

Instrumentație pentru măsurarea presiunii

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 H₂O, 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).

Instrumentație pentru măsurarea presiunii 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*
- *Burduful elastic (silfonul)*

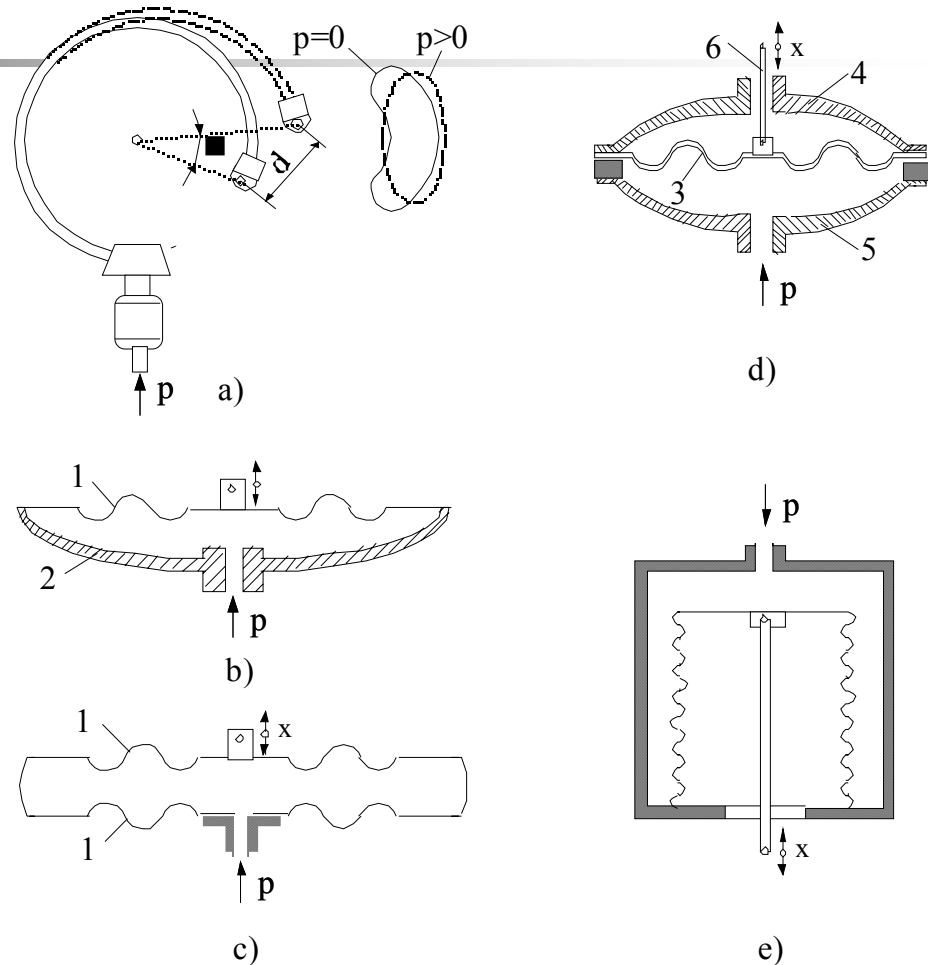


Fig.a. Tipuri de elemente sensibile elastice:

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

Instrumentație pentru măsurarea presiunii cu elemente elastice

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...

