

MINISTERUL ÎNVĂȚĂMÂNTULUI
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

ING. DUMITRU MNERIE

TEZĂ DE DOCTORAT

CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA UTILIZĂRII
MATERIALELOR PIEZOCERAMICE ÎN
CONSTRUCȚIA TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ

Conducător științific:
Prof. dr. doc. șt. ing. dhc. AUREL NANU

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

TIMIȘOARA
1997

613.446
366 B.

C U V Ă N T Î N A I N T E**MOTTO:*****Atât ! ... deocamdată.***

Dorința de progres a societății angajează personalul științific și tehnic din învățământ și cercetare într-o căutare permanentă de *inovare și integrare* continuă a noului, într-o variantă optimă, în structurile deja existente, acordând activității un caracter interactiv.

Performanțele tehnico-științifice pot fi atinse doar pe baza activității de *cercetare științifică fundamentală*, aprofundată, dar și prin *abordarea multidisciplinară* a fenomenelor cercetate.

Dinamismul cercetării se realizează prin *continua optimizare* a situațiilor deja studiate, cu noi metode, folosind funcții de optimizare complexe, pe baza unor experimentări în condiții tehnice evaluate.

În prezent, *cercetarea individuală* nu mai poate avea mari șanse, decât în cazuri cu totul excepționale; dar anii de muncă a fiecărui "scormonitor" pe tărâmul științific, poate netezi unele căi, deja aflate, sau poate deschide *noi drumuri*. Așa cum, construirea unui edificiu nu se bazează doar pe clădirea, peste o fundație deja turnată, mereu a unor cărămizi, ci și pe îmbunătățirea *calității* acestora, a liantului dintre cărămizi, apoi a tencuielilor, zugrăvelilor etc, așa și în activitatea de cercetare, sunt meritorii, atât descoperirile epocale, cât și contribuțiile la valorificarea lor, sporirea aplicabilității, mărirea eficienței acestora.

În acest context, lucrarea de față își propune și să *medieze* participarea la valorificarea de noi materiale, atât a specialiștilor în elaborarea acestora, cât și a utilizatorilor, obișnuiți doar cu anumite caracteristici și posibilități de utilizare. De asemenea, se intenționează *provocarea*, în perspectivă, a cercetătorilor fizicieni, chimiști, tehnologi, electroniști, informaticieni, pentru a privi cu mai mare interes, fiecare în parte și toți împreună, categoria de *materiale piezoceramice*, care pot avea un loc mereu mai important în progres.

Deși, *nu se cunoaște* aplicația de înaltă performanță a **materialelor piezoceramice pentru construcția traductoarelor de forță**, în lucrare s-au abordat direcții de optimizare, în baza unei analize sistemice, pe un model creat previzional, urmare a unor studii teoretice și experimentale, stabilindu-se apoi, justificat, diferite jaloane pentru o cercetare aplicativă ulterioară, sau chiar pentru proiectarea unor echipamente propriu-zise.

Concluziile desprinse, privind utilitatea practică a modelului sistemic teoretic propus, a rezultatelor încercărilor modelelor experimentale realizate în etapa de elaborare a prezentei lucrări, pot fi *preluate* atât de producătorii de materiale piezoceramice, cât și de specialiști în automatizarea sistemelor productive, pentru activități de cercetare aplicativă sau de proiectare.

Tema prezentei lucrări este rezultatul a mai multor probleme concrete lansate din sectoarele de cercetare și producție, reprezentate prin firme, cum ar fi: INCDFM-București, SEVAM-Drobeta-Turnu-Severin, ISIM-Timișoara, "ARIS"-Arad ș.a. De aceea, în perioada elaborării lucrării, autorul s-a folosit de multe din discuțiile purtate cu specialiștii de la aceste firme, cu prilejul predării a 4 contracte cercetare, cu participanții la simpozioanele și sesiunile de comunicări tehnico-științifice unde au fost prezentate și publicate 32 lucrări, din care 9 ca autor singular, toate cu teme desprinse din problematica materialelor piezoceramice, a traductoarelor de forță și a posibilității utilizării acestora în sisteme de automatizare a utilajelor și echipamentelor industriale.

Prezenta TEZĂ, realizată cu scopul obținerii titlului de DOCTOR-INGINER, este structurată pe 6 capitole, cuprinzând 195 de pagini, 127 figuri, 38 tabele, 141 relații fizico-matematice, 21 fotografii și 126 referințe bibliografice.

În mare parte, eforturile autorului ar fi rămas nevalorificate, dacă nu ar fi beneficiat de sprijinul susținut și permanent al domnului **prof. dr. doc. șt. ing. dhc. AUREL NANU**, căruia, prin aceste rânduri scrise la finalul elaborării lucrării, autorul dorește să-i aducă profunda recunoștință, alături de cele mai calde și sincere mulțumiri pentru competența orientare și îndrumare a cercetării, în calitate de îndrumător științific.

Sunt adresate mulțumiri, pentru ajutorul acordat de specialiștii colectivului de cercetare și producție a materialelor piezoceramice din cadrul Institutului Național de Cercetare- Dezvoltare pentru Fizica Materialelor-București, în special domnului *prof. dr. Constantin Tănăsioiu, CNCST*, pentru finanțarea unei părți din cercetări materializate în Contractele de cercetare 4004/1995 și 5004/1996, precum și a *Programului TEMPUS*, prin acordarea unei burse în Grecia, prilej cu care au fost realizate importante cercetări ale materialelor piezoceramice în cadrul "Composite Materials Group", (Universitatea din Patras), condus cu multă competență de remarcabilul *profesor G.C.Papanicolaou*.

De asemenea, autorul aduce mulțumiri *specialiștilor* din instituțiile consultate, în special *colegilor din catedra de Tehnologie mecanică* și din alte colective din Universitatea "Politehnica" din Timișoara, precum și tuturor celor care, cu sfaturi și încurajări au contribuit ca această TEZĂ să fie finalizată.

Autorul,
Ing. DUMITRU MNERIE

CUPRINS

	Pag.
- Cuvânt înainte	1
- Lista abrevierilor și simbolurilor utilizate	6
1. - CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND TRADUCTOARELE DE FORȚĂ CU MATERIALE PIEZOCERAMICE	7
1.1. - Traductoare de forță	7
1.1.1. - Generalități	7
1.1.2. - Clasificări	9
1.1.3. - Traductoare de forță cu elemente sensibile neconvenționale	11
1.2. - Concepția actuală asupra utilizării materialelor piezoceramice	17
1.2.1. - Efectul piezoelectric în materiale ceramice	18
1.2.2. - Tipuri de materiale piezoceramice	27
1.2.3. - Aplicații actuale ale materialelor piezoceramice	30
2. - CONTRIBUȚII PRIVIND DETERMINAREA UNUI MODEL SISTEMIC GENERALIZAT DE OPTIMIZARE A UTILIZĂRII MATERIALELOR PIEZOCERAMICE ÎN CONSTRUCȚIA TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ	33
2.1. - Tendințe actuale în domeniul măsurării forțelor	33
2.2. - Studiul comparativ al performanțelor traductoarelor piezoelectrice construite până în prezent	36
2.3. - Alegerea indicatorilor de performanță ai traductoarelor de forță piezoceramice	38
2.4. - Sistem generalizat de utilizare a traductoarelor de forță piezoceramice	39
2.4.1. - Logistica utilizării traductoarelor de forță piezoceramice	39
2.4.2. - Stabilirea funcțiilor generalizate de optimizare și a restricțiilor aferente	42
2.4.3. - Analiza globală a modelului sistemic de măsurare a forțelor cu ajutorul traductoarelor de forță	45
2.4.4. - Stabilirea rolurilor factorilor esențiali în procesul de măsurare a forței cu traductoare de forță piezoceramice.....	51
3. - CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND ELABORAREA OPTIMĂ A MATERIALELOR PIEZOCERAMICE DESTINATE TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ	61
3.1. - Elemente de optimizare a compoziției și microstructurii materialelor piezoceramice	61

3.1.1.	- Stabilirea compoziției chimice optime a materialelor piezoceramice destinate construcției traductoarelor de forță	61
3.1.2.	- Studii experimentale microstructurale asupra materialului piezoceramic $Pb(Ti_{0,465}Zr_{0,535})O_3$	64
3.1.3.	- Studiul efectelor mărimii grăuntelui și polării electrice asupra modului de rupere la nivelul microstructural al materialelor piezoceramice	67
3.2.	- Studiul experimental al proprietăților electrice și mecanice ale materialelor piezoceramice	73
3.2.1.	- Model experimental de studiu al modificărilor dimensionale ale elementelor piezoceramice	73
3.2.2.	- Studiul asupra comportamentului piezoelectric al materialelor piezoceramice	78
3.2.3.	- Studiul experimental asupra durității materialelor piezoceramice	81
3.2.4.	- Analiza comportamentului elementelor piezoceramice la solicitări mecanice	83
3.3.	- Studiul experimental asupra calității electrozilor materialelor piezoceramice	86
3.3.1.	- Analiza funcțională a electrozilor formați prin depunere metalică pe suprafața elementelor piezoceramice	86
3.3.2.	- Influența imperfecțiunilor de depunere metalică a electrozilor asupra performanțelor elementelor piezoceramice	87
3.3.3.	- Influența electrodului colector de sarcini asupra calității semnalului electric cules ..	88
3.4.	- Sinteza contribuțiilor la optimizarea metodologiei de obținere a materialelor piezoceramice destinate traductoarelor de forță	89
4.	- CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND OPTIMIZAREA CONSTRUCȚIEI TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ CU MATERIALE PIEZOCERAMICE	93
4.1.	- Studiul variantelor constructive ale traductoarelor de forță cu utilizarea materialelor piezoceramice	93
4.1.1.	- Modelarea matematică a aplicării efectului direct piezoelectric în construcția traductoarelor de forță piezoceramice.....	93
4.1.2.	- Modelarea matematică a comportării elementelor piezoceramice în condițiile oscilațiilor forțate	98
4.2.	- Studiul asupra comportării unor modele experimentale de traductoare de forță piezoceramice	103
4.2.1.	- <i>Traductor de forță piezoceramic</i> destinat solicitărilor la compresiune în regim dinamic	103
4.2.2.	- <i>Traductoare de forță piezoceramice</i> pentru solicitări la compresiune în regim quasistatic	106
4.3.	- Sinteza contribuțiilor la optimizarea principiilor de construcție a traductoarelor de forță piezoceramice	112

5. - CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE LA OPTIMIZAREA UTILIZĂRII TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ CU ELEMENTE PIEZOCERAMICE	116
5.1. - Contribuții la utilizarea traductoarelor de forță piezoceramice ca elemente de automatizare a mașinilor-unelte	116
5.1.1. - Experimentări ale traductoarelor de forță piezoceramice în sisteme tehnologice de prelucrare prin strunjire	119
5.1.1.1. - Studiul variațiilor forțelor de așchiere folosind traductorul TFPC-04	119
5.1.1.2. - Utilizarea traductorului TFPC-05	122
5.1.2. - Experimentări ale traductorului TFPC-06 în sisteme tehnologice de prelucrare prin frezare	123
5.2. - Contribuții la utilizarea traductoarelor de forță piezoceramice ca elemente de automatizare a echipamentelor de prelucrare prin tehnologii neconvenționale ..	128
5.2.1. - Studiul variațiilor forțelor din spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune electrică	128
5.2.2. - Studiul variațiilor forțelor din spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune electrică complexă	131
5.2.3. - Studiul forțelor cu ajutorul traductorului de forță piezoceramice la prelucrarea cu jet de apă	134
5.3. - Contribuții la optimizarea monitorizării unor operații de prelucrare prin utilizarea traductoarelor de forță piezoceramice	135
5.3.1. - Model generalizat de monitorizare	135
5.3.2. - Monitorizarea datelor experimentale obținute la strunjire cu traductoare de forță piezoceramice	140
5.3.3. - Monitorizarea datelor experimentale obținute cu traductoare de forță piezoceramice la frezare	149
5.4. - Contribuții privind definirea aplicabilității traductoarelor de forță piezoceramice	153
6. - CONCLUZII	158
6.1 - Concluzii finale	158
6.2 - Contribuții originale ale lucrării	159
6.2.1. - Contribuții teoretice	159
6.2.2. - Contribuții în domeniul cercetării experimentale	160
6.2.3. - Contribuții în implementarea industrială a rezultatelor cercetării	162
BIBLIOGRAFIE	163
Anexa A	171
Anexa B	187
Anexa C	190

LISTA ABREVIERILOR ȘI SIMBOLURILOR UTILIZATE

A - amper, aria suprafeței, $[m^2]$; **AD** - bloc de adaptare; **AM** - aparat de măsură; **AS** - amplificator de sarcină; **β** - impermeabilitatea dielectrică, $[m/F]$; **C** - capacitate dielectrică, $[C]$; **c** - modulul de elasticitate al materialului pur mecanic, $[N/m^2]$; **c_m** - complianța mecanică a unui element piezoceramic; **D** - inducție electrică, $[C/m^2]$; **d** - constanta de deformare piezoelectrică, $[m/V]$, $[C/N]$; **DF** - divizor de fascicul; **Δ** - abatere, diferență; **E** - câmp electric, intensitatea câmpului electric, $[V/m]$ sau modulul de elasticitate, $[N/m^2]$; **ES** - element sensibil; **e** - constanta de efort piezoelectric, $[Vm/N]$, $[C/m^2]$; **e_0** - tensiune elementară, $[V]$; **ϵ** - permitivitatea dielectrică, $[F/m]$; **ϵ_r** - permitivitatea dielectrică relativă; **η** - randamentul de conversie, $[\%]$; **F** - forță, $[N]$; **F_m** - forța măsurată, $[N]$; **F_s** - forța sesizată, $[N]$; **FD** - fotodetector; **Fra** - frecvența măsurată în solicitare ascendentă, $[Hz]$; **Frd** - frecvența măsurată în solicitare descendentă, $[Hz]$; **f_a** - frecvența de antirezonanță, $[Hz]$; **f_r** - frecvența de rezonanță, $[Hz]$; **\mathcal{F}_c** - mărimea Ficher; **g** - constanta de deformare piezoelectrică, $[m^2/C]$, $[Vm/N]$; **γ** - tensiune superficială, $[N/m]$; **γ_s** - energie de suprafață, $[J]$; **H** - mulțimea trăsăturilor caracteristice ale condițiilor unei operații de prelucrare; **h** - constanta de efort piezoelectric, $[N/C]$, $[V/m]$; **H_{II}** - entropie, $[J/K]$; **HV** - durezza Vickers; **I** - intensitatea curentului electric, $[A]$; **i** - intensitate electrică specifică, $[A]$; **ISF** - indicator de semnificație a factorilor; **J_{II}** - funcția Bessel; **K** - rigiditate, $[N/m]$; **K_p** - coeficient de cuplaj piezoelectric planar; **M** - masa, $[kg]$; **ML** - material lichid; **MPT** - material piezoceramic destinat traductoarelor mecano-electrice; **MPG** - material piezoceramic destinat generatoarelor de ultrasunete; **N_{II}** - număr; **O** - amplificator operațional; **OP** - operație de prelucrare; **OT** - obiect de transfer; **ω** - frecvența unghiulară proprie; **P** - polarizare electrică; **p** - presiune, $[Pa]$; **P_{av}** - putere acustică pe unitate de volum, $[m^2kgW/m^3s^3]$; **P_{II}** - pondere, $[\%]$; **PC** - Personal Computer; **PLZT** - titanatul-zirconat de plumb și lantan; **PZT** - titanatul-zirconat de plumb; **PZT-D** - materiale piezoceramice dure; **PZT-M** - materiale piezoceramice moi; **Q** - sarcină electrică, $[C]$; **q** - sarcini electrice pe unitate de suprafață, $[C]$; **Q_m** - factor de calitate mecanic; **R** - rezistență electrică, $[\Omega]$; **R_s** - rata de succes, $[\%]$; **S** - deformare elastică, $[m/m]$; **s** - deformabilitatea mecanică, $[m^2/N]$; **S_b** - sensibilitate; **s_a** - avansul de așchiere, $[m/rot \cdot 10^{-1}]$; **s_c** - strângere capacitivă a unui element piezoceramic; **SIT** - sursă de curent continuu, de înaltă tensiune; **T** - temperatură, $[K]$; **T_m** - tensiune mecanică, $[N/m^2]$; **T_c** - temperatură Curie, $[K]$; **t** - grosimea elementelor piezoceramice, $[m]$; **t_a** - adâncimea de așchiere, $[m]$; **t_x** - prag de valoare admisibilă; **τ** - constantă de timp a traductorului, $[s]$; **TF** - traductor de forță; **TP** - titanatul de plumb; **TFP** - traductor de forță piezoelectric; **TFPc** - traductor de forță piezoceramic; **T_r** - traductor de referință; **U** - tensiune electrică, $[V]$; **V_{II}** - număr de variabile; **v** - viteza, $[m/s]$; **v_a** - viteza de așchiere, $[m/s]$; **X** - mulțimea indicilor de monitorizare; **y** - semnal electric cules de traductor, $[C]$; **Z** - impedanța electrică, $[\Omega]$; **W** - energie electrică, mecanică, $[W]$, $[J]$;

1. CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND TRADUCTOARELE DE FORȚĂ CU MATERIALE PIEZOCERAMICE

1.1. TRADUCTOARE DE FORȚĂ

1.1.1. Generalități

Pentru conducerea eficientă a unui proces, indiferent de procedeele și mijloacele aplicate, informarea reprezintă o funcție esențială. Astfel, deciziile de conducere pot fi luate numai pe baza unor informații cât mai corecte și mai complete asupra unor parametri semnificativi pentru caracterizarea tehnico-economică a procesului, informații obținute ca rezultat a unor operații de măsurare [10], [15].

În sistemele automate operațiile de măsurare sunt efectuate de *traductoare*. *Traductoarele* sunt definite ca fiind aparate care stabilesc o corespondență univocă între valorile unei mărimi caracteristice și valorile unei mărimi de altă natură, ceea ce permite măsurarea valorilor primei mărimi [19], [119].

Traductoarele stabilesc o corespondență între mărimea de măsurat și o mărime cu un domeniu de variație calibrat, aptă de a fi recepționată și prelucrată de echipamentele de conducere [3], [13].

Deci, prin intermediul *traductoarelor* se asigură funcția informațională, întrunind o serie de calități care să le apropie de caracteristicile ideale de liniaritate, dinamică și precizie, pentru a asigura valabilitatea ipotezelor și prelucrările matematice pe baza cărora sunt formalizate problemele de conducere automată a proceselor [15], [17], [43].

Traductoarele de forță se fac necesare în sistemele de supraveghere a structurilor cinematice supuse la regimuri variabile de încărcare (de exemplu: mașini-unelte, roboți, linii automate, celule flexibile etc.), unde interesează forța ca mărime cât și ca direcție de acțiune [17].

Totuși, trebuie făcută o distincție între *dinamometru* și *traductor* [111].

- *Dinamometrul* se definește ca fiind un aparat de măsurat forța, fie prin comparație cu greutăți cunoscute, fie prin măsurarea unor deformații, a unor modificări de presiune sau electrice provocate de forța de măsurat [3], [10], [26], [113].

- *Traductorul de forță* transformă o mărime de o anumită natură, respectiv *forța*, direct într-o mărime de altă natură, electrică sau neelectrică [17], [43].

În concluzie, se poate afirma că măsurarea completă a forței o face *dinamometrul* care poate avea în compunere un traductor. După cum se remarcă și în schema din *figura 1.1.*, dacă considerăm ca mărime de intrare în dinamometru *forța F*, traductorul preia efectul x (cu valoare necunoscută a măsurandului), prin intermediul elementului sensibil **ES**, (denumit și *detector*, *captor* sau *senzor*), care transmite o informație adaptorului **AD**, cel care adaptează informația la cerințele de automatizare care o utilizează, rezultând astfel mărimea de ieșire din traductor y , convertită printr-o metodă proprie a dinamometrului în unități de măsurare specifice forței [22].

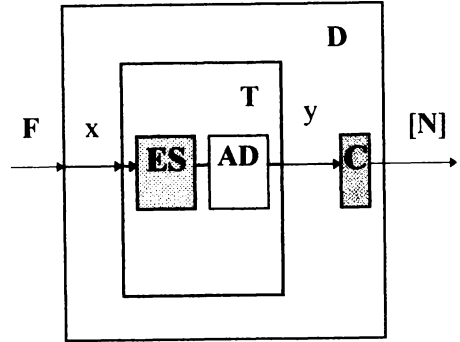


Figura 1.1. - Schema măsurării forței.

În lucrarea de față nu se propune studierea tuturor sistemelor de măsurare a forțelor, ci doar a *traductoarelor de forță*, ca elemente ale unor sisteme de reglare automată care transformă forța în semnal unificat [17], [23].

Forța, în mecanica clasică, este cauza determinantă a variației vitezei unei particule. Ecuația dimensională a forței, în general, este [9], [15], [22]:

$$F = k \cdot m \cdot a \quad , \quad (1.1)$$

unde: - **F** este forța care acționează asupra masei m ;
 - a este accelerația;
 - k coeficient care depinde de unitățile de măsură.

Pe lângă valoarea absolută a forței interesează de obicei și direcția după care acționează. Uneori este necesară determinarea forței după două, sau chiar trei direcții ortogonale.

Măsurarea forțelor de întindere și compresiune este în strânsă legătură cu măsurarea alungirii relative, (apreciată prin efort unitar), care reprezintă deformația produsă de forța ce acționează pe unitatea de suprafață, într-un solid:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad , \quad (1.2)$$

unde: ε - deformația; ρ - efortul unitar; **E** - modulul de elasticitate [22].

În prezent, cea mai răspândită metodă de obținere a traductoarelor de forță (**TF**), este *conversia deformației în semnal util*, datorită posibilităților tehnice de valorificare relativ simplă a efectului tensorezistiv, care constă din modificarea rezistenței unui conductor, atunci când acesta este supus la un efort care îi provoacă alungirea sau compresia [14], [59], [115].

1.1.2. Clasificări

Clasificarea traductoarelor de forță se face ținându-se cont de diferitele criterii luate în considerare în literatura de specialitate, referitoare la: *tipul mărimii de ieșire, tipul convertirii acțiunii forței, tipul semnalului de ieșire, numărul transformărilor energetice, etc.*(figura 1.2)

După *natura mărimii de ieșire*, traductoarele de forță pot fi **TF în mărime mecanică**, sau **TF în mărime nemecanică**. Primele, după starea de agregare a agentului de transmisie a mărimii de la intrare, se pot clasifica la rândul lor în: **TF mecanice**, **TF hidraulice**, **TF pneumatice**. De asemenea, **TF** cu mărime de ieșire *nemecanică* se clasifică în : **TF rezistive**, **TF inductive**, **TF capacitive**, **TF piezoelectrice**.

După *tipul convertirii acțiunii forței*, în urma solicitării elementului sensibil **TF** pot fi: **TF** cu *convertire directă* și **TF** cu *convertire indirectă*. Primele se împart în două grupe: **TF generatoare** și **TF parametrice**. Acestea se împart la rândul lor, după cum urmează:

- **TF generatoare** sau *energetice* dau ca mărime de ieșire o tensiune electromotoare, un curent sau o cantitate de sarcină, care sunt prelucrate de măsurand.

- **TF parametrice** sau *modulare* au ca mărime de ieșire parametrii modificați de rezistență, inductivitate sau capacitate, circuitul fiind alimentat de la o sursă de energie [43].

În cazul convertirii *indirecte*, forța de măsurat acționează asupra unui element sau sistem elastic, producând astfel o deformare sau o deplasare a acestuia, care se transmite apoi elementului sensibil al traductorului. În cadrul acestei categorii de **TF**, se pot întâlni: **TF tensometrice**, **TF pneumatice**, **TF hidraulice**, **TF cu coardă vibrantă** ș.a. [4].

După modul de prezentare al *semnalului de ieșire*, **TF** se împart în: **TF analogice** și **TF numerice**.

După *numărul transformărilor energetice* care au loc de la acțiunea forței până la ieșirea semnalului din traductor, se pot întâlni: - **TF directe**, care realizează o singură transformare energetică; **TF complexe**, în care au loc mai multe transformări [57].

Deasemenea după *numărul direcțiilor de urmărire* a acțiunii forței **TF** se împart în **TF** după *o direcție*, *2 direcții* sau *3 direcții ortogonale*.

În general, după *modul de montare* al traductoarelor în sistemele de măsurare, **TF** pot fi: *succesive* și *diferențiale*. În primul caz **TF** se conectează în serie; în cel de-al doilea caz parametrii electrici variază în sensuri contrare.

Mai pot fi întâlnite **TF** de *compensare*, când folosind o schemă de reacție se reduce efectul traductorului asupra măsurandului [72].

Fără a face o analiză amănunțită a fiecărui tip de **TF**, în lucrare se abordează în parte doar acele **TF** care sunt mai *compatibile* cu sistemele de automatizare a proceselor, în care **TF** să se poată realiza într-o construcție *miniaturizată*, să aibă o *sensibilitate mare*, *precizie ridicată*, *consum de putere scăzut*, *viteză mare de răspuns*, posibilitatea de urmărire a *variației forței*, atât în regim *dinamic* cât și în regim *quasistatic*, (sau chiar în regim static), cu posibilitatea asigurării *teletransmisiei semnalului de ieșire*, precum și *integrarea TF în sistemele cinematice* ale utilajelor fără să influențeze funcționalitatea acestora.

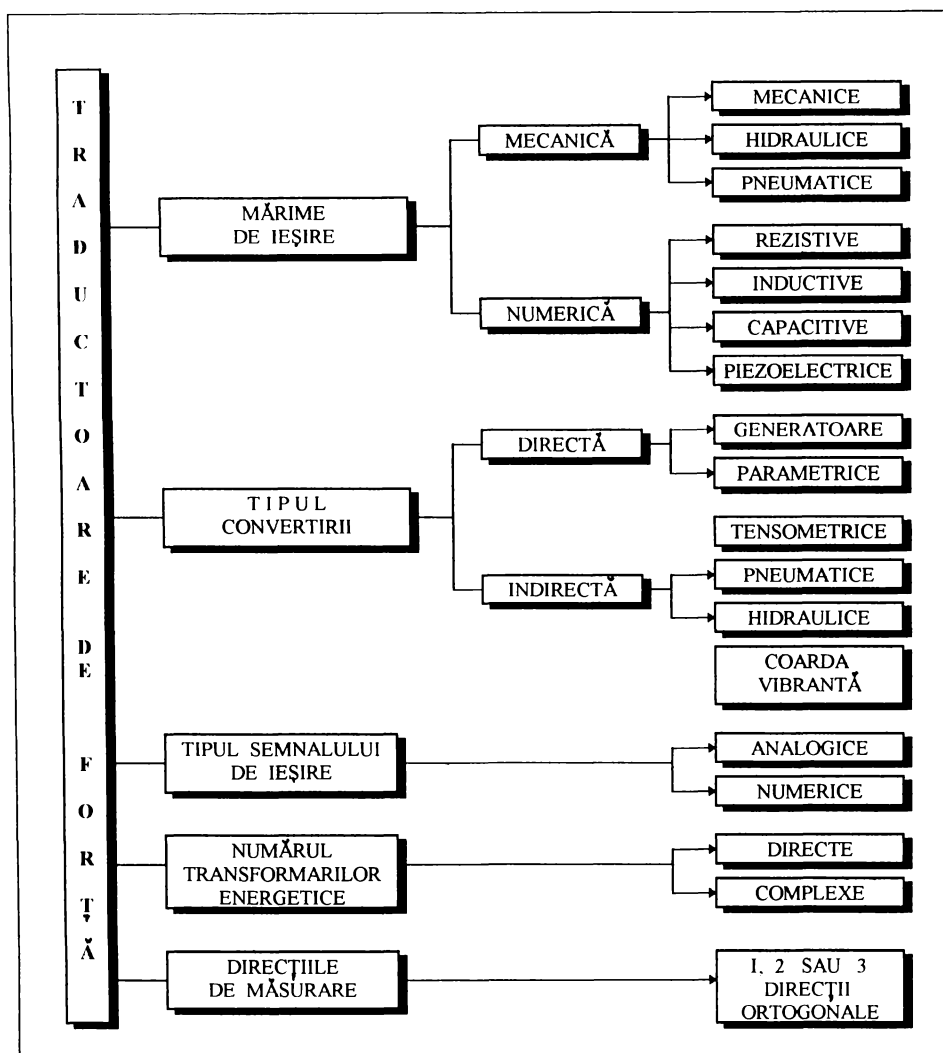


Figura 1.2. - Clasificarea traductorilor de forță.

1.1.3. Traductoare de forță cu elemente sensibile neconvenționale

Utilizate în sistemele de măsurare a variației forțelor, încă din perioada interbelică, traductoarele de forță cu elemente sensibile cu *mărci tensiometrice*, au devenit clasice, cu cea mai mare extindere, atât datorită simplității constructive, cât mai ales datorită simplității relative a circuitelor de conversie a variației de rezistență în semnal util, adaptoarele fiind uzual punți de tip *Wheatstone* [22]

Opus acestor avantaje, există o serie de deficiențe ale metodei care limitează sfera de aplicabilitate. Astfel, variațiile de temperatură, calitatea elementelor sensibile și a cablurilor de legătură, efectele termoelectrice, reacțiile chimice, câmpurile electrice parazite pot perturba semnalele de ieșire de la traductoarele tensorezistive, influențând calitativ informațiile. De asemenea, complexitatea tehnologiei de amplasare a mărcilor ridică impedimente în generalizarea utilizării acestora [13], [15].

De aceea, cercetarea științifică a condus la introducerea în construcția traductoarelor de forță a unor *elemente sensibile neconvenționale*, sau nespecifice pentru sesizarea variațiilor de forță. Astfel, s-au studiat posibilitatea adoptării unor soluții constructive cu elemente sensibile *parametrice*, de tip *inductiv* și *capacitiv*, sau *generatoare*, bazate pe efecte de material, cum ar fi: *magnetostrictiv* și *piezoelectric* [56].

a.- Traductoarele inductive, detectează forța prin deformări elastice cauzate, care provoacă deplasări sesizabile, prin determinarea unei mișcări relative între elementele unor bobine, modificându-se astfel parametrii acesteia. Principial, aceste traductoare pot fi: cu miez mobil, cu armătură mobilă, cu întrefier variabil.

Mai performante se dovedesc a fi **TF** cu element sensibil *inductiv cu miez mobil-diferențial* și **TF** cu element sensibil cu modificarea *întrefierului diferențial*, prezentate schematic în figura 1.3.

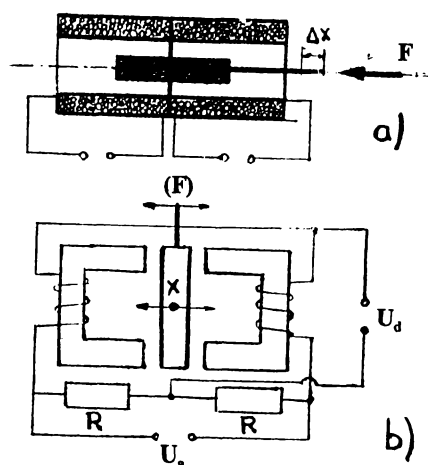


Figura 1.3. - TF inductive:
a - cu miez,diferențial;
b - cu întrefier,diferențial.

Aceste variante asigură ameliorarea liniarității și sporirea sensibilității. În mod practic, la aceste variante, forța acționează asupra unor elemente elastice, (în formă de fi : inel, diafragmă, coloană etc.), deformarea cărora să fie în legătură directă cu miezul, respectiv cu întrefierul bobinelor, prin deplasarea acestora modificându-se inductanțelor proprii ale celor două bobine.

Elementele sensibile de acest tip sunt caracterizate prin gabarit redus, rezoluție foarte bună și robustețe sporită, dar sunt susceptibile de erori prin modificările caracteristicilor magnetice ale miezului datorate îmbătrânirii. Totodată, metoda de măsurare prezintă dezavantajul dependenței curentului din circuit de oscilațiile tensiunii și frecvenței sursei de alimentare [43].

b. - Traductoarele capacitive, au ca elemente sensibile, componente ale unui condensator. Deplasările cauzate de deformațiile unui element elastic sub acțiunea unei forțe F determină modificarea distanței dintre armături, simplu (figura 1.4.-a) și diferențial (figura 1.4.-b), respectiv determină modificarea permitivității dielectricului prin intermediul unui manșon (figura 1.4.-c).

Dezavantajele TF capacitive constau în:

- instabilitatea caracteristicilor cu modificarea temperaturii și umidității mediului;
- prezintă scheme relativ complicate de conectare a traductoarelor;
- necesită precizie foarte ridicată de prelucrare a componentelor;
- dependența semnalelor de ieșire de oscilațiile din rețeaua de alimentare;
- pentru stabilitate sunt necesare surse de înaltă frecvență etc. [15].

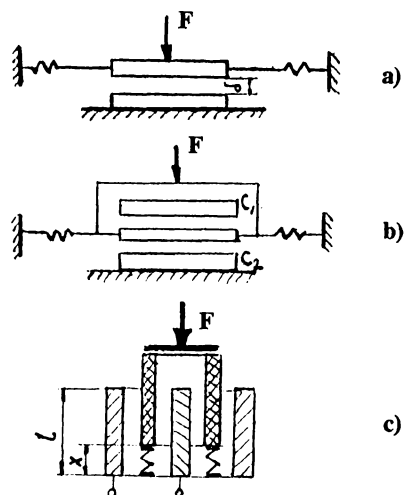


Figura 1.4.- TF capacitive:
a - cu modificarea distanței dintre armături;
b - diferențial;
c - cu manșon.

c. - Traductoarele magnetostrictive, folosesc elemente sensibile alcătuite din materiale, (numite magnetostrictive), cu proprietatea de a-și schimba caracteristicile magnetice, mai exact ciclul de histerezis, sub acțiunea forței. Dintre aceste materiale, mai utilizate sunt *nichelul pur* și *permalloy*, (un aliaj Ni-Fe, cu 68% Ni).

Aceste materiale au un comportament diferit la acțiunea forței, nichelul prezentând o magnetostricțiune negativă iar materialul permalloy prezintă o magnetostricțiune pozitivă. Variația de pantă a caracteristicii poate fi convertită într-o tensiune electromotoare ceea ce conferă traductorului calitatea de a fi de tip generator.

Dintre variantele folosite, în *figura 1.5-a*, se prezintă schema de principiu a unui *TF* având ca element sensibil un circuit magnetic închis, din material magnetostrictiv, în care la acțiunea forței provoacă variația permeabilității. Cu acest tip se poate obține o precizie maximă de 1%. O altă soluție se prezintă în *figura 1.5-b*, în care acțiunea forței determină variația inducției remanente, provocând implicit o variație de tensiune indusă în bobină.

Metoda se pretează mai ales pentru măsurarea forțelor dinamice [15], [22].

d. - Traductoarele electrodinamice, (de inducție), (*figura 1.6.*), sunt de tip generator, având la ieșire variația fluxului magnetic prin, deplasarea sub acțiunea forței de măsurat, a unei membrane solidare cu un magnet sau o bobină, în interiorul unei alte bobine.

Pe acest principiu se bazează o soluție constructivă de *TF* realizată de cunoscuta firmă germană *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH*, cu trei elemente sensibile.

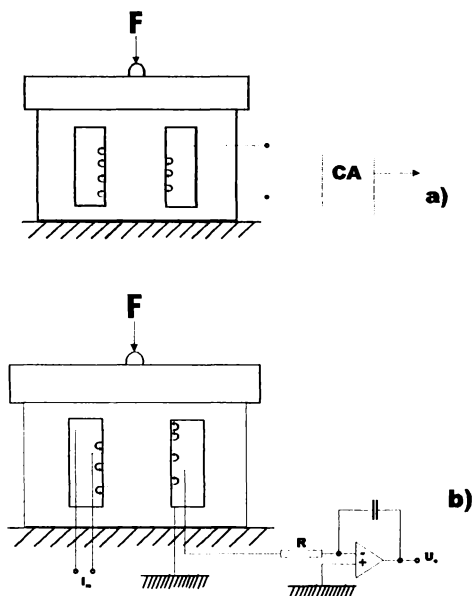


Figura 1.5. - Traductoare de forță magnetostrictive.

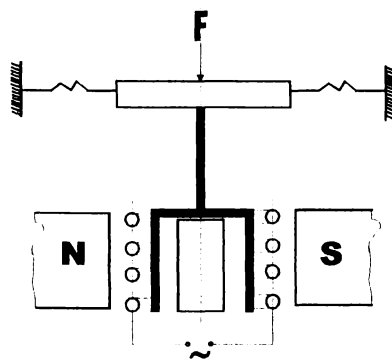


Figura 1.6. - Traductoare electrodinamice (de inducție).

e. - Traductoarele piezoelectrice, se încadrează în grupa traductoarelor de forță cu elemente sensibile neconvenționale, deoarece materialele piezoelectrice se regăsesc, de regulă, ca elemente active în componența traductoarelor pentru generarea de ultrasunete, sau a senzorilor de vibrații, respectiv pentru cazurile solicitărilor dinamice.

În construcția senzorilor de forță piezoelectrice realizați de câteva firme de marcă din lume, (cum ar fi: *Kistler* din Elveția, *Piezotronics* și *SENSOTEC* din SUA, *Zeiss Ikon AG* din Germania ș.a.), elementul sensibil este asigurat de *cuarț* [45], [89].

Cuarțul, cristal natural de SiO_2 , prezintă, din punct de vedere piezoelectric:

- 3 axe Ox - electrice;
- 3 axe Oy - mecanice;
- 1 axă Oz - neutră.

Se consideră tăietură în "X", (*figura 1.7.*), tăietura realizată perpendicular pe axa Ox , când efectul piezoelectric este maxim.

În repaos, din punct de vedere electric, plăcuța de cuarț detașată este neutră.

Sub acțiunea forței F_x aplicată pe direcția axei Ox , rezultă o sarcină electrică Q_x , de forma:

$$Q_x = d_{11} \cdot F_x , \quad (1.3)$$

unde d_{11} este modulul piezoelectric pe direcția Ox .

Deci, prin aplicarea unei forțe pe direcția axei Ox rezultă, prin efect piezoelectric longitudinal, sarcini +/-, pe fețele 1-1 ale cristalului de cuarț, (*figura 1.8.*), cu valoarea totală direct proporțională cu valoarea forței F_x , dar neinfluențată valoric de dimensiunea cristalului piezoelectric [10], [22], [22].

De asemenea, prin aplicarea unei forțe pe direcția Oy , datorită efectului piezoelectric transversal, se obțin sarcini electrice pe fețele 1-1, în valoare totală direct proporțională cu mărimea forței, dar de sens contrar și dependentă de dimensiunile cristalului:

$$Q_y = d_{11} \cdot \frac{l}{b} \cdot F_y , \quad (1.4)$$

unde l și b sunt dimensiunile plăcuței de cristal.

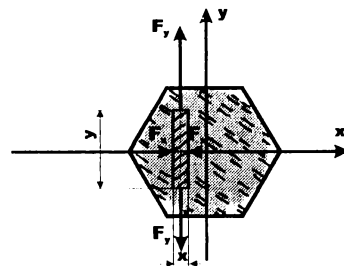


Figura 1.7. - Cristal de cuarț.

În construcția *TF piezoelectrice*, pentru urmărirea acțiunii unei forțe după o direcție, se pot folosi două plăcuțe de cristal, situație în care sarcinile se însumează. Montajul minim necesar pentru măsurarea forței cu traductor prevăzut element sensibil piezoelectric, (figura 1.9.) se compune din:

- elementul sensibil, (*ES*) simplu sau dublu;
- amplificator de sarcină, (*AS*);
- aparat de măsură a semnalului, (*AM*).

Cuarțul utilizat este foarte stabil la temperatură și umezeală, este rezistent mecanic, (100 N/mm^2), rezistivitate volumetrică foarte mare, (de aproximativ $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$), modulul piezoelectric pe direcția Ox cu valoarea $d_{11} = 2,31 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$, variind puțin cu temperatura [45].

Fiind de tip *generator*, traductorul nu necesită o tensiune de excitație, dar, datorită impedenței mari de ieșire al *ES*, este necesar ca *AS* să aibă o impedență foarte mare de intrare, ($Z > 100 \text{ M}\Omega$) [62].

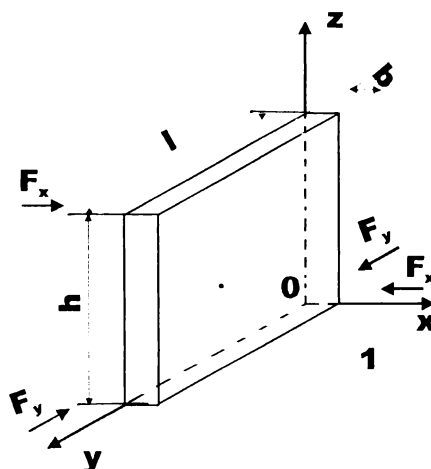


Figura 1.8. - Plăcuță de cuarț tăiată în "X", sollicitată după Ox și Oy .

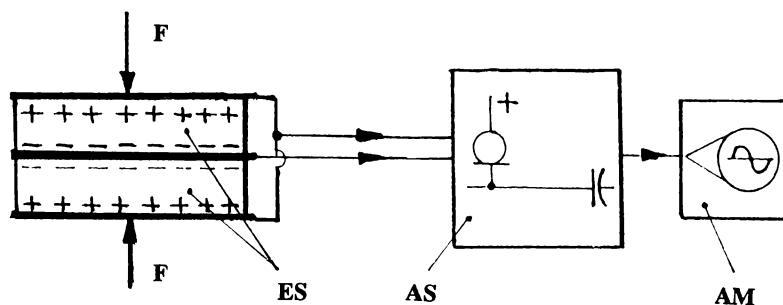


Figura 1.9. - Schemă de principiu a măsurării forței de compresie cu *TF piezoelectric* cu cuarț.

Prin utilizarea unor amplificatoare de sarcină electrică adecvate, se pot măsura și forțe cu acțiune quasistatică. De regulă, cu acest tip de traductor, se pot converti mărimi de forțe care acționează cu o fluctuație de 0,1 ms.

În general, TF piezoelectrice pot fi folosite pentru forțe de compresiune, dar, prin realizarea unei precomprimări, posibilitățile pot fi extinse și la forțele de întindere, considerate cu acțiune dinamică în raport cu un nivel static, față de care apar alternativ diminuări și intensificări, sub forma unor eforturi fluctuante de întindere și compresie [14], [26].

De asemenea, în categoria **TF** cu *elemente sensibile neconvenționale*, mai pot fi menționate și următoarele tipuri:

- **TF** cu elemente sensibile care valorifică proprietățile vibratorii ale unor structuri elastice, urmărind evidențierea unui semnal a cărui frecvență depinde de starea de tensiune a acestei structuri, de regulă coardă metalică [19];

- benzile și discurile codate de tip incremental (numeric), la care defazajul este proporțional cu efortul [43];

- discurile sau benzile optice, la care variația forței se convertește în diferență de flux luminos captat de un receptor adecvat [43].

În acest *subcapitol*, s-a realizat doar o prezentare sintetică a *traductoarelor de forță*, în dorința de a încadra subiectul acestei teze în domeniul de largă întindere a elementelor cu rol decisiv, în sistemele de automatizare ale sistemelor tehnice. De asemenea, aceste informații constituie date componente din ansamblul de baze definitorii pentru delimitarea *stadiului actual* al cunoașterii și utilizării principiului *piezoelectricității* în măsurarea forțelor.

1.2. CONCEPȚIA ACTUALĂ ASUPRA UTILIZĂRII MATERIALELOR PIEZOCERAMICE

Ceramica tehnică, cunoscută pentru proprietățile de excepție, își dovedește din ce în ce mai mult aplicabilitatea în diverse ramuri, atât în construcții civile și industriale, cât și în construcții de mașini, electronică, electrotehnică, energetică ș.a. [80].

În general, ceramica tehnică, prezintă o mare rezistență mecanică, rezistență la atacurile chimice, stabilitate geometrică, (proprietăți ce se păstrează și la temperaturi foarte ridicate), greutate specifică redusă, duritate ridicată, surse de materii prime practic nelimitate, posibilități de realizare practică în forme și dimensiuni foarte variate cu precizii și calitate a suprafeței ireproșabile. Dintre diferitele clase de materiale ceramice se remarcă în mod deosebit *materialele electroceramice*, care joacă un rol important în ingineria electrică încă de la începuturile acesteia. Marea familie a electroceramicelor include o întreagă listă de subfamilii, (*figura 1.10.*), fiecare dintre ele având o lungă istorie [43], [117].

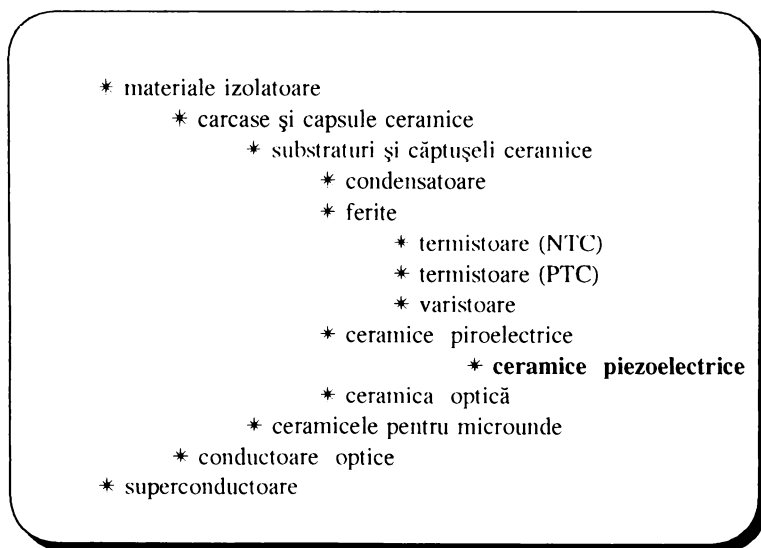


Figura 1.10. - Subfamiliile de materiale electroceramice.

Studiindu-se natura materialelor ceramice feroelectrice au fost descoperite *materialele piezoceramice*, a căror dezvoltare s-a petrecut datorită cercetărilor științifice asupra stării fizice a solidului și a căutărilor empirice de îmbunătățire a proprietăților sub aspect mecanic ale electroceramicelor.

613.446
366 B.

1.2.1. Efectul piezoelectric în materialele ceramice

Efectul piezoelectric a fost descoperit încă din anul 1880 de frații *Jean și Pierre Curie*, în cristalele naturale de cuarț. Acest efect *presupune apariția de sarcini electrice pe suprafața unui corp sub acțiunea unor tensiuni mecanice*. Sarcinile sunt de natură electrică și de semn contrar pe fețele opuse ale plăcuței de cristal. Prefixul "*piezo*" provine de la grecescul "*piezein*", care înseamnă "*a presa*" [4], [11].

Efectul piezoelectric s-a dovedit a fi *reversibil*, ceea ce înseamnă că, dacă încărcăm fețele opuse ale lamei, tăiată din *cristalul de cuarț*, cu sarcini electrice de semn contrar, forma și una dintre dimensiunile lamei se modifică. Acest fenomen a fost descoperit de fizicianul francez *G. Lippman* după un an de la descoperirea efectului piezoelectric direct, purtând astfel numele de "*efect piezoelectric invers*" [75].

În stare naturală se pot găsi materiale cu proprietăți piezoelectrice, cum ar fi:

- *materiale monocristaline*: cuarțul, turmalina, sarea Rochelle;
- *materiale policristaline*: titanatul de bariu, titanatul de plumb - **TP**, titanatul-zirconat de plumb - **PZT**, titanatul-zirconat de plumb și lantan - **PLZT**, niobiații de plumb ș.a.;
- *materiale plastice*: florura de poliviniliden;
- *materiale amorfe*: lemnul;
- *materiale biologice*: mușchi, tendoane etc.

Fenomenul de *piezoelectricitate* reprezintă un cuplaj între mărimile *dielectrice* și *mechanice* [4]. Interacțiunile complexe între stările *dielectrică* și *elastică* ale solidului piezoelectric, pot fi rezumate în diagrama de interacție, prezentată în *figura 1.11.*, în care s-au considerat următoarele variabile macroscopice :

- T_m - tensiunea mecanică, $[N/m^2]$;
- E - câmp electric, $[V/m]$;
- S - deformarea elastică, $[m/m]$;
- D - inducția electrică, $[C/m^2]$.

Sensul săgeții indică mărimea *produs*, iar simbolurile elementelor de legătură reprezintă:

- s - deformabilitatea mecanică, $[m^2/N]$;
- ϵ - permitivitatea dielectrică, $[F/m]$;

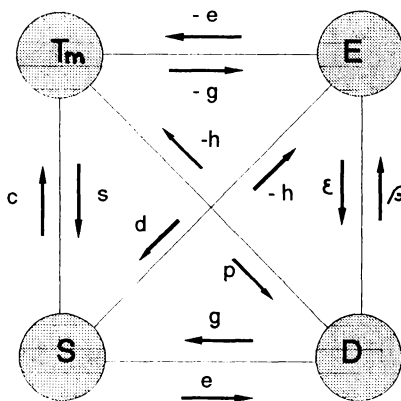


Figura 1.11. - Diagrama de interacție din solidul piezoelectric.

- β - impermeabilitatea dielectrică, [m/F];
- d - constanta de deformare piezoelectrică, [m/V] sau [C/N];
- e - constanta de efort piezoelectric, [Vm/N] sau [C/m²];
- g - constanta de tensiune piezoelectrică; $g = d/\epsilon$, [m²/C] sau [Vm/N];
- h - constanta de efort relativ piezoelectric; $h = e/\epsilon$, [N/C] sau [V/m].

Dacă se consideră un volum elementar dintr-un solid piezoelectric și se supune simultan la o tensiune mecanică T_m și un câmp electric E , va apărea inducția electrică D și deformarea S . Alegerea variabilelor independente ale sistemului este arbitrară.

Astfel, rezultă *ecuațiile fundamentale ale piezoelectricității*, care se pot scrie în patru moduri diferite:

$$\left\{ \begin{array}{l} D = \epsilon^T \cdot E + d \cdot T_m \\ S = d_t \cdot E + s^E \cdot T_m \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} D = \epsilon^S \cdot E + e \cdot S \\ T_m = - e_t \cdot E + c^E \cdot S \end{array} \right. , \quad (1.5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E = \beta^T \cdot D - g \cdot T_m \\ S = g_t \cdot D + s^D \cdot T_m \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} E = \beta^S \cdot D - h \cdot S \\ T_m = - h_t \cdot D + c^D \cdot S \end{array} \right.$$

unde, constantele au următoarele semnificații: (*relațiile 1.6.*)

$$\epsilon^T = \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_T - \text{constanta dielectrică, (permitivitatea) măsurată la efort mecanic}$$

constant sau nul, (constanta dielectrică liberă);

$$d = \left(\frac{\partial D}{\partial T} \right)_E - \text{constanta piezoelectrică măsurată în câmp electric constant sau nul;}$$

$$d_t = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_T - \text{constanta piezoelectrică măsurată la efort mecanic constant sau nul;}$$

$$s^E = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_E - \text{compliance elastică, măsurată în câmp electric constant sau nul, (inversul}$$

constantei elastice);

$$\epsilon^S = \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_S - \text{constanta dielectrică măsurată la deformare constantă sau nulă;}$$

$e \left(\frac{\partial D}{\partial S} \right)_E$ - constanta de efort piezoelectric măsurată în câmp electric constant sau nul;

$e_t \left(\frac{\partial T}{\partial E} \right)_S$ - constanta de efort piezoelectric măsurată la deformare constantă sau nulă;

$c^E \left(\frac{\partial T}{\partial S} \right)_E$ - constanta de rigiditate elastică măsurată în câmp electric constant sau nul;

$\beta^T \left(\frac{\partial E}{\partial D} \right)_T$ - constanta de impermeabilitate dielectrică măsurată la efort mecanic

constant sau nul;

$g \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_E$ - constanta de tensiune piezoelectrică măsurată în condiții de inducție

electrică constantă sau nulă;

$g_t \left(\frac{\partial S}{\partial D} \right)_T$ - constanta de deformare piezoelectrică măsurată la efort constant sau nul;

$s^D \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_E$ - complianța elastică măsurată în condiții de inducție electrică constantă sau

nulă;

$\beta^S \left(\frac{\partial E}{\partial D} \right)_S$ - constanta de impermeabilitate dielectrică măsurată la deformare constantă

sau nulă;

$h \left(\frac{\partial E}{\partial S} \right)_E$ - constanta de efort relativ piezoelectric, măsurată în condiții de inducție

electrică constantă sau nulă;

$h_t \left(\frac{\partial T}{\partial D} \right)_S$ - constanta de efort piezoelectric măsurată la deformare constantă sau nulă;

$c^D \left(\frac{\partial T}{\partial S} \right)_E$ - constanta de rigiditate elastică măsurată în condiții de inducție electrică

constantă sau nulă;

În sistemele de ecuații 1.5., S și T_m sunt tensorii deformărilor corespunzătoare tensiunilor mecanice, având fiecare câte 6 componente independente, iar E și D sunt vectorii câmp electric, respectiv inducție electrică, cu 3 componente independente [3], [6], [14].

În funcție de simetria caracteristică fiecărui mediu piezoelectric, matricea elasto-piezoelectrică, care cuprinde totalitatea coeficienților elastici, piezoelectrici, dielectrici independenți și care caracterizează comportarea materialului, se simplifică în mod corespunzător.

Dintre materialele piezoelectrice, cele care prezintă în perspectivă cea mai largă arie de aplicații, sunt ceramicele piezoelectrice, numite și piezoceramice.

Materialele piezoceramice cristalizează, de regulă, în structură de tip *perovskit*, descrisă de formula chimică de bază ABO_3 și reprezentată în figura 1.12., prin exemplul moleculei de $PbTiO_3$, [54].

În formula generală, prin literele A și B se simbolizează:

- A - ion de valență 2^+ , care poate fi de: Pb , Ba , Sr , Ca , sau combinații ale acestora;
- B - ion cu valență 4^+ , care poate fi de: Ti , Zr , sau combinații ale acestora.

Structura perovskitică cubică ideală, reprezintă o celulă cubică cu volum și fețe centrate, iar în cazul soluțiilor solide *PZT*, (titanat-zirconat de plumb), este descrisă de relația *Goldschmidt* [3], [25]:

$$t = \frac{R_A + R_O}{\sqrt{2 \cdot (R_B + R_O)}}, \quad (1.7)$$

în care:

- R_A , R_B , R_O sunt razele ionice ale cationului mare A , cationului mic B și respectiv anionului de oxigen;
- t se numește *factor de toleranță* și este egal cu unitatea în cazul structurii perovskitice cubice ideale.

Astfel, în figura 1.12., se observă în vârful celulei cubice ionii bivalenți de tip A , de Pb^{2+} , iar în centrul cubului ionul tetravalent de tip B , de Ti^{4+} . La temperaturi ridicate, $T > T_c$, (unde T_c reprezintă temperatura "Curie", de regulă de ordinul sutelor de $^{\circ}C$), structura cubică are centru

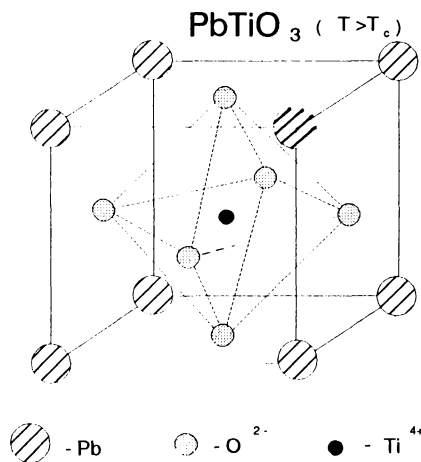


Figura 1.12. - Structura perovskită a $PbTiO_3$, ($T > T_c$).

de simetrie, materialele ceramice fiind astfel paraelectrice. Însă, la temperaturi inferioare temperaturii "Curie", $T < T_c$, rezultă o transformare de fază prin care structura se distorsionează, ionii se deplasează formându-se dipoli electrici elementari.

În figura 1.13., se observă distorsiunea tetragonală în $PbTiO_3$, rezultând o fază feroelectrică, datorită ordonării locale a dipolilor electrici elementari în domeniul feroelectric, adică având proprietatea ca, deși dielectric, să aibă o polarizație diferită de zero, chiar în absența unui câmp electric exterior [46].

Astfel, materialul ceramic se prezintă ca o masă de cristalite, (mici monocristale), orientate întâmplător, fiecare dintre ele având o structură în domeniul feroelectric [7].

În această situație, (figura 1.14.- a), momentul dipolar este nul, efectul piezoelectric fiind inexistent.

Pentru a transforma materialul ceramic într-un material cu activitate piezoelectrică, este necesară orientarea dipolilor prin *polare*.

Astfel, **polarea** este tratamentul termoelectric prin care se realizează orientarea dipolilor electrici elementari, obținându-se astfel o polarizare electrică. Acest tratament se face prin aplicarea unui câmp electric extern de zeci de KV/cm pe două fețe paralele pe care s-au depus electrozi metalici, proba de ceramică fiind răcită în câmpul electric, de la o temperatură T a tratamentului, ($T < T_c$), până la $(60 \dots 70)^\circ C$. În prezența câmpului electric intens, dipolii se orientează după anumite direcții permise, apropiate de cea a câmpului polarizant. În urma tratamentului rezultă un grad de aliniere a dipolilor și o elongație a piesei ceramice, după direcția câmpului.

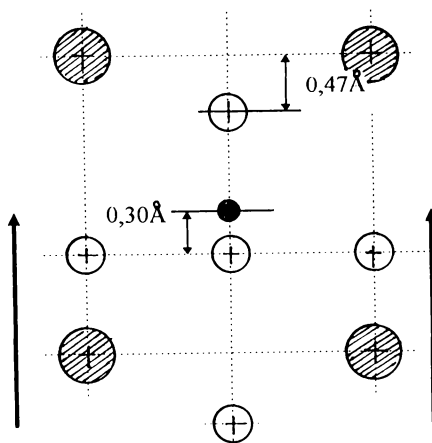


Figura 1.13. - Distorsiunea structurii de $PbTiO_3$, $T < T_c$

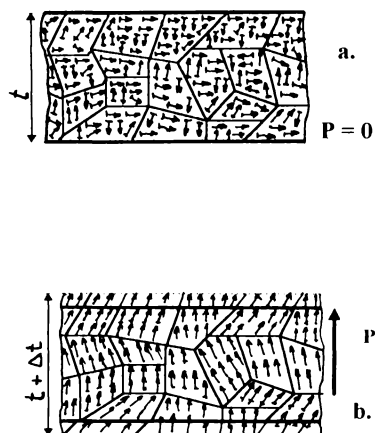


Figura 1.14. - Polarizarea electrică.

După răcire și îndepărtare a câmpului electric extern, dipolii nu-și mai schimbă poziția, materialul ceramic dobândind o polarizare remanentă, (*figura 1.14. - b*), având în acest moment proprietăți piezoelectrice [19], [25].

Se poate concluziona că prin polare, ceramicii i s-a imprimat o axă de anizotropie, axa de polarizare fiind o axă de simetrie de rotație de ordin infinit, prin ea trecând o infinitate de plane de reflexie [7].

