigma$ jest duża ich rozdzielcość (24 bity) i prosta konstrukcja oraz tłumienie szumów. Są one obecnie silnie rozwijane.

Czujniki i przetworniki

Prof. dr hab. inż. Michał Lisowski

Wykład 14 (1 h)

**Przetworniki mocy i energii
elektrycznej**

MOC PRAĐU PRZEMIENNEGO W OBWODACH JEDNOFAZOWYCH

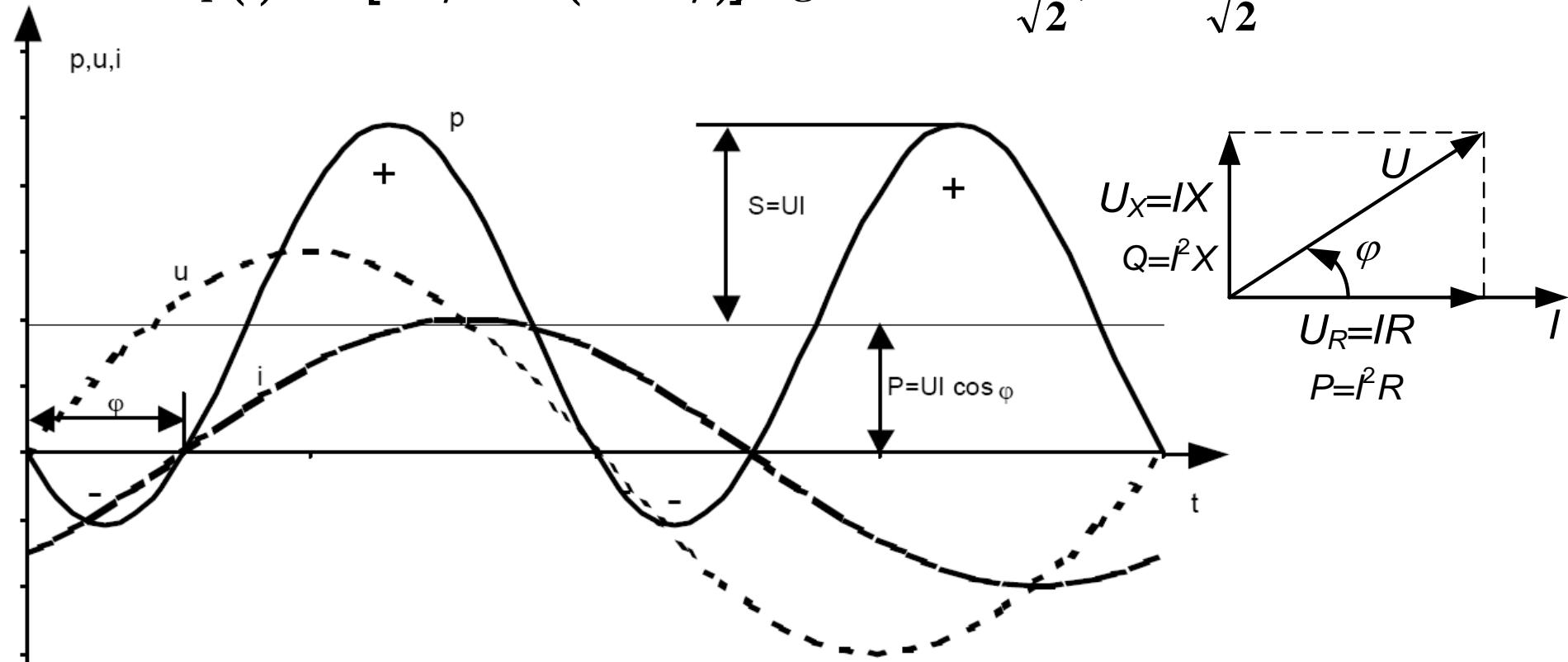
Moc chwilowa

Moc chwilowa jest iloczynem chwilowej wartości napięcia $u(t)$ i prądu $i(t)$. Wyraża ona energię chwilową dostarczoną do odbiornika w chwili t :