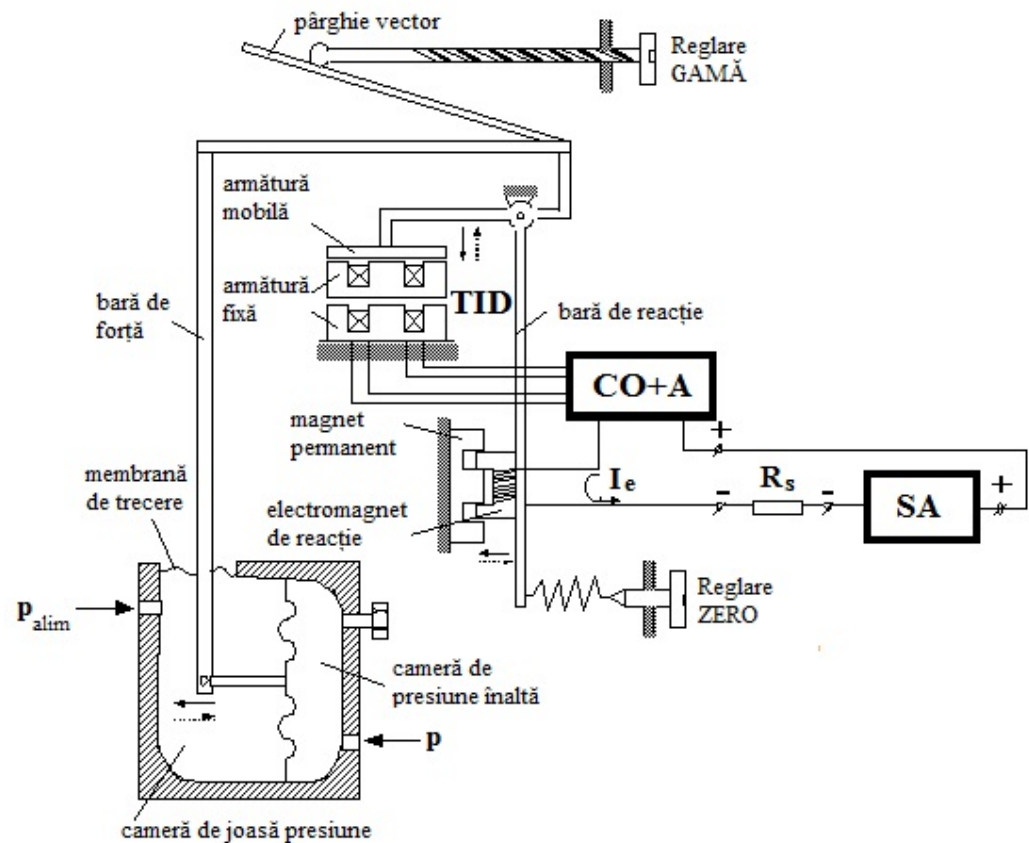


Fig.b. Schema funcțională a adaptorului presiune-curent bazat pe principiul balanței de forțe:
TID - traductor inductiv diferențial; CO+A - circuit oscilator + amplificator; SA - sursă de alimentare; R_s - rezistență de sarcină



Instrumentație pentru măsurarea presiunii cu elemente elastice

Forța dezvoltată de membrana elastică, sub acțiunea presiunii fluidului aplicat în camera de înaltă presiune, este preluată de bara de forță și aplicată, prin intermediul unui amplificator cu pârghii armăturii mobile a traductorului inductiv diferențial TID; înfășurările traductorului, conectate într-o schemă de oscilator Colpits, au ca efect creșterea consumului blocului amplificator (CO+A), deci I_e crește. Prin armătura mobilă a electromagnetului de reacție, trecând un curent mai mare, se realizează o forță de respingere mai mare, care are ca efect deplasarea barei de reacție spre dreapta, urmată de apropierea armăturii mobile de cea fixă a TID. Drept consecință, bara de forță revine într-o poziție aproape identică cu cea inițială, astfel că membrana elastică este “obligată” să revină într-o stare puțin diferită de cea inițială.

Concret, dacă capsula elastică ar avea capătul de preluare al deplasării liber, acesta s-ar deplasa, la aplicarea unei presiuni între 0 și p_n , cu 1..2 mm, pe când prin această reacție de forță, realizată prin intermediul barei de forțe, la aceeași variație a presiunii, deplasarea este de maximum 50 μm , așadar într-un domeniu în care cu certitudine liniaritatea este asigurată, iar histerezisul mecanic este neglijabil.

Șurubul de reglare ZERO asigură, la presiune 0, curentul de 4 mA prin circuitul de ieșire, iar din reglare GAMA, la presiune p_n , se asigură capătul superior, adică 20 mA.



Instrumentație pentru măsurarea presiunii 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.

Instrumentație pentru măsurarea presiunii 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.c.

