

## CAPITOLUL 9

### TRADUCTOARE DE PRESIUNE

#### 9.1 Introducere

Fluidele se caracterizează prin faptul că pot curge ușor (straturile lor alunecă ușor unele față de altele). Din categoria fluidelor fac parte lichidele și gazele. Deosebiriile dintre lichide și gaze sunt următoarele:

- lichidele au o suprafață liberă, care la echilibru este plană și orizontală, pe când gazele nu au această suprafață, ele ocupând tot volumul incintei în care sunt introduse;
- lichidele sunt incompresibile, pe când gazele sunt compresibile.

Legile generale ale fluidelor se studiază pentru fluidele perfecte. Un lichid perfect este acela la care straturile se pot deplasa unele față de celelalte, fără frecare (fără vâscozitate) și al cărui volum nu poate fi comprimat. Un gaz perfect este un gaz la care, pentru o anumită cantitate, produsul dintre presiunea și volumul său este constant (respectă legea Boyle-Mariotte). Metodele de măsurare a presiunii sunt adaptate fluidelor reale.

Considerând fluidele ca fiind medii continui, într-o masă oarecare de fluid, fiecare element de volum suportă acțiunea unor forțe din partea restului de fluid, care, în cazul fluidului perfect sunt perpendiculare pe fiecare suprafață a volumului unitar considerat.

O forță  $F$ , uniform repartizată pe o suprafață  $S$ , exercită o presiune  $p$  a cărei valoare este dată de relația:  $p = F / S$ .

Măsurătorile de presiune sunt legate de măsurătorile de forță, de aceea metodele de măsurare a forțelor pot fi aplicate și în domeniul presiunilor și invers.

Presiunea exercitată de învelișul gazos din jurul pământului se numește *presiune atmosferică (barometrică)*, ea variind cu altitudinea. Corpurile aflate pe pământ sunt supuse acestei presiuni atmosferice. S-a ajuns astfel la necesitatea stabilirii unei presiuni atmosferice de referință față de care să se determine starea fizică a unui corp. Această presiune stabilită convențional se numește *presiune normală*.

Presiunea normală tehnică este presiunea exercitată de o coloană de mercur de înălțime 735,56 mm.

La măsurătorile de presiune se întâlnesc trei situații:

- măsurarea presiunii în raport cu vidul absolut (considerat de presiune zero) dă *presiunea absolută*;

- măsurarea diferenței de presiune față de cea atmosferică dă *presiunea relativă* sau *efectivă* (multe presiuni măsurate cu manometre). După cum această diferență este pozitivă sau negativă, mai poartă numele de *suprapresiune* sau *depresiune*. Relația dintre presiunea efectivă și presiunea absolută este:

$$p_a \cong p_e + 1,01325 - \varepsilon \text{ [bar]},$$

în care  $p_a$  este presiunea absolută,  $p_e$  este presiunea efectivă iar  $\varepsilon$  este un factor de corecție egal cu diferența dintre presiunea atmosferică normală și cea atmosferică reală în momentul măsurării;

- măsurarea diferenței de presiune față de o valoare de referință convențională (aleasă de utilizator, în funcție de cerințele procesului tehnologic). În acest caz, rezultatul măsurării este *presiunea diferențială*.

La o suprafață plană care separă două mase de fluid în mișcare, presiunea care se exercită pe cele două mase de fluid în planul lor de separație este *presiunea statică*. Dacă în curentul de fluid se pune un obstacol, în punctul de oprire viteza fluidului se anulează și energia cinetică specifică a lichidului apare sub formă de presiune. Presiunea din punctul de oprire se numește *presiune totală*. Diferența dintre presiunea totală și cea statică este *presiunea dinamică*.

Unitatea de măsură a presiunii în Sistemul Internațional este newtonul pe metru pătrat [ $\text{N}/\text{m}^2$ ], denumită și pascal [Pa]. O unitate tolerată este kilogramul-forță pe metru pătrat, [ $\text{kgf}/\text{m}^2$ ].

