

## Traductoare tensorezistive

### 1. Considerații generale

Traductoarele pentru forțe și momente sunt utile în primul rând pentru supravegherea structurilor cinematice supuse la regimuri variabile de încărcare (de exemplu, mașini-unelte, roboți, linii transportoare, etc.); în aceste situații, forța apare ca vector, determinarea direcției, în care acționează aceasta fiind esențială. Un caz particular în care interesează doar valoarea absolută a forței, iar direcția este necesară îl constituie operația de cântărire automată, de determinare a greutății unei mase. În toate aceste cazuri forța poate fi determinată și prin accelerația pe care o imprimă structurii cinematice:

$$F = k \cdot m \cdot a \quad (1)$$

unde  $F$  este forța ce acționează asupra masei  $m$ ,  $a$  este accelerația, iar  $k$  un coeficient care depinde de unități. În SI pentru  $[m] = 1 \text{ kg}$  și  $[a] = 1 \text{ m/s}^2$ ,  $k = 1$  și  $[F] = 1 \text{ N}$ .

*Momentul*  $M$  este produsul dintre forța și distanța dintre direcția forței și axa (centrul) de rotație (brațul fortei):

$$M = F \cdot l \quad \text{sau} \quad M = J \cdot a_u = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2)$$

unde  $l$  este brațul forței,  $J$  - momentul de inerție,  $a_u$  - accelerația unghiulară. Momentul poate fi de încovoiere, de torsiune sau de forfecare. În procesele industriale cel mai frecvent se măsoară *momentul de torsiune*, numit și *cuplu*, motiv pentru care în lucrare se vor face referiri în special la traductoarele de cuplu. În SI unitatea de măsură pentru moment este  $[N \cdot m]$ .

În strânsă legătură cu măsurarea forțelor de întindere sau compresie este măsurarea *alungirii relative* (apreciată prin *efortul unitar*), care reprezintă deformația produsă de forță ce acționează pe unitatea de suprafață într-un solid:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

unde  $\varepsilon$  este deformația;  $\sigma$  - efortul unitar,  $E$  - modulul de elasticitate. Uzual  $\varepsilon$  se exprimă în  $[\text{mm/m}]$  sau în  $[\mu\text{m/m}]$ .

Efectului tensorezistiv constă în modificarea rezistenței unui conductor atunci când acesta este supus la un efort care îi provoacă alungirea sau compresia. Pus în evidență încă din 1856, de lord Kelvin, efectul tensorezistiv a devenit utilizabil în tehnică după aproximativ 75 de ani, odată cu apariția primei mărci tensometrice. De atunci, elementele sensibile cu mărci tensometrice au cunoscut o rapidă dezvoltare, atât datorită simplității constructive, cât mai ales

datorită simplității relative a circuitelor de conversie a variației de rezistență în semnal util (adaptoarele sunt uzual punți de tip Wheatstone).

## 2. Traductoare de tip tensorezistiv

### 2.1. Principiul de funcționare al elementelor sensibile tensorezistive

Considerând un conductor uniform de secțiune  $A$ , lungime  $l$  și rezistivitate  $\rho$ , variația rezistenței sale datorită variației dimensiunilor produse de alungirea  $\Delta l$ , va fi :

$$\Delta R = \frac{\rho}{A} \Delta l - \rho \frac{l}{A^2} \Delta A + \frac{l}{A} \Delta \rho$$

sau prin împărțirea la  $R$ , variația relativă va fi:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4)$$

Întru-cât variația relativă de arie se poate exprima sub forma:

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\mu \frac{\Delta l}{l} \quad (5)$$

unde  $\mu$  este coeficientul lui Poisson (raportul dintre contracția transversală și alungire) și admițând pentru rezistivitate o variație liniară cu volumul  $V$ , de forma:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = k \frac{\Delta V}{V} = k \frac{\Delta l A + l \Delta A}{V} = k(1 - 2\mu) \frac{\Delta l}{l} \quad (6)$$

resultă în final expresia:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} [1 - 2\mu + k(1 - 2\mu)] = K \frac{\Delta l}{l} = K \varepsilon \quad (7)$$

Deoarece în practică elementele tensorezistive se întâlnesc sub denumirea unanim acceptată de *marcă tensometrică*, coeficientul  $K$  din relația (7) poartă numele de *factor de marcă*. El depinde de natura materialului (coeficientul  $k$ , din relația (6) și de tehnologia de realizare a mărcii și reprezintă sensibilitatea acestui senzor (variația relativă de rezistență raportată la alungirea relativă).

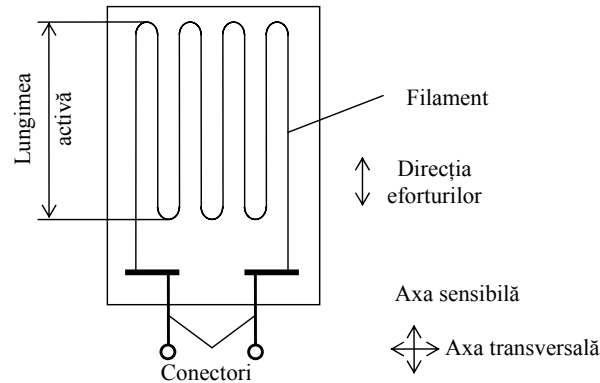
### 2.2. Caracteristicile mărcilor tensometrice

Principalele caracteristici ale mărcilor tensometrice sunt determinate de natura materialului din care se realizează. Din acest punct de vedere ele se grupează în patru categorii.

