

Traductoare pentru forțe cu ES piezoelectrice

Funcționarea acestor traductoare se bazează pe proprietatea unor anumite cristale de a se polariza (apariția unei sarcini electrice) la aplicarea unei forțe.

Astfel de cristale - substanțe cu structuri anizotrope - sunt cuarțul, titanatul de bariu, zirconatul/titanatul de plumb, care cristalizează în sistemul hexagonal, prezentând 3 axe (fig.12.5,a):

- axa electrică Ox
- axa mecanică Oy
- axa optică Oz .

Dacă se taie un paralelipiped ca în fig.12.5,b și se aplică o forță F_x dirijată în lungul axei electrice Ox , atunci pe suprafețele $S_x = b \cdot c$ apare o polarizare electrică q_{xx} (sarcina electrică raportată la unitatea de suprafață):

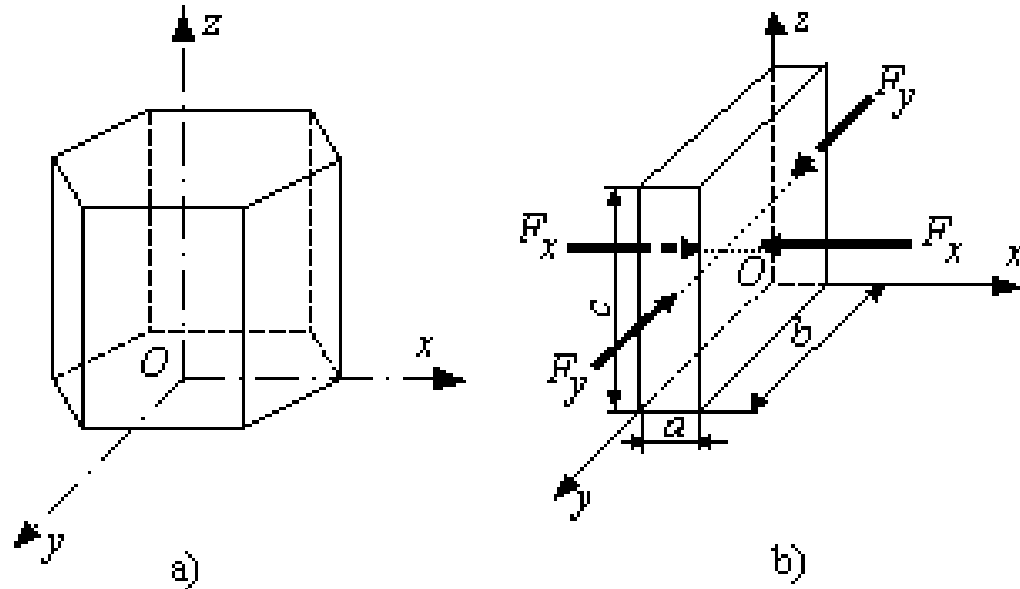
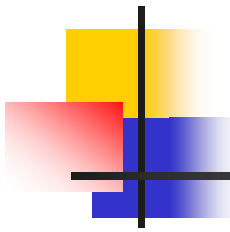


Fig.12.5. Forma cristalului de cuarț (a) și modalitatea lui de utilizare în elementele sensibile de forță (b)

$$q_{xx} = d_p \cdot p_x \quad \text{astfel că sarcina acumulată pe suprafața } S_x \text{ va fi}$$

Traductoare pentru forțe cu ES piezoelectrice


$$Q_{xx} = S_x \cdot q_{xx} = d_p \cdot p_x \cdot S_x = d_p \cdot F_x$$

Pentru un cristal de cuarț $d_p = 2,1 \cdot 10^{-12} \text{C/N}$, iar forța F_y poate atinge 1000 daN.

unde d_p este modulul (constanta) piezoelectric(ă), p_x - presiunea exercitată în lungul axei Ox de forța aplicată de-a lungul aceleiași axe, Q_{xx} - sarcina acumulată pe suprafața S_x .

→ sarcina electrică acumulată Q_{xx} nu depinde de dimensiunile cristalului.

Acest fenomen, de generare a unei sarcini electrice la aplicarea unei forțe de-a lungul axei electrice, se numește *efect piezoelectric direct longitudinal*.

Dacă se aplică o forță F_y de-a lungul axei mecanice Oy, pe suprafața $S_x = b \cdot c$ apare o acumulare de sarcină electrică (polarizare), care va avea sens contrar celei dinainte. Acest tip de fenomen se numește *efect piezoelectric direct transversal*.

Prin analogie, rezultă: $q_{xy} = -d_p \cdot p_y$ $Q_{xy} = q_{xy} \cdot S_x = -d_p \cdot p_y S_x = -d_p \cdot \frac{F_y}{S_y} S_x$

cum $S_x = b c$, iar $S_y = a c$, rezultă: $Q_{xy} = -d_p \cdot \frac{b}{a} F_y$

relație care arată că sarcina electrică acumulată depinde de dimensiunile cristalului (modalitate stă la baza construcției elementelor sensibile de forțe bazate pe efecte piezoelectrice).

Traductoare pentru forțe cu ES piezoelectrice

Observații:

1. Dacă pe suprafețele S_x se aplică un semnal electric sinusoidal, pe suprafețele S_y apar vibrații mecanice care ajung la rezonanță (amplitudine maximă) când frecvența semnalului sinusoidal egalează frecvența de rezonanță proprie a cristalului. Acest fenomen se numește *efect piezoelectric invers*, pe baza lui fiind realizate oscilatoarele de mare precizie.
2. Fenomenul de polarizare (acumulare de sarcini electrice) se explică prin structura cristalină a cuarțului. Dacă se face o secțiune plană normală (perpendiculară) la axa optică Oz - fig.12.6,a - se constată că există 3 molecule de SiO_2 așezate hexagonal (explicații...).

