



Istrumentație pentru măsurarea forțelor și momentelor

Traductoarele pentru forțe și momente sunt necesare pentru supravegherea structurilor cinematice supuse la regimuri variabile de încărcare (la mașini-unelte, roboți, benzi transportoare etc).

La aceste situații forța este o mărime vectorială, fiind esențială - pe lângă aflarea modulului - și cunoașterea direcției de aplicare.

Ținând seama de tipul elementului sensibil (ES) se disting două mari categorii:

- cu ES parametrice - din categoria cărora fac parte cele tensorezistive și piezorezistive;
- cu ES generatoare - bazate pe efectul piezoelectric, respectiv magnetostrictiv.

Instrumentație pentru forțe cu ES tensorezistive

Elementele sensibile tensorezistive sunt cunoscute sub denumirea de *mărci tensometrice*.

Funcționarea acestora presupune următorul lanț de transformări:

$$F \rightarrow^{CE} \Delta l \rightarrow^{MT} \Delta R \rightarrow^A U_e(I_e)$$

Forța F aplicată unui corp elastic (CE) produce o deformație Δl care este preluată de marca tensometrică (MT), astfel că efectul este o variație de rezistență ΔR ; aceasta este preluată electronic de un adaptor (A), rezultatul fiind semnalul calibrat de tensiune sau curent $U_e(I_e)$.

Instrumentație pentru forțe cu ES tensorezistive

Pe baza legii lui Hooke rezultă: $\sigma = \varepsilon E$

Dar ε se calculează cu relația: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$

unde σ - efortul unitar [N/m^2], E - modulul de elasticitate [N/m^2], iar ε este deformația specifică liniară medie.

unde Δl este deformația corespunzătoare lungimii l pentru piesa sollicitată; $\rightarrow \sigma = E \frac{\Delta l}{l}$
 \rightarrow determinarea efortului unitar pe baza deformației specifice.

Mărcile tensometrice sunt de dimensiuni reduse, permițând astfel determinarea “punctuală” a eforturilor unitare.

Constructiv, o *marcă tensometrică cu fir metalic* este realizată sub forma unei rețele bobinate în plan dintr-un conductor foarte subțire (0,02...0,05mm) din constantan (cel mai folosit), crom-nichel, fero-crom-nichel. Bobinajul este lipit pe un suport de hârtie, sau este înglobat într-o piesă plată de material plastic. Tipic, se prezintă sub forma unei folii pătratice, cu baza de 5...50mm, iar rezistența nominală este între 50 Ω și 1000 Ω .

O *marcă tensometrică cu folie metalică corodată* se fabrică printr-un procedeu similar cablajelor imprimate, prin îndepărtarea de pe porțiunile neprotejate a metalului depus în prealabil pe un suport de plastic.

Instrumentație pentru forțe cu ES tensorezistive

Mărcile tensometrice semiconductoare folosesc efectul tensorezistiv al dispozitivelor semiconductoare; sunt constituite din monocristale de siliciu - de tip *n* sau *p* - au factorul de marcă 100...150, iar dimensiunile sunt foarte mici (tipic, o marcă tensometrică semiconductoare are dimensiunile bazei între 1,3...13mm și o modificare a rezistenței între 120Ω și 1000Ω).

Mărcile se fixează pe piesele care se deformează prin lipire cu rășini epoxidice sau materiale termoplastice.

În fig.12.4 se prezintă tipuri constructive de mărci tensometrice și modul lor de fixare pe corpul elastic de preluare a forței.

De reținut că fixarea mărcii tensometrice pe corpul elastic trebuie să se facă cu dimensiunea activă pe direcția de aplicare a forței F .

Deoarece: $F = A\sigma$ unde A este aria corpului elastic CE , rezultă că modificarea ariei A datorită forței F provoacă modificarea elementelor rezistorului mărcii tensometrice.

