

## 1.1. Pojęcia podstawowe i definicje

Informacja, nazywa się dowolny zbiór wiadomości, których pierwotnym źródłem jest doświadczenie. Informacje pomiarowe są przenoszone za pomocą sygnałów.

Sygnał definiuje się jako cechę określonej wielkości fizycznej przedstawiającą według przyjętej umowy informację (wg def. wg PN-70/H-42000-Automatyka przemysłowa). Ogólnie sygnał  $x(t)$  może być dowolną wielkością fizyczną zmienną w czasie, a natura fizyczna sygnału może być różnorodna, np. mechaniczna, elektromagnetyczna, cieplna, optyczna itp., przy czym w układzie pomiarowym sygnału może ulec wielokrotnemu przekształceniu, np. cieplna w optyczną, mechaniczna w elektryczną itp. Sygnały są nośnikami informacji, ale same jeszcze nie stanowią informacji.

Pomiar można rozpatrywać jako proces otrzymywania i odpowiedniego przetwarzania sygnałów zawierających informację o mierzonej wielkości w celu otrzymania wyniku ilościowego (porównanie z jednostką miary) oraz przedstawienia wyniku w postaci najkorzystniejszej dla obserwatora. Środkami technicznymi przetwarzania są przetworniki pomiarowe.

Przetwornik pomiarowy stanowi względnie wyodrębniony zespół elementów, które służą do przetwarzania - z określoną dokładnością i według określonego prawa - wartości i wielkości mierzonej (albo wielkości już przetworzonej z wielkości mierzonej) na wartość innej wielkości lub inną wartość tej samej wielkości. W procesie przetwarzania mogą zachodzić określone straty informacji pomiarowych. Przetwornikami pomiarowymi są np. czujniki indukcyjne, dźwignie, termoelementy, przepływomierze zwężkowe, mierniki wskazówkowe i cyfrowe, mostki niezrównoważone i inne.

Źródłem informacji w układzie pomiarowym jest badany obiekt, a nośnikami informacji są sygnały pochodzące z tego źródła. Przetwarzanie sygnałów wymaga przesyłania ich w kanale pomiarowym. Przesyłanie sygnałów jest więc nierozłącznie związane z przesyłaniem energii. Przetworniki pomiarowe są zatem urządzeniami przetwarzającymi energię.

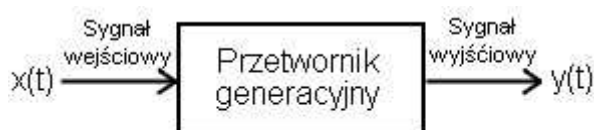
W układach pomiarowych wielkości nieelektrycznych specjalną rolę odgrywa wejściowy przetwornik pomiarowy, za pomocą którego odbiera się informacje o wielkości mierzonej ze źródła informacji i taki przetwornik nazywa się czujnikiem. Czujnik pomiarowy jest konstrukcją (złożoną najczęściej z kilku prostych przetworników pomiarowych) umieszczoną zwykle na badanym obiekcie lub w jego bezpośrednim otoczeniu.

## 1.2. Ogólna klasyfikacja przetworników pomiarowych

Generalnie, czujniki dzieli się na:

- generacyjne (aktywne)
- parametryczne (pasywne)

Przetworniki pomiarowe, w których sygnał wejściowy jest bezpośrednio przetwarzany w sygnał wyjściowy, nazywamy przetwornikami generacyjnymi.



Rys. 1.

W przetwornikach generacyjnych energia wejściowa jest przetwarzana bezpośrednio w energię elektryczną, tzn. siłę elektromotoryczną. Przetwornik taki jest źródłem prądowym lub napięciowym.

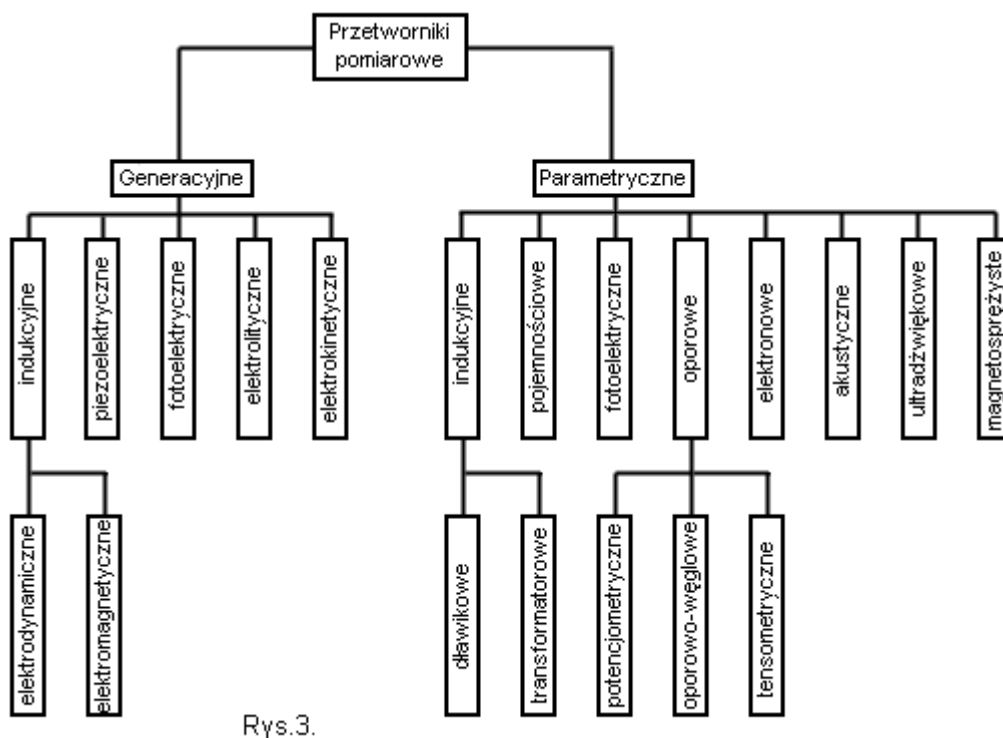
W przetwornikach generacyjnych wykorzystuje się zjawiska indukcji elektromagnetycznej, zjawiska piezoelektryczne, fotoelektryczne, termoelektryczne, magnetostrykcyjne, elektrochemiczne oraz zjawisko szumów cieplnych.

Przetwornikami parametrycznymi nazywamy takie przetworniki pomiarowe, w których sygnał wejściowy powoduje zmianę jakiegoś parametru przetwornika, np. oporności, indukcyjności pojemności lub wielkości bezpośrednio z nimi związanych takich jak: tłumienie, sprzężenia, częstotliwość rezonansowa itp. Przykładem takiego przetwornika może być termometr oporowy. W termometrze takim energia cieplna powoduje zmianę jego oporności. Jednak zmiana parametru elektrycznego jakim jest w tym przypadku oporność elektryczna nie powoduje bezpośrednio powstania sygnału elektrycznego. Do uzyskania sygnału wyjściowego, jakim może być prąd lub napięcie, potrzebna jest pomocnicza energia. Przetworniki parametryczne mają więc co najmniej dwa wejścia:

- wejście informacyjne, tj. wejście dla sygnału niosącego informację o mierzonej wielkości;
- wejście pomocnicze, do którego podłączone jest źródło energii pomocniczej;



Biorąc za podstawę klasyfikacji rodzaje energii na wejściach przetworników pomiarowych, można wyróżnić kilka najważniejszych typów przetworników:



**UWAGA:** Wprowadzenie jakiegokolwiek czujnika do źródła informacji powoduje zawsze naruszenie pola badanych zjawisk tak, że przeprowadzenie pomiaru nie powodującego zmian wielkości mierzonej jest nie możliwe. Należy więc tak projektować przetworniki pomiarowe, aby ze źródła sygnału pomiarowego pobierać maksimum informacji przy minimum energii.

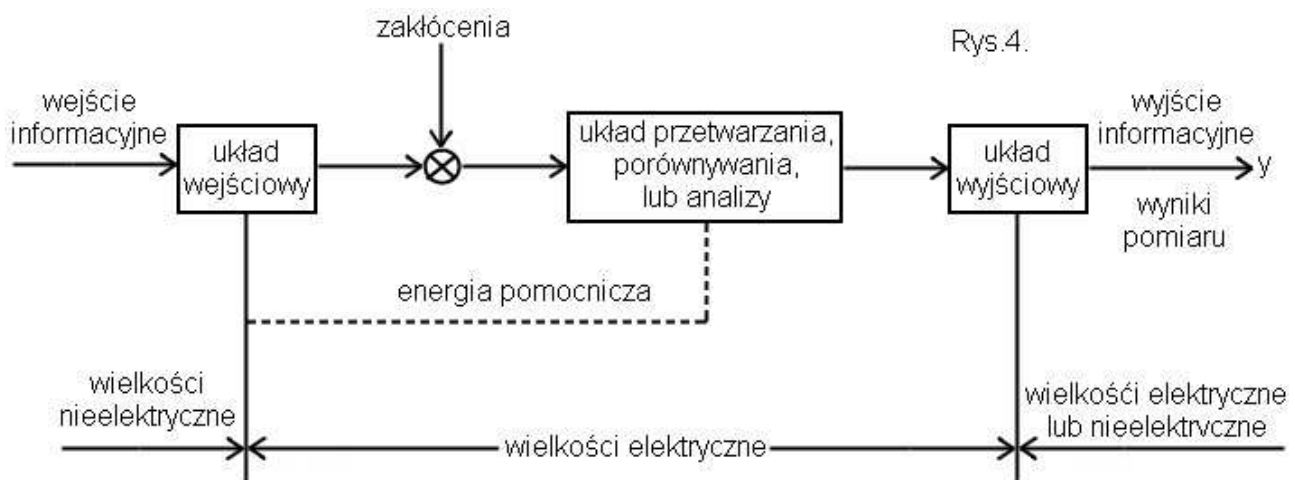
### 1.3. Układy pomiarowe

Układem pomiarowym nazywamy takie połączenie przetworników, które tworzy łańcuch odbioru i przetwarzania informacji pomiarowej o mierzonej wielkości. Sposób połączenia przetworników w układzie pomiarowym określa jego strukturę.