Utilizarea dispozitivelor cu lichid pentru măsurarea presiunii a determinat adoptarea unor noi unități de măsură: milimetru coloană de apă [ $\text{mmH}_2\text{O}$ ] și milimetru coloană de mercur [ $\text{mmHg}$ ], denumit și torr. Unitățile coloană de lichid sunt definite pentru anumite condiții de temperatură, accelerație gravitațională și presiune atmosferică. Pascalul fiind mic, în practică se folosesc multiplii kPa și MPa. Un multiplu mult folosit este barul.

$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10197,3 \text{ mmH}_2\text{O} = 750,06 \text{ mmHg} = 0,9869 \text{ atm} = 1,0197 \text{ at} = 14,5 \text{ psi}$  (pounds per square inch). În relațiile anterioare s-au folosit notațiile: *at* = atmosfera tehnică, *atm* = atmosfera normală.

Domeniile de variație ale presiunii sunt:

- vacuum extrem,  $< 10^{-9}$  bar;
- vacuum tehnic,  $10^{-9} \dots 10^{-6}$  bar;
- vacuum,  $10^{-6} \dots 0,1$  bar;
- presiune mijlocie,  $10 \dots 100$  bar;
- suprapresiune tehnică,  $100 \dots 10^4$  bar și
- presiuni foarte înalte,  $> 10^4$  bar.

Senzorii de presiune convertesc presiunea fie într-o mărime intermediară, de natura unei deplasări sau deformații mecanice, fie direct într-o mărime electrică.

## 9.2 Traductoare de presiune cu senzori elastici

Aceste traductoare conțin elemente elastice care convertesc presiunea în deformația elastică a unor corpuri de formă specială. Senzorii utilizați sunt: tub simplu curbat, tubul spiral, membrana simplă sau dublă (capsula) și tip burduf.

**Membranele** sunt plăci elastice de grosime mică, de formă circulară, încastrate la extremitate pe un contur. Sub acțiunea presiunii aplicate pe o față, se produc deformații ușor măsurabile. Membranele pot măsura presiuni de la câțiva mmH<sub>2</sub>O până la sute de atmosfere. Se utilizează ca senzori separați sau împreună cu alte traductoare de presiune (piezoelectrice, magnetoelastice). După forma constructivă, membranele sunt plane, grofate și sferice.

**Tuburile ondulate** (sifoanele) sunt tuburi cilindrice cu gofraje transversale pe suprafața laterală. Profilul tubului este diferit, în funcție de modul în care este utilizat. Astfel, dacă solicitările sunt de întindere, profilul se execută cu un punct de inflexiune, iar pentru solicitări de compresiune se folosesc profiluri drepte.

**Tuburile Bourdon** au forma unui arc de cerc cu un unghi la centru de aproximativ 250°. Sunt simplu de executat și au o mare răspândire. Deoarece sensibilitatea lor este mică, se folosesc mecanisme de multiplicare a deplasării capătului liber. Tuburile Bourdon se folosesc la măsurarea presiunilor de la câțiva mmHg până la aproximativ 400 daN/cm<sup>2</sup>. Secțiunea tuburilor Bourdon poate fi ovală, eliptică, în forma literei D, etc.

**Adaptoarele** folosite pentru traductoare de presiune cu senzori elastici sunt:

- adaptorul deplasare unghiulară-tensiune electrică, care transformă variația unghiulară într-o tensiune alternativă modulată în amplitudine;
- adaptorul bazat pe principiul balanței de forțe, care convertește presiunea relativă în semnal electric unificat.

## 9.3 Traductoare de presiune cu lichid

Cele mai reprezentative traductoare din această categorie folosesc senzori tip clopot sau tor oscilant.

**Senzorii tip clopot** sunt folosiți la măsurarea presiunilor < 100 mmH<sub>2</sub>O, în fluide neutre sau corozive. În starea inițială, când presiunea de măsurat este egală cu presiunea atmosferică, clopotul este scufundat în lichid, la o anumită adâncime la care greutatea clopotului este echilibrată de greutatea volumului de lichid dezlocuit. Dacă sub clopot se introduce o presiune mai mare decât presiunea

atmosferică, pe suprafața interioară a clopotului va acționa o forță suplimentară ascensională care va ridica clopotul. Se obține o dependență liniară a deplasării clopotului sub acțiunea presiunii.