**a) Mărci tensometrice cu conductor metalic.** Mărcile tensometrice de acest tip pot fi: cu capete libere, aderente prin lipire, transferabile pe suprafață și sudabile.

*Marca cu capete libere* (nelipită) constă dintr-o sârmă întinsă între două suporturi; se utilizează în prezent doar la doze tensometrice destinate operațiilor de cântărire, pentru alte aplicații nu oferă precizia necesară datorită dificultăților de amplasare și sensibilității reduse.

*Marca aderentă prin lipire* (uzual denumită marcă lipită) se fixează pe suprafața piesei supuse la efort cu un adeziv special. Cea mai utilizată configurație este cea din fig. 1 și constă dintr-un filament de sârmă subțire dispus în proporție de 95% pe o direcție și cimentat la bază. Lungimea configurației (exclusiv conexiunile) este lungimea activă a mărcii.



**Fig. 1.** Marcă tensometrică cu filament

Alegerea materialului pentru filament se bazează pe mai multe criterii :

- materialul trebuie să ofere un factor de marcă  $K$  cât mai mare și o bună liniaritate;
- coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura  $\alpha$  să fie cât mai mic pentru a minimiza erorile de temperatură;
- filamentul trebuie să aibă o rezistență mecanică ridicată, pentru a evita deformările plastice și pentru a suporta eforturi mari;
- materialul trebuie să genereze la joncțiunile filamentului cu conductorii un potențial termoelectric  $e_t$  cât mai mic posibil;
- coeficientul de dilatare trebuie să fie cât mai apropiat de cel al materialului din care este confecționată piesa ;
- limita de elasticitate să fie cât mai ridicată, iar histerezisul - pe cât posibil redus.

Factorul de marcă este practic același la alungire și la compresie, modificări mici ( $\leq 5\%$ ) putând să apară datorită adezivilor și modului de dispunere a filamentului pe suport.

Mai multe tipuri de materiale se utilizează drept suport (bază). Cel mai răspândit este suportul din hârtie de nitroceluloză, utilizabil la aplicații la care temperatura variază în domeniul  $-70^\circ \dots +70^\circ C$ , cu grosimi de  $\approx 40 \mu m$ . Pentru domenii de temperatură mai largi ( $-180 \div 120^\circ C$ ) este necesar suportul din rășină epoxidică. Celuloza impregnată cu bachelită ori cu fibră de sticlă poate suporta  $180^\circ C$ .

*Mărcile transferabile* se execută pe suporturi adezive, care se dispun pe suprafața supusă la efort fără alt liant (ciment). Materialul utilizat este de obicei plasticul (vinil), dar se

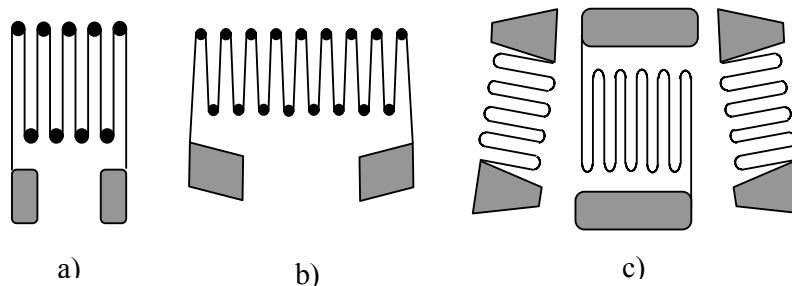
mai pot folosi: poliester, poliamida, azbest.

În sfârșit, *mărcile sudabile* se montează pe suporturi metalici (de dorit din același material ca suprafața pe care se fixează), având baza mai largă decât corpul principal pe care se dispune marca. Datorită dimensiunilor reduse, montarea lor implică tehnici speciale de microsudură, dar utilizarea lor este uneori absolut necesară în aplicații dificile (de exemplu, dispunerea pe pereții rezervoarelor de lichide criogenice).

**b) Mărci tensometrice din folii metalice.** Tehnologia de realizare este asemănătoare cu cea utilizată la elaborarea circuitelor imprimate. Principalul avantaj constă în utilizarea mai bună a suprafeței - mărcile din folie având dimensiuni mai reduse. Din acest motiv ele se utilizează frecvent sub forma de rozete. Mărcile din folie se utilizează în general la eforturi mai mari decât cele din conductor, având și o rezistență la distrugere superioară, în special în raport cu mărcile transferabile.

În fig. 2 se prezintă 3 configurații tipice de mărci din folii: a - de lățime normală (mai lungi pe axa sensibilă, pentru a reduce efectele efortului transversal); b - de lățime sporită, recomandabilă atunci când efortul transversal este neglijabil, deoarece disipă o putere mai mare decât configurația normală, ceea ce permite alimentarea la tensiuni mai mari; c - rozete cu 3 elemente în configurație V.