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 histerezis 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 bar.⁶

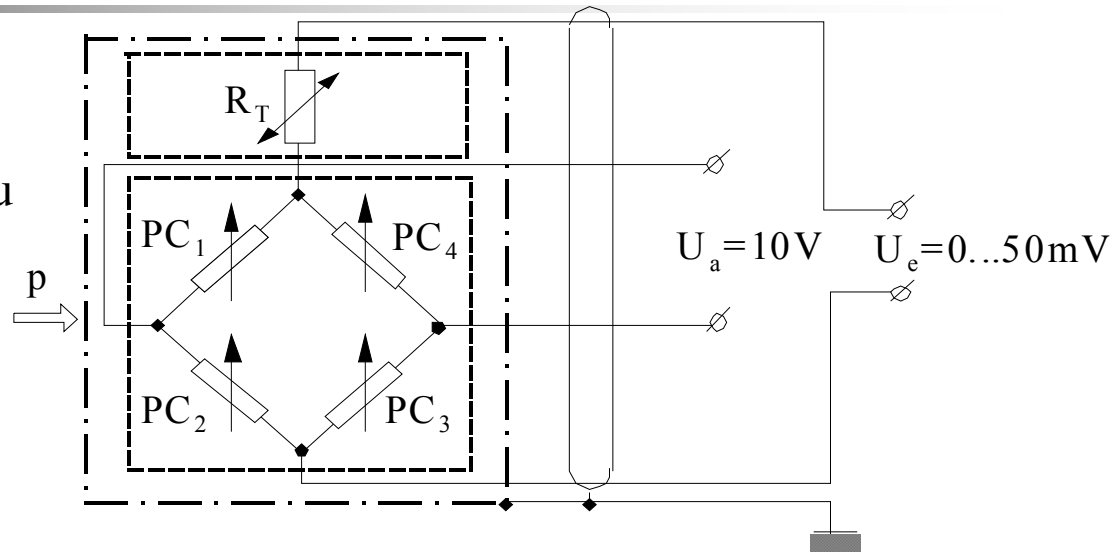


Fig.c. Schema de principiu a elementului sensibil piezorezistiv:
 PC_1, \dots, PC_4 - piezocristale de siliciu; R_T - termistor de compensare

Instrumentație pentru măsurarea debitului

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: $Q_m = Av_s \rho_s$ 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: $Q_v = Av_s$

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

Instrumentație pentru măsurarea debitului cu ultrasunete

Principiul de funcționare: a acestei categorii de instrumentație 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

Instrumentație pentru măsurarea debitului 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.d.

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; diagrama de semnale aferentă schemei poate fi urmărită în Fig.f.

