

UNIVERSITATEA «POLITEHNICA» TIMIȘOARA

FACULTATEA DE MECANICĂ

ing. Dinu-Valentin GUBENCU

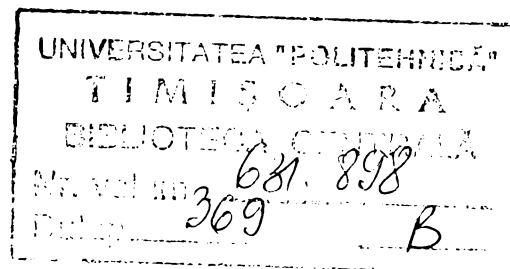
**ÎMBUNĂTĂȚIREA PERFORMANȚELOR
SISTEMELOR PNEUMATICE DE
CONTROL ACTIV ÎN PROCESELE DE
RECTIFICARE**

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător științific:

prof. dr. ing. Alexandru NICHICI

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA



Timișoara

2001

CUPRINS

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCERE..... | 7 |
| 2. STADIUL ACTUAL AL CONTROLULUI ACTIV PNEUMATIC ÎN PROCESELE DE RECTIFICARE | 13 |
| 2.1. PRELUCRAREA PRIN RECTIFICARE ÎN CONSTRUCȚIA DE MAȘINI | 13 |
| 2.1.1. <i>Analiza sistemică a procesului de rectificare</i> | <i>13</i> |
| 2.1.2. <i>Tendențe în evoluția proceselor de prelucrare prin rectificare.....</i> | <i>16</i> |
| 2.2. CONTROLUL ACTIV ÎN CONSTRUCȚIA DE MAȘINI | 21 |
| 2.2.1. <i>Efecte tehnico-economice ale introducerii controlului activ pe mașini-unelte.....</i> | <i>21</i> |
| 2.2.2. <i>Schema-bloc a sistemelor de control activ.....</i> | <i>24</i> |
| 2.2.3. <i>Clasificarea metodelor și procedeele de control activ.....</i> | <i>26</i> |
| 2.3. METODA PNEUMATICĂ DE MĂSURARE..... | 29 |
| 2.3.1. <i>Analiza metodei pneumatice de măsurare</i> | <i>29</i> |
| 2.3.2. <i>Clasificarea procedeele pneumatice de măsurare</i> | <i>30</i> |
| 2.3.3. <i>Principiul de măsurare a presiunii statice.....</i> | <i>30</i> |
| 2.4. ELEMENTE STRUCTURALE ALE SISTEMELOR PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV | 36 |
| 2.4.1. <i>Construcția captorilor pneumatici.....</i> | <i>36</i> |
| 2.4.1.1. Elemente de contactare..... | 36 |
| 2.4.1.2. Sisteme de ghidare a palpatoarelor și de realizare a forței de măsurare | 40 |
| 2.4.1.3. Variante constructive de senzori pneumatici | 41 |
| 2.4.1.4. Elemente de amortizare a vibrațiilor | 43 |
| 2.4.1.5. Elemente de protecție | 44 |
| 2.4.2. <i>Unități de acționare</i> | <i>44</i> |
| 2.4.3. <i>Unități electronice de achiziție, prelucrare, afișare și comandă.....</i> | <i>45</i> |
| 2.5. SISTEME PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV AL PRECIZIEI DIMENSIONALE ÎN PROCESELE DE RECTIFICARE | 45 |