Układ pomiarowy -to przetworniki pomiarowe + struktura układu.

Układy pomiarowe, podobnie jak i przetworniki, mogą mieć strukturę otwartą lub zamkniętą (tzn. ze sprzężeniem zwrotnym). W układzie o strukturze otwartej wszystkie procesy przetwarzania zachodzą tylko w jednym kierunku - od wejścia do wyjścia układu pomiarowego.

W najogólniejszym schemacie strukturalnym układu pomiarowego można wyróżnić trzy zasadnicze części: układ wejściowy, układ przetwarzający, układ wyjściowy .



Rys. 4

W układzie wejściowym przetwarza się sygnał nielektryczny na elektryczny, odpowiedni do dalszego przetwarzania na drodze elektrycznej. Układ wejściowy definiuje oddziaływanie przyrządu pomiarowego na źródło informacji.

Układ przetwarzania, porównywania lub analizy sygnałów elektrycznych stanowi najbardziej rozbudowaną część układu pomiarowego. Zawsze jednak aby można było uzyskać ilościowy wynik pomiaru, w funkcji przetwarzania musi być zawarty proces porównywania mierzonej wartości z wartością wzorcową.

Układ wyjściowy łączy wyjścia informacyjne układu przetwarzania z odbiornikiem informacji, nadając informacji wyjściowej, czyli wynikowi pomiaru, postać najdogodniejszą dla obserwatora lub do dalszego wykorzystania. Przetworniki wyjściowe są bardzo różnorodne. Jedną grupę stanowią np. mierniki wskazówkowe, wskaźniki cyfrowe, lampy oscyloskopowe itp., zaś drugą grupę stanowią układy trwałej rejestracji (trwałej dokumentacji pomiarowej) wyników pomiarów, takie jak: rejestratory, drukarki, plotery, dyskiety, płyty Cd, dyski twarde, itp.

### 1.4. Sygnały pomiarowe

Wielkości fizyczne, a więc i sygnały pomiarowe, mają strukturę:

- analogową (ciągłą)
- dyskretną

W przypadku sygnału pomiarowego o strukturze ciągłej przez pomiar rozumie się wybór informacji ze zbioru ciągłego. Takie wielkości jak: wymiary geometryczne, siła, napięcie, czas, częstotliwość itd. są wielkościami analogowymi.

Przyrząd o przetwarzaniu ciągłym nazywamy przyrządem analogowym.

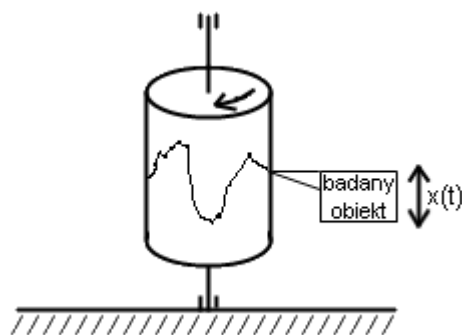
Wielkości dyskretne przyjmują wartości różniące się między sobą o skończone wartości przyrostów. Najmniejszy możliwy przyrost stanowi elementarny kwant wielkości dyskretnej. Przykładem wielkości dyskretnej jest np. ładunek elektryczny składający się ze skończonej liczby ładunków elementarnych, równych ładunkowi elektronu.

Sygnał pomiarowy o strukturze dyskretnej jest zbiorem informacji zawierającym w praktyce skończoną liczbę informacji. Przyrząd o przetwarzaniu dyskretnym nazywamy przyrządem cyfrowym.

## 1.5 Pomiary parametrów drgań

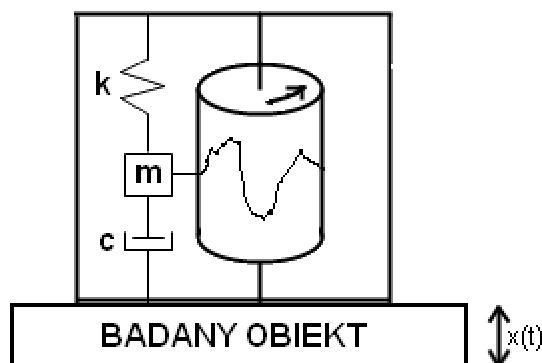
Przy pomiarach parametrów drgań (tj. przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń liniowych lub kątowych) można wykorzystać jeden z dwóch następujących sposobów:

Sposób I - drgania wybranego punktu badanego obiektu mierzymy względem wybranego, praktycznie nieruchomego, układu odniesienia. Schemat przyrządu działającego wg tego sposobu pokazano na rys.5. Nieruchomym układem odniesienia, względem którego drga badany obiekt, jest tutaj oś obracającego się bębna.



Rys. 5

SPOSÓB II - na obiekcie umieszczany dodatkowy układ mechaniczny w postaci oscylatora harmonicznego (układ o jednym stopniu swobody). Układ odniesienia, względem którego mierzymy badaną wielkość, jest związany z masą oscylatora. Schemat przyrządu pokazano na rys.6.



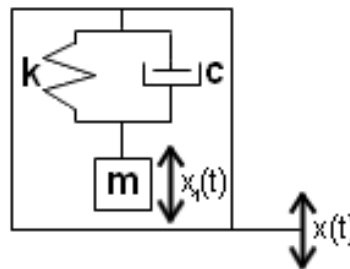
Rys. 6

Obudowa przyrządu jest sztywno połączona z badanym obiektem i wykonuje wraz z nim drgania. Układ odniesienia związany jest z masą sejsmiczną (bezwładnością), której ruch staramy się możliwie dokładnie określić.

Przyrządy działające wg I sposobu nazwiemy umownie przyrządami o stałym układzie odniesienia, natomiast działające wg sposobu II nazwiemy przyrządami inercyjnymi, bezwładnościowymi lub sejsmicznymi.

### 1.6 Zasada działania z uwzględnieniem doboru parametrów inercyjnego czujnika drgań.

Przeanalizujemy działanie inercyjnego czujnika drgań, którego schemat pokazano na rys.7. Przyjmijmy, że drgania obiektu, a także wraz z nim sztywno połączonej obudowy czujnika, opisuje funkcja  $x(t)$ . Przesunięcie masy  $m$  oznaczmy przez  $x_1(t)$ . Zarówno  $x(t)$  jak i  $x_1(t)$  odmierzamy względem nieruchomego układu współrzędnych (związanego ze środkiem masy Ziemi).



Rys. 7

Równanie opisujące drgania masy ( $m$ ) przyjmuje więc postać:

$$m \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + c \frac{d[x_1(t) - x(t)]}{dt} + k[x_1(t) - x(t)] = 0 \quad /1/$$

Umieszczony w czujniku przetwornik mechaniczno-elektryczny reaguje na względne przemieszczenie masy  $m$  i obudowy czujnika, tj. na wielkość.

$$y(t) = x_1(t) - x(t) \quad /2/$$

Podstawiając (2) do (1) otrzymamy równanie:

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + c \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = -m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \quad /3/$$

Zadanie pomiarowe polega na wyznaczaniu przebiegu przemieszczeń  $x(t)$  na podstawie znanego (mierzonego) przebiegu  $y(t)$ . Związek między nimi podany jest równaniem (3). Jednak od przyrządu pomiarowego żąda się najczęściej, aby między zmierzonym a badanym przebiegiem zachodziła prosta proporcjonalność.

$$y(t) \approx x(t)$$

lub

$$y(t) \approx x(t - \tau)$$

/4/

gdzie:  $\tau = \text{const.}$  – stałe opóźnienie czasowy między sygnałami.

Przy spełnieniu pewnych warunków, jak to będzie pokazane dalej, zależność taka zachodzi. Jeśli według przebiegu  $y(t)$  możemy sądzić o drganiach badanego obiektu (zachodzą warunki 4), to przyrząd umożliwiający taki pomiar nosi nazwę wibrometru (lub przemieszczeniomierza).

W przypadku, gdy interesuje nas przyspieszenie żąda się, aby zachodziła proporcjonalność

$$y(t) \approx \frac{d^2 x(t)}{dt^2}$$

lub

$$y(t) \approx \frac{d^2 x(t - \tau)}{dt^2}$$

/5/

gdzie:  $\tau = \text{const.}$

Przyrząd umożliwiający tego rodzaju pomiary nosi nazwę przyspieszeniomierza lub akcelerometru.