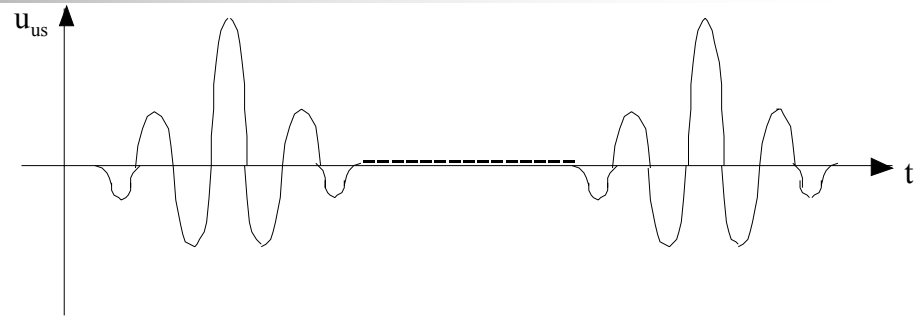


Fig.d. Forma tipică a pulsului ultrasonic emis de un piezocristal

Instrumentație pentru măsurarea debitului cu ultrasunete

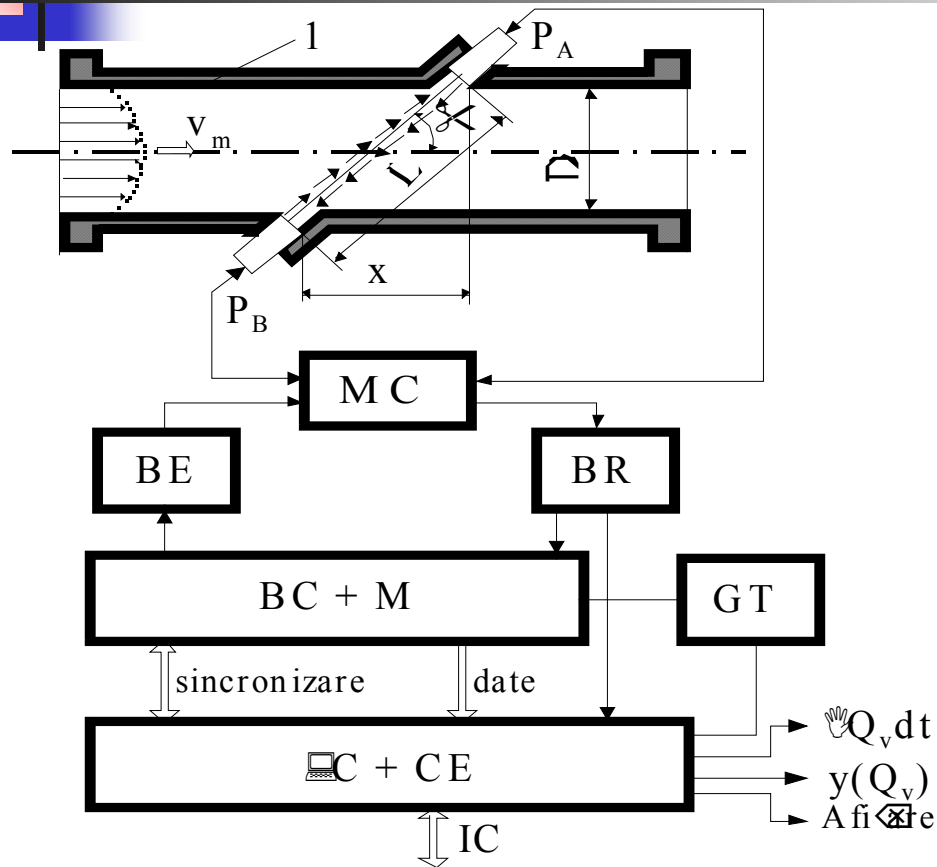


Fig.e. Schema de principiu a măsurării debitului cu ultrasunete:

1- conductă; P_A , P_B - piezocristale; MC - modul comutator; BE - bloc emițător; BR - bloc receptor; BC+M - bloc de comenzi + măsurare; GT - generator de impulsuri de tact; $\mu C+CE$ - microcontroler + convertor de ieșire; IC - interfață de comunicație