Dacă un conductor de rezistență

$R = \rho \frac{l}{S}$ este supus unor întinderi sau compresiuni, atunci

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S}{S_3}$$

Instrumentație pentru forțe cu ES tensorezistive

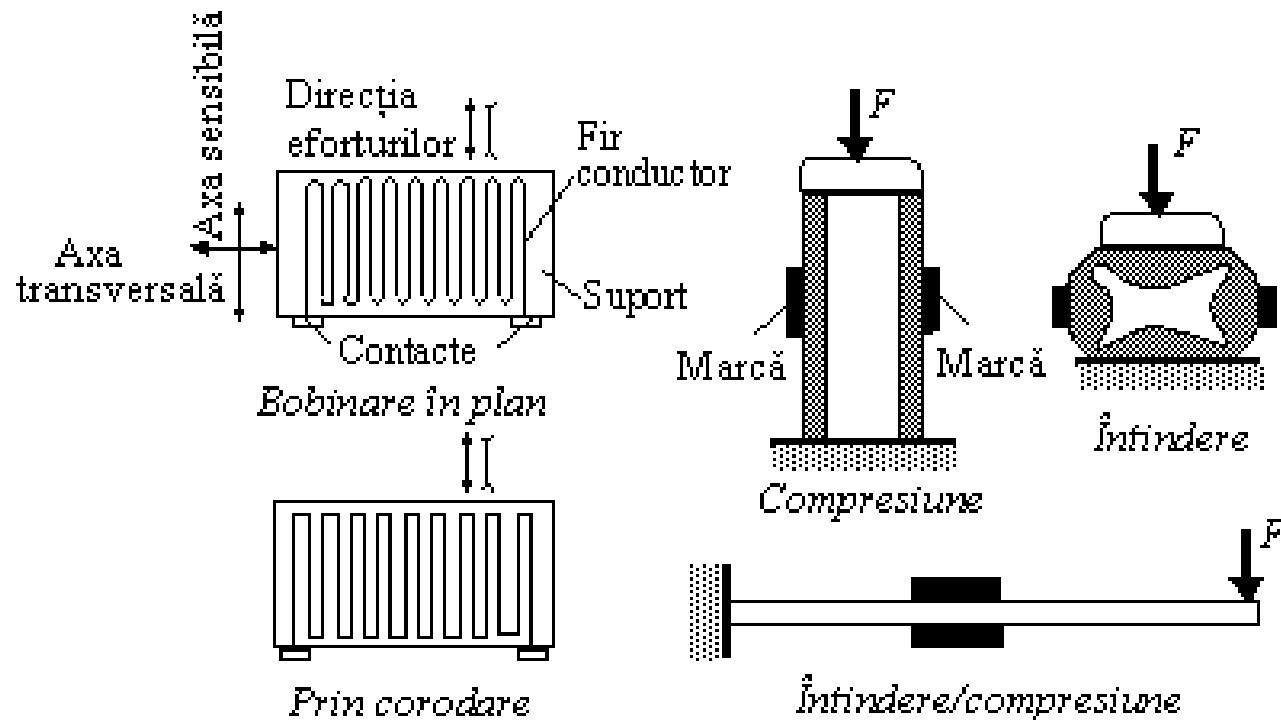


Fig.12.4. Tipuri constructive de mărci tensometrice și modul lor de fixare

Instrumentație pentru forțe cu ES tensorezistive

Cum $S = \pi d^2/4$ rezultă
$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\pi 2 \Delta d \cdot d}{4} \frac{4}{\pi d^2} = 2 \frac{\Delta d}{d}.$$

Dacă notăm cu ε_l deformația specifică longitudinală, adică $\varepsilon_l = (\Delta l)/l$, și ținem seama de coeficientul lui Poisson μ_t , rezultă că deformația specifică transversală ε_t este

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta d}{d} = -\mu_t \varepsilon_l. \quad \text{Dar: } \rho = \rho_0 \left(1 + C_B \frac{\Delta V}{V} \right)$$

unde C_B este constanta lui Bridgmann, iar din expresia volumului firului $V = l \cdot S = \pi(d^2/4)l$ rezultă:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta d}{d} = \varepsilon_l - 2\mu_t \varepsilon_l = \varepsilon_l (1 - 2\mu_t)$$

astfel că
$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = C_B \frac{\Delta V}{V} = C_B \varepsilon_l (1 - 2\mu_t). \quad \text{În final}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon_l - 2\mu_t \varepsilon_l + C_B \varepsilon_l (1 - 2\mu_t) = \varepsilon_l (1 - 2\mu_t)(1 + C_B).$$

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_l} = (1 - 2\mu_t)(1 + C_B)$$

Se notează cu K factorul de marcă, adică:

care are valori diferite în funcție de materialul firului rezistiv (de exemplu, $K = 2,1$ la constantan, $K = 2,4$ la crom-nichel, $K = 4,2$ la platină-tungsten).

Instrumentație pentru forțe cu ES tensorezistive

Observații:

1. Deoarece tehnicile de prelucrare a variațiilor de rezistență sunt - în majoritatea cazurilor - montajele în punte, rezultă că cerințele principale pe care trebuie să le îndeplinească o marcă tensometrică sunt:

- coeficient de variație a rezistenței firului cu temperatura cât mai mic;
- coeficientul de dilatare cu temperatura aproximativ același cu suportul mărcii și a corpului elastic;
- rezistență mecanică a firului rezistiv cât mai mare;
- histerezis cât mai redus.