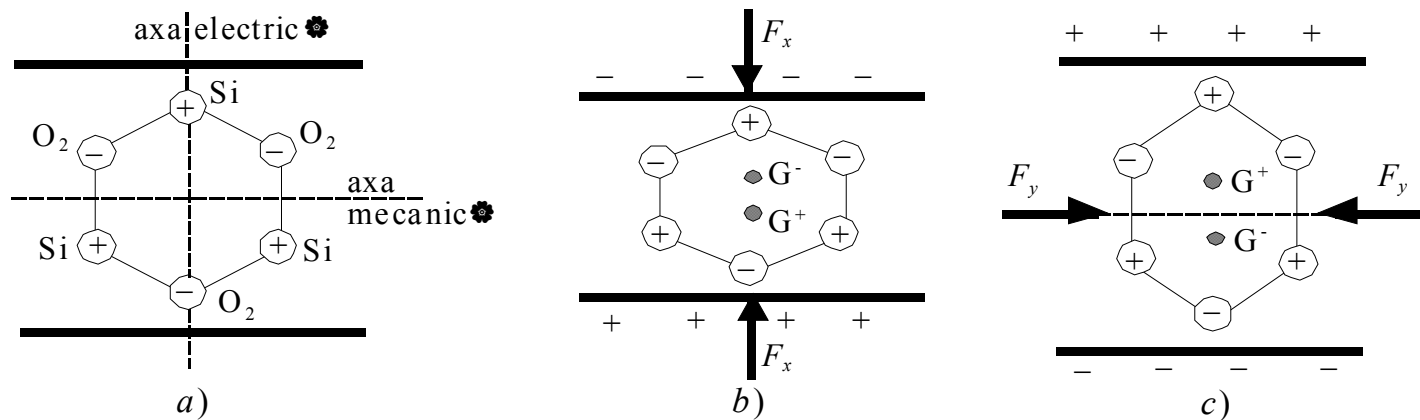


Fig.12.6. Secțiune normală pe axa optică (a) și explicarea efectului piezoelectric direct longitudinal (b), respectiv transversal (c)

Traductoare pentru forțe cu ES piezoelectrice

Un element sensibil bazat pe efect piezoelectric trebuie să aibă - în principal - următoarele proprietăți:

- să fie cât mai subțire posibil (a de valori foarte mici pentru a avea o bună sensibilitate);
- să aibă rigiditate mecanică mare, pentru a rezista la valori importante de forțe aplicate;
- să aibă constantă dielectrică mare (permitivitate dielectrică ridicată pentru a păstra sarcina acumulată pe suprafețele aferente axei electrice);
- să permită o prelucrare mecanică ușoară (din acest punct de vedere cristalul de cuarț este deficitar).

Pentru creșterea sensibilității se folosesc rondele (cu dimensiuni apropiate unei monezi) dispuse în coloană, conectate electric în serie sau în paralel.

O rondea piezoelectrică are capacitatea C_0 de 30...200pF, iar rezistența de pierderi R_0 de $10^{10}...10^{11} \Omega$.

Aplicând o forță dinamică pe axa mecanică, un cristal piezoelectric se comportă ca un generator de sarcină, care debitează pe o capacitate C_0 în paralel cu o rezistență R_0 (s-a presupus o singură rondea piezoelectrică); în continuare, semnalul este transmis către circuitul de intrare al adaptorului prin intermediul unui cablu ecranat caracterizat prin capacitatea C_c și rezistența R_c (fig.12.7,a).

Traductoare pentru forțe cu ES piezoelectrice

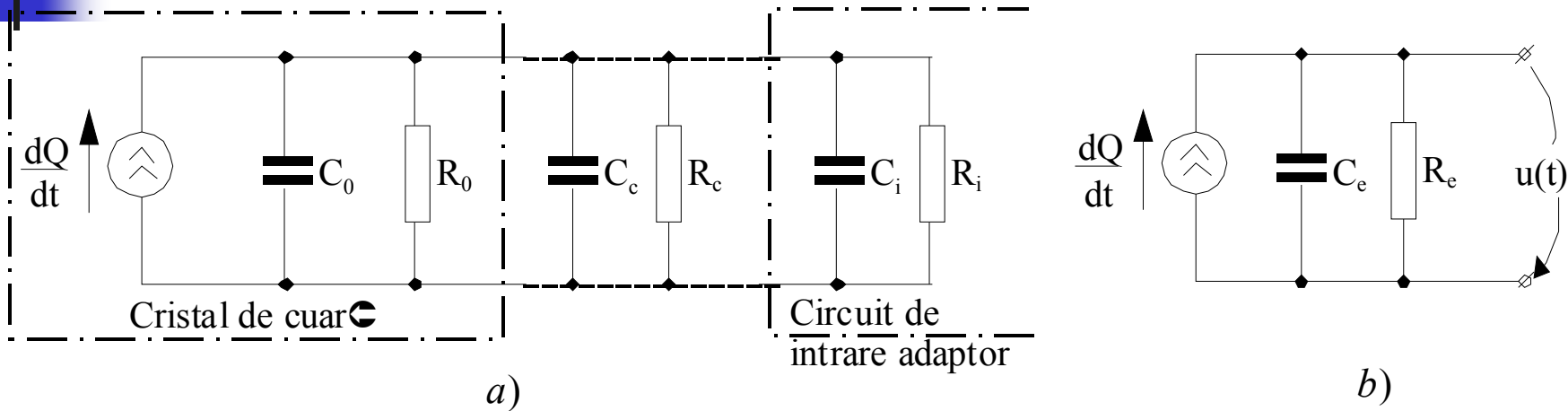


Fig.12.7. Schema echivalentă detaliată (a) a lanțului element sensibil piezoelectric - intrare adaptor semnal calibrat și cea simplificată (b)

schema echivalentă simplificată este conform fig.12.7,b, în care

$$C_e = C_0 + C_c + C_i \quad \text{Considerând o forță dinamică sinusoidală} \quad F(t) = F_m \sin \omega t$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_i} \quad \text{prin considerarea unui amplificator de c.a. clasic se obține un răspuns care conține o componentă forțată și una liberă, influențate de valorile } C_e \text{ și } R_e.$$