Rozetele se utilizează în situațiile în care direcțiile de aplicare ale efortului sunt necunoscute. Uzual se folosesc 3-4 elemente dispuse la  $60^\circ$  sau  $45^\circ$ , care permit determinarea direcțiilor și valorilor deformațiilor.



**Fig. 2.** Mărci tensometrice din folii: a – lățime normală; b – lățime sporită; c – rozetă.

**c) Mărci obținute din depuneri metalice.** Aceste mărci se realizează direct pe suprafața impusă măsurării, după ce aceasta a fost în prealabil acoperită cu un strat izolator. Marca se formează prin metode de evaporare sau de bombardare cu particule. Principala aplicație până în prezent a fost la diafragme pentru traductoare de presiune, dar există tendințe de utilizare și la traductoare de forță și cupluri. De dimensiuni sensibil reduse, ele oferă și avantajul că suportă temperaturi înalte ( $1200^\circ\text{C}$ ).

**d) Mărci tensometrice semiconductoare.** Începând din anii 1950, când s-au pus pentru prima oară în evidență efecte piezorezistive în semiconductoare, s-au dezvoltat și elemente tensometrice semiconductoare. Caracterizate printr-un factor de marcă net superior (50-200) față de cele metalice (maxim 6, uzual 2), mărcile semiconductoare au dezavantajul unei neliniarități mai pronunțate, al compensării mai dificile a erorilor de temperatură și chiar al unor probleme mai dificile legate de dispunerea pe suprafața de măsurat.

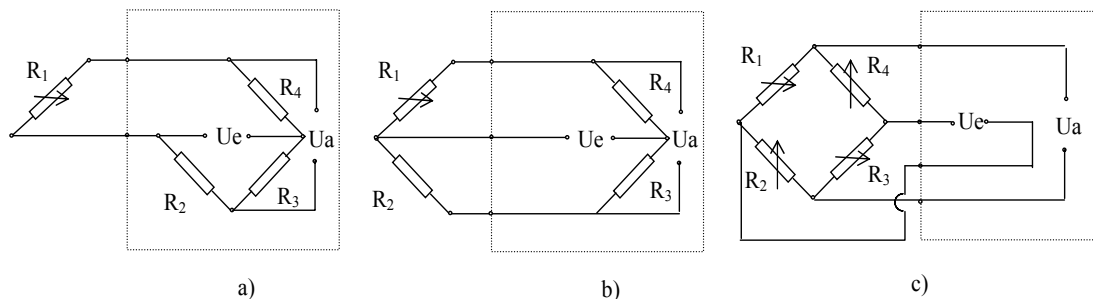
Pe de altă parte, coeficientul de variație a rezistivității cu temperatura este mult mai mare decât la mărcile metalice (de cca 60 ... 100 ori mai mare la constantan), variația factorului de marcă de 3 ... 5 ori mai mare, iar efectul termoelectric (coeficientul Seebeck) de 10 ... 20 ori mai mare. Faptul că există și mărci cu coeficient negativ de variație a rezistivității poate fi folosit la compensarea neliniarităților.

Materialul semiconductor cel mai folosit (aproape în exclusivitate) este siliciul, în care marca difuzată are lungimi de 0,02 ... 0,05 mm. Terminalele conductoare se realizează din aur, cupru, argint sau nichel.

### 2.3. Adaptoare pentru traductoarele tensorezistive

Variațiile relativ mici ale rezistenței mărcii tensometrice atunci când este supusă la deformații impun utilizarea unor adaptoare deosebit de sensibile. Adaptoarele constau din două blocuri distincte: o schemă de măsurare de tip punte Wheatstone, în care se conectează elementele sensibile (punte tensometrică) și un circuit de prelucrare (amplificare și apoi conversie în semnal util). Punțile sunt de două tipuri funcție de modul de lucru: c.c. sau c.a.

**Punți tensometrice.** Elementele sensibile tensometrice se pot conecta în punte conform schemelor prezentate în fig. 3.



**Fig. 3.** Tipuri de punți tensometrice: a - sfert de punte; b – semipunte; c - punte completă.

În fig. 3.a se reprezintă montajul în sfert de punte, puntea fiind alcătuită dintr-un senzor tensorezistiv exterior și trei rezistențe calibrate montate în adaptor. Schema din fig. 3.b reprezintă montajul în semipunte și este alcătuit din două elemente sensibile tensorezistive

exterioare și două rezistențe calibrate aflate în adaptor. Schema din fig. 3.c reprezintă montajul în punte completă, la care în toate brațele punții se află conectate elemente sensibile.

Aceste punți se alimentează cu o sursă de tensiune constantă  $U_a$  pe una din diagonale, iar pe cealaltă diagonală (diagonala de măsurare) se obține un semnal de ieșire  $U_e$  care, în cazul punților dezechilibrate, este folosit direct ca o măsură a variației rezistenței elementelor active ale punții. De obicei, puntea se echilibrează înaintea aplicării sollicitărilor mecanice și rămâne dezechilibrată după aplicarea acesteia.