Pentru materialele piezoceramice direcția polarizării pozitive este de obicei considerată axa z a unui sistem ortogonal de axe xyz . Dacă materialul are simetrie completă a axelor de polarizare, sensul axelor x și y se poate alege arbitrar. Dacă, așa cum se arată în *figura 1.15.*, direcțiile x, y, z sunt notate cu $1, 2, 3$ și tăierea pe cele 3 axe, cu $4, 5, 6$ parametri se vor scrie cu indici care semnifică acest aspect, după cum urmează:

- *primul* indice semnifică:

- direcția deplasării dielectrice, la permitivitatea dielectrică, ϵ ;
- direcția deformației, la s ;
- direcția câmpului, la g și la d ;
- direcția polarizării, la K ;

- al *doilea* indice reprezintă:

- direcția câmpului electric, la ϵ ;
- direcția efortului, la s și la g ;
- direcția de deformație, la K și la d .

Matricea *elasto-piezo-dielectrică* pentru ceramici polarizate se scrie astfel:

$$\begin{pmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \cdot (s_{11}^E - s_{12}^E) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{13} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

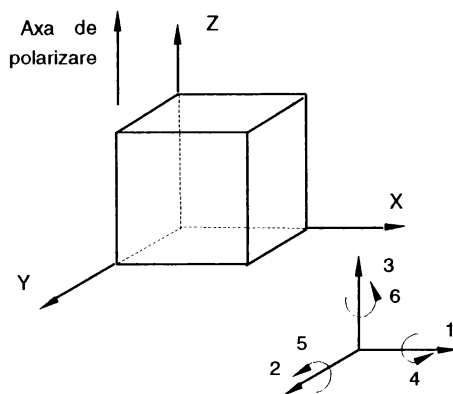


Figura 1.15. - Prezentarea indicilor parametrilor caracteristici piezoceramice.

Constantele, care nu sunt cuprinse în matrice, se pot obține din cele prezentate, cu ajutorul *relațiilor 1.5*.

Alte mărimi importante, care caracterizează materialele piezoelectrice, sunt: *coeficienții de cuplaj, factorii de calitate, factorii de disipare, variațiile acestor factori în funcție de temperatură și câmp, stabilitatea în timp, temperatura "Curie"*.

În continuare, se prezintă câteva aspecte legate de aceste mărimi:

1. *Coeficientul de cuplaj piezoelectric* este măsura directă a efectului electromecanic.

Pentru *efectul direct* piezoelectric, (figura 1.16. - a.) coeficientul de cuplaj se definește pe următoarele considerente:

Când un element piezoelectric este supus unei tensiuni mecanice **T**, forța externă este utilizată, atât pentru deformarea elastică, cât și pentru polarizarea sa.

Densitatea energiei de deformație mecanică, este dată de relația:

$$W_{mec} = \frac{c \cdot (\Delta t / t)^2}{2}, \quad (1.9)$$

unde : **c** - modulul de elasticitate al materialului pur mecanic;
Δt/t - deformația relativă a materialului.

Coeficientul de cuplaj piezoelectric este dat de relația:

$$K = \sqrt{\frac{\text{energia electrică disponibilă la ieșire}}{\text{energia mecanică totală la intrare}}}, \quad (1.10)$$

Dar, trebuie ținut cont și de următoarele aspecte:

- *energia electrică disponibilă la ieșire* este egală, în acest caz, cu *energia generată piezoelectric*, (W_{e1});

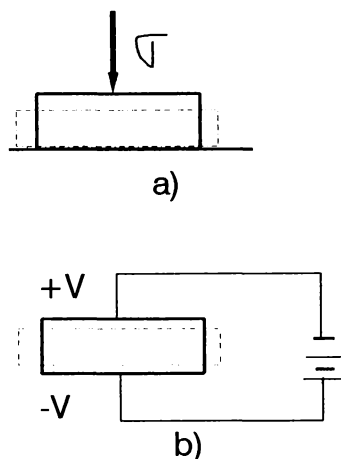


Figura 1.16. - Efectul piezoelectric:
a- direct; **b**- indirect.

- *energia mecanică totală la intrare*, este de fapt *energia totală consumată pentru deformare*, ($W_{el} + W_{mec}$).

Deci:

$$K = \sqrt{\frac{W_{el}}{W_{el} + W_{mec}}} , \quad (1.11)$$

Astfel, intervine *modulul de elasticitate aparent* dat de relația:

$$c_{ap} = \frac{c}{1 - K^2} , \quad (1.12)$$

Pentru *efectul invers piezoelectric* coeficientul de cuplaj piezoelectric este dat de relația:

$$K = \sqrt{\frac{W_{mec}}{W_{el} + W_{mec}}} , \quad (1.13)$$

unde: W_{mec} - energia mecanică de deformare;

W_{el} - energia sursei electrice externe consumată pentru încărcarea piezoelectrică.

Tinând cont de valoarea capacității C , [F], valoarea energiei W_{el} se poate determina cu relația:

$$W_{el} = \frac{C \cdot U^2}{2} , \quad (1.14)$$

U , [V], fiind tensiunea dată în circuit.

Semnificația fizică a lui K , de *coeficient de cuplaj piezoelectric*, η , care diferă de *randamentul de conversie*, conduce la concluzia, că în condiții de rezonanță, randamentul este superior lui K^2 . Astfel, se deduce faptul că, pentru un traductor piezoceramic bine reglat și adaptat, care lucrează în condiții de rezonanță, randamentul de conversie $\eta > 90\%$, iar $K_{max} < (60 \dots 70)\%$ [4], [26].

Coeficientul de cuplaj piezoelectric depinde de condițiile limită particulare, mecanice și electrice. Câteva valori reale, prezentate în *tabelul 1.1.*, dovedesc avantajele materialelor piezoceramice față de cuarț, (*tabelul 1.1.*)

Tabelul 1.1.

<i>M a t e r i a l</i>	<i>K</i>
Cuarț	0,1
Titanat de bariu	0,4
Zirconat titanat de plumb, (PZT)	0,5 ÷ 0,7

Totuși, trebuie făcută o distincție între *coeficientul de cuplaj* al materialului piezoceramic și *coeficientul de cuplaj al elementului rezonant*, care prezintă unde staționare; astfel doar o parte din energia elastică este cuplată dielectric, pe când în cazul materialului există o densitate uniformă de energie elastică.

2. *Factorul de calitate mecanic*, Q_m , caracterizează materialul piezoceramic din punct de vedere al comportării în oscilație mecanică, el este dat de expresia:

$$Q_m = \frac{\omega_0 \cdot M}{R_m}, \quad (1.15)$$

unde: M - masa sistemului piezoceramic oscilant, [Kg];

ω_0 - frecvența unghiulară proprie, [Hz];

R_m - rezistența totală de pierderi datorate acțiunilor mecanice, [Ω].

3. *Factorul de disipare electric*, reprezintă tangenta unghiului de pierderi, $tg\delta$, care caracterizează pierderile electrice în material.

4. *Temperatura "Curie"*, T_c , este specifică fiecărui material și reprezintă temperatura maximă la care ceramica prezintă proprietăți piezoelectrice, fiind legată de tranziția între fazele feroelectrică și paraelectrică ale ceramicii respective [4], [15].

1.2.2. Tipuri de materialele piezoceramice

Primul material piezoceramic folosit în tehnică a fost *titanatul de bariu*, în anul 1947. În 1952, apare *niobiatul de plumb piezoelectric*, urmând mai apoi, introducerea mai multor soluții pe bază de niobiați [3], [19].

Pentru prima dată s-au evidențiat efecte piezoelectrice stabile și foarte intense în soluții solide de titanat-zirconat de plumb în anul 1954. În anul 1970 a fost dovedită feroelectricitatea *titanatului de plumb*. De atunci, *zirco-titanatul de plumb*, cu diferite modificări compoziționale, a devenit ceramica piezoelectrică dominantă [3], [37].

Având proprietăți piezoelectrice superioare, *zirco-titanatul de plumb (PZT)* și combinațiile acestuia cu alți aditivi, se regăsesc, în prezent, cu aplicații în SUA, Germania, fosta URSS, Anglia, Franța, Olanda, Suedia, Polonia ș.a.

În **România**, primele materiale piezoceramice sunt realizate de dată recentă, ca urmare a eforturilor *Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Materialelor, (INCDFM)* din București. Au fost asimilate unele tehnologii de elaborare din străinătate, iar în prezent s-au obținut unele tipuri ca rezultat a propriilor cercetări [15], [23], [88].

Primele elemente piezoceramice produse de INCDFM-București au fost realizate în forme și dimensiuni diferite, dar împărțite din punctul de vedere al rețetelor aplicate [89], în două mari categorii:

- *MPT-01* - destinate construcției traductoarelor mecano-electrice;
- *MPG-01* - destinate construcției generatoarelor de ultrasunete.

De asemenea, ICPE-București a realizat elemente cu compoziții asemănătoare, destinate fabricării generatoarelor de ultrasunete marcate cu simbolurile: *PZ-A* și *PZ-B*, [89].

În prezent, în laboratoarele *INCDFM-București* se elaborează alte 15 tipuri de compuși noi, încadrați în 5 sisteme distincte: *Fe-La*, *Fe-La-Bi*, *Zr-Ti*, *Nb-Li* - cu compuși stoichiometrici, respectiv sistemul *Bi-Li* - cu compuși cu vacanțe de tip A. Aceste materiale au o activitate piezoelectrică intensă, cu factori de cuplaj mare, ($K > 0,5$), fiind destinate mai mult utilizării lor în construcția rezonatoarelor de bandă largă, în aplicațiile care necesită puteri reduse [54].

În *tabelul 1.2.*, se prezintă valorile principalelor caracteristici pentru cele mai cunoscute și utilizate materiale piezoceramice, care ar putea fi studiate pentru a fi utilizate în construcția **TFP**. Sunt prezentate caracteristicile a 6 tipuri de materiale obținute de firme reprezentative din străinătate, iar 2 obținute în țară [2], [3], [10], [23], [43], [52], [88], [89].

(*Observație:* în cazul în care nu s-au putut obține informații în legătură cu unele valori ale caracteristicilor materialelor piezoceramice, în *tabelul 1.2.*, locul s-a marcat cu linie (" -").

Tabelul nr.1.2.

Mări- mea	Unit.de măsură	PZT	P4-68 Q&S Franța	PZT SA Vernitron Anglia	P5 Sonox SUA	PXE 5 Philips Olanda	Piezolan Germania	T5 INCDFM-București România	FeLal
0.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
T_c	$^{\circ}\text{C}$	326	165	365	-	285	350	350	374
ρ_m	$10^3 \cdot \text{kg/m}^3$	-	7,1	7,45	7,7	7,6	7,5	7,5	7,46
S_{33}^E	$10^{-12} \cdot \text{m}^2/\text{N}$	17,1	19,6	18,8	19,0	18,9	17,6	18,8	19,47
S_{11}^E	"	13,8	18,2	16,4	16	15,4	15	18,1	17,62
S_{45}^E	"	-	-	47,5	19	38,5	34	-	53,9
S_{12}^E	"	-4,07	-6,92	-5,41	-	-5,08	-4,8	-	-6,29
S_{13}^E	"	-5,8	-	-	-	-	-6	-	-
S_{11}^D	"	12,4	16,56	14,4	14,26	13,3	13,8	-	15,58
S_{33}^D	"	4,35	11,15	9,46	10	8,8	11,7	-	10,7
S_{45}^D	"	-	-	25,20	-	21,7	21,8	-	27,5
S_{12}^D	"	-5,38	-8,56	-7,31	-	-6,86	-5,98	-	-8,33
σ	-	0,295	0,38	0,3	-	0,3	0,32	0,4	0,35
Q_m^E	in modul radial	500	80	75	90	80	80	80	80
N_P^E	Hz/m	-	2030	-	-	2000	2150	2000	1950
N_I^E	"	-	1400	1400	-	1460	1540	1355	1380
N_5^E	"	-	-	825	-	930	1030	-	855
N_3^D	"	-	1760	1845	-	-850	-	1800	1770
$\varepsilon_{33} / \varepsilon_0$	-	730	2800	1700	1600	1800	800	1550	1564

Tabelul 1.2. (continuare)

0.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
$\epsilon_{33}^s / \epsilon_0$	-	399	1600	830	-	-	320	-	-
$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	-	1180	-	-	-	1800	-	-	-
$\epsilon_{11}^s / \epsilon_0$	-	612	-	1730	-	1800	1040	-	-
ρ_{el} (25 °C) $\Omega \cdot m$	-	-	10^{10}	-	-	10^{12}	-	10^{11}	10^{12}
$tg \delta$	10^{-3}	4	20	20	20	20	25	<20	17
K_p	-	0,52	0,54	0,60	0,54	0,58	0,48	0,61	0,61
K_{33}	-	0,67	0,65	0,705	0,7	0,7	0,58	0,66	0,671
K_{31}	-	0,31	0,30	0,34	0,33	0,34	0,28	>0,31	0,34
K_{15}	-	0,69	-	0,685	0,67	0,65	0,60	-	0,70
d_{33}	10^{-12} m/V; C/N.	229	480	374	340	356	215	330	348
d_{31}	"	-93,5	-200	-171	-160	-169	-90	-164	-168
d_{15}	"	494	-	584	-	515	380	-	605
g_{33}	10^{-3} Vm/N; m ² /C.	34,5	20	24,8	24	23,2	31	25	25,1
g_{31}	"	-14,5	-8	-11,4	-11	-11,3	-14,9	-12,3	-12,1
g_{15}	"	47,2	-	38,2	-	32,5	49	-	43,7

Din analiza bibliografică a surselor de informare avute la dispoziție, din diverse colecții de publicații periodice și de literatură tehnică, tipologia materialelor piezoceramice se diversifică, apărând mereu noi materiale, unele cu performanțe ridicate sub diferite aspecte unilaterale ale unor caracteristici, sau altele cu destinații precise, cu caracteristici mereu optimizate, după posibilitățile tehnologice de elaborare, existente [4].

Cele mai mari performanțe s-au obținut în direcția obținerii unor performanțe la extreme, cum ar fi: elemente cu *grosimi* mici, de ordinul micronilor, sau de dimensiuni mari, de ordinul centimetrelor; de asemenea, s-au obținut elemente de forma peliculelor sau a blocurilor, în variante compoziționale singulare sau înglobate în structura unor materiale compozite, împreună cu fibre metalice, de sticlă, polimeri ș.a. [13], [57], [45], [117].

1.2.3. Aplicații actuale ale materialelor piezoceramice

Datorită proprietăților deosebite pe care le prezintă materialele piezoceramice și a modalităților diverse de realizare, an de an se lărgeste sfera de aplicabilitate a acestora.

Cele mai multe aplicații vizează domeniile sonor și ultrasonor, unde pot dezvolta importante puteri acustice. În anii 1935-47, dozele de pick-up se realizau din monocristale feroelectrice de sare de Rochelle [20].

Odată cu descoperirea titanatului de bariu, rolul a fost preluat de piezoceramice în diverse variante principale și constructive. La început, printre aplicațiile practice s-au remarcat două variante diferite, în care variațiile forței din acul dozei se transformă în variații ale tensiunii corespunzătoare câmpului electric generat perpendicular pe direcția aplicării tensiunii mecanice; cele două variante se deosebesc prin culegerea semnalului în două moduri diferite: în serie și în paralel.

Principial asemănătoare este soluția adoptată pentru realizarea traductoarelor de sunet, respectiv construirea microfoanelor cu lamelă bimorfă piezoceramică din **PZT**. Astfel, o lamelă bimorfă este incastrată pe un suport și preia vibrațiile unei membrane elastice, transformându-le în variații de tensiune, corespunzătoare solicitărilor acustice recepționate; sau, varianta în care vibrațiile membranei sunt transmise prin intermediul unei lamele bimorfe **PZT**, solicitată de către amplitudinile vibrațiilor.

Traductoarele piezoceramice fac parte din grupa traductoarelor electromecanice, funcționând ca un sistem oscilant care, pe baza efectului piezoelectric convertește energia electrică în energie mecanică și invers [20].

Aplicațiile acestora se regăsesc în diversitatea constructivă a traductoarelor electromecanice. De mare sensibilitate se dovedesc traductoarele din sistemele de măsurare a vibrațiilor, accelerației, debitului, presiunii ș.a. [26], [31].

În figura 1.17. - a, se prezintă principiul unui accelerometru piezoceramic bazat pe convertirea solicitărilor la forfecare a unui tub piezoceramic polarizat pe direcția longitudinală și recepție a solicitărilor unei mase seismice pe direcție transversală [46], [50]. Culegerea semnalului se face de pe suprafețele interioare și exterioare metalizate ale tubului piezoceramic. În figura 1.17. - b, este prezentată soluția constructivă cu convertirea solicitărilor la compresiune a elementelor piezoceramice. În aceste aplicații se folosesc de regulă elemente piezoceramice de tip **PZT**, cu coeficient de cuplaj planar $K_p = 0,6$, respectiv cu factor de calitate $Q_m = 80$ [7], [25].

De asemenea, materialele piezoceramice de tip **PZT**, cu coeficient planar $K_p = 0,58$ și factor de calitate $Q_m = 1000$, se folosesc pentru construirea dispozitivelor generatoare de ultrasunete, de puteri mici și mijlocii, cuprinse în intervalul de valori (10 ... 300) W [20], [30].

Firma *Burleigh Instruments, (SUA)*, [12], folosește materialele de tip **PZT** pentru realizarea unor sisteme de deplasare submicronică, bazate pe efectul invers piezoelectric. În figura 1.18, se prezintă o schemă principială a unui asemenea sistem, numit și actuator. După cum se observă, se utilizează un pachet de discuri sau plăcuțe piezoceramice fixate mecanic între ele, a căror electrozi sunt conectați electric, în paralel.

Precizia deplasărilor Δt este limitată, de performanțele electronicii, care asigură comanda de alimentare cu curenți de înaltă tensiune, precum și de controlul asupra unui constant efect de histereză.

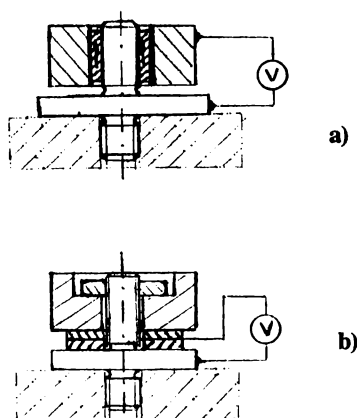


Figura 1.17. - Accelerometre piezoceramice.

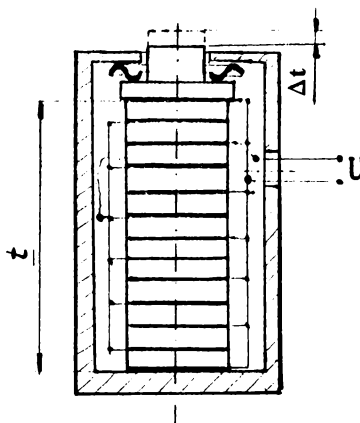


Figura 1.18. - Actuator piezoceramic.

Astfel, se pot determina deplasări controlate, foarte reduse, ajungându-se la nivelul nanometrilor [11].

Aceeași firmă, folosind proprietatea extensiei longitudinale și a contracției transversale a tuburilor piezoceramice, proporționale cu tensiunea de alimentare, a realizat *motoare liniare*, (*inchworm motors*), a căror rezoluție mecanică ajunge la 4 nm [12]. Aceste sisteme se aplică mai ales în domeniul opticii și fizicii laserului, pentru a satisface necesitățile de înaltă precizie de poziționare la diversele reglaje [12].

Tot în domeniul micropoziționării, firma *Physik Instrumente*, folosește elemente piezoceramice în construcția *translatoarelor*, în principiu, construite asemănător cu modelul din *figura 1.18*. O aplicație standard a acestor *translatoare* o constituie asigurarea preciziei *meselor de poziționare* liniară cu precizie *micrometrică*, încărcate static chiar cu sarcini mecanice mari și foarte mari, cuprinse în intervalul (1000 ... 20000) N, având *cursa între* $5\text{ }\mu\text{m}$ și $6\text{ }\mu\text{m}$, cu o *rezoluție de* $0,02\text{ }\mu\text{m/V}$ [26].

Firma olandeză *Philips*, utilizând o gamă largă de piezoceramice de tip *PXE*, (din care *PXE-5* are caracteristicile prezentate în *tabelul 1.1.*), realizează *transductoare de înaltă intensitate a ultrasunetelor*, cu aplicații în curățirea cu ultrasunete, (*PXE-42*), sudură cu ultrasunete, (*PXE-43*) ș.a. De asemenea, cu ajutorul lamelelor piezoceramice *PXE-elastic* sunt construite *transductoarele electroacustice*, (microfoane sonice și ultrasonice, precum și generatoare de sunet). O altă aplicație a piezoceramicelor *PXE* ale firmei *Philips* o constituie *generatoarele de tensiuni mari* necesare obținerii scânteilor electrice [26].

În România, la *Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Materialelor-București*, (Măgurele), s-au realizat o gamă largă de tipodimensiuni de elemente piezoceramice destinate: dozelor pentru pick-up, receptoare telefonice, transductoare destinate controlului nedistructiv al materialelor cu ultrasunete, generatoare de scântei, transductoare de ultrasunete pentru comunicații și detecție submarină, pentru dispozitive destinate curățirii și prelucrării metalelor și materialelor plastice, detectoare de vibrații, aparate de măsurare a rugozității, a debitului, senzori de contact, precum și pentru diferite aplicații medicale [20], [62].

Având în vedere *randamentul de transformare electromecanic mai mare* la materialele piezoceramice, în comparație cu cuarțul, se pot prefera aceste materiale, mai ales pentru aplicațiile care se referă la emisia și recepția de ultrasunete, construirea de transductoare, aplicații de putere ș.a.[19].

După cum se observă, în această succintă prezentare a aplicațiilor materialelor piezoceramice, nu s-au făcut referiri la folosirea specială a acestora pentru măsurarea forțelor, datorită faptului că, încă nu s-a lansat această aplicație, datorită unor limite calitative presupuse. De aceea, prezenta teză își propune să aducă câteva argumente în favoarea posibilității, ca pentru anumite aplicații, să se utilizeze în construcția transductoarelor de forță, a materialelor piezoceramice, mai ales a celor de producție indigenă.

2. CONTRIBUȚII PRIVIND DETERMINAREA UNUI MODEL SISTEMIC GENERALIZAT DE OPTIMIZARE A UTILIZĂRII MATERIALELOR PIEZOCERAMICE ÎN CONSTRUCȚIA TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ

2.1. TENDINȚE ACTUALE ÎN DOMENIUL MĂSURĂRII FORȚELOR

În prezent, cercetarea științifică din toate domeniile, privind extinderea automatizării și robotizării în procesele industriale, medicină, tehnică spațială ș.a., este de neconceput fără utilizarea traductoarelor de forță [88].

Necesitatea măsurării forțelor, se manifestă din ce în ce mai mult, atât în cadrul proceselor de mecanizare și automatizare din sectoarele industriale, cât și în laboratoarele de cercetări asupra materialelor [108].

În realizarea **TF** au fost realizați pași spectaculoși, mai ales în ceea ce privește obținerea unor parametri electrici variabili din categoria semnalului analog, dar nepotrivii pentru sistemele de control digitale, deoarece conversia analog-digitală duce la creșterea accentuată a costurilor sistemului [19], [26].

Odată cu dezvoltarea tehnologiilor de fabricație și a performanțelor atinse de electronică, se vor putea extinde **TF** capabile de a asigura la ieșire semnale digitale stabile.

Principalele metode de măsurare a forțelor, prezentate, în principiu, în *subcapitolele 1.1.2.* și *1.1.3.*, s-au dezvoltat aproape în paralel, dobândindu-se performanțe remarcabile în construcția traductoarelor, aplicându-se fiecare dintre metode, cu posibilitățile și limitele fiecăra.

În scopul evidențierii perspectivei de dezvoltare a traductoarelor de forță, în *figura 2.1.*, se prezintă o prognoză, elaborată pe baza unor statistici ale unor specialiști din SUA și câteva țări europene dezvoltate, privind utilizarea acestora în domeniul automatizării și robotizării proceselor industriale, estimându-se posibilități de creștere anuală cu (10 ... 15) % [26].

Creșterile mari anuale, din perioada cuprinsă între anii 1995 și 2000, de 44,5%, sunt marcate, atât de mărirea numărului de firme, pe plan mondial, producătoare de traductori de forță, cât și a măririi numărului de tipodimensiuni de traductoare produse de firmele deja consacrate unei asemenea fabricații.

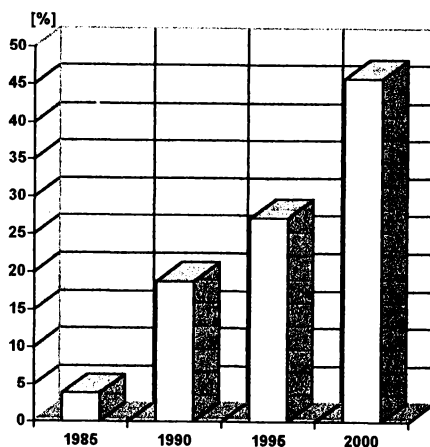


Figura 2.1. - Prognoza utilizării traductoarelor de forță.

Printre firmele a căror produse au fost studiate se pot menționa:

- **Kistler Instrumente AG** din Elveția;
- **Brüel & Kjær** din Danemarca;
- **Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH** din Germania;
- **PCB Piezotronics, Inc.** din SUA;
- **Sensor Developments Inc.** din SUA;
- **SCAIME S.A.** din Elveția;
- **INTERFACE, Inc.** din SUA;
- **Siemens AG** din Germania;
- **Entran SA** din Franța;
- **Unitronex Corporation** din Polonia;
- **Kaliber** din Ungaria;
- **Zeiss Ikon AG** din Germania;
- **SENSOTEC** din SUA.

Progresele produselor acestor firme sunt realizate atât sub aspectul preciziilor raportate

la mărimile forțelor măsurate, cât mai ales la diversitatea constructivă cu posibilitățile cele mai diverse de implementare ale traductoarelor de forță în diversele standuri de încercări și măsurări și mai ales în sistemele de supraveghere automată ale instalațiilor din diferite domenii industriale.

Pornind de la caracteristicile **TF** produse de firmele de mai sus, se poate aprecia existența unei evoluții interesante a traductoarelor, orientate spre: reducerea factorului de risc în utilizarea acestora, precizia dimensională, lărgirea plajei de măsurare a forțelor. O asemenea evoluție se prezintă în figura 2.2.

Traductoarele de forță piezoceramice se pot regăsi, în: grupa TF-mecano-electrice, pot funcționa pe bază de frecvență proprie, pot fi concepute ca TF cu captori multipli, sau TF combinate, pe bază de multi-/demulti- plicări.

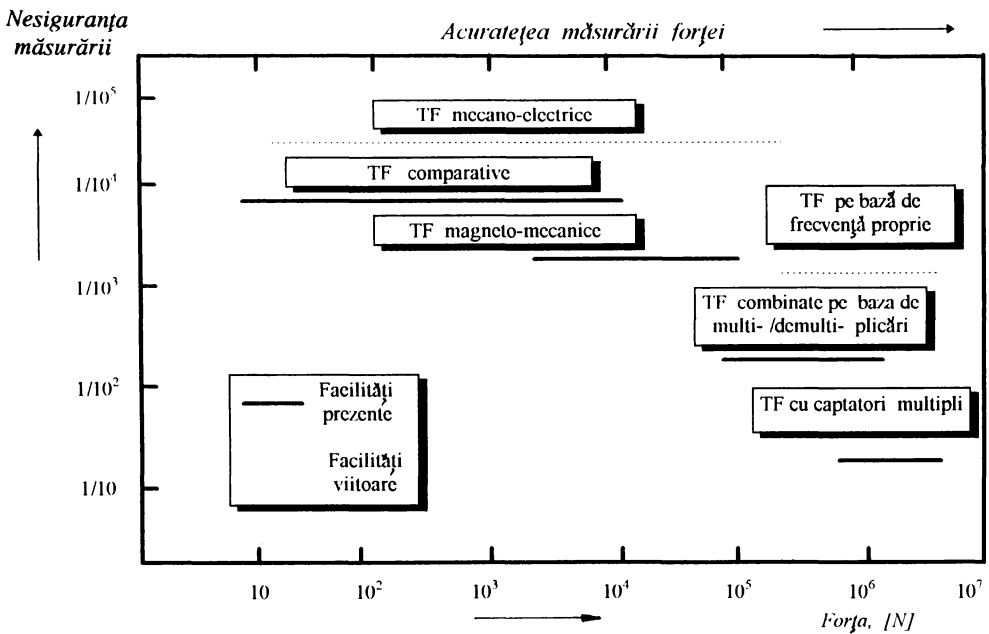


Figura 2.2. - Evoluția traductoarelor de forță.

În concluzie, stadiul actual al dezvoltării construcției de **TF** este greu de definit, datorită dinamicii evoluției, fapt ce preconizează, în continuare, o dezvoltare ascendentă, către lărgirea domeniului de aplicabilitate a **TF**, mărirea numărului, precum și realizarea unui progres calitativ al măsurărilor [25].

2.2. STUDIUL COMPARATIV AL PERFORMANTELOR TRADUCTOARELOR PIEZOELECTRICE CONSTRUITE PÂNĂ ÎN PREZENT

Proprietățile semnalului, proporțional cu forța supusă măsurării, rezultat prin intermediul *traductoarelor piezoelectrice*, au determinat câteva firme de marcă să adopte această soluție.

Astfel, firma **Zeiss Ikon AG** a realizat traductoare piezoelectrice destinate forțelor mijlocii sub $4\,000\text{ daN}$, cu acționare la compresiune, convertirea acționării mecanice în semnale electrice realizându-se prin intermediul a două piezo-cristale de cuarț; având o frecvență proprie foarte ridicată, permite măsurarea forțelor cu variație extrem de rapidă, chiar cu șocuri. Deasemenea, aceste traductoare prezintă o bună liniaritate a măsurătorilor și suportă sarcini specifice mijlocii, de aproximativ 250 daN/cm^2 [15].

Firma **SENSOTEC** (SUA), a realizat o gamă largă de traductoare de forță cu posibilități multiple de măsurare, robuste, cu forme și dimensiuni diverse, majoritatea realizate în construcție sudată. Aceste **TF** permit realizarea măsurării operative în condiții de amplasare dificile, cu solicitări la compresiune preluate de îmbinări filetate din montaj, după direcție axială. S-au analizat performanțele a *13 tipodimensiuni* realizate de firmă, cu aplicații pentru sistemele de supraveghere automată a dispozitivelor de încercări a materialelor, asigurându-se și sistemele de preluare și transmitere a semnalului [105].

În ultima perioadă, sunt din ce în ce mai cunoscute performanțele **TF** piezoelectrice cu *cuarț*, produse de firma **PCB PIEZOTRONICS, Inc** (SUA), care permit măsurarea forțelor de compresiune dinamice, cu aplicarea acestora în mod crescător, sau cu șoc. Aceste traductoare, prezintă o rigiditate comparabilă cu cea a oțelurilor dure și sunt recomandate aplicațiilor de încercări ale materialelor, testări ale diferitelor subansamble la vibrații, șocuri și chiar pentru supravegherea forțelor de lucru. Firma produce o gamă foarte diversă de **TF** piezoelectrice cu posibilități de măsurare a forțelor cu valori până la 500 kN , cu dimensiuni cuprinse între $\varnothing 16,5 \times 8$ [mm · mm] și $\varnothing 75 \times 17$ [mm · mm], realizate în două variante de culegere și preluare a semnalului: în *tensiune electrică* și *sarcină electrică* [24].

Firma care, probabil, deține supremația performanțelor și a aplicabilităților **TF** piezoelectrice cu cuarț este **KISTLER Instrumente AG**, din *Elveția*, cu filiale în *SUA, Japonia, Anglia, Germania, Canada* ș.a., precum și cu distribuitori în peste 30 de țări, de pe 6 continente ale lumii.

Renumerele acestei firme se datorează faptului că aplicând fenomenele *piezoelectric* și *piezorezistiv*, realizează sisteme de măsurare pentru:

- **forțe** cuprinse între $10^{-3} N$ și $10^6 kN$;
- **momente și forțe de așchiere**, după 1, 2 sau 3 direcții de măsurare simultană.

De asemenea, firma produce în 8 mărimi diferite **TF** piezoelectrice pentru măsurarea forțelor "înlănțuite", cu solicitări la compresiune și întindere, cu aplicații pentru măsurarea solicitărilor din suportți, din diferite suspensii, sau alte solicitări la compresiune etc., [46].

Sunt realizate o gamă largă de tipodimensiuni. Spre exemplu, categoria de traductoare de forță pentru măsurarea forțelor de compresiune, de tip "șabă", care se încadrează cu cotele principale între următoarele limite: - *diametrul exterior*, (**D**), cuprins în intervalul (14 ... 120) mm; - *diametrul interior*, (**d**), cuprins în intervalul (6,5 ... 66) mm; - *înălțimea*, (**H**), cuprinsă în intervalul (8 ... 25) mm.

Alte caracteristici: - *rigiditatea*: 15 μm , la măsurarea unei forțe de 100 tf; - *liniaritatea*: 1%; - *rezistența de izolație*: $10^{14} \Omega$; - *coeficientul de temperatură*: 0,025 % / $^{\circ}C$; - *temperatura de utilizare* cuprinsă între -150 și + 240 $^{\circ}C$; - *capacitatea maximă de măsurare*, precizată pe tipodimensiuni cuprinse între 1 500 kgf și 100 000 kgf; - *masa* cuprinsă între 6,5 g și 1 500 g.

Firma realizează traductoare de forță pentru culegerea informației, după 1, 2 sau 3 direcții de acțiune a forței.

Caracteristicile **TFP** produse de aceste firme, nu diferă într-o prea mare măsură, dar fiecare reușind să exceleze prin unele performanțe, funcție și de aplicațiile pentru care au fost destinate. Firmele asigură, de asemenea, aproape de fiecare dată, pentru aplicații și aparatura electronică de prelucrare a semnalului.

Acest studiu comparativ, nu are pretenția de a cuprinde în totalitate tipologia de fabricație a **TF** piezoelectrice din întreaga lume industrială, dar datele culese și prezentate mai sus, pot constitui suficiente puncte de plecare în abordarea *sistemică a optimizării utilizării materialelor piezoelectrice*, ca elemente sensibile în construcția **TF**.

Analizând datele prezentate, se remarcă supremația unor firme, privind unele performanțe legate de precizia măsurării, sau posibilitatea de miniaturizare, sau calitățile semnalului cules și prelucrat, dar, în același timp se pot deduce și unele aspecte ale măsurărilor forțelor, pe care folosirea efectului piezoelectric nu le poate rezolva. Cel mai important aspect este legat de posibilitatea de măsurare a forțelor care acționează în regim static și quasistatic, respectiv *menținerea unui timp nelimitat a semnalului electric cules*, pe toată perioada solicitărilor.

2.3. ALEGEREA INDICATORILOR DE PERFORMANȚĂ AI TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ PIEZOCERAMICE

Indicatorii de performanță a **TF** piezoceramice se aleg ținând cont, în mare măsură de *indicatorii de performanță a TF piezoelectrice cu cuarț*, prezentați anterior, în *subcapitolul 2.2.*, precum și din concluziile desprinse, după experimentarea modelelor realizate și studiate de autor.

Gruparea indicatorilor se poate face după câteva caracteristici de bază, cum ar fi:

A. - caracteristici statice:

- *mărimile de intrare*: domeniul de forțe de măsurat, numărul direcțiilor de acțiune a forțelor urmărite;
- *mărimile de ieșire*: mărimea semnalului de ieșire, tipul mărimii de ieșire (tensiune sau sarcină electrică), sensibilitatea;

B. - caracteristici dinamice:

- eroarea dinamică;
- frecvența acțiunii forțelor de măsurat;

C. - caracteristici energetice:

- consumul de putere (sau de energie) necesar funcționării;
- puterea asociată semnalului de ieșire;

D. - caracteristici constructive:

- robustețea, ca rezistență: - mecanică (vibrații, șocuri, capacitatea de supraîncărcare), termică, la umiditate, agenți chimici, câmpuri electrice și magnetice, presiune, accelerație ș.a;
- forma și dimensiunile geometrice, cote de gabarit;
- fiabilitate;

E. - capacitatea de unificare, standardizare;

- stabilitatea comportării în exploatare pe clase de întrebuințare;
- posibilitatea stabilirii unor caracteristici general-valabile și în mod distinct caracteristici particulare, în utilizarea **TFP**;

F. - caracteristici tehnico-economice:

- preț de cost al măsurării forțelor raportat la efectele benefice pe care le poate determina în aplicarea **TFP**.

2.4. SISTEM GENERALIZAT DE UTILIZARE A TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ PIEZOCERAMICE

2.4.1. Logistica utilizării traductoarelor de forță piezoceramice

Pentru tratarea problemei conceperii unui *sistem generalizat de utilizare a traductoarelor de forță piezoceramice*, se pornește de la o schema logistică, *figura 2.3*, întocmită pe baza experimentelor proprii de utilizare a **TFPc**, care se încadrează în grupa măsurătorilor electrice a unor mărimi neelectrice [17], [22], precum și a informațiilor culese din materialele publicate, [45], [89], de firme producătoare de **TFP**, pe bază de *cuarț*, a căror performanțe au fost prezentate în *subcapitolele 2.1., 2.2.*

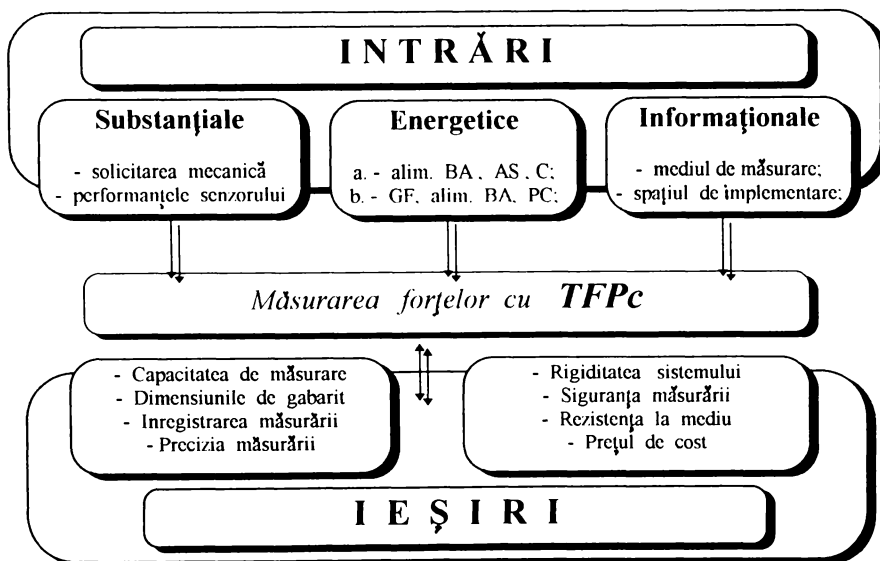


Figura 2.3. - Schema logistică a utilizării TFPc în măsurarea forțelor.

Schema logistică reprezintă succesiunea proceselor și stărilor pe care le traversează informația de *forță*, cu disponibilitatea de a fi convertită într-o mărime electrică, care să poată

fi reflectată, sau înregistrată, ca o mărime, cu unitate de măsură de *forță*, cu o valoare cât mai apropiată de valoarea reală a forței de măsurat.

Analiza *schemei logistice* conduce la următoarele concluzii:

A. - INTRĂRILE, sunt reprezentate de următoarele componente:

1. Intrarea substanțială, reprezentată de solicitarea mecanică de **forță**, F_i , care poate fi de natură statică, quasistatică sau dinamică, se transmite **TF**, prin contactul cu armătura metalică, apoi către electrod și elementelor piezoceramice, elementele componente ale **senzorului**, (ca element elastic, destinat culegerii informației de solicitare a forței și component al **TF**).

Determinante, pentru calitatea informației culese, sunt proprietățile materialelor care intră în componența **senzorului**, precum și a elementelor de legătură. Unele dintre proprietăți afectează direct calitatea informației culese, pentru a se converti în semnale electrice proporționale cu solicitarea mecanică, cum ar fi: conductibilitatea electrică a armăturii și a electrodului, caracteristicile piezoelectrice ale elementelor piezoceramice ș.a., iar altele afectează direct caracteristicile mecanice ale **TF**, cum ar fi: rigiditatea, fiabilitatea, dimensiunile de gabarit ș.a.

2. Intrarea energetică, este relativă, funcție de parametrii de convertire a forței în mărimi electrice. Astfel, dacă se folosește *efectul direct piezoelectric*, este necesară energia doar de întreținere a blocului electronic de adaptare a semnalului electric, (amplificatorul de sarcină, filtrul, înregistrarea/afișarea valorilor). Dacă se folosește varianta de evaluare a solicitărilor mecanice prin intermediul variației *frecvenței proprii de rezonanță* a **TF**, atunci participarea energetică trebuie să asigure și activarea oscilatorie a **TF**, spre exemplu, prin intermediul unui versatester.

3. Intrarea informațională, este reprezentată de datele privitoare la condițiile de mediu (temperatură, umiditate, agenți chimici externi, vibrații) și spațiu în care are loc măsurarea (dimensiunile în care trebuie implementat **TF**).

B. IEȘIRILE, sunt reprezentate de elementele care caracterizează măsurarea propriu-zisă cu ajutorul TFPc, cum ar fi:

1. *capacitatea de măsurare*, care reprezintă plaja și natura forțelor care pot fi măsurate;
2. *modalitatea de informare/inregistrare* a valorilor măsurandului:

- informarea asupra valorii forței măsurate poate fi:
 - cu afișajul numeric al valorilor;
 - determinarea valorii citite pe un cadran;
 - sesizarea luminoasă sau sonoră la depășirea unor valori prescrise;

- înregistrarea valorilor se poate face prin intermediul:

- benzii de hârtie;
- benzii magnetice;
- memoriei calculatorului;

3. *rigiditatea TFPc*;

4. *dimensiunile de gabarit al TFPc*;

5. *precizia de măsurare a TFPc*, unde sunt incluse: abaterile de la valorile determinate la etalonare, stabilitatea termică, durata menținerii în timp a semnalului măsurării, repetabilitatea ș.a.;

6. *rezistența la*: șocuri, agenți chimici, umiditate ș.a.;

7. *gradul de miniaturizare*, în raport cu locul minim posibil de afectat pentru implementarea TFPc-ului;

8. *siguranța* funcționării sistemului de măsurare, cu existența posibilității de avertizare în cazul existenței unor vicii de măsurare;

9. *prețul de cost*, raportat la performanțele de măsurare.

Cerințele generale impuse oricăror tipuri de traductoare de forță, pentru respectarea condițiilor de corespondență bijectivă între informația de intrare de la măsurand și mărimea de ieșire, sunt următoarele [10], [38], [62]:

- executarea primară a informației;
- asigurarea siguranței în exploatare;
- semnalul furnizat să fie ferm, cu precizie și neperturbator față de măsurand;
- să prezinte clar domeniul de măsurare, cu posibilitatea reglării sensibilității;
- să admită suprasolicitări de durată;
- să prezinte o rigiditate ridicată, rezistență la șocuri și acțiunea mediului în care are loc măsurarea, gabarit redus și masă mică;
- să aibă o construcție modulată cu posibilitatea interchimbabilității;
- cuplarea și decuplarea de la măsurare să fie facilă;
- reglare și întreținere ușoară;
- să asigure respectarea normelor de tehnică a securității muncii;
- să asigure costuri reduse ale măsurării.

2.4.2 Stabilirea funcțiilor generalizate de optimizare și a restricțiilor aferente

Având în vedere aceste **cerințe** și schema logisticii utilizării **TFPc**-urilor în acțiunile de măsurare a forțelor, rezultă importanța deosebită pe care o prezintă acțiunea de **OPTIMIZARE**.

În vederea abordării optimizării utilizării materialelor piezoceramice în construcția tractoarelor de forță este necesară stabilirea funcțiilor generalizate de optimizare și a restricțiilor aferente, ținând cont de indicatorii de performanță a TF [1], [83].

Optimizarea utilizării materialelor piezoceramice în construcția tractoarelor de forță, presupune aplicarea unui ansamblu de acțiuni care să determine încadrarea cât mai bine posibil a **TFPc**-urilor în cerințele impuse, considerând concomitent acțiunile vizând *intrările, ieșirile și legăturile interne*, din sistemul generalizat al utilizării **TFPc**, ca părți active, aflate într-o permanentă interacțiune. Aceasta se consideră, la rândul său, ca o succesiune de elemente operatorii, cu caracteristici bine individualizate, corelate și determinate într-o interdependență cu variantele constructive de **TFPc**, variantele de măsurare și condițiile de aplicare.

Pe baza tuturor considerentelor prezentate anterior, în *figura 2.4* se prezintă schema unui model desfășurat pe *intrări-ieșiri*, pentru un sistem generalizat de utilizare materialelor piezoceramice în construcția **TF**.

Pentru ușurarea operării în continuare cu variabilele din sistem, acestea au fost notate fiecare cu câte o majusculă, legată de denumirea acestora, având ca indice grupa de variabile din care face parte. Variabilele au fost grupate astfel:

A. Variabilele de intrare, considerate ipotetic controlabile și stabilite inițial, se pot împărți în 3 grupe, astfel:

1. -grupa variabilelor legate de materialele piezoceramice utilizate, care include caracteristicile considerate cele mai importante în definirea calității acestora:

- constanta de deformare piezoelectrică, după "33", (d_{33}) - **D₁**;
- deformabilitatea mecanică, (compliance elastică după "33", s_{33}) - **S₁**;
- coeficientul de cuplaj electromecanic planar, (K_p) - **K₁**;
- factorul de calitate mecanic, (Q_m) - **Q₁**;
- rezistența la compresiune - **R₁**;
- starea suprafețelor metalizate - **M₁**;
- structura materialului ceramic sinterizat - **C₁**;

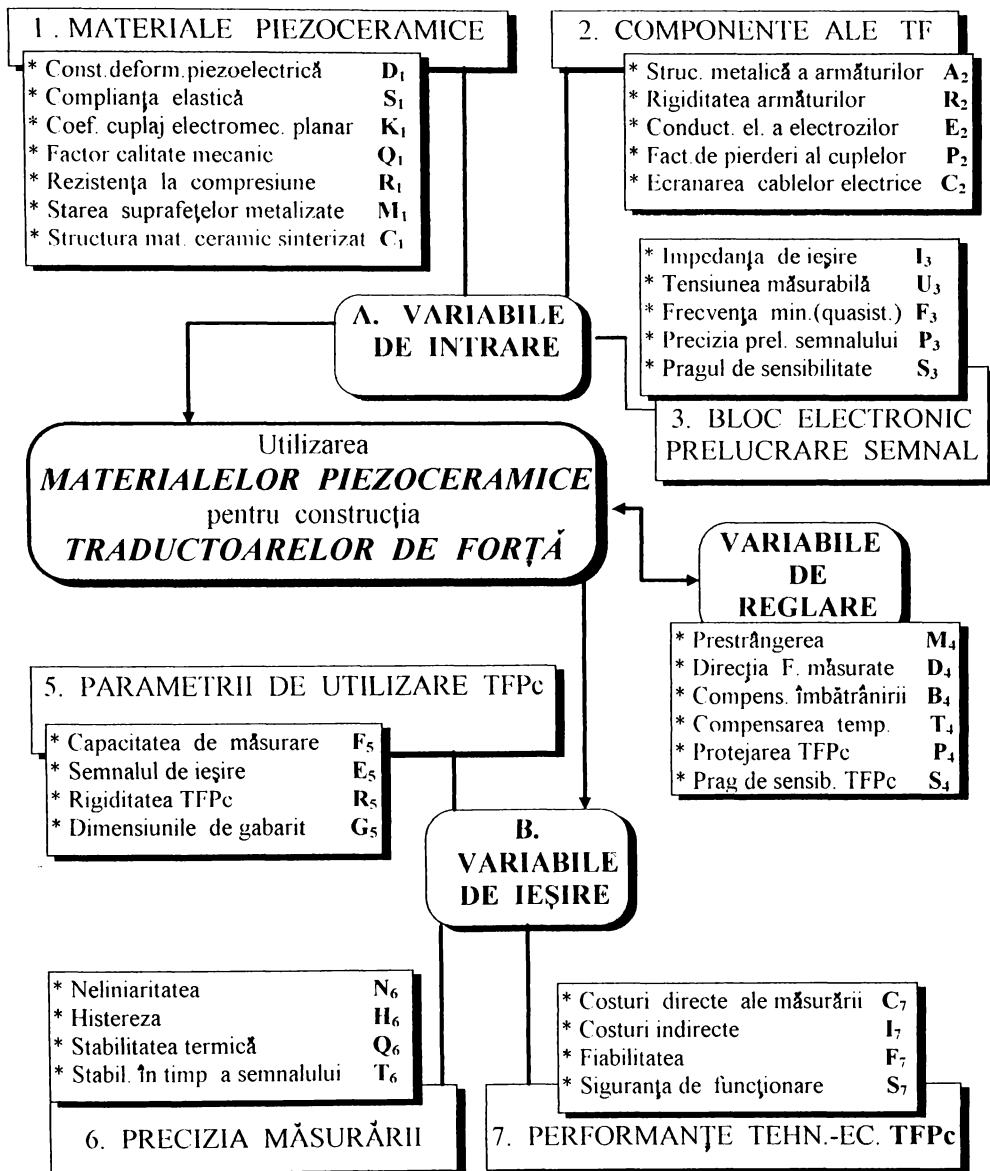


Figura 2.4. - Schema modelului sistemic generalizat de utilizare a materialelor piezoceramice în construcția TFPc.

2. - grupa variabilelor legate de alte componente ale TF utilizate, care include caracteristicile:

- structura metalică a armăturilor - Λ_2 ;
- rigiditatea armăturilor - R_2 ;
- conductibilitatea electrică a electrozilor - E_2 ;
- factorul de pierderi al cuplelor - P_2 ;
- starea de ecranare al cablurilor electrice de legătură - C_2 ;

3. - grupa variabilelor legate de blocul electronic de prelucrare semnal electric

- impedanța de ieșire - I_3 ;
- plaja de tensiune care poate fi măsurată - U_3 ;
- frecvența minimă în regim quasistatic - F_3 ;
- gradul precizie (fidelitatea prelucrării semnalului) - P_3 ;
- pragul de sensibilitate - S_3 ;

B. Variabilele de ieșire, care caracterizează funcționarea TFPC, în raport cu performanțele atinse, funcție de modificarea variabilelor de intrare. Aceste variabile mai poartă numele de *variabile de stare* și pot fi încadrate în două grupe

5. Variabile de stare legate de parametrii de utilizare a TFPC, care includ:

- capacitatea de măsurare - F_5 ;
- semnalul de ieșire - E_5 ;
- rigiditatea TFPC - R_5 ;
- dimensiunile de gabarit - G_5 ;

6. Variabile de stare legate de precizia măsurării:

- neliniaritatea - N_6 ;
- histereza - H_6 ;
- stabilitatea termică - Q_6 ;
- stabilitatea în timp a semnalului - T_6 ;

7. Variabile legate de performanțele tehnico-economice ale utilizării TFPC:

- costurile directe ale măsurării - C_7 ;
- costurile indirecte ale măsurării - I_7 ;
- fiabilitatea TFPC - F_7 ;
- siguranța în funcționare - S_7 ;

Variabilele de stare pot fi considerate, de asemenea, din punct de vedere tehnic controlate și comandate, printr-un ansamblu de variabile de legătură, care oferă posibilitatea reglajelor, numite și:

4. Variabile de reglare, cum sunt:

- tensiunea mecanică de prestrângere - \mathbf{M}_4 ;
- direcția forțelor de măsurare - \mathbf{D}_4 ;
- compensarea îmbătrânirii elementelor piezoceramice - \mathbf{B}_4 ;
- compensarea față de temperatura mediului de măsurare - \mathbf{T}_4 ;
- montarea **TFPc**, cu protecție față de posibیلی factori perturbatori - \mathbf{P}_4 ;
- pragul de sensibilitate a sistemului de măsurare cu **TFPc** - \mathbf{S}_4 ;

Variabilele prezentate mai sus acționează ca mărimi independente, dar pot fi admise, din considerente practice, unele relații de inter-determinare [83].

Criteriul principal de grupare a variabilelor din *figura 2.4.*, a fost dat de ordinea determinării și implicării variabilelor în procesul de măsurare.

2.4.3. Analiza globală a modelului sistemic de măsurare a forțelor cu ajutorul traductoarelor de forță

În vederea analizării complexe a sistemului, trebuie de la început să fie încadrat într-un sistem de clasificare. S-a aplicat varianta de clasificare dată de *S.Bir* [86], conform căreia, sistemele se împart după următoarele două criterii:

- după *gradul de nedeterminare*:
 - sisteme deterministe;
 - sisteme probabiliste;
- după *gradul de complexitate*:
 - sisteme simple;
 - sisteme complexe;
 - sisteme foarte complexe.

Sistemul supus analizei se încadrează în categoria sistemelor probabiliste, dar cu anumite simplificări, realizate cu scopul ușurării analizei, modelării, iar ulterior, al optimizării, sistemul poate fi adus în condiția unui *sistem determinist*; după gradul de complexitate se încadrează în grupa *sistemelor complexe*, caracterizate de: dimensiuni mari, număr mare de funcții, comportare complexă, cu variate legături directe și inverse, ultimele acționând, fie pozitiv fie negativ, micșorând, sau, respectiv măbind discordanța [122].

În următoarea etapă, se determină legăturile și relațiile de determinare dintre variabilele sistemului. Prin sistemul dat, s-au propus:

- N_i - variabile de intrare, unde:

$$N_i = 7 + 5 + 5 = 17, \quad (2.1)$$

- N_e - variabile de ieșire, unde:

$$N_e = 4 + 4 + 4 = 12, \quad (2.2)$$

- N_r - variabile de reglare, unde:

$$N_r = 6, \quad (2.3)$$

Astfel, numărul total al variabilelor propuse prin sistem, este:

$$N_t = N_i + N_e + N_r = 17 + 12 + 6 = 35, \quad (2.4)$$

În cadrul variabilelor sistemului este admisă natura vectorială sau tensorială a acestora, în cele mai multe cazuri, cu mai multe dimensiuni. Legăturile dintre variabile pot fi directe, cu sau fără influența sistemului de măsurare, unele însă, având chiar o poziție intermediară între cele două extreme. Practic, numărul de legături se stabilește prin cumulare.

Teoretic, sunt posibile legături între toate variabilele, dar, analizând unele ipoteze funcționale, rezultă, pentru studiu, modelare și optimizare, situația legăturilor dintre variabile prezentată în *tabelul 2.1*. Existența relației între două variabile a fost notată cu "1", iar inexistența legăturii între două variabile a fost notată cu "0".

Ponderea legăturilor existente între variabile se calculează cu relația:

$$P_{ie} = \frac{N_{ie}}{N_i \cdot N_e} \cdot 100 = \frac{134}{17 \cdot 12} \cdot 100 = 65,69\%, \quad (2.5)$$

Unde, N_{ie} reprezintă numărul total al legăturilor dintre variabile:

$$N_{ie} = \sum (V_i \rightarrow V_e) = \sum (V_i \leftarrow V_e) = \sum (V_e \leftarrow V_i) = 134, \quad (2.6)$$

iar, $(N_i \cdot N_e)$, reprezintă numărul total de legături posibile de considerat.

Tabelul 2.1.

Variabile de ieșire (V_e)	F ₅	E ₅	R ₅	G ₅	N ₆	H ₆	Q ₆	T ₆	C ₇	I ₇	F ₇	S ₇	Σ
Variabile de intrare (V_i)													
D ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	10
S ₁	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	8
K ₁	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	10
Q ₁	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	10
R ₁	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	9
M ₁	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	9
C ₁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
A ₂	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	7
R ₂	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	8
E ₂	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	8
P ₂	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	7
C ₂	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	8
I ₃	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	6
U ₃	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	5
F ₃	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	5
P ₃	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	7
S ₃	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	5
Σ ($V_i \rightarrow V_e$)	13	13	9	9	13	13	7	10	13	8	13	13	134

În continuare, considerând și cele $\{N_r = 6\}$ - variabile de reglare, rezultă situațiile legăturilor acestora cu variabilele de intrare, respectiv, cu cele de ieșire, prezentate în *tabelele* 2.2, și 2.3.

Tabelul 2.2.

Variabile de intrare (V_i)	D_1	S_1	K_1	Q_1	R_1	M_1	C_1	A_2	R_2	E_2	P_2	C_2	I_3	U_3	F_3	P_3	S_3	Σ
Variabile de reglare (V_r)																		
M_4	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	12
D_4	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	8
B_4	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	10
T_4	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	9
P_4	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	13
S_4	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	8
$\Sigma (V_r - V_i)$	5	5	5	6	2	2	2	3	2	2	6	2	2	2	2	6	6	60

Ponderea legăturilor existente între variabilele de reglare și variabilele de intrare se calculează cu relația:

$$P_n = \frac{N_{ri}}{N_r \cdot N_i} \cdot 100 = \frac{60}{6 \cdot 17} \cdot 100 = 58,82 \% , \quad (2.7)$$

Unde, N_{ri} reprezintă numărul total al legăturilor dintre variabile:

$$N_{ri} = \Sigma (V_r \neq V_i) = \Sigma (V_r - V_i) = \Sigma (V_i - V_r) = 56 , \quad (2.8)$$

iar, $(N_r \cdot N_i)$, reprezintă numărul total de legături posibile de considerat.

Tabelul 2.3.

Variabile de ieșire (V_e)	F ₅	E ₅	R ₅	G ₅	N ₆	H ₆	Q ₆	T ₆	C ₇	I ₇	F ₇	S ₇	Σ
Variabile de reglare (V_r)													
M ₄	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	8
D ₄	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	6
B ₄	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	7
T ₄	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11
P ₄	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	7
S ₄	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	6
$\Sigma (V_r - V_e)$	5	6	4	1	4	4	1	3	4	2	5	6	45

Ponderea legăturilor existente între variabilele de ieșire și variabilele de reglare se calculează cu relația:

$$P_{rr} = \frac{N_{rr}}{N_r \cdot N_e} \cdot 100 = \frac{45}{6 \cdot 12} \cdot 100 = 62,50 \% , \quad (2.9)$$

Unde, N_{re} reprezintă numărul total al legăturilor dintre variabile:

$$N_{re} = \Sigma (V_r = V_e) = \Sigma (V_r - V_e) = \Sigma (V_e - V_r) = 45, \quad (2.10)$$

iar, $(N_r \cdot N_e)$, reprezintă numărul total de legături posibile de considerat.

Făcând o raportare la sistemul global, din rezultatele de mai sus, se pot desprinde următoarele *concluzii*:

1- ponderea cea mai mare o au legăturile realizate între variabilele de intrarea și cele de ieșire, (66,69 %), prin intermediul procesului propriu-zis, încă insuficient de cunoscut;

2 - variabilele de reglare alese pentru procesul de măsurare cu **TFPC**, sunt mai legate de variabilele de ieșire, (62,50 %), decât de cele de intrare, (58,82 %), dar ponderile sunt destul de apropiate, dovedind alegerea relativ reprezentativă și echilibrată a variabilelor;

3 - în vederea stabilirii priorităților și realizării optimizării globale a modelului sistemic propus, datele cuprinse în *tabelele 2.1., 2.2., 2.3.*, constituie reale baze de plecare pentru ierarhizările ulterioare necesare;

4 - pentru a realiza o caracterizare globală a sistemului, se determină ponderea globală a legăturilor existente, cu relația:

$$P_{gs} = \frac{N_{re} + N_{ri} + N_{re}}{N_i \cdot N_e + N_r \cdot N_i + N_r \cdot N_e} \cdot 100 = \frac{134 + 60 + 45}{17 \cdot 12 + 6 \cdot 17 + 6 \cdot 12} \cdot 100 = 63,22 \% \quad (2.11)$$

De asemenea, valoarea **entropiei sistemului**, ca mărime ce caracterizează nedeterminarea sistemului, se calculează cu relația:

$$H_S = \sum_{i=1}^I p(S_i) \cdot \log_2 p(S_i) \quad , \quad (2.12)$$

unde I este numărul total al legăturilor sistemului, iar S_1, \dots, S_I reprezintă probabilitățile de apariție estimate, ale stării structurale S_i a sistemului.