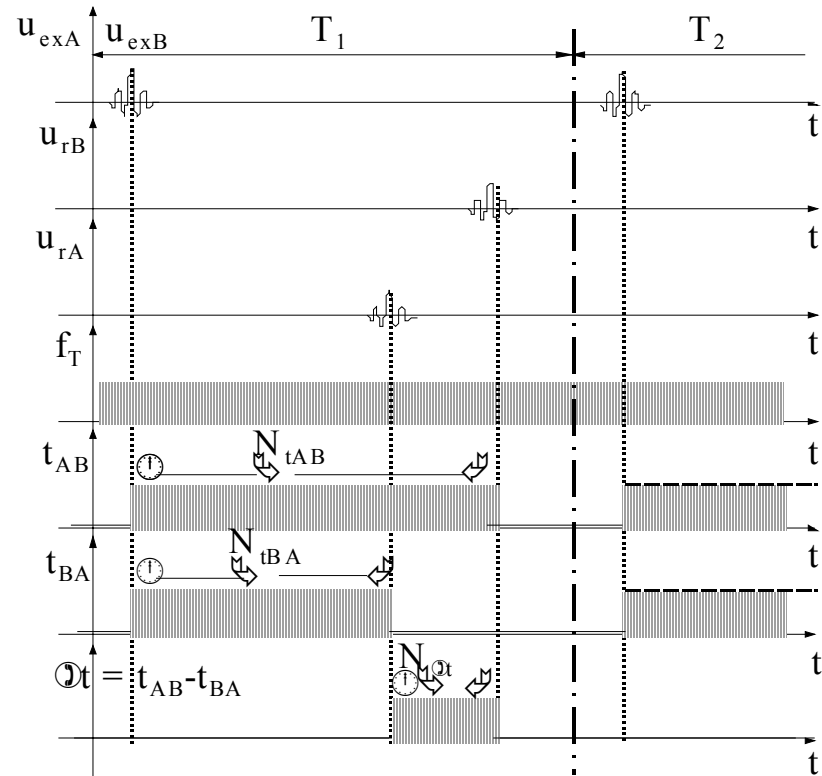


Fig.f. Diagrama de semnale pentru schema principală din fig.e.

Instrumentație pentru măsurarea debitului cu ultrasunete

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

$$\begin{aligned}
 t_{AB} &= \frac{L}{C - v_m \cos \alpha} & C - v_m \cos \alpha &= \frac{L}{t_{AB}} \\
 t_{BA} &= \frac{L}{C + v_m \cos \alpha} & C + v_m \cos \alpha &= \frac{L}{t_{BA}}
 \end{aligned}
 \rightarrow
 \begin{aligned}
 & & & \rightarrow v_m = \frac{L}{2 \cos \alpha} \left(\frac{1}{t_{BA}} - \frac{1}{t_{AB}} \right)
 \end{aligned}$$

Cum $\cos \alpha = x/L$ și $Q_v = (\pi/4)D^2 v_m$ 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 blocul receptor BR se face - într-o primă etapă - în blocul de comenzi și măsurare BC+M, care conține două numărătoare unde se obțin:

$$N_{t_{AB}} = \frac{t_{AB}}{t_T} = f_T \cdot t_{AB} \quad N_{t_{BA}} = \frac{t_{BA}}{t_T} = f_T \cdot t_{BA}$$

Instrumentație pentru măsurarea debitului cu ultrasunete

Valorile anterioare sunt transferate structurii de calcul cu μC , unde se află implementată relația de calcul sub forma:

$$Q_v = \frac{\pi}{4} D^2 \frac{L^2}{2x} \frac{f_T (t_{AB} - t_{BA}) f_T}{f_T \cdot t_{AB} \cdot f_T \cdot t_{BA}} = \frac{\pi}{4} D^2 \frac{L^2}{2x} f_T \frac{N_{t_{AB}} - N_{t_{BA}}}{N_{t_{AB}} \cdot N_{t_{BA}}}.$$

Dacă ambele semnale recepționate de BR sunt - după compararea cu amprenta din μC - recunoscute ca valabile, atunci valoarea debitului calculată conform relației ... este memorată într-o locație temporară de RAM. Funcție de diametrul conductei, într-o secundă sunt emise / recepționate 20...60 pulsuri ultrasonice, astfel că debitul Q_v [m^3/s] se obține ca media aritmetică a valorilor intermediare pentru toate măsurările valabile obținute în intervalul de o secundă.

Cum se observă, în relația finală 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.e, montate în raport cu centrul conductei, trebuie introdusă o corecție datorată vitezei medii v_m , adică:

Instrumentație pentru măsurarea debitului cu ultrasunete

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

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.g - debitul volumetric rezultând ca media debitelor calculate de cele patru configurații.

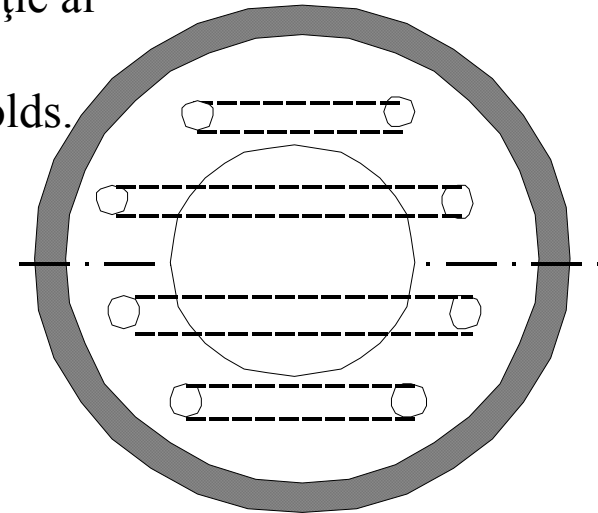


Fig.g. Amplasarea senzorilor pentru eliminarea factorului de corecție K al profilului vitezei de curgere v_m

Observația 1.