Pentru exemplificare considerăm cazul punții complete din fig. 3.c:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (9)$$

Se constată că dacă puntea nu este sollicitată la efort și rezistențele sunt egale:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad (10)$$

rezultă  $U_e/U_a = 0$ , sau  $U_e = 0$ .

După aplicarea sollicitării puntea se dezechilibrează, iar raportul dintre tensiune de dezechilibru și cea de alimentare devine:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \quad (11)$$

unde  $\Delta R_i$ , cu  $i = 1, 2, 3, 4$ , reprezintă variația de rezistență a mărcii  $R_i$ , ca urmare a sollicitării la care este supusă aceasta.

Se constată astfel că în cazul general al punții cu patru brațe active, tensiunea de dezechilibru  $U_e$  nu variază liniar cu termenii  $\Delta R_i$  și deci nu este liniară cu eforturile care au produs respectivele variații. Dacă însă se consideră mărcile identice (condiția 10) și  $\Delta R_i \ll R_i$ , atunci se poate obține o relație liniară între  $U_e$  și  $U_a$ . Dacă se dezvoltă expresia (11) în serie Taylor și se rețin doar termenii de ordinul 1:

$$\frac{U_e^*}{U_a} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} \Delta R_1 - \frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2} \Delta R_2 + \frac{R_4}{(R_3 + R_4)^2} \Delta R_3 - \frac{R_3}{(R_3 + R_4)^2} \Delta R_4$$

și ținând seama de relația (10) obținem:

$$\frac{U_e^*}{U_a} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right) \quad (12)$$

Aplicând din nou condiția (10), relația (12) se poate scrie:

$$\frac{U_e^*}{U_a} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (13)$$

sau folosind legea de funcționare a mărcilor tensometrice dată de relația (7):

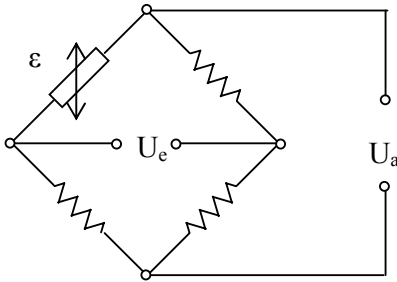


Fig. 4. Punte cu un singur braț activ

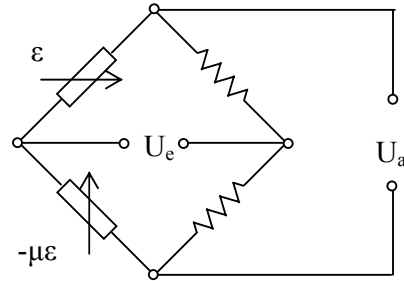


Fig. 5. Punte cu 2 brațe active, cu sesizare efectului Poisson

$$\frac{U_e^*}{U_a} = \frac{K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (14)$$

Relațiile (13) și (14) exprimă modelul matematic liniarizat al punții Wheatstone complete. Pentru a exprima eroarea care apare atunci când în loc de ecuația reală de ieșire (11) se folosește ecuația liniarizată (14), se definește eroarea relativă de liniarizare :

$$\varepsilon_{rel} = \frac{U_e/U_a - U_e^*/U_a}{U_e^*/U_a} * 100[\%] \quad (15)$$

Deci, datorită neliniarității punții, între deformația reală  $\varepsilon$  și deformația măsurată  $\hat{\varepsilon}$  există relația:

$$\varepsilon = \hat{\varepsilon} + n \quad (16)$$

unde  $n$  se numește *eroare incrementală*.

a) *Punte cu un singur braț activ* (fig.4). În această situație relația (11) devine:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (17)$$

și în condițiile stipulate prin (10) și cu relația (7) se obține:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{4 + 2\frac{\Delta R}{R}} = \frac{K \cdot \varepsilon}{4 + 2K \cdot \varepsilon} \cong K \cdot \varepsilon \quad (18)$$

b) *Punte cu două brațe active, cu o marcă tensometrică montată pentru a sesiza efectul Poisson* (fig. 5). Particularizând relația (11) se obține:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (19)$$

iar cu condiția (10):

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R}}{2\left(2 + \frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R}\right)} \quad (20)$$

Folosind relațiile:  $\frac{\Delta R_1}{R} = K\varepsilon_1 = K\varepsilon$  și  $\frac{\Delta R_2}{R} = K\varepsilon_2 = -\mu K\varepsilon$

se obține:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{K(1+\mu)\varepsilon}{2[2+K(1-\mu)\varepsilon]} \quad (21)$$

c) *Punte cu două brațe active, supuse unor eforturi de semne contrare și egale* (fig. 6).