| | |
|---|------------|
| 2.5.1. <i>Sisteme pneumatice de control activ la rectificarea suprafețelor cilindrice continue exterioare și interioare</i> | 47 |
| 2.5.2. <i>Sisteme pneumatice de control activ la rectificarea suprafețelor cilindrice discontinue și a suprafețelor plane</i> | 51 |
| 2.6. SISTEME PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV AL PRECIZIEI FORMEI GEOMETRICE A SUPRAFETELOR | 53 |
| 2.7. SISTEME PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV AL PRECIZIEI POZIȚIEI RECIPROCE A SUPRAFETELOR | 55 |
| 2.8. SISTEME PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV AL RUGOZITĂȚII SUPRAFETELOR | 56 |
| 2.9. INTEGRAREA TRUCTOARELOR MAGNETOFLUIDICE ÎN SISTEMELE PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV | 58 |
| 2.10. PERSPECTIVE ALE CONTROLULUI ACTIV PNEUMATIC ÎN PROCESELE DE RECTIFICARE ... | 61 |
| 2.11. CONCLUZII..... | 62 |
| | |
| 3. ANALIZA ERORILOR DE MĂSURARE SPECIFICE SISTEMELOR PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV | 65 |
| 3.1. SURSE DE ERORI LA PRELUCRAREA CU CONTROL ACTIV..... | 65 |
| 3.2. ERORI DE CAPTARE LA MĂSURAREA FĂRĂ CONTACT | 68 |
| 3.2.1. <i>Eroarea de captare cauzată de curbura suprafeței de măsurat</i> | 68 |
| 3.2.2. <i>Eroarea de captare cauzată de deplasarea duzei de măsurare în plan diametral pe direcția avansului de pătrundere</i> | 74 |
| 3.3. ERORI DE CAPTARE LA MĂSURAREA CU CONTACT | 79 |
| 3.3.1. <i>Eroarea de captare datorată deformațiilor de contact</i> | 79 |
| 3.3.2. <i>Eroarea de captare cauzată de deplasarea palpatorului în plan diametral pe direcția avansului de pătrundere</i> | 86 |
| 3.4. ANALIZA COMPARATIVĂ A ERORILOR DATORATE DEPLASĂRII AXEI DE CAPTARE ÎN PLAN DIAMETRAL, LA MĂSURAREA PNEUMATICĂ CU ȘI FĂRĂ CONTACT | 93 |
| 3.5. PREZENTAREA PROGRAMULUI DE CALCUL REALIZAT..... | 96 |
| 3.6. CONCLUZII..... | 99 |
| | |
| 4. MODELAREA MATEMATICĂ A CONTROLULUI PNEUMATIC AL DIMENSIUNILOR | 101 |
| 4.1. FACTORI DE INFLUENȚĂ ȘI INDICATORI DE PERFORMANȚĂ LA MODELAREA CONTROLULUI PNEUMATIC AL DIMENSIUNILOR | 101 |

| | |
|---|------------|
| 4.2. MODELAREA ANALITICĂ A SISTEMULUI DE CONTROL PNEUMO-MAGNETOFLUIDIC | 106 |
| 4.2.1. <i>Modelarea sistemului pneumatic</i> | 106 |
| 4.2.2. <i>Modelarea sistemului magnetofluidic</i> | 112 |
| 4.3. MODELAREA EXPERIMENTALĂ A SISTEMULUI PNEUMO-MAGNETOFLUIDIC..... | 117 |
| 4.3.1. <i>Prezentarea instalației experimentale</i> | 117 |
| 4.3.2. <i>Stabilirea prin metoda analizei regresionale a funcției de transfer a sistemelor pneumo-magnetofluidice cu duză ejectoare</i> | 121 |
| 4.3.2.1. <i>Conceperea și realizarea experimentelor</i> | 122 |
| 4.3.2.2. <i>Prelucrarea datelor și concluzii</i> | 125 |
| 4.3.3. <i>Modelarea empirică a sensibilității sistemului de control activ pneumo- magnetofluidic cu duză ejectoare, prin experiment factorial complet</i> | 126 |
| 4.3.3.1. <i>Proiectarea și realizarea experimentului</i> | 126 |
| 4.3.3.2. <i>Explicitarea modelului matematic</i> | 129 |
| 4.3.3.3. <i>Analiza dispersională a modelului</i> | 132 |
| 4.3.3.4. <i>Interpretarea rezultatelor modelării</i> | 133 |
| | |
| 5. VERIFICAREA PRECIZIEI DE OPRIRE LA COTĂ A UNUI SISTEM DE CONTROL ACTIV PNEUMO-MAGNETOFLUIDIC..... | 138 |
| 5.1. INTRODUCERE | 138 |
| 5.2. PREZENTAREA STANDULUI EXPERIMENTAL..... | 140 |
| 5.3. CONEXIUNILE MODULELOR COMPONENTE ALE STANDULUI EXPERIMENTAL | 146 |
| 5.4. STRUCTURA SISTEMULUI DE REGLARE NUMERICĂ | 149 |
| 5.5. STRUCTURA PROGRAMULUI UTILIZAT PENTRU COMANDA STANDULUI EXPERIMENTAL | 151 |
| 5.6. PREZENTAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE..... | 153 |
| | |
| 6. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ PRIN CONTROL POSTOPERAȚIONAL A UNOR ABATERI DE FORMĂ GEOMETRICĂ ALE SUPRAFETELOR CILINDRICE EXTERIOARE | 160 |
| 6.1. UTILIZAREA STANDULUI EXPERIMENTAL LA CONTROLUL POSTOPERAȚIONAL AL SUPRAFETELOR CILINDRICE EXTERIOARE | 160 |
| 6.2. DETERMINAREA ABATERII DE LA CIRCULARITATE..... | 161 |
| 6.3. DETERMINAREA ABATERII DE LA CILINDRICITATE..... | 163 |
| 6.4. CONCLUZII | 168 |