În sistemul considerat, presupunând toate stările *echiprobabile*, **entropia maximă** a sistemului se calculează cu relația:

$$H_{S_{\min}} = 239 / 239 \cdot \log_2 (1 / 239) = 7,90087 \quad , \quad (2.13)$$

Dacă se consideră toate legăturile posibile echiprobabile, **entropia minimă** a sistemului se calculează astfel:

$$H_{S_{\max}} = 378 / 378 \cdot \log_2 (1 / 378) = 8,56224 \quad , \quad (2.14)$$

Organizarea absolută a sistemului, (I), se determina prin:

$$I = H_{S_{\max}} - H_{S_{\min}} = 8,56224 - 7,90087 = 0,66137 \quad , \quad (2.15)$$

Analiza efectuată anterior, prezintă, în primă fază, o oarecare doză de subiectivism; de aceea se constituie ca o etapă de preselecție, precedentă unei noi etape de premodelare, care să permită prelucrarea volumului de informații apriorice, orientative, în sensul stabilirii *numărului* și *rolului* factorilor în proces.

2.4.4. Stabilirea rolului factorilor esențiali în procesul de măsurare a forței cu traductoare de forță piezoceramice

Aplicația, realizată, într-o perioadă mai lungă de timp, (1989-1992), s-a bazat pe părerile a 9 experți, reprezentanți ai unor firme producătoare de TF, din colective de cercetare asupra aspectelor legate materiale piezoceramice sau de măsurări de forțe, din rândul cadrelor didactice și din rândul utilizatorilor. Experții și-au exprimat părerile, prin ordonarea, pe baza numerelor de ordine, ("ranguri"), (1, 2, 3, ... k; unde k = numărul factorilor), diferite de la un factor la altul, atribuite de fiecare expert factorilor procesului, funcție de influența pe care aceștia o exercită asupra factorului de stare [82], [122].

Rezultatele au fost centralizate pe fișe separate, pentru fiecare grupă de variabile de stare și factor de influență, sintetizate în **matricile de ordonare a factorilor**.

În matricea ordonării factorilor, fiecare rând conține numere din șirul natural dispuse diferit; x_{ij} reprezintă rangul atribuit de specialistul "i" factorului "j".

În cazul măririi rezoluției determinării, se pot utiliza și numere fracționare, cu respectarea condiției:

$$\sum_{j=1}^k x_{ij} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot (k + 1) . \quad (2.15)$$

Media aritmetică a numerelor dintr-un rând, este:

$$M_a = (k + 1) / 2 , \quad (2.16)$$

unde, a_j este valoarea medie a rangului j, adică:

$$a_j = A_j / m , \quad (2.17)$$

unde:

$$A_j = \sum_{i=1}^m x_{ij} , \quad (2.18)$$

iar $m = 9$ reprezintă numărul experților.

Astfel, *coeficientul de pondere* al factorului, este:

$$M_j = \frac{A_j}{\sum_{j=1}^k A_j}, \quad (2.19)$$

unde, k - numărul factorilor, $k = 6$.

Pentru ierarhizarea factorilor de influență asupra variabilelor, ca *indicator de semnificație, a factorilor (ISF)*, în exprimarea grafică, s-a folosit:

$$ISF = 1/M_j. \quad (2.20)$$

Media generală a sumelor A_j , se determină cu relația:

$$M = \frac{\sum_{j=1}^k A_j}{k}. \quad (2.21)$$

Abaterile de la această medie, Δ_j , sunt date de relația:

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^m x_{ij} - M, \quad (2.22)$$

iar suma pătratelor abaterilor, este dată de relația:

$$\sum_{j=1}^k \Delta_j^2 = \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^m x_{ij} - M \right)^2, \quad (2.23)$$

În cazul unei concordanțe perfecte între experți, valoarea maximă a sumei va fi:

$$\left(\sum_{j=1}^k d_j^2 \right)_{\max} = \frac{1}{12} \cdot m^2 \cdot k \cdot (k^2 - 1) = 1417,5. \quad (2.24)$$

Pentru aprecierea gradului de concordanță a părerilor experților, se utilizează *coeficientul de concordanță*, (W), dat de raportul:

$$W = \frac{\sum_{j=1}^k d_j^2}{(\sum_{j=1}^k d_j^2)_{\max}} = \frac{\sum_{j=1}^k d_j^2}{1417,5} \in [0, 1] , \quad (2.25)$$

Folosind mărimea *Fisher*, calculată cu relația:

$$\bar{\mathcal{F}}_c = \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{(m-1) \cdot W}{1-W} , \quad (2.26)$$

În etapele de calcul din tabele s-a notat cu l expresia:

$$l = \frac{(m-1) \cdot W}{1-W} , \quad (2.27)$$

Numărul gradelor de libertate, (ν_i), sunt determinate cu relația:

$$\nu_1 = \text{INT} (k - 1 - 2/m) ; \quad \nu_2 = (m - 1) \cdot \nu_1 . \quad (2.28)$$

Valorile $\bar{\mathcal{F}}_c$ se compară cu valorile tabelate, având în vedere părerile experților concordante, utilizându-se ca prag de semnificație $\alpha = 0,05$, sau în cel mai rău caz $\alpha=0,01$, pentru un număr de grade de libertate mai sus precizate [1].

Astfel, rezultatele ordonării factorilor se prezintă sub forma unor histogramme, cu distribuții, unele liniare altele neliniare.

De la caz la caz s-au separat factorii a căror influență nu este semnificativă.

Pentru ierarhizarea factorilor, dintre variabilele de reglare, semnificativi față de *constanta de deformare piezoelectrică*, (d_{33}), - \mathbf{D}_1 , s-au realizat *tabelul A.1. și figura A.1, (Anexa 1)*, din care se remarcă legătura esențială dintre această constantă și reglarea tensiunii mecanice de

prestrângere și chiar tensiune mecanică ce se regăsește în urma solicitărilor asupra elementelor piezoceramice (**PZT**), pe durata măsurării. Celelalte variabile de reglare sunt considerate, comparativ cu D_1 , cu o influență mai mică, cu o concordanță semnificativă.

O situație similară se observă și în *tabelul A.2*, respectiv *figura A.2*, (**Anexa 1**), cu prezentarea ierarhizării factorilor de influență dintre variabilele de reglare și constanta de complianță mecanică (s_{33}), dar, cu un nivel de concordanță mai scăzut, însă în limitele pragului de semnificație de $\alpha < 0,05$.

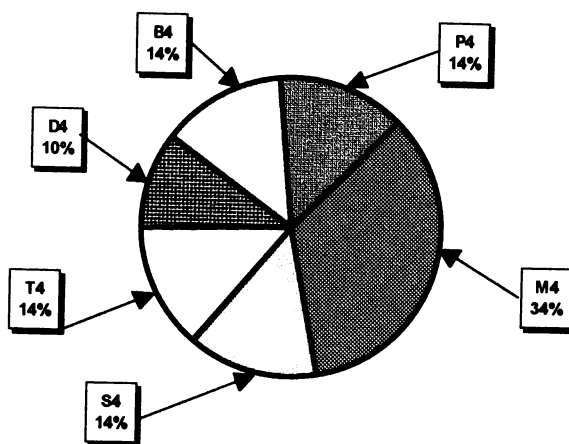


Figura 2.5. - Influența variabilelor de reglare asupra variabilelor de intrare.

Urmărind *tabelele A.1, ... , A.7*, respectiv, *figurile A.1, ... , A.7*, din **Anexa 1**, se observă o situație destul de echilibrată a considerațiilor experților despre importanța fiecărei variabile de reglare asupra variabilelor de intrare, detasându-se, însă importanța variabilei M_4 , (reprezentând tensiunea mecanică prereglată asupra elementelor **PZT**), care apare de 2-3 ori mai cu influență față de fiecare dintre celelalte variabile, cu o pondere de preferință de 34% (*figura 2.5.*).

Analizând în mod similar și *tabelele A.8, ... , A.11*, respectiv, *figurile A.8, ... , A.11*, care reflectă ierarhizarea factorilor de influență dintre variabilele de reglare și variabile de ieșire, cum sunt E_5, N_6, C_7, S_7 , se observă aproape aceeași preferință pentru influența pe care o poate avea prestrângerea în reglarea **TFPC**, adică, pentru variabila M_4 .

Astfel, situația preferențială a experților în ierarhizarea factorilor de influență dintre variabilele de reglare și celelalte variabile, se poate observa în *figura 2.6*.

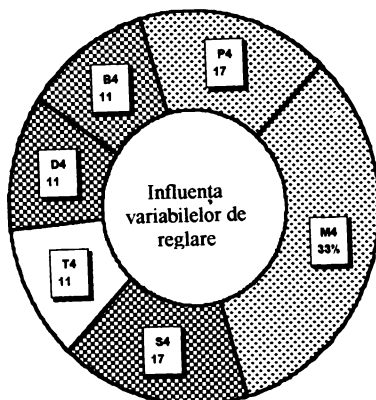


Figura 2.6. - Influența variabilelor de reglare asupra variabilelor de intrare și ieșire.

În continuare, s-a supus analizei, ierarhizarea factorilor de influență directă dintre variabilele de intrare și acele variabile de ieșire, care pot fi astfel influențate.

Din datele culese, s-au întocmit, similar cu analiza anterioară, *tabelele A.12, ... , A.16*, respectiv *figurile A.12, ... , A.16*, (**Anexa 1**), cu prezentarea ierarhizării factorilor de influență dintre variabilele de intrare, ($D_1, K_1, C_1, Q_1, M_1, S_1$) și acele variabile de ieșire care pot fi influențate direct de variabilele de intrare, fără a fi determinate semnificativ de variabilele de reglare, respectiv: F_5, E_5, C_7, S_7, F_7 .

Se remarcă o concordanță favorabilă, în limitele pragului de semnificație de $\alpha < 0,05$, în cazurile F_5 , și C_7 , respectiv în limitele pragului de semnificație $\alpha < 0,1$ pentru cazurile E_5 , S_7, F_7 .

Selectarea variabilelor s-a dovedit corectă, prin faptul că experții au considerat că fiecare dintre experți au apreciat cu o pondere semnificativă, fiecare variabilă de intrare, ca factor de influență pentru variabilele de ieșire considerate.

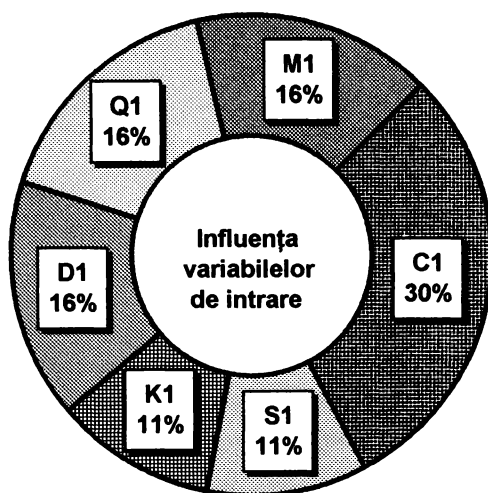


Figura 2.7. - Influența variabilelor de intrare asupra variabilelor de ieșire.

Se remarcă importanța acordată variabilei C_1 , respectiv *structura materialului piezoceramic*, care apare cu o pondere de preferință de 30% (figura 2.7).

*

După această analiză, se pot desprinde o serie de concluzii, foarte necesare pentru precizare a unor criterii de optimizare a utilizării materialelor piezoceramice în construcția TF , dar și a principalelor direcții (*funcții*) și restricții pentru programul de optimizare, cum ar fi:

1. - aprecierea unor valori mai scăzute ale gradelor de concordanță dintre părerile experților privind influențele unor proprietăți ale materialelor piezoceramice, (ex.: R_1 , M_1 , C_1), sau ale unor materiale componente ale $TFPC$, (ex.: A_2 , P_2 , E_2), asupra mărimilor de reglare, (ex.: M_4 , P_4 , S_4), coroborată cu considerarea unor influențe mai mici ale acestora asupra variabilelor de ieșire, dovedește mari lipsuri și chiar confuzii cauzate de o insuficientă cercetare experimentală asupra legăturilor de interdependență dintre variabile, utilizarea având un caracter empiric și aleator;

2. - părerile apropiate ale experților, asupra dependențelor dintre variabilele de intrare legate de materialele piezoceramice, cum ar fi: D_1 , K_1 , S_1 , sau cele legate de materialele componente ale **TFPc**, altele decât cele piezoceramice, cum sunt: C_2 , R_2 , ori variabile legate de blocul electronic de adaptare semnal, (ex.: I_3 , U_3 , S_3), cu mărimile de reglare și mai ales cele de ieșire, dovedesc oportunitatea lărgirii gamei de cercetări experimentale în aceste direcții, pentru pronunțarea unor principii sigure de construcție și utilizare a **TFPc**-urilor;

3. - existența, sau lipsa, unei prestrângeri mecanice a întregului pachet format din materialele piezoceramice și celelalte componente, se dovedește o problemă încă puțin tratată, în cazul construcției **TFPc**, dar intuitiv de experți, ca fiind într-o relație de dependență cu variabile de ieșire, cum ar fi: E_5 , R_5 , H_5 , S_7 ;

4. - se constată, din unele aprecieri contradictorii, că este necesară, premergător acestor cercetări experimentale privind construcția **TFPc**, un set de studii teoretice asupra unor corelații structurale dintre materialele piezoceramice și celelalte componente, precum și posibile comportamente în diverse situații de implementare într-un circuit electric sau într-un ansamblu oscilator;

5. - este previzibilă implicarea, în realizarea studiilor teoretice, precum și în interpretarea rezultatelor experimentărilor, a unor experți proveniți nu doar din rândul reprezentanților unor firme producătoare de TF, sau a unor colective de cercetare asupra aspectelor legate materiale piezoceramice sau de măsurări de forțe, sau din rândul cadrelor didactice și al utilizatorilor de **TF**, ci, un rol important îl pot juca experți matematicieni, chimiști, ceramiști, electroniști, informaticieni, care, să colaboreze, aducând, atât informațiile proaspete din domeniul lor, care să poată fi în legătură cu tema, cât și experiența privind unele similitudini comportamentale ale altor materiale, montaje sau aparatură, care să contribuie la eliminarea unor eventuale vicii de procedură sau baze greșite de plecare;

6. - unele aspecte tehnologice petrecute în perioada de elaborare a materialelor ceramice cărora li se conferă starea de piezoelectricitate, pot avea influențe importante în comportarea materialelor piezoceramice în componența unor **TFPc**, mai ales când lucrează în stare de oscilații forțate. Acest aspect se observă și din considerentele experților asupra legăturilor dintre variabilele de intrare R_1 , C_1 , R_2 , cu variabilele de reglare M_4 , B_4 , T_4 , sau a celor din urmă cu variabilele de ieșire E_5 , Q_6 , F_7 ;

7. - capacitatea de măsurare (F_5), este în mare măsură dependentă de variabilele R_1 , M_1 , A_2 , R_2 , dar și de variabilele de reglare D_4 și P_4 . Astfel, este necesară o aprofundare a cercetării

experimentale în realizarea unor măsurători în condiții diferite de solicitare a forțelor, atât în regim dinamic cât și în regim quasistatic, eventual chiar și static;

8. - privit în ansamblu, sistemul de măsurare va avea o siguranță în exploatare (S_7), o fiabilitate ridicată (F_7), în măsura în care construcția va fi adecvată, asigurându-se o montare de precizie a componentelor, după o verificare atentă a fiecăreia dintre acestea, cum ar fi: metalizarea elementelor piezoceramice, (M_1), calitatea suprafețelor armăturilor metalice, caracteristicile mecanice (R_2), legăturile electrice dintre **TFPC** și blocul electronic de prelucrare a semnalului, (P_2), fără pierderi, cu o protecție corespunzătoare a cablurilor de legătură, (C_2) și o orientare corectă a poziției **TFPC** față de forțele care se doresc a fi urmărite, (D_4);

9. - aspectele economice ale măsurătorilor de forțe cu **TFPC**, sunt în atenția majorității experților, legând un număr mare de factori de costurile directe, (C_7), respectiv de cele indirecte, (I_7). Evident este avantajul *prețului de cost /forță măsurată*, prin utilizarea materialelor piezoceramice în locul cuarțului, mai ales datorită prelucrărilor mult economice a ceramicii până la faza implementării în **TFPC**, decât în cazul tăierilor după axe foarte bine precizate, necesare de realizat în cuarț și a prelucrărilor ulterioare;

10. - de asemenea, proprietățile mecanice cu care pot fi înzestrate elementele piezoceramice, într-o multitudine de forme și dimensiuni dorite, pot asigura o fiabilitate (F_7), destul de ridicată, influențată de o serie de factori, atât dintre variabilele de intrare considerate, cât și dintre variabilele de reglare. Aceasta, poate afecta în mod controlat funcționabilitatea sistemelor de măsurare cu utilizarea **TFPC**;

11. - analizând rolul variabilelor de reglare în legătură cu caracteristicile de funcționare a **TFPC**, se poate aprecia rolul tensiunii mecanice de prestrângere (M_4), în mod special în cazul utilizării **TFPC** într-un sistem de oscilații forțate, în care frecvența proprie de rezonanță a traductorului este în legătură cu nivelul tensiunilor mecanice. De asemenea, un rol important îl are complexitatea blocului electronic de adaptare și prelucrare semnal, mai ales măsura în care asigură compensarea periodică a efectelor "îmbătrânirii" elementelor piezoceramice precum și a temperaturilor ($< T_c$), în care se realizează măsurarea;

12. - eficiența utilizării **TFPC** este, astfel, dependentă de aceste costuri indirecte (I_7), legate de echipamentele auxiliare, de caracteristicile acestora, precum și condițiile în care acestea pot să-și îndeplinească funcțiunile;

13. - deși, mulți experți au legat o serie de factori de *siguranța în funcționare* (S_7), a **TFPC**, robustețea acestora, nivelul ridicat și constant al rigidității traductorului pe tot parcursul

măsurării, determină un interes mărit din partea potențialilor utilizatori pentru aplicații cu acest tip de **TF**;

14. - se remarcă acordul unanim al experților față de dependențele directe ale performanțelor **TFPc** de unele variabile de intrare, fără vreo influență semnificativă a variabilelor de reglare, cum ar fi: **S₁, A₂, R₂, I₃**.

*

După selectarea factorilor, se poate trece la modelarea procesului de măsurare a forțelor, utilizând experimentul și metodele statisticii matematice, punând accentul, în primul rând, pe concordanța dintre model și datele experimentale, care se realizează prin analiza de regresie.

Paralel cu această analiză, se vor inventaria și unele probleme specifice, care pot constitui restricții pentru un program complex de optimizare a procesului de fabricație.

Pentru funcțiile (criteriile) de optimizare generalizate, din cadrul sistemului generalizat de utilizare a materialelor piezoceramice, (*figura 2.8.*), se propun următoarele:

- domenii de măsurare forțe - **maxime**;
- numărul direcțiilor de măsurare - **maxime, (3)**;
- semnal de ieșire - **maxim**;
- eroare dinamică - **minimă**;
- frecvența acțiunii forțelor de măsurat - **maximă**;
- consum de putere în timpul funcționării - **minim**;
- rigiditate - **maximă**;
- cote de gabarit - **minime**;
- fiabilitate - **maximă**;
- preț de cost al măsurătorii pe unitate de forță - **minim**;
- stabilitate termică - **maximă**;
- menținerea în timp a semnalului - **maximă**;
- histereză (la încărcări și descărcări de forțe), - **minimă**;
- fiabilitate - **maximă**;
- siguranță în funcționare - **maximă**;
- costuri directe și indirecte, pe timpul măsurărilor și în construcția **TFPc** - **minime**;

Având în vedere aceste restricții, impuse procesului de optimizare a sistemului de măsurare a forțelor cu ajutorul **TFPc**, s-au putut stabili direcțiile principale ale cercetării aferente prezentei teze și prezentate în *figura 2.8.*

DIRECȚII DE CERCETARE

* *Elaborarea optimă a materialelor piezoceramice destinate TFPC,*
referitor la:

- compoziția chimică;
- structura dobândită de materialul piezoceramic din faza de elaborare
- proprietățile piezoelectrice și mecanice ale elementelor **PZT**

* *Optimizarea metodelor constructive de realizare a TFPC,*
prin:

- alegerea variantei constructive
- alegerea variantei principale de utilizare a **PZT**

* *Utilizarea optimă a TFPC în cadrul diverselor aplicații*
prin:

- experimentări efectuate cu ajutorul unor modele experimentale, realizate pentru diferite măsurări de forțe

Figura 2.8. - Direcțiile de cercetare experimentală ale tezei.

3. CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND ELABORAREA OPTIMĂ A MATERIALELOR PIEZOCERAMICE DESTINATE TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ

3.1. ELEMENTE DE OPTIMIZARE A COMPOZIȚIEI ȘI MICROSTRUCTURII MATERIALELOR PIEZOCERAMICE

3.1.1. Stabilirea compoziției chimice optime a materialelor piezoceramice destinate construcției traductoarelor de forță

După cum s-a arătat și în *subcapitolul 1.2.1.*, materialele ceramice cu posibilitatea de dobândire a proprietăților piezoelectrice, care s-au remarcat prin diferite aplicații, au fost titanatul de plumb (PbTiO_3) și zirconatul de plumb (PbZrO_3) [47].

Titanatul de plumb, are o structură tetragonală, certificată prin studii de difracție a neutronilor cu o distorsiune tetragonală c/a similară cu a titanatului de bariu, dar cu o valoare ceva mai mare (1,06 față de 1,01) [17].

Zirconatul de plumb, care, de asemenea prezintă o anomalie a permitivității dielectrice funcție de temperatură, a fost caracterizat drept antiferoelectric de către Sawaguchi [20], [32].

În *figura 3.1.*, se prezintă situația permitivității dielectrice (ϵ_r) și a coeficientului de cuplaj planar (K_p) în funcție de compoziția PbTiO_3 - PbZrO_3 , în soluția solidă de titanat-zirconat de plumb (PZT). Soluțiile solide de PZT sunt feroelectrice, substituția $\text{Zr}^{4'}$ în locul $\text{Ti}^{4'}$ din PbTiO_3 , reduce distorsiunea tetragonală a acestuia și produce astfel apariția unei alte faze feroelectrice cu simetrie romboedrică, structura PbZrO_3 fiind ortorombică [13], [60].

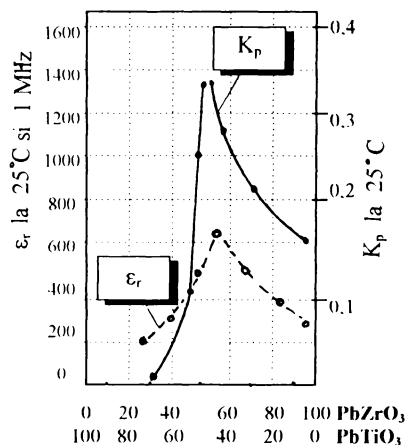


Figura 3.1. - Variația K_p și ϵ_r în soluția solidă de PbTiO_3 - PbZrO_3 .

În *figura 3.2*, se prezintă diagrama fazelor pentru sistemul soluției solide de **PZT**, în care linia punctată semnifică variația coeficientului de cuplaj piezoelectric **K** în funcție de compoziție. Se disting următoarele zone:

- I. - faza antiferoelectrică;
- II. - faza feroelectrică romboedrică;
- III. - faza feroelectrică tetragonală;
- IV. - faza paraelectrică cubică .

Domeniul de tranziție dintre fazele **II** și **III**, este în bună măsură independent de temperatură, deci morfotropic [58].

Soluțiile solide de zirconat-titanat de plumb (**PZT**), din zona de tranziție morfotropică de fază, prezintă o activitate piezoelectrică mult superioară față de cea a componentelor, dar mai ales față de titanatul de bariu ($BaTiO_3$) [5], [17], [32], [44], [65].

De asemenea, se remarcă temperatura Curie mult mai ridicată pentru soluțiile solide **PZT** din această zonă, față de cea a $BaTiO_3$, (aproximativ $360^\circ C$ față de $120^\circ C$). De aceea, materialele **PZT** din această zonă prezintă o stabilitate termică în domeniul larg de valori ale temperaturii.

Studiul experimental s-a realizat cu ajutorul difracției razelor X, utilizând un difractometru D500, cu radiațiile CuK_α cu un filtru din nichel, aplicat asupra unor probe din **PZT** oferite de *INCDFM-București*. Fazele au fost identificate prin analiza reflexiilor în șirul $43 \div 46,5^\circ$, 2θ ; compoziția fazelor romboedrale ale **PZT** au fost determinate din reflexia (200) și calibrate, iar fazele tetragonale au fost determinate din tăieturile tetragonale $d_{200} \cdot d_{002}$ [8], [91], [116].

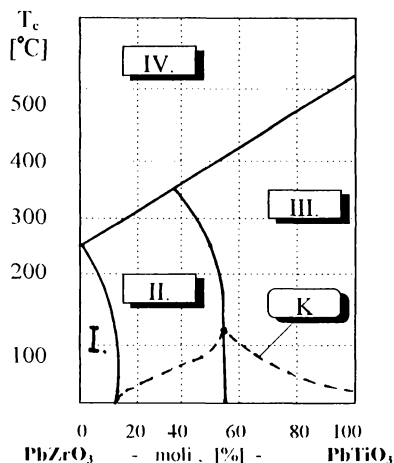


Figura 3.2. - Diagrama fazelor pentru sistemul soluției solide de **PZT**.

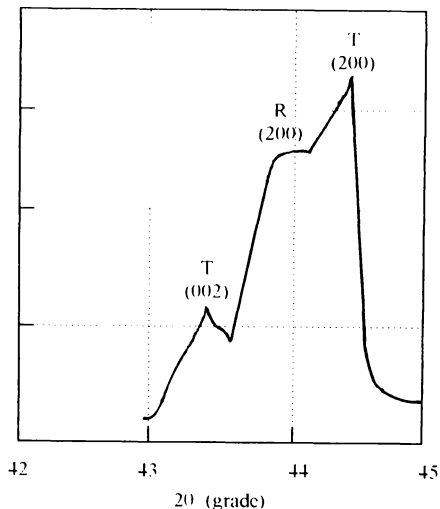


Figura 3.3. - Difractograma **PZT** obținută cu raze X.

Densitatea ceramicii sinterizate la 1180°C a fost de $7,47 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Existența zonei de tranziție morfotopică între fazele tetragonale și romboedrale se confirmă, când teoria *Landau-Devenshire*, este verificată; particularitățile întâlnite sunt explicabile, datorită neomogenităților asociate cu fluctuațiile compoziționale întâlnite în structura **PZT**. În zona morfotopică, cele două faze coexita, când, în fiecare grăunte cu consistența unei faze, există cel puțin un nucleu specific celeilalte faze [8], [32], [45].

Pentru a determina echilibrul termodinamic al regiunii de coexistență a fazelor, se folosește valoarea medie a concentrației x' a fazelor "**T+R**", (tabelul 3.1), folosind relația:

$$\frac{W_T}{W_R} = \frac{x'_R}{x'_T} \frac{x'}{x'} = \frac{I_T}{I_R}, \quad (3.1)$$

unde: - W_T și W_R sunt cantitățile relative ale celor două faze;

- x' reprezintă greutatea relativă;

- x'_T și x'_R reprezintă imitele zonelor;

- I_T/I_R reprezintă raportul intensităților integrate.

Media concentrațiilor x' într-o probă, PZT, sinterizată la 1180°C.

Tabelul 3.1.

Secțiunea	Compoziția x	W_T/W_R	x'_i	x'
1	47·1	2·09	46·36	46·55
	48·1	5·19	45·73	
2	44	4·24	43·92	44·58
	45	0·32	45·25	
3	40	0·56	40·58	40·39
	41	0·24	41·20	

Astfel, se determină o *bandă de tranziție morfotopică* a cărei lățime este dată de variațiile compoziționale din material și de calitatea pulberilor preparate din constituienții soluției solide **PZT**. Piezoceramicile cuprinse în această zonă au proprietăți foarte interesante. Pentru utilizarea acestor materiale în construcția **TF**, unde sunt importante proprietățile piezoelectrice asociate cu cele mecanice, se consideră compuşii, cu limita fazelor:



Valori maxime au, de asemenea, constantele de deformație piezoelectrică d și implicit g , ($g = d/\epsilon$). În concluzie, materialele **PZT** care se încadrează în domeniul tetragonal al tranziției morfotropice de fază, au o *compoziție chimică optimă* pentru a constitui element sensibil al **TF**.

3.1.2. Studii experimentale microstructurale asupra materialului piezoceramic $Pb(Ti_{0,465}Zr_{0,535})O_3$

Probele de PZT, cu o compoziție nominală $Pb(Ti_{0,465}Zr_{0,535})O_3$, au fost prelevate din diferite elemente piezoceramice, elaborate de *INCDFM-București*, iar analiza metalografică a fost realizată în colaborare cu trei colective de specialiști diferite, beneficiind de dotări tehnice diferite:

- A. - laboratoarele catedrei de *Știința materialelor*, ale Facultății de Mecanică din Timișoara;
- B. - laboratoarele Institutului de Sudură și Incercări Mecanice din Timișoara;
- C. - laboratoarele Universității din Patras, (Grecia).

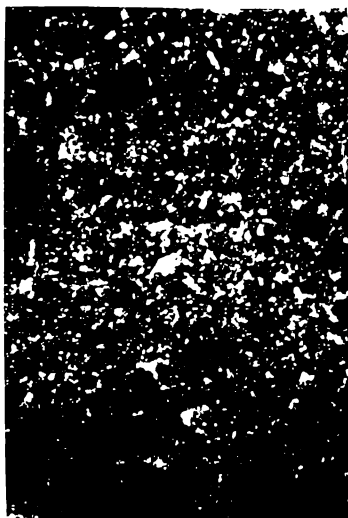


Figura 3.4. - Micrografia elementului PZT, MPG-01, (100x).

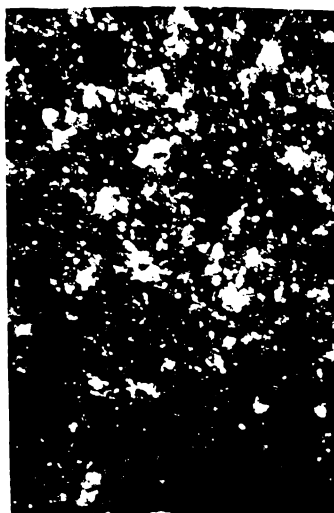


Figura 3.5. - Micrografia elementului PZT, MPT-01, (200x).

A. Probele au fost montate pe suportți inelari, fixându-se cu rășini, apoi șlefuite cu pulberi abrazive și alumină metalografică, pe o mașină de șlefuit, cu grija evitării încălzirii probelor. Au urmat operațiile de lustruire, spălare, uscare. Punerea în evidență a structurii cristaline s-a realizat prin atac, la rece, prin imersia probelor într-o soluție de **10 % HCl + 0,5 % HF + 89,5 % H₂O**, cu menținere în reactiv timpî, cuprinși între 15s și 60 s. Analiza microstructurilor s-a realizat cu ajutorul unui microscop metalografic *Carl Zeiss Jena, tip S-100 A/G*, fotografierea

fiind făcută cu o expunere de 1 ± 2 s. S-au realizat mărimi de 100 și, respectiv 200 de ori.

Două dintre micrografiile sunt prezentate în figurile 3.4 și 3.5, altele fiind adăugate în anexa A, [120], [121].

B. Spre deosebire de cazul precedent, după o șlefuire folosindu-se și paste diamantate, s-a avut mai multă grijă față de operațiile de lustruire și spălare, mai ales pentru reducerea, până la eliminare, a urmelor de pastă de șlefuit depuse.

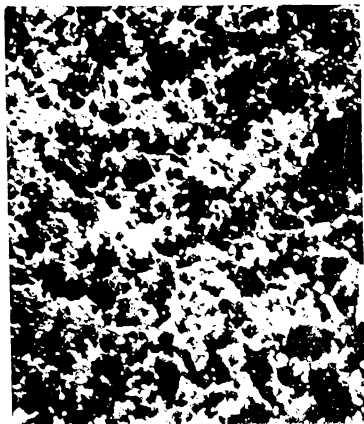


Figura 3.6. - Micrografia elementului PZT, de tip MPG-01, (Nomarski, 100x)

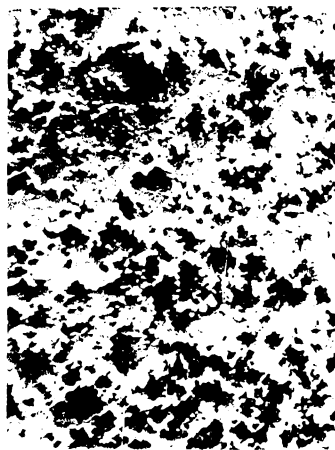


Figura 3.7. - Micrografia elementului PZT de tip MPT-01, (Nomarski, 500x)

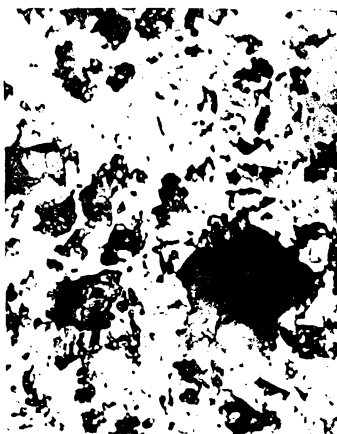


Figura 3.8. - Micrografia elementului PZT, de tip MPG-01, (Normal, 500x)

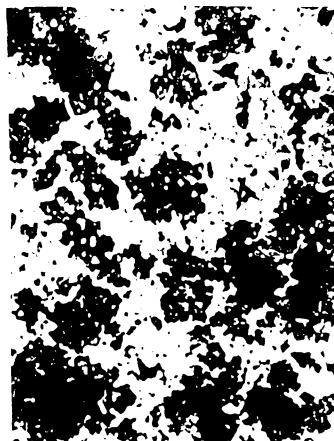


Figura 3.9. - Micrografia elementului PZT de tip MPT-01, (Normal, 500x)

De asemenea, s-a folosit un atac cu un reactiv, având în compoziție: **1,5 % HCL + 0,5 % HF + 2,5 % H₂NO₃ + 95,5 % H₂O**. S-au imersat probele în acest reactiv selectiv, timp de min 15 s.

Microstructurile au fost observate, studiate și reținute pe hârtie fotografică (*contrast*), cu ajutorul unui microscop optic *C. Reichert*, (Austria), tip *MeF2*, practicând:

- metoda *luminii interferențiale (Nomarski)*, cu mărimi de 100 x, (*figurile 3.6 și 3.7*);
- metoda *iluminării normale*, cu mărimi de 500 x, (*figurile 3.8 și 3.9*).

Alte micrografii sunt prezentate în *anexa A*.

C. Au fost asigurate condițiile unei investigații facile, folosindu-se mijloace moderne, atât în pregătirea probelor, cât și în metoda de evaluare a rezultatelor. La operațiile de șlefuire, lustruire și spălare s-au folosit mașini cu turații variabile, paste diamantate de cu calități diferite, ș.a. Atacul s-a realizat cu o soluție de **5 % HCl + 1 % HF + 3,5 % H₂NO₃ + 90,5 % H₂O**, aflată la temperatura constantă de 25 °C, prin imersarea probelor timp de 60 s, în soluție.

Observarea și analiza microstructurilor au fost realizate cu ajutorul unui microscop electronic *PULNIX-TMC 785*, cuplat direct la un calculator, cu folosirea unui *soft* specializat, *FOCUS-optiplus*. Pentru exemplificare, au fost imprimate pe hârtie câteva imagini ale micrografiilor studiate. Dintre acestea, în *figura 3.10*, se prezintă un exemplu, iar altele se pot remarca în *anexa A*.



Figura 3.10. - Micrografie de element piezoceramic de tip PZT, imprimată după studierea pe calculator.

Analiza microscopică a probelor a scos în evidență câteva aspecte importante legate de optimizarea tehnologiei de elaborare a materialelor piezoceramice destinate construcției **TFPc**, prin obținerea de microstructuri adecvate aplicației.

3.1.3. Studiul efectelor mărimii grăuntelui și polării electrice asupra modului de rupere la nivelul microstructural al materialelor piezoceramice

Din studierea *modului de rupere* la nivel microstructural a probelor prelevate din piezoceramicele **PZT**, s-a depistat existența unor, în cele două ipostaze:

- a. - *ruperea intergranulară*, rezultată din cedarea limitelor grăunților;
- b. - *ruperea transgranulară*, rezultată prin separare și prin forfecare;

Bazați doar pe considerente energetice, în general, în ceramicele policristaline o rupere este *intergranulară*, când:

$$\left(\gamma_s \frac{1}{2} \cdot \gamma_g \right) \cdot A_g < \gamma_s \cdot A_s, \quad (3.3)$$

iar *transgranulară*, când:

$$\left(\gamma_s \frac{1}{2} \cdot \gamma_g \right) \cdot A_g > \gamma_s \cdot A_s, \quad (3.4)$$

unde: - γ_s și γ_g sunt energiile de suprafață, respectiv de legătură dintre limitele grăunților,

- A_s și A_g reprezintă ariile nou formate în cazurile existențelor ruperilor *intergranulare*, respectiv *transgranulare* [44].

Studierea ruperilor din structura materialelor **PZT** supuse cercetării, are o importanță deosebită, datorită influențelor pe care le poate avea, atât sub aspectul caracteristicilor piezoelectrice, cât, mai ales, asupra proprietăților mecanice [16], [48]. Modul de rupere din structurile ceramicelor policristaline, este determinat de un complex de factori, cum ar fi:

- existența după sinterizare a porilor reziduali;
- prezența segregățiilor învecinate impurităților;
- prezența fazelor secundare;
- morfologia limitelor grăunților;
- mărimea grăunților formați.

Studiul s-a realizat pe baza analizei metalografice prezentată în *subcapitolul 3.1.2.* pe elemente piezoceramice obținute în diferite condiții de sinterizare și de variație a puterii câmpului electric de polare.

S-au studiat probe, cu o compoziție nominală $\text{Pb}(\text{Ti}_{0,465}\text{Zr}_{0,535})\text{O}_3$, care au fost preparate din pulberi obținute dintr-un oxalat, prin metoda coprecipitației, urmărindu-se controlul asupra procentului de **Pb** din compoziție, cu un exces de 2%, pentru compensarea evaporării **PbO**, mai puțin pe perioada calcinării și sinterizării, înainte de solidificare. Precipitatul de oxalat a fost calcinat la 850 °C, timp de 4 ore.

Pulberea **PZT** obținută a fost compactată ușor într-un tub cilindric cu diametrul de 5 mm, mai apoi presată hidrostatic la 274 MPa. În continuare, conținutul a fost sinterizat la 1200 °C, cu menținere la diferite durate de timp, cuprinse între 4 și 240 ore, în scopul obținerii a diferitelor mărimi de grăunți. Pentru sinterizare, epruvetele au fost puse împreună cu același tip de pulberi din conținutul materialului **PZT**, în vase de alumina și închise etanș, pentru a se evita, pe cât posibil, volatilizarea **PbO**. Au fost utilizate folii de platină pentru izolarea epruvetelor de pulberile inconjurătoare. Încălzirea și răcirea s-au realizat cu o viteză de aproximativ 120 °C/min. Pentru analiza metalografică, electronică, epruvetele șlefuite au fost urmărite pe lungimi interceptate, cuprinzând aproximativ 1000 de grăunți, căutându-se o mărime medie a acestora.

În *tabelul 3.2*, sunt cuprinse măsurările efectuate pentru probele studiate

Valorile determinate la probele **PZT** investigate

Tabelul 3.2.

<i>Nr. crt.</i>	<i>Timpul de sinterizare [h]</i>	<i>Diametrul mediu al grăunțului [μm]</i>	<i>Pondere ruperilor intergranulare [%]</i>	<i>Pondere ruperilor transgranulare [%]</i>
1.	4	9,5	93,5	6,5
2.	8	9,7	90	10
3.	16	10	88	12
4.	36	10,6	87	13
5.	72	11,9	80	20
6.	96	12,8	70	30
7.	120	14	24	76
8.	160	15,1	20	80
9.	200	16,6	11	89
10.	240	18	8	92

Micrografiile structurilor policristaline din imagini, obținute prin mărimi de 500 de ori, cu ajutorul microscopului electronic, prezintă un aspect eterogen datorită compoziției soluției solide de **PZT** studiate, dată și de microzonele de coexistență a fazelor feroelectrice romboedrale și tetragonale, de dimensiuni submicronice.

Dificultățile studiului s-au datorat și suprafețelor atacate, care prezintă mari abateri, având o serie de concavități și convexități rezultate și datorită comportării materialelor, (soluții solide), obținute prin sinterizare, la prelucrări mecanice de șlefuire și lustruire.

Din cercetări anterioare [36], se știe despre creșterea aproximativ proporțională, (variație liniară), a dimensiunilor medii ale grăunților odată cu creșterea timpului de sinterizare; aspectul verificat și prin studiul efectuat și reliefat în *figura 3.11*.

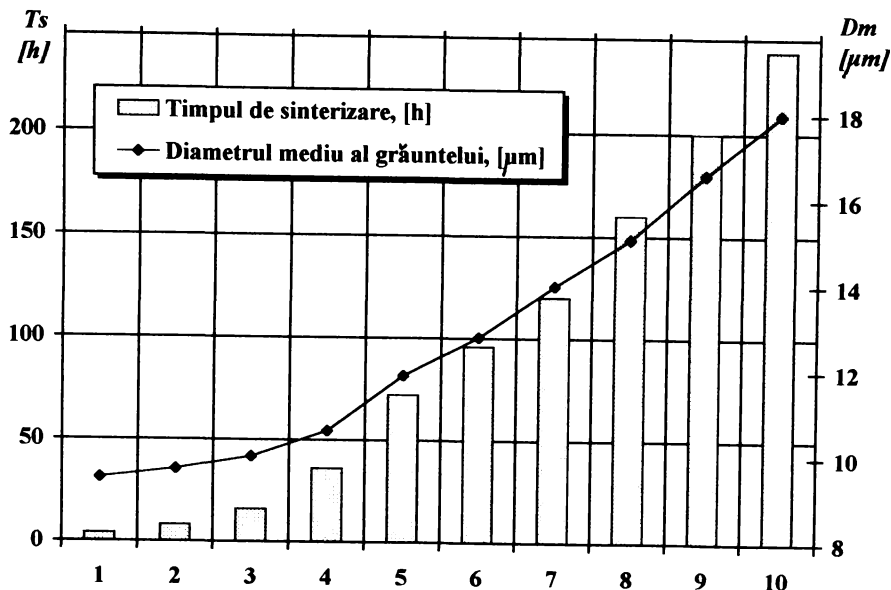


Figura 3.11. - Influența timpului de sinterizare asupra dimensiunilor grăunților, la materialele piezoceramice.

La baza diagramei s-au marcat prin cifre de la 1 la 10 numărul de ordine al probelor investigate. Abaterile de la forma liniară a variației dimensiunilor medii ale grăunților în raport cu timpul de sinterizare, se datorează erorilor de măsurare în cazul primelor 3 probe, sinterizate într-un timp insuficient pentru formarea unei structuri stabile.

Comparativ cu această creștere a dimensiunilor grăunților cuprinsă între 9,5 μm și 18 μm, datorită exclusiv timpului de sinterizare, s-au reliefat aspecte ale modului de rupere al materialelor PZT studiate.

În *figura 3.12*, se remarcă descreșterea ponderii ruperilor *intergranulare* determinate în raport cu variația dimensiunilor medii ale grăunților, cu o pantă mai bruscă în zona probelor 5÷8, adică atunci când dimensiunile medii ale grăunților oscilează în intervalul (10 ... 16)μm, ceea ce sub aspectul timpului de sinterizare ar însemna variația cuprinsă între 40 h și 160 h.

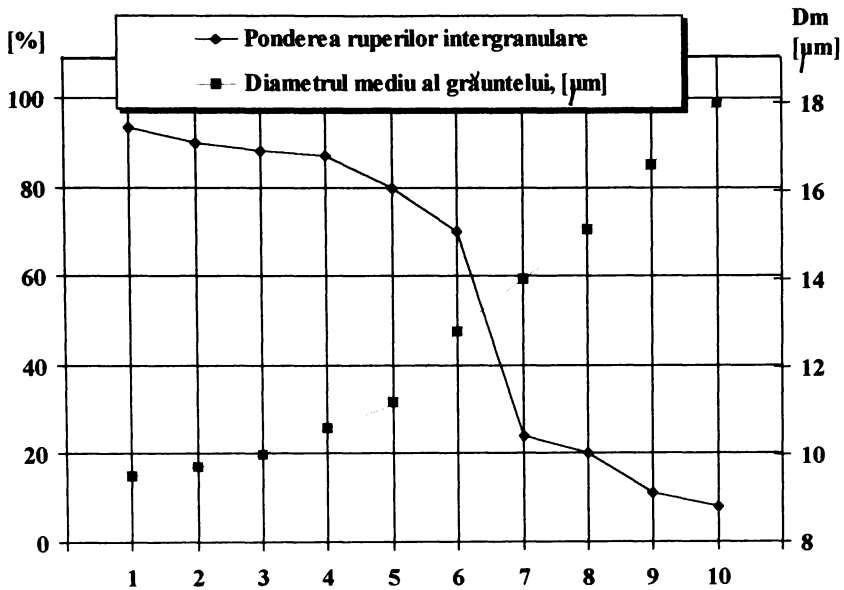


Figura 3.12. - Variația ponderii ruperilor intergranulare în raport cu dimensiunea medie a grăunților ale PZT.

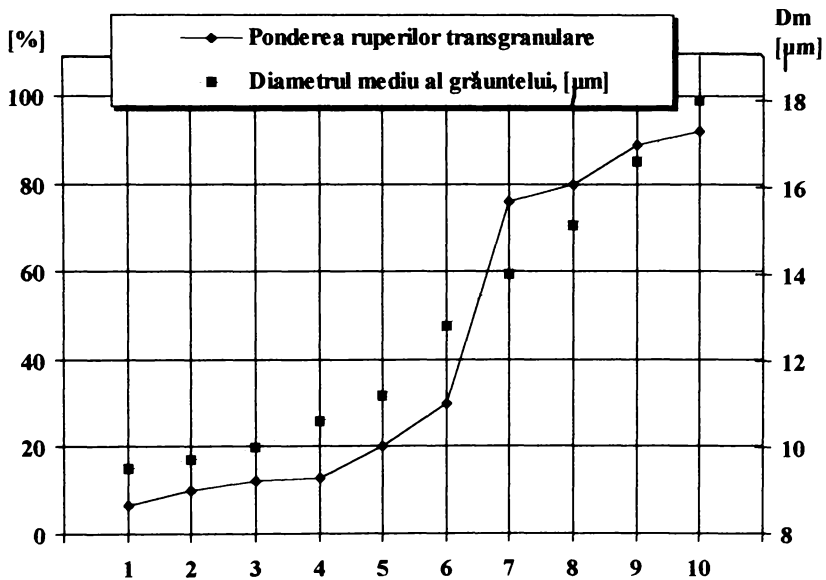


Figura 3.13. - Variația ponderii ruperilor transgranulare în raport cu dimensiunea medie a grăunților ale PZT.

În mod contrar, în *figura 3.13.*, se observă o creștere semnificativă a ruperilor *transgranulare* odată cu creșterea dimensiunilor medii ale grăunților.

Mărimea *ruperilor transgranulare* a fost determinată prin sondaj, în puncte.

S-a constatat faptul că epruvetele obținute prin acest experiment, raportat la timpul de sinterizare, prezintă aproximativ același grad de porozitate, plasat în jurul valorii de 3%. Dar, media mărimilor porilor crește odată cu mărirea timpului de sinterizare, fenomen care poate fi consecința creșterii și mărimii grăunților.

Suprapunând graficele de variație a ponderilor a *ruperilor transgranulare*, a celor *intergranulare*, a timpului de sinterizare, în raport cu creșterea dimensiunilor medii ale grăunților, (*figura 3.14*), se determină o zonă de **optim** al modului de rupere, atunci, când timpul de sinterizare este de aproximativ 120 h, mărimea medie a grăunților este de 14 μm , iar prezența ruperilor *inter-* și *trans-*granulare este în același raport, cuprins între 50 % și 55%.

Această concluzie nu poate fi suficient de certă, datorită complexității mecanismului de desăvârșire a structurii piezoceramicelor, atât pe timpul elaborării acestora, a condițiilor în care se realizează polarea, cât și a condițiilor de exploatare, în raport cu starea de îmbătrânire sau de temperatură de lucru.

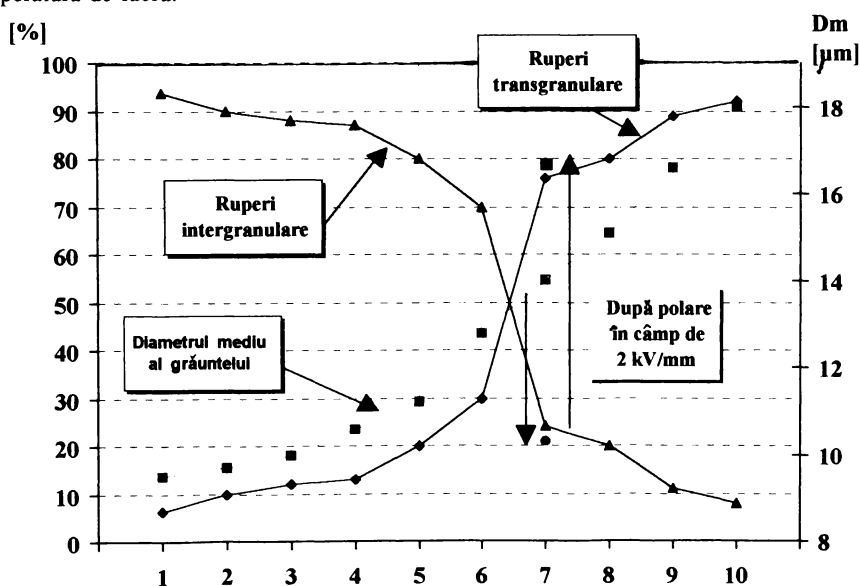


Figura 3.14. - Determinarea zonei de **optim**, pentru condițiile de elaborare a materialelor PZT, în raport timpul de sinterizare.

Această concluzie nu poate fi suficient de certă, datorită complexității mecanismului de desăvârșire a structurii piezoceramicelor, atât pe timpul elaborării acestora, a condițiilor în care

se realizează polarea, cât și a condițiilor de exploatare, în raport cu starea de îmbătrânire sau de temperatură de lucru [16].

Astfel, unul dintre factorii intrinseci, care determină în mare măsură starea microstructurală a piezoceramicelor, este starea tensiunilor interne, dezvoltate datorită producerii unor deformări incompatibile pe perioada transformărilor ce au loc la trecerea din sistemul cubic în cel tetragonal, la atingerea temperaturii *Curie*, (*subcapitolul 1.2.1*).

Cauzele creșterii tensiunilor interne, pot fi:

- anizotropia expansiunii termale a cristalelor tetragonale;
- formațiunile de "impletitură" feroelastică, constituite ca *domenii* pe durata răcirii ceramicii **PZT**; se pot crea de-alungul înlănțuirilor de grăunți polidomenii feroelastice în granulația **PZT**;
- transformările de fază realizate pe perioada răcirii ceramicii.

În mod paradoxal, deși granulația fină ar putea fi avantajoasă, din punctul de vedere al proprietăților mecanice, prezentând și un mod de rupere transgranular foarte redusă, *figura 3.13*, totuși prezintă dezavantajul chiar datorat posibilităților reduse de a se forma domenii în interiorul grăunților, pe lângă, starea predominantă a preponderenței ruperilor intergranulare, de peste 90%.

Astfel, se poate releva aspectul factorului critic, în determinarea modului de rupere al materialelor **PZT**, care constă în structura domeniului format în grăunte [48].

S-a mai putut observa faptul că dacă numărul domeniilor într-un grăunte este foarte limitat sau se prezintă o structură domeniială singulară datorită dimensiunilor mici ale grăunților, atunci în structură va fi o dominantă a ruperilor *intergranulare*.

Pentru studiul variației mărimii medii a grăunților în raport cu valoarea câmpului electric de polare, s-au considerat epruvetele sinterizate timp de 120 h, care au fost introduse într-un câmp electric, variindu-se în trepte valorile între 2 și 3 kV/mm, timp de 30 de minute. Pe durata polării, epruvetele au fost menținute la o temperatură de 110 °C.

Studiindu-se microstructura unei epruvete sinterizate timp de 120 h, (proba numărul 7 din *tabelul 3.2*), în care se remarcă înainte de polare, (*figura 3.8*), un mod de rupere transgranulară cu o pondere de 76 %, după o polare în câmp de 2 kV/mm, ruperile intergranulare devin predominante, procentul ruperilor transgranulare coborând la 21 %, iar la epruveta care a fost polată într-un câmp de 3 kV/mm, acest procent descrește cu încă 2%.

Deci, tensiunile interne la grăunții învecinați se măresc după polare, ca o consecință a reducerii numărului de domenii formate în grăuntele **PZT**.

Investigând modul de rupere a piezoceramicii **PZT**, se constată că la epruvetele cu granulație fină, cu un timp scurt de sinterizare, tensiunile interne cresc pe timpul răcirii, propagându-se ruperile intergranulare. În cazul dimensiunilor mari ale grăunților tensiunile interne sunt determinate de formarea structurii polidomeniale feroelectrice, devenind predominante ruperile transgranulare.

3.2. STUDIUL EXPERIMENTAL AL PROPRIETĂȚILOR ELECTRICE ȘI MECANICE ALE MATERIALELOR PIEZOCERAMICE

Acest studiu s-a realizat urmărind în paralel proprietățile electrice și cele mecanice, tocmai datorită faptului că fenomenul de *piezoelectricitate* reprezintă un cuplaj între mărimile dielectrice și cele mecanice, existând astfel o interdependență a acestora, atât la un moment dat, cât și pe parcursul variațiilor în timp.

3.2.1. Model experimental de studiu al modificărilor dimensionale ale elementelor piezoceramice

S-au folosit elemente cilindrice din **PZT**, prevăzute cu un orificiu central, cu metalizare pe fețele frontale paralele, (*figura 3.15*). Direcția polarizării este după axa 3.

Astfel, vectorul întindere **S** produs de câmpul electric **E** este dat de relația [89] :

$$S = d \cdot E, \quad (3.5)$$

unde: - **d** - constanta de deformație piezoelectrică, [m/V];
- **E** - valoarea câmpului electric aplicat, care se determină ca fiind raportul:

$$E = U/t, \quad (3.6)$$

unde: **U** - tensiunea aplicată, [V];
t - grosimea blocului **PZT**, [m];

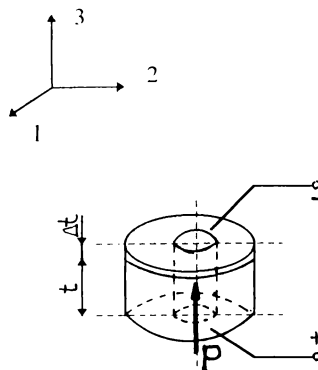


Figura 3.15. - Schița de principiu a elementului PZT.

Deformabilitatea mecanică după direcția 3 este:

$$s = \frac{\Delta t}{t}, \quad (3.7)$$

Asfel, aplicând tensiunea U pe fețele metalizate, blocul **PZT** realizează o extensie t calculată cu relația:

$$\Delta t = d_{33} \cdot U, \quad (3.8)$$

unde: d_{33} - constanta de deformație pe axa 3, la polarizarea după axa 3, [m/V].

Determinând deformabilitatea mecanică s la o anumită tensiune, apoi aplicând o presiune în trepte F/A , se obține o familie de caracteristici, (figura 3.16). (unde: A - suprafața frontală a blocului **PZT**, [m²]).

Panta caracteristicilor este dată de complianța materialului față de câmpul determinat de tensiunea U_1 .

Astfel:

$$\frac{\Delta t}{t} = \frac{s_{33}^E \cdot F_3}{\pi(R^2 - r^2)}, \quad (3.9)$$

unde: - s_{33}^E - complianța elastică în câmp constant, [m²/N];

- F_3 - forța uniaxială aplicată pe direcția 3, [N].

În mod similar se pot determina și modificările dimensionale pe direcțiile 2 și 1, dar obținându-se valori negative, adică micșorări ale dimensiunilor.

Energia mecanică din **PZT**, (W_{mec}), care produce schimbările dimensionale, se poate determina prin calcularea ariei cuprinse între linia lui U_1 și axele Ox și Oy , (figura 3.16).

Energia electrică (W_{el}) aplicată se determină cu relația:

$$W_{el} = \frac{C \cdot U_1^2}{2}, \quad (3.10)$$

unde: - C - capacitatea elementului piezoceramic, [F].

Eficiența transformărilor materialului **PZT** în sens direct sau invers piezoelectric, se apreciază prin intermediul factorului de cuplaj electromecanic determinat după cum s-a arătat în *subcapitolul 1.2.1.*

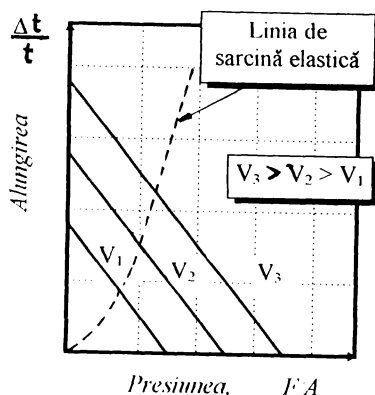


Figura 3.16. - Familie de caracteristici PZT.

De remarcat este faptul că ecuațiile piezoelectrice realizează o simplă descriere fenomenologică a proprietăților piezoceramicilor, dar nu redau anumite caracteristici comportamentale, în legătură cu neliniaritatea, histereza, frecvența, dependența temporală ș.a.

De aceea, s-a considerat necesară experimentarea fenomenului piezoelectric și compararea cu rezultatele teoretice [18].

Deoarece, extensia preconizată pentru un singur element **PZT** sub acțiunea W_{el} , variabile în trepte, este de ordin *sub i roni*, pentru experimentare s-a folosit un pachet de 7 elemente piezoceramice, produse de *INCDFM - București*, de tipul MPT-01, cu diametrul exterior 20 mm, diametrul interior de 6 mm și grosimea de 4 mm. Constanta de deformare piezoelectrică longitudinală $d_{33} = 330 \cdot 10^{-12}$ [m/V].

Pachetul de elemente piezoceramice, având intercalate ca electrozi, discuri subțiri de cupru, lipite între ele cu un adeziv siliconic pentru asigurarea unui contact optim, a fost supus unor tensiuni de alimentare în trepte, pe intervalul $0 \div 3,3$ kV, de la o sursă de curent continuu [61], [75].

Montajul folosit, se prezintă ca schemă bloc în *figura 3.17*. Pachetul de elemente active piezoceramice (1), este încadrat de două discuri ceramice izolatoare (2) și apoi de două plăci metalice (7); în placa metalică inferioară sunt incastrate 4 șuruburi (8), care asigură și ghidarea plăcii superioare. Pe placa metalică superioară este lipită oglinda (5). Pe placa metalică inferioară este lipită oglinda (5).