Senzorii tip tor oscilant, fig. 9.1, sunt folosiți la măsurarea unor presiuni sau diferențe de presiuni mici (mmH<sub>2</sub>O) deoarece au o mare sensibilitate.

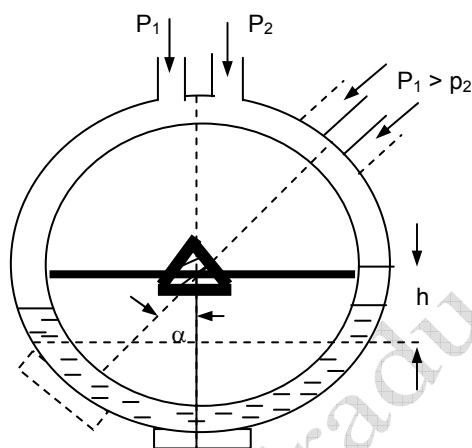


Fig. 9.1

Dacă presiunile pe cele două racorduri sunt egale, pârghia este orizontală iar sistemul este în echilibru în raport cu axul aparatului.

Dacă  $p_1 > p_2$  nivelul lichidului din jumătatea stângă a torului va coborî și va urca în jumătatea dreaptă.

Diferența de nivel este proporțională cu diferența  $p_1 - p_2$  și torul se rotește față de axa de simetrie verticală. Diferența de presiune este transformată într-un unghi, relația fiind neliniară.

#### 9.4 Traductoare de presiune cu elemente piezorezistive

Aceste traductoare permit realizarea în același ansamblu atât a senzorului cât și a dispozitivului de conversie intermediară.

Piezorezistivitatea este proprietatea unui corp de a-și varia rezistivitatea sub influența unei acțiuni mecanice, statice sau dinamice. Fenomenul este mai puternic la semiconductoare.

Expresia rezistivității unui semiconductor este:  $\rho = \frac{1}{en\mu}$ ,

unde  $e$  reprezintă sarcina electronului,  $n$  este numărul de purtători iar  $\mu$  este mobilitatea medie.

Aplicarea unei tensiuni mecanice modifică numărul de purtători și mobilitatea lor. La semiconductoare, aplicarea unor tensiuni mecanice crește mobilitatea purtătorilor pe o anumită direcție, față de direcția perpendiculară. Mobilitatea depinde de concentrația de purtători și de orientarea cristalografică în raport cu direcția de aplicare a solicitărilor. În funcție de planul cristalografic și de direcție, mobilitățile pot avea valori egale și semne opuse pe diverse direcții, permițând fabricarea unor dispozitive compensate la variațiile de temperatură.

Elementele piezorezistive sunt difuzate într-o diafragmă de monocristal de siliciu. După modul de obținere, senzorii piezorezistivi din Si sunt de două tipuri:

- prin depunerea în vid a unor pastile de siliciu pe un suport;
- prin difuzia siliciului.

Senzorii piezorezistivi sunt rar utilizați singuri sau în scheme sfert de punte, datorită dificultății de separare a variațiilor de rezistență datorită presiunii și variațiilor de temperatură. Cel mai mult se folosesc scheme de măsurare tip jumătate de punte sau punte completă. Amplasarea senzorilor piezorezistivi se face astfel încât variațiile de rezistență provocate de presiunea de măsurat să fie de semne contrare. Aceasta se obține dacă se realizează senzorii piezorezistivi pe o față și pe cealaltă a unei diafragme. Senzorii din punte trebuie astfel realizați încât variațiile de temperatură să nu dea semnal parazit.

Puntea de măsură se poate alimenta în trei moduri: în curent constant tensiune constantă sau curenți constanți în opoziție.

Compensarea variației gamei de lucru se face prin:

- montarea unor rezistențe în paralel, ce modifică panta caracteristicii inițiale;
- folosirea unor rețele termistor - rezistoare de liniarizare, care variază curentul de alimentare al punții.