În acest caz relațiile de calcul se obțin din cele deduse în cazul b, pentru  $\mu = 1$ . Rezultă:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{K}{2} \cdot \varepsilon; \quad \frac{\varepsilon}{\hat{\varepsilon}} = 1; \quad n = 0; \quad e_{rel} = 0$$

d) *Punte cu două brațe active supuse unor solicitări de același semn* (fig.7). Rezultă:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4} \quad (22)$$

iar cu condiția (10) obținem:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{1 + \frac{\Delta R_1}{R}}{2 + \frac{\Delta R_1}{R}} - \frac{1}{2 + \frac{\Delta R_3}{R}} \quad (23)$$

Deoarece:  $\frac{\Delta R_1}{R} = \frac{\Delta R_3}{R} = K\varepsilon$ , rezultă:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{K\varepsilon}{2 + \varepsilon K} \quad (24)$$

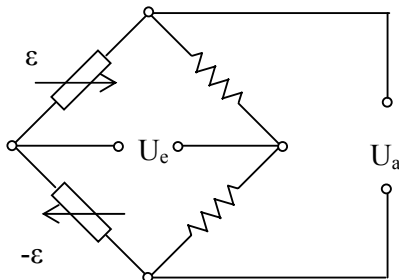


Fig. 6. Punte cu 2 brațe active supuse la eforturi contrare și egale.

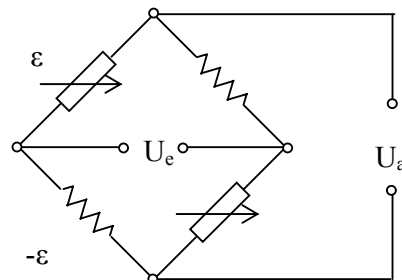


Fig. 7. Punte cu 2 brațe active supuse la solicitări de același semn.

e) *Punte cu patru brațe active, două aliniat în câmpul de efort maxim, două perpendiculare pe acestea* (fig. 8.a). Particularizând relația (11) cu condiția (10) și notând:



$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = K\varepsilon_1 = K\varepsilon ; \frac{\Delta R_2}{R_2} = K\varepsilon_2 = -\mu K\varepsilon ; \frac{\Delta R_3}{R_3} = K\varepsilon_3 = K\varepsilon ; \frac{\Delta R_4}{R_4} = K\varepsilon_4 = -\mu K\varepsilon$$

se obține:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{K\varepsilon(1+\mu)}{2+K\varepsilon(1-\mu)} \quad (25)$$

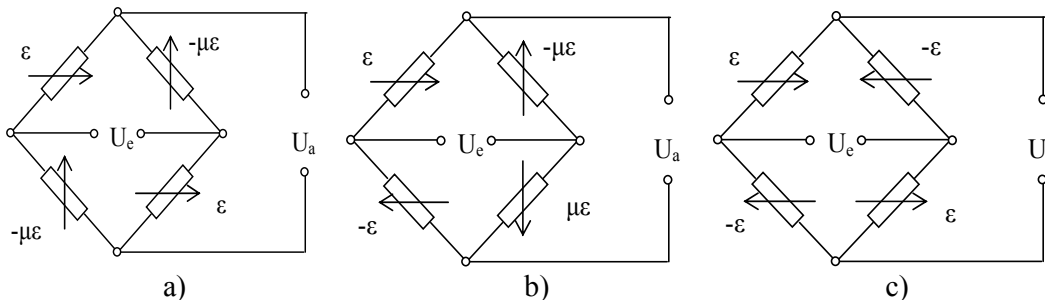
f) *Punte cu patru brațe active cu două mărci orientate după efortul maxim și două mărci pentru sesizarea efortului Poisson* (fig. 8.b).

Din particularitățile relațiilor (14) și (15) rezultă:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{K\varepsilon(1+\mu)}{2} ; \frac{\varepsilon}{\hat{\varepsilon}} = 1 ; e_{rel} = 0 ; n = 0$$

g) *Punte cu patru brațe egale supuse la eforturi egale și de sens contrar* (fig.8.c). Cu aceleași particularizări ca la cazul f) și considerând în plus  $\mu = 1$ , se obține:

$$\frac{U_e}{U_a} = \frac{K}{2} \cdot \varepsilon ; \frac{\varepsilon}{\hat{\varepsilon}} = 1 ; e_{rel} = 0 ; n = 0 \quad (26)$$



**Fig. 8.** Punte cu 4 brațe active: a) 2 în câmpul de efort și 2 perpendiculare, b) cu sesizarea efortului Poisson, c) supuse la eforturi contrare și egale.

**Circuite de prelucrare pentru adaptoarele cu punți tensometrice.** Semnalul util oferit de punte în diagonala de măsurare  $U_e [mV/V]$  pentru mărci cu factor de marcă  $k = 1, 5 \dots 3$  și rezistență 150... 300 depinde de forța aplicată  $F$  (respectiv de momentul  $M$ ) printr-o relație care la aranjamentele de mărci ce asigură dependență liniară este de forma:

$$U_e = K \cdot \varepsilon \cdot 10^{-3} \cdot U_a = K \cdot K_1 \cdot \frac{F}{(M)} \cdot U_a = K \cdot K' \cdot U_a \quad (27)$$

în care  $K' = 1 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-3}$  pentru forțe de ordinul kN.