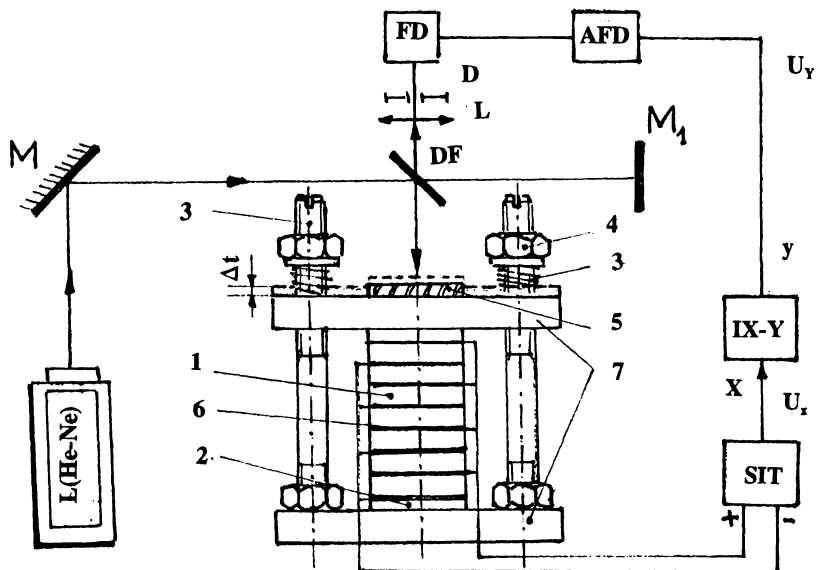


Figura 3.17. - Schemă bloc a standului de măsurare interferometrică a extensiei materialelor piezoceramice.

În figura 3.18., se prezintă imaginea de ansamblu al standului de experimentare, realizat în Laboratorul de măsurări electrice al *Facultății de electronică și telecomunicații* a Universității "Politehnica" din Timișoara [14].

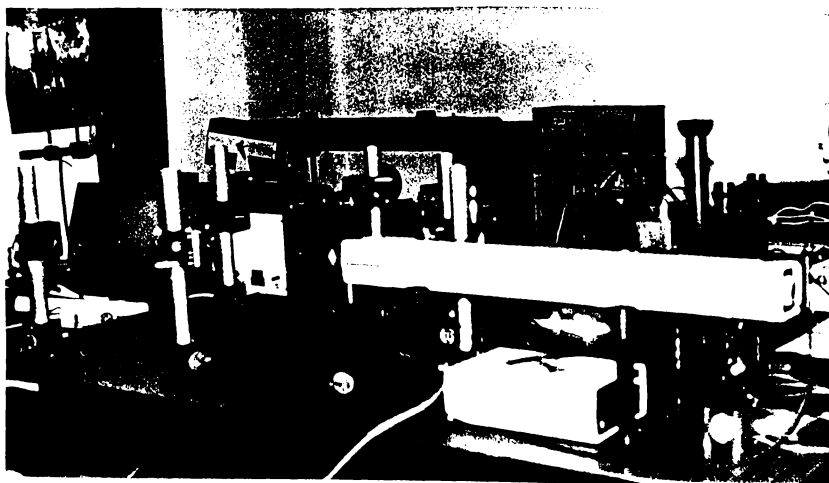


Figura 3.18. - Imagine de ansamblu a standului de măsurare

Măsurarea extensiei s-a realizat cu ajutorul unui *interferometru Michelson* (în varianta Twyman-Green), compus dintr-un laser L cu He-Ne, cu lungime de undă a radiației de emisie de 632,8 nm, care transmite o undă de lumină prin intermediul oglinzii M , unui divizor de fascicul DF ; o parte din raza de lumină este transmisă în continuare oglinzii M_1 , iar o parte oglinzii (5). Fascicolul emergent, realizat prin interferența undelor provenite de la oglinzile 5 și M_1 , este expandat de lentila L și colimat de diafragma D , în vederea aplicării acestuia blocului fotodetector FD , realizat cu ajutorul unui fotomultiplicator. Semnalul obținut la ieșire este amplificat de un amplificator AFD rezultând la ieșirea acestuia o tensiune U_e , care aplică la intrarea Y a înregistratorului $IX-Y$. Intensitatea radiației captate de FD este funcție de extensia pachetului de elemente piezoceramice (I), sub acțiunea tensiunii electrice aplicate de la sursa de curent continuu de înaltă tensiune SIT .

Experimentul și-a propus studierea comportării piezoelectrice a materialului PZT în diferite condiții de solicitare mecanică statică. Astfel, s-au realizat măsurători ale extensiei în urcare și coborâre în intervalul $0 \pm 3,3$ kV, în patru situații diferite de prestrângeri statice, (realizate prin strângerea piulițelor (4)): la început cu pachetul relaxat, apoi aplicându-se trei trepte de forță: 2 daN, 10daN, 15 daN.

Rezultatele măsurătorilor s-au centralizat într-un tabel, după transformarea mărimilor măsurate de pe hârtia gradată a înregistratorului (ținându-se cont de franjele de interferență și lungimea de undă a radiației luminoase emise de laser), în mărimi de lungime echivalente cu deplasarea oglinzii solidare cu pachetul de elemente **PZT**.

După prelucrarea datelor s-au ridicat câteva diagrame și grafice, din care se pot desprinde următoarele *concluzii*:

- experimentul practic confirmă calculele teoretice, după care materialele piezoceramice **PZT** au o activitate piezoelectrică superioară cuarțului;
- în raport cu creșterea nivelului prestângerii elementelor piezoceramice crește precizia măsurării, dar să nu se depășească presiunea specifică la compresiune suportată de **PZT**, care în cazul prezentat este de 32 daN/cm².

Experimentul asupra proprietăților materialelor piezoceramice, a continuat prin compararea extensiilor a două tipuri de materiale, diferențiate de caracteristici care le conferă calități diferite sub aspectul proprietăților mecanice, reliefate și prin intermediul constantelor de deformație piezoelectrică.

Astfel, au fost studiate materialele:

- **PZT-D** - numit "dur", are următoarele proprietăți: - temperatura Curie $T_c > 300^\circ\text{C}$;
- nu se pot polariza și depolariza ușor, decât la temperaturi mai ridicate; - $d_{33} = 225 \cdot 10^{-12}$ [m/V]; $d_{31} = -100 \cdot 10^{-12}$ [m/V].

- **PZT-M** - numit "moale", cu proprietățile: - $T_c = 200^\circ\text{C}$; - se polarizează și se depolarizează la temperaturi chiar apropiate de temperatura ambiantă a camerei;
- constantele dielectrice și factorii de disipare cu valori ridicate; - $d_{33} = 600 \cdot 10^{-12}$ [m/V]; $d_{31} = -275 \cdot 10^{-12}$ [m/V].

Cele două elemente piezoceramice, cu dimensiuni identice, (diametru de 16 mm; grosimea de 3 mm), au fost supuse la încărcări și descărcări de tensiune, pe intervalul 0÷1000 V (curent continuu); în baza datelor culese, s-au ridicat curbele de variație a extensiei (Δl), în raport cu tensiunea aplicată (U), prezentate în *figura 3.19*. [11].

Se observă diferențe semnificative de liniaritate și histereză.

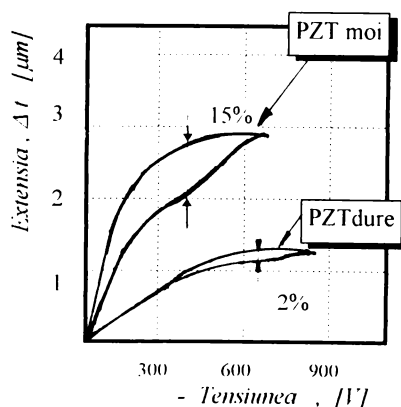


Figura 3.19. - Diferențe de liniaritate și histereză la **PZT-D** și **PZT-M**.

Astfel, **PZT-M** prezintă o neliniaritate pronunțată, o histereză de aproximativ 15 %, dar o extensie ridicată. Pe când elementul piezoceramic **PZT-D**, în comparație cu primul, prezintă o liniaritate mai bună, histereză de aproximativ 2 %, dar valori scăzute ale extensiei, la aceleași valori de încărcare cu tensiune [67].

Aplcând prestângeri în trepte de efort asupra elementelor piezoceramice, s-a constatat scăderea mărimii extensiei, dar și a histerezei. Cu linie punctată, în *figura 3.16*. se observă linia de sarcină elastică, la o prestrângere, care intersectează liniile de treaptă a tensiunilor U_i , în punctul care reprezintă extensia netă a PZT-urilor.

Liniaritatea răspunsurilor materialului PZT-D este de aproximativ 1%, iar a lui PZT-M, oscilează între 2-10 %; aspectul este mai pregnant la tensiuni joase (*figura 3.20.*), aranjamentul dipolilor în câmpul electric aplicat putând fi diferit [63].

Neliniaritatea se poate corecta generând electronic o tensiune:

$$U_Q = U \cdot (1 - b \cdot U), \quad [V] \quad (3.10)$$

unde coeficientul b este ajustat la precizia de compensare pentru neliniaritatea materialului respectiv [106].

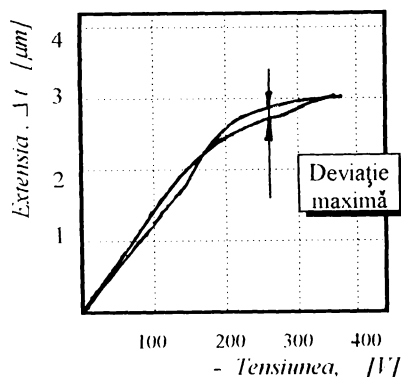


Figura 3.20.- Liniaritatea răspunsurilor la PZT la tensiuni joase.

3.2.2. Studiul asupra comportamentului piezoelectric al materialelor piezoceramice

Este cunoscută dependența materialelor piezoceramice, în funcționare, de temperatura de lucru, dar cu obligația respectării condiției: $T < T_c$, pentru a nu-și pierde proprietățile piezoelectrice. Dar și în acest interval de temperatură există modificări ale parametrilor, însă controlabile [13], [124].

Există încercări ale materialelor **PZT** și la temperaturi foarte scăzute cu valori chiar de $4^\circ K$, cu remarcă faptului că în aceste situații scad valorile constantelor "d".

Sub acest aspect, s-a dovedit experimental comportamentul diferit al materialelor **PZT**, funcție de tipul acestora.

Asfel, cum se observă și în *figura 3.21.*, valorile constantelor relative d_{ij} cresc odată cu temperatura, dar liniar în cazul **PZT-M**, fața de materialul **PZT-D**; în cazul celui de-al doilea (**PZT-D**) se remarcă o modificare a pantei de creștere în apropierea temperaturii de 0°C .

Aceste variații ale caracteristicilor, fiind cunoscute, pot fi controlate prin aplicarea unor coeficienți de expansiune termică [11].

Un mare avantaj al proprietății piezoelectricitate este *reversibilitatea*.

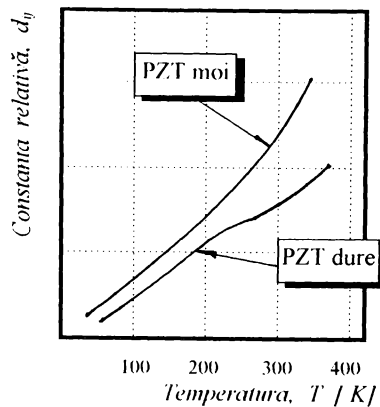


Figura 3.21.- Variația d_{11} cu variația temperaturii de lucru.

Astfel, și materialele piezoceramice se dovedesc capabile de a fi folosite în condiții de inversare a sensului de aplicare a câmpului electric sau a tensiunii mecanice, rezultând extensii și contracții, respectiv sarcini electrice de semne contrare.

Această neliniaritate în piezoceramică, se evidențiază în *figura 3.22.*, unde se prezintă patru ipostaze diferite de solicitare a elementului **PZT**; și anume: elementul piezoelectric **PZT** este ușor depolat când este supus la un câmp electric de sens opus, pe direcția de polarizare.

Efectul unui ciclu dintre tensiunea pozitivă și negativă este demonstrat în *figura 3.22*. Pe lângă curba histereză normală *AB*, când voltajul aplicat este pozitiv, diagrama "fluture" *CDEFG* definește comportamentul materialului printr-un ciclu complet de variație a tensiunii, de la pozitiv și negativ.

Modificarea polarizării produce contracții, (dealungul curbei *C*), până când nivelul contracției determină prin efect direct piezoelectric sarcini electrice de sens opus, care determină extensia elementului piezoelectric, urmând curba *D*.

Procesul este repetat de-a lungul curbelor *EF*, când voltajul devine din nou pozitiv. Diagrama "fluture" reflectă o completă caracterizare a procesului de depolarizare și repolarizare, specific materialelor piezoceramice [17].

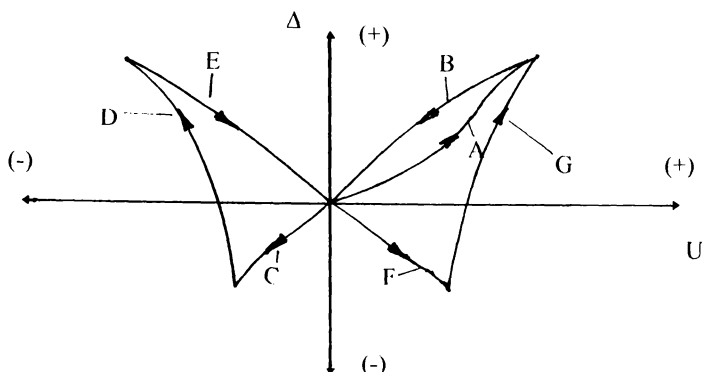


Figura 3.22.- Neliniaritatea reversibilității în piezoceramice.

La materialele piezoceramice s-a constatat că, în timp, valoarea polarizării remanente descrește, odată cu fenomenul de îmbătrânire a ceramicii. Această *depolarizare* în timp, se datorează reorientării domeniilor ca urmare a eliberării tensiunii mecanice reziduale. Aceasta, determină o descreștere a constantelor piezoelectrice și dielectrice, diminuând și valoarea complianței mecanice.

În figura 3.23, se prezintă diminuarea valorii constantei de deformație piezoelectrică, (d) după direcția "33", la PZT, în comparație cu d_{11} , în cazul cuarțului, (SiO_2).

Determinarea vitezei de îmbătrânire se poate determina și cu relația :

$$\frac{1}{y(1)} \cdot \frac{dy}{dt} = \frac{c}{t}, \quad (3.11)$$

unde:- y reprezintă mărimea aflată în observație;

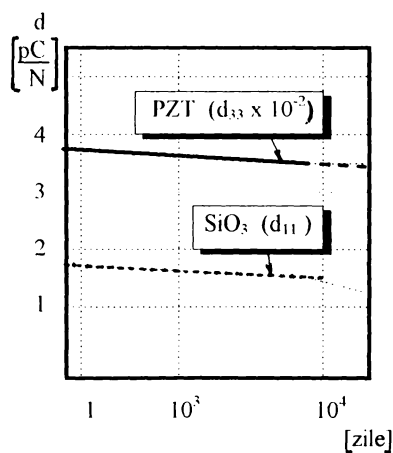


Figura 3.23. - Efectele piezoelectrice ale îmbătrânirii PZT comparativ cu cuarțul.

- $y(t)$ este valoarea acestei mărimi după un interval de timp unitar, (de exemplu: o zi), măsurat din momentul imediat polarizării;

- c este coeficient dependent de material și mărimea y .

Cunoscând c independent de timp și integrând, rezultă:

$$\frac{y - y(1)}{y(1)} = c \cdot \ln(t) = c' \cdot \log_{10}(t), \quad (3.12)$$

unde: c' - reprezintă un *coeficient de îmbtrânire* pe decadă.

Valorile tipice a lui c' pentru permitivitatea dielectrică și coeficientul de cuplaj piezoelectric, sunt cuprinse între 0,5÷5 %. [46]

Spre exemplu, următorii parametri funcționali prezintă o variație relativă procentuală pe decadă de tip, mai mică de 2 %: *factorul de cuplaj planar*, (K_p); *constanta de frecvență planară*, (N_p^E); *factorul de calitate mecanic*, (Q_m); *permitivitatea relativă*, ($\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$) și *tangenta unghiului de pierdere*, ($\tan\delta$) [87].

Modificările mărimilor caracteristice *piezoelectrice*, care sunt afectate de fenomenul de îmbtrânire, se realizează în paralel cu modificări ale unor caracteristici *mechanice*, datorate schimbării, în timp, a stării de tensiune din material. Cercetările efectuate asupra caracteristicilor mecanice ale materialelor piezoceramice s-au efectuat și ținând seama de "vechimea" materialului supus analizei, scăderile și creșterile unor mărimi mecanice, fiind considerate că se realizează după aceeași lege prezentată în *relația 3.12*.

Fenomenul de îmbtrânire, fiind un fenomen care se petrece în timp, cu evoluție lentă și după o lege deja cunoscută, (3.12), nu constituie un dezavantaj prea mare pentru materialele piezoceramice, datorită posibilităților de control asupra acestui fenomen. Se recomandă reetalonarea periodică a **TFPC**, cu aplicarea corecțiilor necesare, sau introducerea în calculatorul de achiziție a datelor a acestor corecții, care să se aplice automat, la momentul măsurării.

3.2.3. Studiul experimental asupra durtății materialelor piezoceramice

Metoda folosită pentru determinarea microdurtății a fost VICKERS, conform cu normele STAS 9472/8-75, [116]. S-au pregătit probele din pastile circulare, de tip "șaiabă", din **PZT**, debitată cu disc diamantat, cu o răcire abundentă și aplicându-se un regim de așchiere ponderat, pentru a se evita apariția unor modificări microstructurale. Pregătirea probelor, măsurările și interpretarea rezultatelor s-au efectuat personal, într-un laborator de specialitate al *Universității din Patras, (Grecia)*, cu prilejul unei burse *Thempus*, obținute în aprilie-mai 1996. Au fost realizate investigații în diverse zone ale secțiunii, cu solicitări diferite ale vârfului aparatului. Urmele au fost urmărite la un microscop TMC-765, cu mărire de 500 de ori, cele mai semnificative rezultate fiind cuprinse în *tabelul 3.2*.

Măsurarea microdunităților în PZT

Tabelul 3.2.

Sarcina [g]	Măr.diag. d_1 [μm]	Măr.diag. d_2 [μm]	d^2 [μm^2]	HV
200	22,5	27,5	702,25	528,131
	27,0	27,5	742,5625	499,459
	30	29,5	885,0625	419,044
	28,5	27,5	784	473,061
	32,5	31	1024	362,187
	28	27	756,25	490,419
100	24,5	27	663,0625	279,671
	23	20,5	473,0625	391,999
	19,5	21,5	420,25	441,261
	21,5	19,5	420,20	441,261
				HV_{med} = 388,548
50	13,5	15,5	210,25	440,998
	14,0	13,0	182,25	508,751
	12,5	13,5	169	548,639
	14,0	14,5	203,0625	456,608
	14,5	14,0	203,0625	456,608
	14,5	13,0	189,0625	490,419
				HV_{med} = 483,671
500	50,0	46,0	2304	402,430
	52,0	56,0	2916	317,969
	53,5	51,0	2730,0625	339,625
				HV_{med} = 353,341

Media valorilor microdunităților **HV** din *tabelul 3.2* este de **422 HV**.

Se poate concluziona că valorile diferă chiar cu 150 HV, în funcție de locul investigat: por, grăunte, marginea grăuntelui, în mijlocul sau la extremitatea probei; valorile mai mari s-au obținut la (2 ... 2,4) mm de la suprafață, în grăunte fără ruperi transgranulare.

Efectuându-se măsurări de dunitate la suprafața elementelor piezoceramice, valorile au fost mai ridicate decât în interior, datorită și existenței la suprafață a unui strat ecruisat.

Investigațiile realizate la perioade mai îndelungate de timp, (aproximativ 6 luni), s-au obținut mici diferențe între valorile medii, în creștere, odată cu trecerea timpului, datorită înregistrării fenomenului de îmbătrânire a piezoceramicii.

3.2.4. Analiza comportamentului elementelor piezoceramice la solicitări mecanice

S-au realizat măsurători ale solicitărilor maxime (pâna la spargere), a unor elemente piezoceramice de forme diferite, cum ar fi: *paralelipipedice, cilindrice pline, cilindrice cu orificiu central* (tip "șaiabă"), cu grosimi diferite, cuprinse între 0,5 mm și 6 mm. Probele au fost supuse la solicitări *de compresiune constant- crescătoare, prin șoc și la încovoiere*. Valorile medii sunt menționate în *tabelul 3.3*.

Incercări mecanice ale elementelor PZT

Tabelul 3.3.

Nr. probă	Tipul PZT (dimensiuni) [mm]	Tipul solicitării, cu valoarea maximă la rupere			Observații privind friabilitatea
		Rezistența mecanică la compresiune (const. cresc.) [N/mm ²]	Șoc (cădere liberă) h = 25 cm [kg]	Rezistența mecanică la încovoiere [N/mm ²]	
1.	MPG-01 (ø10 x 2)	511	3,5	82	friabilitate pronunțată
2.	MPG-01 (ø20 x 4)	528	6	81	friabilitate pronunțată
3.	MPT-01 (ø12xø3,5x2)	515	2,5	84	friabilitate redușă
4.	MPT-01 (ø11,5x8x0,6)	522	0,5	85	friabilitate redușă
5.*	MPT-01* (ø37xø15x6)	540	5	89	friabilitate pronunțată

Incercările pentru stabilirea rezistenței mecanice la încovoiere, s-au realizat conform STAS 9472/2-84 [112].

*Pozitia 5**, din *tabelul 3.3*, este realizată pe probe cu o "vechime" de aproximativ 5 ani. Se adeverește faptul că, odată cu trecerea timpului rezistența la rupere și la încovoiere crește, rezistența la șoc scade, iar friabilitatea este mult mai pronunțată, porțiuni din elementul piezoceramic, după rupere, să se transforme în particule foarte mici, în diametru de ordinul zecimilor de milimetru.

Pentru a se îmbunătăți calitățile elementelor piezoelectrice sunt necesare îmbunătățiri ale controlului asupra proporțiilor și calității granulometrice a pulberilor care intră în compoziție și respectarea condițiilor de sinterizare.

S-au efectuat cercetări asupra apariției și propagării fisurilor, în elementele piezoceramice, în urma unor solicitări mecanice sau după realizarea unor prelucrări mecanice. În *subcapitolul 3.13.*, s-au abordat aspecte ale modului de rupere, prezent în structura policristalină a elementelor piezoceramice sinterizate. În urma prelucrărilor mecanice de șlefuire pe mașina de șlefuit, folosind hârtie și paste abrazive, s-au depistat câteva situații deosebit de semnificative pentru caracterizarea comportamentului materialelor piezoceramice.

În *figurile 3.24.*, *3.25.* și *3.26.*, sunt reliefate, în trei modalități metodologice diferite, situații de inițiere, propagare și dezvoltare a fisurărilor în PZT.

Datorită unor mecanisme determinate de echilibru static și dinamic al dislocațiilor se realizează o nucleație a microfisurilor, apoi microfisurile se dezvoltă în fisuri macroscopice. Nucleația fisurilor este precedată de o ecrusare datorită solicitărilor variabile. La marginile fisurii se observă anumite striații fragile în planul de clivare, care conduce mai departe la reinițierea fisurării în benzile de alunecare, prin alunecări transversale provocate de mișcarea dislocațiilor elicoidale. Planele de fisurare sunt aproximativ paralele datorită legăturilor formate, prin sinterizare, precum și a modului de propagare a undelor, în cazul solicitărilor variabile.

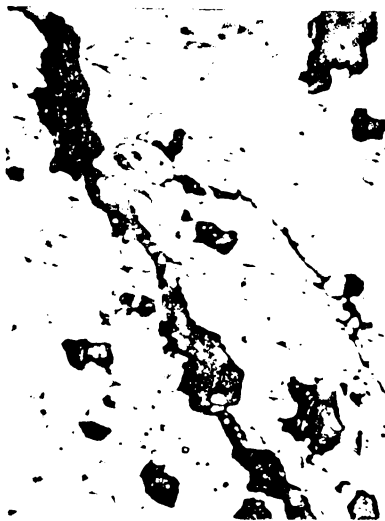


Figura 3.24. - Micrografia unei fisurări în PZT; (Normal, 500x).



Figura 3.25. - Micrografia unei fisurări în PZT; Nomarski, 100x.



Figura 3.26. - Micrografia inițierii și propagării fisurilor în materialele piezoceramice, (prelucrată și scanată de PC; 500x)

Cunoașterea nivelului microfisurilor existente în structura materialelor piezoceramice este foarte importantă pentru utilizatori, mai ales în cazul aplicațiilor **TFPc**, sub solicitările oscilațiilor forțate, în regimul frecvenței de rezonanță, când există pericolul propagării și dezvoltării microfisurilor în fisuri macroscopice, ce pot conduce la ruperea elementului piezoceramic.

Prelucrările mecanice, ulterioare sinterizării, aplicate elementelor **PZT**, care intră în componența **TFPc**, sunt necesare, de regulă, pe suprafețele pe care se realizează depunerea electrozilor. În acest fel, pe suprafețele investigate, se realizează o stabilizare a propagărilor fisurilor, prin pelicula metalică depusă și chiar pătrunsă în neregularitățile și fisurile superficiale rezultate în urma prelucrărilor mecanice, aspect tratat în *subcapitolul 3.3*.

Mecanismele fizice și electrice ale nucleației și propagării fisurilor în materialele piezoceramice sunt extrem de complexe, modelarea ridicând multiple probleme interdisciplinare. Reușita unui asemenea model depinde de pertința discernerii mecanismelor esențiale și abilitatea cuprinderii acestora în relații analitice suficient de explicite de intensitatea și caracterul solicitărilor, de caracteristicile de material și de alte constante termo-fizice și electrice.

Abordarea problemelor legate de defectele posibile apărute în materialele piezoceramice pe durata elaborării, prelucrării sau exploatării acestora, se face în sens profilactic pentru aplicațiile inițiate. De aceea, sunt necesare, atât măsuri de prevenire a acestora, prin corecții în tehnologiile de elaborare și prelucrare, cât și prin alegerea variantelor constructive ale **TFPc**, cu măsuri de utilizare, care să asigure o fiabilitate și siguranță în exploatare. De aceea, se stabilesc nivele admisibile ale stării de rupere, care se verifică la fiecare element piezoceramic supus aplicației. Identificarea acestora, se realizează prin metode nedistructive sau cu ajutorul epruvetelor prelevate din materiale piezoceramice, realizate în aceleași condiții.

3.3. STUDIUL EXPERIMENTAL ASUPRA CALITĂȚII ELECTROZILOR MATERIALELOR PIEZOCERAMICE

3.3.1. Analiza funcțională a electrozilor formați prin depunere metalică pe suprafața elementelor piezoceramice

S-au luat în considerare 4 tipuri de materiale piezoceramice de tip **PZT**, produse de *INCDFM-București* și s-a analizat calitatea depunerilor metalice necesare culegerii sarcinilor electrice. Probele au fost pregătite în laborator și au fost supuse acțiunii unei soluții de **10% HCl + 0,5 % HF + H₂O**, cu menținerea timp de 15-60s. Observarea s-a efectuat cu un microscop metalografic **Carl Zeiss Jena tip S-100 A/G**, fotografierea făcându-se cu un timp de expunere de **1 s**. S-au realizat mărimi de **500x** și **1000x** [121].

Examinând microstructurile prezentate în *figura 3.27.* și a celor din *Anexa B*, s-au remarcat neuniformități ale depunerilor, existența unor pori sub stratul metalic, o granulație destul de mare, cu porozități intercrystaline la toate probele analizate, care pot conduce la instabilități în funcționarea elementului **PZT**.

De asemenea, este vizibilă rezistența superioară la atacul metalografic a unor constituenți din structură, față de cea a materialului metalic depus, elocventă fiind rezistența materialelor **PZT** la acțiunea agenților chimici [58].

Analizând comparativ calitatea depunerilor s-a constatat o aderență mai bună a depunerilor de argint pe materiale piezoceramice de tipul **MPT-01**, (culoare gri metalic), cu o sinterizare mai compactă, făcând posibilă o șlefuire mai bună, fără ciupituri, depunerile fiind și în straturi uniforme și foarte subțiri.

Astfel, se evită în mare măsură imperfecțiuni ce pot conduce la modificarea parametrilor dielectrici și piezoelectrici ai elementelor **PZT**.



Figura 3.27. - Microstructură PZT, cu depunere metalică.

3.3.2 Influența imperfecțiunilor de depunere metalică a electrozilor asupra performanțelor elementelor piezoceramice

Printre condițiile funcționale, electrice, ale elementelor piezoceramice este și încadrarea în limitele prescrise ale: - *permitivității relative*, $\epsilon_{33}^U/\epsilon_0$; - *tangentei unghiului de pierdere*, $tg\delta$; - *rezistivității de volum*.

Pentru respectarea acestor condiții, este necesară o depunere uniformă a electrozilor, cu o aderență maximă.

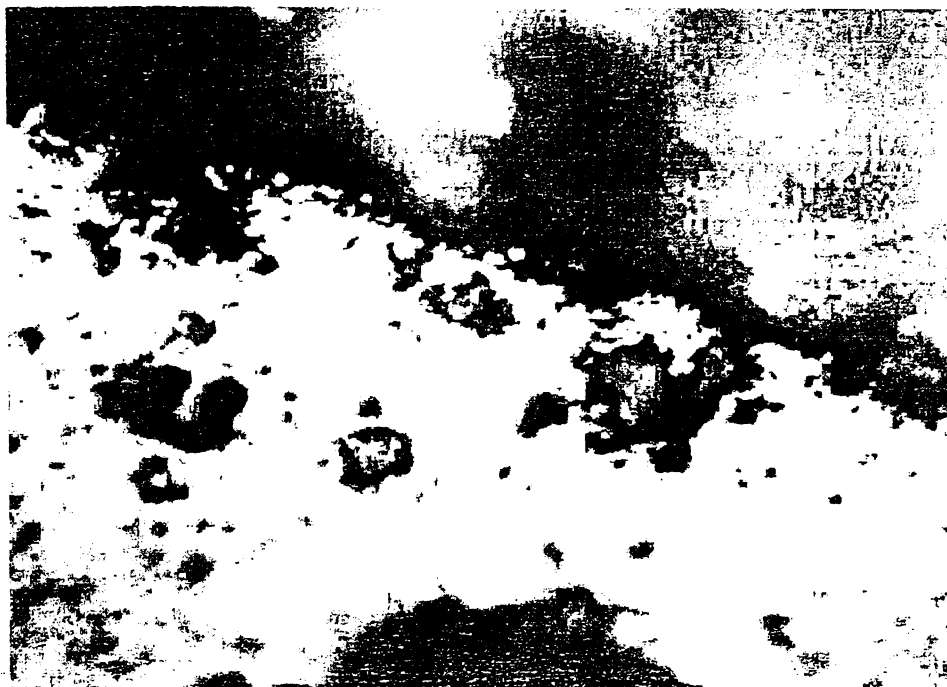


Figura 3.28. - Micrografia scanată a umplerii neregularităților de suprafață a elementului PZT, cu metal de depunere, (1000x).

După cum se observă în *figura 3.28*, materialul metalic depus ca electrod pe suprafața elementului PZT, pătrunde în neregularitățile suprafeței, în pori, determinând formarea unor zone de neomogenitate dielectrică, discontinuități de suprafață, care pot cauza reflexii ale undelor elastice provocate la aplicații cu oscilarea forțată a TFPc, sau modificarea caracteristicilor dielectrice, implicit a celor piezoelectrice, ale elementelor piezoceramice folosite.

3.3.3. Influența electrodului colector de sarcini asupra calității semnalului electric cules

Pentru confecționarea electrozilor colectori de sarcini electrice de pe suprafețele metalizate ale materialelor piezoceramice, au fost experimentate mai multe materiale metalice, urmărindu-se calitatea semnalului cules și mai ales, mărimea tensiunii înregistrate, pentru aceeași apăsare asupra TFPC.

Pentru experimentări s-a folosit montajul, prezentat detaliat în *subcapitolul 4.2.2*. Ca elemente piezoceramice, s-a folosit aceeași pereche de elementele PZT, cu diametrul de 28 mm, cu grosimea de 3 mm.

Sarcina aplicată pentru fiecare încercare a fost, pentru toate cazurile, de 130 daN.

S-au utilizat, în primă fază, atât discuri confecționate din materiale neferoase din tablă de Cu și aliaje de cupru, Al și diferite aliaje de aluminiu, precum și discuri din tablă de oțel austenitic 10NiCr180, toate având o grosime de 0,5 mm.

Apoi, în a doua etapă, au fost încercate discuri din cupru și aliaje ale aluminiului, dar de dimensiuni cât mai reduse, până la 0,1 mm.

Prelucrând datele înregistrate, luând în considerare valorile medii, s-au trasat curbele prezentate în *figura 3.29*. Se remarcă faptul că, nu s-au înregistrat diferențe calitative, prea mari, dar, totuși cele mai bune rezultate le-a înregistrat electrodul din cupru, (99,5 %), cu grosimea de 0,1 mm; apoi aliajele cuprului, (alame), aluminiu, aliajele aluminiului apoi discurile din oțel.

O altă concluzie desprinsă este legată de aspectul posibilei deformări ale electrodului pe timpul solicitărilor, ceea ce ar putea determina modificarea înălțimii TFPC, conducând, astfel la modificarea frecvenței, proprii traductorului, de rezonanță. Situația optimă ar fi, dacă tehnologic, s-ar putea elimina electrodul, prin fixarea direct pe electrodul realizat prin depunere metalică a unui pin pentru transmiterea sarcinilor prin cabluri la amplificatorul de sarcini.

Datorită semnalelor electrice culese, cu intensități foarte reduse, (de ordinul miliamperilor), se recomandă utilizarea și pentru montaje, componente cu impedanță mare, cabluri din cupru, ecranate, (mai ales pentru cazul măsurării în frecvență, *subcapitolul 4.1.2*).

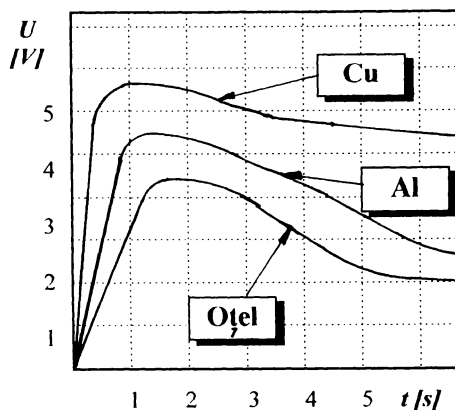


Figura 3.29.- Influența materialelor electrozilor colectori asupra calității semnalului cules.

3.4. SINTEZA CONTRIBUȚIILOR LA OPTIMIZAREA METODOLOGIEI DE OBTINERE A MATERIALELOR PIEZOCERAMICE DESTINATE TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ

Tehnologia clasică de obținere a soluțiilor solide de **PZT**, cu formula generală $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$, (aplicată în prezent în cadrul Institutului de Fizică și Tehnologia Materialelor -București), cuprinde următoarele etape, (figura 3.30.):

a. - *cântărirea și omogenizarea* materiilor prime, (constând din pulberi de oxizi cum ar fi: ZrO_2 , TiO_2 , PbO), cu ajutorul unei mori planetare, în vase de agat, cu bile de agat, în amestec cu alcool metilic, timp de aproximativ 2 ore [84];

b. - *uscarea șlamului* format pe plite electrice cu agitarea magnetic, în capsule de porțelan, pentru evitarea sedimentării oxidului de plumb cu densitate mare;

c. - *presinterizarea sau calcinarea*, timp de aproximativ 2 ore, în creuzete de sintercorund, la (800 ... 1200)°C, funcție de natura materialului. Această etapă se parcurge în următoarele scopuri:

- îndepărtarea apei, a CO_2 din carbonați și a oricăror impurități volatile;
- realizarea reacțiilor termochimice între oxizii constituenți;
- obținerea soluției solide dorite;
- realizarea unei concentrații volumice suficiente;

d. - *măcinarea compusului* presinterizat în aceeași moară, în mediu umed, realizată timp de (4 ... 6) ore, pentru obținerea pulberilor cu granulație de (1 ... 10) μm ;

e. - *presarea pulberilor* măcinate în matrițe de oțel cu o presiune de (0,5 ... 1) tf/cm^2 . În vederea vederea presării se umezește pulberea cu apă distilată. Formele și dimensiunile obținute sunt date de formele matrițelor;

f. - *sinterizarea probelor* în nacele de sintercorund, în aer, la o temperatură de (1000 ... 1250)°C, timp de aproximativ 5 ore, în cuptoare electrice, evitându-se atmosfera reducătoare. Volatilizarea PbO se previne prin îngroparea probelor într-o pulbere grosieră din același material.

Ceramica nesinterizată ar avea o densitate de 60 % din densitatea teoretică a monocristalului corespunzător, iar fragilitatea materialului ar fi pronunțată, legătura intergranulară fiind practic nulă [33].

Prin sinterizare rezultă o legătură intergranulară mare, porii se închid, densitatea reprezentând 95 % din densitatea teoretică [84].

După obținerea pieselor ceramice, în vederea conferirii proprietăților piezoelectrice se parcurg următoarele etape tehnologice:

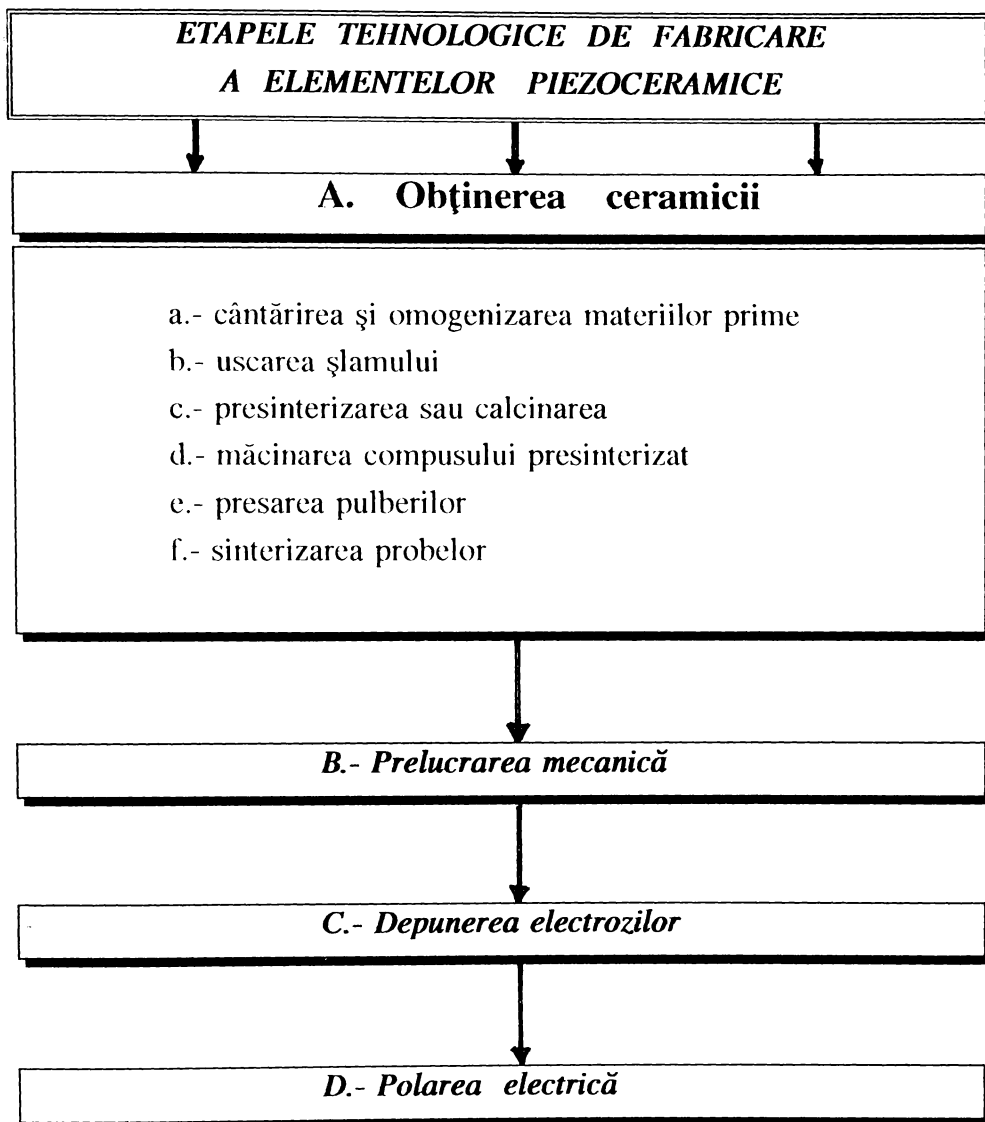


Figura 3.30. Elaborarea elementelor piezoceramice.

1.- *prelucrarea mecanică* a pieselor sinterizate, prin rectificarea cilindrică și apoi plan-paralelă, cu pulberi abrazive și răcire cu apă; eventualele debitări se realizează pe o mașină automată cu disc diamantat. Alte prelucrări de suprafațare se realizează prin abraziune cu carbură de siliciu, cu o granulație sub 15 μm [33].

2.- *depunerea electrozilor* se realizează prin metoda de reducere termică la temperatura de 560°C a pastei de AgCO_3 , (denumită și Degussa Genuu) [110];

3.- *polarea* se realizează la temperatura de 200-300°C, în baie de ulei siliconic, în câmp de aproximativ 30 kV/cm, probele fiind răcite în câmp electric cu viteze de 3 °C/min, până la temperatura de 80°C, în mod specific pentru fiecare tip de compoziție ceramică;

Datorită faptului că îmbunătățirea condițiilor de utilizare a materialelor piezoceramice este condiționată de calitatea ireproșabilă a acestora, calitate dependentă de o tehnologie adecvată, după studiile efectuate, atât bibliografice cât și experimentale prezentate și în *subcapitolele 3.1.1. și 3.1.2.*, pentru **optimizarea tehnologiei** de obținere a elementelor piezoceramice, se consideră două criterii generale: - *criteriul calitativ*; - *criteriul stabilității proprietăților* acestora.

Aceste criterii generale sunt dependente de câteva funcții de influență, care se pot constitui în următoarele subcriterii de optimizare, vizând indici calitativi superiori ale produsului final :

- porozitate - **minimă**;
- dimensiuni medii ale grăunților de aproximativ - **14 μm** ;
- discontinuități, (microfisuri, rupturi,) - **minime**;
- ponderile rupturilor *intra-/trans-* granulare - echilibrate - în proporții egale, **50 %**;
- friabilitatea elementului piezoceramic - **minimă**;
- costuri - **minime**;

Analizând factorii care pot influența caracteristicile de mai sus, cu interdependențe studiate, se propun următoarele prescripții tehnologice de corectare a tehnologiilor clasice:

- deoarece se preconizează calități superioare pentru piezoceramica obținută prin coprecipitare din soluție și descompunerea termică a precipitatului, se recomandă realizarea unui studiu comparativ, de eficiență, al acestei metode și cea clasică de realizare a ceramicelor, direct din pulberi;

- se impune un control automat al temperaturii de presinterizare, în vederea obținerii unei temperaturi optime pentru realizarea completă a reacției termochimice și de măcinare consecutivă, eficientă, cu evitarea pierderii oxizilor volatili de PbO ;

- la măcinarea compusului presinterizat este necesar un control asupra omogenității granulației, înainte de presare a pulberilor, pentru a evita obținerea unor goluri mari intergranulare (în cazul unei granulații prea mari), dar și pentru evitarea obținerii unor proprietăți coloidale a operațiilor tehnologice (datorate unei granulații prea mici);

- este necesară automatizarea comenzilor și controlului tratamentelor termice, stabilite corespunzător pentru fiecare tip de material și șarjă, care să determine dimensiuni optime ale

crystalitelor; deoarece, dacă temperatura este prea mare, rezultă un proces de recristalizare, cristalitele mari crescând pe seama celor mici, obținându-se o porozitate ridicată afectând proprietățile dielectrice și piezoelectrice ale materialelor;

- pentru îmbunătățirea calității suprafețelor și a preciziei dimensionale ale pieselor sinterizate, se recomandă studierea posibilităților de utilizare a prelucrărilor cu ultrasunete;

- deoarece s-au constatat mari deficiențe privind aderența și uniformitatea stratului metalic depus pe suprafețele plan-paralele ale elementelor piezoceramice, operația de depunere poate fi îmbunătățită prin:

- alegerea materialului metalic cel mai adecvat, dintre *Au, Ag, Ni, Cu, Pd, Pt* ș.a., pentru fiecare tip de material ceramic, precum și în raport cu amplasarea piezoceramicilor în construcția TF și cu caracteristicile forțelor de măsurat;

- studierea posibilităților de depunere prin evaporare în vid, a electrozilor;

- pentru a evita montarea în traductor, între elementele piezoceramice a unor discuri metalice pentru culegerea semnalului electric rezultat din apăsare sau excitării piezoelementelor, se impune crearea, odată cu depunerea electrozilor, a unor pini de conexiune electrică directă;

- pentru evitarea unor accidente, pe timpul polării, este necesară în prealabil, introducerea controlului complet asupra integrității elementelor piezoceramice, privind eventuale defecte fizice, fisuri, goluri, ce pot conduce la străpungerea piezoelementului; se recomandă controlul ultrasonor;

- pentru sporirea eficienței operației de polare, se recomandă realizarea pe bază de calcule și experiment, a unor scheme optime termoelectrice de tratament "*temperatură-câmp electric-timp*", ținându-se cont de tipul materialului piezoceramic, de compoziția acestuia. Intensitatea câmpului la stăpungere este funcție de grosimea și configurația elementului, gradul de aderență al electrozului depus. Condițiile optime de polare electrică,

se stabilesc pe o probă disc de dimensiuni mici, cu respectarea corelărilor dintre valorile valorile optime ale câmpului de polare, valoarea tensiunii de străpungere, durata și temperatura de lucru, (*figura 3.30.*), urmărind, atât efectele în raport cu grosimea, cât și modificările intervenite în starea ruperilor din microstructură datorate formării și orientării din domeniile electrice formate.

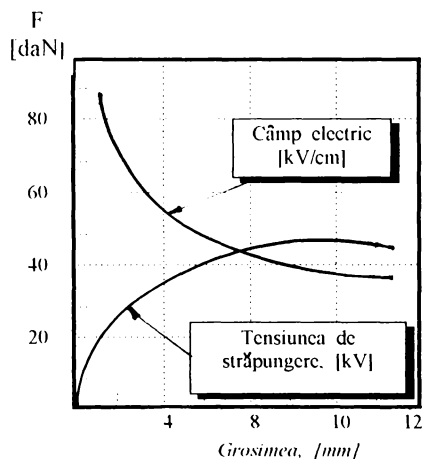


Figura 3.31. - Variația câmpului de polare și a tensiunii de stăpungere în raport cu grosimea elementului PZT.

**4. CERCETĂRI TEORETICE SI EXPERIMENTALE PRIVIND
OPTIMIZAREA CONSTRUCȚIEI TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ
CU MATERIALE PIEZOCERAMICE**

**4.1. STUDIUL VARIANTELOR CONSTRUCTIVE ALE TRADUCTOARELOR
DE FORȚĂ CU UTILIZAREA MATERIALELOR PIEZOCERAMICE**

**4.1.1. Modelarea matematică a aplicării efectului direct piezoelectric
în construcția traductoarelor de forță piezoceramice**

Abordarea studiului utilizării efectului direct piezoelectric în folosirea materialelor piezoceramice în construcția TF, se face pornind de la rezultatele obținute de firme, cum ar fi: *Zeiss Ikon AG, PCB PIEZOTRONICS Inc, KISTLER Instrumente AG* ș.a. Aceste firme sunt recunoscute pentru traductoarele de forță piezoelectrice fabricate pe bază de *cuarț*.

În acest *subcapitol* se propune studierea prin similitudini, a comportării materialelor piezoceramice la solicitări mecanice pe suprafețele plan-paralele ale acestora.

Se consideră un element piezoceramic cilindric introdus într-un montaj, ca cel prezentat schematic, în *figura 4.1*. În lipsa unei tensiuni mecanice, instrumentul de măsură nu sesizează prezența unei căderi de tensiune în circuit. La aplicarea unei forțe pe suprafața elementului piezoceramic, se realizează o polarizare mecanică, iar pe

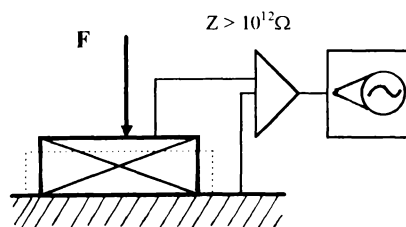


Figura 4.1. - Schema bloc de studiu al efectului piezoelectric direct a PZT.

suprafețele cu electrozi rezultă sarcini electrice, marcate pe cadranul aparatului de măsură, cu valoare corespunzătoare câmpului electric rezultat.

Astfel, la tensiunea mecanică T_i aplicată, se obține un câmp electric E_j cu un coeficient de proporționalitate e_{ij} , de fapt chiar constanta de efort piezoelectric specific materialului:

$$T_i = e_{ij} \cdot E_j \quad (4.1)$$

În cazul unei solicitări statice, tensiunea înregistrată nu este stabilă (*figura 4.2. - a*), datorită consumului de curent pe aparatul de măsurare [13].

În cazul unei solicitări variabile, (*Figura 4.2.- b*), se remarcă o alură a variațiilor tensiunilor înregistrate în care, la creșteri de forțe se înregistrează tensiuni pozitive, iar la micșorări de valori ale forței apar tensiuni electrice de sens contrar, cu tendințe de apropiere către valoarea 0.

Această alternanță de semn a sarcinilor conferă traductorului o aplicabilitate mai mare pentru solicitări variabile, chiar la frecvențe destul de mari, cu o sensibilitate mare și viteză mare de răspuns [25].

La apăsarea aplicată asupra **TFPc** se realizează o deformare elastică a elementelor piezoceramice notată cu x_i .

În *figura 4.3.* sunt prezentate schemele echivalente ale unui **TFPc**, având în vedere inclusiv cablul ecranat și amplificatorul de sarcină corespunzătoare [124]. **TFPc** lucrând ca un generator, (*v.subcapitolul 1.2.2*), valorile sarcinilor produse (q), respectiv a intensitatea curentului electric (i) produs, sunt date de relațiile 4.1.

$$q = K_q \cdot x_i, \quad i = K_q \cdot \dot{x}_i \quad (4.2)$$

unde K_q reprezintă un coeficient de proporționalitate, [C/cm].

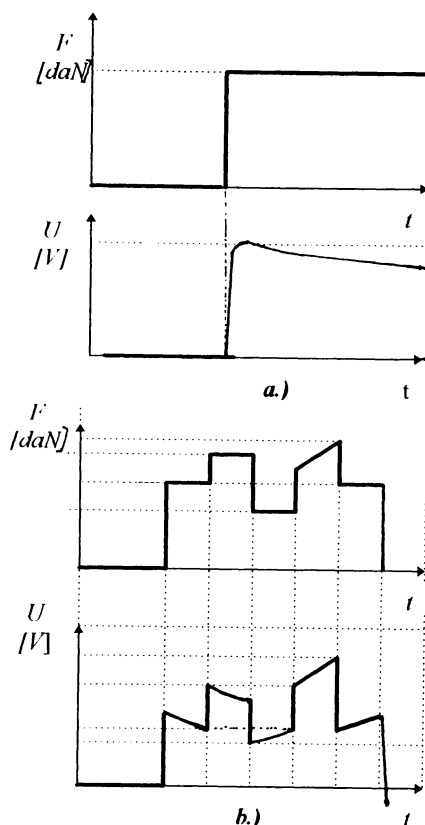


Figura 4.2.- Diagrame de răspuns ale solicitărilor elementelor PZT.

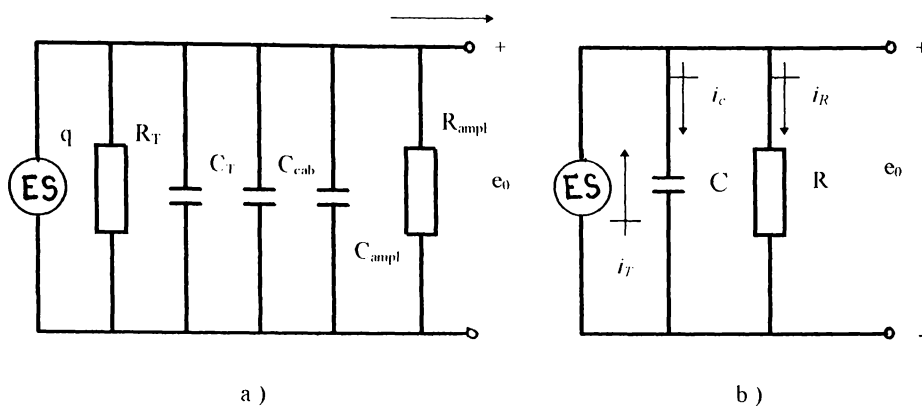


Figura 4.3.- Schema echivalentă a TFPC.

Rezistența și capacitatea echivalente pentru TFPC, se calculează cu relațiile:

$$R = \frac{R_{ampl} \cdot R_T}{R_{ampl} + R_T} \approx R_{ampl}, \quad C = C_T + C_{cab} + C_{ampl} \quad (4.3)$$

Valoarea intensității curentului electric rezultat la solicitarea TFPC, este dată de expresia:

$$i = \frac{dq}{dt} = K_q \cdot \left(\frac{dx_i}{dt} \right), \quad (4.4)$$

Dar, din figura 4.3, rezultă:

$$i = i_C + i_R \quad (4.5)$$

Astfel:

$$e_0 = e_C = \frac{\int i_C dt}{C} = \frac{\int (i_T - i_R) dt}{C}, \quad (4.6)$$

sau:

$$C \cdot \left(\frac{de_0}{dt} \right) = i_T - i_R = K_q \cdot \left(\frac{dx_i}{dt} \right) = \frac{e_0}{R}, \quad (4.7)$$

Ecuția **TFPC** mai puțin putând fi scrisă sintetic sub forma:

$$\frac{e_0}{x_i} (D) = \frac{K \cdot \tau \cdot D}{\tau \cdot D + 1}, \quad (4.8)$$

unde:

$K = K_q / C$ - reprezintă sensibilitatea traductorului, [V/cm];

$\tau = RC$, - reprezintă o constantă de timp a traductorului, [s].

Se remarcă faptul că traductorul **TFPC**, utilizându-i efectul direct piezoelectric, se comportă ca un traductor de ordinul I (de tip diferențial), având ca mărime de intrare **forța** și ca mărime de ieșire *tensiunea* [26].

Pentru a studia modul de răspuns al traductorului **TFPC**, la solicitările mecanice, având în vedere *relația (4.8)*, ecuația diferențială diferențială corespunzătoare, este:

$$(\tau \cdot D + 1) \cdot e_0 = (K \cdot \tau \cdot D) \cdot x_i \quad (4.9)$$

Pentru o valoare constantă: $x_i = m$,
iar: $0 < t < T$, ecuația (4.9), devine:

$$(\tau \cdot D + 1) \cdot e_0 = 0, \quad (4.10)$$

Astfel, la valoarea

$$t = 0^+ \Rightarrow e_0 = m \cdot K_q / C;$$

Rezolvând *ecuația (4.10)*, se obține soluția:

$$e_0 = \frac{m \cdot K_q}{C} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4.11)$$

valabilă pe intervalul $t \in (0, T)$. Se observă că odată cu creșterea valorii constantei τ , descrescerea valorii tensiunii e_0 scade în mai mică măsură [17], [24].

Comportamentul în vecinătatea momentului încetării acțiunii forței, când deformarea încetează a mai exista, ($x_i = 0$), prezintă următoarele particularități:

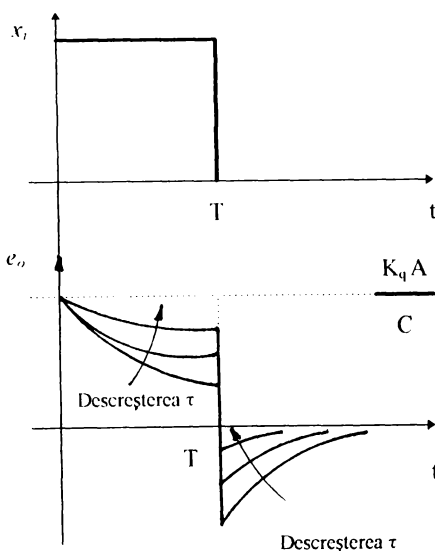


Figura 4.4.- Modul de răspuns la solicitările mecanice a **TFPC**.

- pentru $t = T^-$ soluția *ecuației* (4.10), este:

$$e_0 = \frac{m \cdot K_q}{C} \cdot e^{-\frac{T}{\tau}}, \quad (4.12)$$

- pentru $t = T^+$ soluția *ecuației* (4.10), este:

$$e_0 = \frac{m \cdot K_q}{C} \cdot (e^{-\frac{T}{\tau}} - 1), \quad (4.13)$$

Astfel, *relațiile* (4.12.) și (4.13.) devin condiții inițiale pentru *ecuația* (4.10), soluțiile devenind:

$$e_0 = \frac{m \cdot K_q}{C} \cdot (e^{-\frac{T}{\tau}} - 1) \cdot e^{-\frac{t-T}{\tau}}, \quad \text{pentru } t \in (T, \infty) \quad (4.14)$$

După momentul încetării acțiunii forței, se observă că odată cu creșterea valorii constantei τ , la momentul $t = T$, descreșterea valorii tensiunii e_0 , scade în mai mică măsură (*figura 4.4.*).

Se deduce condiția constructivă de a inseria în circuitul electric al traductorului o rezistență care să crească valoarea constantei $\tau = RC$, în detrimentul minor al scăderii valorii e_0 .

Optim pentru un **TFPC**, este ca:

- valoarea tensiunii e_0 să fie **maximă**;
- sensibilitatea **K** să fie **maximă**;
- timpul **T** de menținere a semnalului la valori ridicate, **maxim**;

Pentru frecvențe scăzute de acțiune a forței implicit trebuie ca **R** să fie **maxim**, ($R \rightarrow \infty$).

De aceea, se recomandă utilizarea **TFPC** cu aplicarea *efectului direct piezoelectric*, pentru solicitări dinamice, forța de apăsare putându-se aprecia prin intermediul *acelerației* [66], [101].

4.1.2. Modelarea matematică a comportării elementelor piezoceramice în condițiile oscilațiilor forțate

Deoarece, în programul de aplicații ale **TFPc** s-au folosit elemente piezoceramice în formă de "disc", s-a abordat studierea comportării, în condițiile oscilațiilor forțate, a cazului discurilor subțiri polarizate în grosime, în care se exercită vibrații radiale.

În *figura 4.5*, este reprezentat un disc **PZT**, de rază r , grosime t , cu electrozi dispuși pe suprafețele plane, polarizat după direcția x_3 , în câmpul P , (aceeași direcție după care se măsoară grosimea, orientată după axa 3).

În disc se induc vibrații radiale, prin aplicarea pe electrozi a unei tensiuni alternative. Din punct de vedere mecanic, **TFPc**, se comportă ca un sistem oscilant de ordinul II. Frecvența proprie de rezonanță depinde de natura materialului piezoceramic și de unele dimensiuni geometrice ale acestora și ale celorlalte componente ale **TFPc** [20], [36].