Pentru a elimina influențele evidențiate mai sus se folosește un amplificator de sarcină (fig.12.8) la care:

Traductoare pentru forțe cu ES piezoelectrice

$$\frac{dQ}{dt} + C_r \frac{du_e}{dt} \cong 0 \quad \text{cu soluția (în condiții inițiale nule)}$$

$$u_e(t) = -\frac{1}{C_r} Q(t)$$

unde capacitatea de pe reacție C_r este bine determinată din condiția $C_r \gg C_e$.

Uneori, pe reacție se atașează și o rezistență

$$R_r, \text{ astfel că: } \frac{dQ}{dt} + C_r \frac{du_e}{dt} + \frac{u_e}{R_r} \cong 0$$

sau, aplicând transformata Laplace în condiții inițiale nule, rezultă

$$sQ(s) + sC_r U_e(s) + \frac{1}{R_r} U_e(s) = 0 \quad \text{de unde} \quad U_e(s) = -\frac{sR_r C_r}{1 + sR_r C_r} \frac{Q(s)}{C_r}.$$

Așadar, se obține un filtru trece-sus care poate fi riguros proiectat, în sensul că se poate controla atât constanta de timp $\tau_r = R_r \cdot C_r$ cât și factorul $Q(s)/C_r$.

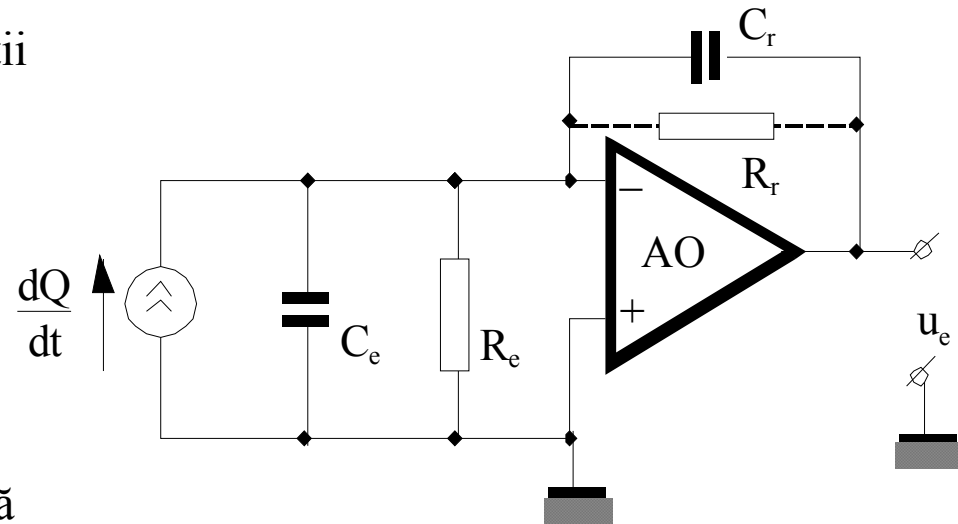


Fig.12.8. Preluarea semnalului de la elementul sensibil piezoelectric cu un amplificator de sarcină



Traductoare de presiune

Presiunea caracterizează starea unui fluid fiind determinată prin raportul dintre forța care apasă normal pe o suprafață și aria acestei suprafețe.

Unitatea de măsură a presiunii este - în SI - pascalul $\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$, dar există încă multe alte unități tolerate ca: atm, at, kgf/m^2 , mm Hg, mm H_2O , bar (foarte folosită), tor = 1 mm Hg, psi (pound square inch).

Principiile de funcționare ale instrumentației pentru măsurarea presiunii se bazează pe utilizarea de elemente sensibile care transformă presiunea fie într-o deplasare sau o deformare mecanică - preluată cu traductoare specifice - fie direct într-o mărime electrică - tensiune, sarcină electrică, variație de rezistență electrică. În consecință, după tipul elementului sensibil utilizat pentru preluarea presiunii, se disting:

- cu elemente sensibile de tip elastic (capsulă elastică, membrană elastică, burduf elastic, tub Bourdon);
- cu elemente sensibile de tip presiune-deplasare (cu clopot, cu tor oscilant);
- cu elemente sensibile bazate pe proprietăți electrice (piezorezistive, piezoelectrice).

Traductoare de presiune cu elemente elastice

Principiul de funcționare:
deformarea elastică a elementului de măsurare sub acțiunea forței exercitate de fluidul de lucru pe suprafața sa activă → o forță elastică egală și de sens contrar din partea elementului sensibil, deformare efectuată până în momentul atingerii unei stări de echilibru.