2. Corpul elastic *CE* trebuie:

- să permită determinarea cu precizie a zonelor de deformare maximă și evaluarea cantitativă a acestor deformații;
- să permită structuri (montaje) diferențiale pentru eliminarea neliniarităților, compensarea variațiilor cu temperatura și creșterea sensibilității.

3. Pentru preluarea variațiilor de rezistență de la mărcile tensometrice se folosesc punți Wheatstone de c.c. cu 1, 2 sau 4 brațe active.

Instrumentație pentru forțe cu ES piezoelectrice

Funcționarea acestei instruentății 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):

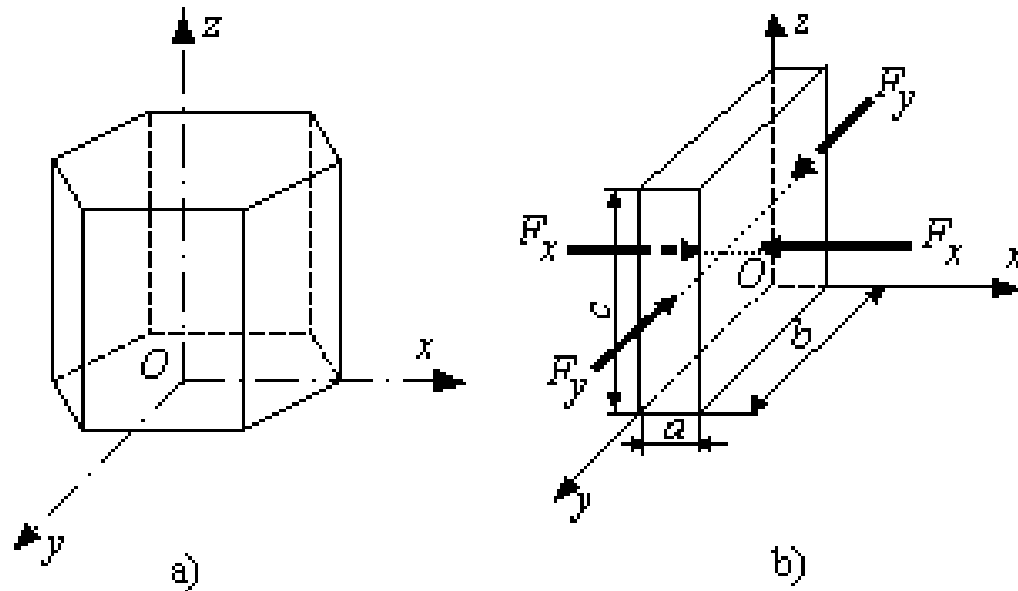
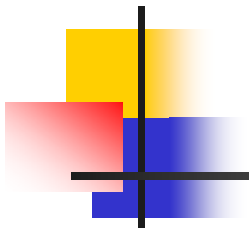


Fig.12.5. Forma cristalului de cuarț (a) și modalitatea lui de utilizare în elementele sensibile de forță (b)

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

Instrumentație 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).

Instrumentație 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...).

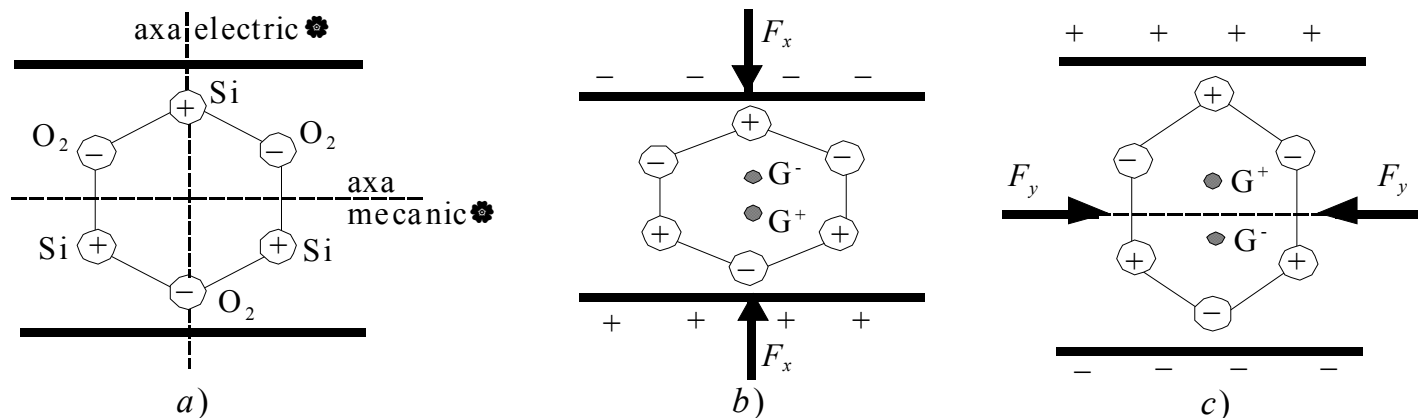


Fig.12.6. Secțiune normală pe axa optică (a) și explicarea efectului piezoelectric direct longitudinal (b), respectiv transversal (c)

Instrumentație 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} Ω .