Notând cu u_r componenta radială a deplasării, precum și, ținând cont de notațiile din *subcapitolul 1.2.1.*, ecuația diferențială, care corespunde cazului de vibrație radială a discului, poate fi scrisă sub forma:

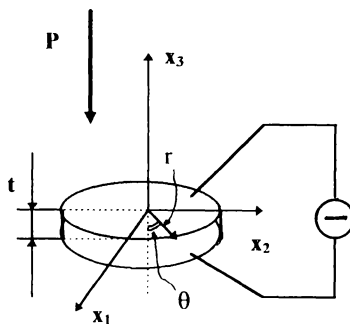


Figura 4.5. - Disc **PZT** în condițiile solicitărilor forțate, radiale.

$$c_{11}^P \cdot \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right) = \rho \cdot \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}, \quad (4.15)$$

unde:

$$c_{11}^P = \frac{s_{11}^E}{(s_{11}^E)^2 - (s_{12}^E)^2}, \quad (4.16)$$

Ecuatiile de bază sunt:

$$T_{rr} = c_{11}^p \cdot \frac{\partial u_r}{\partial r} + c_{12}^p \cdot \frac{u_r}{r} - e_{31}^p \cdot E_3, \quad (4.17)$$

$$D_3 = e_{31}^p \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r \cdot u_r) + \epsilon_{33}^p \cdot E_3, \quad (4.18)$$

unde:

$$c_{12}^p = - \frac{s_{12}^E}{(s_{11}^E)^2 - (s_{12}^E)^2}, \quad (4.19)$$

$$e_{31}^p = \frac{d_{31}}{s_{11}^E + s_{12}^E}, \quad (4.20)$$

$$\epsilon_{33}^p = - \frac{2 \cdot d_{31}^2}{s_{11}^E + s_{12}^E} + \epsilon_{33}^T, \quad (4.21)$$

$$E_3 = \frac{U}{t}, \quad (4.22)$$

Relații, în care U este tensiunea aplicată, iar t reprezintă grosimea discului.

De asemenea,

- s_{ij}^E reprezintă deformabilitățile mecanice ale materialului, în câmp electric constant;
- e_{ij}^p sunt constante de efort piezoelectric radial;
- d_{ij} constante de deformare piezoelectrică;
- ϵ_{33}^T este permitivitatea dielectrică pe direcția 3, la sollicitarea pe direcția 3.

Condițiile de limită pentru modul de vibrație planar, sunt:

$$T_{rr} = 0 \quad \text{la} \quad r = 0, \quad (4.23)$$

Soluția ecuației vibrațiilor, este de forma:

$$u_r = A \cdot J_1 \left(\frac{\omega \cdot r}{v_p} \right) \cdot e^{i \omega t}, \quad (4.24)$$

unde:

- ω este frecvența câmpului aplicat;
- J_1 este funcția *Bessel* de speța 1 și ordinul 1, iar:

$$v^p = \sqrt{\frac{c_n^p}{\rho}}, \quad (4.25)$$

Admitanța electrică este dată de:

$$Y_e = \frac{J \cdot \omega \cdot \epsilon_{33}^p \cdot \pi \cdot a^2}{h} \cdot \left[\frac{2 \cdot k_p^2}{1 - \sigma_p - J_1} - 1 \right], \quad (4.26)$$

unde J_1 este definit prin:

$$J_1(z) = \frac{Z \cdot J_0(z)}{J_1(z)}, \quad (4.27)$$

iar J_0 este funcția *Bessel* de speța 1 și ordinul 0; σ_p este raportul *Poisson* planar:

$$\sigma_p = \frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}, \quad (4.28)$$

k_p este *coeficientul de cuplaj piezoelectric planar*, pentru discuri piezoceramice subțiri, dintre cele folosite în experimentări; determinarea acestei valori se poate face cu relația:

$$k_p = \frac{e_{31}^p}{\sqrt{c_{11}^p \cdot e_{33}^p}}, \quad (4.29)$$

Acest coeficient este legat de K_p , *factorul de cuplaj planar*, (*subcapitolul 1.2.1*), prin relația:

$$k_p^2 = \frac{1 + \sigma_p}{2} \cdot \left(\frac{K_p^2}{1 - K_p^2} \right), \quad (4.30)$$

iar legătura dintre k_p și coeficientul de cuplaj piezoelectric după "31" (k_{31}), este dată prin relația:

$$k_p^2 = 2 \cdot \frac{k_{31}^2}{1 - \sigma_p}, \quad (4.31)$$

Prin combinarea relațiilor: (4.8), (4.12) și (4.16), se obține admitanța electrică dată de relația:

$$Y_e = i \cdot \omega \cdot \varepsilon_{33}^p \cdot \pi \cdot a^2 \cdot \frac{(1 - K_p^2)}{h} \cdot \left[\frac{J_1 - 1 + \frac{\sigma_p + K_p^2}{1 - K_p^2}}{J_1 - 1 + \sigma_p} \right], \quad (4.32)$$

Din ecuația (4.12), *frecvențele de rezonanță* sunt rădăcinile ecuației transcendente:

$$J_1 \cdot \left(\frac{\omega \cdot a}{v_p} \right) = 1 - \sigma_p, \quad (4.33)$$

iar *frecvențele de antirezonanță*, sunt rădăcinile ecuației transcendente:

$$J_1 \cdot \left(\frac{\omega \cdot a}{v_p} \right) = 1 - \sigma_p - 2 \cdot k_p^2, \quad (4.34)$$

În prezentarea ecuațiilor și mărimilor caracteristice oscilațiilor forțate în materiale piezoceramice, nu s-au luat în considerare pierderile pe circuitul electric. Pentru a diminua erorile de calcul, se poate aplica o corecție a ecuațiilor originale, presupunând că toți coeficienții sunt complecși.

Astefel, ecuația elastică, neținând seama de pierderi, se poate scrie astfel:

$$T = c^D \cdot S, \quad (4.35)$$

Tinând cont de vâscozitatea mediului, se adaugă termenul de amortizare mecanică, $\mathbf{R}^* \mathbf{S}$, în ipoteza existenței oscilațiilor armonice de frecvență ω , ecuația luând forma:

$$T = c^D \cdot S + i \cdot \omega \cdot R \cdot S = (c^D + i \cdot \omega \cdot R) \cdot S, \quad (4.36)$$

Analog se poate proceda și pentru ceilalți coeficienți, inclusiv pentru constanta dielectrică complexă.

Pentru a putea opera cu algoritmul de calcul prezentat mai sus, se folosește *funcția Bessel*, soluție a ecuației:

$$\frac{d^2 Z}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dZ}{d\rho} + \left(1 - \frac{n^2}{\rho^2} \right) \cdot Z = 0, \quad (4.37)$$

unde:

- cu ρ s-a notat variabila adimensională, determinată cu relația:

$$\rho = \frac{\omega}{c} \cdot r , \quad (4.38)$$

- funcția $Z(r)$, este rezultată din ecuația de mișcare pentru studiul oscilațiilor forțate la membrane circulare, funcție care dă valorile amplitudinilor oscilațiilor armonice. Se consideră că amplitudinile sunt date de o funcție de forma:

$$Z(r, \varphi) = Z(r) \cdot \sin(n \cdot \varphi + \varphi_0) , \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (4.39)$$

Astfel, forma *funcției Bessel* de speța **I** și indice **n**, ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$), are următoarea formă:

$$J_n(\rho) = \frac{\rho^n}{2^n \cdot n!} \cdot \left[1 - \frac{\rho^2}{2(2n+2)} + \frac{\rho^4}{2 \cdot 4(2n+2)(2n+4)} - \dots \right] , \quad (4.40)$$

Deci:

$$J_1(\rho) = \frac{\rho}{2} \left[1 - \frac{\rho^2}{2^3} + \frac{\rho^4}{2^3 \cdot 4 \cdot 6} - \dots \right] , \quad (4.41)$$

iar:

$$J_0(\rho) = \frac{\rho}{2} \left[1 - \frac{\rho^2}{2 \cdot 2} + \frac{\rho^4}{2^3 \cdot 2 \cdot 4} - \dots \right] , \quad (4.42)$$

Aceste soluții, caracterizează modul de oscilare radială a discurilor piezoceramice, la aplicarea unor tensiuni alternative. Dacă asupra discului piezoceramic se aplică o forță exterioară pe direcția "3", s-a confirmat și experimental modificarea atât a caracteristicilor piezoelectrice ale materialului, cât și a modului de oscilație [4].

S-a constatat că, în condiții de rezonanță, randamentul de conversie poate depăși 90 %, iar coeficientul de cuplaj piezoelectric, peste 70 %.

În cazul construcției unui *traductor de forță*, pe lângă elementul piezoceramic, în montaj mai intră și alte componente, modul de comportare a întregului ansamblu, la aplicarea unei tensiuni electrice alternative, este deosebit de complex, iar în studiul acestuia se pornește de la similitudinea cu un traductor electromecanic compus și polarizat mecanic [66].

4.2. STUDIUL ASUPRA COMPORTARII UNOR MODELE EXPERIMENTALE DE TRADUCTOARE DE FORȚA PIEZOCERAMICE

4.2.1. Traductor piezoceramic destinat solicitărilor la compresiune în regim dinamic

Acest mod de utilizare a **TFPc** conduce, aproximativ, la aceeași formă a funcției de transfer, folosită în cazul *accelerometrelor piezoelectrice*. Printre avantajele acestei aplicații este și acela prin care, chiar la o neliniaritate de 1 %, construcția poate asigura rigidități de ordinul 10^3 - 10^5 daN/mm.

Pentru a se putea utiliza **TFPc** în situații de măsurare cât mai diverse, atât folosindu-se condițiile *efectului direct piezoelectric*, (*subcapitolul 4.1.1.*), cât și pentru cazul *o ilațiilor forțate*, (*subcapitolul 4.1.2.*), se alege o construcție simetrică a **TFPc**. Această variantă constructivă avantajează calitatea măsurărilor datorită influențelor echidistante ale celorlalte elemente componente ale **TFPc**, asupra elementelor active piezoceramice [28].

Considerând o variantă constructivă de **TFPc**, materializată într-un model experimental, cu posibilități de măsurare a solicitărilor dinamice cuprinse între 100÷500 daN, (*figura 4.6.*), s-a realizat un studiu asupra comportamentului traductorului în condițiile măsurării forței dinamice aplicate, prin intermediul unui sistem vibrator, (folosit de obicei pentru încercări la oboseală), unei structuri metalice supusă testărilor.

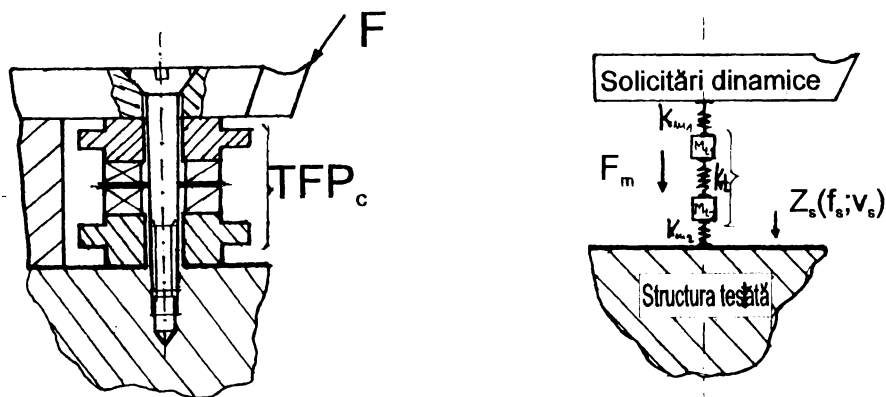


Figura 4.6.- Schemă pentru studiul teoretic al erorilor de măsurare a forțelor dinamice.

Cu K_{m1} și K_{m2} s-au notat rigiditățile armăturilor metalice; dacă impedanța structurii testate, (incluzând și K_{m2}), se definește ca fiind:

$$Z_s = \frac{f_s}{v_s}, \quad (4.43)$$

forța aplicată structurii se scrie: $F_s = Z_s \cdot v_s$. Forța măsurată, F_m , este stabilită prin intermediul semnalelor electrice culese din punctul de mijloc al **TFPC**, ținând cont și de rigiditatea proprie a **TFPC**, K_1 , (care este proporțională cu deplasările, datorate extensiilor și comprimărilor elementelor piezoceramice, ale maselor, simetric dispuse în interiorul traductorului, M_{11} și respectiv M_{12}).

În condițiile măsurărilor dinamice, forțele F_m și F_s nu coincid, diferențele însemnând erorile de măsurare ale **TFPC**. Astfel, acuratețea măsurării poate fi dedusă din ecuația:

$$F_m - v_s \cdot Z_s = M_{12} \cdot D \cdot v_s, \quad (4.44)$$

unde: $D = dx_i / dt$; x_i fiind un punct de pe suprafața de contact a structurii testate.

Astfel, ecuația diferențială (4.21.), se mai poate scrie:

$$\frac{F_m}{F_s}(D) = \frac{M_{12} \cdot D}{Z_s(D)} + 1, \quad (4.45)$$

Având în exemplul *figurii 4.6.*, cazul unei structurii supuse deformărilor elastice, pe timpul solicitărilor dinamice, atunci impedanța Z_s , corespunzătoare sistemului poate fi caracterizată de ecuația diferențială:

$$Z_s(D) = \frac{K_s}{D}, \quad (4.46)$$

unde K_s reprezintă rigiditatea structurii testate. Dacă se trece în sistemul numerelor complexe, fiind caracteristic stării dinamice a structurii, atunci se poate scrie: $D = i \cdot \omega$, (ω fiind frecvența oscilațiilor); în acest caz, ecuația (4.22.) devine:

$$\frac{F_m}{F_s}(i \cdot \omega) = 1 - \frac{M_{12}}{K_s} \cdot \omega^2, \quad (4.47)$$

Studiul acestei impedanțe structurale, pentru cazul **TFPC**, scoate în evidență unele condiții

constructive pentru obținerea unor erori *minime* pentru valorile forțelor măsurate.

Astfel, *masa* armăturilor trebuie să fie *minimă*, dar cu o *rigiditate maximă*.

Sub aspectul aplicațiilor favorabile acestei modalități de măsurare, este mai eficientă situația structurilor cu rigiditate ridicată și a solicitărilor cu frecvențe medii.

De asemenea, în cazul structurilor de formă complexă solicitate dinamic, caz foarte frecvent întâlnit la mașini și utilaje în stare de funcționare, se face necesară implementarea mai multor traductoare **TFPc**, în diferite locuri, considerate sau depistate ca fiind critice.

Avantajul utilizării materialelor piezoceramice în construcția **TF**, este încă odată dovedit prin posibilitatea constructivă de realizare a variantei din *figura 4.7.*, cu trei perechi de elemente piezoceramice, identice dimensional, dar polarizate electric după trei direcții ortogonale. În acest fel, cele trei semnale electrice, culese după fiecare pereche de elemente piezoceramice oferă informații simultane asupra valorilor solicitărilor dinamice ale structurilor supuse supravegherii.

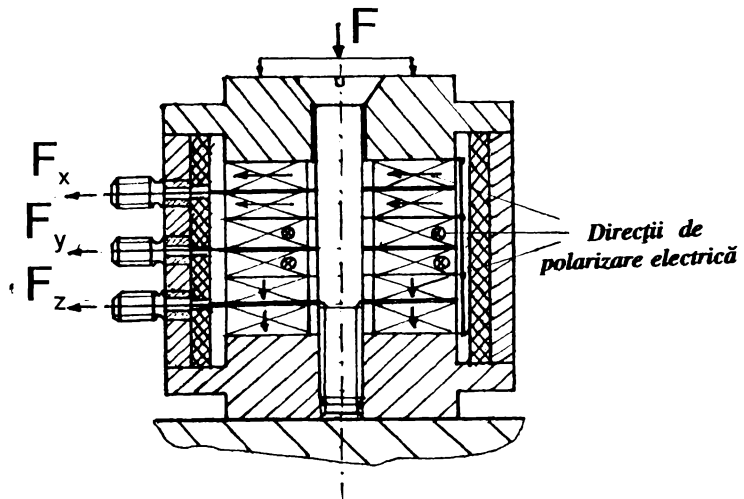


Figura 4.7. - **TFPc** pentru măsurarea forțelor dinamice după 3 direcții.

Această variantă constructivă este lansată către utilizatori de câțiva ani, de către firma **KISTLER Instrumente AG**, dar având ca material pentru elementele active, cristalul de cuarț, tăiat după trei direcții ortogonale. Datorită costurilor ridicate atât a cuarțului, ca materie primă, cât și a prelucrărilor acestuia, prețul unui **TFP** cu cuarț este foarte mare; prin realizarea practică a variantei din *figura 4.7.*, prețul se poate estima redus cu peste 60 %.

4.2.2. Traductoare piezoceramice pentru solicitări la compresiune în regim quasistatic

S-au realizat trei modele experimentale de TF piezoceramice, având în componență elemente PZT produse de *INCDFM-București*. Traductoarele au fost construite pentru solicitări la compresiune după o singură direcție, folosindu-se aceeași variantă constructivă, dar de dimensiuni diferite ale elementelor piezoceramice, cu diametre de 10 mm; 20 mm; 35 mm.

Varianta constructivă a traductorului este prezentată în *figura 4.8.*; după cum se observă, este de tip simetric având în componență: o pereche de elemente piezoceramice cilindrice cu orificiu central (1), intercalate de un electrod de cupru (2); acest pachet este prestâns între armăturile metalice (4) prin intermediul șurubului (3); de asemenea traductorul cuprinde inelele izolatoare (5) și corpul protector metalic (6), pe care sunt montate cuplele de conexiune electrică (7).

Construcția modelului, permite studierea comportării traductorului în diferite situații de legare la sursele de excitație cu curenți de înaltă frecvență, precum și la aparatele de prelucrare și înregistrare semnal.

Considerând constructiv ca pe un ansamblu rezonant, cu acest model se poate studia comportamentul traductorului în condițiile de frecvență de rezonanță, la variațiile forței care acționează simetric asupra traductorului.

Este semnificativ faptul că simultan, se pot măsura și valorile semnalului de tensiune culese, care variază, de asemenea, proporțional cu forța solicitantă, dar cu instabilitate în timp.

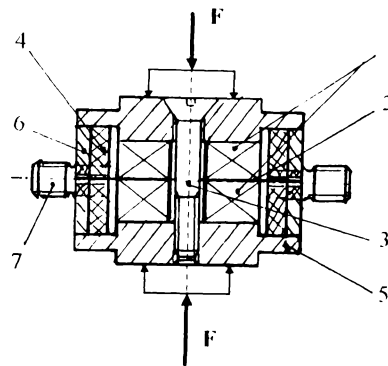


Figura 4.8. - TFPC, pentru măsurarea forțelor în regim quasistatic.

Standul propriu-zis de încercare, prezentat schematic în *figura 4.9.*, pe lângă *traductorul piezoceramic (3)*, mai cuprinde: *presa cu șurub (1)*, *dinamometrul (2)*, *generatorul de frecvență (GF)*, *frecvențmetru (Fr)* și *convertorul frecvența de rezonanță-forță (C)*.

Înainte de începerea încercărilor se realizează *prestrângerea traductorului* în limitele asigurării *compactității și rigidității*, apoi se *acordează în montaj frecvența de rezonanță*.

Încercările constau în *apăsarea traductorului cu forțe*, în trepte, a căror valori sunt urmărite pe *cadranul comparatorului dinamometrului martor*, până se întrevide o *valoare repetabilă a frecvenței de rezonanță*, determinată cu ajutorul *frecvențmetrului*, la valori crescânde ale *apăsărilor*. În continuare, s-a realizat *descărcarea traductorului*, efectuând *măsurători la aceleași trepte de solicitare*.

Încercările s-au efectuat urmărind următorii parametrii:

- a.- capacitatea maximă de încărcare;
- b.- rezoluția;
- c.- rigiditatea;
- d.- semnalul de ieșire;
- f.- stabilitatea în timp a semnalului;
- g.- stabilitatea termică.

Rezultatele s-au trecut în *tabele*, după care s-au ridicat *grafice de variație a variația frecvențelor de rezonanță în raport cu variația forțelor*, pentru fiecare caz în parte, observând *forța în creștere și în descreștere*.

Spre exemplificare, se prezintă *tabelele centralizatoare 4.1., 4.2. și 4.3.* și *graficele aferenteprezentate în figurile 4.10., 4.11., și 4.12.*, pentru cele trei modele experimentate în cadrul cercetării.

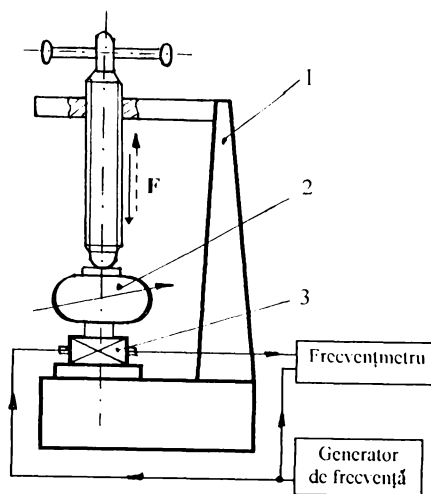
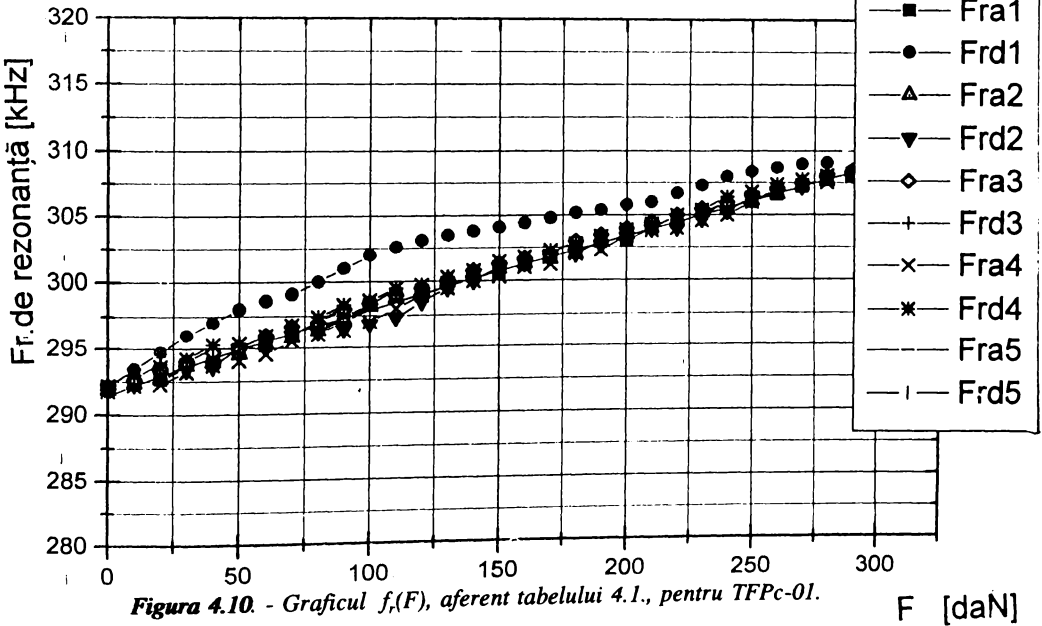


Figura 4.9.- Stand de încercări a TFPC în regim quasistatic.

Valorile măsurate pentru *TFFc-01*

Tabelul 4.1.

F.daN. (X)	Fra1 (Y)	Frd1 (Y)	Fra2 (Y)	Frd2 (Y)	Fra3 (Y)	Frd3 (Y)	Fra4 (Y)	Frd4 (Y)	Fra5 (Y)	Frd5 (Y)
1	0	291,8	292,2	291,9	292	292	291,8	292,2	291,8	292,1
2	10	292,3	293,4	292,4	292,3	292,7	292,8	292,2	293	292,3
3	20	292,7	294,7	292,7	293	293,5	293,8	292,3	293,6	292,6
4	30	293,8	296	293,7	293,4	294	294	293,2	294,2	293,5
5	40	293,9	297	293,9	293,6	294,7	295	293,7	295,3	293,8
6	50	294,7	298	294,5	295	295	295,3	294	295,4	294,2
7	60	295,2	298,6	295,3	295,6	296	295,8	294,5	296	295
8	70	295,9	299,1	295,8	296	296,7	296	295,5	296,8	295,8
9	80	296,4	300	296,3	296,2	297	297	296	297,4	296,1
10	90	297,4	301	297,2	296,4	298	298	296,3	298,3	297
11	100	298,3	302	298,2	296,8	298,4	298,3	297	298,6	298
12	110	299	302,6	298,8	297,3	299	299	298	299,5	298,5
13	120	299,3	303,1	299,3	298,5	299,5	299,4	299	299,7	299,1
14	130	299,8	303,5	299,9	299,5	300,1	300	299,5	300,3	299,6
15	140	300,3	303,8	300,3	300	300,8	300,3	300	300,8	300,1
16	150	300,6	304,1	300,9	301	301,3	301	300,3	301,5	300,8
17	160	301,2	304,4	301,3	301,3	301,7	301,3	301	301,8	301,1
18	170	301,7	304,8	301,6	301,9	302	302	301,2	302,3	301,5
19	180	302,2	305,2	302	302	303	302,3	302	302,8	302,1
20	190	302,9	305,4	302,9	302,7	303,5	303	302,3	303,4	302,8
21	200	303	305,8	303,5	303,3	304	303,4	303,4	303,9	303,2
22	210	304	306	304	303,9	304,5	304	303,8	304,3	303,9
23	220	304,4	306,7	304,4	304	305	304,6	304	305	304,2
24	230	305,1	307,3	305,2	304,7	305,5	305	304,6	305,4	305
25	240	305,5	308	305,4	305,3	306	306	305	306,4	305,3
26	250	306	308,4	306,1	306,4	306,5	306,5	306	306,8	306
27	260	306,6	308,7	306,6	306,8	307	307	307	307,4	306,5
28	270	307,2	309	307,3	307,2	307,5	307,3	307,3	307,8	307

Figura 4.10. - Graficul $f_r(F)$, aferent tabelului 4.1., pentru *TFFc-01*.

F [daN]

Valorile măsurate pentru *TFPc-02*

Tabelul 4.2.

	F, daN (X)	Fra1 (Y)	Frd1 (Y)	Fra2 (Y)	Frd2 (Y)	Fra3 (Y)	Frd3 (Y)	Fra4 (Y)	Frd4 (Y)	Fra5 (Y)	Frd5 (Y)
1	0	239	240,2	239,1	240,1	239,1	240,1	240	240,1	239,9	240,2
2	30	240,4	242,3	240,3	241,4	240,3	242	241,5	241,7	240,9	242
3	65	242,3	244	242,2	243,6	242	243	242,8	242,9	242,6	243
4	100	242,9	246,5	244,3	245	243	244,5	244	243	243,9	244
5	130	244,3	245,8	244,6	245,3	244	245,9	244,6	245	244,4	245
6	165	244,6	246,1	244,9	246	244,5	246	245,3	245,5	245	245,6
7	200	244,9	247	245,3	246,4	244,8	246,7	246	244,9	245,9	246
8	230	245,4	248	246	247,8	245	247,2	246,8	245,2	246,3	247
9	265	246,3	248,4	246,3	248,1	246	248	247,6	246	247,4	247,8
10	300	247,4	248,6	247,3	248,4	247	248,4	248	247	247,7	248,1
11	330	247,9	248,8	247,6	248,6	247,3	248,5	248,8	247,5	248	248,6
12	365	248,1	248,9	247,8	248,3	247,8	248,7	248,5	248,3	248,7	248,6
13	400	248,5	249	248,3	248,9	248	248,8	248,6	248,5	248,8	248,8
14	430	248,7	249,1	248,6	249	248,3	248,9	248,7	248,7	248,9	249
15	465	248,8	249,2	248,9	249,1	248,6	249	248,8	248,8	249	249,1
16	500	249	249,3	249,2	249,2	248,9	249,2	249	249,1	249,1	249,2

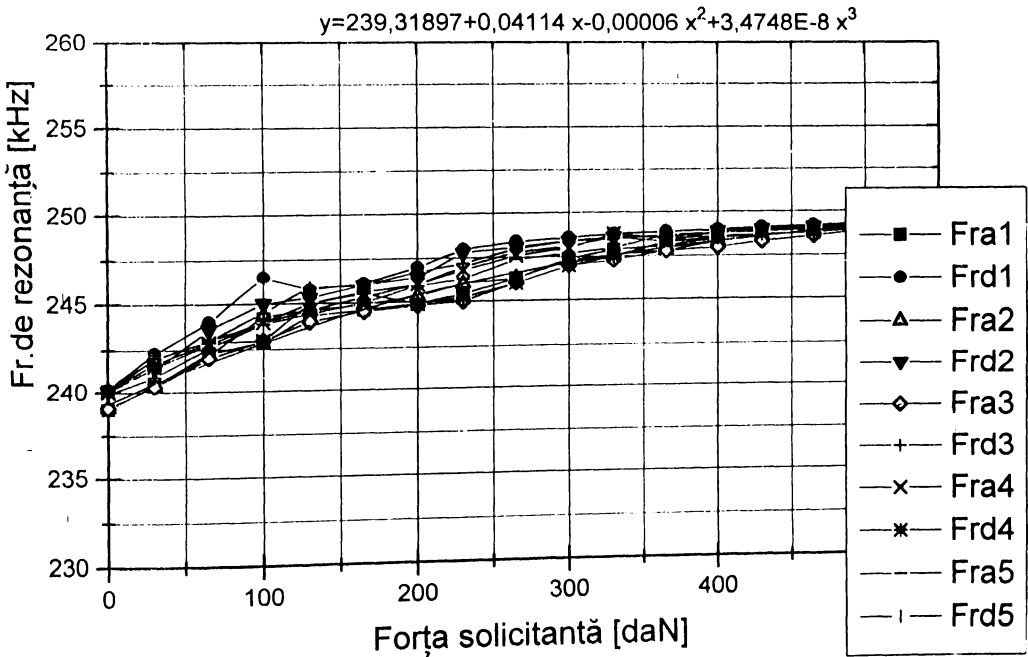


Figura 4.11. - Graficul $f_r(F)$, aferent tabelului 4.2., pentru *TFPc-02*.

Valorile măsurate pentru *TFPc-03*

Tabelul 4.3.

	F. daN. (X)	Fra1 (Y)	Frd1 (Y)	Fra2 (Y)	Frd2 (Y)	Fra3 (Y)	Frd3 (Y)	Fra4 (Y)	Frd4 (Y)	Fra5 (Y)
1	0	371,5	372,7	371	372	372	372,7	371,6	373	371,9
2	50	375,6	379	375	378,3	378	378,6	377	380	377,5
3	100	383	385	382	384,3	384	384,9	383,4	389	383,9
4	150	388	393	386	390,4	390	394	388	396	389
5	200	395	394,5	394	395,3	395	395,4	395	399	394,9
6	250	398,6	400,5	398	399,9	399	399,5	398,5	402	398,9
7	300	400,9	403	400,5	401,3	401	402,6	400,8	404,5	400,9
8	350	403	404,6	402	404,9	404	404	403,8	406	403,9
9	400	405	406,9	404	406,8	406	406	405,3	407,5	405,5
10	450	406,9	408,8	406	407	408	408	407	409,5	407,3
11	500	409	411	408	409	410	410,5	409,2	412	409,5
12	550	411	412,1	410	411,3	412	412	411,2	413	411,6
13	600	412	413,3	411,5	412,5	413	413,5	412	413,5	412,5
14	650	413	413,8	412,8	413,3	413,5	413,8	413,8	414	413,7
15	700	414	414	413,9	414	414	413,9	413,9	414,1	414

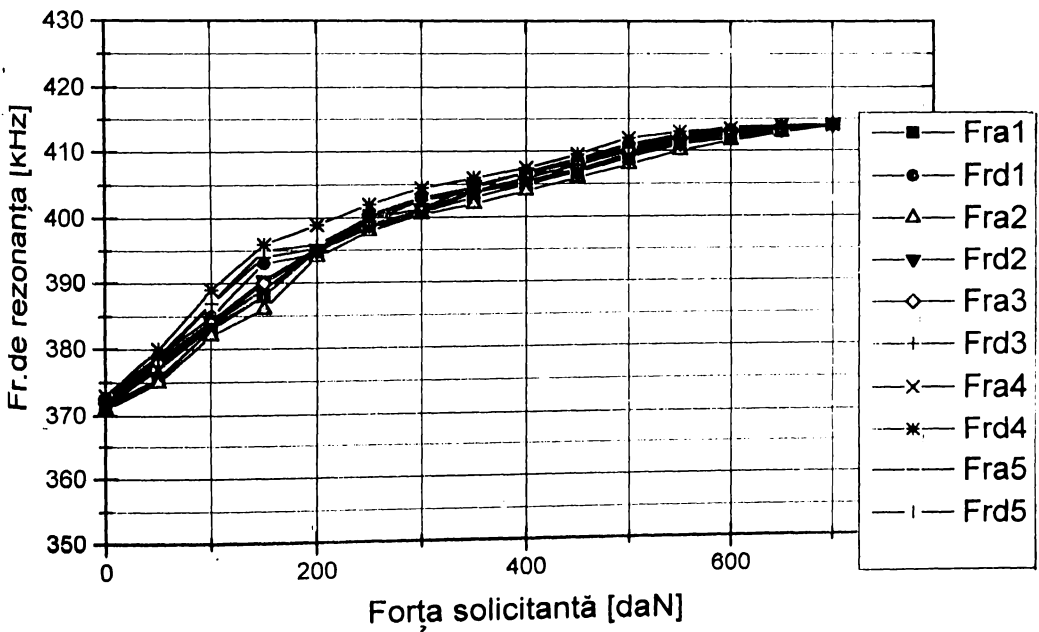


Figura 4.12. - Graficul $f_r(F)$, aferent tabelului 4.3., pentru *TFPc-03*.

Cercetările efectuate pe aceste modele experimentale, au scos în evidență câteva elemente caracteristice comportării materialelor piezoceramice indigene, în componența mai multor variante constructive de traductoare de forță, benefice, mai ales în cazul implementării acestora, în sisteme de supraveghere automată a utilajelor și instalațiilor [109].

În urma experimentărilor, s-au constatat, pentru cele trei **TFPc**, parametrii menționați în tabelul sintetic nr.4.4.

Sinteza caracteristicilor *TFPc*, utilizate în regim quasistatic Tabelul 4.4.

Nr. crt.	PARAMETRUL	Traductoare de forță piezoceramice		
		<i>TFPc-01</i>	<i>TFPc-02</i>	<i>TFPc-03</i>
1.	Capacitatea maximă de încărcare, [daN]	800	1000	5000
2.	Rezoluția, [% x F_{max}]	0,1	0.15	0,01
3.	Rigiditatea, [kN/ μ m]	1 \pm 5	1 \pm 7	1 \pm 9
4.	Semnal de ieșire-tensiunea, [V]	0 \pm 7	0 \pm 9	0 \pm 10
5.	Stabilitate termică, [°C]	< 45	<55	<65
6.	Dimensiuni de gabarit, [mm-mm]	\varnothing 18 x 14	\varnothing 28 x 16	\varnothing 42 x 22

Menținerea în timp a semnalului, practic, a fost nelimitată, eventuale diferențe fiind accidentale, datorate instabilității în timp sistemului de apăsare. Prin sondaj s-a lăsat încărcat traductorul cu o anumită forță un timp, chiar de ordinul orelor, iar la reluarea măsurării rezultatul este neschimbat la aceeași apăsare [62].

Domeniul maxim de încărcare s-a determinat prin aplicarea fiecărui **TFPc** o apăsare în trepte până când frecvența de rezonanță nu s-a mai modificat, valoarea respectivă fiind considerată forța maximă de încărcare pentru fiecare traductor.

Rezoluția s-a determinat după aplicarea a 10 încărcări și descărcări, pentru fiecare **TFPc**.

Pentru verificarea stabilității termice, asupra modelelor experimentale pe perioada măsurătorilor s-a proiectat un aer cald cu temperaturi cuprinse între 20°C și 90 °C. Schimbările frecvenței de rezonanță s-au datorat, în primul rând, unor modificări dimensionale ale celorlalte componente, altele decât elementele sensibile realizate din materiale piezoceramice. Este foarte importantă pretensionarea aplicată **TFPc**, datorită faptului că la încălzire apare o dilatare a elementelor metalice, care mărește înălțimea traductorului, ca element oscilant, ceea ce afectează evident valoarea frecvenței de rezonanță, dar în limite controlabile.

4.3. SINTEZA CONTRIBUȚILOR LA OPTIMIZAREA PRINCIPILOR DE CONSTRUCȚIE A TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ PIEZOCERAMICE

În urma studiilor teoretice și experimentale realizate în subcapitolele anterioare, se propun, în vederea proiectării **TFPc**, următoarele recomandări:

1. - datorită rezistenței la compresiune a materialelor **PZT**, de zeci de ori mai mari decât la extensie (*subcapitolul 3.2.*), se recomandă folosirea acestora pentru construirea **TF** solicitate la compresiune;

2. - tot din motive de rezistență, se proiectează **TFPc**, astfel încât forța să se transmită direct pe suprafața maximă a elementelor **PZT**, nicidecum punctiform, datorită valorilor rezistenței admisibile la compresiune, de aproximativ 500 N/mm^2 , (*subcapitolul 3.2.4*);

3. - datorită, randamentului mare de conversie ($>90\%$), a coeficientului de cuplaj piezoelectric, de peste 70% , (*subcapitolul 4.1.2.*), se recomandă măsurarea forțelor să se realizeze în condiții de excitație până la rezonanța proprie a elementelor piezoelectrice.

Din prezentarea materialelor piezoceramice indigene, (*subcapitolul 3.3.*), s-a observat că frecvențele proprii de rezonanță ale acestora se încadrează în categoria ultrasunetelor, fiind chiar de ordinul sutelor și chiar al miilor de kHz, (spre exemplu pentru o grosime cuprinsă între 12 mm și $0,5 \text{ mm}$, frecvența proprie de rezonanță este cuprinsă în intervalul $(20 \dots 4000) \text{ kHz}$); astfel nu există pericolul confundării acestor oscilații cu solicitările dinamice de măsurat;

4. Se recomandă o construcție simetrică a **TFPc**, pentru ca nodul de vibrație să fie plasat în centru. Asemănător structurii "sandwich", promovată de *Langevin*, [44], elementele piezoceramice, în număr de două, pentru mărirea puterii detransformare, vor fi așezate între două armături metalice, separate între ele de un electrod conectat la sursa de tensiune alternativă de excitație [4]. Astfel, electrodul va fi plasat în nod, iar elementele piezoelectrice (1) și (2), - *figura 4.13.* - sunt polarizate în direcții opuse pentru o activitate optimă.

5. Construcția simetrică a **TFPc** poate conferi o comportare, în condițiile unor oscilații forțate, similară cu cea a unei bare

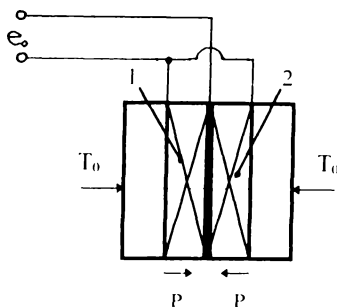


Figura 4.13. - Schema de principiu a **TFPc** simetric.

libere la ambele capete, cu nod în centru și ventre pe extremități. În calculul dimensiunilor componentelor **TFPc**, se va ține seamă de acest aspect, precum și de caracteristicile materialelor care influențează transmiterea oscilațiilor între medii diferite.

6. Ansamblu format se va precomprima, polarizându-se astfel și mecanic [4]. Rolul polarizării mecanice, este și de a tensiona ceramica astfel încât, în funcționare, oscilațiile tensiunii elastice să se efectueze, nu în jurul valorii "0", ci față de nivelul introdus prin polarizarea mecanică a **TFPc**. Pentru o transmitere cât mai bună a oscilațiilor între diferitele medii, precomprimarea este încă o dată binevenită; de asemenea, componentele vor fi lipite cu lac siliconic.

Privit ca un traductor electromecanic, de regulă utilizat ca generator de ultrasunete sau în general de vibrații, polarizarea mecanică determină creșterea puterii acustice pe unitatea de volum, P_{av} , emisă de traductorul compus polarizat mecanic, creștere realizată cu pătratul tensiunii mecanice de polarizare T_{m0} , având forma:

$$P_{av} = \frac{d_{33}^2}{k_{33}^2 \cdot \epsilon_{33}} \cdot (T_m + T_{m0})^2 \cdot Q_m \cdot \omega_0 \cdot \eta, \quad (4.48)$$

unde:

- T_m este tensiunea mecanică de funcționare [N];
- Q_m reprezintă factorul de calitate mecanic, fără sarcină;
- ω_0 este frecvența de rezonanță electromecanică [Hz];
- η reprezintă randamentul electroacustic [%];
- k_{33} este coeficient de cuplaj electromecanic pentru acțiunea pe direcția "3", în cazul polarizării pe direcția "3";
- ϵ_{33} permitivitatea dielectrică [F/m];
- d_{33} constanta de deformare piezoelectrică [m/V];

În figura 4.14., se pune în evidență influența tensiunii de polarizare mecanică asupra frecvenței de rezonanță a traductorului polarizat mecanic. Se remarcă faptul că, odată cu creșterea valorilor tensiunilor de polarizare mecanică, T_{m0} , raportului $\Delta f_r/f_r$, (semnificând frecvența relativă de rezonanță a traductorului **TFPc**), crește cu o rată mare, până la o anumită valoare, după care rata scade lent,

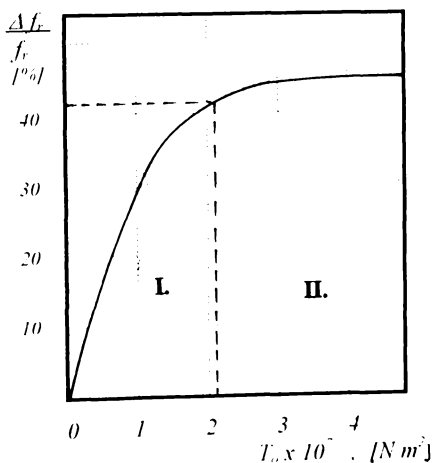


Figura 4.14. - Influența tensiunii de polarizare asupra frecvenței de rezonanță.

ajungându-se la un palier, după care, indiferent de creșterile lui T_{m0} , frecvența relativă rămâne cu o valoare aproximativ constantă. Zona I din grafic, reflectă o variație aproximativ liniară a frecvenței de rezonanță în raport cu valorile tensiunii de polarizare mecanică aplicată transductorului. Deci, pe acest interval de sollicitare mecanică a **TFPC**, se pot măsura valorile forțelor, prin intermediul măsurării volorilor frecvenței de rezonanță aferente. În cazul exemplificării din *figura 4.14.*, intervalului de creștere a tensiunii mecanice $0 \div 300 \text{ daN/cm}^2$, (de la o stare fără existența unei tensionări mecanice până la tensionarea maximă), îi corespunde o modificare continuă a frecvenței relative de rezonanță corespunzătoare modificării valorilor raportului $\Delta f_r/f_r = 1 \div 1,5$.

Deoarece, valorile frecvenței de rezonanță proprii ale **TFPC** experimentate au fost de ordinul sutelor de kHz, (250 ... 730) kHz, preciziile de măsurare pot fi ridicate, corespunzând la o creștere de 1 daN o modificare a frecvenței de rezonanță de aproximativ 0,5 kHz. Astfel, constructiv, este necesar să se țină cont de aceste posibilități de utilizare a **TFPC**, cu respectarea condițiilor de precizie dimensională a componentelor, pentru asigurarea deformabilităților constnte, ale întregului ansamblu al **TFPC**, la sollicitările mecanice din timpul măsurărilor forțelor [64].

7. Armăturile metalice, realizate în forme și dimensiuni identice, pentru păstrarea simetriei, constituie elemente sensibile ale **TFPC**, aflându-se în contact direct cu factorul sollicitant și intermediare între acesta și elementele piezoceramice. Ele influențează astfel, sensibilitatea **TFPC**. Sensibilitatea **TFPC** se poate determina cu relația:

$$S = \frac{F_1}{F} , \quad (4.49)$$

unde: - F_1 reprezintă valoarea forței transmise direct elementelor piezoceramice, [N];
- F - forța de măsurat [N].

Sensibilitatea va fi considerată favorabilă în măsura în care valoarea S va fi cât mai apropiată de valoarea 1, ceea ce implică o rigiditate maximă a elementelor intercalate între suprafața de contact pe care acționează direct forța de măsurat și elementele piezoceramice, care asigură convertirea valorilor acesteia în semnale electrice.

Se recomandă utilizarea pentru armături a *oțelurilor austenitice*, pentru rigiditatea ridicată, ($> 10 \text{ KN}/\mu\text{m}$), dar mai ales pentru modul de cristalizare, (*cubic cu fețe centrate*), asemănător cu materialele **PZT** utilizate, (*subcapitolul 1.2.1.*).

8. În construcția **TFPC** se va urmări obținerea unei puteri maxime de transfer, prin studierea circuitului electric echivalent. Astfel, se determină randamentul **TFPC** avându-se în vedere caracteristicile *dielectrice* și *piezoelectrice* ale elementelor piezoceramice, precum și geometria, masa, elasticitatea, modul de oscilație, pentru fiecare componentă a ansamblului și a întregului sistem.

Factorul de transformare al **TFPc**, depinde de coeficientul de cuplare electromecanică k_c , după cum arată și relația:

$$\alpha^2 = \frac{s_c}{c_m} \cdot k_c^2 - \frac{C_0}{1} \cdot k_c^2 - C_0 \cdot k \cdot k_c^2, \quad (4.50)$$

- unde: - s_c reprezintă strângerea capacitivă a elementului piezoceramic;
 - c_m reprezintă complianța mecanică a elementului piezoceramic;
 - C_0 - capacitatea dielectrică a elementului piezoceramic;
 - k - coeficientul de cuplaj piezoelectric;
 - k_c^2 - reprezintă energia de transformare din energia totală consumată;

O valoare aproximativă a lui k_c^2 se poate afla prin măsurarea *frecvenței de rezonanță* f_r și de *antirezonanță* f_a , determinând ulterior valoarea expresiei:

$$k_c^2 = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{f_a - f_r}{f_r}, \quad (4.51)$$

În montaje de măsurare, **TFPc**, construite pe baza dependenței frecvenței proprii de rezonanță de solicitările mecanice, sunt folosite ca oscilatoare electromecanice. Preciziile care se pot obține pentru varianta constructivă propusă sunt mai mari, iar dacă se perfecționează construcția, preciziile se pot mări, în detrimentul costurilor. Perfecționarea constructivă se poate realiza și prin adăugarea încă a unui pachet de elemente piezoceramic cu acțiune diferențială, eventual cu posibilități de multiplicare mecanică a forțelor de măsurat. O altă metodă poate fi bazată pe folosirea suplimentară a unui traductor de referință, **Tr**, măsurările de forță realizându-se prin determinarea diferențelor de frecvență dintre **TFPc** și **Tr** [69].

Recomandările făcute în acest *subcapitol* constituie repere importante pentru parcurgerea etapelor de concepere, calcul, proiectare și construcție a **TFPc**, dar nu epuizează lista tuturor factorilor care pot influența funcționalitatea acestora. Dar, pentru realizarea modelelor experimentale, aceste recomandări au fost suficiente, având posibilitatea realizării unei baze importante necesare continuării cercetărilor [100], [109].

5. CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE LA OPTIMIZAREA UTILIZĂRII TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ CU ELEMENTE PIEZOCERAMICE

5.1. CONTRIBUȚII LA UTILIZAREA TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ PIEZOCERAMICE CA ELEMENTE DE AUTOMATIZARE A MAȘINILOR-UNELTE

În construcția actuală de mașini-unelte au apărut numeroase elemente noi, care au adus mari schimbări față de tehnologiile convenționale aplicate până în prezent. Importanța lor trebuie apreciată, atât sub aspectul eficienței imediate, privind mecanizarea și automatizarea în diferite nivele ale procesului de fabricație, cât și sub aspectul perspectivei, deoarece automatizarea și robotizarea pe scară largă a procesului de prelucrare, sunt elemente esențiale care stau la baza proiectării și construirii întreprinderilor automatizate ale viitorului [3], [9], [27], [29], [40], [54].

Ca date de **intrare** importante, în cadrul modelului sistemic generalizat de optimizare a utilizării materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță, au fost considerate printre altele, *dotarea actuală* a parcului de mașini-unelte existent atât în sectoarele productive, cât și în laboratoarele de cercetări [118].

Aceste aspecte implică obligativitatea abordării problemei constructive a **TFPc**, cu asigurarea, pe cât posibil, a universalității aplicative, în condițiile de competență calitativă și a costurilor automatizării minime.

De aceea, modelele experimentale de **TFP** au fost concepute ca să poată intra în dotarea a majorității tipurilor de mașini-unelte, cu posibilități de prelucrare diferite, pentru a se putea integra în sistemele de automatizare generale ale fabricației, fără modificări substanțiale ale mașinilor-unelte [77], [78], [90].

Variantele de utilizare abordate, au fost concepute ținând cont de aspectele generale și particulare vizate de automatizare, studiindu-se probleme legate de *sistemul automat*: acesta asigură, fără intervenția umană, transmiterea și efectuarea unei comenzi inițiale de o mărime de intrare, cu scopul de a stabili în mod corespunzător valorile unei mărimi de ieșire. În speță, pentru mașini-unelte sistemul automat presupune prelucrarea prin așchiere, fără intervenția operatorului, cu asigurarea realizării mișcărilor de lucru și auxiliare, executate în succesiunea necesară de către mecanismele de comandă și distribuție, pe baza unui program bine stabilit.

De asemenea, s-a avut în vedere posibilitatea implementării **TFPc** și în contextul sistemelor de automatizare rigide sau elastice, asigurate, sau nu, de comenzi numerice [30], [94].

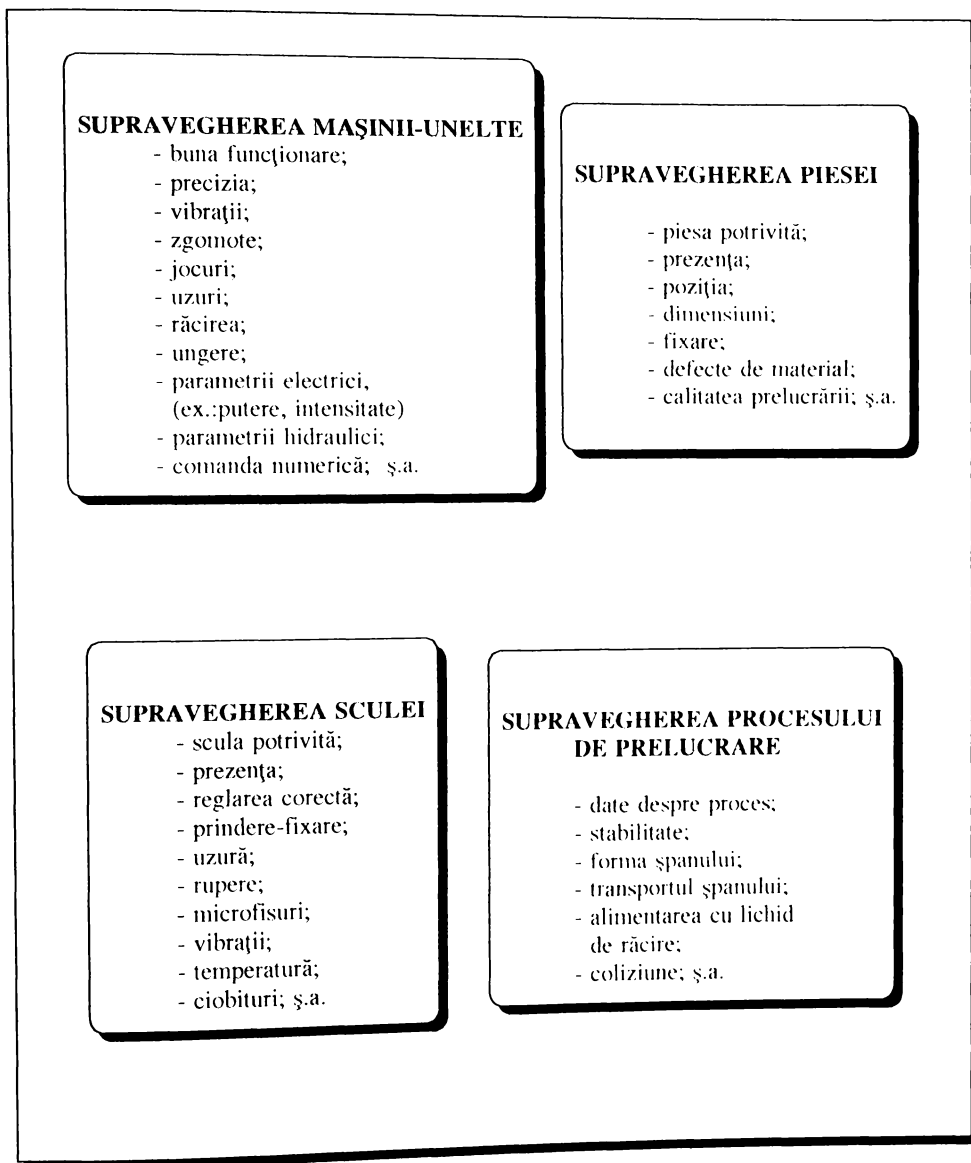


Figura 5.1. - Parametrii de monitorizare, pe secțiuni.

Acordând cercetărilor efectuate și rol de *bază de pornire* în diverse direcții de cercetare aplicativă ulterioară, se consideră posibilă integrarea **TFPc** și în aplicații moderne și de perspectivă a dezvoltării tehnologice, în domeniul prelucrărilor prin așchiere, cum ar fi [99]:

- comanda adaptivă a mașinilor-unelte cu comenzi-numerice;
- conducerea prin calculator a mașinilor-unelte;
- programarea asistată de calculator a mașinilor-unelte cu comandă numerică;
- realizarea celulelor flexibile de fabricație.

Implementarea **TFPc** la mașinile-unelte în vederea asigurării *supravegherii OP* prin așchiere, presupune considerarea a 4 secțiuni principale [53], [79], [107]:

- mașina-unealtă, propriu-zisă;
- piesa de prelucrat;
- scula de lucru;
- procesul de prelucrare.

În fiecare secțiune se urmăresc unul sau mai mulți parametrii, în funcție de amplasarea traductoarelor specifice fenomenelor care au loc. Pentru fiecare secțiune în parte, în *figura 5.1* sunt prezentați principalii parametrii de supraveghere [95].

Teza își propune abordarea acelor parametrii care pot fi monitorizați prin intermediul *forțelor* urmărite cu ajutorul modelelor experimentale de tip **TFPc**.

5.1.1. Experimentări ale traductoarelor de forță piezoceramice în sisteme tehnologice de prelucrare prin strunjire

5.1.1.1. - Studiul variațiilor forțelor de așchiere folosind traductorul TFPc-04

Aplicându-se efectul piezoelectric longitudinal, s-a realizat traductorul **TFP-04**, schematic prezentat în *figura 5.2*.

În corpul (1), de forma unei potcoave, sunt montate două elemente piezoceramice de formă paralelipipedică (2) și (3), având între ele un electrod comun (4). Semnalul furnizat de traductor este maxim după axa Ox și minim după axa Oy .

Traductorul a fost montat cu strângere în placa de bază a portcușitului unui strung normal, SNA-250. Deformația plăcii după axa Ox a traductorului sunt proporționale cu forța care le-a produs, astfel semnalul furnizat de blocul de adaptare poate fi etalonat direct în forță, obținându-se diagrame de etalonare în coordonate *tensiune-forță*. Panta diagramei este în funcție de rigiditatea corpului metalic (1) al traductorului și mai ales de rigiditatea suportului în care a fost montat acesta [14].

Montând în suport trei asemenea traductoare, dar amplasate în trei plane ortogonale, se pot urmări simultan variațiile celor trei componente ale forței de așchiere, (*figura 5.3*).

Semnalele electrice prelucrate de blocul electronic, sunt înregistrate pe banda de hârtie, obținându-se curbele de variație a celor trei componente ale forței de așchiere pe timpul strunjirii.

Încercările au scos în evidență că forțele axiale și radiale cresc cu **uzura sculei** de 2:3 ori mai mult decât valorile forțelor tangențiale [38].

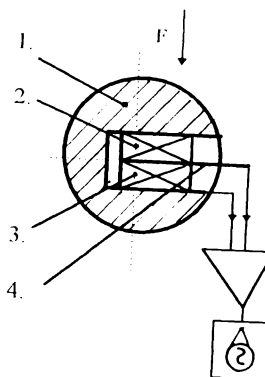


Figura 5.2. - Schema de principiu a traductorului **TFP-04**.

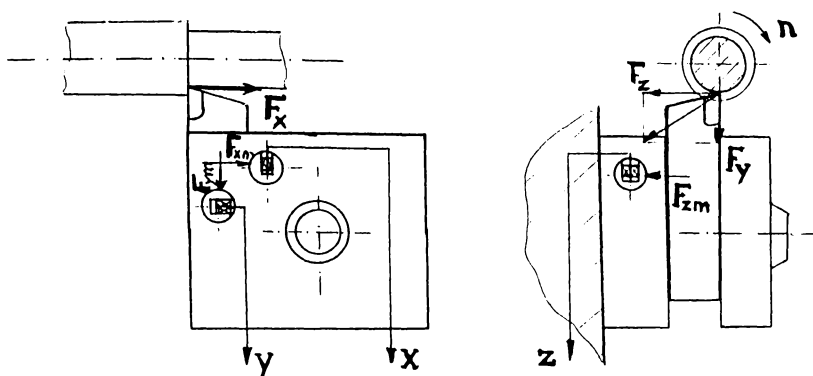


Figura 5.3. - Amplasarea traductorului TFPC-04, la strunjire.

Analizând porțiunea de bandă de hârtie înregistrată, prezentată simplificat în figura 5.4., se remarcă următoarele aspecte:

- componenta tangențială a crescut de la 243 daN la 287 daN, adică de 1,18 ori;
- componenta radială a crescut de la 176 daN la 252 daN, adică de 1,43 ori;
- forța axială a crescut de la 122 daN la 362 daN, adică de 2,97 ori.

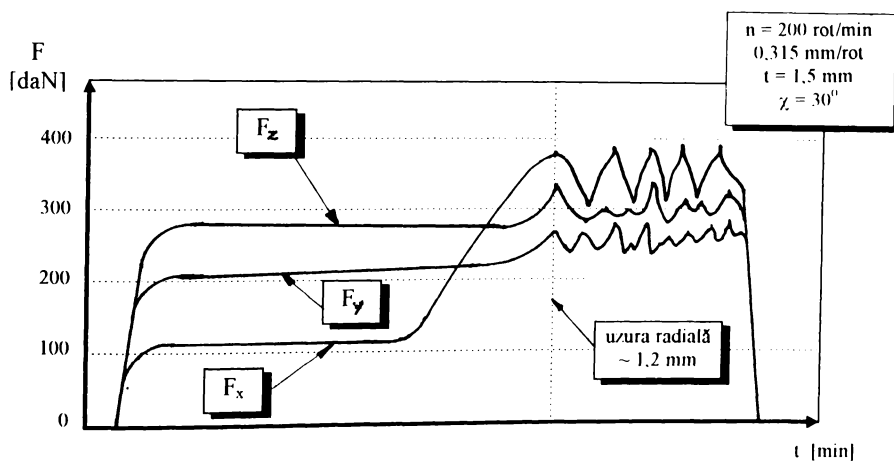


Figura 5.4. - Diagrama de urmărire a forțelor de așchiere.

Astfel, uzura pronunțată a tăișului sculei, se manifestă prin apariția unor vibrații la nivelul sculă-piesă. Continuând prelucrarea, are loc o scădere a valorilor componentelor forței de aşchiere, ca urmare a micșorării adaosului de prelucrare [51], [98].