Widzimy więc, że we wszystkich wymienionych przypadkach, aby sprawdzić czy zachodzi prosta proporcjonalność, powinniśmy przeanalizować równanie (3),

Czujnik przyspieszeń

Jeśli równanie różniczkowe opisane zależnością (3) poddać obustronnie transformacji Laplace'a, zakładając zerowe warunki początkowe, to otrzymamy równanie operatorowe:

$$ms^2 y(s) + cs y(s) + ky(s) = -ms^2 x(s) \quad /6/$$

gdzie operator  $s = \sigma + j\omega$  jest zmienną zespoloną.

Następnie możemy wyznaczyć stosunek transformat sygnału wyjściowego do sygnału wejściowego, który okaże się wielkością zależną od właściwości dynamicznych czujnika a niezależną od sygnału wejściowego (pobudzającego). Stosunek ten nazywa się transmitancją operatorową (funkcją przejścia)

$$K(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = -\frac{ms^2}{ms^2 + cs + k} \quad /7/$$

Jeżeli przyjmiemy, że zmienna  $s = j\omega$  (dla  $\sigma = 0$  gdzie  $\omega$  - jest częstotliwością kołową [rad/s]), to transmitancja operatorowa przekształci się w transmitancję częstotliwościową,

$$K(j\omega) = \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{m\omega^2}{k - m\omega^2 + j\omega c} = \frac{1}{\frac{k}{m}} * \frac{\omega^2}{1 - \frac{\omega^2}{\frac{k}{m}} + j\omega \frac{c}{k}} \quad /8/$$

którą można zapisać w tzw. postaci kanonicznej oscylatora harmonicznego

$$K(j\omega) = \frac{1}{\omega_0^2} * \frac{\omega^2}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j2\gamma \frac{\omega}{\omega_0}} \quad /9/$$

gdzie dla mechanicznego oscylatora harmonicznego

$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$  jest częstotliwością drgań własnych nie tłumionych

$\gamma = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$  bezwymiarowym współczynnikiem tłumienia.

Transmitancję częstotliwościową zapisaną we współrzędnych prostokątnych  $X = \text{Re}K(j\omega)$  i  $Y = \text{Im}K(j\omega)$  można przedstawić we współrzędnych biegunowych w postaci modułu i argumentu:

gdzie moduł transmitancji

$$|K(j\omega)| = \sqrt{[\text{Re}K(j\omega)]^2 + [\text{Im}K(j\omega)]^2} \quad /10/$$

argument transmitancji

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{\text{Im}K(j\omega)}{\text{Re}K(j\omega)} \quad /11/$$

Zatem równanie (9) we współrzędnych biegunowych można przedstawić w postaci równań :

$$K(\omega) = |K(j\omega)| = \frac{1}{\omega_0^2} * \frac{\omega^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4\gamma^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad /12/$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{2\gamma \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad /13/$$

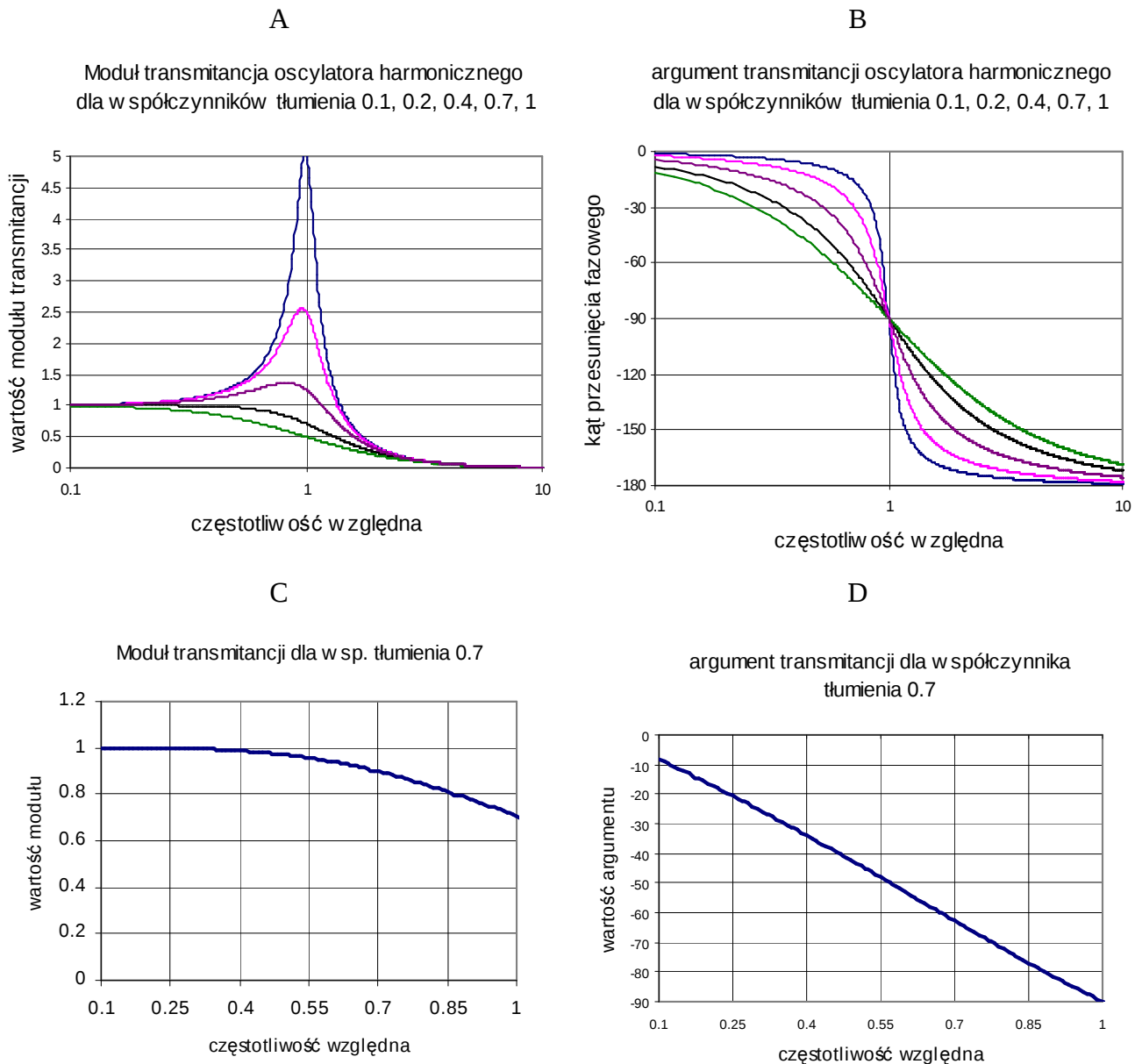
Spełnienie warunku proporcjonalności opisanego równaniem (5) oznacza, że równania (12) i (13) przyjmą postać:

$$K(\omega) = \frac{M}{\omega_0^2} \approx \text{const} . \quad /14/$$

$$\varphi(\omega) \approx \omega\tau \quad /15/$$

Warunki te mogą być w przybliżeniu spełnione dla  $\gamma = 0.7$  w zakresie częstotliwości  $\omega < \omega_{gr} < \omega_0$

gdzie:  $\omega_{gr}$  oznacza najwyższą częstotliwość, dla której jest spełniony warunek (14).



Rys. 8

Charakterystyki modułu i argumentu transmitancji oscylatora harmonicznego spełniających warunki (14) i (15)

przedstawiono na rysunkach 8C i 8D gdzie częstotliwość względna =  $\frac{\omega}{\omega_0}$  a  $\omega_0 = 1$

Odpowiednio charakterystyki modułu i argumentu transmitancji oscylatora harmonicznego dla różnych wartości współczynników tłumienia przedstawiono na rysunkach 8A i 8B gdzie częstotliwość względną przedstawiono w skali logarytmicznej.

Przeanalizujemy rozwiązanie równania (3) dla drgań o dowolnej postaci przebiegu w czasie, metodą analizy widmowej. Jeżeli sygnał wymuszenia  $\ddot{x}(t)$  posiada dowolną postać przebiegu w czasie, to można go przedstawić za pomocą tzw. całki Fouriera.

$$\ddot{x}(t) = \int_0^{\infty} F_{\ddot{x}}(\omega) \cos[\omega t - \delta(\omega)] d\omega \quad (16)$$

Równanie (16) można traktować jako sumę nieskończonej ilości drgań harmonicznym o nieskończenie małych amplitudach  $F_{\ddot{x}}(\omega)d\omega$  o częstościach  $\omega$ , których wartości zmieniają się w sposób ciągły w granicach  $0 \leq \omega \leq \infty$  i każda składowa ma własny początkowy kąt fazowy  $\delta(\omega)$ . Funkcja  $F(\omega)$  nosi nazwę funkcji rozkładu amplitud lub gęstości widma. Funkcja  $\delta(\omega)$  nazywana jest funkcją rozkładu faz początkowych.

Elementarne składowe równania (16) można napisać w postaci

$$d[\ddot{x}(t)] = F_{\ddot{x}}(\omega) \cos[\omega t - \delta(\omega)] d\omega$$

Składowe te mają amplitudy

$$d\ddot{x}_m = F_{\ddot{x}}(\omega) d\omega$$

Ponieważ elementarne składowe sygnału mierzonego (wejściowego) mają przebieg harmoniczny, więc składowe sygnału wyjściowego będą również harmoniczne i będą miały amplitudy

$$dY_m = K(\omega) * d\ddot{x}_m$$

Przebieg czasowy odpowiedzi czujnika na elementarne wymuszenie ma więc postać

$$d[y(t)] = K(\omega) * d[x(t)]$$

$$d[y(t)] = K(\omega) * F_{\ddot{x}}(\omega) \cos[\omega t - \delta(\omega) - \varphi(\omega)] d\omega \quad (17)$$

gdzie:

$K(\omega), \varphi(\omega)$  – moduł i faza (argument) transmitancji przetwornika pomiarowego.