Cele mai utilizate elemente sensibile elastice - fig.a - sunt:

- *Tubul Bourdon*
- *Membrana elastică*
- *Capsula elastică*
- *Burdiful elastic (silfonul)*

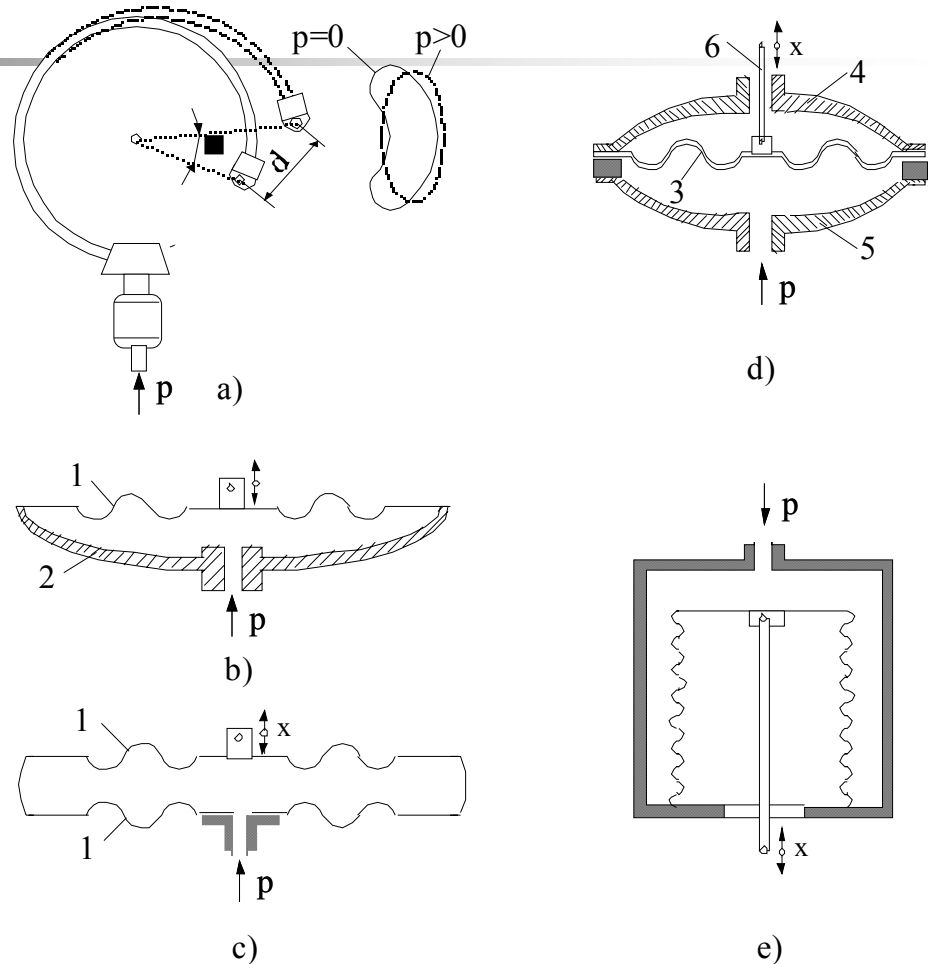
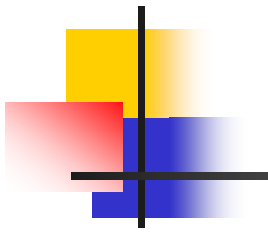


Fig.a. Tipuri de elemente sensibile elastice:

a) - tub Bourdon; b) - capsulă elastică cu acțiune unilaterală; c) - capsulă elastică cu acțiune bilaterală; d) - membrană elastică; e) - burduf elastic; 1 - membrană elastică; 2 - taler rigid; 3 - membrană ondulată; 4 - flanșă superioară; 5 - flanșă inferioară

Traductoare de presiune cu elemente elastice



Tubul Bourdon este în formă de arc de cerc, cu un unghi la centru de aprox. 270° , confecționat din metale (aliaje) ca: alamă, bronz fosforos, Cu-Be, oțel, rigidizat la capătul care comunică cu presiunea de măsurat, iar capătul liber conectat la un traductor de deplasare unghiulară. Sub acțiunea presiunii secțiunea tubului tinde către una circulară, care are ca efect deplasarea capătului liber cu un unghi la centru de aprox. 8° pentru presiunea nominală (în raport cu cea de referință). Pentru creșterea sensibilității se construiesc tuburi elicoidale sau plan spiralate compuse din mai multe spire bobinate în spațiu, respectiv în plan. Întrucât tuburile Bourdon acoperă o gamă largă de presiuni (0,01 at ... 400 at), secțiunea acestora diferă în funcție de domeniul presiunilor de lucru.

Membrana elastică este confecționată din metale (aliaje) ca: alamă pentru presiuni mici și oțel pentru presiuni mari, realizată sub formă de ondulații concentrice, forma și adâncimea ondulațiilor determinând caracteristicile elastice, în speță sensibilitatea membranei. Deplasarea maximă este de 1,5 ... 2 mm, având o sensibilitate mai redusă ca a tuburilor Bourdon. Sunt folosite - cu predilecție - în medii corosive (suprafața lor se poate acoperi cu un strat protector) și viscoase.

Burdiful elastic (silfonul) este un tub cilindric cu gofraje transversale pe suprafața laterală, realizat din bronz cu adaos de beriliu, oțel inox, alamă, alpaca, bronz placat cu nichel; asigură deplasări de circa 8 ... 10 mm, măsoară presiuni mici, între 60 ... 3500 mm H₂O, în medii gazoase.



Traductoare de presiune cu elemente elastice

Capsula elastică poate fi cu acțiune unilaterală - o membrană elastică lipită pe contur pe un taler rigid - sau bilaterală - două membrane lipite pe contur - realizate din aceleași materiale menționate la membrana elastică. Pentru creșterea sensibilității se folosesc blocuri de capsule cu acțiune bilaterală înseriate. Se pot măsura presiuni relative și absolute (pentru presiuni absolute se folosește o capsulă de referință cu vid înaintat - aplicații frecvente în altimetrie). Domeniul presiunilor de lucru este între 0,2 at ... 420 at, atât pentru lichide cât și pentru gaze.