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = \frac{dW}{dt}$$

Jeżeli $i = I_m \sin \omega t$ $u = U_m \sin(\omega t + \varphi) = U_m \cos \varphi \sin \omega t + U_m \sin \varphi \cos \omega t$

to $p(t) = UI[\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]$, gdzie $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$



$$U_{wy} = c_3 I_s \frac{\Delta R}{R} = c_4 U I$$

Moc czynna

Mocączną P jest energia elektryczna na jednostkę czasu zamieniona w odbiorniku na inny rodzaj energii:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt$$

Dla przebiegów sinusoidalnych $P = UI\cos\varphi$ [W], $1\text{W} = 1\text{V} \cdot 1\text{A} = 1\text{J/s}$

Moc bierna

dla przebiegów sinusoidalnych: $Q = UI\sin\varphi$ [war], $1\text{war} = 1\text{VA}$

Moc bierna może przyjmować wartości dodatnie lub ujemne. Moc bierna pobierana przez cewkę jest dodatnia, a moc bierna pobierana przez kondensator jest ujemna.

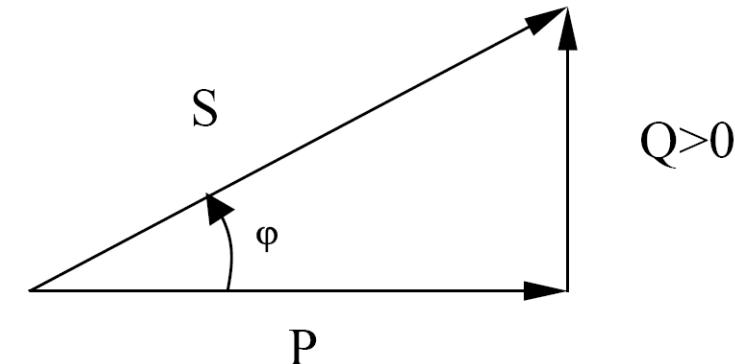
Moc pozorna

Moc pozorna wyraża się wzorem:

$$S = UI \quad [\text{VA}]$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Moc pozorna jest amplitudą oscylacji mocy chwilowej odbiornika.



Przetworniki mocy

Przetworniki mocy działają na zasadzie mnożenia wartości napięcia i prądu, które może odbywać się na sygnałach analogowych lub cyfrowych.



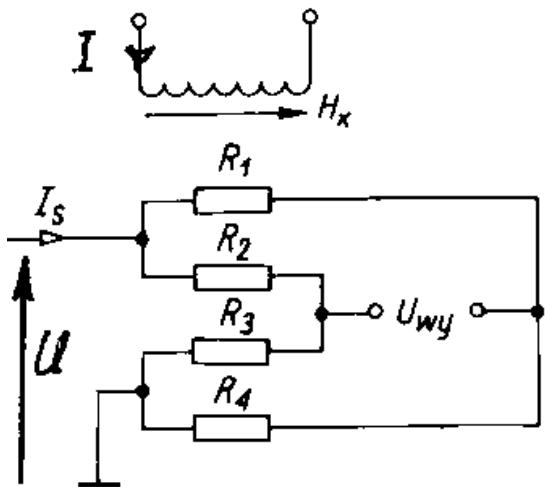
W przetwornikach analogowych wykorzystuje się mnożniki:

- magnetorezystancyjne,
- halotronowe,
- układy mnożące półprzewodnikowe, np. z zastosowaniem operacji logarytmicznej i wykładniczej:

$$u(t)i(t) = a^{\log_a u(t) + \log_a i(t)}$$

Jednak w elektronicznych przetwornikach mocy najczęściej wykorzystuje się metodę modulacji szerokości i amplitudy impulsów prostokątnych (TDM – Time Division Multiplier). Mają niedokładność 0,1 – 0,5 % i mogą pracować w paśmie od 40 Hz do kilku kiloherców.