Ca adaptor, se folosește convertorul rezistență - timp, bazat pe modularea în durată ale impulsurilor. Acesta are sensibilitate mare, liniaritate bună, preț mic și circuit numeric de diferențiere în frecvență, fig. 9.2.

Tensiunile de la ieșirile punții Wheatstone, notate:

$$V_A = \frac{V(1-x)}{2} \text{ și } V_B = \frac{V(1+x)}{2}$$

sunt cuplate la intrările a două modulate în durată ale impulsurilor (MDI), ale căror ieșiri sunt semnale numerice proporționale cu variațiile rezistenței ( $x$ ):

$$t_1 = \frac{Vk_1(1-x)}{2} \text{ și } t_2 = \frac{Vk_2(1+x)}{2}$$

unde  $k_1$  și  $k_2$  sunt variabile ce depind de câștigurile și constantele de timp RC ale celor două circuite.

Când  $k_1 = k_2 = k$ , funcția de transfer este liniară.

Când  $k_1 \neq k_2$ , în circuit există o eroare datorită diferenței dintre circuite. În acest caz, dacă nu se aplică presiune suprafeței de senzori, la ieșire se obține un tren de impulsuri cu lățime constantă, care poate fi folosit pentru calibrare.

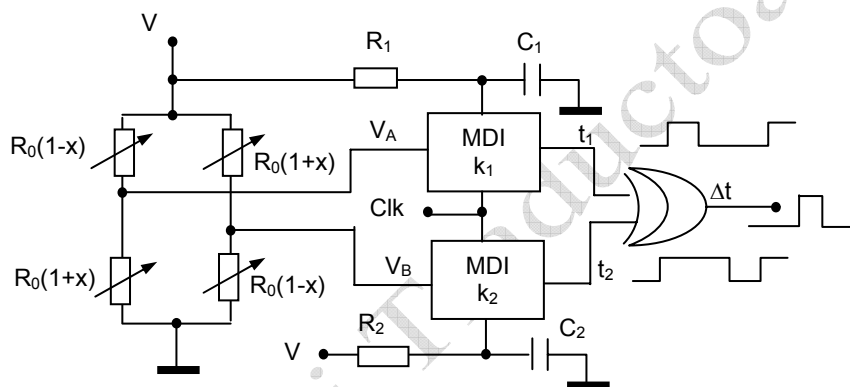


Fig. 9.2

### 9.5 Traductoare de presiune piezoelectrice

Senzorii piezoelectrice se folosesc la traductoare pentru presiuni foarte înalte, variabile în timp (500 ... 1000 Hz). Senzorii piezoelectrice au forma unui disc pretensionat, așezat între două discuri metalice, cu ajutorul a două arcuri laterale sau a unei membrane. La realizarea unui astfel de senzor, trebuie eliminate erorile de încovoiere date de centrări imperfecte și erorile parazite date de vibrații mecanice.

Folosind ca senzor piezoelectric un tranzistor MOSFET din GaAs, se poate introduce în aceeași structură convertorul sarcină - tensiune pentru temperaturi mari, fără necesitatea răcirii cu apă. Pe lângă efectul piezoelectric longitudinal, GaAs are și efect piezoelectric transversal, ceea ce face semnalul piezoelectric independent de deformarea paralelă cu direcția de aplicare a presiunii, determinată

de variația cu temperatura. Cel mai simplu convertor sarcină - tensiune este un tranzistor cu efect de câmp în care sarcina electrică se folosește pentru a controla curentul de drenă.

## 9.6. Traductoare de presiune speciale

### Traductoare de vacuum

În domeniul presiunilor foarte mici ( $< 0,1$  torr) construcțiile obișnuite cu senzori elastici nu dau rezultate. Forțele produse de presiunea de măsurat sunt atât de mici, încât trebuie să se recurgă la metode indirecte de măsurare, bazate pe dependența de presiune a unuia din parametrii fizici ai gazului. Cele mai multe din aceste metode au însă dezavantajul că indicațiile depind de natura gazului, fiind nevoie de o etalonare specială pentru fiecare caz.

Traductoarele de vacuum sunt de mai multe feluri:

- cu variația conductibilității termice,
- cu ionizare,
- cu ionizare în câmp magnetic,
- cu ionizare radioactivă, etc.