| | |
|--|------------|
| 7. CONCLUZII | 169 |
| 7.1. CONCLUZII FINALE..... | 169 |
| 7.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE..... | 171 |
| BIBLIOGRAFIE..... | 174 |
| ANEXA 1. CUANTIFICAREA UNOR ERORI DE MĂSURARE SPECIFICE SISTEMELOR PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV..... | 181 |
| ANEXA 2. PROGRAM-SURSĂ DE EVALUAREA ERORILOR DE MĂSURARE SPECIFICE SISTEMELOR PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV..... | 191 |
| ANEXA 3. PROGRAM-SURSĂ DE REGLARE NUMERICĂ ȘI ACHIZIȚIE DE DATE ÎN FIȘIER | 216 |
| ANEXA 4. PROGRAME-SURSĂ DE DETERMINARE A ABATERILOR DE LA CIRCULARUTATE, DE LA CILINDRICITATE ȘI A BĂȚĂII RADIALE | 219 |

1.

INTRODUCERE

Contextul industrial actual se caracterizează prin existența unor mutații complexe în tehnologiile de realizare a diverselor produse, determinate de continua creștere a cerințelor relative la funcționalitatea și nivelul tehnic calitativ al acestora. Acestor tendințe li se subordonează și tehnologiile de prelucrare prin rectificare, cu atât mai mult cu cât, datorită locului ocupat în itinerarul tehnologic de fabricație, de operație finală, contribuie decisiv la precizia pieselor uzinate. Este logic deci, interesul permanent manifestat de numeroși cercetători asupra procesului de rectificare ([F1], [I2], [T3], [V1], [W1], [X3]).

Precizia obținută în urma rectificării este legată intrinsec și de performanțele metodelor și sistemelor de control. Prin consecuție, s-a menținut un interes constant asupra sistemelor de control activ, care realizând comanda procesului pe baza măsurării asigură obținerea unei productivități sporite a prelucrării și transformă controlul calității în asigurarea calității. O categorie importantă a sistemelor de control activ o constituie cea a sistemelor cu senzori pneumatici, utilizate îndeosebi datorită avantajelor pe care le prezintă în cazul măsurărilor fără contact. Cercetările care implică aceste sisteme pneumatice s-au amplificat odată cu dezvoltarea traductoarelor magnetofluidice ([A2], [D16], [D17], [G8], [P2], [P5], [X8], [X9]), care permit obținerea unui semnal electric analogic la ieșire, ce poate fi digitalizat.

Pe de altă parte, dezvoltarea sistemelor de control activ este legată de cea a tuturor sistemelor de comandă și reglare automată, provocată de schimbările determinate de expansiunea extraordinară a microprocesoarelor. Acestea au preluat integral sarcina reglării, având performanțe net superioare față de cazul utilizării

regulatele analogice, datorate puterii lor de calcul și costului scăzut. Conceperea microcalculatoarelor personale PC ca mijloace deschise, ușor de completat cu plăci de achiziție de date, a permis integrarea lor în conducerea sistemelor de rectificare, precum și proiectarea, dezvoltarea și implementarea diferiților algoritmi de reglare dedicați proceselor reale ([B2], [L1], [S1], [S2]).