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).

Instrumentație pentru forțe cu ES piezoelectrice

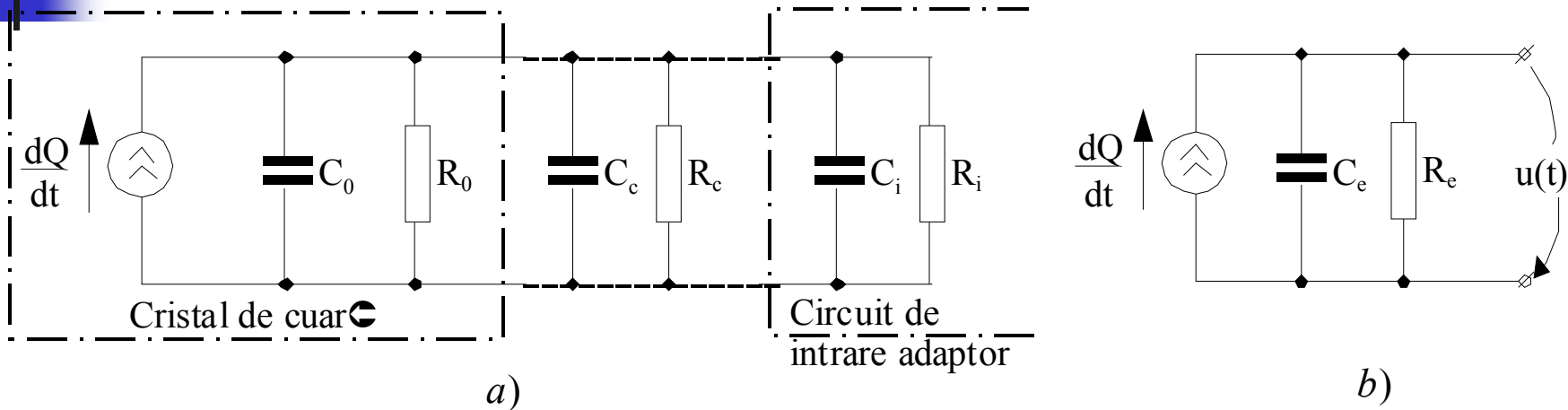


Fig.12.7. Schema echivalentă detaliată (a) a lanțului element sensibil piezoelectric - intrare adaptor semnal calibrat și cea simplificată (b)

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 și R_e .

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

Instrumentație 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 $Q(s)/C_r$.

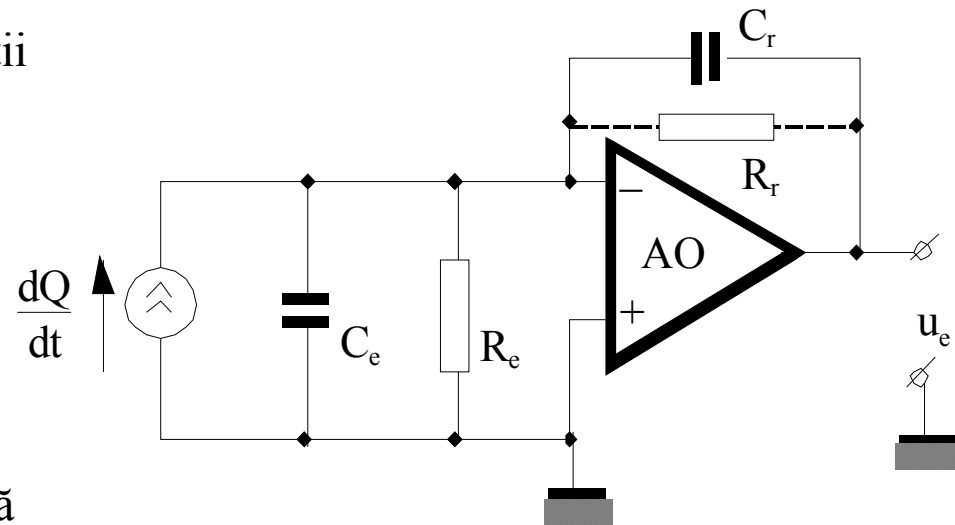


Fig.12.8. Preluarea semnalului de la elementul sensibil piezoelectric cu un amplificator de sarcină