Domeniul de măsurare ajunge până la  $10^{-18}$  torr.

### Traductoare pentru presiuni foarte înalte

În domeniul presiunilor foarte înalte (zeci de mii de atmosfere) se folosesc traductoare ai căror senzori realizează o dublă conversie presiune - deformare - parametru electric, cu următoarele avantaje: măsurarea presiunii cu variații foarte mici de volum, sensibilitate ridicată, liniaritate bună, dimensiuni mici.

Se folosesc:

- elemente rezistive a căror rezistență variază cu presiunea (metale, aliaje sau materiale polimorfice);
- elemente inductive, la care modificările de presiune determină modificări de inductanță, datorită variației volumului miezului magnetic;
- celule electrolitice, a căror tensiune de ieșire scade la creșterea presiunii.

### Traductoare de presiune cu elemente elastice vibrante

Acestea funcționează după principiile traductoarelor cu coardă vibrantă pentru măsurarea forțelor. Există două variante:

- cu membrană vibrantă ( $p < 100$  at) și
- cu cilindru vibrant ( $p \approx 1...700$  at).

### Traductoare de presiune integrate

Au senzorul și adaptorul integrate într-un singur ansamblu. Avantajele acestor traductoare sunt: domenii de presiune mari, precizie sub 1%, sensibilitate sub 0,5%, eroare de neliniaritate < 0,1 %, alimentare cu tensiune continuă 24...30 V, bandă largă de frecvențe 0 Hz ... 50kHz, imunitate la șocuri și vibrații mecanice, dimensiuni reduse, instalare și exploatare simplă, cuplare ușoară cu alte sisteme de măsurare.

Schema bloc a unui astfel de traductor cuprinde regulatorul de tensiune, senzorul de presiune, amplificatorul, senzorul de temperatură, circuitul de compensare a temperaturii și amplificatorul final. Senzorul este de tip piezorezistiv, din cristal de siliciu montat pe un suport atenuator de șocuri.

Pentru măsurarea presiunii fluidelor corozive se folosesc fluide tampon pentru cuplare cu senzorul.

## 9.7 Traductoare de presiune cu fibre optice

### 9.7.1 Traductor de presiune mare cu senzor de deplasare

Schema bloc a traductorului de presiune cu senzor de deplasare cu fibre optice este dată în fig. 9.3.

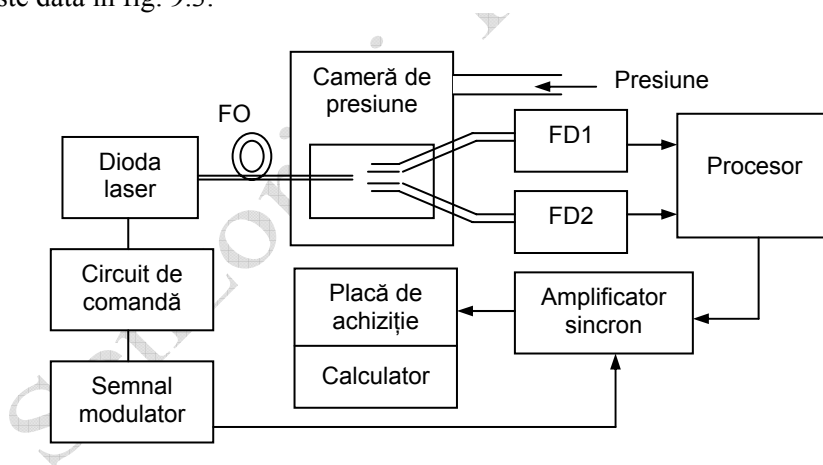


Fig. 9.3

Senzorul de deplasare cu FO este cu variația intensității radiației optice și are trei FO multimod, o fibră optică fixă de intrare și două fibre optice de ieșire, într-o



consolă elastică, ce se deplasează sub acțiunea presiunii. Fibrele optice de ieșire au capetele lipite între ele și deplasabile în fața capătului fibrei optice de intrare.