Relațiile ... pot conduce la determinarea vitezei de propagare C sub forma:

$$C = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_{AB}} + \frac{1}{t_{BA}} \right) = \frac{L}{2} f_T \frac{N_{t_{AB}} + N_{t_{BA}}}{N_{t_{AB}} N_{t_{BA}}}$$

și, deoarece viteza ultrasunetelor este dependentă de densitatea mediului de lucru → se poate folosi în acele aplicații care presupun determinarea debitului masic. De exemplu, în măsurarea puterii calorice a gazului și în determinarea vaporilor de apă din gazele naturale.¹³

Instrumentație pentru măsurarea debitului cu ultrasunete

Observația 2.

La conducte de diametre relativ mici se utilizează variante de traductoare ultrasonice cu sondele piezoceramice montate pe aceeași parte a conductei și reflexia undelor ultrasonice (Fig.h). Sondele piezoceramice sunt montate pe partea superioară a conductei, reflexia fiind asigurată de peretele opus locului de plasare a sondei. În acest fel se simplifică construcția traductorului și face ca acesta să fie mai puțin susceptibil la interferența cu depunerile din conductă și la turbioanele care apar în aceasta.

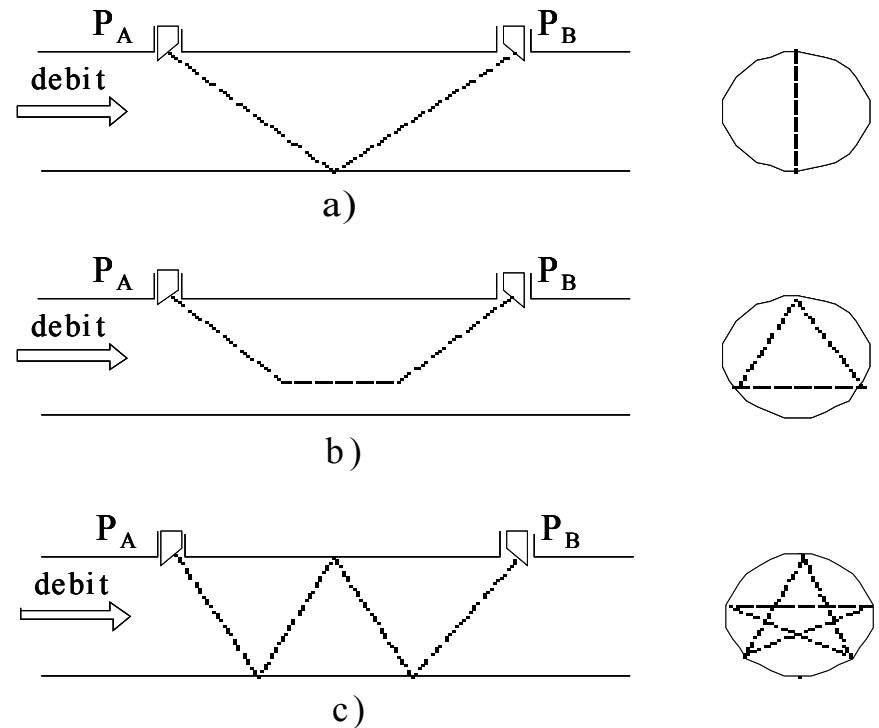


Fig.h. Variante de măsurări ultrasonice cu reflexia undelor ultrasonice:
a) - reflexie simplă; b) - reflexie triplă; c) reflexie cuadruplă

Variantele *a* și *b* din Fig.h sunt cele mai întâlnite în aplicațiile practice.

Instrumentație pentru măsurarea debitului 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.