De aceea, pentru tensiuni de alimentare de ordinul volților, tensiunea de ieșire ia valori de ordinul milivolților. Se impune evident utilizarea unor circuite finale care să permită amplificarea acestui semnal și să permită conversia în semnal unificat (de exemplu, tensiune în gama  $0 \div 10$  V sau curenți în gamele  $2 \div 10$  mA sau  $4 \div 20$  mA).

Soluțiile constructive pentru aceste circuite finale diferă după cum puntea este alimentată în curent continuu sau în curent alternativ.

a) *Adaptoare cu punți tensometrice alimentate în curent continuu.* Schema de principiu pentru adaptor este prezentată în fig. 9, în care pe lângă puntea tensometrică apar: amplificatorul de tensiune în c.c. ACC, convertorul tensiune/curent CTC, sursa de tensiune de referință STR. Convertorul tensiune-curent, care are rolul de a furniza un semnal de ieșire în curent unificat.

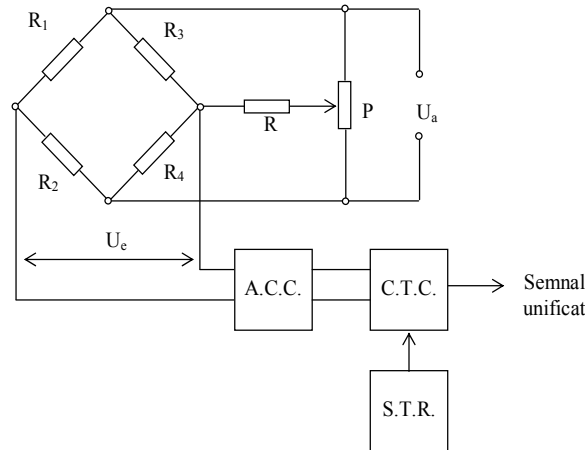


Fig. 9. Schema bloc a adaptorului pentru punți tensometrice alimentate în c.c.

b) *Adaptoare cu punți tensometrice alimentate în curent alternativ.* Avantajul acestor scheme constă în primul rând din asigurarea separării galvanice între tensiunea de ieșire și cea oferită de puntea tensometrică, dar și posibilitatea amplificării selective a semnalului sau detecția sincronă și asigurarea unui zgomot redus la ieșire.

Schema de principiu pentru un astfel de adaptor este prezentată în fig. 10, în care: GF - generator de tensiune sinusoidală de frecvență 2 ... 5 kHz; PT - puntea tensometrică; PA - preamplificator (selector de gamă); AF - amplificator final; DSF - demodulator sensibil la fază;

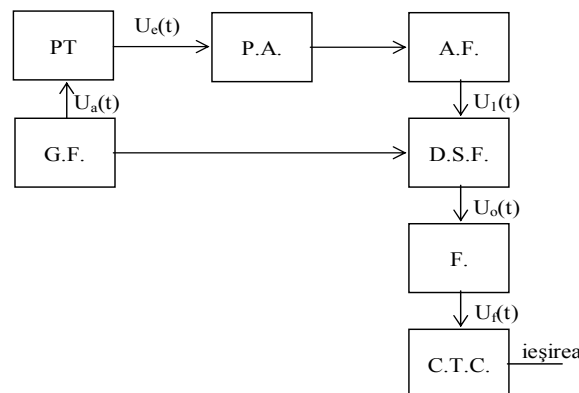


Fig. 10. Schema bloc a adaptorului pentru punți tensometrice cu alimentare în c.a.

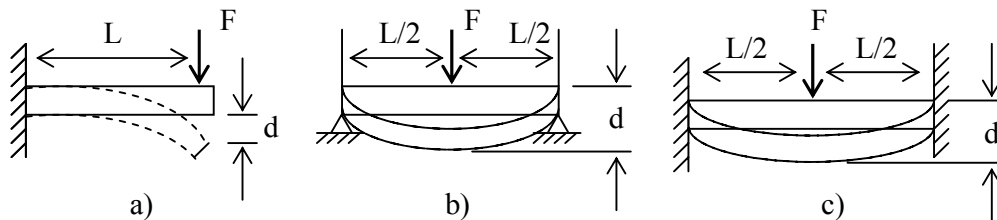
$F$  - filtru trece-jos;  $CTC$  - convertor tensiune/curent.

Elementul principal al schemei este demodulatorul sensibil la fază care asigură extragerea informației utile din semnal.

### 3. Utilizarea mărcilor tensometrice

Traductoarele de forță și momente cu mărci tensometrice utilizează deformarea elastică produsă la aplicarea efortului, valorificând două caracteristici ale acesteia: alungiri relative locale și deformări. Elementele mecanice pe care se aplică marca trebuie să aibă o anumită structură, care să permită orientarea efortului spre zona de sensibilitate maximă a mărcii, iar aceasta, bineînțeles, trebuie să fie aplicată în mod corespunzător.