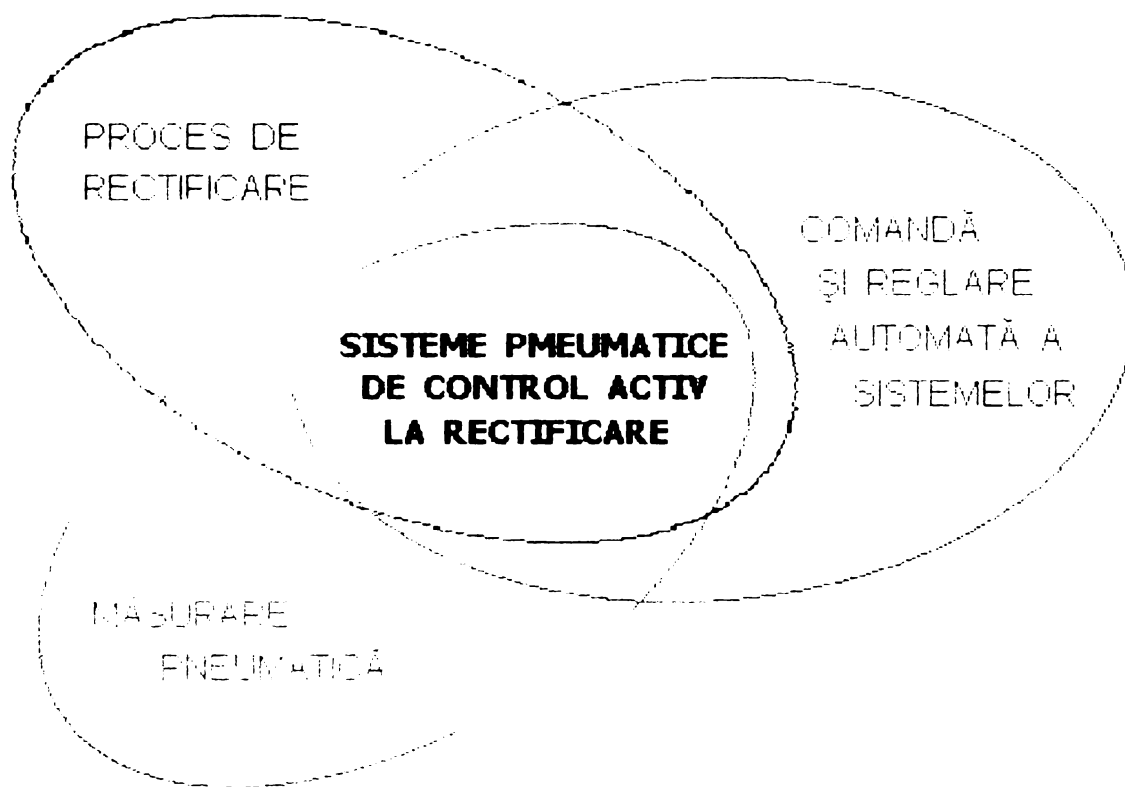


Figura 1.1 Domeniul de cercetare al tezei de doctorat

Ținând cont de cele expuse anterior, domeniul de cercetare abordat în cadrul prezentei lucrări este delimitat de interferența a trei domenii vaste (*figura 1.1*), situate fiecare în centrul preocupărilor actuale ale unui număr mare de cercetători. Constituind ele însele obiecte de cercetare predilecte, cele trei domenii conferă actualitate subiectului abordat.

Obiectivele tezei de doctorat au fost stabilite în urma inventarierii principalelor direcții și posibilități de îmbunătățire a performanțelor sistemelor pneumatice de control activ în procesele de rectificare *SPCAR*, prezentate în *figura 1.2*. Dintre direcțiile legate de captarea măsurandului, s-au constituit în obiective următoarele:

- ❖ cuantificarea unor categorii de erori sistematice, specifice controlului activ pneumatic, evaluate ca primă etapă a analizei decizionale de neglijare, diminuare sau compensare a acestora;

- ❖ modelarea analitică și experimentală a unor indicatori de performanță ai sistemului pneumatic de control activ.