Intensitățile radiației optice de ieșire din cele două fibre,  $I_1$  și  $I_2$  sunt detectate cu ajutorul a două fotodiode  $FD_1$  și  $FD_2$ , conectate într-o schemă diferențială. Diferența  $I_1 - I_2$  este o măsură a deplasării relative a capetelor fibrelor optice.

### 9.7.2 Traductor interferometric de presiune cu FO cu lumină albă

Traductorul se bazează pe fibră optică cu birefrință mare și folosește avantajele scanării electronice cu cameră video, așa cum se arată în fig. 9.4.

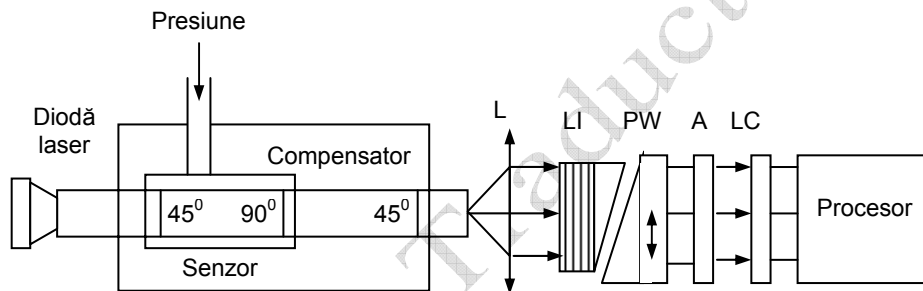


Fig. 9.4

Ca sursă de radiație optică se folosește o diodă laser DL, comandată în curent mic pentru a avea funcționare de bandă largă. Dioda laser este cuplată cu fibră optică cu menținerea polarizării. Senzorul este realizat cu FO și este compensat cu temperatura. Fibrele optice de legătură, de intrare și ieșire, sunt montate cap la cap și au axele de polarizare rotite la  $45^\circ$ . Radiația optică de ieșire este colimată de lentila L și trece prin linia de întârziere în trepte LI și o prismă Wollaston PW (ambele realizate din cuarț cristalin), analizorul de polarizare A și lentila cilindrică LC. Axele de polarizare de la ieșirea din FO de legătură de ieșire sunt aliniate la  $45^\circ$  față de axele de polarizare ale liniei de întârziere în trepte, compusă din două plăci de întârziere de cuarț, pentru creșterea gamei interferometrului receptor.

Presiunea hidrostatică mărește diferența constantelor de propagare ca și dispersia modului de polarizare a fibrei optice cu birefrință mare. Creșterea presiunii  $\Delta p$  are ca efect o deplasare transversală  $\Delta y$  a formei de interferență cu lumină albă, înregistrată de camera video:

$$\Delta y = K \cdot L_0 \frac{\partial \tau}{\partial p} \Delta p$$

unde  $\tau$  este dispersia de polarizare a fibrei optice cu birefringență mare,  $L_0$  este lungimea fibrei optice senzor și  $K$  este coeficientul de proporționalitate dat de geometria interferometrului receptor.

Procesarea semnalului digitizat de camera video stabilește poziția centrului formei de interferență cu lumină albă, față de axele de simetrie ale funcției de coerență. Metoda determină axele de simetrie ale formei de interferență cu lumină albă cu acuratețe mai mare decât o franjă de interferență. Pentru a mări gama de funcționare, schema folosește linia de întârziere în trepte (două plăci de cuarț cu grosimea aproximativ 4 mm).

### 9.7.3 Traductor fotoelastic de presiune cu FO cu birefringență mică

Dacă o fibră optică unimod fără înveliș exterior este presată între plăci paralele. În regiunea miezului se induce birefringență datorită distribuției transversale asimetrice a efortului.

Presiunea se determină prin măsurarea schimbării polarizării radiației propagate prin fibra optică. Birefringența indusă în miez permite realizarea configurațiilor de senzor cu suprafețe de măsurare mari. Datorită secțiunii transversale mici a FO, apar eforturi mari în regiunea miezului FO, obținându-se astfel sensibilitate mare.