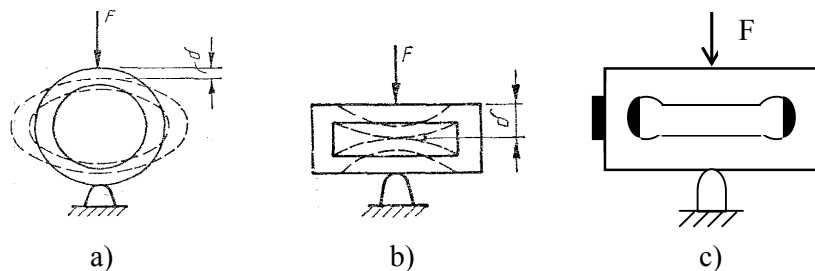
Cele mai simple elemente mecanice pentru captarea forțelor sunt barele, care pot fi montate în trei variante de bază (fig. 11).



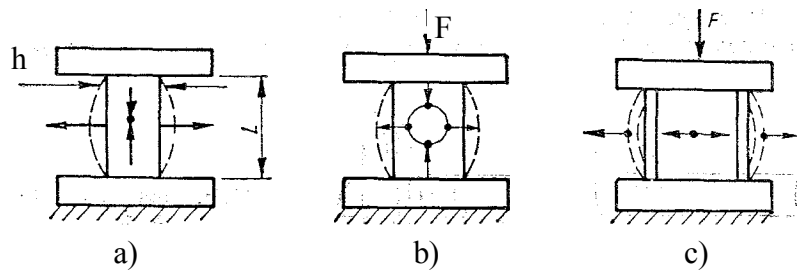
**Fig. 11.** Concentratoare de efort tip bară: a - încastrat la un capăt; b - sprijinit; c - dublu încastrat.

Se observă că pentru toate cele trei configurații, deflexia maximă are loc în punctul de aplicație al forței. Avantajul principal al barelor de secțiune constantă este acela că deformarea relativă este constantă pe toată lungimea. Diafragmele (discuri circulare) sunt utilizate și ele ca elemente de concentrare a forțelor, deoarece localizează întotdeauna deviația maximă în centru, asigurând și o bună stabilitate.

Inelele de probă se pot executa în variantele arătate în fig. 12. La inelele standard, deși deformarea maximă apare în punctul de aplicație a forței, se pot utiliza pentru amplasarea mărcilor și punctele aflate lateral la  $90^\circ$ , unde nivelul deformației este cam de același ordin.



**Fig. 12.** Concentratoare de efort tip inel: a - standard, b - plat, c - cu găuri.



**Fig. 13.** Concentratoare de efort tip coloană: a – standard, b – cu gaură, c – cilindru.

Coloanele (fig. 13) au punctul de deformație maximă în centru, pe axa verticală la jumătatea înălțimii coloanei și alungirea relativă maximă pe axa laterală față de centru. Caracteristicile depind în primul rând de raportul înălțime/lățime ( $L/h$ ). Față de varianta standard (a) se pot folosi coloane cu gaură de concentrare a eforturilor (b) sau coloana cu pereți cilindrici (c).

#### 4. Erori de măsurare și posibilități de compensare a acestora

Principalele influențe perturbatoare care influențează ieșirea traductoarelor tensorezistive sunt: variațiile de temperatură suferite de piesă, element sensibil sau cabluri de legătură, efecte termoelectrice, reacții chimice, câmpuri electrice parazite.

**Influența temperaturii.** O marcă tensometrică de lungime  $l$  și rezistență  $R$ , supusă unei variații de temperatură  $\Delta T$ , va avea o variație de rezistivitate  $\Delta \rho$  și o variație de lungime  $\Delta l_t$ . La marca lipită direct pe piesă variația de lungime va fi egală cu variația de lungime a piesei  $\Delta l_p$ , deci cu  $\Delta l = \Delta l_t = \Delta l_p$  mai mare decât a mărcii libere (fig. 21). Această alungire suplimentară acționează ca o variație de lungime produsă de o solicitare mecanică. Ca atare, variația rezistenței electrice va fi:

$$\frac{\Delta R}{R} = (\alpha_\rho - \alpha_t) \Delta T + K(\alpha_p - \alpha_t) \Delta T \quad (28)$$

cu  $\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T}$  - coeficientul de variație cu temperatura al rezistivității;

$\alpha_t = \frac{1}{l} \frac{\Delta l_t}{\Delta T}$  - coeficientul de dilatare liniară a materialului mărcii;

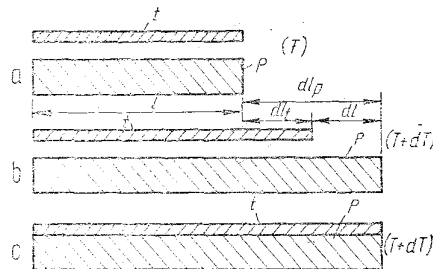
$\alpha_p = \frac{1}{l} \frac{\Delta l_p}{\Delta T}$  - coeficientul de dilatare liniară a piesei.

Dacă variația de temperatură este  $\Delta T$  și piesa pe care este lipită marca are în urma unei solicitări mecanice o alungire  $\varepsilon$ , relația (28) devine:

$$\frac{\Delta R}{R} = (\alpha_p - \alpha_t)\Delta T + K(\alpha_p - \alpha_t)\Delta T + K\varepsilon \quad (29)$$

Dacă marca tensometrică este lipită mai întâi pe un suport și apoi pe piesă, în relațiile (28) și (29) apare în loc de  $\alpha_p$  coeficientul de dilatare al suportului  $\alpha_s$ .