Din analiza caracteristicii statice a elementelor sensibile elastice se constată că acestea asigură - în general - o dependență neliniară a deplasării funcție de presiunea aplicată; în plus, apare fenomenul de histerezis mecanic, care duce la creșterea neliniarităților.

Adaptoarele, cu un traductor intermediar de deplasare în intrare - de regulă de tip inductiv - fie lucrează cu elemente sensibile elastice supuse la domenii mici de presiuni, fie se procedează la liniarizarea caracteristicii statice în cadrul adaptorului...

Traductoare de presiune cu elemente piezorezistive

Utilizarea elementelor piezorezistive s-a impus în ultimii ani datorită dezvoltărilor tehnologice din domenii ca micro și nanotehnologiile, care au permis obținerea unor componente de precizie și sensibilitate ridicate, coroborate cu miniaturizarea remarcabilă. *Piezorezistivitatea* → proprietatea unui corp de a-și modifica rezistivitatea sub acțiunea unui câmp de tensiuni (de natură mecanică) la care acesta este supus. Fenomenul este mai pronunțat la semiconductoare - monocristale de siliciu - iar modificările de rezistență apar atât la eforturi statice cât și dinamice.

Rezistivitatea unui semiconductor este dată de relația
$$\rho = \frac{1}{e\mu n}$$

unde e - sarcina electronului, μ - mobilitatea medie, n - numărul de purtători → modificarea rezistivității se poate realiza atât prin modificarea lui μ cât și a lui n .

Modificările de μ și n la un semiconductor depind de concentrația purtătorilor și de orientarea cristalografică în raport cu direcția de aplicare a solicitărilor, în consecință se pot obține - prin dopaje corespunzătoare și aplicări de eforturi pe direcții diferite - o multitudine de caracteristici.

Din analiza relației ... rezultă o dependență neliniară a rezistivității de efortul unitar (presiune). Realizarea unei dependențe liniare se obține prin utilizarea a 4 monocristale semiconductoare montate într-o punte Wheatstone, toate brațele fiind active.

Traductoare de presiune cu elemente piezorezistive

Deoarece mobilitatea este puternic influențată de temperatură, pentru compensare se introduce în serie cu diagonala de măsurare a punții Wheatstone un termistor, realizându-se compensarea variațiilor cu temperatura pe domenii mari ($-30^{\circ}\text{C} \dots +80^{\circ}\text{C}$).

Așadar, schema de principiu a elementului sensibil piezorezistiv de presiune arată ca în fig.b.

Ca exemplu, un astfel de element sensibil (firma Endevco - SUA) are diafragma de preluare a presiunii cu diametrul de 1,25 mm, în interiorul acesteia sunt sculptate zonele de depunere a monocristalelor de Si "atacate" la eforturi longitudinale (2) și transversale (2), realizând - la o alimentare tipică de 10V - un semnal la cap de scală de 300mV; frecvența proprie de rezonanță este de 70kHz, suportă o suprapresiune de până la 3 ori presiunea nominală, asigură - în plaja de lucru - o liniaritate sub 0,25% și un histerzis sub 0,1%, fiind capabil să lucreze, fără circuit extern de compensare, pe domeniul $-18^{\circ}\text{C} \dots +90^{\circ}\text{C}$, au o greutate între 0,08 ... 11g (funcție de variantă), pot măsura presiuni între 0,1 ... 1400 ba12

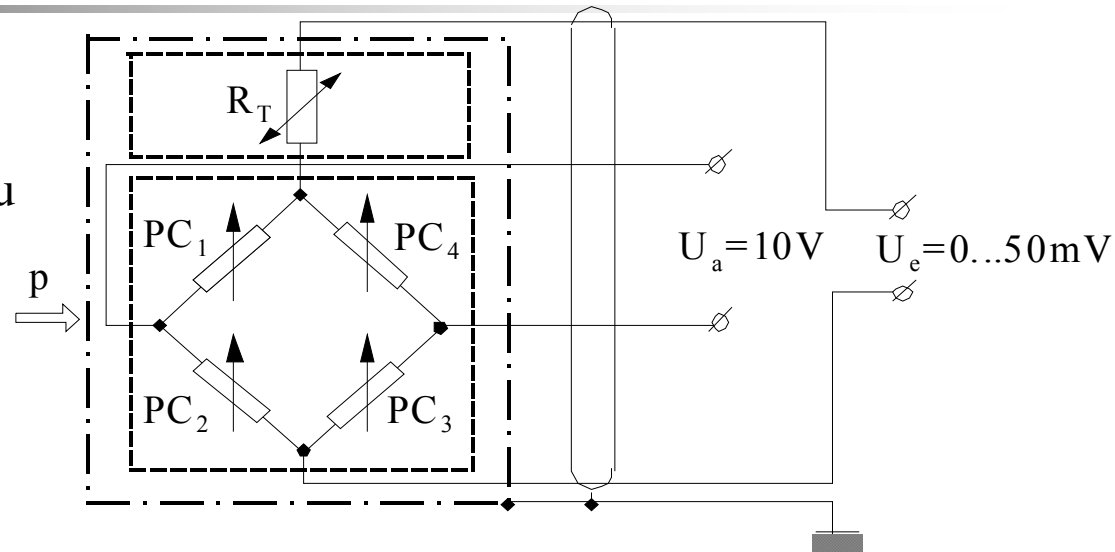


Fig.b. Schema de principiu a elementului sensibil piezorezistiv:

PC₁, ..., PC₄ - piezocristale de siliciu; R_T - termistor de compensare



Traductoare de debit

Măsurarea debitelor de fluide și, prin integrarea acestora, contorizarea cantităților de materiale care intervin în diverse procese tehnologice, reprezintă o componentă esențială a numeroase activități industriale/domestice și comerciale.