Przetwornik magnetorezystancyjny (gaussotronowy) mocy



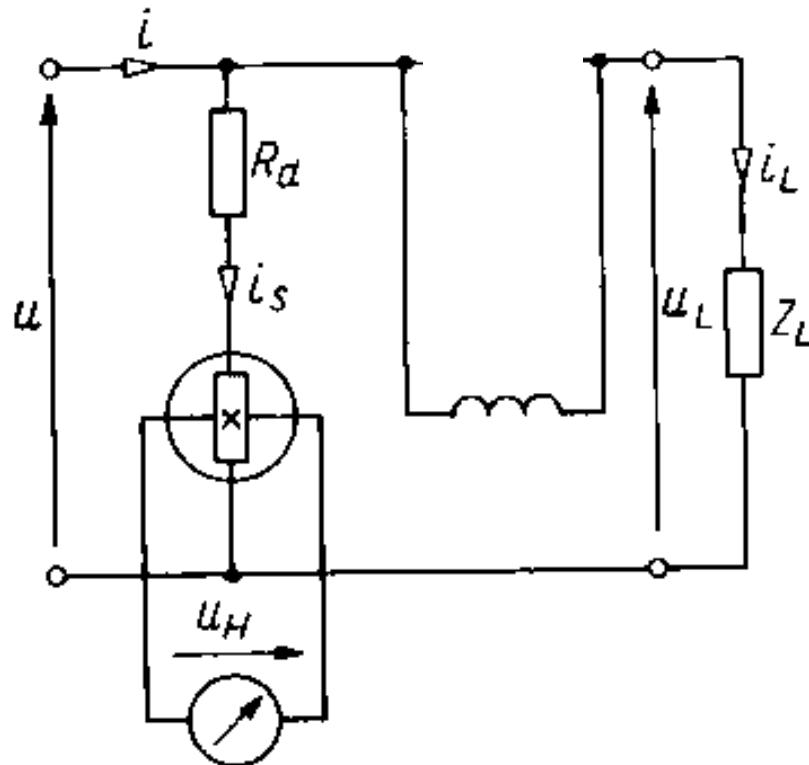
Magnetorezystory cienkowarstwowe $R_1 - R_4$ wykonane są z materiału ferromagnetycznego, który zmienia rezystywność pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego (efekt Gaussa). Względna zmiana rezystancji jest proporcjonalna do natężenia pola magnetycznego:

$$\frac{\Delta R}{R} = c_1 H_x(t) = c_2 i(t)$$

Napięcie na wyjściu mostka: $u_{wy}(t) = c_3 i_s(t) \frac{\Delta R}{R} = c_4 u(t) i(t) = p(t)$