W celu otrzymania równania odpowiedzi należy scałkować równanie (17). Wówczas otrzymuje się:

$$y(t) = \int_0^{\infty} K(\omega) * F_{\ddot{x}}(\omega) \cos[\omega t - \delta(\omega) - \varphi(\omega)] d\omega \quad (18)$$

Porównując (16) i (18) dochodzi się do określenia funkcji gęstości widmowej odpowiedzi

$$F_y(\omega) = K(\omega) * F_{\ddot{x}}(\omega) \quad (19)$$

W sensie analizy widmowej czujnik przedstawia człon przetwarzający sygnał wejściowy o widmie  $F_{\ddot{x}}(\omega)$  na sygnał na wyjściu przetwornika o widmie  $F_y(\omega)$ .

Gdyby w równaniu (18) zachodziły przybliżone zależności (14) i (15) to przyjmie ono postać

$$y(t) = \frac{M}{\omega_0^2} \int_0^\infty F_{\ddot{x}}(\omega) \cos[\omega(t - \tau) - \delta(\omega)] d\omega \quad (20)$$

skąd na podstawie (16) mamy

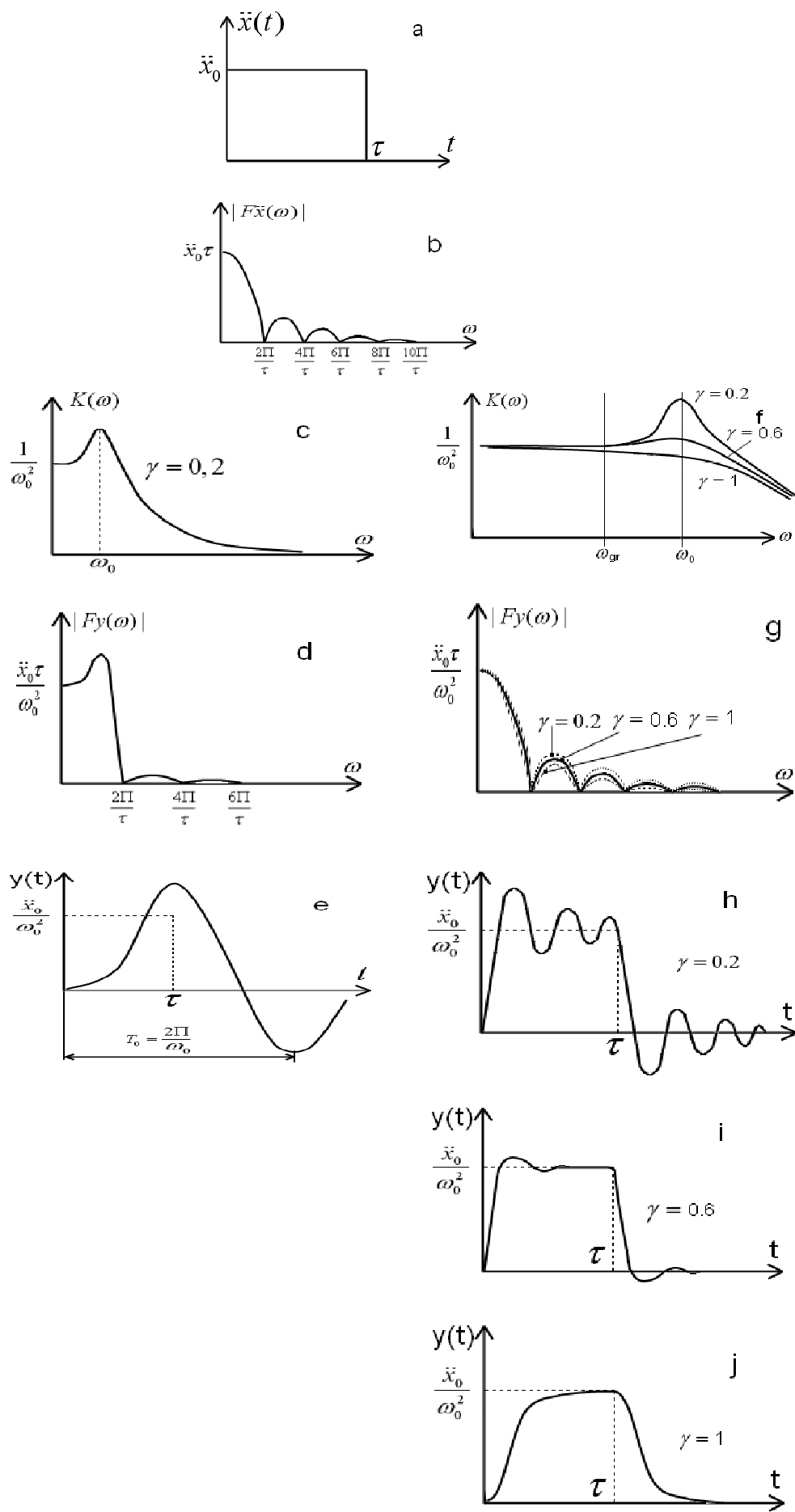
$$y(t) \approx \frac{M}{\omega_0^2} * \frac{d^2 x(t - \tau)}{dt^2}$$

Widzimy, że przy takich założeniach czujnik byłby dobrym przetwornikiem dla przyspieszeniomierza (akcelerometru). Należy tu zwrócić uwagę, że jego czułość  $\frac{M}{\omega_0^2}$  maleje w miarę wzrostu częstotliwości drgań własnych  $\omega_0$ .

Różnice między prawidłowo i wadliwie dobranym czujnikiem pokazano na rys. 5. Wymuszeniem  $\ddot{x}(t)$  jest pojedynczy impuls prostokątny (rys. 5a). Widmo takiego sygnału  $\ddot{x}(t) = \frac{\ddot{x}_0}{0} \frac{dla}{dla} \frac{0 < t < \tau}{t < \tau}$

wyrażone jest zależnością  $|F_{\ddot{x}}(\omega)| = \frac{2x_0}{\omega} \left| \frac{\sin(\omega\tau)}{2} \right| = \ddot{x}_0 \tau \frac{\sin \frac{\omega\tau}{2}}{\frac{\omega\tau}{2}}$  (rys.9b).

Na rys.9d przedstawiono widmo amplitudowe drgań czujnika o wadliwie dobranych parametrach. Różni się ono znacznie od widma amplitudowego sygnału wejściowego  $F_{\ddot{x}}(\omega)$  (rys.5b). W rezultacie przebieg pokazany na rys.9e niewiele ma wspólnego z przebiegiem badanym rys 9a. Na rys.9f, 9g, 9h, 9i, pokazano charakterystyki czujnika o lepiej dobranych parametrach. Widmo amplitudowe (Rys.9g) na wyjściu przetwornika niewiele się różni od widma amplitudowego  $F_{\ddot{x}}(\omega)$  szczególnie przy  $\gamma = 0.6$ . W przypadku, gdy  $\gamma = 0.2$ , gęstość widmowa odpowiedzi wzrasta w otoczeniu częstotliwości rezonansowej przetwornika. Powstają więc słabo tłumione odpowiedzi rys.9h. Powodują one znaczne zniekształcenie sygnału mierzzonego. W przypadku tłumienia  $\gamma = 1$  następuje wyraźne zmniejszenie składowych o większych częstotliwościach. Skokowe zmiany sygnału wyjściowego oznaczają, że zawiera on składowe o wyższych częstotliwościach. Ponieważ przetwornik nie przepuszcza tych składowych (rys.9f), więc sygnał wyjściowy nie może się zmienić skokowo, lecz narasta i maleje łagodniej, niż wymuszenie rys.9j.



Rys. 9

Mniejsze zniekształcenia sygnału wyjściowego otrzymamy dla "bardziej płynnych" przebiegów mierzonych, jak też dla przebiegów, które mają wykres gęstości widma w obszarze niskich częstotliwości oraz takie procesy, dla których gęstość rozkładu widma jest zlokalizowana w możliwie wąskim przedziale częstotliwości.

Przebiegi wejściowe o szybkich zmianach wartości (w szczególności z ostrymi załamaniami, „pikami” i punktami nieciągłości) będą w pomiarze zaokrąglone i wynik nie będzie w pełni odpowiadał przebiegowi mierzonemu.

W przypadkach przebiegów okresowych załamania takie są wyrazem istnienia składowych o wysokich częstotliwościach. W odniesieniu do przebiegów nieokresowych świadczą one o dużej gęstości widma w obszarze wysokich częstotliwości. Jedyną gwarancją, że zapis przyspieszeń za pomocą przyspieszeniomierza inercyjnego będzie prawidłowy, jest odpowiednio wysoka częstotliwość drgań swobodnych czujnika, która jednak znacznie obniża jego czułość (10).