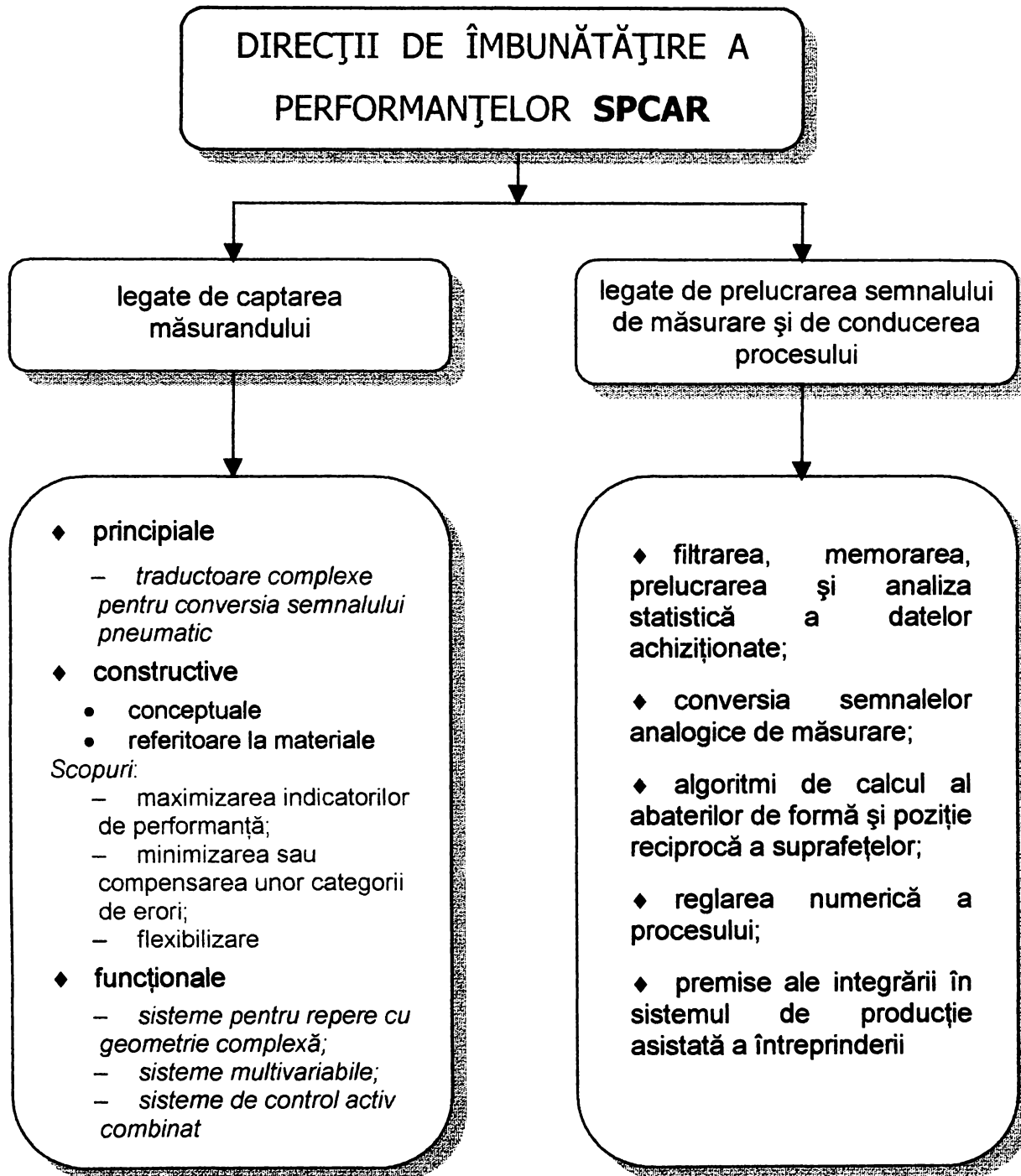


Figura 1.2 Modalități de îmbunătățire a performanțelor SPCAR

Din analiza direcțiilor legate de prelucrarea semnalului de măsurare și de conducerea procesului, au rezultat următoarele obiective:

- ❖ implementarea traductoarelor magnetofluidice într-un sistem pneumatic de control activ și simularea conducerii prin reglare numerică a procesului de rectificare;
- ❖ conversia analogic-numerică a semnalelor de măsurare;

- ❖ conversia analogic-numerică a semnalelor de măsurare;
- ❖ memorarea, prelucrarea și reprezentarea grafică a datelor achiziționate;
- ❖ verificarea experimentală a preciziei de oprire la cotă a unui sistem pneumo-magnetofluidic de control activ;
- ❖ stabilirea algoritmilor pentru controlul postoperațional al abaterilor de formă geometrică ale suprafețelor cilindrice exterioare.