Zatem jeżeli U i I są sinusoidalne: $P = UI \cos \varphi = c U_{wy}$

Hallotronowy przetwornik mocy



Prąd sterujący hallotronu

$$i_s = c_u u = c_u U_m \sin \omega t$$

Indukcja pola magnetycznego $B(t)$ jest proporcjonalna do prądu obciążenia i_L

$$B(t) = c_2 i_L = c_1 I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

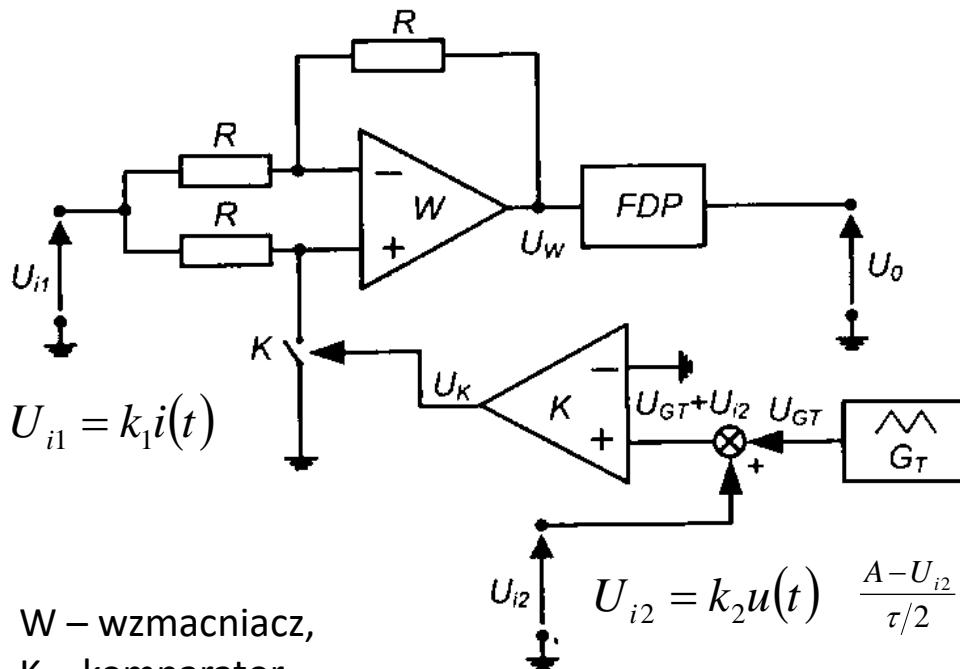
Napięcie wyjściowe hallotronu

$$u_H(t) = c u(t) i(t) = p(t)$$

Zatem wartość średnia napięcia wyjściowego hallotronu

$$U_H = c U I \cos \varphi = c P$$

Przetwornik mocy z modulacją szerokości i amplitudy impulsów prostokątnych (TDM)

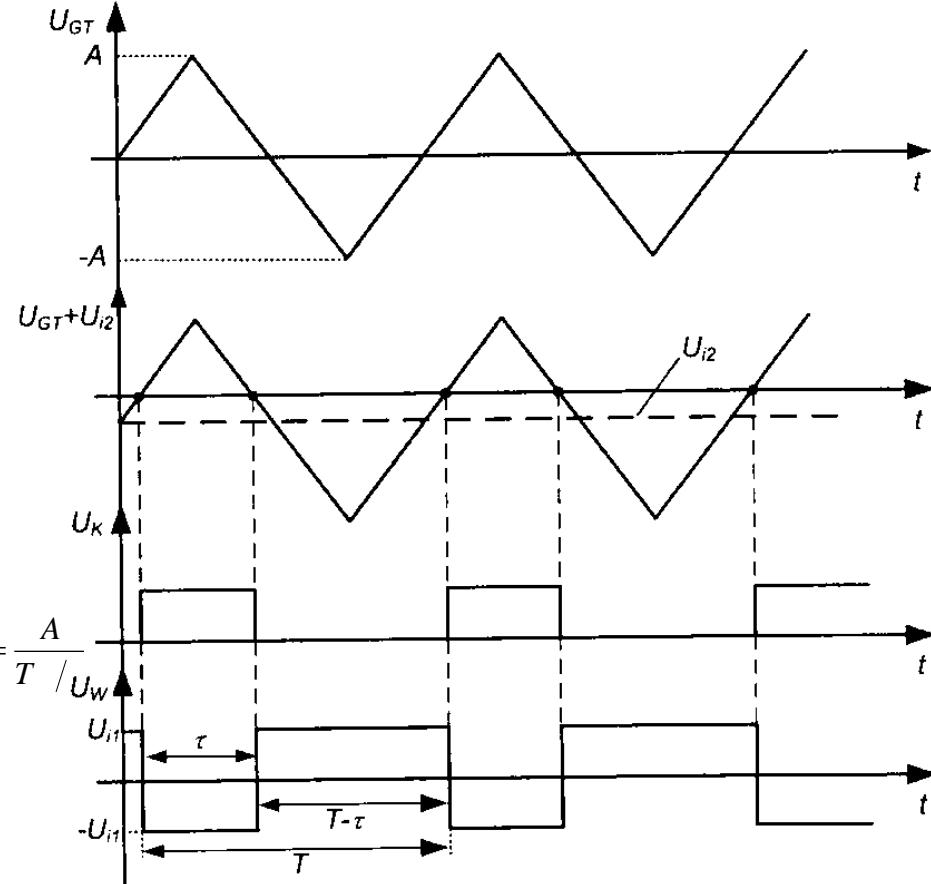


W – wzmacniacz,
 K – komparator,
 FDP – filtr dolnoprzepustowy,
 G_T – generator napięcia trójkątnego