Debitul unui fluid reprezintă cantitatea de fluid (apă, ulei, abur, aer comprimat, gaz, produs petrolier etc) care trece în unitatea de timp printr-o secțiune transversală S a tubului de curent (conductă sau canal deschis).

Debitul poate fi *masic* - notat Q_m $Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta \tau}$
volumetric - notat Q_v $Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta \tau}$

Dacă se ia în considerare viteza fluidului (mai precis o valoare medie a acesteia pe ansamblul secțiunii de măsurare S), se poate defini debitul astfel:

- debitul masic: $Q_m = A v_s \rho_s$ unde A este aria secțiunii de trecere (măsurare), v_s - viteza instantanee medie pe ansamblul secțiunii de măsurare S , ρ_s - densitatea fluidului mediată pe ansamblul secțiunii de măsurare S .
- debitul volumetric: $Q_v = A v_s$

Cele mai utilizate elemente sensibile de debit sunt: cu dispozitive de strangulare, cu turbină, cu ultrasunete, electromagnetice, termoanemometrice, rotametrice.

Traductoare de debit cu ultrasunete

Principiul de funcționare a acestei categorii de traductoare are la bază influența vitezei de curgere a fluidului printr-o conductă asupra propagării undelor ultrasonice. Viteza de propagare a undelor sonice depinde de tipul fluidului, presiunea și temperatura acestuia. În **tabelul a** se prezintă - spre exemplificare - viteza C [m/s] de propagare a sunetului pentru diverse gaze, în condiții diferite de presiune și temperatură [Instromet].

Tabelul a. Viteza de propagare a undelor sonice în diverse medii

Rezultatele prezentate în tabelul a conduc la concluzia că trebuie făcută corecția vitezei de propagare C în funcție de presiunea și temperatura fluidului. De exemplu, la gazele naturale se folosește dependența aproximativă

$$C = \sqrt{\frac{K \cdot p}{Z \cdot \rho}}$$

unde K este constanta lui Poisson, p - presiunea, ρ - densitatea și Z - factorul de compresibilitate.

Elementele sensibile ale instrumentației ultrasonice de debit sunt de tip piezoceramic - care folosesc atât efectul piezoelectric invers (pentru generarea undelor ultrasonice), cât și efectul piezoelectric direct transversal (pentru recepția undelor ultrasonice care tranzitează fluidul a cărui viteză se măsoară).

Tip fluid	p [bar]	T [K]	C [m/s]
Metan	1	275	432
Metan	1	320	463
Metan	60	275	414
Metan	60	320	456
Aer	1,0133	275	333
Hidrogen	1,0133	273,15	1022
Etilenă	1	273,15	318
Gaz natural	1,0133	273,15	400

Traductoare de debit cu ultrasunete

La o excitație electrică de înaltă frecvență ($2 \cdot 10^4 \dots 10^9$ Hz) aplicată piezocristalului emițător se generează un puls ultrasonic de forma celui prezentat în Fig.c.

După propagarea prin fluidul din conductă, pulsul - atenuat în amplitudine - este preluat de piezocristalul receptor;

În continuare este transformat în semnal electric, amplificat corespunzător, comparat cu o "amprentă" memorată în dispozitivul de prelucrare (pentru a avea certitudinea că nu provine de la o sursă perturbatoare), după care se calculează timpul de tranzitare a spațiului dintre sursă și receptor.

Prelucrarea semnalelor se face numeric de o structură organizată în jurul unui microcontroler - prezentată principal în Fig.e.