Lucrarea este structurată în șapte capitole, primul dintre acestea având un caracter introductiv și expunând domeniul, conținutul și obiectivele abordate în teza de doctorat. Obiectivele prioritare ale tezei sunt evaluarea unor erori sistematice specifice controlului activ pneumatic, modelarea matematică a sensibilității unui sistem de control activ pneumo-magnetofluidic și utilizarea acestui sistem pentru simularea conducerii prin reglare numerică a procesului de rectificare

Capitolul al 2-lea prezintă o sinteză bibliografică exhaustivă, referitoare la domeniul cercetat. El debutează cu o viziune sistemică originală a procesului de rectificare cu control activ și investighează principalele direcții și tendințe în evoluția acestuia. Capitolul continuă cu analiza metodelor și procedeele de control activ, a principalelor elemente structurale și a sistemelor pneumatice în integralitatea lor, încheindu-se prin avansarea unor concluzii preliminare referitoare la soluțiile principiale și constructive ce conduc la îmbunătățirea performanțelor acestor sisteme.

Capitolul al 3-lea analizează și cuantifică unele erori sistematice generate de diverse surse, specifice măsurării pneumatice cu și fără contact. Procedurile de calcul realizate au fost integrate într-un program general, de cuantificare și comparare a diverselor categorii de erori, ce permite luarea deciziilor cu privire la neglijarea, diminuarea sau compensarea lor.

Modelarea matematică a unui sistem cu traductor pneumo-magnetofluidic, având un subansamblu de captare cu duză ejectoare este prezentată în capitolul al 4-lea. După analiza și gruparea tuturor factorilor de influență și a indicatorilor de performanță, modelarea analitică și experimentală s-a concentrat asupra unui singur indicator – sensibilitatea sistemului de control – considerat esențial în obținerea unei precizii dimensionale ridicate la prelucrarea prin rectificare. Modelarea empirică s-a realizat prin experiment factorial complet și permite, pe baza curbelor de nivel constant obținute, alegerea unor valori concrete ale factorilor de influență considerați, care să determine o anumită valoare necesară, impusă a sensibilității sistemului de control.

Capitolul al 5-lea prezintă rezultatele obținute la verificarea preciziei de oprire la cotă a unui sistem de control activ pneumo-magnetofluidic. Sunt prezentate standul experimental asistat de calculator folosit pentru simularea controlului activ și principiile algoritmilor de reglare numerică utilizați.

Controlul postoperațional al abaterilor de la forma geometrică a suprafețelor face obiectul capitolului al 6-lea. Sunt prezentate facilitățile oferite de programele în limbajul C++, realizate pentru determinarea abaterilor de la circularitate și de la cilindricitate a suprafețelor cilindrice exterioare.

Capitolul al 7-lea este consacrat concluziilor finale, evidențierii contribuțiilor originale ale autorului, precum și enumerării perspectivelor și a direcțiilor de cercetare rămase deschise. În acest mod se atestă realizarea integrală a tuturor obiectivelor propuse.

Teza de doctorat se extinde pe un număr de 232 de pagini, cuprinzând 27 de tabele, 131 de figuri, precum și 4 anexe, iar lista bibliografică conține 109 titluri.

Autorul îi adresează profunđa sa recunoștință domnului prof. dr. ing. Aurel Dreucean, sub a cărui îndrumare competentă și generoasă a făcut primele cercetări în domeniul controlului activ pneumatic și consideră prezenta teză de doctorat ca o încercare de continuare a cercetărilor Domniei sale. Competența, rigurozitatea și corectitudinea care îl caracterizează au constituit un model pe care autorul s-a străduit să-l urmeze de-a lungul întregii activități didactice și de cercetare. Lucrarea de față nu ar fi fost posibilă fără sfaturile și colaborarea domnului profesor pe parcursul realizării sale.

Autorul mulțumește în mod deosebit conducătorului științific, domnul prof. dr. ing. Alexandru Nichici, pentru sfaturile competente și ajutorul acordat, în special în momentele mai dificile survenite pe parcursul elaborării tezei de doctorat. Îndrumările Domniei sale au constituit repere importante în asigurarea înlănțuirii logice și coerenței acestei lucrări, precum și în însușirea și abordarea unor strategii de experimentare și modelare moderne.

Capitolele al 5-lea și al 6-lea sunt rezultatul unei colaborări științifice și susținerii unor colegi cărora țin să le mulțumesc în mod deosebit: domnului prof. dr. ing. Titus Slavici, pentru încurajările permanente și împărtășirea experienței sale în domeniul conducerii cu calculatorul a sistemelor tehnologice; domnului conf. dr. ing. Antoniu Reviczky–Levay, pentru ajutorul dat la interfașarea modulelor componente

ale instalației experimentale. Pentru suportul acordat în materializarea standului experimental, multe mulțumiri firmei *Electrostar Job SRL*.