La semnalarea unui asemenea fapt, se sesizează necesitatea reascuțirii cuțitului de strung.

Pe același stand, s-a studiat și *ruperea sculei* la operația de strunjire. Pentru aceasta, în piesa de prelucrat, s-a simulat o neomogenitate, prin realizarea, pe suprafața de prelucrat, a unei găuri, care ulterior s-a încărcat cu sudură. Astfel, în timpul strunjirii, vârful cuțitului ajuns în zona neomogenității (caracterizată de o duritate mai mare), s-a rupt.

Rezultatele încercărilor, prezentate în graficele din *figura 5.5.*, dovedesc faptul, că în momentul ruperii se evidențiază un impuls al forței, în cazul cuțitelor de strung confecționate din *oțel rapid*, spre deosebire de cazul cuțitelor de strung cu *plăcuță din carbură metalică*.

Caracteristicile ruperii vârfului cuțitului de strung, indiferent de materialul sculei, sunt: - scăderea bruscă a forței după un *impuls*, mai mult sau mai puțin pregnant, cu o durată de circa (2 ... 4) ms, urmată de o creștere pronunțată a forțelor de aşchiere, începând cu prima rotație a piesei [53].

Astfel, se desprinde condiția necesară pentru **TF** destinate supravegherii sculelor la aşchiere, de a asigura un *timp de răspuns* cât mai redus.

Cu privire la comportarea traductorului utilizat **TFPc-04**, se pot preciza *avantajele*:

- prezintă o sensibilitate bună;
- timp de răspuns corespunzător de redus, (*sub 1 ms*);
- domeniul de utilizare este reglabil din blocul de adaptare;
- prin varianta de montare, nu se influențează rigiditatea strungului.

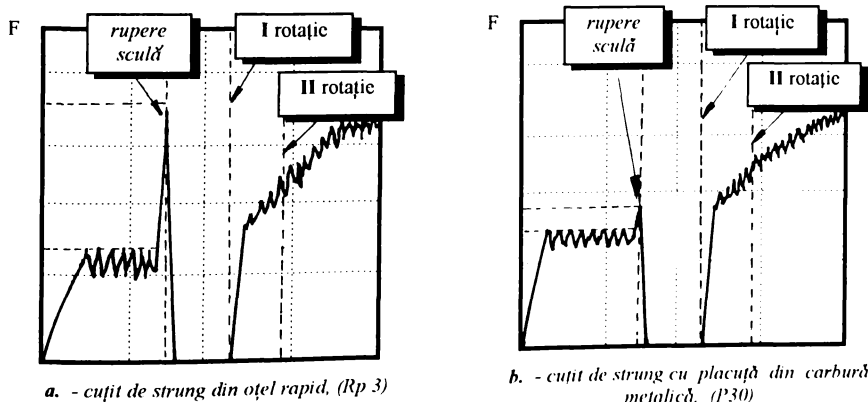


Figura 5.5. - Variația forțelor de aşchiere, până la ruperea sculelor.

Totuși, se menționează și următoarele *dezavantaje*:

- implementarea dificilă a traductorului pe suport portcuțit;
- orientarea greoaie a traductorului;
- comportarea necorespunzătoare la șocuri, ajungându-se chiar la spargerea pastilelor piezoceramice;
- necesită o prelucrare de precizie pentru montaj.

5.1.1.2. - Utilizarea traductorului TFPc - 05

Utilizând, de asemenea, efectul *direct piezoelectric*, s-au efectuat încercări cu **TFPc-05**, prezentat în *figura 5.6.*, având următoarea componență: - două discuri piezoceramice (1); - un electrod de cupru (2); - două armături din oțel (3); - două inele elastice de fixare (4); - un manșon izolator pentru electrod (5); - un cilindru izolator pentru elementele piezoceramice (6); - corp metalic cilindric protector (7).

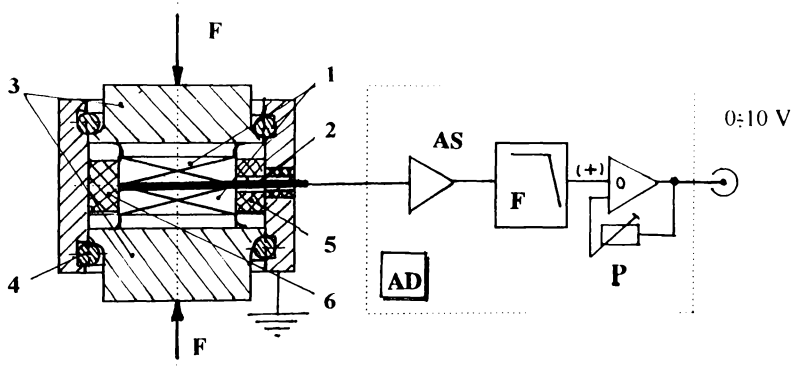


Figura 5.6. - Schema bloc de utilizare a traductorului **TFPc-05**.

De asemenea, **TFPc - 05** fiind de tip generator, nu are nevoie de sursă de alimentare, transformând mărimile solicitărilor axiale în sarcini electrice colectate de electrodul (2) și transmite unui bloc electronic de adaptare semnal, compus dintr-un amplificator de sarcină **S**, un filtru **F** și un amplificator operațional **O**. Pentru a putea menține semnalul, amplificatorul trebuie să aibă o impedanță de $10^{12} \div 10^{14} \Omega$.

Acest tip de traductor prezintă o sensibilitate mare, un timp de răspuns mai mic, fiind în legătură mai directă cu acțiunea forței, dar în condițiile acțiunii cu șocuri există riscul spargerii elementelor piezoceramice [74].

5.1.2. Experimentări ale traductorului *TFPc-06* în sisteme tehnologice de prelucrare prin frezare

Pentru a elimina riscul spargerii pastilelor piezoceramice, sub acțiunea șocurilor, s-a conceput și realizat un traductor, care deși în principiu este un traductor de deformație, poate fi folosit cu succes pentru urmărirea forțelor de așchiere, prin folosirea efectului de forfecare asupra elementelor **PZT**.

Schema de principiu a traductorului **TFPc-06** este prezentată în *figura 5.7*.

Sub acțiunea forțelor de întindere F_t sau ale forțelor de compresiune F_c , piesa suport se deformează. Variația lungimii l , cuprinse între punctele S_1 și S_2 , puncte de preluare prin contact mecanic a deformației piesei suport, se transmite printr-un element elastic **E** la pachetul de pastile piezoceramice **P**, care lucrează la forfecare. Distrugerea elementelor **PZT** prin șoc mecanic este evitată prin introducerea elementelor constructive de limitare a suprasarcinii, care constau în:

- preluarea prin frecare a contactului cu piesa suport;
- existența unui element elastic intermediar;
- utilizarea efectului piezoelectric de forfecare.

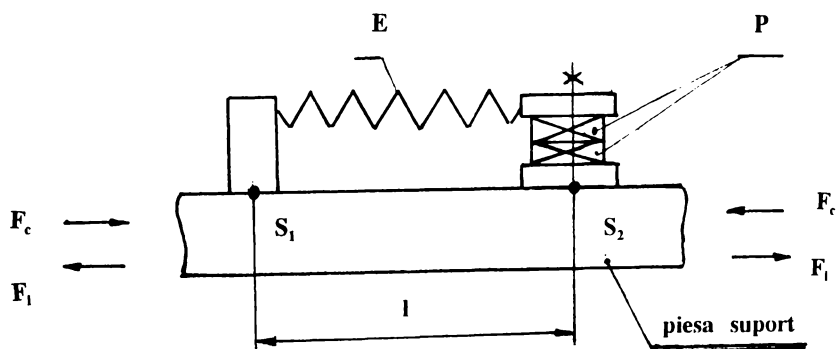


Figura 5.7. - Schema de principiu a traductorului **TFPc-06**.

Traductorul **TFP-06** se compune dintr-un corp metalic (1), în care este montată o pereche de elemente **PZT** (4) (având între ele un electrod de cupru), cu ajutorul piuliței (2) și a tălpii (3), (*figura 5.8*).

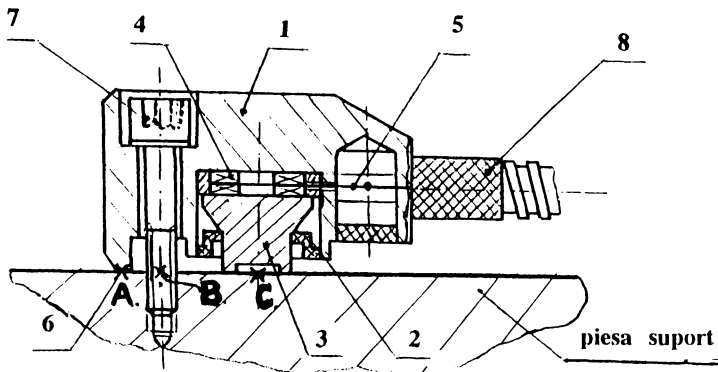


Figura 5.8. - Traductorul piezoceramic TFPC-06.

Traductorul se montează pe suportul fix, cel mai influențat de forțele de așchiere prin intermediul șurubului (7). Deci, montarea și demontarea traductorului se face relativ ușor, fără modificări importante ale rigidității sistemului de așchiere. Dacă nu se cunoaște sensul forței, prin simpla rotire a traductorului în jurul șurubului (7), se poate căuta sensul acesteia în valoare maximă [71].

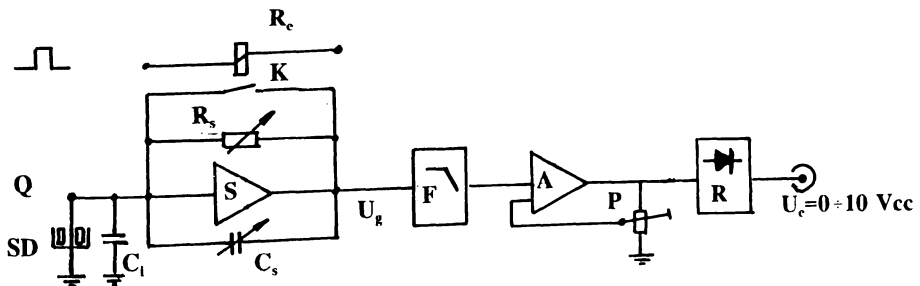


Figura 5.9. - Schema blocului de adaptare semnal pentru TFPC-06.

Sarcinile colectate prin intermediul electrodului (5) de pe suprafețele pastilelor piezoceramice în timpul prelucrării, sunt transmise prin intermediul cablului coaxial (8) la blocul electronic de adaptare a semnalului, (figura 5.9). Blocul de adaptare semnal, se compune dintr-un amplificator de sarcină, un filtru și un amplificator operațional. Amplificatorul de sarcină **S** cu impedanța de intrare mare, are în bucla de reacție condensatorul **C**, cu care se transformă sarcina electrică **Q** într-o tensiune **U_s** proporțională. Impedanța de intrare mare ($Z > 10^8 \Omega$), se obține prin folosirea perechilor de tranzistoare **MOS** de tipul ROS-02. Folosirea în paralel a rezistenței **R_s**, reduce deriva prin micșorarea constantei de timp. Filtrul **F**, de tipul "trece jos", elimină semnalele perturbatoare de frecvență înaltă. Amplificatorul operațional **O**, are o reacție reglabilă cu sensibilitatea senzorului. Tensiunea de ieșire variază în intervalul (0 ... 10) Vcc.

Traductorul se montează pe o suprafață rectificată și fără pete de ulei sau vaselină. Strângerea șurubului de fixare se face cu un moment de (13 ... 15) N·m, astfel încât presiunea de contact dintre senzor și suprafața suport să nu depășească valoarea de 350 N/mm².

Incălcările s-au efectuat pentru studierea forțelor în cazul frezării cu sculă cu mai multe tăișuri, în cazul uzurii acestora. Astfel, s-a montat un traductor **TFPc-06** pe menghina de fixare a piesei de prelucrat, pe o mașină de frezat FU-32, într-o poziție favorabilă urmării componentei axiale (verticale) a forței de așchiere, iar un al doilea similar, s-a montat pentru urmărirea componentei orizontale, (figura 5.10). În imaginea alăturată, se prezintă o imagine dintr-un alt experiment, realizat pe o celulă flexibilă la firma ARIS-Arad, în cadrul unui contract.

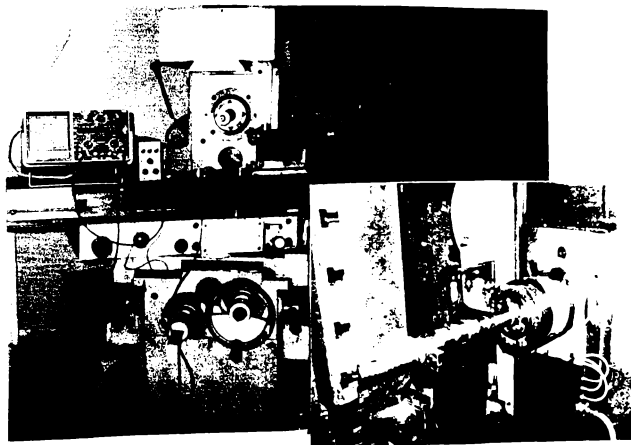


Figura 5.10. - Imagini din timpul experimentării TFPc-06, la operația de frezare.

Intr-o primă etapă s-a urmărit efectul uzurii asupra forțelor de așchiere la frezarea unei piese din **OLC 45**, cu o freză cu diametrul de 18 mm, cu patru dinți.

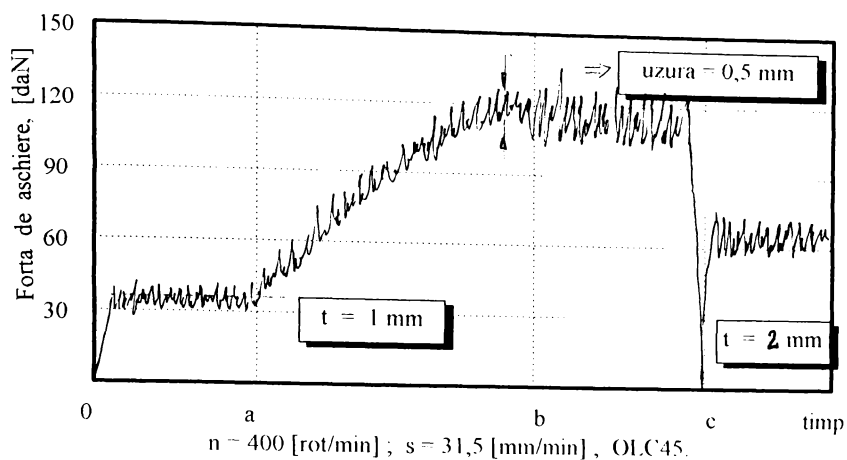


Figura 5.11. - Variația forței axiale, odată cu uzura frezei.

Pentru evidențierea alurii curbei de uzură, s-a folosit un regim de așchiere mai dur, decât cel optim, rezulțând astfel o diagramă ca cea din *figura 5.11*. Se observă că în intervalul de timp **0-a**, prelucrarea se desfășoară normal, iar pe intervalul **a-b** apare o creștere uniformă a forței datorită uzurii normale a frezei, (în punctul **b** uzura fiind de 0,5 mm), componenta axială ajungând la 123 daN, ceea ce reprezintă o creștere de 350 %, față de valoarea nominală.

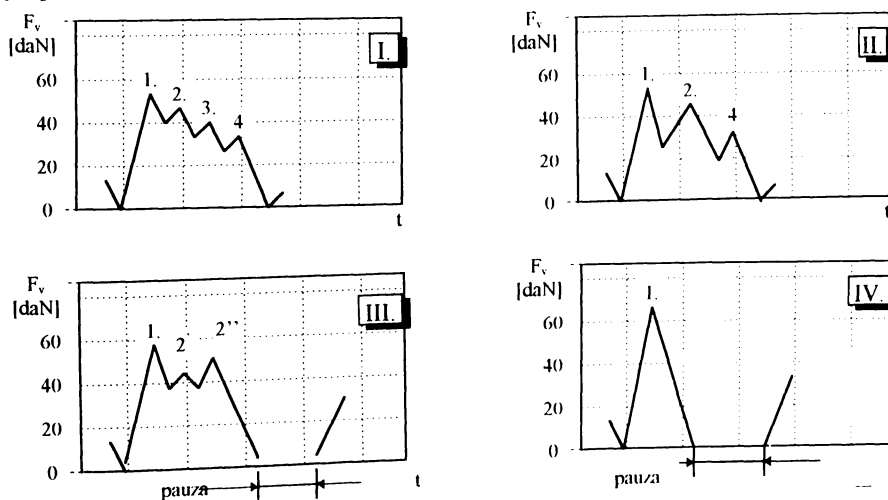


Figura 5.12. - Evoluția forțelor de așchiere la ruperea dinților frezei.

Continuându-se prelucrarea, apar vibrații puternice însoțite de arderea tășurilor frezei. Apoi forța de așchiere începe să scadă; datorită creșterii adâncimii de așchiere de la 1 mm la 2 mm, celelalte elemente păstrându-se aceleași, componenta axială a crescut de la 35 daN la 68 daN, adică cu 165 %.

Un alt experiment al traductoarelor de tip TFPc efectuat la frezare, dar utilizând un traductor **TFPc-04** (prezentat în *subcapitolul 5.1.1.1*), a fost realizat cu scopul de a studia reacțiile forțelor în condițiile ruperii dinților frezei. Astfel, pe aceeași mașină-unealtă, (FU-32), s-a folosit tot o freză cu diametrul de 18 mm și cu patru dinți. Rezultatele se prezintă în *figura 5.12*.

După cum se observă, în prima etapă (**I**) s-a executat frezarea piesei de probă cu scula bine ascuțită; iar apoi, (**II-IV**) s-au simulat, cu puncte de sudură pe piesă, neomogenități, care au condus la ruperea, pe rând a câte un dinte.

Astfel, după ruperea primului dinte (**II**) nivelul forței maxime nu se modifică, ci numai repartizarea încărcăturii pe dinții frezei; în continuare se remarcă faptul că, după fiecare dinte rupt, apar două fenomene:

1. - creșterea forței, datorită mării adăosului de prelucrare la intrarea în așchiere a primului dinte în stare perfectă;
2. - pierderea contactului dintre sculă și piesă, determină apariția în timpul prelucrării a unor șocuri puternice, care conduc la ruperea pe rând și a celorlalți dinți.

În *figura 5.12-IV*, se observă o creștere a încărcării pe dinte cu 171 % față de situația normală.

*

Experimentele prezentate în acest subcapitol, s-au realizat cu scopul demonstrării utilității traductoarelor de tip **TFPc** pentru studiul cazurilor create de disfuncții datorate stării de integritate a frezei.

5.2. CONTRIBUȚII LA UTILIZAREA TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ PIEZOCERAMICE CA ELEMENTE DE AUTOMATIZARE A ECHIPAMENTELOR DE PRELUCRARE PRIN TEHNOLOGII NECONVENTIONALE

5.2.1. Studiul variațiilor forțelor din spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune electrică

În general prelucrarea prin eroziune electrică a metalelor se realizează pe baza utilizării fenomenelor descărcării energiei electrice prin impulsuri între electrodul-sculă și piesa de prelucrat, păstrându-se constant un interstițiu de lucru ocupat în timpul prelucrării, de un mediu lichid dielectric, (ulei, petrol, motorina etc.) [85].

În interstițiul de lucru, microdescărcarea energiei electrice duce la formarea unor microcanale cilindrice pe vârful microneregularităților de pe suprafețele piesei și sculei, unde stratul dielectric este străpuns, având o rezistență mai mică [34],[97].

Fenomenul de ionizare a mediului, în aceste canale, conduce la formarea plasmei la temperatura, de aproximativ $(50 \dots 87) \times 10^4 \text{ K}$, care topește, arde, vaporizează și condensează vaporii de metal.

Au loc, simultan, un proces de piroliză a dielectricului și o dizolvare anodică. Aceste fenomene conduc la apariția unor bule de gaze cu presiuni, temperaturi și viteză de expansiune foarte mari.

Dezvoltarea bulei are loc odată cu transformarea energiei electrice în energie termică, corespunzător fazelor de descărcare, iar mișcarea ei se produce ca urmare a transformării energiei termice în energie mecanică [70].

Pe unitatea de suprafață pot apărea simultan un număr mai mare de microdescărcări, asupra electrodului-sculă și asupra piesei de prelucrat exercitându-se forțe însemnate, care conduc la oscilații ale sistemului tehnologic, (figura 5.13).

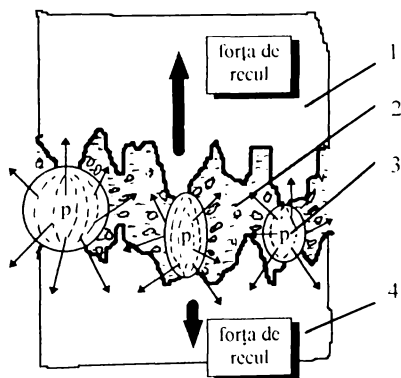


Figura 5.13. - Relieful forțelor de recul la prelucrarea prin eroziune electrică.

În vederea realizării unui sistem de supraveghere a prelucrării prin eroziune electrică s-au studiat forțele de recul care se transmit electrodului-sculă în timpul prelucrării.

Studiul forțelor exercitate asupra electrodului-sculă, în diverse condiții de prelucrare prin eroziune electrică, s-a realizat utilizând un model experimental, având pe electrod înglobat un traductor **TFPc-07**, cu elemente PZT polarizate după direcție axială, cu aceeași direcție cu forțele de recul.

Astfel, într-un electrod de tip cilindric, din cupru, s-a înglobat un **TFPc**, ca în *figura 5.14*. Cele două șaibe piezoceramice (1), sunt intercalate de un electrod de cupru (2), constituind traductorul propriu-zis. Acesta este izolat, din punct de vedere electric, prin intermediul izolatorilor ceramici (4).

De asemenea, precomprimarea și rigidizarea traductorului de electrodul-sculă (5), se realizează prin bușa filetată (3).

În timpul prelucrării, forțele de recul solicită implicit și în mod direct **TFPc**, astfel, pe suprafețele metalizate ale elementelor piezoceramice, apar sarcini electrice culese prin intermediul electrozilor de cupru (2).

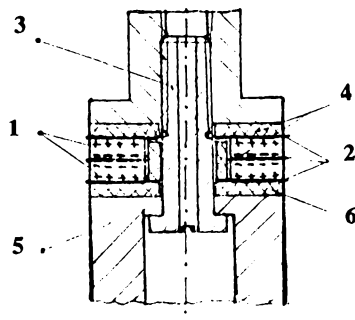


Figura 5.14. - Implementarea **TFPc-07** în electrodul masiv, la eroziunea electrică.

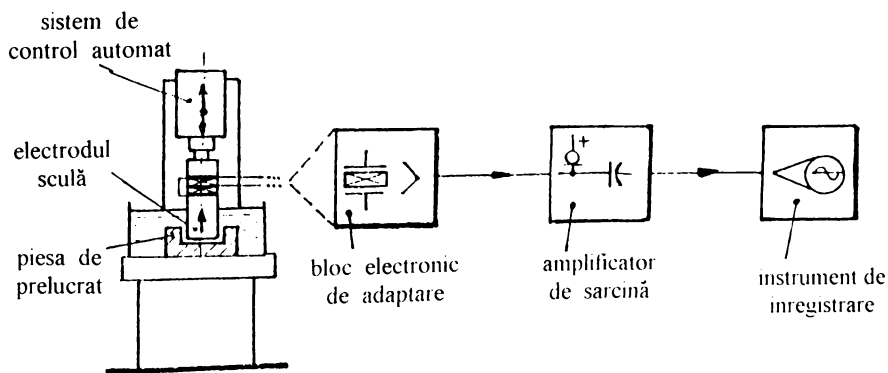


Figura 5.15. - Schema standului de experimentare a **TFPc-07**, la prelucrarea prin eroziune electrică.

Aceste semnale electrice, apărute ca efect direct al solicitărilor dinamice în electrod, datorate forțelor de recul, sunt în continuare *amplificate, filtrate* și introduse într-un modul de *supraveghere*, apoi într-un modul de *diagnoză* [68].

În continuare, informațiile sunt transmise unui calculator, ierarhic superior, contribuind prin intermediul unui echipament de conducere automată, la funcționarea optimă a utilajului de prelucrare prin eroziune electrică.

S-au efectuat găuriri în diferite piese dintr-un oțel austenitic, (15SiNiCr250 - STAS 11523-86), folosindu-se mai multe regimuri de lucru, cu variația energiei impulsurilor cuprinsă în intervalul (0,05 ... 5) J, durata impulsului în intervalul (4 ... 800) μ s, iar frecvența cuprinsă în intervalul (0,8 ... 6) kHz.

În figura 5.16., se prezintă o imagine din laboratorul de tehnologii neconvenționale a Facultății de mecanică, Timișoara, unde s-au realizat experimentările.



Figura 5.16. - Imagine din timpul experimentărilor traductorului TFPc-07, la prelucrarea prin eroziune electrică. (Laboratorul de tehnologii neconvenționale, Facultatea de mecanică, Timișoara).

După delimitarea informațiilor referitoare la variația forțelor de recul, de alte informații colaterale, s-au putut realiza unele observații asupra mărimilor acestor forțe, în raport cu regimurile de lucru aplicate.

Prezenta cercetare, confirmă posibilitatea utilizării TFPc, perspectiva optimizării constructive unui echipament complex de supraveghere a prelucrărilor prin eroziune electrică.

5.2.2. Studiul variațiilor forțelor din spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune electrică complexă

Eficiența utilizării tehnologiei de *eroziune electrică complexă* pentru debitarea materialelor metalice greu prelucrabile este unanim recunoscută, fapt ce determină studierea aprofundată a tuturor fenomenelor rezultate în spațiul de lucru, care pot influența în mod favorabil sau nefavorabil performanțele prelucrării.

Un interes deosebit al aplicării eroziunii complexe este orientat către debitarea unor materiale din carburi metalice; în acest caz, sunt cunoscute restricțiile impuse parametrilor tehnologici, cauzate de tensiunile termice și mecanice, care pot determina apariția unor fisurări, rupturi locale, alunecări de straturi în materialul supus debitării, în zona din imediata apropiere a spațiului de lucru.

Studiul și-a propus evaluarea efectelor *forțelor* rezultate din undele de șoc provocate de descărcările electrice în impulsuri generate de ruperea microcontactelor parcurse de curent, precum și o metodă practică de urmărire a variațiilor acestora pe timpul prelucrării cu diferite regimuri.

Analizând procesele care au loc în spațiul de lucru elementar și tehnologic, în *figura 5.17.*, se prezintă cu preponderență momentul formării undelor de șoc datorate descărcărilor electrice, care au loc datorită:

- ruperii contactului de scurtcircuit metalic pe microasperitățile dezvelite de pelicula pasivă, anterior formată prin dizolvare anodică;
- străpungerii spațiului între două microasperități imediat vecine: una situată pe anod - obiect de prelucrat, OP, iar cealaltă pe catod - obiect de transfer OT.

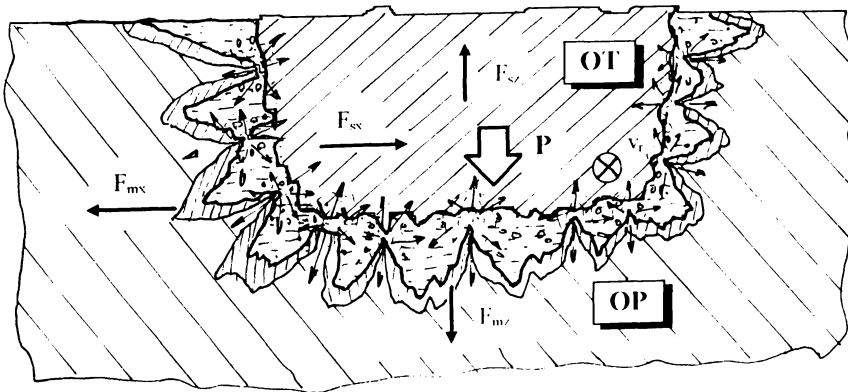


Figura 5.17. - Aspect din spațiul de lucru la prelucrarea prin eroziune electrică complexă.

Aceste descărcări electrice în mediu lichid, conduc la formarea unor microcanale cilindrice pe vârful microneregularităților de pe suprafețele piesei (**OP**) și obiectului de transfer (**OT**), iar ca urmare a fenomenului de ionizarea mediului, în aceste canale se formează plasmă la temperaturi de ordinul ($10^4 \dots 10^5$) K, care topește, arde și vaporizează elemente componente din spațiul de lucru din zona cea mai apropiată. În continuare, vaporizarea conduce la deformarea canalului de plasmă sub forma unei bule de gaz care, datorită temperaturii și presiunii mari din interior, va exploda, rezultând un lucru mecanic de generare a unei unde de presiune, a cărei valoare poate fi calculată cu relația:

$$p \cdot dV = I \cdot U \cdot dt - \frac{1}{\gamma - 1} d(\Delta U) - d(R_r) , \quad (5.1)$$

- unde:
- p - presiunea din interiorul bulei, [MPa];
 - $I \cdot U \cdot dt$ - energia eliberată într-o microdescărcare, [J];
 - γ - căldura specifică a gazului format, [J/kg·grd];
 - ΔU - energia internă a bulei de gaz, [J];
 - $d(R_r)$ - energia de radiație termică rezultată, [J].

Deși la începutul descărcării bulele de gaz are mai mult o formă cilindrică, ținând cont de viteza mare de expansiune a acesteia, în calcul poate fi considerată forma sferică, deducându-se astfel o valoare maximă pentru presiunea din interiorul bulei de 280 MPa, temperatura de maxim 87 000 K, iar o viteză de expansiune de 160 m/s [37].

De menționat, este faptul că, presiunea datorată expansiunii bulei se propagă ca o undă sferică, fiind astfel invers proporțională cu distanța de propagare.

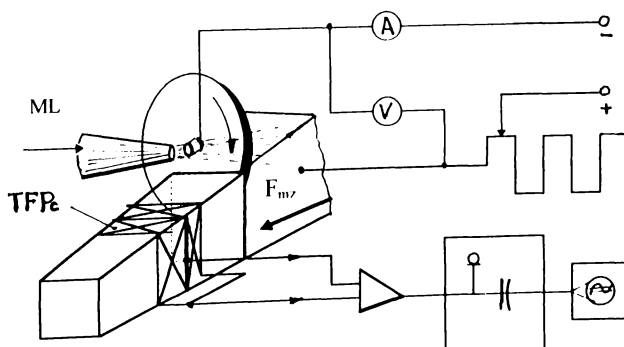


Figura 5.18. - Utilizarea TFPc-08 la prelucrarea prin eroziune electrică complexă.

Efectele forțelor rezultate sunt accentuate în spațiul disruptiv, contribuind la desprinderea în bucăți a particulelor din pelicula pasivă, expulzarea particulelor de material erodat; în parte efectele se regăsesc și în solicitarea mecanică a materialului de debitat și a sculei, după componentele F_{mx} , F_{my} , F_{mz} și respectiv F_{sx} , F_{sy} , F_{sz} , (figura 5.18.)

Componentele F_{my} și F_{mz} cumulează și apăsarea creată de sculă asupra materialului pentru distrugerea peliculei pasivante. De aceea, pentru urmărirea variației solicitărilor datorate undelor de șoc, se recomandă observarea componentei F_{mx} ; se pot urmări și celelalte componente pentru remarcarea modificărilor solicitărilor la diferite regimuri de lucru.

Pentru cercetări experimentale, s-a folosit supravegherea forțelor, care solicită materialul de prelucrat în timpul debitării cu ajutorul unui *traductor de forță piezoelectric*, cu elemente *piezoceramice* de tip **PZT**, **TFPc**, amplasat, cu elementul sensibil, în imediata apropiere a fantei debitate.

Studiul variației forțelor la debitarea prin eroziune electrică complexă poate oferi câteva direcții de acțiune pentru optimizarea regimurilor de lucru pentru debitarea diferitelor materiale metalice greu prelucrabile prin procedee clasice; astfel, se pot face corelări între tensiunea și curentul de alimentare și :

- lățimea minimă ce poate fi debitată cu precizie;
- tipul de material de debitat;
- grosimea materialului de debitat; ș.a. [68].

Varianta de măsurare a acestor forțe, utilizând un traductor *piezoceramic*, **TFPc**, asigură avantajul unui sistem rigid de măsurare, viteză mare de răspuns, sensibilitate ridicată, convertirea directă a solicitărilor din material în semnale electrice ușor prelucrabile, precum și, adaptabile la sistemele de automatizare, fiind posibilă și urmărirea variațiilor forțelor în raport cu variațiile de tensiune și curent, pe tot timpul prelucrării.

5.2.3. Studiul forțelor cu ajutorul traductorului de forță piezoceramic la prelucrarea cu jet de apă

Prelucrarea cu jet de apă cu abraziv, se realizează cu cunsum energetic mare și solicitări mari atât asupra componentelor sistemului de prelucrare, cât și asupra materialului supus prelucrărilor. Aspectul urmăririi acestor solicitări prin intermediul variațiilor *forțelor* este o problemă dificilă, dar necesară. Dificultatea constă în găsirea unor modalități de măsurare a forțelor cu sisteme rigide, miniaturale, cu viteză mare de răspuns, cu semnale de ieșire prelucrabile și compatibile cu echipamentele de urmărire și ai celorlalți parametrii de lucru. Astfel, s-au conceput și proiectat modalități de implementare a **TFPc** în construcția instalației de prelucrare cu jet de apă cu abraziv.

Determinarea forțelor rezultate pe perioada de prelucrare cu jet de apă cu abraziv este necesară mai ales pentru asigurarea posibilităților de realizare a unei modelări matematice a procesului.

Experimentările au avut în vedere verificarea condițiilor optime pentru prelucrarea unui anumit material, realizându-se standul schematic prezentat în *figura 5.19*.

Sistemul de generare a jetului cu amestec cu apă cu abraziv utilizat, folosește principiul multiplicării *presiunii de ulei* de la $5 \cdot 10^6 \text{ Pa/m}^2$, la $200 \cdot 10^6 \text{ Pa/m}^2$. În stand au fost utilizate patru **TFPc** (4) amplasate între *disipatorul de energie* (3) și *masa de lucru* (5).

Pe baza datelor culese s-a studiat modul în care variază forța funcție de presiune, presiune a cărei variație este urmărită tot prin intermediul unui traductor piezoceramic [76].

Pe baza experimentărilor efectuate s-au putut face evaluări cantitative și calitative asupra *forței* de prelucrare și deci, implicit asupra procesului de prelucrare în sine.

Semnalele s-au cules de la patru **TFPc**, intercalate între corpul de prelucrat și suportul acestuia, pentru solicitarea globală, de la un alt **TFPc** special pentru variația forței în diferite puncte egal depărtate de punctul de impact al jetului cu corpul de prelucrat, precum și de la un traductor de presiune piezoceramic, dovedit **optim** și pentru asemenea instalație [123].

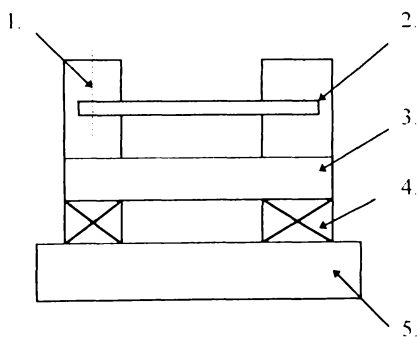


Figura 5.19.- Schema standului de urmărire a forțelor cu TFPc-09, la prelucrarea cu jet de apă cu abraziv.

5.3. CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA MONITORIZĂRII UNOR OPERAȚII DE PRELUCRARE PRIN UTILIZAREA TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ PIEZOCERAMICE

5.3.1. Model generalizat de monitorizare

Monitorizarea proceselor de fabricație, reprezintă acțiunea, bazată pe evaluarea semnalelor culese, de identificare a *ieșirilor* valorilor caracteristice proceselor în afara limitelor de funcționare normală [31].

Această acțiune prezintă două laturi:

- *însușirea informației;*
- *evaluarea informațiilor.*

În *figura 5.20.*, se prezintă schematic sarcinile unei monitorizări, care îndeplinește, în principal, funcțiile de:

- *culegere* a informațiilor din procesul de prelucrare, cu ajutorul **TFPc**;
- *reținere și prelucrare* a semnalelor corespunzătoare informațiilor culese,
- *control* al deciziilor nou create;

Urmare a înlăptuirii acestor funcții, monitorizarea oferă date estimative asupra condițiilor de desfășurare a *operației de prelucrare, OP.*

Implementarea **TFPc** în sistemul de monitorizare propus se realizează pentru culegerea informațiilor referitoare la variația forțelor din diverse puncte critice, eventual după *1, 2 sau 3 direcții* ortogonale, forțe care pot caracteriza parțial desfășurarea unei anumite **OP.**

Cea mai simplă relație ce se poate stabili pentru neincadrarea valorii forței între limitele impuse, este:

$$y < t_x \quad (5.2)$$

- unde: - *y* reprezintă semnalul cules de traductor;
- *t_x* reprezintă pragul de valoare, pentru o prelucrare normală.

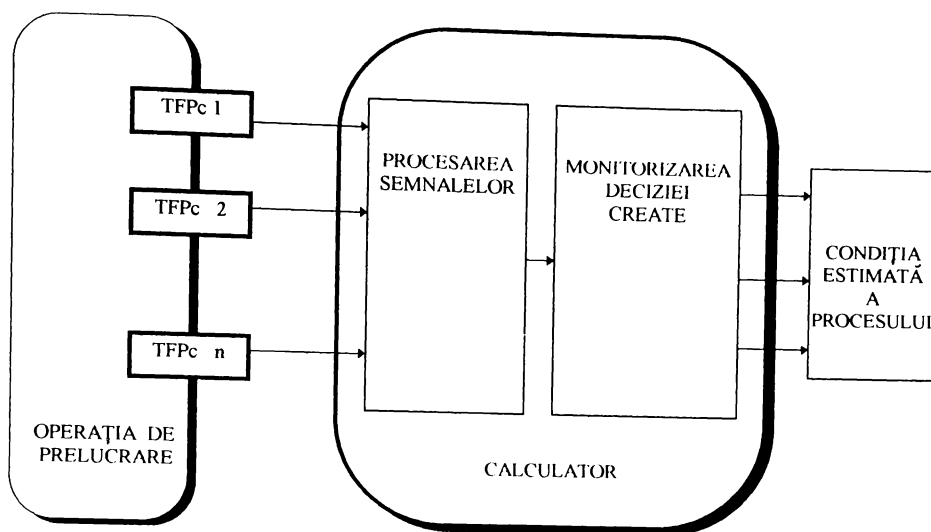


Figura 5.20.- Monitorizarea operațiilor de prelucrare, (OP).

Metodele de monitorizare pot fi împărțite în două categorii, astfel:

- A. - metodele bazate pe un anumit model;
- B. - metodele bazate pe trăsăturile caracteristice;

Pe lângă multe avantaje ale metodelor de monitorizare din prima categorie, (A), acestea prezintă și două limite semnificative:

- desfășurarea majorității operațiilor de prelucrare se realizează în regimuri variabile în timp și neliniare; (exemplu: neliniaritatea variației forțelor de așchiere pe timpul prelucrărilor, generată de vibrațiile petrecute pe durata prelucrării).

- semnalele culese de traductoare sunt dependente, în timpul prelucrării, de condițiile în care se desfășoară aceasta. Adesea, devine dificilă identificarea semnificației unei modificări ale semnalului dat de traductor, deoarece poate fi efect al schimbării condițiilor în care se desfășoară operația de prelucrare sau efect al deteriorării elementelor în funcțiune [25], [27].

Metodele din a II-a categorie (B), interpretează informațiile date de traductoare, funcție de trăsăturile caracteristicilor care definesc OP la momentul investigației [77], [88].

Considerând semnalele date de TFPc, la anumite momente temporale ca fiind:

$$\{y_t, t = 1, 2, 3, \dots\}, \quad (5.3)$$

atunci se definesc anumiți *indicatori de monitorizare*, care pot fi reprezentați prin:

$$x = P(y), \quad (5.4)$$

unde P^* reprezintă un *operator*.

Găsirea indicatorilor de monitorizare **optimi**, joacă un rol esențial; ei trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- a.- *sensibili* la corecțiile aplicate condițiilor de prelucrare;
- b. - *insensibili* la efectul mediului de lucru;
- c. - să *informeze* despre costurile efective.

În practică, *indicatorii de monitorizare* se aleg în urma unor studii analitice, simulări ale **OP** cu ajutorul calculatorului sau experimentări sistematice [102].

Modelul general de monitorizare a unei **OP** poate fi reprezentat ca în *figura 5.21.*, unde:

- $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ - mulțimea indicatorilor de monitorizare;
- $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ - mulțimea trăsăturilor caracteristice ale condițiilor operației de prelucrare.

Mulțimile X și H pot fi definite sau determinate prin relații de calcul.

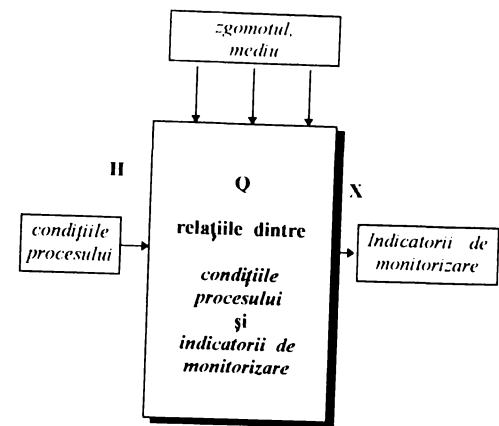


Figura 5.21. - Modelul general al monitorizării **OP**.

Mulțimea legilor (**Q**), după care elementele mulțimii **H** implică elementele mulțimii **X**, poate fi scrisă sub forma:

$$Q : H - X, \quad (5.5)$$

Tabelul de culegere a informațiilor date de **TFPc**, poate fi de forma *tabelului 5.1.*, unde:

- **n** reprezintă numărul trăsăturilor caracteristice ale **OP**;
- **N** este numărul mărimilor urmărite prin intermediul **TFPc**;
- **m** este numărul indicatorilor de monitorizare.

Sistematizarea informațiilor culese de TFPc

Tabelul 5.1.

Mărime a_i	Indicatorii de monitorizare						Trăsăturile caracteristice ale operației de prelucrare
	X_1	X_2	...	X_j	...	X_m	
a_1	$x(1, 1)$	$x(1, 2)$	...	$x(1, j)$	...	$x(1, m)$	$h(x_1) \in \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$
a_2	$x(2, 1)$	$x(2, 2)$	...	$x(2, j)$	...	$x(2, m)$	$h(x_2) \in \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$
...
a_N	$x(N, 1)$	$x(N, 2)$	...	$x(N, j)$	...	$x(N, m)$	$h(x_N) \in \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$

În faza de evaluare a mărimilor culese, bazată pe Q și pe noile mărimi culese a_i , noua condiție estimată este identificată de inversa funcției Q , (5.4), adică:

$$Q^{-1} : X \rightarrow H, \quad (5.5)$$

Există o serie de aplicații ale metodelor de monitorizare. Teza își propune să abordeze câteva aspecte de evaluare ale metodelor deja cunoscute, cu scopul de a găsi o măsură de apreciere a eficienței folosirii TFPc în monitorizarea diferitelor operații de prelucrare.

Înainte de a aplica una dintre metodele de monitorizare experimentelor efectuate, este necesară verificarea acestora după următoarele criterii:

- rata de succes a metodei;
- sensibilitatea sistemului;
- robustețea echipamentului..

Apoi, având informațiile culese și sistematizate ca în tabelul 5.1, se determină funcția Q .

a. Rata de succes se determină cu relația:

$$R_s = \frac{\text{numărul de mărimi evaluate corect}}{\text{numărul total de mărimi considerate}}, \quad (5.7)$$

b. Sensibilitatea sistemului de culegere și de prelucrare a informațiilor se determină cu relația:

$$S_t = \frac{\text{numărul de mărimi verificate corect evaluate}}{\text{numărul total de mărimi verificate}}, \quad (5.8)$$

c. Robustețea echipamentului, se apreciază prin robustețea fiecărui TFPc, precum și prin rezistența sistemului de monitorizare față de diferite influențe exterioare.

Utilizându-se **TFPC**, se pot oferi informații, prin semnale electrice, despre nivelul solicitărilor sculei din spațiul de lucru, ca urmare a derulării activității operației de prelucrare supusă monitorizării.

Pornind de la legătura existentă între forțe și procesul realizat în spațiul de lucru, la început, s-a abordat o strategie de însușire a informațiilor bazată pe *metoda punctelor de măsurare*, cu utilizarea valorii *medii curențe*, în condițiile unui program pe calculator, adecvat.

Spre exemplificare, în *figura 5.22.*, se prezintă un fragment dintr-o înregistrare a unui semnal electric în creștere, datorată mării uzurii sculei de prelucrat - în cazul așchierii.

Aplicarea mediei curențe, presupune parcurgerea automată a unui algoritm de calcul, cu următoarele etape:

$F_A = (F_1 + F_2 + F_3) / 3$ - considerată valoare inițială;

$F_{Gn} = (F_n + F_{n-1} + F_{n-2}) / 3$ - valoarea medie curență;

$F_E = F_A * (C/100 + 1)$ - valoarea finală;

$F_{AE} = F_{Gmax} - F_{Ab}$ - valoarea finală a descreșterii;

$F_{Ab} = F_A * C/100 * X$ - rata scăderii lui F_{Gmax} ;

$F_s = F_A + F_{Ab}$ - prag de indiferență pentru F_{AE} ;

unde: - C - valoarea creșterii forței până la sfârșitul durabilității [%].

- X - constantă determinată experimental;

Astfel, cu valoarea măsurată F_{Gn} se urmărește evoluția forței pe perioada exercitării **OP**.

Când $F_{Gn} > F_E$ se marchează momentul când se atinge sfârșitul timpului de bună funcționare.

Pentru evitarea unor situații accidentale cauzate de unele imperfecțiuni ale semifabricatului, s-a utilizat $X=0,2$ pentru stabilirea pragului de indiferență F_s [73].

Această metodă poate fi aplicată, mai ales în cazul înregistrărilor succesive a semnalelor electrice de **TFPC**, care să reflecte variațiile forțelor, prin intermediul unei plăci de achiziție electrică de **TFPC**, care să reflecte variațiile forțelor, prin intermediul unei plăci de achiziție *direct* pe calculator, oferindu-se informații sintetice asupra ritmului de uzare a sculei așchietoare.

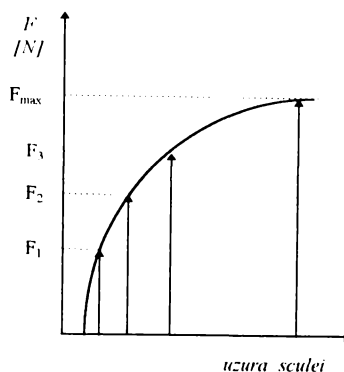


Figura 5.22.- Aplicarea mediei curențe.

5.3.2. Monitorizarea datelor experimentale obținute la strunjire cu traductoare de forță piezoceramice

În cazul prelucrărilor prin așchiere, în ultimii ani s-au realizat o serie de cercetări, fiecare încercând să abordeze anumite aspecte caracteristice, care să furnizeze cât mai multe date despre prelucrări în sine, sau despre influențele pe care le pot avea față de sistemul *mașină-unealtă - sculă-om* [29].

Prezenta *teză*, în acest *subcapitol* își propune să determine în ce măsură urmărirea variațiilor forțelor din timpul strunjirii poate asigura suficiente date pentru o coordonare automată a derulării operației, în diverse situații de prelucrare, folosindu-se ca și cale sistemul generalizat propus în *subcapitolul* 5.3.1.

Au fost realizate 2 modele experimentale de **TFPc** pentru investigare a variațiilor forțelor de așchiere la strunjire. Experimentul utilizat este cel prezentat în *figura* 5.23, cu implementarea în suportul portcuțit al strungului, 3 traductoare **TFPc-04**, pentru urmărirea variațiilor forțelor de așchiere după 3 direcții, F_x , F_y , F_z , precum și un traductor **TFPc-05** montat deasupra suportului portcuțit [104].

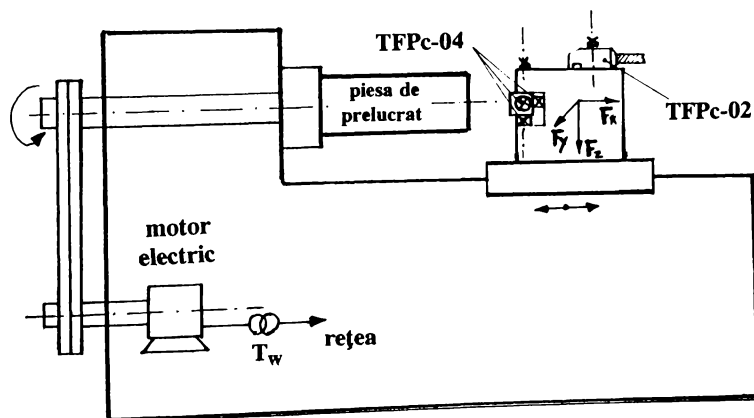


Figura 5.23.- *Schema standului de experimentare a monitorizării strunjirii, folosind TFPc.*

De asemenea, pe cablu de alimentare electrică a motorului care antrenează arborele principal al strungului, s-a intercalat wattmetru pentru urmărirea variației puterii absorbite de la rețea, pe perioada așchierii.

Pentru studiul condițiilor rezultate în urma experimentelor efectuate, au fost folosite mai multe metode, printre care: metoda *recunoașteri modelului*, sistemele Fuzzy, arborii decizionali, rețelele neurale, cu accent pe efectele obținute în diferite condiții de așchiere (*Anexa C*) [31].

Au fost selectate 84 de înregistrări pe bandă de hârtie, care au reliefat 23 de situații diferite ale condițiilor de așchiere. Regimurile de așchiere aplicate s-au încadrat în următoarele limite:

- adâncimea de așchiere cuprinsă între 1,5 și 3,5 mm;
- viteza de avans longitudinal cuprinsă între 32 mm/min și 126 mm/min;
- viteza de așchiere cuprinsă 66,8 m/min și 322,2 m/min.

Ca și cuțite de strung s-au folosit cuțite drepte, din oțel rapid și cu carburi metalice. Au fost realizate prelucrări cilindrice exterioare pe bare de oțel OL 52, 41MoC11 și o bară de aliaj de aluminiu; toate barele au avut ca diametre inițiale cuprinse în intervalul ($\varnothing 30 \dots \varnothing 60$) mm. Pe timpul strunjirii s-au folosit lichide de răcire-ungere. Semnalele senzoriale au fost receptate de la **TFPc**, prin amplificator de sarcină (*Brüel & Kær*), cu o frecvență de 1 KHz și 2 KHz.

Cazurile întâlnite, la strunjire, includ: *așchiera normală, situația coliziunii, diferite stadii ale uzurii sculei, așchiera de trecere, așchiera în gol, zgomotul realizat de prelucrarea propriuzisă*. În tabelul 5.2., se prezintă o listă cu indicii de monitorizare pentru condițiile așchierii.

Definirea condițiilor așchierii

Tabelul 5.2.

Clasa	Condiția de așchiere	Identificarea pe cuțit	Identificarea pe piesă	Numărul de probe
h_1	normal	uzura < 0,1 mm	-	14
h_2	sculă ciobită	desprindere > 0,05 mm ²	-	6
h_3	uzură ușoară	0,11 < uzura ≤ 0,15 mm	-	15
h_4	uzură medie	0,16 < uzura ≤ 0,30 mm	-	15
h_5	uzură mare	uzura > 0,31 mm	-	15
h_6	cu intermitențe	sculă ascuțită	urme rezultate	6
h_7	așchiere de trecere	sculă ascuțită	crestătură axială	6
h_8	așchiera în gol	-	-	7

La început, condițiile normale de aşchiere presupun ca scula să fie bine ascuțită. Ciobirea sculei se consideră atunci când se desprinde de pe sculă o aşchie mai mare de $0,05\text{mm}^2$. Uzura sculei s-a urmărit pe trei etape de uzură corespunzătoare pentru uzura vârfului, a muchiiilor sau mărirea craterelor pe suprafețele sculei, apropiate procesului de aşchiere; zgomotul se identifică prin frecvența înaltă și intensitatea zgomotului; aşchiera de trecere presupune aşchiera pe porțiunea unei caneluri practicate pe direcție axială; aşchiera în gol este considerată când nu există contact între sculă și piesă.

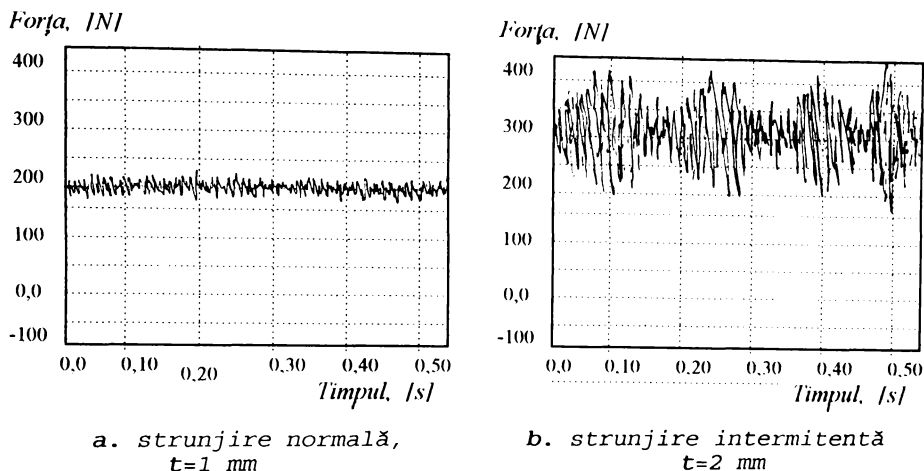


Figura 5.24. - Înregistrări ale semnalelor aferente variației forței F_z , în condițiile: $v=221,3\text{ mm/min}$; $s=0,055\text{ mm/rot}$; material OLC45; cuțit drept cu carbură metalică.

În figura 5.24, se prezintă porțiuni de înregistrare a variației forței F_z , în condițiile normale de lucru (a), respectiv în condițiile unei strunjiri cu intermitențe (b).

În figura 5.25, se observă efectul uzurii sculei, considerând raportul:

$$\frac{F_z}{F_t} = \frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}, \quad (5.9)$$

După cum se observă pe înregistrările făcute, valoarea raportului scade, datorită creșterii mai rapide a forței F_y decât F_z , odată cu uzura sculei.

În figura 5.26, se prezintă înregistrarea spectrală FFT, ("fast Fourier transform"), a semnalului aferent variației accelerației (a_z), în diferite stadii ale uzurii sculei.

Vârfulurile înregistrate în jurul valorii de 190 Hz, corespund vibrațiilor mașinii-unelte, iar cele înregistrate în jurul valorii de 450 Hz, corespund vibrațiilor piesei. Odată cu creșterea uzurii sculei, piesa înregistrează o vibrație mai pronunțată.

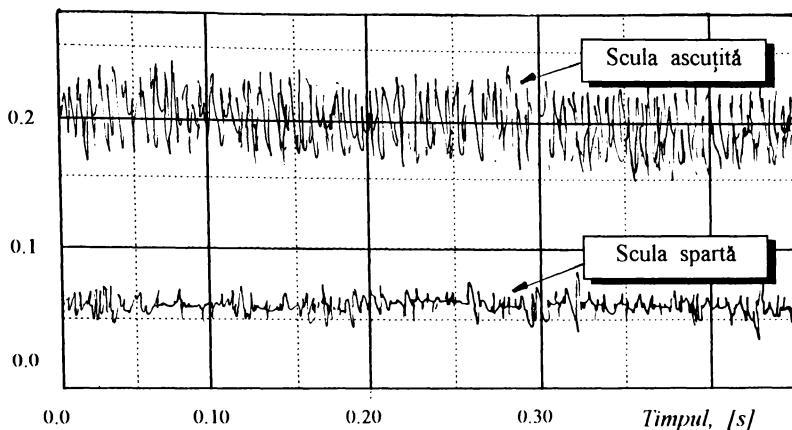


Figura 5.25.- Efectul sculei ciobite, evaluat prin F_z/F_x .

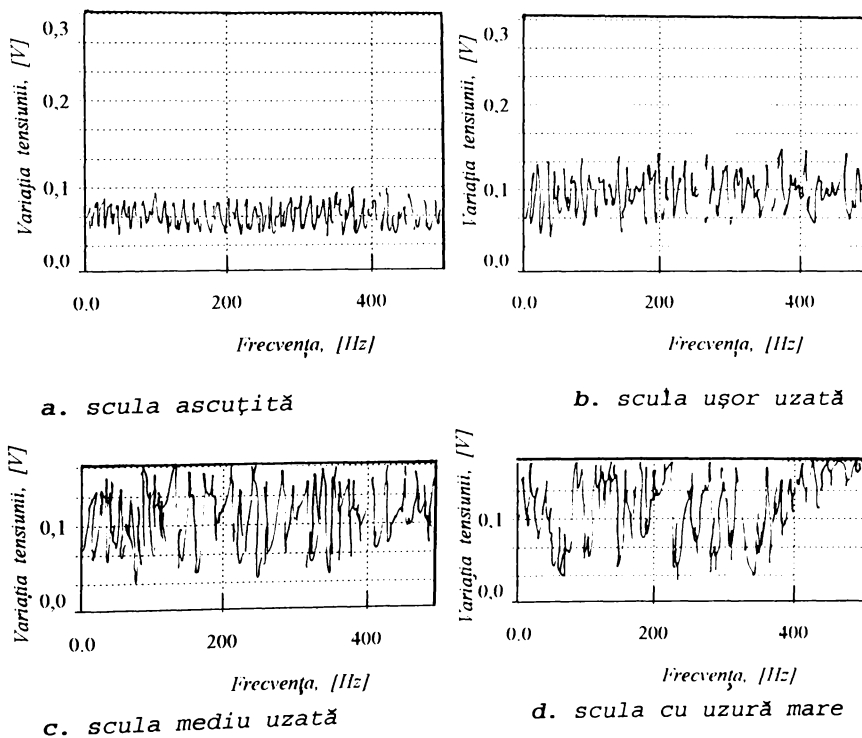


Figura 5.26.- Analiza spectrală FFT a semnalului aferent accelerației, a_z , în diferite stadii de uzură a sculei; $v=292,7$ m/min; $s=0,04$ mm/rot; $t=1,5$ mm; material: 41MoC11; K21.

Au fost aleși 11 indicatori de monitorizare prezentați în tabelul 5.3.

Definirea indicatorilor de monitorizare

Tabelul 5.3.

Simbol	D e n u m i r e a indicatorilor de monitorizare aleși
X_1	media forței rezultante de așchiere
X_2	factorul de coamă a componentei tangențiale, F_z
X_3	media raportului componentelor forței de așchiere : F_z / F_t
X_4	media frecvenței de oscilație a variației componentei F_z
X_5	mărimea componentei F_z în banda de frecvență: [1, 125] Hz
X_6	mărimea componentei F_z în banda de frecvență: [126, 250] Hz
X_7	mărimea componentei F_z în banda de frecvență: [251, 500] Hz
X_8	amplitudinea vibrațiilor a_z în banda de frecvență [0, 125] Hz
X_9	amplitudinea vibrațiilor a_z în banda de frecvență [126, 250] Hz
X_{10}	amplitudinea vibrațiilor a_z în banda de frecvență [251, 500] Hz
X_{11}	rădăcina medie pătrată a puterii absorbită de la rețea, pe durata așchierii

Valoarea medie a forței rezultante de așchiere se calculează cu relația:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}, \quad (5.10)$$

unde F_x , F_y și F_z sunt valorile medii ale componentelor forței de așchiere.