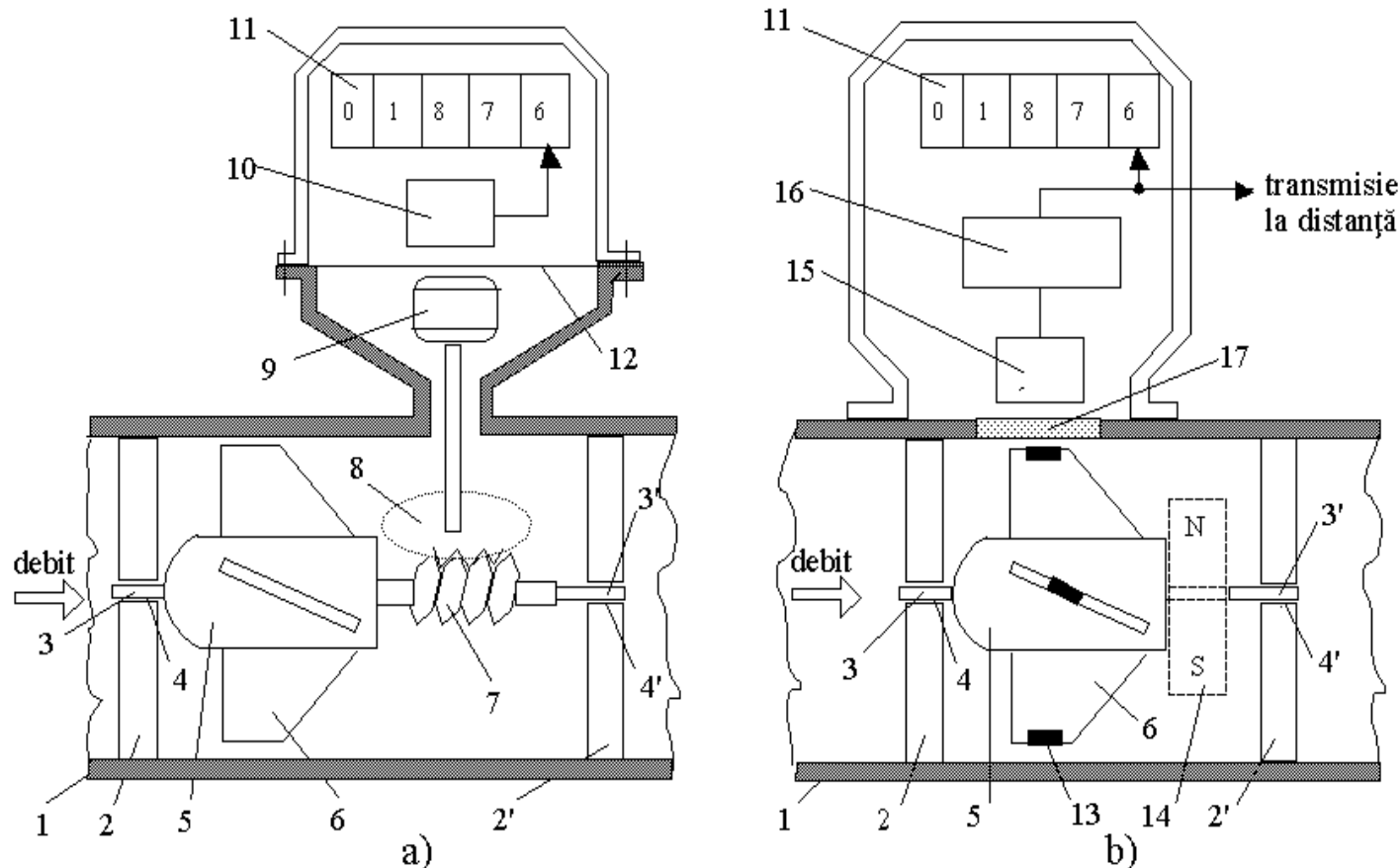


Fig.i. Schema de principiu a debitmetrelor cu turbină:

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

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



Instrumentație pentru măsurarea debitului 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.i).

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.i,*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.i,*b* - întâlnindu-se ca variante următoarele:

- la diametre mici ale conductei paletetele 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, paletetele turbinei se fac din material diamagnetic (plastic special), care au inserate pe exteriorun 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.