Determinările experimentale realizate au beneficiat și de suportul colectivului *Laboratorului de Lichide Magnetice* din cadrul *Centrului de Cercetări Tehnice Fundamentale și Avansate* al Filialei Timișoara a *Academiei Române*.

Nu în ultimul rând, autorul dorește să le mulțumească tuturor colegilor de la *Catedra de Tehnologie Mecanică*, care l-au sprijinit, direct sau indirect, în realizarea acestei lucrări.

2.

STADIUL ACTUAL AL CONTROLULUI ACTIV PNEUMATIC ÎN PROCESELE DE RECTIFICARE

2.1. Prelucrarea prin rectificare în construcția de mașini

2.1.1. Analiza sistemică a procesului de rectificare

Deși își are originile în timpuri străvechi, prelucrarea abrazivă continuă să joace un rol important și astăzi, fiind în cele mai multe cazuri operația finală în itinerarul tehnologic de realizare a pieselor de mare precizie. Debutul tehnologiilor moderne de abrazare este considerat în secolul al XIX-lea, odată cu realizarea mașinilor de rectificat și a abrazivilor sintetici.

Precizia dimensională ridicată și rugozitatea mică a suprafețelor rectificate se datorează secțiunilor de așchie foarte mici, care determină concentrarea eforturilor de așchiere și permit uzinarea materialelor cu prelucrabilitate redusă. O altă caracteristică ce individualizează prelucrarea prin rectificare de alte procedee de prelucrare prin așchiere este fenomenul de autoascuțire a corpului abraziv, corp realizat prin înglobarea într-o masă de liant a unor particule abrazive a căror muchii așchietoare au orientare și geometrie nedefinită. Aceste caracteristici constituie avantajele cheie ce trebuie luate în considerare în evaluarea oricăror posibilități de dezvoltare ulterioare.