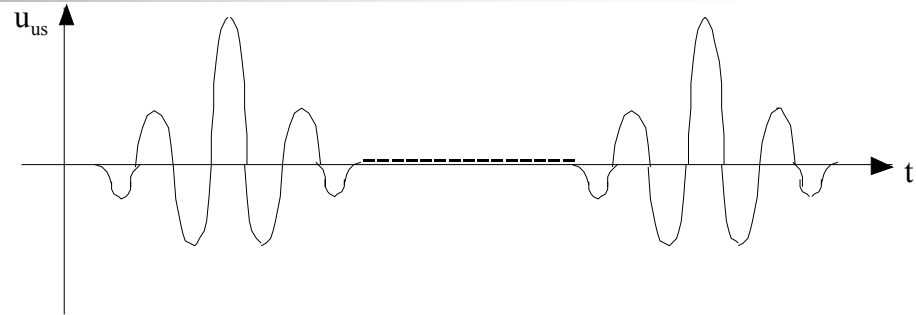


Fig.c. Forma tipică a pulsului ultrasonic emis de un piezocristal

Traductoare de debit cu ultrasunete

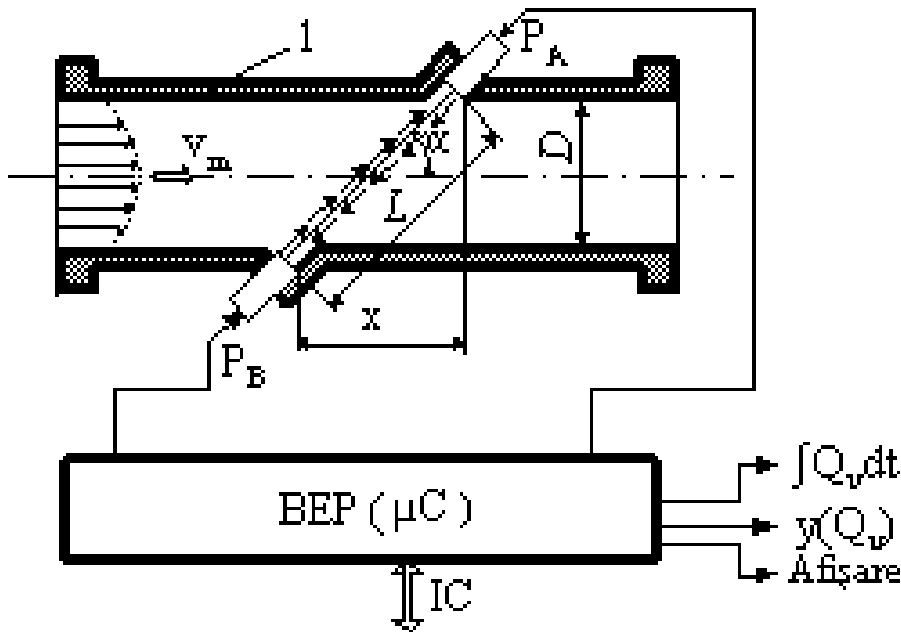


Fig.d. Schema de principiu a măsurării debitului cu ultrasunete:

1- conductă; P_A , P_B - piezocristale; BEP - bloc electronic de prelucrare; IC - interfață de comunicație

Ținând seama de dimensiunile puse în evidență pe Fig.d, se pot scrie relațiile:

$$t_{AB} = \frac{L}{C - v_m \cos \alpha}$$

$$t_{BA} = \frac{L}{C + v_m \cos \alpha}$$

astfel că:

$$C - v_m \cos \alpha = \frac{L}{t_{AB}}$$

$$C + v_m \cos \alpha = \frac{L}{t_{BA}}$$

Traductoare de debit cu ultrasunete

Așadar:

$$v_m = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left(\frac{1}{t_{BA}} - \frac{1}{t_{AB}} \right). \quad \text{Cum } \cos \alpha = x/L \text{ și } Q_v = (\pi/4)D^2 v_m \text{ rezultă că:}$$

$$Q_v = \frac{\pi}{4} D^2 \frac{L}{2 \frac{x}{L}} \frac{t_{AB} - t_{BA}}{t_{AB} t_{BA}} = \frac{\pi}{4} D^2 \frac{L^2}{2x} \frac{\Delta t}{t_{AB} t_{BA}}$$

relație care arată că debitul volumetric depinde doar de dimensiunile conductei, a distanței de amplasare a piezocristalelor, timpilor de tranzit și diferența acestora. Prelucrarea numerică a semnalelor recepționate de la cele două piezocristale se face de către blocul de prelucrare electronică BPE (organizat în jurul unui microcontroler) și circuitele asociate.

Traductoare de debit cu ultrasunete

Cum se observă, în relația debitului nu intră viteza de propagare a ultrasunetelor prin fluid C , așadar nu mai este necesară corecția cu temperatura, presiunea și factorul de compresibilitate al fluidului de lucru.

Dacă măsurarea se face cu o singură pereche de elemente piezoelectrice ca în Fig.d, montate în raport cu centrul conductei, trebuie introdusă o corecție datorată vitezei medii v_m , adică:

$$Q_v = K \frac{\pi}{4} D^2 \frac{L^2}{2x} \frac{\Delta t}{t_{AB} t_{BA}}$$

unde K este factorul de corecție al profilului vitezei fluidului v_m dependent de numărul Reynolds.

Măsurările performante de debit cu ultrasunete folosesc, pentru eliminarea factorului de corecție K , perechi de senzori piezoelectrice montați în X - două câte două - la patru cote riguros precizate în raport cu diametrul conductei - Fig.e - debitul volumetric rezultând ca media debitelor calculate de cele patru configurații.

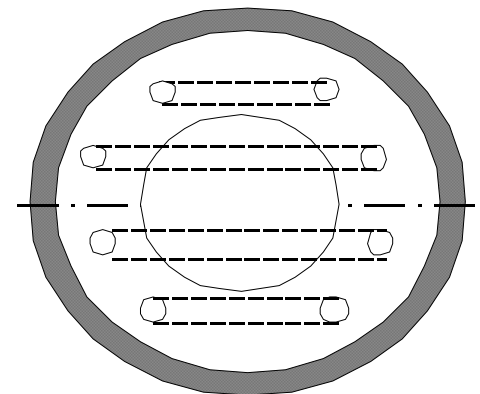


Fig.e. Amplasarea senzorilor pentru eliminarea factorului de corecție K al profilului vitezei de curgere v_m

Traductoare de debit cu turbină

Principiul de funcționare:
Sub acțiunea fluidului a cărui debit se dorește a fi măsurat, se produce rotirea turbinei cu o turație dependentă de valoarea debitului.