## 2. Czujniki z przetwornikami drgań mechanicznych

### 2.1 Czujnik piezoelektryczny

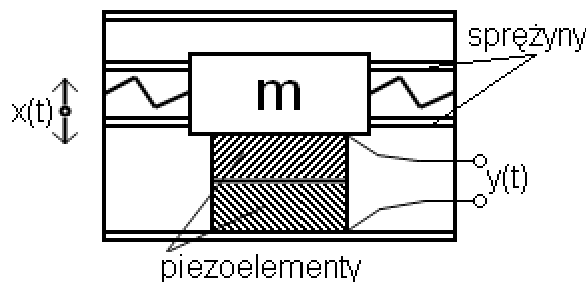
Najpopularniejszym (najczęściej stosowanym) czujnikiem drgań jest sejsmiczny (bezwładnościowy) akcelerometr piezoelektryczny. Czujnik piezoelektryczny należy do grupy czujników generacyjnych. Zasada działania czujnika piezoelektrycznego polega na zjawisku powstawania ładunków elektrycznych na ściankach pewnych kryształów, przy działaniu na nie sił ściskających lub ścinających – jest to tzw. efekt piezoelektryczny. Jeśli na piezoelement będziemy działać siłą ściskającą  $P$ , to na jego ściankach pojawią się równe co do wielkości, lecz przeciwnego znaku, ładunki elektryczne  $+q$  i  $-q$ , przy czym ich wielkość jest proporcjonalna do siły  $F$ .

$$q = k * F = k * m * a$$

gdzie  $q$  – ładunek elektryczny,  $k$  – stała piezoelektryczna,  $F$  – siła,  $m$  – masa sejsmiczna,

$a$  – przyspieszenie.

Schemat inercyjnego czujnika piezoelektrycznego pokazano na rys. 10. Sprężyny wywierają siłę wstępną nie pozwalając na odrywanie się masy sejsmicznej od kryształu piezoelektrycznego.



Rys. 10

Wielkością charakteryzującą czujniki piezoelektryczne jest tzw. współczynnik przenoszenia (czułość)

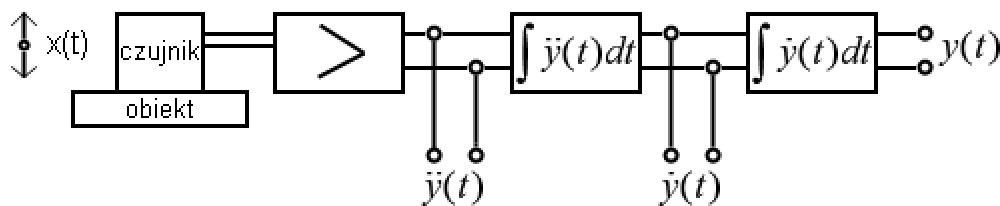
opisany zależnością

$$B_0 = \frac{E_0}{\ddot{x}_0} \left[ \frac{mV}{g} \right]$$

$\ddot{x}_0$  - amplituda przyspieszenia badanego przebiegu mierzona w wartościach przyspieszenia ziemskiego.

Współczynnik  $B_0$  dla większości typowych piezoelementów waha się w granicach  $4,5 \frac{mV}{ms^{-2}} - 18 \frac{mV}{ms^{-2}}$

Schemat blokowy układu pomiarowego do wyznaczania przyspieszeń, prędkości lub przemieszczeń pokazano na rys.11.



Rys. 11

Układ pomiarowy składa się z czujnika przyspieszeń, wzmacniacza i dwóch układów całkujących.

Zalety czujników piezoelektrycznych:

- możliwość pomiaru drgań w bardzo szerokim zakresie częstotliwości (od kilku Hz do kilkudziesięciu kHz);
- możliwość pomiaru przyspieszeń o bardzo dużej rozpiętości amplitud;
- bezinercyjność efektu piezoelektrycznego;
- małe gabaryty i ciężar;
- prostota wykonania
- bardzo małe tłumienie w połączeniu z wysoką częstotliwością drgań swobodnych praktycznie nie powoduje błędów fazowych

Wady czujników piezoelektrycznych:

- trudność cechowania;
- niemożliwość pomiaru drgań o częstotliwościach poniżej około 5 Hz;
- stosunkowo słaby poziom sygnałów elektrycznych zdejmowanych z piezoelementów w porównaniu z szumami wzmacniacza i innymi zakłóceniami.

## 2.2. Czujniki indukcyjne (bierne)

Czujniki indukcyjne parametryczne nie generują siły elektromotorycznej w uzwojeniu cewki i wymagają zasilania napięciem zmiennym. Pracują one na zasadzie zmiany indukcyjności własnej  $L$  lub indukcyjności wzajemnej  $M$  pod wpływem zmian wielkości nieelektrycznej.

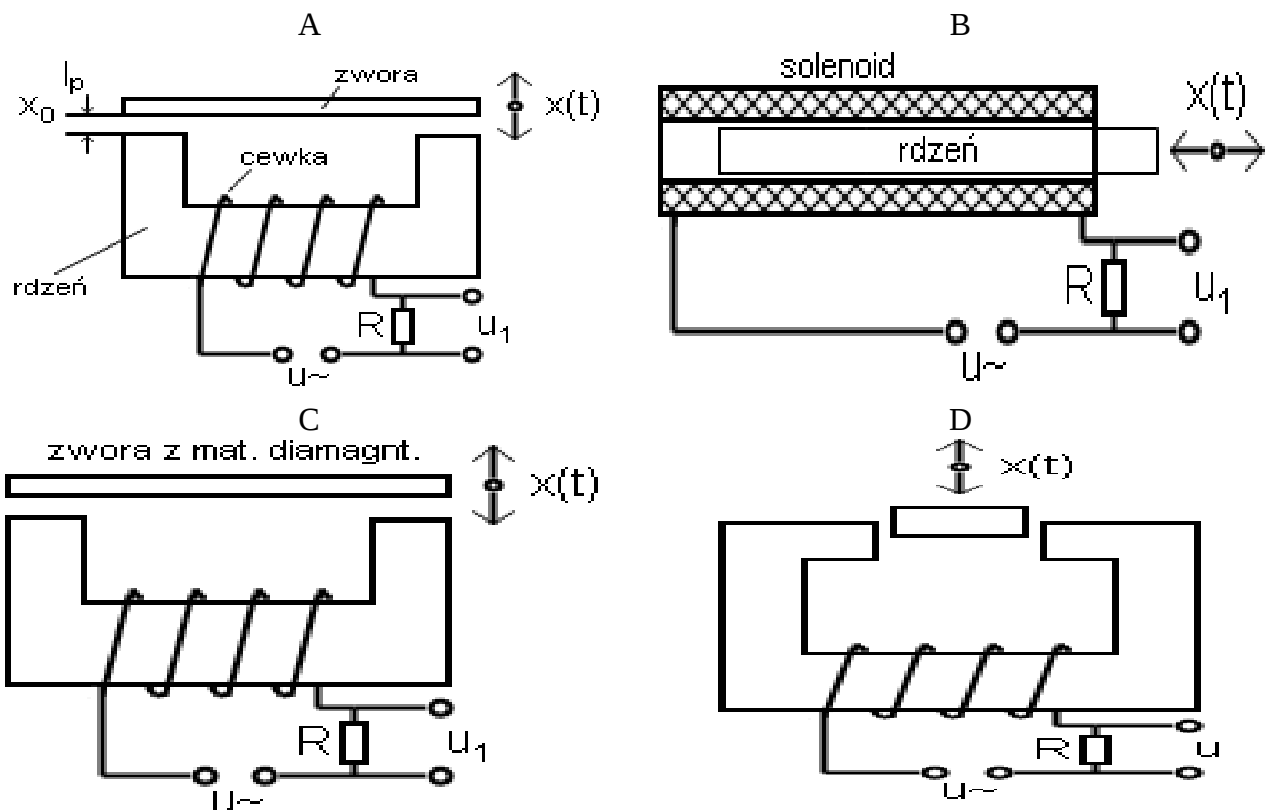
W zależności od sposobu realizacji zmiany indukcyjności dzielimy je na dwie podstawowe grupy.

- czujniki dławikowe, działające na zasadzie zmiany indukcyjności własnej,  $L$ ;
- czujniki transformatorowe, działające na zasadzie zmiany indukcyjności wzajemnej,  $M$ .