Factorul de coamă a diagramei aferente variațiilor componentei forței de așchiere F_z , se determină cu ajutorul relației:

$$C_F = \frac{\max(F_z) - \min(F_z)}{F_z}, \quad (5.11)$$

Media valorii rapoartelor componentelor forței de așchiere, F_z / F_t , se determină după relația:

$$\frac{F_z}{F_t} = \frac{F}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}, \quad (5.12)$$

Media frecvenței de oscilație a variației componentei F_z , este definită ca număr al timpilor când semnalul forței tangențiale, F_z intersectează linia virtuală a valorii medii înregistrate pe perioada luării probei.

Cu ajutorul calculatorului au fost aplicate șapte metode, de monitorizare a rezultatelor experimentale, în *tabelul 5.4.*, fiind prezentate procentual valorile ratelor de succes prin aplicarea fiecăreia dintre aceste metode.

Ratele de succes utilizând diferite metode de monitorizare, [%]

Tabelul 5.4.

<i>Metoda</i>	<i>Test 1</i>	<i>Test 2</i>	<i>Test 3</i>	<i>Test 4</i>	<i>Test 5</i>
recunoașterea modelului,(K)	31,5	28,5	34,6	18,8	17,9
recunoașterea modelului,(F)	67,6	71,5	68,6	39,6	39,4
vecinătății apropiate	67,9	68,6	65,3	54,6	53,1
media "C" Fuzzy	38,4	15,1	5,9	20,5	33,2
ecuația liniară Fuzzy	85,9	81,2	81,8	63,6	76,9
arborele decizional Fuzzy	95,8	85,7	83,8	67,6	74,2
rețeaua neurală	100	61,2	65,6	54,7	58,4

Din *tabelul 5.4* se remarcă faptul că nu toate metodele redau rezultate satisfăcătoare la toate cele 5 teste efectuate. Metodele *Fuzzy* sunt totuși cele mai constante în rezultate.

Rezultatele testului de robustețe aplicat metodei ecuației liniare *Fuzzy* confirmă avantajele acestei metode de monitorizare, prin datele din *tabelul 5.5.*

Rezultatele testului de robustețe a metodei ecuației liniară Fuzzy, [%]

Tabelul 5.5.

<i>Condiția testului</i>	$X_1=0$	$X_2=0$	$X_3=0$	$X_4=0$	$X_5=0$	$X_6=0$	$X_7=0$	$X_8=0$	$X_9=0$	$X_{10}=0$	$X_{11}=0$	<i>Media</i>
Robustețea	66,5	74,1	74,1	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	76,2	61,5	66,5	73,2

Inercând o interpretare a acestor rezultate, se pot menționa următoarele aspecte:

1. *Selecția indicatorilor de monitorizare*, este pe cât de importantă pe atâta de dificilă, jucând un rol foarte mare, în optimizarea metodei de monitorizare.

În cazul combinării sistemelor *Fuzzy*, fiecare indice de monitorizare este împărțit în *L* intervale, pentru calcularea *gradului Fuzzy* al fiecăruia, care reprezintă *imprecizia unui eveniment*, spre deosebire de probabilitate, care arată frecvența de apariție a aceluși eveniment [80].

Astfel, pentru indicele de monitorizare X_k , la al *k* interval, ar putea fi întâlnite 3 cazuri:

1. - în interval să nu se încadreze nici o probă;
2. - doar probe cu aceleași condiții ale procesului se încadrează în interval;
3. - j_p probe referitoare la diferite condiții ale procesului se încadrează în interval.

Astfel, se definește următoarea funcție de suprapunere:

$$\begin{aligned} O[i,k] &= 0, \text{ pentru cazurile 1 și 2;} \\ O[i,k] &= j_p, \text{ pentru cazul 3.} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Cu această funcție se evaluează eficacitatea indicatorilor de monitorizare. Cu cât valoarea funcției este mai mică, cu atât indicatorul de monitorizare este mai bun. De aceea, se vor selecta indicii de monitorizare cu valori minime.

Aplicând acest principiu, pentru strunjire, în *tabelul 5.6*, sunt prezentați cei 11 indicatori de monitorizare, apoi fiecare indice a fost descompus în 20 de subintervale.

Valorile funcției de evaluare ale indicatorilor de monitorizare.

Tabelul 5.6.

Indice	$o[i,k]$	Σ
X_1	3 5 6 5 4 3 3 3 2 3 2 3 3 2 2 1 1 1 0 1	53
X_2	2 1 2 1 2 3 5 6 6 5 6 2 1 1 1 0 2 1 0 1	48
X_3	1 1 3 2 1 2 6 6 6 4 5 5 6 6 6 6 3 2 1 1	75
X_4	6 5 6 5 3 2 1 2 1 2 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0	40
X_5	5 4 4 5 5 4 4 3 2 2 0 1 1 1 0 0 1 0 0 0	42
X_6	5 6 4 3 4 3 3 2 1 1 2 2 2 5 5 2 1 0 1 1	53
X_7	6 5 3 2 0 1 1 2 3 2 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0	33
X_8	7 5 4 4 3 2 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1	35
X_9	7 6 3 3 2 3 3 0 2 2 2 1 3 3 2 2 1 0 1 1	48
X_{10}	7 8 6 5 5 3 1 2 2 2 1 3 1 1 0 3 1 1 1 1	54
X_{11}	5 3 2 1 1 0 1 1 2 0 2 1 2 1 1 0 0 0 0 1	24

Se observă în *tabelul 5.6.*, că eficacitățile tuturor indicilor de monitorizare sunt apropiate, ceea ce dovedește succesul metodei aplicate. De asemenea, se remarcă faptul că subintervalele sigure ale indicatorilor de monitorizare pot fi, în mod particular, variabile.

De exemplu, urmărind indicatorul X_2 , care reprezintă factorul de coamă, (sau vârful), al variației forței F_2 , valorile funcției de suprapunere o , în prima parte sunt corespunzătoare așchierii normale, apoi valorile pot fi asociate unei uzuri sau ciobiri ale vârfului cușitului, iar în final situația mersului în gol.

2. Pentru a îmbunătăți calitatea clasificării, se aplică metoda de clasificare *clasă-după-clasă* cu stabilirea celui mai sigur secund, în combinație cu metoda ecuațiilor liniare Fuzzy. Astfel, se determină ratele de succes prezentate în tabelul 5.7., unde se poate remarca diferențierea de apreciere a condițiilor de aşchiere pentru fiecare caz în parte, deși semnalele electrice reținute au un aspect destul de asemănător, putând determina confuzii pentru un operator, dar asigurând destule certitudini în situația efectuării calculului corespunzătoare, după algoritmi mai sus prezentați. Această combinație de metode a condus la o îmbunătățire a ratei de succes a clasificării cu aproape 5%.

Ratele succeselor în testele clasificării *clasă-după-clasă*

Tabelul 5.7.

Condițiile aşchierii	Clasificarea ratelor pe clase, [%]							
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8
aşchiere normală, (h_1)	100	0	0	0	0	0	0	0
sculă lovită, (h_2)	13,5	86,5	0	0	0	0	0	0
uzură ușoară, (h_3)	44,5	0	34,6	22,2	0	0	0	0
uzură medie, (h_4)	0	0	0	100	0	0	0	0
uzură mare, (h_5)	0	0	18,1	55,2	26,7	0	0	0
cu intermitențe, (h_6)	0	0	0	0	0	100	0	0
aşchiere de trecere, (h_7)	10,0	5,4	0	0	0	0	84,6	0
aşchiere în gol, (h_8)	0	0	0	0	0	0	0	100

3. Pentru perfecționarea metodelor de monitorizare, se aplică o *fuziune* a datelor oferite de traductoarele **TFPC**, considerându-se condițiile reale de prelucrare, ca indicatori de monitorizare și aplicând metoda ecuațiilor liniare Fuzzy, se obțin rezultatele centralizate în tabelul 5.8.

Ratele de succes folosind ca referințe condițiile de aşchiere Tabelul 5.8.

<i>Informații folosite</i>	<i>Rata succesului [%]</i>
semnale legate de forțe	82,4 %
semnale despre forțe și condițiile aşchierii	88,1 %
semnale despre vibrații	65,8 %
semnale despre vibrații și condiții ale aşchierii	75,8 %
toate semnalele legate de forțe, vibrații,	86,2 %
toate semnalele legate de forțe, vibrații și condiții ale aşchierii	91,3 %

Din tabelul 5.8, în funcție de ratele de succes, reiese foarte clar eficiența mai mare a utilizării pentru monitorizare a semnalelor date de **TFPc**, față de semnalele date de traductoarele de vibrații.

De asemenea, pentru monitorizarea metodelor aplicate, fuzionarea senzorială a semnalelor culese de la traductoare, cu informațiile legate de condițiile de strunjire dă cele mai sigure rezultate.

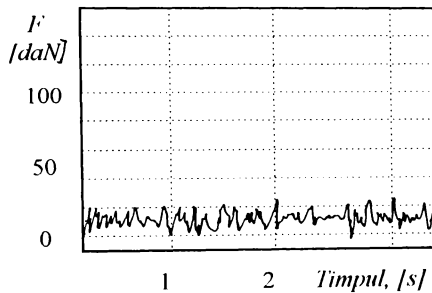
Deci, este semnificativă concluzia *avantajului* utilizării, pentru monitorizarea strunjirii, a **TFPc**, care oferă informații complete despre forțele rezultate în timpul operației de strunjire. Această metodă de monitorizare asigură o **rată de succes de 82 %**, mult superioară cazului utilizării informațiilor legate de vibrații, dar, evident cu 8,9 % mai puțin decât cazul folosirii tuturor informațiilor, situație mult mai costisitoare.

Optim, pentru monitorizarea strunjirii este folosirea **TFPc** pentru culegerea semnalelor legate de *forțele de aşchiere* și folosirea traductoarelor piezoceramice cu rol de accelerometre, pentru supravegherea și a vibrațiilor, obținându-se în acest caz o rată de succes superioară, în valoare procentuală de **86,2 %**.

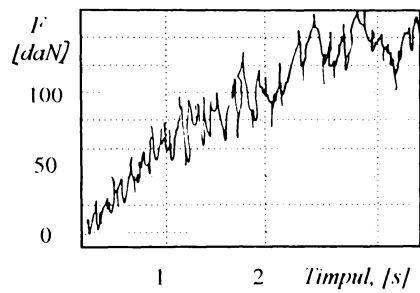
5.3.3. Monitorizarea datelor experimentale obținute cu ajutorul traductoarelor de forță piezoceramice pe timpul operației de frezare

Scopul cercetării este de a dezvolta sistemul de monitorizare pentru situațiile disfuncționale, prin intermediul semnalelor legate de variația forțelor.

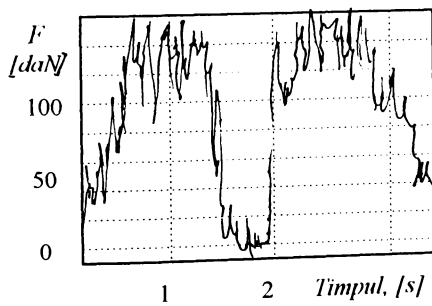
Experimentul prezentat în *subcapitolul 5.1.2.*, a fost reluat, folosindu-se ca regim de lucru: turația=880 rot/min; materialul prelucrat OLC35, prelucrând pe o adâncime de 1,5 mm; semnalele sunt culese prin intermediul **TFPc**, cu o frecvență de 440 Hz. Au fost culese date, în diverse situații de așchiere, de regulă înregistrările depășind 4 secunde, fiind reținute peste 1000 de valori în puncte. În *figura 5.27.*, prezintă situația semnalelor culese despre variația forței în timpul frezării.



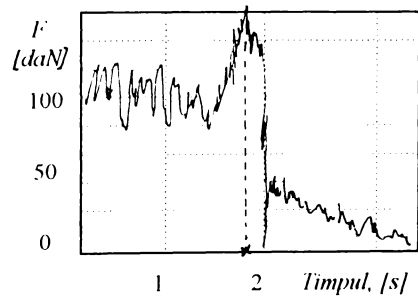
a. mers în gol



b. începerea frezării



c. frezare cu intermitențe



d. rupere sculă

Figura 5.27. - Semnalele referitoare la forțele de așchiere la frezare.

Condițiile prelucrării, prin frezare, pot fi împărțite în 10 categorii, (clase), prezentate în tabelul 5.9.

Definirea condițiilor procesului de frezare

Tabelul 5.9.

<i>Clasa</i>	<i>Condiția frezării</i>	<i>Descrierea condiției</i>
h_1	normală	-
h_2	freză ușor uzată	diametrul micșorat cu $\sim 0,254$ mm
h_3	freză mediu uzată	diametrul micșorat cu $\sim 0,508$ mm
h_4	freză foarte uzată	diametrul micșorat cu $\sim 1,016$ mm
h_5	ușoară descenterare	excetricitate de $\sim 0,2$ mm
h_6	descenterare mare	excetricitate de $\sim 0,3$ mm
h_7	puțin sub mărimea nominală	frezare la $\varnothing 5$ mm
h_8	mult peste mărimea nominală	frezare la $\varnothing 7$ mm
h_9	ușoară depășire a diametrului	frezare la $\varnothing 9$ mm
h_{10}	severă depășire a diametrului	frezare la $\varnothing 11$ mm

Stadiile de uzură au fost experimentate prin realizarea uzurii intenționat, cu măsurarea microscopică a stării acesteia.

În tabelul 5.10, se prezintă definirea indicilor de monitorizare:

Succesul deciziei de a alege o metodă sau alta de monitorizare depinde de modul în care caracteristicile sunt alese astfel încât să caracterizeze optim procesul.

Implementarea **TFPc** joacă, de asemenea, un rol decisiv pentru fidelitatea culegerii informațiilor despre forțele din freza-sculă, precum și solicitările din piesă, respectiv dispozitivul de prindere piesă.

O caracteristică importantă a succesului metodei de monitorizare este legată de viteza de transmitere a informației de la locul exact unde se petrece la mijlocul de evaluare a acesteia. **TFPc** sunt remarcate ca fiind transductoare directe, cu posibilitatea convertirii solicitării mecanice în semnal electric, cu reflectare promptă și exactă a variațiilor de forță din spațiul investigat. Viteza cu care semnalul este cules și transmis sistemului de evaluare este de ordinul milisecundelor.

Definirea indicatorilor de monitorizare a frezării

Tabelul 5.10.

Indicator	Definirea indicatorilor
X_1	momentul maxim de frezare
X_2	media momentelor de frezare
X_3	abaterea admisibilă a momentului de frezare
X_4	media momentelor măsurate la retragerea din frezare
X_5	abaterea admisibilă a momentului de frezare la retragerea din frezare
X_6	media valorilor forțelor de frezare
X_7	covariația forței implicite și a momentului de frezare
X_8	corelarea momentului cu forțele implicite de frezare
X_9	corelarea forțelor și momentelor de frezare la retragerea din așchiere
X_{10}	media forțelor tangențiale
X_{11}	media forțelor tangențiale în timpul frezării
X_{12}	media forțelor axiale în timpul frezării
X_{13}	media forțelor tangențiale la retragerea din frezare
X_{14}	media forțelor axiale la retragerea din frezare

Metodele de evaluare puse în comparație sunt: metoda recunoașterii modelului și a sistemului aleator. Astfel, în schema de adaptare iterativă trebuie reprezentat prin:

$$q = \alpha q + (1 - \alpha) x, \quad (5.14)$$

unde:

- q reprezintă valoarea impusă prin model;
- x este valoarea măsurată cu proba experimentală realizată;
- α - este o constantă de măsurare, cu proprietatea: $0 \leq \alpha \leq 1$.

Prin această adaptare, evaluarea poate fi efectuată după un principiu controlabil.

5.3.4. Concluzii asupra eficienței aplicării monitorizării, cu utilizarea traductoarelor de forță piezoceramice

Cu toate că sarcinile monitorizării condițiilor operațiilor de prelucrare sunt atât de diferite, schema de bază a monitorizării este aceeași. Ea presupune culegerea, prelucrarea, evaluarea semnalului și luarea deciziei.

Prelucrarea semnalului cules de **TFPc** este ajutată la obținerea indicilor de monitorizare și este hotărâtoare în succesul monitorizării. *Indicatorii de monitorizare* pot reprezenta caracteristicile condițiilor procesului fiind afectați direct de condițiile de prelucrare. Pentru a asista la alegerea indicilor de monitorizare se pot utiliza informațiile provenite din folosirea metodelor de monitorizare a fiecărei funcții de evaluare.

Diferitele metode de decizie-create pot fi folosite, incluzând *recunoașterea modelului, sistemele Fuzzy, arborii decizionali, rețelele neurale și sistemele expert*. În aplicațiile prezentate rezultate bune au dat combinațiile sistemelor *Fuzzy* cu alte metode, cum ar fi: *arborii decizionali* și ale *rețelelor neurale*, au dat cele mai bune rezultate.

Viitoarele cercetări în monitorizarea proceselor de prelucrare pot conduce la dezvoltarea sistemelor expert capabile de captarea adaptivă a informațiilor. Prin combinația metodelor *arborilor decizionali, (pentru captarea probelor experimentale), studiile analitice, (legile fizice ale procesului), și cunoașterea empirică a operatorilor, sistemele expert* cu posibilitatea de a fi foarte util și eficiente metode pentru monitorizarea proceselor de prelucrare.

Rezultatele acestor încercări de utilizare a *traductoarelor de forță piezoceramice* la sistemele de supraveghere automată a așchierii, au scos în evidență nu numai eficiența acestora, ci și justetea *ipotezei* de folosire a *variației forțelor de așchiere ca parametru de bază* în operația de *supraveghere* a diverselor sisteme de fabricație sau a experimentărilor efectuate pentru încercarea unor utilaje.

5.4. CONTRIBUȚII PRIVIND DEFINIREA APLICABILITĂȚII TRADUCTOARELOR DE FORȚĂ PIEZOCERAMICE

Cercetările cuprinse în această *teză*, au fost, de la început concentrate pe obiectivul principal, acela de a crea premisele *proiectării, construcției și implementării* în echipamentele de automatizare a sistemelor tehnice, a *traductoarelor de forță piezoceramice*.

După parcurgerea *direcțiilor de cercetare* prevăzute în *figura 2.8.*, se poate defini, în linii mari, o sferă de aplicabilitate a **TFPc**, realizate în variantele constructive a celor *9 modele experimentale* prezentate în *capitolele 4. și 5.* și în imaginea de ansamblu din *figura 5.28.*, alături de aparatura electronică de bază.



Figura 5.28. - *Imagine de ansamblu cu modelele experimentale de traductoare de forță utilizate în cercetările prezentei teze.*

Înainte de prezentarea aplicabilității **TFPc**, sunt necesare câteva referiri la posibilitatea lărgirii sferei de aplicabilitate a materialelor piezoceramice indigene. Astfel, cu elemente ale prezentei cercetări, se poate acționa pentru elaborarea unor elemente piezoceramice speciale, destinate construcției **TFPc**.

Deși experimentările s-au efectuat, folosind materiale piezoceramice sub forma unor componente destinate altor aplicații, s-au realizat în *subcapitolul 3.4.*, câteva recomandări pentru modificarea acestora, pentru a fi mai eficiente în construcția **TFPc**. În concluzie, pentru realizarea **TFPc**, se solicită elaborarea unor elemente piezoceramice cu următoarele principale caracteristici:

- porozitate omogenă și mai mică de 0,08 %;
- temperatura Curie, $T_c = (360 \dots 380) \text{ }^\circ\text{C}$;
- densitatea mecanică, $\rho_m = (7500 \dots 7700) \text{ kg/m}^3$;
- constanta elastică, $s_{33}^F = (18,9 \dots 19,7) \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$;
- constanta de deformare piezoelectrică longitudinală, $d_{33} = (350 \dots 400) \cdot 10^{-12} \text{ m/V}$;
- constanta de tensiune piezoelectrică longitudinală, $g_{33} = (27 \dots 34) \cdot 10^{-3} \text{ Vm/N}$;
- factorul de cuplaj electromecanic planar, $K_p = 0,58 \dots 0,63$;
- factorul de calitate mecanic, în modul radial:
 - $Q_m = 70 \dots 80$ - pentru cazurile aplicării doar a efectului direct piezoelectric;
 - $Q_m > 1000$ - pentru aplicațiile în frecvență proprie de rezonanță;
- constanta de frecvență planară, $N_p = (2000 \dots 2200) \text{ Hz/m}$;
- rezistența mecanică la compresiune, $R_c = (550 \dots 650) \text{ N/mm}^2$;
- rezistența mecanică la încovoiere, $R_i = (250 \dots 350) \text{ N/mm}^2$;
- abateri ale principalelor caracteristici, în intervalul de temperatură (- 40 ... + 120) °C, să fie sub 1 %;
- rezistivitatea de volum la 100 °C superioară valorii de $10^{11} \text{ } \Omega \text{ m}$;
- variația relativă procentuală, pe decadă de timp, (îmbătrânirea), mai mică de 1%;
- tangenta unghiului de pierdere, $(\text{tg} \delta)_{\text{max}} = (10 \dots 18) \cdot 10^{-4}$;
- dimensiunile medii ale grăunților = (13 ... 15) μm;
- ponderile rupturilor inter-/trans- granulare, în proporții aproximativ egale, 50 %;
- duritatea uniformă, mai mare de 500 HV;
- forme preferate de "șaibe", cu grosimi diferite, în raport cu forțele de măsurat;
- prelucrarea mecanică cu rugozitate sub 0,8 μm;
- depunerea metalică a electrozilor uniformă, cu pin de ieșire pentru colectarea directă a sarcinilor;

Pentru construcția unor **TFPc** utilizate în condiții speciale, (ex: solicitări la șoc, temperaturi ridicate, solicitări urmărite pe direcții transversale etc.), unele caracteristici recomandate vor putea fi ajustate, după precizările existente în *capitolul 3*.

Este posibil ca, având la dispoziție materiale piezoceramice cu caracteristicile prezentate mai sus, comportamentele pe durata experimentărilor transductoarelor piezoceramice, să difere de cele cuprinse în prezenta teză; dar, cu certitudine, rămân valabile: metodologia de investigare, modelele matematice, utilizate, datele comparative și variantele constructive ale standurilor propuse pentru experimentare.

Analizând pe rând modelele constructive de **TFPc** experimentate, se propun următoarele aplicații:

TFPc-01., poate suporta o capacitate de încărcare, fără șocuri, în regim quasistatic, de maxim 300 daN, asigurând o rezoluție de 0,1 %, rigiditate de (1 ... 5) kN/μm; tensiunea de ieșire cuprinsă în intervalul (0 ... 7) V; stabilitatea termică garantată la temperaturi sub 45 °C. Prezintă dimensiuni de gabarit reduse, (∅ 18 mm · 14 mm), putând fi montat, cu prestrângere de aproximativ 50 N, direct pe suportul de măsurare; frecvența proprie de rezonanță, pe care se realizează măsurători este cuprinsă în intervalul (291 ... 308,5) kHz. Semnalul informativ poate fi menținut în timp și poate fi transmis la distanță (v. subcapitolul 4.2.2.).

TFPc-02., poate suporta o capacitate de încărcare, fără șocuri, în regim quasistatic, de maxim 500 daN, asigurând o rezoluție de 0,15 %, rigiditate de (1 ... 7) kN/μm; tensiunea de ieșire cuprinsă în intervalul (0 ... 9) V; stabilitatea termică garantată la temperaturi sub 55 °C. Prezintă dimensiuni de gabarit, (∅ 28 mm · 16 mm), putând fi montat, cu prestrângere de aproximativ 80 N, direct pe suportul de măsurare; frecvența proprie de rezonanță, pe care se realizează măsurători este cuprinsă în intervalul (239 ... 249) kHz. Semnalul informativ poate fi menținut în timp și poate fi transmis la distanță (v. subcapitolul 4.2.2.).

TFPc-03., poate suporta o capacitate de încărcare, fără șocuri, în regim quasistatic, de maxim 700 daN, asigurând o rezoluție de 0,01 %, rigiditate de (1 ... 9) kN/μm; tensiunea de ieșire cuprinsă în intervalul (0 ... 10) V; stabilitatea termică garantată la temperaturi sub 65 °C. Prezintă dimensiuni de gabarit, (∅ 42 mm · 22 mm), putând fi montat, cu prestrângere de aproximativ 80 N, direct pe suportul de măsurare; frecvența proprie de rezonanță, pe care se realizează măsurători este cuprinsă în intervalul (291 ... 308) kHz. Semnalul informativ poate fi menținut în timp și poate fi transmis la distanță (v. subcapitolul 4.2.2.).

TFPc-04., prezintă particularitatea de a fi montat, prin ușoară presare în orificii practicate în zona în care se dorește urmărirea variațiilor solicitărilor mecanice dinamice, de regulă, pentru supravegherea așchierii. Implementarea nu afectează rigiditatea mașinii-unelte. Suportă solicitări, fără prea mari șocuri, până la forțe de 500 daN. Timpul de răspuns electric la solicitări mecanice este sub 1 ms (v. subcapitolul 5.1.1.1.).

TFPc-05., poate fi implementat între piesă și elementul solicitant, fără nici o prelucrare a acestora. Este destinat măsurării solicitărilor la compresiune. Fiind în construcție capsulată, rezistă bine la acțiunea mediului: umiditate, temperatură, agenți corozivi. Este recomandat supravegherii diferitelor prelucrări mecanice, cum ar fi: așchieria și deformarea plastică. Prin introducerea a 2 sau 3 perechi de elemente piezoceramice polarizate după 2, respectiv 3 direcții ortogonale, poate asigura urmărirea solicitărilor mecanice, simultan, după 2, respectiv 3 direcții. Valorile forțelor dinamice solicitante pot fi cuprinse în intervalul (0 ... 1000) daN (v. subcapitolul 5.1.1.2.).

TFPc-06., are particularitatea constructivă de a percepe solicitările indirect, fapt ce permite utilizarea traductorului și pentru situațiile unor amplitudini ale variațiilor forțelor mai mari, chiar cu șocuri medii. Valorile maxime admise pot ajunge până la 3000 daN, funcție și de dimensiunile și calitățile componentelor. Oferă posibilitatea, ca prin rotirea în jurul axei șurubului de fixare, să se găsească direcția solicitărilor maxime în corpurile diferitelor subsansamble pe care se montează. Poate fi aplicat pentru supravegherea unei game diversificate de utilaje și prelucrări. De asemenea, fiind în construcție capsulată, rezistă bine la acțiunea mediului: umiditate, temperatură, agenți corozivi (v. *subcapitolul 5.1.2.*)

TFPc-07., deși este prezentat ca fiind construit special pentru a fi implementat în construcția electrosculii, destinat prelucrării prin eroziune electrică, în mod similar, poate fi montat în suportul piesei de prelucrat, (situație experimentată, dar neprezentată în teză), sau în mandrina unei freze sau burghiu, pentru supravegherea solicitărilor din aceste scule de prelucrat prin așchiere. Cu acest traductor se poate urmări variațiile forțelor dinamice cu frecvențe de (1 ... 30 000) Hz (v. *subcapitolul 5.3.1.*)

TFPc-08., este un traductor special realizat pentru a fi implementat în piesa care urmează să fie debitată prin eroziune electrică complexă, în vederea sesizării prezenței forțelor în piesă, eventual pentru măsurarea forțelor existente, în timpul prelucrărilor. De menționat, este faptul că, pe timpul experimentărilor pentru aceleași obiective pot fi folosite și alte traductoare mai sus menționate. Spre exemplu, având în vedere condițiile de mediu deosebit de umede și corozive, existente pe parcursul prelucrărilor prin eroziune electrică complexă, a fost utilizat cu bune rezultate, traductorul **TFPc-05**, fiind în construcție capsulată; implementarea a fost realizată între piesa de prelucrat și dispozitivul de fixare piesă (v. *subcapitolul 5.3.2.*)

TFPc-09., este de construcție mai robustă, datorită solicitărilor mai mari, în cazul prelucrărilor cu jet de apă. Acest traductor este construit pentru a putea fi utilizat, în general, pentru solicitări directe, de mărimi cuprinse în intervalul (30 ... 3000) daN, fără șocuri. Aplicația s-a realizat cu ajutorul a 4 asemenea traductoare, urmărindu-se în paralel, solicitările mecanice, la compresiune, în punctele de sprijin ale disipatorului de energie și masa de lucru. (v. *subcapitolul 5.3.3.*)

Din experimentările efectuate, s-a constatat un comportament satisfăcător al **TFPc**, asigurând avantaje, cum ar fi:

- se pot realiza în variante constructive miniaturizate, în raport cu valorile maxime ale forțelor de măsurat;
- pot asigura înlocuirea cuarțului din construcția majorității variantelor de **TFP** cunoscute, asigurând un preț de cost redus cu aproape 60 % a măsurătorilor;
- prezintă o sensibilitate bună, la diverse tipuri de solicitări;
- poate asigura precizii ridicate de măsurare, funcție și de echipamentul auxiliar utilizat;
- variantele constructive, care funcționează pe baza fenomenului direct piezoelectric, nu

necesită o altă sursă de energie;

- în variantele constructive bazate pe modificarea frecvențelor proprii de rezonanță, în raport cu polarizarea mecanică realizată, există un avantaj semnificativ, datorat posibilităților menținerii în timp a semnalului, în cazul solicitărilor quasistatice, precum și posibilitatea transmiterii semnalului la distanță, fără fir;
- se pot folosi și pentru solicitări la întindere, printr-o precomprimare anterioară, întinderea determinând slăbirea apăsării elementelor piezoceramice, înregistrându-se tensiuni negative, în valori absolute proporționale cu mărimea forțelor;
- viteză mare de răspuns, (*sub 1 ms*);
- asigurând ca semnal de ieșire tensiunea electrică proporțională cu eforturile aplicate, pot fi ușor integrate în sistemele de automatizare ale diverselor echipamente de prelucrare, la scară industrială, sau pentru cercetare;
- față de alte tipuri de transductoare de forță, mult extinse în prezent în practica cercetării, de tipul celor tensometrice, **TFPc**, se pot realiza în construcții compacte, rigide, cu posibilitatea urmăririi solicitărilor, simultan după 1, 2 sau 3 direcții ortogonale;
- semnificativă este stabilitatea termică, putând asigura, prin construcții speciale, să poată realiza măsurători cu abateri minime, ($\Delta < 5 \%$), în intervalul de temperatură (-150 ... +250) °C;
- prezintă o siguranță în exploatare ridicată, comportamentele în cazuri anormale, putând fi recunoscute direct prin forma și mărimea semnalelor de ieșire;
- fiabilitatea ridicată a transducoarelor, prin fiabilitatea elementelor active, piezoceramice, care, în condiții normale de exploatare pot asigura măsurări repetate, reglajul periodic fiind realizat prin aducerea la "0", a semnalelor înregistrate în cazul lipsei solicitărilor;
- se pot remarca nivele mult scăzute ale costurilor măsurărilor de forțe cu **TFPc**, nu doar prin costuri mai reduse, decât în cazul folosirii cuarțului ca element activ, ci și prin durata mare de exploatare, simplitatea constructivă, posibilitatea destul de facilă de integrare în sisteme de automatizare deja existente.

*

Aplicabilitatea *transducoarelor de forță piezoceramice* poate fi limitată, în prezent, mai mult prin puținele informații, în legătură cu acestea, decât prin posibilitățile de perspectivă ale dezvoltării cercetării aplicative în acest domeniu. Prin materialul teoretic și experimental cuprins în prezenta teză, se dorește și atragerea atenției cercetătorilor din diferite domenii științifice și tehnice, pentru o preocupare aprofundată în direcția perfecționării materialelor piezoceramice și a construcției **TFPc**, pentru sporirea calității și eficienței aplicației.

6.1. CONCLUZII FINALE

* Optimizarea utilizării *materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță* este deosebit de complexă, însemnând o orientare convergentă de multiple direcții de cercetare din domenii diverse, integrată într-o tipologie de tehnologii de prelucrare, într-o continuă perfecționare;

* Abordarea globală a optimizării utilizării materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță, începe de la stabilirea unui *model sistemic generalizat* pentru acest proces, care să permită particularizarea în aplicații cât mai diverse a traductoarelor de forță piezoceramice;

* Condițiile utilizării materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță nu se pot sintetiza într-un sistem cibernetic, datorită numărului mare de variabile aferente. De aceea, este necesară, la începutul determinării modelului sistemic, o *selecție a variabilelor*, bazată la început pe aprecieri subiective, iar ulterior, pe metode obiective, experimente și calcule;

* Etapa ulterioară finalizării modelului sistemic generalizat, o constituie determinarea *legăturilor existente* între variabile și/sau grupe de variabile;

* Legăturile determinate stau la baza stabilirii condițiilor generale și particulare, de definire a unei mulțimi limitate de funcții de transfer, care să definească materialele cele mai potrivite pentru construcția, în variantă optimă, a traductoarelor de forță, pentru o metodă optimizată de supraveghere automată a unui proces de fabricație;

* Pe perioada analizării condițiilor de stare a modelului sistemic propus, a rezultat concluzia unei imposibilități, deocamdată, în stabilirea unor date complete și categorice pentru o optimizare globală a utilizării materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță, utilizând metode multicriteriale;

* Baza de informații din literatura de specialitate, sau din discuțiile cu diverși specialiști au scos în evidență, în mare măsură, doar *acțiuni unilaterale*, de îmbunătățire a performanțelor mecanice a piezoceramicii, sau de eficiențizarea economică a tehnologiilor de elaborare a acestora, sau a metodelor de verificare și control a unor caracteristici, sau de diversificare a formelor constructive a traductoarelor de forță, dar nicidecum informații cuprinzătoare care să vizeze aspecte directe ale posibilității de utilizare a materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță;

* Dacă pe domeniul de definiție al solicitărilor de aplicație a traductoarelor de forță se introduc restricții, (determinate de condițiile de solicitări mecanice, de prag de precizie și/sau siguranță în exploatare, de costuri alocate măsurării), iar pe aceste subdomenii se introduc restricții speciale ale posibilităților de implementare cu o bază de dotare minimă de valorificare a semnalelor informative culese, atunci există *posibilitatea reală de definiție a unor funcții obiectiv ale optimizării*;

* Astfel, se desprinde concluzia finală asupra *utilității modelului sistemic propus* în soluționarea unor probleme de măsurări de forțe, folosind în traductoare, ca elemente sensibile, anumite materiale ceramice, cu posibilitatea dobândirii proprietăților piezoelectrice, elaborate după o metodologie bine definită, prelucrate după tehnologii optimizate.

6.2. CONTRIBUTII ORIGINALE ALE LUCRARI

Prezenta teză de doctorat, cuprinde elemente definerii pentru o *anumită variantă de abordare a problematicii optimizării* utilizării materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță, în care aspectele de cercetare fundamentală s-au îmbinat cu laturile cercetării aplicative, proces din care se pot desprinde câteva contribuții originale ale autorului.

6.2.1. Contribuții teoretice

☆ Studiul *tipologiei construcției traductoarelor de forță cu elemente sensibile din materiale piezoelectrice*, existente pe plan mondial, în vederea elaborării unui sistem global de înlocuire a cuarțului cu materiale piezoceramice indigene, sau de realizare de variante noi;

☆ Realizarea unei *sinteze teoretice multidisciplinare*, corelându-se performanțe ale specialiștilor fizicieni, chimiști, electroniști, mecanici, tehnologi, automatiști, statisticieni, în legătură directă sau indirectă cu problematica temei prezentei teze;

☆ Analiza principalelor *tehnologii de elaborare a materialelor ceramice* cu posibilitatea dobândirii calităților piezoelectrice, în vederea găsirii unei *variante optime*, aplicabile la noi în țară, care să asigure paramentrii calitativi, mecanici și electrice, pentru obținerea elementelor sensibile din componența traductoarelor de forță, de largă utilizare;

☆ Pe baza unui program de experimentări și considerații teoretice, elaborarea unui *model sistemic generalizat*, optimizabil, de analiză a posibilităților de utilizare a materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță;

☆ Realizarea unei *ierarhizări ai factorilor esențiali* în alegerea materialelor piezoceramice potrivite și a construcției traductoarelor de forță;

☆ Stabilirea unor *funcții generalizate de optimizare* și a restricțiilor aferente pentru construcția și aplicarea traductoarelor de forță piezoceramice;

☆ *Studiul interdisciplinar al elementelor piezoceramice indigene*, privind: compoziția chimică, parametrii tehnologici aplicați în elaborare, proprietățile mecanice și electrice, în scopul lărgirii domeniilor de utilizare a acestora;

☆ Utilizarea unui *aparat fizico-matematic* în vederea fundamentării unor direcții de principiu în *proiectarea* traductoarelor de forță piezoceramice, solicitate atât în regim dinamic, cât și în regim quasistatic;

☆ Adoptarea unor metode moderne, în alegerea *variantei de monitorizare* a unor operații de prelucrare, din cadrul tehnologiilor convenționale și neconvenționale, prin intermediul traductoarelor de forță piezoceramice;

☆ Reconsiderarea proprietății, (într-un fel parazitare), a materialelor piezoceramice de a-și *modifica frecvența de rezonanță odată cu polarizarea mecanică*, în sensul benefic de a se constitui *principiu de bază în construcția traductoarelor de forță piezoceramice*, destinate măsurării *forțelor quasistatice*;

6.2.2. Contribuții în domeniul cercetării experimentale

□ Asimilarea metodelor de *analiză difractometrică* asupra materialelor piezoceramice, realizate de *INCDFM-București*, atât pentru identificarea acestora în cadrul benzii de tranziție morfotropică în sistemul soluției solide de zirconat-titanat de plumb, (PZT), cât și pentru stabilirea compoziției chimice adecvate pentru obținerea unor caracteristici piezoelectrice optime elementelor utilizate în aplicațiile de măsurare a forțelor;

□ Stabilirea *caracteristicilor microstructurale a piezoceramicii* $\text{Pb}(\text{Ti}_{0,465}\text{Zr}_{0,535})\text{O}_3$, prin investigarea probelor, în diverse condiții de atac, precum și cu tehnici diferite, cum ar fi: microscopului metalografic, microscop optic și a unui microscop electronic racordat la un calculator, cu un soft adecvat analizelor microstructurilor;

□ Stabilirea efectelor mărimii grăuntelui și a polării electrice asupra *modului de rupere* în microstructura materialelor **PZT**;

□ Stabilirea, pe baze experimentale, cu modalități originale, a *mărimii extensiilor* la materialele piezoceramice indigene, în diferite situații de alimentare cu tensiune, demonstrându-se veridicitatea unor teorii cunoscute în literatura de specialitate referitoare la alte tipuri de materiale piezoceramice;

□ Caracterizarea materialelor piezoceramice indigene, pe baze experimentale, sub aspectul *durității* determinate în microstructură, a *rezistenței mecanice* la compresiune, a comportamentului în cazul solicitărilor cu *șoc*;

□ Definirea *modului de propagare a fisurărilor* în materialele piezoceramice, pe baza microgرافیilor realizate;

□ Atenționarea producătorilor de elemente piezoceramice, în baza unor analize experimentale micrografice, cu aspecte negative, prezentate de unele imperfecțiuni în aplicarea *depunerilor metalice* pe suprafețele elementelor piezoelectrice, asupra comportamentelor în exploatare;

□ Stabilirea *comportamentelor traductoarelor de forță piezoceramice*, în construcții originale, în condițiile solicitărilor dinamice și quasistatice;

□ *Variantă constructivă* de traductor de forță piezoceramic, cu posibilități de utilizare atât în regim dinamic cât și quasistatic, pentru forțe limitate deocamdată de performanțele tehnologice actuale de fabricare a elementelor sensibile piezoceramice;

□ Verificarea experimentală a influențelor uzurii sculei asupra *forțelor de așchiere la strunjire*, cu utilizarea a două modele experimentale de **TFP** ; monitorizarea metodelor de evaluare a informațiilor culese de traductoare, cu alegerea variantei optime;

□ Studiul comportamentului în așchiere a sculelor la *frezare*, odată cu uzura sau ruperea dinților, prin intermediul urmării variației forțelor, cu ajutorul unui alt model experimental de traductor de forță piezoceramic;

□ Determinarea prezenței *forțelor de recul în electrodul-sculă* pe perioada prelucrării prin *eroziune electrică* cu electrod masiv, cu ajutorul unui TFPc înglobat în sculă;

□ Incercări de supraveghere a prelucrării prin *eroziune electrică complexă*, folosind un **TFPc** înglobat în piesa de prelucrat pentru sesizarea unor solicitări variate, funcție de regimul de lucru aplicat;

□ Implementarea unor variante speciale de **TFPc** într-un echipament de *prelucrare cu jet de apă*, respectiv apă cu material abraziv, pentru urmărirea presiunilor, forțelor de impact a jetului cu piesa de prelucrat și a altor solicitări realizate pe parcursul prelucrărilor;

6.2.3. Contribuții în implementarea industrială a rezultatelor cercetării

► Cercetările autorului, pentru elaborarea prezentei teze au început la cererea industriei, atât din partea firmelor cu intenție de a asimila în fabricație a elementelor piezoceramice pentru o gamă mai largă de aplicații, cât și din partea altor firme doritoare de implementare în construcția diverselor echipamente a unor traductoare de forță, cu avantajele deja preconizate ale traductoarelor de forță piezoceramice. Lucrările științifice prezentate la diverse manifestări științifico-tehnice, rapoartele științifice întocmite în urma finalizării diferitelor contracte, discuțiile purtate cu diverși specialiști din țară și străinătate, au dovedit interesul pentru concretizarea rezultatelor cercetării, în aplicații industriale diverse;

► O parte din modelele experimentate pe parcursul prezentei teze, au fost testate de autor cu prilejul finalizării unui contract cu IMU-Arad, (Nr. 9264/89), având ca temă: "Senzori piezoelectrice de forță și moment miniaturizați utilizați în diagnoza mașinilor-unelte", finalizat cu proiectul unui prototip;

► Varianta metodologică și practică, prezentată în *subcapitolul 3.2.1.*, cu privire la studiul modificărilor dimensionale ale elementelor piezoceramice, a fost verificată de autor cu prilejul finalizării unei faze de contract (Nr.10137/ 1990), încheiat cu ICEEMF- București, cu tema: " Studiu privind asimilarea sistemelor de deplasare micrometrică"; o aplicație a variantei propuse s-a materializat într-o lucrare practică de laborator la disciplina de "Măsurări electrice a unor mărimi neelectrice", din cadrul Facultății de Electronică și Telecomunicații din Timișoara;

► Posibilitățile de implementare a traductoarelor de forță piezoceramice a căror modele experimentale au stat la baza elaborării *subcapitolului 5.2.*, au fost prezentate de autor specialiștilor de la IMU-Arad, cu prilejul predării fazelor de contract, (Nr. 10840/1990), cu tema: "Sistem de măsurare scule-piese";

► Rezultate parțiale ale cercetărilor efectuate au fost puse la dispoziția unor firme, cum sunt: SEVAM SA-Drobeta-Turnu-Severin, ARIS SA-Arad, ISIM-Timișoara, ș.a., prin rapoarte științifice elaborate la finalizarea fazelor contractelor încheiate cu CNCST, (Nr. 4004/95, tema 29 și 5004/96, tema 395);

► Cercetările cuprinse în prezenta teză se doresc a fi vor fi continuate de autor într-o etapă de cercetare aplicativă, finalizată prin omologările unor variante constructive și lansarea lor în circuitul productiv și aplicativ.

BIBLIOGRAFIE

1. **ADLER, Y.** - The Design of Experiments to Find Optimal Conditions, Mir Publ., Moskow, 1975.
2. **x x x** - Agenda tehnică, Editura Tehnică, București, 1990.
3. **ALPECK, F.** - Senzori de forță pentru supravegherea strungurilor de tipul EEN 400-CNC, Gep 1/1988, p. 7÷13.
4. **AMZA, G.** - Sisteme ultraacustice, Editura tehnică, București, 1988.
5. **AUBRY, J.P.** - Materiaux et composants piezoelectriques, E 1890, Paris, 1990.
6. **BENIGUI, L.** - Solid State Communication, nr.11, 825, SUA, 1972.
7. **BERLINCOURT, D.** - Piezoelectric Crystals and Ceramics, Vernitron Piezoelectric Division Bedford, Ohio, Ultrasonic Transducer Materials Edited by O.E. Mattiat-Plenum Press New York, London, 1971.
8. **BOUTARFAIA, A., BOUDAREN, C., MOUSSER, A., BOUAOUD, S.E.** - Study of Phase Transition Line of PZT Ceramics by X-Ray Diffraction, Ceramics International 21, Great Britain, p.391÷394, 1995.
9. **x x x** - BRANKAMP Process Automation Inc. - WIDATRONIC, Werkzeuguberwachungs-Systeme fur Kollision, Bruch und Verschleib, (prospect), Germania, 1989.
10. **BREBAN, V.** - Dicționar al limbii române contemporane, Editura științifică și enciclopedică, 1980.
11. **x x x** - BURLEIGH, (SUA) - Piezo book, 1990.
12. **x x x** - BURLEIGH, (SUA) - Prospecte 1989, 1990.
13. **CHEN, H.D., UDAYAKUMAR, K.R., GASKEY, C.J., CROSS, L.E.** - Electrical Properties' Maxima in Thin Films of the Lead Zirconate-Lead Titanate Solid Solution System, Appl. Phys. Lett. 67(23), American Institute of Physics, p. 3411÷13, 1995.
14. **CIOARĂ, T. G.** - Sesizor de forță miniatural. Brevet de invenție, nr.95925/26.04.1988.
15. **CIOCÎRDIA, C., UNGUREANU, I.** - Bazele cercetării experimentale in tehnologia construcțiilor de mașini, Editura didactică și pedagogică, București, 1979.
16. **CIOCLOV, D.** - Mecanica ruperii materialelor, Editura Academiei RSR, București, 1977.
17. **CLOSE, J.A.** - Nonlinear Piezoelectric Metrology-Coefficients and Fatigue under Impact, R. Ceram. Technol. Int., p. 97÷101, 1995.

18. **CRÎȘAN, S., BREABĂN F., BUDURA, A., MNERIE, D.** - Măsurarea interferometrică a amplitudinii de deplasare a traductoarelor piezoelectrice, A III-a Conferință Națională de realizări și perspective în domeniul laserilor și aplicațiilor lor în știință și tehnologie, Timișoara, 26÷28 sept., 1991.
19. **CRÎȘAN, S., IGNEA, A.** - Măsurări și traductoare; curs, Vol.I și II, Universitatea Tehnică Timișoara, 1993.
20. **DEKKER, M.** - The Low and High Intensity Applications, Dale Ensminger, "Ultrasonics", New York, 1973.
21. **x x x** - Dicționar de matematici generale, Editura enciclopedică română, București, 1974.
22. **x x x** - Dicționar de mecanică, Editura științifică și enciclopedică , București, 1980.
23. **DIMITRIU, E., NICOLAU, P., TEODORU, V.** - ULTRASUNETELE-posibilități de utilizare în industria alimentară și biologie, Editura Ceres, București, 1990.
24. **DODON, E.** - Asupra reglării automate a regimurilor de aşchiere la strunguri. Teză de doctorat, București, 1977.
25. **DOEBELIN, O.E.** - Measurement Systems-Application and Design, Fourth Edition, McGraw-Hill Publishing Company, SUA, 1990.
26. **DOLGA, V.** - Construcția traductoarelor și senzorilor. Litografie UTT, 1993.
27. **DORIN, A.** - Alimentarea automată cu semifabricate și scule a strungurilor. Editura Tehnică, București, 1985.
28. **DRĂGAN, O., IANCU, C., AMZA, G., DRIMER, D., ISARIE, I.** - Ultrasunete de mari energii, Editura Academiei RSR, București, p. 47÷51, 1987.
29. **DREUCEAN, A.** - Studiul unui sistem de control adaptiv cu traductor pneumatic de joasă presiune utilizat pe mașini de rectificat plan, Teză de doctorat, IPTVT, 1972.
30. **DREUCEAN A., PAULESCU, G.** - Îndrumător pentru lucrări de laborator la disciplinele Bazele aşchierii și generării suprafețelor și Mașini unelte și control dimensional, partea I, IPTVT, 1988.
31. **DU, R., ELBESTAWI, N.A., WU, S.M.** - Automated Monitoring of Manufacturing Processes, Journal of Engineering for Industry, SUA, May-95, ASME JOURNAL of ENGINEERING for INDUSTRY, Vol.117, p. 121÷140, 1995, 1995.
32. **DUDEK, J.** - Criteria for Broadening of Phase Transitions in Solid Solutions of Type PZT, Fizica, J. Chemia Metali - Tom 12, p. 82÷90, Katowice, 1993.
33. **DUMITAȘ, C., OPRAN, C.** - Prelucrarea materialelor compozite, ceramice și minerale, Editura Tehnică, București, 1994.

34. **DUȘE, D.M., BOLOGA, O., NATANAIL, C.** - Aplicarea analizei dimensionale la studiul procesului de prelucrare dimensională prin eroziune electrică cu rupere de contact, Partea I și II, Conferința Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, CNTN-6, (Volumul A+B), p.61 ÷ 69, 1993.
35. **x x x** - Electronica de A la Z, Editura științifică și enciclopedică, București, 1985.
36. **FOMIȚA N.P. Z.** - Piezoelectricitate preobrazovateli mehancesikih napreșenii v tverdiș sploșnih sredah, Pribori i sistemi upravlenia, URSS, nr.12, 1985.
37. **GAVRILAȘ, I., MARINESCU, N.I.** - Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini, Volumul 1, Editura Tehnică, București, 1991.
38. **GEE, D.** - Sesizarea automată a ruperii sculelor. 2ND Biennal International Machine Tool Technical Conference, sept.5-13/84, p.129-143, 1984.
39. **GRAFÎȚANU, M., CREȚU, S., DRĂGAN, B.** - Diagnosticarea vibroacustică a mașinilor-unelte și utilajelor, Editura Tehnică, București, 1989.
40. **GROSSE, H.J.** - Supravegherea sculelor prin controlul uzurii și ruperii sculei. Fertigungstechnik, nr.5/1986.
41. **GROSU, I. F.** - Comanda adaptivă a avansului la mașina de găurit. Teză de doctorat. IPTVT, 1986.
42. **HUNTER, F.T.** - Sonics-Techniques for the Use of Sound and Ultrasound in Engineering and Science John Wiley & sons Inc., New York, London, Sydney, 1975.
43. **IGNEA, A.** - Măsurarea electrică a mărimilor neelectrice, Editura de vest, Timișoara, 1996.
44. **JAIN, A.** - Continuum Damage Mechanics in Piezoceramics, Univ. of Maryland, College Park, MD Int. SAMPE Tech. Conf. 23, p.163 ÷ 172, 1993.
45. **JANAS, V.F., McNULTY, T.F., WALKER, R.F.** - Processing of Piezoelectric Ceramic/Polimer Composites, J.Am.Ceram.Soc., 78/9, p. 2425 ÷ 30, 1995.
46. **KAIL, R.** - Piezoelektrische Messgerate und ihre Anwendungen material "Kistler Instruments AG", 1991.
47. **KATOU, Y.** - Piezoelectric Ceramics, Fine Ceram.Rep., 12/2, p.38 ÷ 50, 1994.
48. **KIM, S.B., KIM, D.Y.** - Effect of Grain Size and Poling on the Fracture Mode of Lead Zirconate Titanate Ceramics, J.Am.Ceram.Soc., 73/1, p.161 ÷ 63, 1989.
49. **x x x** - KISTLER, (Elveția), Sisteme de măsurare a forțelor. Prospecte 1988, 1990.
50. **KLAASEN, B. K.** - Piezoelectric. Accelerometers. Department of Electrical Engineering, Delft., 1986.

51. **KLUFT, W.** - Supravegherea sculelor (uzură și sesizarea ruperii) la prelucrarea prin așchiere, Maschinenmarkt, nr.47/86, p.38÷42, 1986.
52. **x x x** - KRUPP-Widia, Sistem de supraveghere WZL, prospect, 1988.
53. **LARSON, J.** - Supravegherea ruperii sculelor la strungurile cu CNC, Machine and Tool Blue Book, nr.6/1985.
54. **LUCHT, J.** - Sonstige Drucknebverfahren - Klingenberg - "Ölhydraulik und pneumatik", nr.30, 1986.
55. **MARCU, F.** - Dicționar de neologisme, Editura Academiei RSR București, 1986.
56. **MASON, W.P.** - Electromechanical Transducers and Wave Filters D. van Hastrand Comp.,Inc., New York, 1948.
57. **x x x** - MESURES, (Franța) - Colecția de reviste din anii 1984, 1987.
58. **MICLEA, C.** - Proprietăți fizice ale materialelor oxidice din sistemul AO-BO₂-Fe₂O₃. Teză de doctorat. Universitatea București, Facultatea de fizică, 1991.
59. **MNERIE, D.** - Senzori de forță piezoceramici, Lucrările celui de-al VI-lea simpozion MTM, Facultatea de mecanică, Timișoara, 1992.
60. **MNERIE, D.** - Studiu asupra unor materiale piezoceramice, Lucrările sesiunii de comunicări științifice , Arad, Mai, Vol.3-Mecanică, p.213÷219, 1992.
61. **MNERIE, D.** - Experiment privind asimilarea unor materiale piezoceramice în construcția sistemelor de deplasare micrometrică, Lucrările sesiunii de comunicări științifice, Arad, Mai, Vol.3-Mecanică, p.207÷212, 1992.
62. **MNERIE, D.** - Traductor pentru forțe statice, piezoceramic, Sesiunea de comunicări "TEHNOMUS"-VII, Suceava, (Secția II), p.487÷490, 1993.
63. **MNERIE, D.** - Asupra unor proprietăți ale materialelor piezoceramice, Lucrările sesiunii de comunicări științifice.Ploiești-'92, p. 63÷68, 1992.
64. **MNERIE, D.** - Senzori de forță piezoceramici.Simpozion național de roboți industriali, Ediția a XI-a, U.T.Timișoara, p.19.1 ÷ 19.5, 1992.
65. **MNERIE, D., BREABĂN, F.** - Piezoelectricitatea unor materiale ceramice, Analele Universității din Oradea, Fascicola Mecanica, p.503÷506, 1992.
66. **MNERIE, D., BREABĂN, F.** - Sistem de măsurare a forțelor pentru mâini mecanice. Simpozion național de roboți industriali, Ediția a XI-a, U.T.Timișoara, pg.35.1 ÷ 35.4, 1992.
67. **MNERIE, D., FLEȘER, T.** - Studiu experimental privind unele sisteme de deplasare micrometrică, Ses. tehn.șt. a Univ."Eftimie Murgu"-Reșița, oct.-93, Secția IV, p.181 ÷ 184, 1993.

68. **MNERIE, D., HERMAN, R., FLEŞER, T.** - Considerații asupra variației forțelor la debitarea prin eroziune electrică complexă. Conferința Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, CNTN-6, (Volumul A+B), p.261÷264, 1993.
69. **MNERIE, D., NANU, A.** - Contribuții la optimizarea utilizării materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță, Conferința Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, CNTN-6, (Volumul E), p.8÷16, 1993.
70. **MNERIE, D., POPOVICI, I.** - Unele aspecte privind supravegherea prelucrărilor prin eroziune electrică. Conferința Națională de Tehnologii Neconvenționale, Timișoara, CNTN-6 (Volumul A+B), p.187÷190, 1993.
71. **MNERIE, D., ȚUCU, D.** - Traductoare de forță piezoceramice în studiul operației de frezare. Sesiunea de comunicări "TEHNOMUS"-VII, Suceava, (Secția II), p.209÷211, 1993.
72. **MNERIE, D., ȚUCU, D.** - Materiale piezoceramice în construcția traductoarelor de presiune, Lucrările sesiunii de comunicări științifice. Ploiești-92, p. 69÷72, 1992.
73. **MNERIE, D., ȚUCU, D.** - Sistem de supraveghere automată a sculelor la strunjire, Analale Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, p.89÷92, 1993.
74. **MNERIE, D., ȚUCU, D., FLEŞER, T.** - Traductor de forță pentru utilaje destinate prelucrărilor prin deformare la rece, Sesiunea tehn.șt. a Univ."Eftimie Murgu"-Reșița, octombrie-93, Secția IV., p. 177÷180, 1993.
75. **MNERIE, D., VASILESCU, M.** - Materiale piezoceramice în construcția sistemelor de deplasare micrometrică, Analale Universității din Oradea, Fascicola Mecanică, p.537÷540, 1992.
76. **MNERIE, D., VASILESCU, M.** - Senzor de înaltă presiune piezoelectric, Sesiunea de comunicări "TEHNOMUS"-VII, Suceava, (Secția II), p.174÷176, 1993.
77. **MNERIE, D., VASILESCU, M., ȚUCU, D.** - Sistem de supraveghere și diagnoză a utilajelor tehnologice. Sesiunea de comunicări "TEHNOMUS"-VII, Suceava, (Secția II), p.212÷216, 1993.
78. **MÖHL, R.** - Supravegherea sculei și piesei la prelucrarea prin aşchiere și diagnoza defecțiunilor, Industrial & Production Engineering, nr.1/1986.
79. **MOLOV, V.V.** - Piezorezonansnie datciki, "Energoatomizdat", Moskva, 1989.
80. **MONTGOMERY, C. D.** - Design and Analysis of Experiments, Third Edition, John Wiley & sons, Inc., New York, 1991.
81. **NAGY, I.I.** - Ultrasunetele și utilizarea lor. Editura științifică și enciclopedică, București, 1982.
82. **NANU, A.** - Tehnologia materialelor. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.

83. **NANU, A., HERMAN, R., OLARIU, M.** - Considerații asupra metodelor matematice la stabilirea parametrilor optimi la prelucrarea prin eroziune electrică complexă, A VI-a Conferință națională de tehnologii neconvenționale, Timișoara, 1993.
84. **NICA, A.** - Ceramica tehnică. Editura Tehnică, București, 1988.
85. **NICHICI, A.** - Tehnologia materialelor, IPTVT, 1981.
86. **NICHICI, A., CICALĂ, E., MEE, R.** - Prelucrarea datelor experimentale, Curs și aplicații, U.P.Timișoara, 1996.
87. **NICOLAU, E.** - Manualul inginerului electronist. Radiotehnica vol. 1. Editura Tehnică, București, 1987.
88. **NICOLAU, P., NICULESCU, C.H., TĂNĂSOIU, C.,** - Materiale piezoceramice pe bază de titanat-zirconat de plumb cu adaosuri. Sesiunea anuală de comunicări științifice pentru componente electronice pasive. Curtea de Argeș -Cumpăna, 1982-1984.
89. **x x x** - Normă tehnică de întreprindere - materiale piezoceramice pentru traductoare mecano-electrice (MPT-01) și pentru generatoare de ultrasunete (MPG-01), NTI. Nr.697-85, CSEN-ICEFIZ, IFTM, București, 1985.
90. **NUTZLER, H.** - Diagnoza mașinilor-unelte cu comandă numerică, Industrial & Production Engineering, Nr.1/84, p.62 ÷63, 1984.
91. **OGAWA, T.** - Preparation and Evolution of Ferroelectric thin Films, Ceram.Trans., 43, p.3 ÷14, Shizuok, Japan, 1994.
92. **PALFALVI, A., BREȘTIN, A.** - Tehnologia materialelor. Editura didactică și pedagogică, București, 1985.
93. **x x x** - PCB PIEZOTRONICS, Inc. (SUA) - Prospecte 1990.
94. **PETRICEANU, G.** - Proiectarea proceselor tehnologice și reglarea strungurilor automate, Editura Tehnică, București, 1979.
95. **POPESCU, I.** - Optimizarea procesului de așchiere. Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1987.
96. **POPOVICI, I., MNERIE, D.** - Piezoceramics Materials Used in Engineering of Supervision Systems of Electroerosion Machining, Sixth Israel Materials Engineering Conference, February 24-25, p.103 ÷1051993.
97. **POPOVICI, I., POPOVICI, V., SPOREA, I., MNERIE, D.** - Aspecte ale prelucrării oțelurilor cu electrod de oțel la mașina ELER-01, Al VII-lea Simpozion "Tehnologii și produse noi în construcția de mașini", Suceava, 1993.