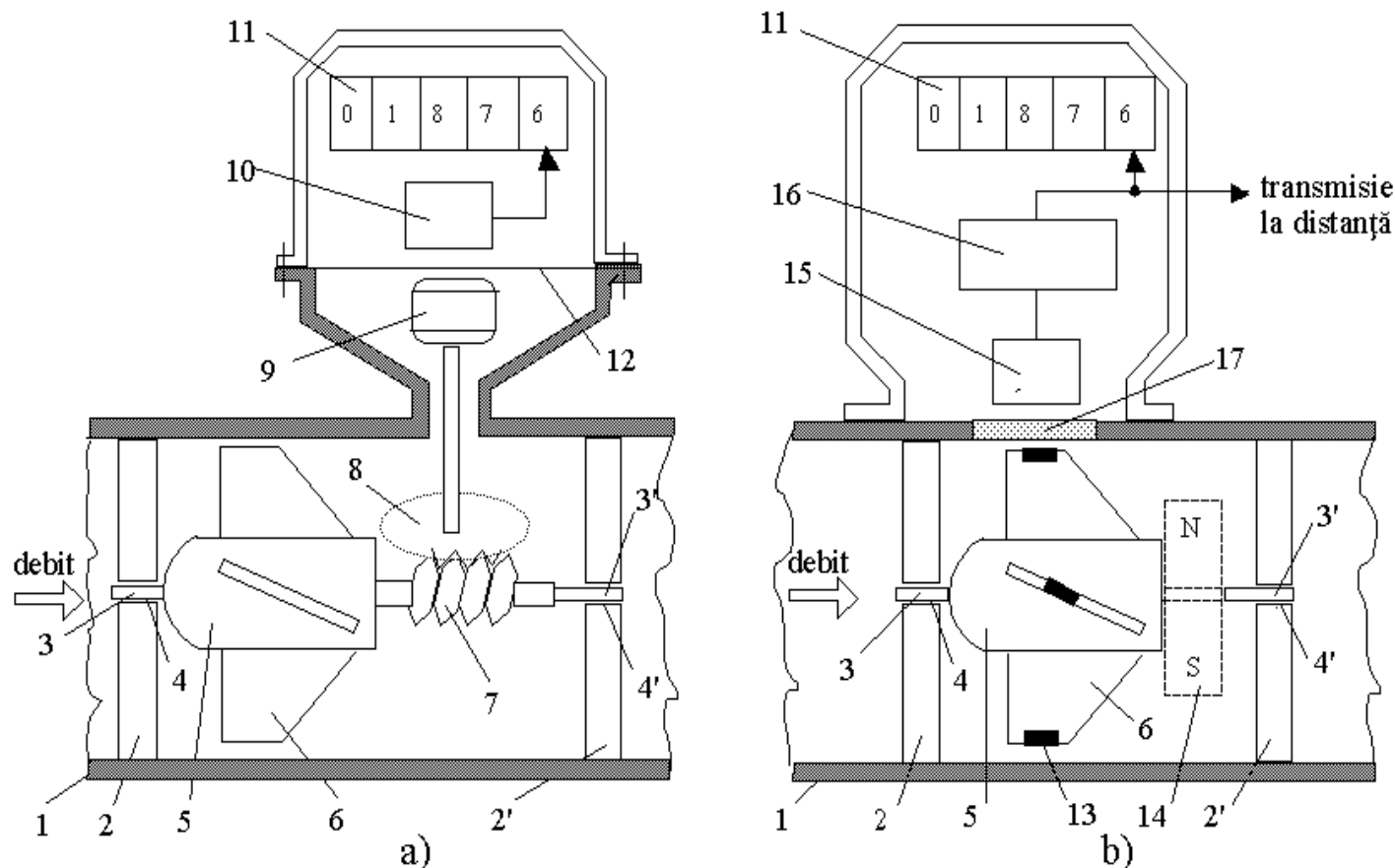


Fig.f Schema de principiu a debitmetrelor cu turbină:

a) - contor de debit cu adaptor pur mecanic; b) - contor de debit cu adaptor electromecanic;

1 - conductă; 2, 2' - palete direcționale; 3, 3' - axe; 4, 4' - lagăre; 5 - corpul turbinei; 6 - paletele turbinei; 7, 8 - mecanism melc-roată melcată; 9 - cuplaj magnetic; 10 - reductor cu roți dințate; 11 - indicator mecanic local; 12 - membrană de separație (nemagnetică); 13 - material feromagnetic inserat în paletele turbinei; 14 - magnet permanent; 15 - bobină cu miez feromagnetic; 16 - circuit electronic de prelucrare; 17 - zonă de separație nemagnetică

Traductoare de debit cu turbină

Turbina propriu-zisă are un număr z de palete ($z = 3 \dots 24$ funcție de fluidul de lucru și diametrul conductei), iar transmisia rotației corpului turbinei se poate face prin intermediul unui angrenaj mecanic, respectiv cu ajutorul unui cuplaj magnetic (fig.f).

Aplicația majoritară a acestor elemente este în contorizarea debitului de fluid - volumetric sau masic - ceea ce atrage după sine anumite forme constructive și/sau blocuri suplimentare de corecție.

O variantă frecvent întâlnită în aplicațiile “domestice” este contorul de debit volumetric pur mecanic - fig.f,a - la care transmisia vitezei de rotație a turbinei se face printr-un angrenaj melc- roată melcată și un cuplaj magnetic către un reductor cu roți dințate, în final fiind acționat un numărător mecanic, care indică volumul de fluid [m^3 , l]. Cele mai frecvente aplicații se întâlnesc la lichide (apă, produse petroliere).

Pentru a reduce pe cât posibil cuplul rezistent realizat de angrenajul mecanic se folosește transmisia electromagnetică a vitezei de rotație - fig.f,b - întâlnindu-se ca variante următoarele:

- la diametre mici ale conductei paletele turbinei se realizează din material feromagnetic, astfel că impulsurile care apar în bobina 15 se bazează pe variația reluctanței magnetice;
- la diametre mari ale conductei, paletele turbinei se fac din material diamagnetic (plastic special), care au inserate pe exterior un material feromagnetic, principiul de preluare a impulsurilor fiind similar celui anterior expus;
- se pot utiliza magneți permanenți (de obicei numărul acestora este egal cu numărul paletelor turbinei) și un senzor de proximitate bazat pe efect Hall pentru preluarea impulsurilor.