Sursa de radiație optică folosită este monocromatică, polarizată liniar, aliniată la  $45^\circ$  față de direcția presiunii, rezultând astfel două moduri de polarizare cu intensități egale (paralel și perpendicular pe direcția forței). La capătul de ieșire al FO, după elementele de polarizare sunt plasate două fotodetectoare care produc semnale electrice defazate la  $90^\circ$  și cu variație sinusoidală. Al treilea fotodetector are rolul de monitorizare a intensității radiației optice de ieșire.

Configurația poate fi privită ca un interferometru diferențial, în care cele două fascicule optice se propagă prin aceeași FO, dar cu polarizări perpendiculare. Schimbarea birefringenței FO datorită presiunii se măsoară prin determinarea interferenței între cele două moduri de polarizare. Pentru aceasta, se plasează în fața celor două fotodetectoare un polarizor, aliniat la  $45^\circ$  față de direcția presiunii. Defazajul de  $90^\circ$  se obține introducând o placă sfert de undă, aliniată cu axa rapidă paralel sau perpendicular cu direcția presiunii, plasată între capătul FO și polarizor, în fața unui fotodetector.

Cele două semnale defazate la  $90^\circ$  și semnalul referință de intensitate sunt transmise la un sistem de măsurare a fazei cu microcontroler, care numără

perioadele și interpolează faza. Comparativ cu tehnicile analogice, acest sistem de măsurare are avantajul ajustării electronice, optice și mecanice prin parametrii numerici din programul software.

Acuratețea sistemului depinde de rezoluția convertorului analog-numeric ales. Gama dinamică a sistemului este limitată doar de capacitatea numărătorului electronic. Deoarece răspunsul fibrei optice la presiune este instantaneu, lățimea de bandă de măsurare a sistemului este limitată. În de timpul de eșantionare și procesare a datelor.

Birefringența sau diferența constantelor de propagare între cele două moduri de polarizare ale FO rezultă din suprapunerea a două efecte, birefringența indusă de forța laterală de compresie și birefringența indusă de îndoire. Dacă FO este elastică și omogenă mecanic, presiunea aplicată se determină prin măsurarea diferenței de fază între cele două moduri de polarizare. Sensibilitatea traductorului depinde de diametrul exterior al fibrei optice, de aceea, variațiile diametrului exterior de-a lungul fibrei determină fluctuații ale sensibilității.

#### 9.7.4 Traductor de presiune cu rețea de difracție în fibra optică

Schema unui asemenea traductor de presiune, cu rețea de difracție în fibra optică, este dată în fig. 9.5.

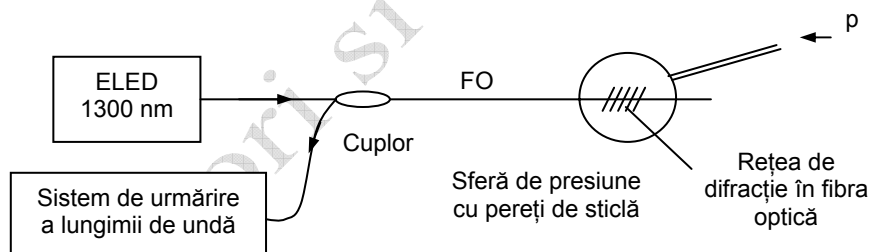


Fig. 9.5

Traductoarele cu rețele de difracție în FO sunt avantajoase doar dacă se compensează efectele variației cu temperatura. Metodele de compensare sunt:

- folosirea altei rețele de difracție într-un material diferit,
- măsurarea simultană a efortului și temperaturii cu două rețele de difracție suprapuse,
- poziționarea rețelei de difracție pe suprafață și

- realizarea rețelei de difracție independentă de temperatură cu o rețea de difracție cu formă specială în fibră optică plată.

Pentru creșterea sensibilității, fibra cu rețea de difracție se introduce într-o mică sferă cu pereți subțiri de sticlă. Când sfera este presurizată, variația diametrului sferei este funcție de grosimea peretelui de sticlă al sferei. Dacă FO este lipită bine de sfera de sticlă, efortul indus de presiune în sfera goală este egal cu variația relativă a diametrului sferei.

Senzori si Traductoare