98. **POWEL, J.W.** - Cutting Tool Sensors, National Machine Tool Builders' Association, 2-nd Bienal International Machine Tool Technical Conference, september 5÷13, SUA, 1984.
99. **x x x** - PROMETEC - Echipament pentru supravegherea mașinilor-unelte tip K 100, prospect 1987.
100. **x x x** - RENISHAW (Anglia) - Sisteme de control dimensional. Traductoare de contact, prospect, 1991.
101. **x x x** - ROBOTRON VEB (Germania) , Prospecte 1990.
102. **x x x** - SANDVIK Coromant (Germania) , Sistem de supraveghere a sculelor, Prospecte 1988.
103. **SCHNEIDER, H.P.** - Sistem de supraveghere a sculelor la prelucrari automatizate, Industrielles Steuern und Regeln, nr.3/86, p.91÷92, 1986.
104. **SCHULER, M.** - Supravegherea automată a strungurilor cu CNC, Schweizer Maschinenmarkt, nr.32/1984.
105. **x x x** - SENSOTEC Inc. (SUA) - Prospecte 1990.
106. **SOSA, H.A.** - Electroelastic Analysis of Piezoelectric Ceramics with Defects, Int. SAMPE Tech. Conf., 25, p.152÷162, 1993.
107. **SPINEANU, U.** - Automatizarea controlului dimensional în construcția de mașini, Editura Tehnică, București, 1985.
108. **SPOREA, I.** - Indrumător de laborator la disciplina Tehnologia materialelor, IPTVT, 1981.
109. **x x x** - SR CEI 770:1994 - Metode de evaluare a caracteristicilor de funcționare a traductoarelor utilizate în sistemele de conducere a proceselor industriale.
110. **x x x** - SR ISO 4522-1:1994 - Acoperiri metalice. Metode de verificare a acoperirilor electrochimice de argint și aliaje de argint.
111. **STANCIU, D.** - Senzori. Prezent și perspectivă, Seria "Tehnica la zi", Editura Tehnică, București, 1987.
112. **x x x** - STAS 4447 -83 - Dinamometre pentru forțe statice. Clasificare.
113. **x x x** - STAS 6019/1-88 - Măsurare și comandă în automatizarea proceselor industriale.
114. **x x x** - STAS 8265-79 - Produse din pulberi sinterizate. Incercarea la încovoiere.
115. **x x x** - STAS 9472/2-84 - Aliaje dure sinterizate. Incercarea la încovoiere.
116. **x x x** - STAS 9472/8-75 - Aliaje dure sinterizate. Incercarea la duritate Vickers.

117. x x x STAS 11852/2 - 92 - Celule de sarcină cu tensorezistoare pentru măsurat forțe și mase. Condiții tehnice generale.
118. ȘANDRU, L.A., ȘTIRBEI, I. F. - Spectre de difracție și tehnici de investigație a materialelor ceramice și bazaltice folosite în construcția de mașini, EDP-R.A., București, 1994.
119. THOMANN, H. - New Generation Electroceramics, Ind. Ceramics Vol. 13, Nr.3/4, p.161 ÷164, 1993.
120. TÎRPE, G. - Precizia prelucrărilor prin aşchiere, Editura Tehnică, 1972.
121. x x x - Traductoare pentru automatizări industriale, Vol.1, Editura Tehnică, București, 1985.
122. TRUȘCULESCU, M. - Studiul metalelor. Editura didactică și pedagogică, București, 1977.
123. TRUȘCULESCU, M., CUCURUZ, R.L., RĂDUȚĂ, A. - Studiul materialelor. Analize și încercări, Lito., UPT, 1992.
124. ȚUCU, D. - Contribuții la optimizarea tehnologiei de fabricație a tuburilor flexibile, Teză de doctorat, Conducător științific Prof. dr. doc. șt. ing. dhc. Aurel NANU, UTTimișoara, 1995.
125. VASILESCU, M., MNERIE, D. - Considerații asupra posibilităților de măsurare a presiunilor în instalația de prelucrare cu jet de apă cu abraziv, Al VII-lea Simpozion, "Tehnologii și produse noi în construcția de mașini - TEHNOMUS-VII", Suceava, iunie, 1993.
126. YADAV, K.L. - Structural and Electrical Properties of PZT (La,Z) Ceramics, Mater.Letters, 16/5, p.291 ÷295, 1993.

ANEXA A.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre

variabilele de reglare și constanta de deformare piezoelectrică, (d_{33}), - D_1

Tabelul A.1.

Var.regł.	M_4	D_4	B_4	T_4	P_4	S_4			
Expert									
1	2	4	5	3	1	6			
2	1	3	6	4	2	5			
3	1	4	6	3	2	5			
4	1	4	6	3	2	5			
5	1	4	6	3	2	5			
6	1	4	6	2	3	5			
7	1	4	6	3	2	5			
8	1	4	6	3	2	5			
9	1	5	6	3	2	4			
Λ_j	10	36	53	27	18	45	$\sum \Lambda_j =$	189	
M_j	0.0529	0.1905	0.2804	0.1428571	0.0952381	0.2381			
$1/M_j$	18.9	5.25	3.566	7	10.5	4.2			
Δ_j	-21.5	4.5	21.5	-4.5	-13.5	13.5	$\sum \Delta_j =$	0	
Δ_j^2	462.25	20.25	462.25	20.25	182.25	182.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1329.5	
$W =$	0.9379	$\bar{r} =$	2.3973	$v_2 =$	4	$v_2 =$	32	$l =$	120.86

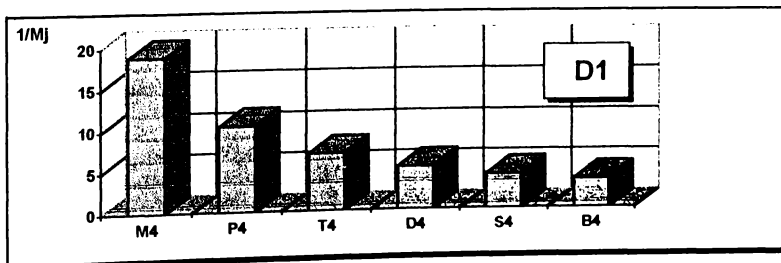


Figura A.1.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre

variabilele de reglare și constanta de complianță mecanică, (s_{33}), - S_1

Tabelul A.2.

Var.reg.	M_4	D_4	B_4	T_4	P_4	S_4			
Expert									
1	2	3	5	4	6	1			
2	1	4	6	3	5	2			
3	1	4	5	2	6	3			
4	1	4	5	3	6	2			
5	1	3	5	4	6	2			
6	1	4	5	2	6	3			
7	1	4	5	3	6	2			
8	1	4	5	2	6	3			
9	2	4	6	3	5	1			
Λ_j	11	34	47	26	52	19	$\sum \Lambda_j =$	189	
M_j	0.0582	0.1799	0.2487	0.1375661	0.2751323	0.1005			
$1/M_j$	17.182	5.5588	4.0213	7.2692308	3.6346154	9.9474			
Δ_j	-20.5	2.5	15.5	-5.5	20.5	-12.5	$\sum \Delta_j =$	0	
Δ_j^2	420.25	6.25	240.25	30.25	420.25	156.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1273.5	
$W =$	0.8984	$\mathcal{F} =$	2.1296	$v_2 =$	4	$v_2 =$	32	$l =$	70.75

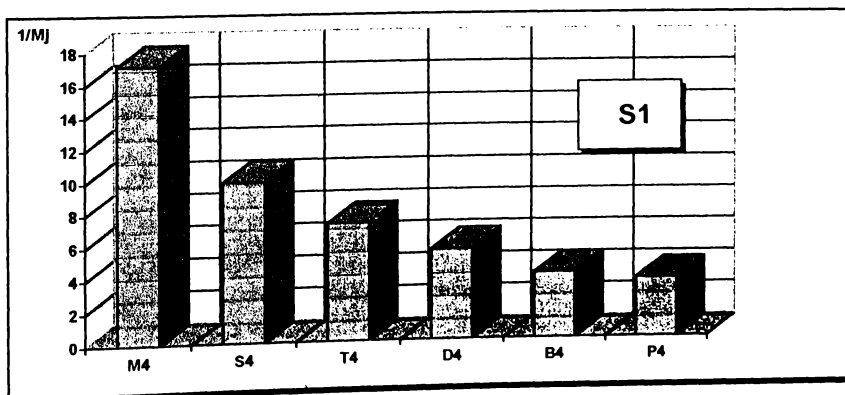


Figura A.2.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre

variabilele de reglare și coeficientul de cuplaj electromecanic, (K_p), - K_1

Tabelul A.3.

Var.reg.	M_1	D_1	B_1	T_1	P_1	S_1			
Expert									
1	1	6	2	4	3	5			
2	2	6	1	5	4	3			
3	3	5	1	6	2	4			
4	2	6	1	5	3	4			
5	2	6	1	5	3	4			
6	2	6	1	5	4	3			
7	3	5	1	6	2	4			
8	2	6	1	4	3	5			
9	1	6	2	5	3	4			
A_j	18	52	11	45	27	36	$\sum A_j =$	189	
M_j	0.0952	0.2751	0.0582	0.2380952	0.1428571	0.1905			
$1/M_j$	10.5	3.6346	17.182	4.2	7	5.25			
Δ_j	-13.5	20.5	-20.5	13.5	-4.5	4.5	$\sum \Delta_j =$	0	
Δ_j^2	182.25	420.25	420.25	182.25	20.25	20.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1245.5	
$W =$	0.8787	$\bar{f} =$	2.0296	$v_2 =$	4	$v_2 =$	32	$l =$	57.93

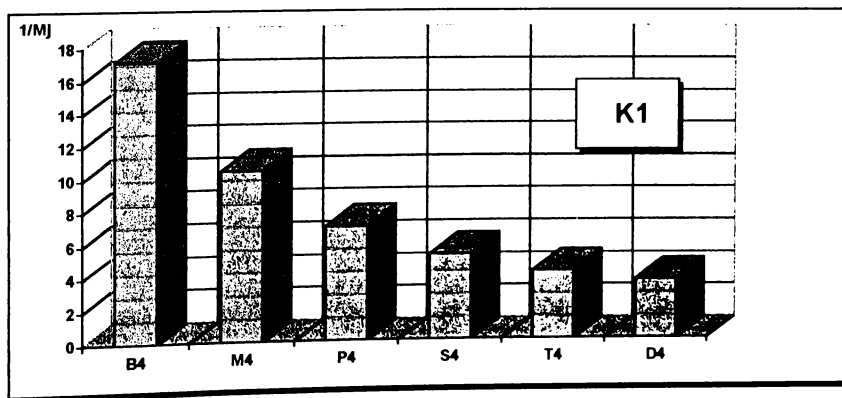


Figura A.3.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre
variabilele de reglare și factorul de calitate mecanic, (Q_m), - Q_1

Tabelul A.4.

Var.reg.	M_4	D_4	B_4	T_4	P_4	S_4			
Expert									
1	2	3	5	4	6	1			
2	1	4	6	3	5	2			
3	1	4	6	2	5	3			
4	1	4	6	3	5	2			
5	1	3	6	5	4	2			
6	1	4	6	2	5	3			
7	1	5	6	3	4	2			
8	1	4	5	2	6	3			
9	2	4	6	3	5	1			
Λ_j	11	35	52	27	45	19	$\sum \Lambda_j =$	189	
M_j	0.0582	0.1852	0.2751	0.1428571	0.2380952	0.1005			
$1/M_j$	17.182	5.4	3.6346	7	4.2	9.9474			
Δ_j	-20.5	3.5	20.5	-4.5	13.5	-12.5	$\sum \Delta_j =$	0	
Δ_j^2	420.25	12.25	420.25	20.25	182.25	156.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1211.5	
$W =$	0.8547	$\bar{S} =$	1.9256	$v_2 =$	4	$v_2 =$	32	$l =$	47.049

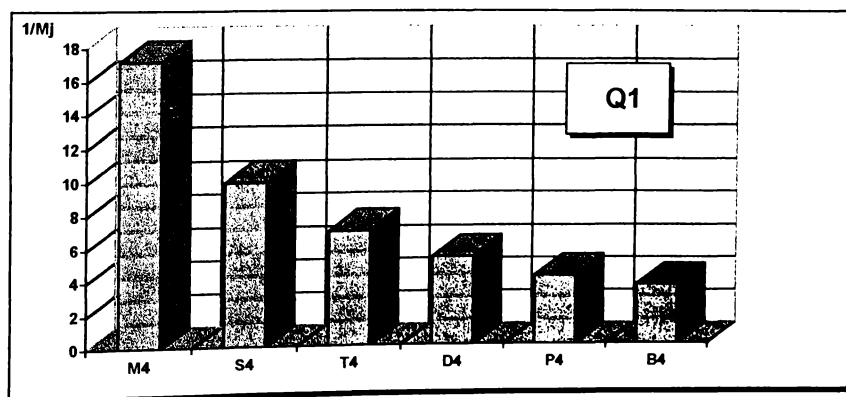


Figura A.4.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre variabilele de reglare și rezistența la compresie, - R_1

Tabelul A.5.

Var.reg.	M_4	D_4	B_4	T_4	P_4	S_4			
Expert									
1	1	2	3	5	4	6			
2	2	1	3	6	4	5			
3	2	1	4	5	3	6			
4	2	1	5	4	3	6			
5	3	1	4	5	2	6			
6	1	2	4	5	3	6			
7	2	1	5	4	3	6			
8	2	1	4	6	3	5			
9	3	1	4	5	2	6			
Λ_j	18	11	36	45	27	52	$\sum \Lambda_j =$	189	
M_j	0.0952	0.0582	0.1905	0.2380952	0.1428571	0.2751			
$1/M_j$	10.5	17.182	5.25	4.2	7	3.6346			
Δ_j	-13.5	-20.5	4.5	13.5	-4.5	20.5	$\sum \Delta_j =$	0	
Δ_j^2	182.25	420.25	20.25	182.25	20.25	420.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1245.5	
$W =$	0.8787	$\bar{r} =$	2.0296	$v_2 =$	4	$v_2 =$	32	$l =$	57.93

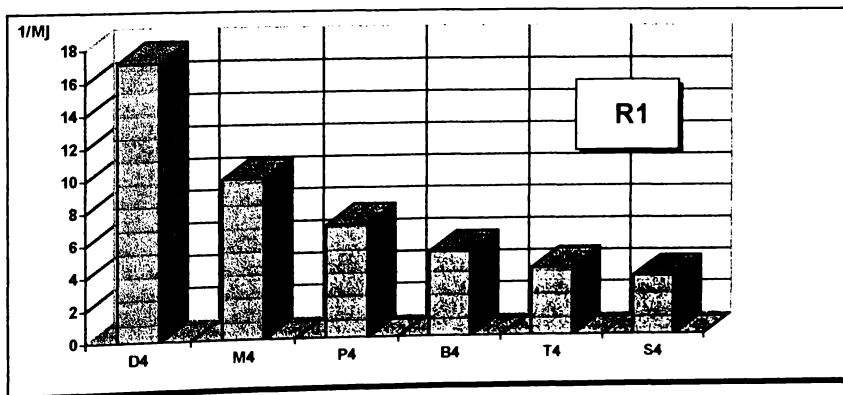


Figura A.5.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre
variabilele de reglare și calitatea metalizării, - M_1

Tabelul A.6.

Var.regł.	M_4	D_4	B_4	T_4	P_4	S_4		
Expert								
1	2	3	5	4	6	1		
2	1	4	6	3	5	2		
3	1	4	5	2	6	3		
4	1	4	5	3	6	2		
5	1	3	5	4	6	2		
6	1	4	5	2	6	3		
7	1	4	5	3	6	2		
8	1	4	5	2	6	3		
9	2	4	6	3	5	1		
Λ_j	11	34	47	26	52	19	$\sum \Lambda_j =$	189
M_j	0.0582	0.1799	0.2487	0.1375661	0.2751323	0.1005		
$1/M_j$	17.182	5.5588	4.0213	7.2692308	3.6346154	9.9474		
Δ_j	-20.5	2.5	15.5	-5.5	20.5	-12.5	$\sum \Delta_j =$	0
Δ_j^2	420.25	6.25	240.25	30.25	420.25	156.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1273.5
$W =$	0.8984	$\bar{r} =$	2.1296	$v_2 =$	4	$v_2 =$	16	1 = 70.75

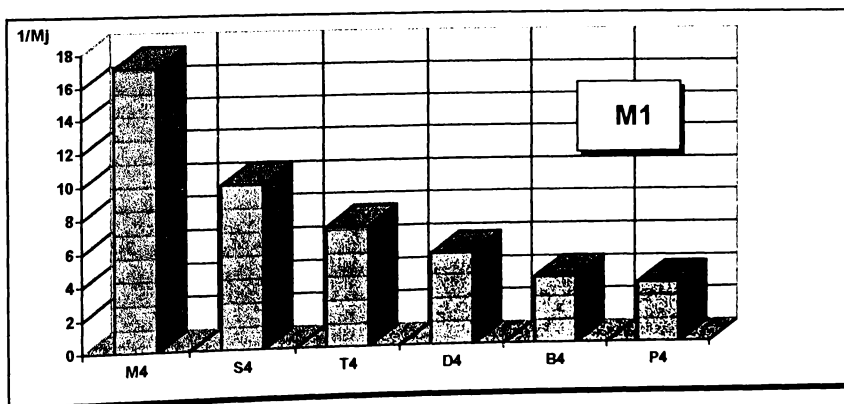


Figura A.6.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre

variabilele de reglare și structura materialului piezoceramic, - C₁

Tabelul A.6.

Var.reg.	M ₁	D ₁	B ₁	T ₁	P ₁	S ₁			
Expert									
1	1	6	2	4	3	5			
2	2	6	1	5	4	3			
3	3	5	1	6	2	4			
4	2	6	1	5	3	4			
5	2	6	1	5	3	4			
6	2	6	1	5	4	3			
7	3	5	1	6	2	4			
8	2	6	1	4	3	5			
9	1	6	2	5	3	4			
Λ_j	18	52	11	45	27	36	$\sum \Lambda_j =$	189	
M_j	0.0952	0.2751	0.0582	0.2380952	0.1428571	0.1905			
$1/M_j$	10.5	3.6346	17.182	4.2	7	5.25			
Δ_j	-13.5	20.5	-20.5	13.5	-4.5	4.5	$\sum \Delta_j =$	0	
Δ_j^2	182.25	420.25	420.25	182.25	20.25	20.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1245.5	
$W =$	0.8787	$\bar{r} =$	2.0296	$v_2 =$	4	$v_2 =$	32	$l =$	57.93

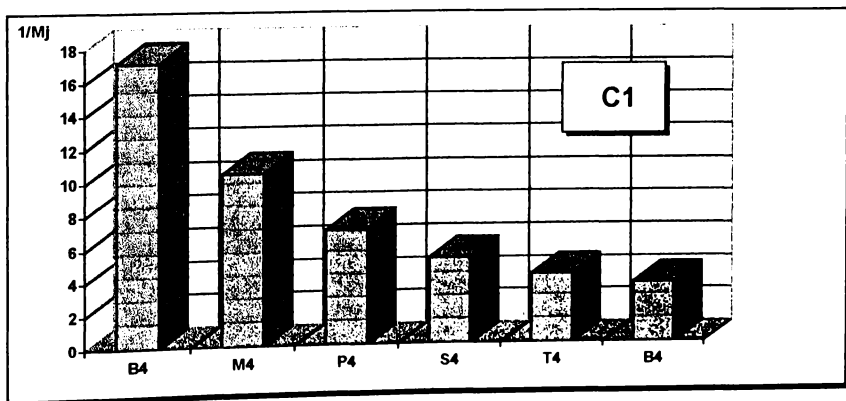


Figura A.7.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre
variabilele de reglare și semnalul de ieșire, - E₅

Tabelul A.8.

Var.reg.	M ₁	D ₁	B ₁	T ₁	P ₁	S ₁		
Expert								
1	1	2	6	4	5	3		
2	2	1	5	6	4	3		
3	1	2	6	5	3	4		
4	1	3	6	5	2	4		
5	1	2	6	5	4	3		
6	2	1	5	6	4	3		
7	1	2	5	6	3	4		
8	1	3	6	5	4	2		
9	1	2	6	5	4	3		
Λ_j	11	18	51	47	33	29	$\sum \Lambda_j =$	189
M_j	0.0582	0.0952	0.2698	0.2486772	0.1746032	0.1534		
$1/M_j$	17.182	10.5	3.7059	4.0212766	5.7272727	6.5172		
Δ_j	-20.5	-13.5	19.5	15.5	1.5	-2.5	$\sum \Delta_j =$	0
Δ_j^2	420.25	182.25	380.25	240.25	2.25	6.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1231.5
W =	0.8688	$\bar{r} =$	1.9848	$v_2 =$ 4	$v_2 =$ 32	$l =$	52.968	

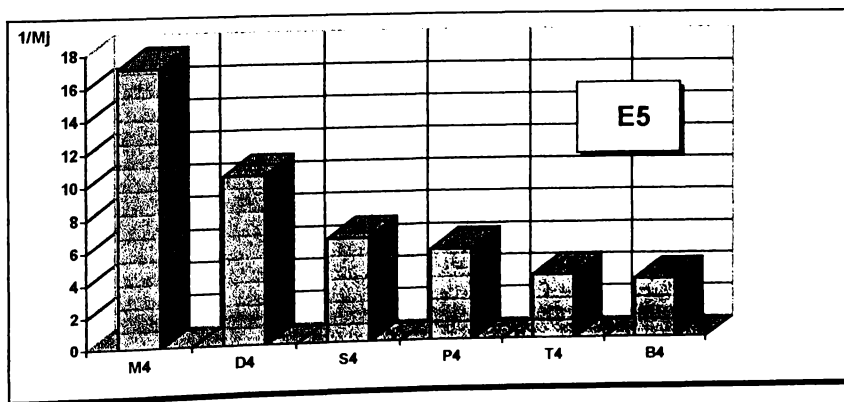


Figura A.8.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre
variabilele de reglare și neliniaritatea, - N_6

Tabelul A.9.

Var.reg.	M_i	D_i	B_i	T_i	P_i	S_i		
Expert								
1	2	4	6	5	1	3		
2	1	3	5	6	4	2		
3	1	5	6	4	2	3		
4	1	3	5	6	4	2		
5	1	4	5	6	3	2		
6	2	3	5	6	4	1		
7	1	5	4	6	3	2		
8	1	3	6	5	2	4		
9	1	5	4	6	2	3		
A_j	11	35	46	50	25	22	$\sum A_j =$	189
M_j	0.0582	0.1852	0.2434	0.2645503	0.1322751	0.1164		
$1/M_j$	17.182	5.4	4.1087	3.78	7.56	8.5909		
Δ_j	-20.5	3.5	14.5	18.5	-6.5	-9.5	$\sum \Delta_j =$	0
Δ_j^2	420.25	12.25	210.25	342.25	42.25	90.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1117.5
$W =$	0.7884	$\sigma =$	1.6973	$v_2 =$ 4	$v_2 =$ 32	$l =$	29.8	

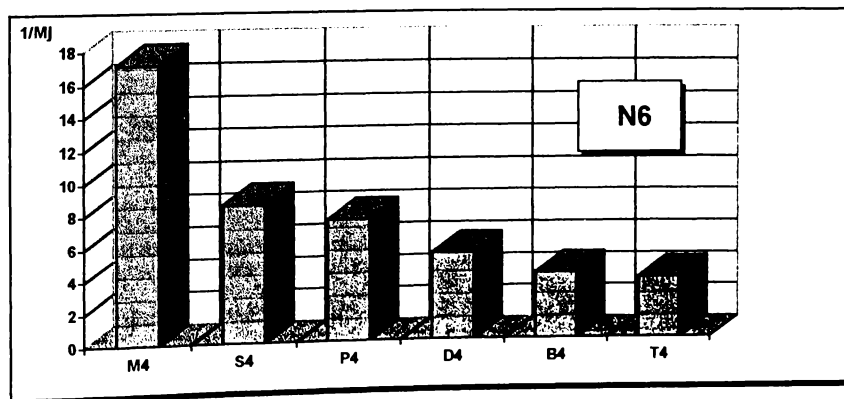


Figura A.9.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre
variabilele de reglare și costurile directe, C_7

Tabelul A.10.

Var.reg.	M_1	D_1	B_1	T_1	P_1	S_1			
Expert									
1	5	4	6	2	1	3			
2	4	6	5	3	1	2			
3	4	5	6	2	1	3			
4	4	6	5	3	1	2			
5	5	6	4	3	1	2			
6	6	5	4	2	3	1			
7	5	6	4	3	1	2			
8	5	6	4	3	2	1			
9	5	6	4	2	1	3			
Λ_j	43	50	42	23	12	19	$\sum \Lambda_j =$	189	
M_j	0.2275	0.2646	0.2222	0.1216931	0.0634921	0.1005			
$1/M_j$	4.3953	3.78	4.5	8.2173913	15.75	9.9474			
Δ_j	11.5	18.5	10.5	-8.5	-19.5	-12.5	$\sum \Delta_j =$	0	
Δ_j^2	132.25	342.25	110.25	72.25	380.25	156.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1193.5	
$W =$	0.842	$\bar{f} =$	1.8762	$v_2 =$	4	$v_2 =$	32	$l =$	42.625

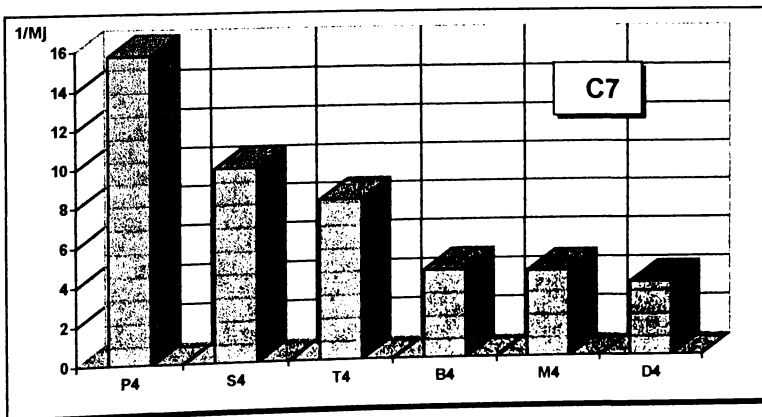


Figura A.10.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre
variabilele de reglare și siguranța în exploatare, - S_7

Tabelul A.11.

Var.regi.	M_4	D_4	B_4	T_4	P_4	S_4			
Expert									
1	3	5	4	6	2	1			
2	2	6	3	4	1	5			
3	2	6	5	4	1	3			
4	1	4	6	5	3	2			
5	2	6	4	5	1	3			
6	3	5	4	6	1	2			
7	3	6	4	5	1	2			
8	2	6	5	3	1	4			
9	3	6	4	5	1	2			
Λ_j	21	50	39	43	12	24	$\sum \Lambda_j =$	189	
M_j	0.1111	0.2646	0.2063	0.2275132	0.0634921	0.127			
$1/M_j$	9	3.78	4.8462	4.3953488	15.75	7.875			
Δ_j	-10.5	18.5	7.5	11.5	-19.5	-7.5	$\sum \Delta_j =$	0	
Δ_j^2	110.25	342.25	56.25	132.25	380.25	56.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1077.5	
$W =$	0.7601	$\bar{r} =$	1.6164	$v_2 =$	4	$v_2 =$	32	$l =$	25.353

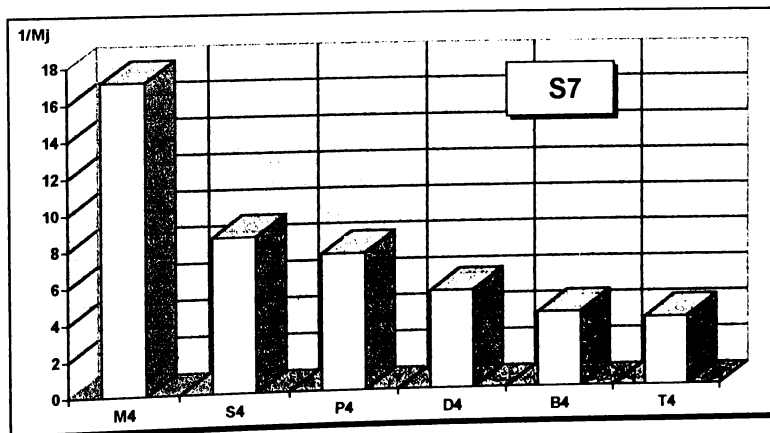


Figura A.11.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre
variabilele de intrare și capacitatea de măsurare, - F₅

Tabelul A.12.

Var.intr.	D ₁	K ₁	C ₁	Q ₁	M ₁	S ₁		
Expert								
1	4	3	1	5	6	2		
2	3	4	2	6	5	1		
3	3	5	1	4	6	2		
4	2	4	1	5	6	3		
5	3	4	1	5	6	2		
6	4	3	1	5	6	2		
7	2	4	1	5	6	3		
8	3	5	1	4	6	2		
9	4	3	1	6	5	2		
Λ_j	28	35	10	45	52	19	$\sum \Lambda_j =$	189
M_j	0.1481	0.1852	0.0529	0.2380952	0.2751323	0.1005		
$1/M_j$	6.75	5.4	18.9	4.2	3.6346154	9.9474		
Δ_j	-3.5	3.5	-21.5	13.5	20.5	-12.5	$\sum \Delta_j =$	0
Δ_j^2	12.25	12.25	462.25	182.25	420.25	156.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1245.5
W =	0.8787	$\bar{F} =$	2.0296	$v_2 =$ 4	$v_2 =$ 32	1 =	57.93	

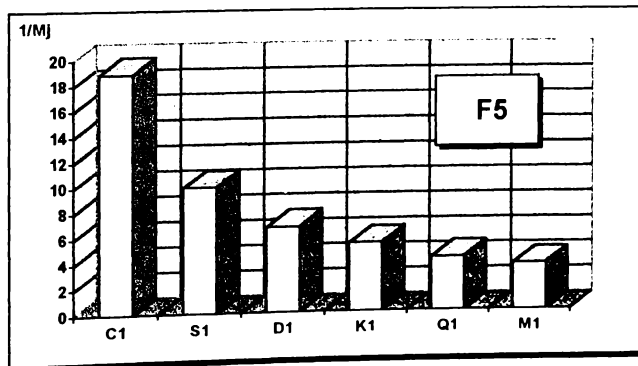


Figura A.12.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre
variabilele de intrare și semnalul de ieșire, - E₅

- Tabelul A.13.

Var.intr.	D ₁	K ₁	C ₁	Q ₁	M ₁	S ₁		
Expert								
1	1	2	6	3	5	4		
2	2	1	3	4	6	5		
3	1	2	4	3	6	5		
4	1	3	2	4	5	6		
5	1	2	4	3	6	5		
6	1	2	5	3	6	4		
7	1	3	4	2	6	5		
8	1	2	3	4	6	5		
9	1	3	4	2	6	5		
Λ_j	10	20	35	28	52	44	$\sum \Lambda_j =$	189
M_j	0.0529	0.1058	0.1852	0.1481481	0.2751323	0.2328		
$1/M_j$	18.9	9.45	5.4	6.75	3.6346154	4.2955		
Δ_j	-21.5	-11.5	3.5	-3.5	20.5	12.5	$\sum \Delta_j =$	0
Δ_j^2	462.25	132.25	12.25	12.25	420.25	156.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1195.5
W =	0.8434	$\bar{r} =$	1.8815	$v_2 =$	4	$v_2 =$	32	1 = 43.081

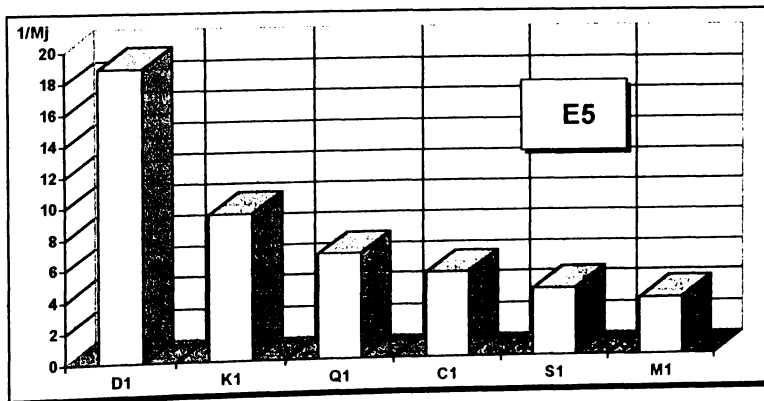


Figura A.13.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre
variabilele de intrare și costurile directe ale măsurării, - C₇

Tabelul A.14.

Var.intr.	D ₁	K ₁	C ₁	Q ₁	M ₁	S ₁		
Expert								
1	2	6	1	5	3	4		
2	1	6	2	4	3	5		
3	3	6	1	5	2	4		
4	2	6	1	5	3	4		
5	2	6	1	5	3	4		
6	2	6	1	5	3	4		
7	2	6	1	4	5	3		
8	2	5	1	6	3	4		
9	3	6	1	5	2	4		
A _j	19	53	10	44	27	36	∑A _j =	189
M _j	0.1005	0.2804	0.0529	0.2328042	0.1428571	0.1905		
1/M _j	9.9474	3.566	18.9	4.2954545	7	5.25		
Δ _j	-12.5	21.5	-21.5	12.5	-4.5	4.5	∑Δ _j =	0
Δ _j ²	156.25	462.25	462.25	156.25	20.25	20.25	∑Δ _j ² =	1277.5
W =	0.9012	$\bar{x} =$	2.1452	v ₂ = 4	v ₂ = 32	l =	73	

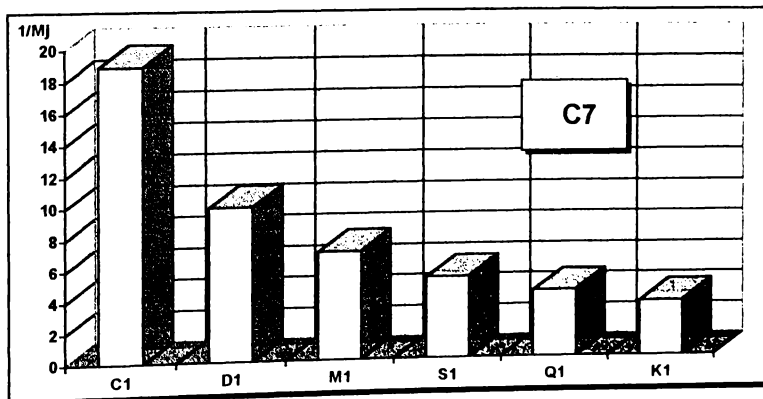


Figura A.14.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre
variabilele de intrare și siguranța în funcționare, - S₇

Tabelul A.15.

Var.intr.	D ₁	K ₁	C ₁	Q ₁	M ₁	S ₁		
Expert								
1	6	5	3	1	2	4		
2	6	3	2	4	1	5		
3	6	5	3	1	2	4		
4	5	4	2	1	3	6		
5	6	4	3	1	2	5		
6	6	3	4	1	2	5		
7	5	4	3	1	2	6		
8	6	5	2	1	3	4		
9	6	3	5	1	2	4		
Λ _j	52	36	27	12	19	43	ΣΛ _j =	189
M _j	0.2751	0.1905	0.1429	0.0634921	0.1005291	0.2275		
1/M _j	3.6346	5.25	7	15.75	9.9473684	4.3953		
Δ _j	20.5	4.5	-4.5	-19.5	-12.5	11.5	ΣΔ _j =	0
Δ _j ²	420.25	20.25	20.25	380.25	156.25	132.25	ΣΔ _j ² =	1129.5
W =	0.7968	ν ₁ =	1.723	ν ₂ =	4	ν ₃ =	32	l =
								31.375

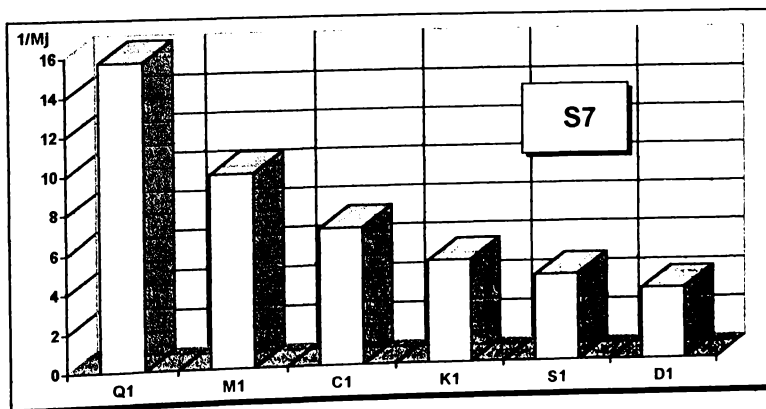


Figura A.15.

Ierarhizarea factorilor de influență dintre
variabilele de intrare și fiabilitate, - F_7

Tabelul A.16.

Var.intr.	D_i	K_i	C_i	Q_i	M_i	S_i			
Expert									
1	5	3	2	1	4	6			
2	4	5	1	2	3	6			
3	5	4	1	3	2	6			
4	4	6	2	1	3	5			
5	5	4	2	1	3	6			
6	5	3	2	1	4	6			
7	6	4	1	2	3	5			
8	4	6	3	1	2	5			
9	6	3	2	1	4	5			
Λ_j	44	38	16	13	28	50	$\sum \Lambda_i =$	189	
M_j	0.2328	0.2011	0.0847	0.0687831	0.1481481	0.2646			
$1/M_j$	4.2955	4.9737	11.813	14.538462	6.75	3.78			
Δ_j	12.5	6.5	-15.5	-18.5	-3.5	18.5	$\sum \Delta_i =$	0	
Δ_j^2	156.25	42.25	240.25	342.25	12.25	342.25	$\sum \Delta_j^2 =$	1135.5	
$W =$	0.8011	$\mathcal{F} =$	1.7362	$v_2 =$	4	$v_2 =$	32	1 =	32.213

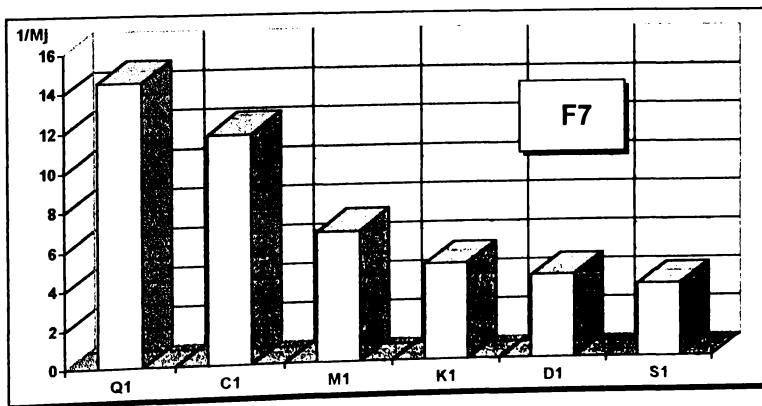


Figura A.16.

ANEXA B.

ASPECTE MICROSTRUCTURALE ALE MATERIALELOR
PIEZOCERAMICE INVESTIGATE ÎN TEZĂ

(completare)

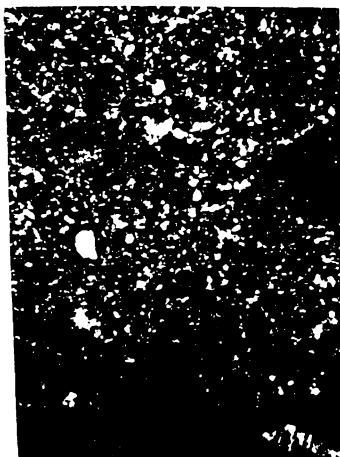


Figura B.1. - Micrografia
elementului PZT, MPG-01, (100x).

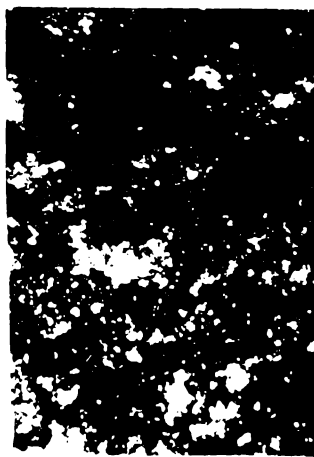


Figura B.2. - Micrografia
elementului PZT, MPT-01, (200x)

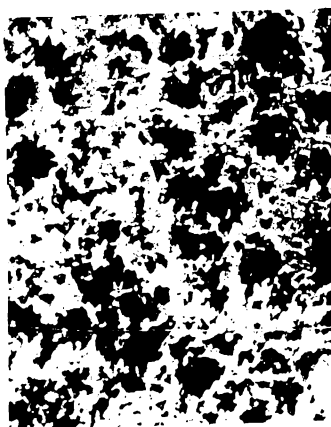


Figura B.3. - Micrografia
elementului PZT, de tip
MPG-01, (Nomarski, 100x)

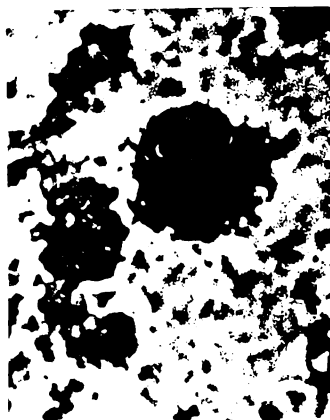


Figura B.4. - Micrografia
elementului PZT de tip
MPT-01, (Nomarski, 500x)



Figura B.5. - Micrografia
elementului PZT, de tip
MPG-01, (Normal, 500x)



Figura B.6. - Micrografia
elementului PZT de tip
MPT-01, (Normal, 500x)

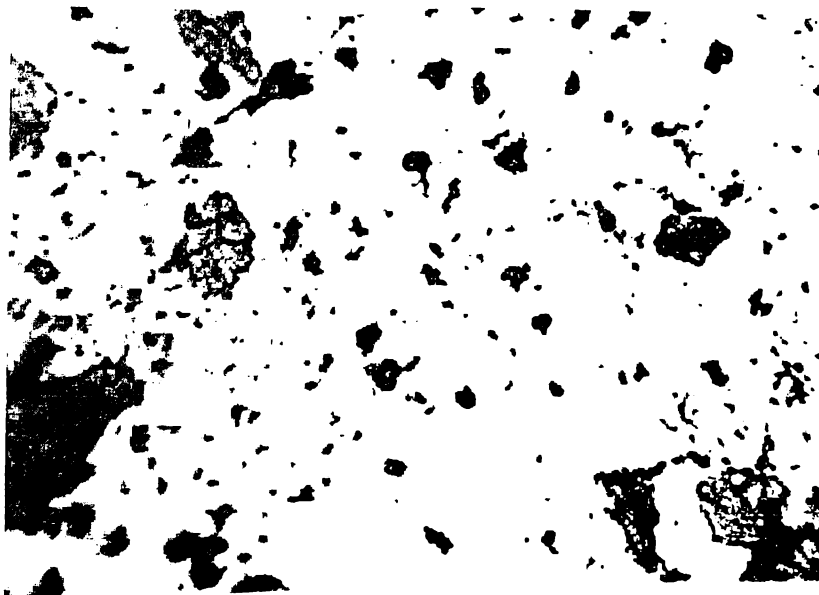


Figura B.7. - Micrografie de element piezoceramic de tip
PZT, imprimată după studierea pe calculator.

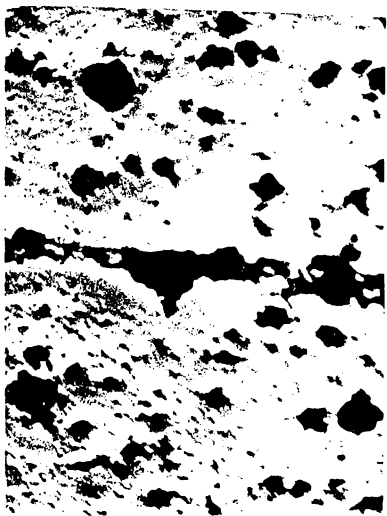


Figura B.8. - Micrografia unei fisurări în PZT; Nomarski, 100x.



Figura B.9. - Micrografia unei fisurări în PZT; (Normal, 500x).



Figura B.10. - Micrografia inițierii și propagării fisurilor în materialele piezoceramice, (prelucrată și scanată de PC; 500x)

A N E X A C.

**APLICAȚIE A SISTEMELOR FUZZY ÎN MONITORIZAREA
PROCESELOR DE FABRICAȚIE**

(fundamentare teoretică)

În *subcapitolul 5.3.*, s-au utilizat ca metode de monitorizare a rezultatelor experimentale de la operațiile de prelucrare prin așchiere, următoarele metode: metoda *recunoașteri modelului*, *sistemele Fuzzy*, *arborii decizionali*, *rețelele neurale*.

Considerându-se metoda *recunoașteri modelului*, ca fiind destul de cunoscută pentru acest gen de aplicații, în prezenta *anexă* se dorește completarea conținutului *tezei* cu metodologia sistemelor *Fuzzy*, folosită în rezolvarea problemelor de monitorizare (*subcapitolul 5.3.*).

Sistemele *Fuzzy* au fost introduse pentru prima dată de *Zadeh* (1973, 1978) [31]. În principiu, *evenimentele nesigure* au fost descrise cu ajutorul *gradului Fuzzy*, de multe ori definit ca funcție relațională sau funcție de probabilitate.

Definiție: Dacă *A* este un eveniment nesigur (concept *Fuzzy*), fiind însușire din mulțimea însușirilor universale \mathcal{U} , atunci *A* poate fi definit prin relația:

$$A = \{x | \mu_A(x)\}, \quad (C.1)$$

unde: $x \in \mathcal{U}$ este valoarea lui *A*, iar $\mu_A(x)$ reprezintă gradul Fuzzy.

Gradul Fuzzy, $\mu_A(x)$, reprezintă, în fapt, un grad de incertitudine; este definit ca o funcție monotonă, $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$, când valoarea "0" reprezintă cazul *sigur NU*, iar valoarea "1" reprezintă cazul *sigur DA*.

Figura C.1., ilustrează conceptul clasificării Fuzzy, în comparație cu clasificarea normală a evenimentelor.

Pentru a se evita confuziile, se precizează diferența dintre *gradul Fuzzy* și *probabilitate*.

Dacă, gradul *Fuzzy* reprezintă gradul de imprecizie, de incertitudine, a unui eveniment, (în ce măsură evenimentul *A* este mai aproape de evenimentul *B* sau mai aproape de opusul lui *B*), atunci despre probabilitate, se știe că reprezintă frecvența probabilă de apariție a evenimentului *A*.

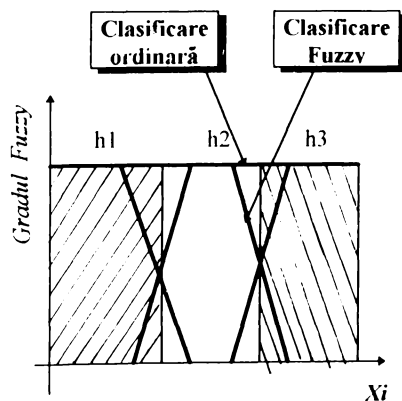


Figura C.1. - Prezentarea clasificării Fuzzy.

Bazate pe sistemele Fuzzy, au fost dezvoltate o serie de aplicații.

Pentru rezolvarea incertitudinilor inerente care apar în procesul de aşchiere, sistemul Fuzzy, oferă avantajul prevederii metodelor sistematice în descrierea relației dintre instrumentele ce trebuie folosite și indicarea diferitelor procedee aplicate, cu rată mare de succes.

Dintre variantele de aplicație a sistemelor Fuzzy, pentru monitorizarea proceselor de prelucrare prin aşchiere sunt potrivite metoda mediei C-fuzzy și a ecuațiilor liniare.

A. Metoda mediei C-Fuzzy, a fost propusă pentru prima dată de Bezdek (1981). Pentru luarea deciziilor, se folosesc doi operatori: fascicolul central, $V = \{v(j,i)\}$ și gradul Fuzzy, $U = \{u(k,j)\}$. În etapa de însușirea a informațiilor despre procesul de aşchiere, se minimizează fascicolul central și gradul Fuzzy, prin ecuația:

$$J(U, V, X) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u^v(k, j) \|x(k, i) - v(j, i)\|^v, \quad (C.2)$$

unde: v este un număr pozitiv, care reflectă configurația gradului Fuzzy, iar $\|\cdot\|$ reprezintă norma. Soluția probabilă este:

$$M = \{ (u(k, j), v(j, i)) \mid \sum_{j=1}^m u(k, j) = 1, \forall k = 1, 2, \dots, N \}, \quad (C.3)$$

Condiția necesară pentru rezolvarea optimizării ecuației (C.2), sunt date de ecuațiile:

$$u(k, j) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{\alpha=1}^m \left(\frac{\|x(k, i) - v(j, i)\|}{\|x(k, i) - v(\alpha, i)\|} \right)^{1/v}}, \quad (C.4)$$

$$v(j, i) = \frac{\sum_{k=1}^N u^v(k, j) \cdot x(k, i)}{\sum_{k=1}^N u^v(k, j)}, \quad (C.5)$$

Ecuațiile (C.4) și (C.5), nu pot fi rezolvate analitic, dar pot fi rezolvate prin iterație [31]. În faza de clasificare, bazată pe un nou experiment x și pe fascicolul V , se poate calcula gradul Fuzzy, pentru noul experiment, $u(k,j)$, $j = 1, 2, \dots, n$, folosind ecuația (C.5). Astfel, condiția procesului de aşchiere este găsită prin determinarea maximului gradului Fuzzy:

$$h_j^* = \operatorname{argmax}\{u(k,j)\}, \quad (C.6)$$

B. Metoda ecuației liniare Fuzzy, pornește de la relația dintre condițiile procesului de așchiere și indicatorii de monitorizare, care poate fi exprimată prin ecuația liniară:

$$\mathbf{r} = \mathbf{Q} \circ \mathbf{p}, \quad (\text{C.7})$$

unde, \mathbf{r} reprezintă *gradul de incertitudine Fuzzy*, al indicatorilor de monitorizare, (v. *subcapitolul 5.3.1.*); \mathbf{p} reprezintă *gradul Fuzzy* pentru condițiile procesului de așchiere analizat, iar \mathbf{Q} este funcția relațională, \circ fiind operatorul Fuzzy.

Rescriind *ecuația (C.7)*, în formă matricială, astfel:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix} \quad (\text{C.8})$$

sau, pentru fiecare linie:

$$r_i = q_{i1} \otimes p_1 \oplus q_{i2} \otimes p_2 \oplus \dots \oplus q_{in} \otimes p_n \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (\text{C.9})$$

unde: \otimes reprezintă *multiplicatorul Fuzzy*, iar \oplus reprezintă *însurătorul Fuzzy*.

Elementele q_{ij} reprezintă relațiile Fuzzy un raport între al i -lea indicator de monitorizare și a j -a condiție a procesului de așchiere.

Măsura în care se realizează însușirea informațiilor din proces, pentru o anumită mărime obținută experimental, poate fi determinată, prin "*frecvența de apariție*" a mărimii obținute prin măsurare, precum și prin "*puterii de susținere*".

Notăm cu $S_i = \{x(1, i), x(2, i), \dots, x(N, i)\}$, o proprietate ce conține al i -lea indicator de monitorizare al experimentului a cărui informații, tocmai au fost însușite, cu limitele:

$$x_{i, \max} = \max\{x(1, i), x(2, i), \dots, x(N, i)\}, \quad (\text{C.10})$$

$$x_{i, \min} = \min\{x(1, i), x(2, i), \dots, x(N, i)\}, \quad (\text{C.10})$$

Restrângând în continuare intervalul dintre $x_{i, \max}$ și $x_{i, \min}$ în L subintervale egale, (de obicei, în practică, numărul intervalelor este recomandat să fie cuprins între 10 și 15).

Dacă, fiecare subinterval este reprezentat de $v(i, k)$, $k = 1, 2, \dots, L$, definit prin relația:

$$v(i, k) = [x_{i, \min} + (k - 1) \cdot \Delta x, x_{i, \min} + k \cdot \Delta x], \quad (\text{C.11})$$

unde:

$$\Delta x = \frac{x_{i, \max} - x_{i, \min}}{L}, \quad (C.12)$$

atunci, q_{ij} poate fi reprezentat printr-o însușire a probei cu al L elemente:

$$q_{ij} = \{ v(i, k) / q(i, j, k), k = 1, 2, \dots, L \}, \quad (C.13)$$

unde a fost stabilit ulterior, *gradul Fuzzy*, determinat de frecvența de apariție și siguranța de apariție a aceleiași informații pentru același fenomen din proces:

$$f(i, j, k) = \frac{C_{ijk}}{C_{ik}}, \quad (C.14)$$

$$s(i, j, k) = \frac{C_{ijk}}{C_{ij}}, \quad (C.15)$$

unde C_{ijk} reprezintă numărul de experimentări cuprinse în S_i , care aparține condiției j a procesului de așchiere și sunt localizate în al k -lea subinterval; C_{ik} reprezintă numărul de mostre din S_i , localizate în subintervalul k , iar C_{ij} este numărul probelor din S_i , aferente condiției j a procesului de așchiere.

Combinând *relațiile* (C.14) cu (C.15), rezultă expresia *gradului Fuzzy*:

$$q(i, j, k) = \alpha f(i, j, k) + (1 - \alpha) \cdot s(i, j, k), \quad (C.16)$$

unde, α este o constantă, cu proprietatea: $0 \leq \alpha \leq 1$.

În faza de clasificare a unui nou experiment, luarea deciziei se face în două etape:

- în *prima etapă*, analizând fiecare element q_{ij} al funcției relaționale reprezentând câte o însușire a probei investigate, trebuie ales cel care va fi utilizat. Valoarea *relației Fuzzy*, notată cu Q^v , este determinată plecând de la valoarea înregistrată. Presupunând că valoarea celui de-al i -lea indicator de monitorizare este localizat în al k -lea subinterval, $v(i, k)$, atunci:

$$q_{ij}^v = q(i, j, k). \quad (C.17)$$

În această etapă, funcția relațională *Fuzzy* Q , dintre condiția procesului și indicatorul de monitorizare, este redusă la o matrice Q^v , de tipul $m \times n$.

- în a doua etapă, se rezolvă ecuația liniară Fuzzy. O soluție simplă este soluția *min-max*:

$$p_j = \max_i \min\{q_{ij}^v, r_i\}, \quad (C.18)$$

sau

$$p_j = \sum_{i=1}^m \min\{q_{ij}^v, r_i\}, \quad (C.19)$$

În final, similar cu metoda *mediei C-Fuzzy*, condiția estimată a procesului este aceea dată de maximul *gradului Fuzzy*:

$$h_j^* = \operatorname{argmax}\{p_j\}, \quad (C.20)$$

Metodele *sistemului Fuzzy* sunt bazate pe analiza egală a fiecărui subinterval, al fiecărui *indicator de monitorizare*. Este foarte importantă alegerea indicatorilor de monitorizare, care să fie suficient de sensibili la condițiile de desfășurare a procesului de așchiere, cu siguranță, în același mod de comportare.

Pentru a mări flexibilității posibilităților de clasificare se realizează o combinare a metodei *sistemului Fuzzy*, cu metoda *arborilor decizionali*, sau cu metoda *rețelelor neurale* [31].

Regulile de clasificare în sistemul *arborilor decizionali*, sunt caracterizate de condiții distincte, cum ar fi: "dacă $x_i > t_{iv}$, atunci h_j ". Clasificările false sau clasificările lipsă, există cel mai mult în jurul valorii "pivot" t_{iv} , bazate pe informații incomplete sau cu tendințe de realizare probabilă. Pentru a minimiza acest aspect, se realizează varianta combinată a definirii *gradului de incertitudine* a *arborilor decizionali*, adică metoda *arborilor de decizie Fuzzy*.

Într-un *arbore de decizie Fuzzy*, nodurile sunt descrise de *așezarea Fuzzy*:

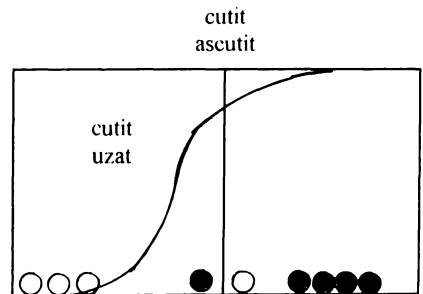


Figura C.2.- Ilustrarea arborelui decizional Fuzzy.

$$" \text{dacă } u(k, j) > u(k, \beta), \beta = 1, 2, \dots, n, \beta \neq j, \text{ atunci } h_j \text{ este } p_j ". \quad (C.21)$$

Astfel, în locul punctului *pivot*, un *nod* este asimilat cu un *grad Fuzzy* și/sau cu un *fascicul Fuzzy*.

În faza însușirii informațiilor culese, *gradul Fuzzy* poate fi determinat folosind metoda ecuațiilor liniare Fuzzy. Fascicolul central, poate fi determinat folosind metoda *mediei C-Fuzzy*, care alternativ, poate determina gradul de incertitudine *Fuzzy*.

Gradul Fuzzy și fascicolul central, reprezintă softul de așchiere, aspect reflectat schematic în *figura C.2*.

În faza clasificării, tot arborele de decizie Fuzzy trebuie cercetat pentru a se găsi *gradul Fuzzy* a fiecărei condiții a procesului unei noi mostre extrase din experiment.

De asemenea, condiția procesului de așchiere a noii mostre, poate fi determinată cu *ecuația (C.6)*.

Condițiile înregistrate pe perioada prelucrărilor mecanice sunt foarte diferite și dependente de o multitudine de factori, aflați într-o continuă modificare. Astfel, devine foarte dificil să se realizeze foarte exact o *monitorizare automată*. Pentru a se creea, totuși, condițiile unei comportări similare în condiții similare de exploatare, este esențială rezolvarea celor 3 probleme de bază:

- sesizarea fermă exactă și la timp a informației caracteristice din proces;
- procesarea semnalelor culese, cât mai fidel;
- clasificarea rezultatelor, pentru o solidă bază în luarea ulterioară a deciziilor.

Culegerea semnalelor, pe perioada prelucrărilor prin așchiere cu ajutorul **TFPC**, asigură o acoperire bună a caracterizării procesului de aproximativ (80 ... 82) %. Aspectul de bază rămâne acela de a garanta stabilitatea în comportament a tractoarelor, atât în condițiile solicitărilor dinamice cât și quasistatice. Celelalte aspecte revin aparatului electronic de prelucrare a semnalului și calculatorului de proces.

Algoritmul prezentat și aplicat prelucrărilor prin așchiere, cu folosirea *sistemelor Fuzzy*, aduce un plus de informații pentru asigurarea unor certitudini ale metodelor folosite, tocmai prin cunoașterea cât mai exactă a gradului de incertitudine, pornind de la fracțiuni și ajungând la o valoare caracteristică de ansamblu. Astfel, se pot asigura, sistemului de automatizare, a trei caracteristici importante pentru eficiența aplicării acestuia:

- rata de succes a metodei folosite;
- sensibilitatea la modificările din proces;
- robustețea sistemului de automatizare.