### Czujniki indukcyjne dławikowe

Wyróżnia się następujące odmiany przetworników:

- o zmiennej szczeliny powietrznej (rys.12A)
- o zmiennym położeniu rdzenia magnetycznego w solenoidzie (rys.12B)
- o zmiennym przekroju szczeliny powietrznej (rys.12C)
- z wykorzystaniem prądów wirowych w materiałach diamagnetycznych, powodujących zmniejszenie strumienia magnetycznego skojarzonego z uzwojeniem (rys. 12D)



Rys.12. Czujniki o zmiennej szczeliny powietrznej

Indukcyjność czujnika pokazanego na rys.12A jest proporcjonalna do

$$L = \frac{n^2}{\frac{l_z}{\mu_z F_z} + \frac{l_p}{\mu_p F_p}}$$

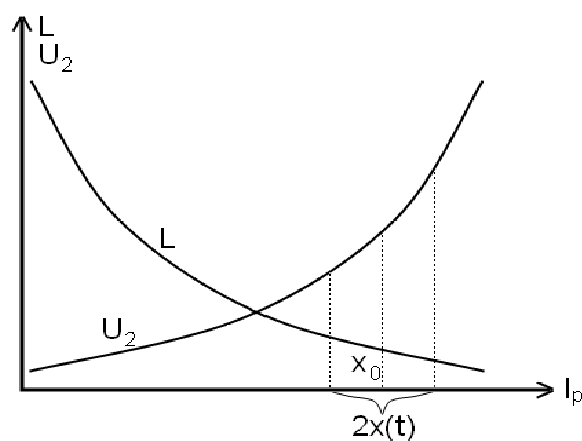
gdzie:  $n$ -liczba zwojów cewki,

$l_z$  i  $l_p$  -długość odcinka obwodu magnetycznego w „żelazie i powietrzu”, przy czym  $l_p = 2(x_0 + x(t))$   $x_0$  - początkowa odległość zwory od rdzenia elektromagnesu,  $x(t)$  - mierzone

przemieszczenia zwory względem rdzenia elektromagnesu,  $F_z$  i  $F_p$  pola przekroju poprzecznego rdzenia i szczeliny powietrznej. Ponieważ na prawej stronie zależności (11) wszystkie wielkości z wyjątkiem  $I_p$  można przyjąć za stałe w czasie, więc (11) można przedstawić w postaci:

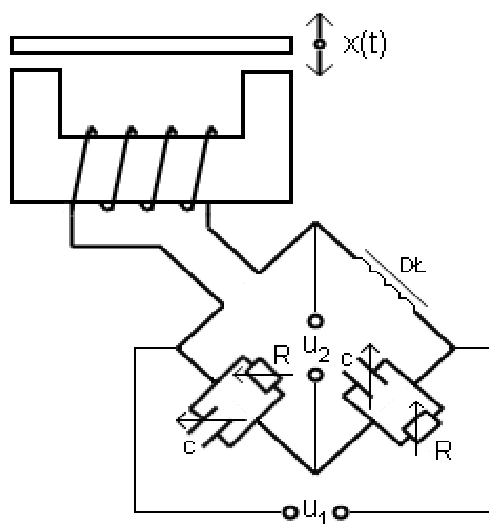
$$L \sim \frac{a}{b + x(t)}$$

Zależności tę pokazano na rys.13.



Rys. 13

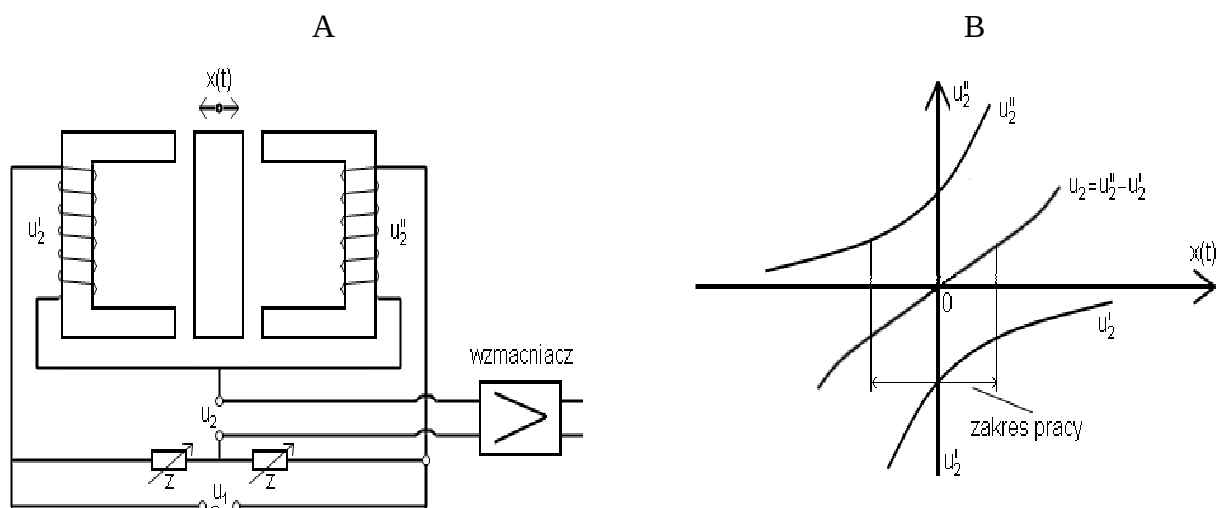
Jak widać, zmiana napięcia  $U_2$  jest w przybliżeniu proporcjonalne do  $x(t)$  na niewielkim tylko odcinku. Czujnik taki włącza się zwykle w układ mostkowy, jak na rys.14.



Rys. 14

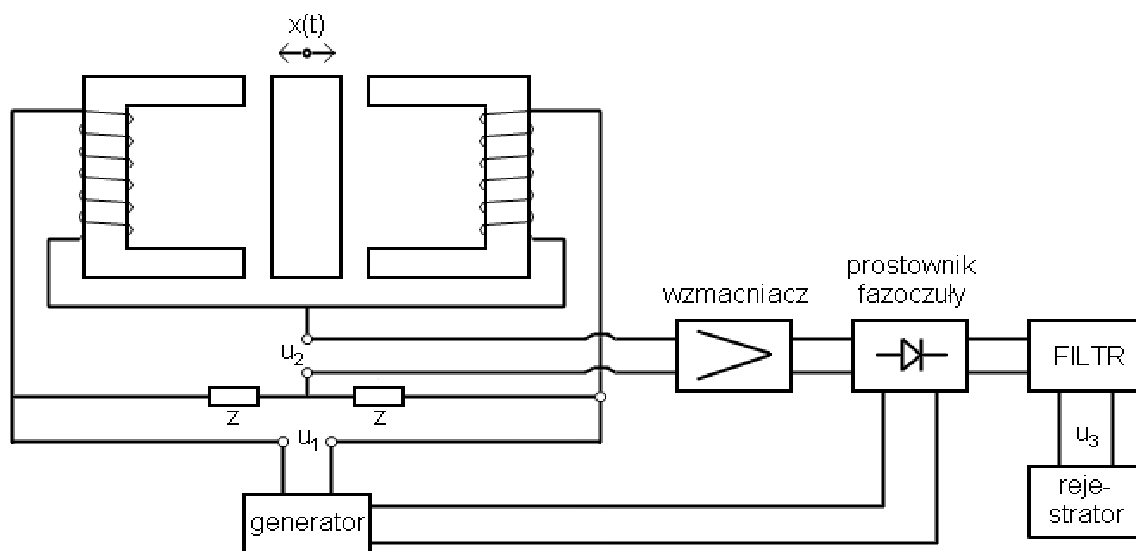
Dławik  $D_L$  najczęściej znajduje się w obudowie czujnika i częściowo kompensuje ewentualny wpływ temperatury. Znaczne poprawienie liniowości charakterystyk czujnika uzyskuje się stosując tzw. układ różnicowy. W tym celu łączy się dwa czujniki indukcyjne w układ mostkowy (jak na rys. 15A), który jest

modulatorem amplitudy.

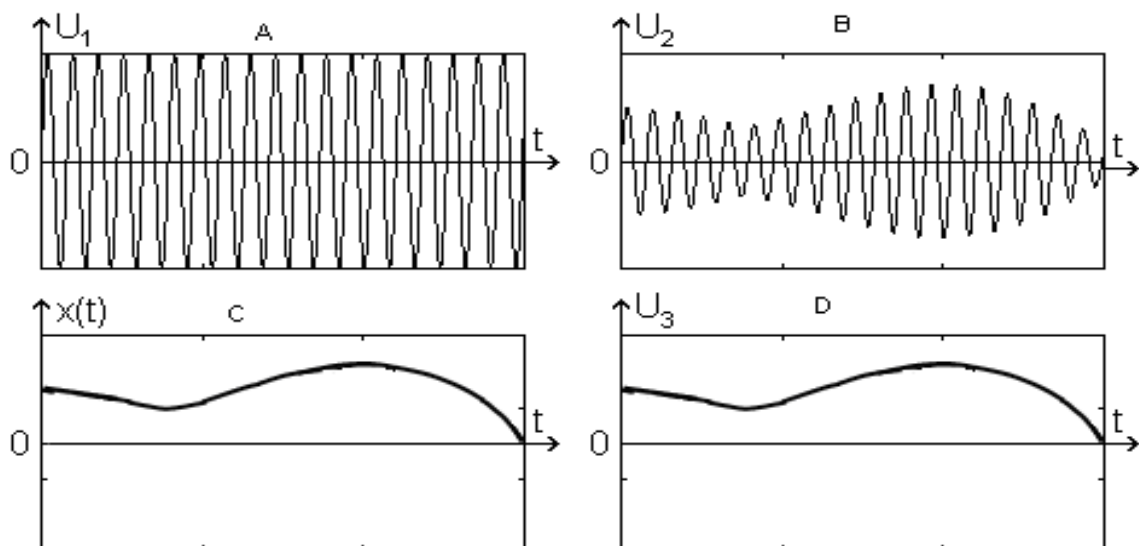


Rys. 15

Napięcie  $U_2$  jest różnicą napięć z cewek obu czujników. Przebieg zmian napięć  $U_2^I$  i  $U_2^{II}$  oraz ich różnicę i zakres pracy czujnika pokazano na rys.15B. Jak widać zależność między  $U_2$ , a  $x(t)$  jest w szerokim zakresie liniowa. Inną zaletą tego układu jest kompensacja wpływu temperatury otoczenia, jak i sił elektromechanicznych przyciągających zwoję. Czujniki indukcyjne najczęściej pracują w układzie modulatora amplitudy. Na rys. 16 pokazano schemat układu pomiarowego. Podobne układy, tj. z modulacją amplitudy, mogą współpracować z innymi typami czujników parametrycznych.