Pentru compensarea erorilor datorate efortului aparent mai importante sunt două metode: cea a mărcilor “false” și cea a mărcilor autocompensate.



**Fig. 14.** Influența temperaturii asupra mărcii lipite.

a) *Utilizarea mărcilor de compensare.* Marca de compensare, numită și marcă „falsă”, se montează pe brațul adiacent al mărcii active și este identică cu aceasta.

b) *Utilizarea mărcilor autocompensate.* Mărcile tensometrice autocompensate la variații de temperatură sunt constituite din aliaje speciale, din care cele mai utilizate sunt aliajele de tip A (cu constantan) și de tip K (aliaj karma). Aceste aliaje au proprietăți care asigură o minimizare a efortului aparent pentru o gamă largă de variație a temperaturii, compensarea datorindu-se faptului că rețeaua mărcii se obține prin înserierea a două rețele din aliaje diferite, unul având coeficient de temperatură pozitiv, celălalt negativ.

Această metodă de compensare este mult utilizată la măsurări ale efortului la temperaturi apropiate de temperatura mediului și utilizează o singură marcă autocompensată montată într-o punte care are în brațul adiacent un rezistor fix al cărui coeficient de variație cu temperatură nu trebuie să, depășească  $10^6 \Omega/^\circ\text{C}$ . Din păcate, costul mărcilor autocompensate este ridicat și limitează utilizarea acestora la situațiile în care influența perturbatoare a temperaturii nu poate fi eliminată în alt mod.

**Influența razei de curbura.** La instalarea mărcii tensometrice pe o suprafață cu o curbura pronunțată, efortul aparent este diferit decât cel ce apare la montarea mărcii pe o suprafață plană. Schimbarea survenită în efortul aparent datorită curburii se numește efort incremental. Efortul aparent incremental produs de curbura este un efect de ordin secundar, care în mod obișnuit se poate neglija, dar care devine semnificativ când raza de curbura scade sub 15 mm, situație în care pentru determinarea corectă a efortului se impun corecții cu valori furnizate de nomograme specifice pentru fiecare tip de marcă, adeziv și suport.

**Influența conductoarelor de legătură.** Rezistența conductoarelor de legătură a mărcilor la puntea de măsurare influențează calitatea aprecierii eforturilor atât datorită valorii sale, cât mai ales datorită variației acestei rezistențe în timpul măsurării.

**Influența rezistenței constante a conductorilor.**

Această influență se manifestă în două moduri:

- modificarea punctului de nul (deriva de zero), care este o modificare aditivă ce poate fi ușor înlăturată prin calibrare;

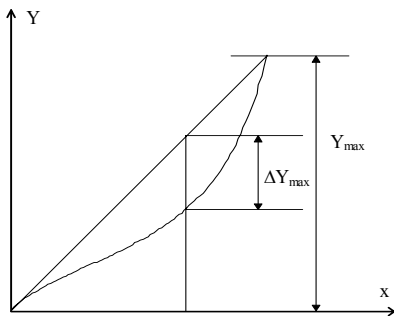
- modificarea sensibilității punții, în sensul scăderii tensiunii de ieșire datorită caderilor de tensiune pe conductorii de legătură.

**Influența variației rezistenței conductorilor de legătură.** Cea mai importantă variație a rezistenței firelor de legătură se datorează variațiilor de temperatură, care - în cazul cel mai defavorabil al conectării în sfert de punte - produc, la o creștere de temperatură  $\Delta T$ , o variație de rezistență  $\Delta R_F = 2R_F \alpha \Delta T$ .

Pentru eliminarea acestui efect nedorit se recomandă legarea mărcii active prin conexiunea cu trei fire în cazul conectării în sfert de punte sau utilizarea montajului cu 5 fire, în cazul unei semipunții cu două mărci active.

**5. Lucrări de efectuat în laborator**

1. Se vor trasa caracteristicile experimentale pentru sistemul tip bară încastrată și pentru celula de cântărire. Acestea se montează pe rând la puntea tensometrică și se aplică forțe prin adăugarea pe rând a celor 5 greutăți de 1.1Kg. Puntea se echilibrează mai întâi fără greutăți.
2. Se determină erorile de neliniaritate și sensibilitatea celor două sisteme.



$$\varepsilon_n = \frac{\Delta Y_{\max}}{Y_{\max}} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$a = \frac{n \cdot \sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k - \sum_{k=1}^n x_k \cdot \sum_{k=1}^n y_k}{n \cdot \sum_{k=1}^n x_k^2 - \left( \sum_{k=1}^n x_k \right)^2}$$

$$b = \frac{n \cdot \sum_{k=1}^n y_k - a \cdot \sum_{k=1}^n x_k}{n}$$

3. Se va determina și histerezisul sistemelor, parcurgând curba în sens invers odată cu îndepărtarea greutăților, ca abaterea maximă din cele două curbe.