W zależności od położenia klucza K wzmacniacz W pracuje ze wzmacnieniem +1 lub -1, a jego napięcie wyjściowe U_w przyjmuje wartości $+U_{i1}$ lub $-U_{i1}$ co zapewnia modulację amplitudy impulsów wyjściowych sygnałem $U_{i1} = k_1 i(t)$.

Gdy $U_{i2} = 0$ napięcie komparatora U_k będzie miało kształt symetrycznego trójkąta. Wówczas czas zamknięcia klucza τ będzie równy czasowi otwarcia $T - \tau$ i na wyjściu wzmacniacza otrzymamy napięcie symetryczne U_w o amplitudzie U_{i1} i wówczas napięcie $U_o = 0$.

Gdy $U_{i2} \neq 0$ spełniona jest zależność: $\frac{A - U_{i2}}{\tau/2} = \frac{A}{T/4}$



Po przekształceniu

$$\tau = \frac{1}{2}T \left(1 - \frac{U_{i2}}{A} \right)$$

Na wyjściu wzmacniacza pojawi się ciąg impulsów o amplitudzie U_{i1} i znaku „-” w czasie τ oraz znaku „+” w czasie $T - \tau$.

Na wyjściu FDP napięcie U_o spełnia zależność:

$$TU_o = U_{iT}(T - \tau) - U_{i1}\tau$$

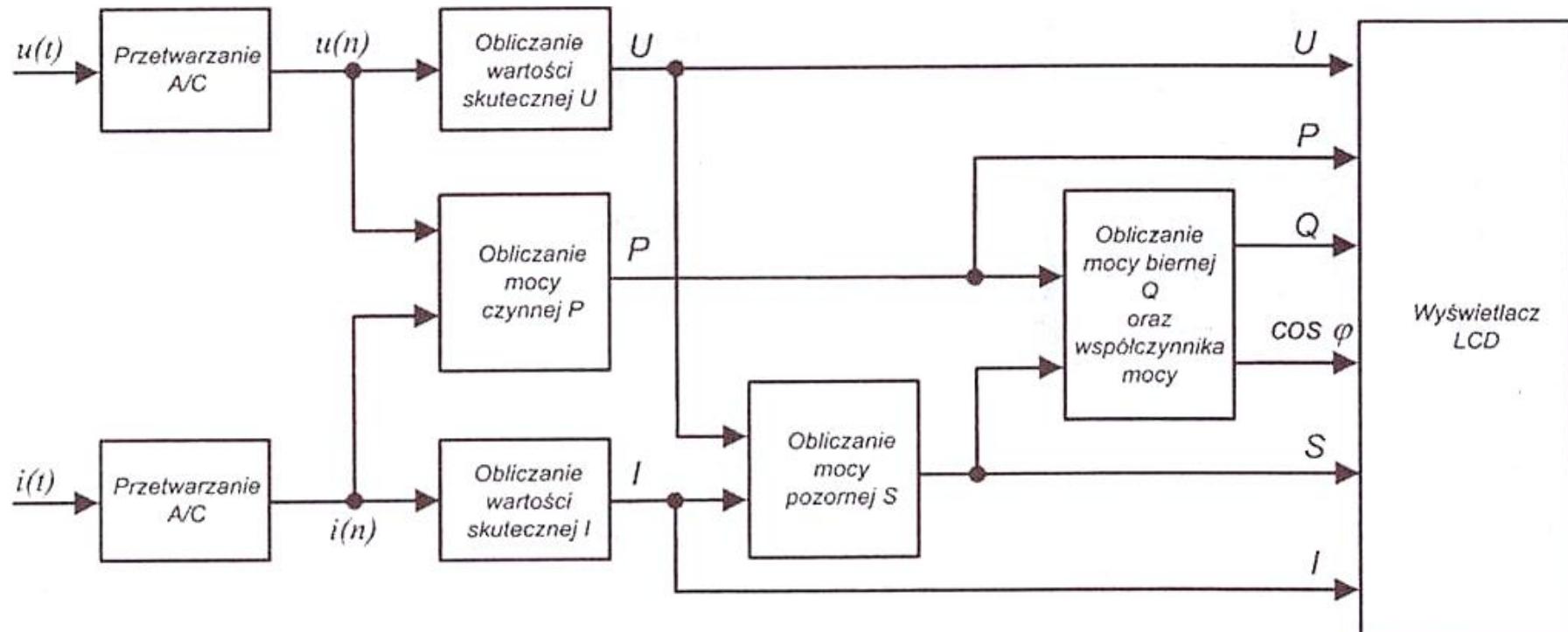
Stąd

$$U_o = \frac{U_{i1}U_{i2}}{A} = \frac{k_1 k_2}{A} u(t)i(t) = kp(t)$$

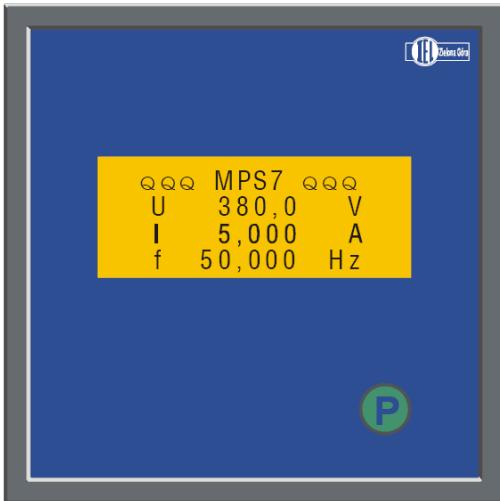
Uśrednione napięcie w czasie T_m jest proporcjonalne do mocy czynnej

$$U_o = \frac{k}{T_m} \int_0^{T_m} p(t) dt = kP$$

Cyfrowe mierniki do pomiaru mocy czynnej, biernej i pozornej oraz napięcia i prądu (mierniki parametrów sieci)



Cyfrowe mierniki parametrów sieci



DANE TECHNICZNE

Sygnal wejściowy:

- prąd
- napięcie

1 A (.../1 A); 5 A (.../5 A)
100 V (.../100 V);
230 V; 400 V; 500 V

strona 3

Zakresy mocy wybrane
z ciągu liczbowego:

1, 1,2, 1,5, 2, 4, 5, 6, 8
W, kW, MW, kvar, Mvar
V·A, kV·A, MV·A

strona 4

Interfejs komunikacyjny:

RS-232C, RS-485

Protokół komunikacyjny:

OBRBUS,

Klasa dokładności:

- prąd, napięcie 0,5 (0,2)²⁾

- moc czynna, bierne, pozorna 0,5

- częstotliwość 0,1

- współczynnik mocy czynnej,
biernej i kat przesunięcia
 fazowego 1 (0,5)²⁾

1) w wykonaniu trójfazowym

strona 1

***	MPS7	***
I1	5,001	A
I2	4,999	A
I3	5,000	A

strona 2

***	MPS7	***
U13	100,0	V
U23	99,9	V
f	50,000	Hz

2) w wykonaniu jednofazowym

strona 1

***	MPS7	***
U	100,0	V
I	5,000	A
f	50,000	Hz

strona 2

***	MPS7	***
P	433	W
Q	250	var
S	500,0	VA

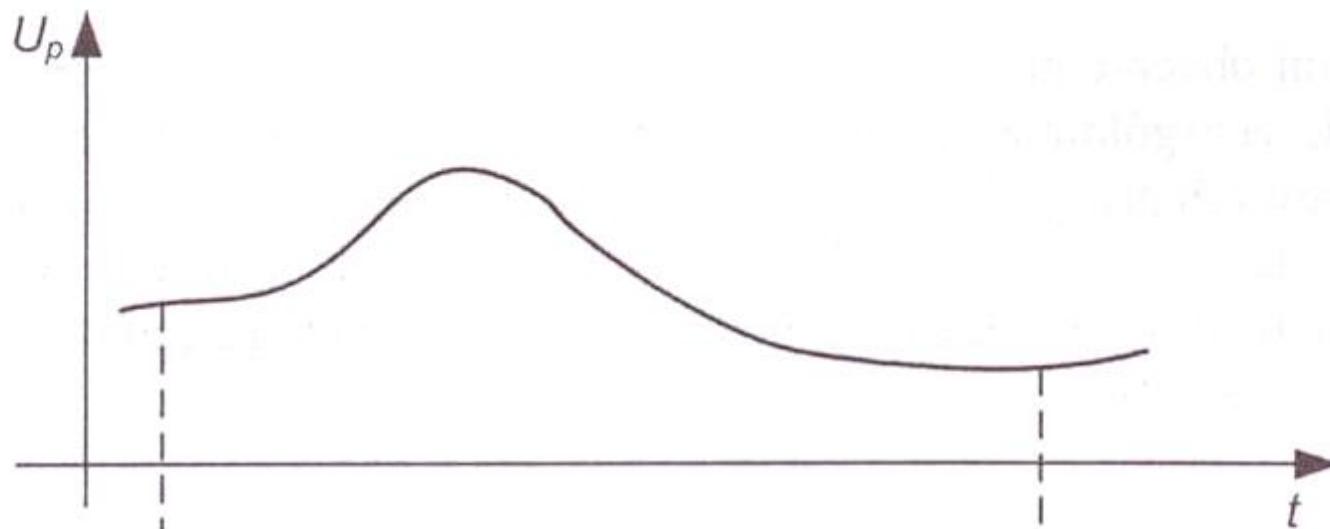
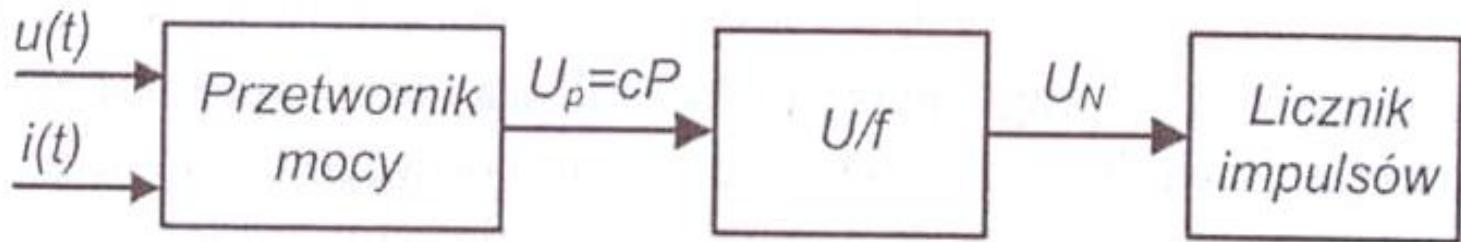
strona 3

***	MPS7	***
P	1,000	W
Q	0,0	kvar
S	1,000	kVA

***	MPS7	***
$\cos\phi$	0,866	poj
$\sin\phi$	-0,500	
ϕ	-30,0°	

***	MPS7	***
$\cos\phi$	1,000	ind
$\sin\phi$	0,000	
ϕ	0,0°	

Liczniki energii elektronicznej



$$W = \frac{N}{c_p}$$