Rys. 16



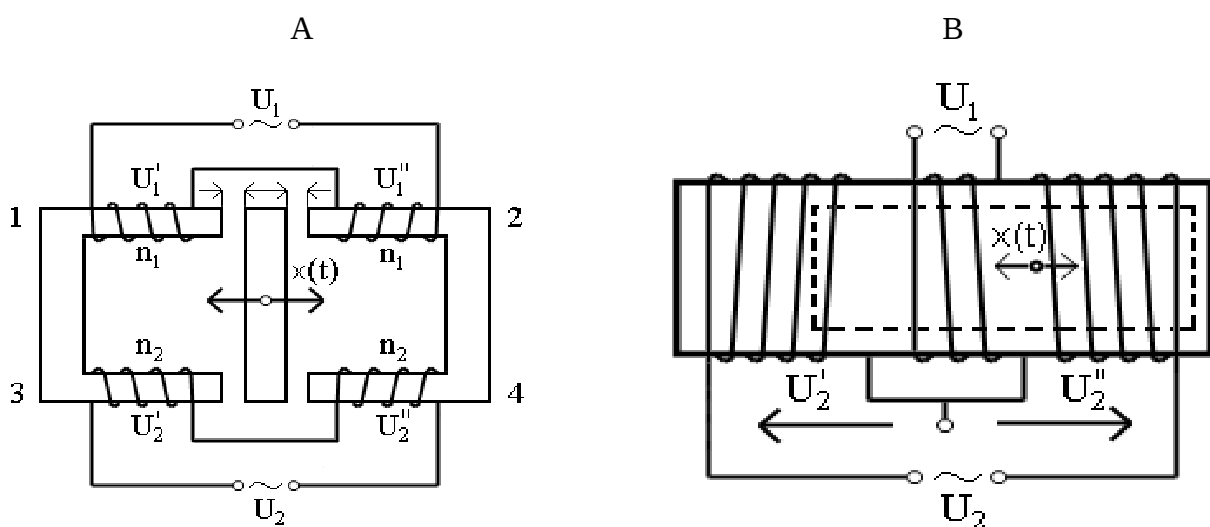
Rys. 17

Układ pokazany na rys. 16 zasilony jest napięciem zmiennym  $U_1(t)$  z generatora wysokiej częstotliwości. Przebieg ten jest pokazany na rys. 17C. Ruch zwory  $x(t)$  spowoduje zmianę indukcyjności obwodu w takt  $x(t)$ . Zmiana indukcyjności obwodu pociąga za sobą efekt zmodulowania napięcia  $U_1$  częstotliwości nośnej, którego z kolei efektem jest napięcie  $U_2$  rys.17B. Obwiednie zmodulowanego przebiegu są identyczne z przebiegiem  $x(t)$ . Napięcie  $U_2$  ulega wzmocnieniu i następnie zdemodulowaniu w prostowniku fazoczułym. Resztki nośnej są odfiltrowane w filtrze F, na wyjściu filtru otrzymujemy przebieg  $U_3(t)$  rys.17D o identycznym kształcie jak  $x(t)$ .

### 3.3. Czujniki transformatorowe

O ile czujniki dławikowe najczęściej są czujnikami bezdotkowymi, gdyż rolę zwory z reguły spełnia obiekt, to czujniki transformatorowe w znacznej większości są czujnikami dotkowymi. W czujnikach transformatorowych o zmiennej indukcyjności wzajemnej wykorzystuje się zależność siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu wtórnym w różnych warunkach sprzężeń obu uzwojeń.

Przykłady różnicowych przetworników transformatorowych pokazano na rys. 18A, 18B.



Rys. 18

Weźmy pod uwagę przetwornik pokazany na rys.18A. Dwa uzwojenia pierwotne 1 i 2 nawinięte są w przeciwnych kierunkach i zasilane napięciem zmiennym  $U_1$ . Uzwojenia wtórne 3 i 4 również są nawinięte w przeciwnych kierunkach. W czasie przemieszczeń zwory ulegają zmianie napięcia  $U_1'$  i  $U_1''$ . W uzwojeniu wtórnym otrzymujemy zatem:

$$U_2' = \frac{n_2}{n_1} U_1' \quad , \quad U_2'' = \frac{n_2}{n_1} U_1''$$

gdzie:  $n_1$  i  $n_2$  - liczby zwojów w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym.

Ponieważ 
$$\frac{U_1'}{U_1''} = \frac{L_1'}{L_1''} = \frac{\delta_2}{\delta_1} \quad \text{oraz} \quad U_1 = U_1' + U_1''$$

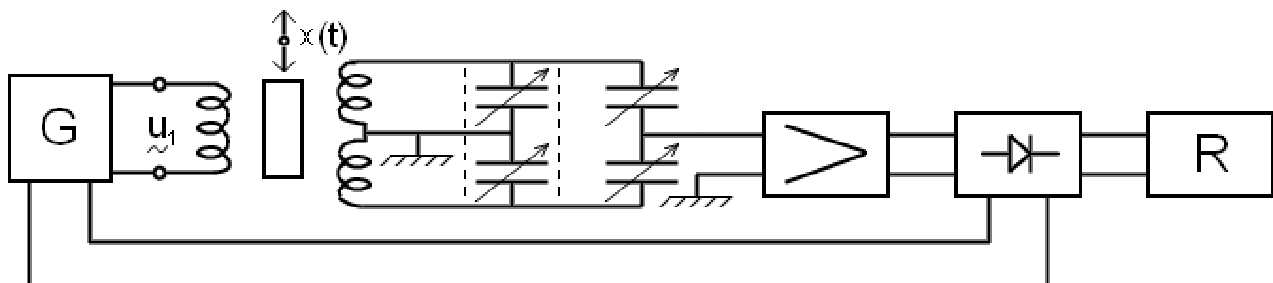
więc 
$$U_1' = \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} U_1, \quad U_1'' = \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta_2} U_1$$

Ponieważ w uzwojeniu wtórnym cewki połączone są przeciwsobnie,

więc 
$$U_2 = U_2'' - U_2' = \frac{n_2}{n_1} (U_1'' - U_1') = \frac{n_2}{n_1} \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} U_1$$

Gdy zwora znajduje się po środku  $\delta_1 = \delta_2$  to  $U_2 = 0$ . Charakterystyka takiego czujnika jest podobna do przedstawionej na rys.15B.

Na rys.18B pokazano schemat różnicowego przetwornika transformatorowego z przesuwным rdzeniem w solenoidzie, z uzwojeniem wtórnym połączonym przeciwsobnie. Czujniki pokazane na rys.18. nie pracują w układzie mostkowym. Napięcie  $U_1$ , podawane z generatora wysokiej częstotliwości, indukuje napięcie  $U_2$  w uzwojeniu wtórnym, które od razu przekazywane jest przez wzmacniacz na prostownik fazoczuły, a następnie na rejestrator. Jeżeli uzwojenie wtórne nie jest połączone przeciwsobnie, to czujnik musi pracować w układzie mostkowym. Schemat czujnika transformatorowego podłączonego w układzie mostkowym pokazano na rys.19.



Rys.19

## 4. Czujniki oporowe (tensometryczne)

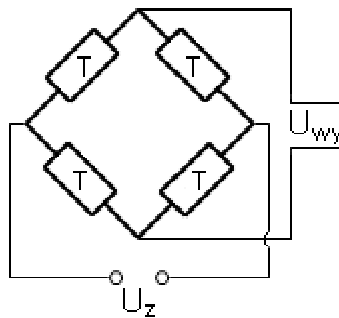
Czujniki tensometryczne oporowe pracują na zasadzie zmiany oporności drutu metalowego przy jego odkształceniach wzdłużnych, gdy drut oporowy jest rozciągany i jego długość wzrasta, a przekrój poprzeczny maleje - w rezultacie to jego oporność elektryczna wzrasta. Przy ściskaniu zmniejszenie długości i zwiększenie przekroju poprzecznego powoduje zmniejszenie oporności elektrycznej.

Na ogół we wszystkich przypadkach nie stosuje się jednego tensometru oporowego, gdyż pojedynczy tensometr zmienia swoją oporność wraz ze zmianą temperatury. Zastosowanie tensometru kompensującego albo dwóch tensometrów czynnych, doznających odkształceń przeciwnych znaków, pozwala wyeliminować wpływ temperatury i inne. Z powyżej podanych przyczyn tensometry pracują najczęściej w układzie mostka Wheatsone'a.

Wielkością charakteryzującą tensometr jest współczynnik  $k$  (bezwymiarowy). Na jego podstawie można określić, jaka wartość względnego wydłużenia tensometru spowoduje określoną względną zmianę jego oporności.

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

$k$  – czułość względna



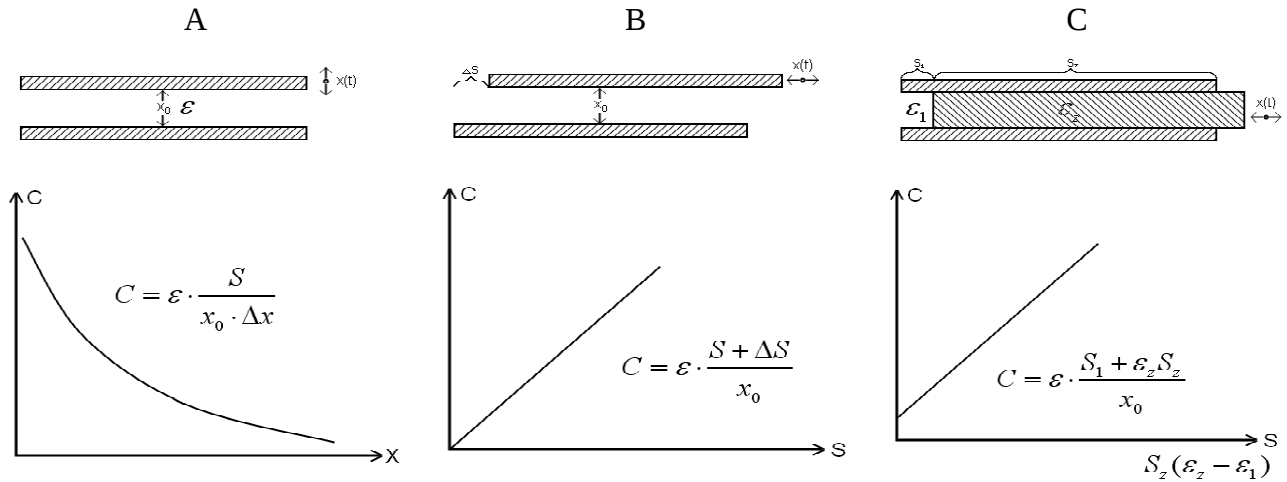
Rys. 20

Najczęściej spotyka się tensometry o współczynniku  $k = 2$ , produkowane są także tensometry o współczynniku  $k = 4$ . Oporności  $R$  tensometrów wynoszą zwykle  $120\Omega$ ,  $300\Omega$ ,  $600\Omega$ . Czujniki tensometryczne stosuje się najczęściej do pomiarów odkształceń konstrukcji. Tensometry używane są także do budowy czujników przemieszczeń, czujników inercyjnych, czujników ciśnień, czujników momentu itp.

## 5. Czujniki pojemnościowe (kondensatorowe)

Można wyodrębnić następujące odmiany czujników pojemnościowych:

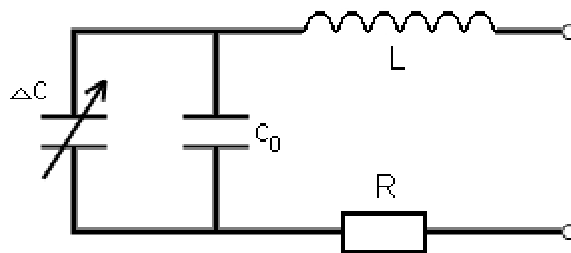
1. o zmiennej odległości  $X$  okładzin kondensatora -rys.21A
2. o zmiennej powierzchni  $S$  okładzin kondensatora -rys.21B
3. o zmiennej stałej dielektrycznej  $\epsilon$  ośrodka -rys.21C



Rys. 21

Jak widać z rys.21 najkorzystniejsze są warianty b i c ze względu na dużą liniowość  $C=f(S)$

Czujniki pojemnościowe pracują najczęściej w układzie modulatora częstotliwości jako element składowy elektrycznego oscylatora harmonicznego. Uproszczony schemat oscylatora elektrycznego pokazano na rys.22



Rys. 22

Częstotliwość rezonansową można opisać zależnością:

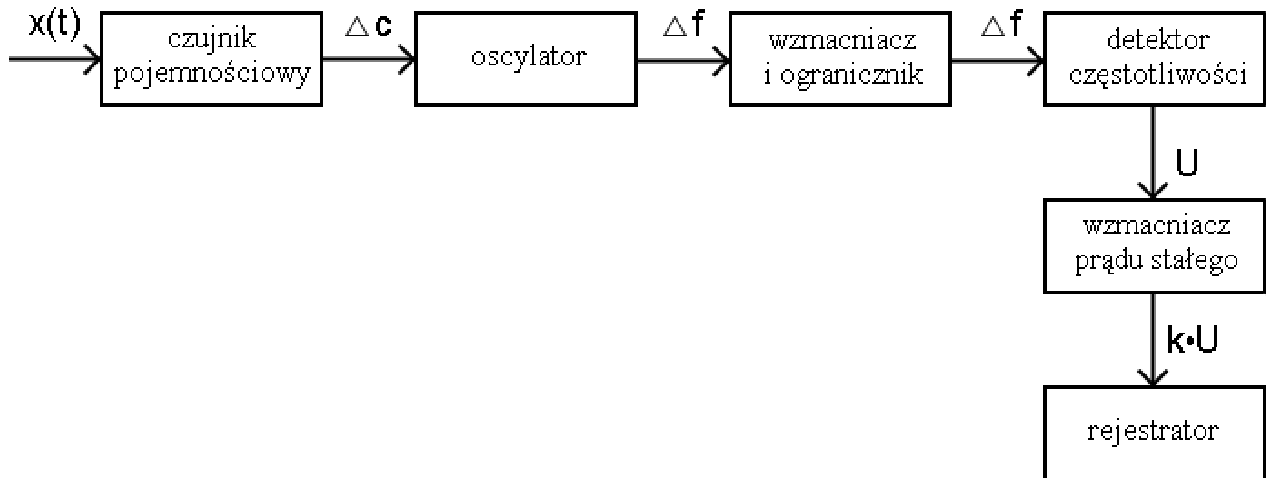
$$f_{rez} = \frac{\omega_{rez}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

gdzie:  $L = const.$ ,  $C = const$   $C_z$  -pojemność czujnika. Względną zmianę częstotliwości można napisać z wystarczającą dokładnością w postaci dwóch wyrazów szeregu Taylora dla funkcji.

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{5}{11} \left( \frac{\Delta C}{C} \right) + \frac{85}{242} \left( \frac{\Delta C}{C} \right)^2$$

$$\Delta C = \text{var}$$

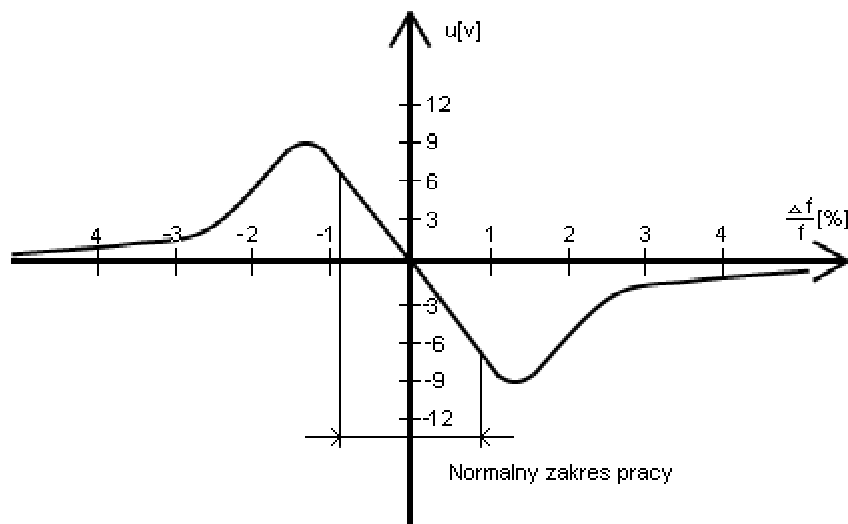
Schemat blokowy toru pomiarowego z czujnikiem pojemnościowym pokazano na rys.23.



Rys. 23

Układ działa następująco:

Drgania mechaniczne powodują zmianę pojemności czujnika. Zmiana pojemności pociąga za sobą zmianę częstotliwości rezonansowej oscylatora harmonicznego  $\Delta f$  wg. wzoru (). Sygnał elektryczny z oscylatora zostaje wzmacniony i ograniczony amplitudowo. Ograniczenie amplitudy powoduje wyeliminowanie zakłóceń, które modulują amplitudę oscylatora. Napięcie o stałej ograniczonej amplitudzie podane zostaje do symetrycznego detektora częstotliwości. Napięcie na wyjściu detektora jest napięciem, którego wielkość zmienia się zgodnie ze zmianą częstotliwości napięcia doprowadzonego. W obrębie określonego obszaru zmian częstotliwości napięcia wejściowego napięcie na wyjściu detektora częstotliwości jest liniową funkcją częstotliwości, tak jak pokazuje charakterystyka detektora na rys. 24.



Rys.24

Do głównych zalet czujników pojemnościowych należy zaliczyć prostotę ich budowy i wygodę w zastosowaniach, niewrażliwość na zakłócenia spowodowane silnymi polami magnetycznymi i możliwość statycznego wzorcowania.

Jedną z najbardziej kłopotliwych wad tych czujników jest wpływ pojemności kabla łączącego czujnik z pozostałymi elementami układu pomiarowego. Czujniki pojemnościowe wykonuje się najczęściej jako czujniki przemieszczeń liniowych i kątowych oraz czujniki ciśnień.

## L i t e r a t u r a

1. R.Hagel.: Miernictwo dynamiczne. WNT Warszawa 1975
2. J.Osiecki, S.Ziomba. Podstawy pomiarów drgań mechanicznych . PWN Warszawa 1968
3. M.Łapiński, W. Włodarski: Miernictwo elektryczne wielkości nielektrycznych. WNT Warszawa 1970
4. R. Zimmerman. Pomiary naprężeń i drgań metodami elektrycznymi. WNT Warszawa 1959.