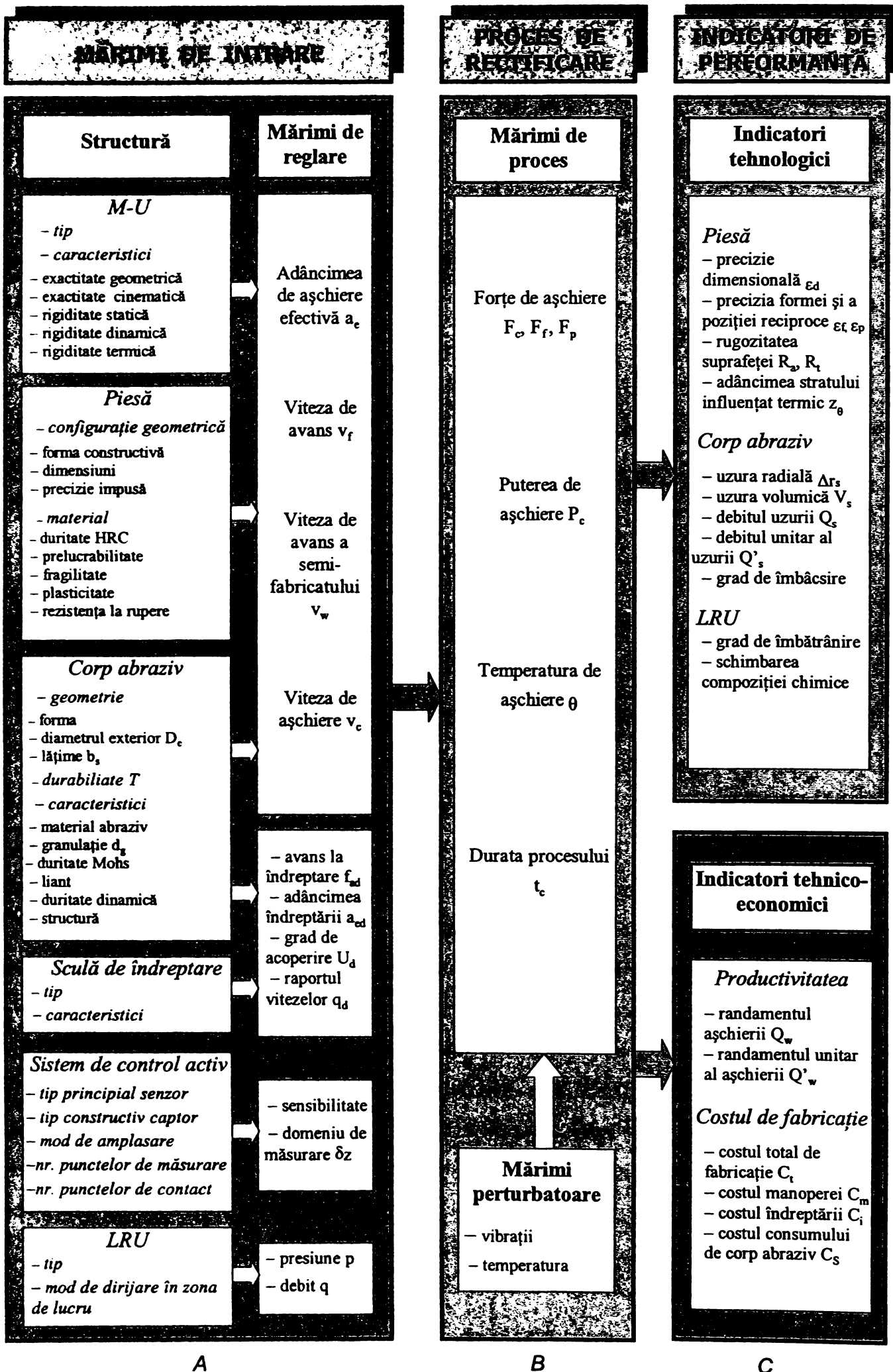


Figura 2.1 Prelucrarea prin rectificare ca sistem de acțiune tehnologică

În scopul analizării acestor posibilități de evoluție a procesului de rectificare este util un studiu sistemic al acestuia. Procedul de prelucrare prin rectificare presupune desfășurarea dirijată sau controlată a unor procese fenomenologice care conduc la transformări tehnologice specifice. Considerând procesul de rectificare ca un sistem de acțiune tehnologică (*figura 2.1*), acesta poate fi caracterizat structural prin trei mari categorii de mărimi ([K2], [L3], [M1], [N1]):

- mărimi de intrare, care reprezintă factori ce acționează asupra sistemului;
- mărimi de proces, care determină desfășurarea proceselor ce conduc la transformări tehnologice;
- mărimi de ieșire, care reprezintă indicatorii tehnologici de performanță ai procesului de rectificare.

Setul de mărimi de intrare (*figura 2.1*, blocul A), care acționează în sensul inițierii proceselor ce determină obținerea unor transformări tehnologice, poate fi împărțit în două categorii:

- mărimi caracteristice structurii propriu-zise, care sunt cvasirigide ([K1]), comune uneia sau mai multor teme impuse, denumite uzual variabile de stare;
- mărimi de reglare, ale căror intervale de variație sunt determinate de mărimile precedente.

Prima categorie cuprinde și factori calitativi, factorii cantitativi din ambele categorii fiind exprimați prin intermediul unor mărimi fizice ce stabilesc relații matematice de tip dependență cu valorile mărimilor de proces și indicatorilor de performanță.

Transformările tehnologice efective sunt apreciate prin intermediul unor indicatori de performanță tehnologici, care se referă la piesa prelucrată: precizia dimensională, a formei și poziției reciproce a suprafețelor cuantificată prin erorile ε_d , ε_f , ε_p ; rugozitatea suprafeței apreciată cantitativ prin valorile R_a , R_z , R_t ; adâncimea de stratului influențat termic z_θ . Deoarece o anumită transformare se poate produce cu viteze și consumuri energetice diferite, deci implicit cu costuri diferite în funcție de condițiile de desfășurare, se consideră și indicatorii tehnico–economici, aceștia nereprezentând scopuri ale procedului de prelucrare, ci doar criterii de decizie ([L3]). Astfel productivitatea, respectiv costul de fabricație, sunt cuantificate prin mărimile prezentate în *figura 2.1*, blocul C.

În același timp, pe parcursul desfășurării proceselor în sistemul tehnologic apar, pe lângă transformările tehnologice ale piesei, și transformări ale altor

componente cum ar fi corpul abraziv ([G3]) sau lichidul de răcire-ungere LRU ([G4]). Aceste transformări neimpuse sunt caracterizate prin indicatori tehnologici de performanță, calitativi sau cantitativi (*figura 2.1*, blocul C).

Indicatorii de performanță depind direct, explicit de mărimile de intrare, iar în unele cazuri, și de valorile mărimilor de proces, care reprezintă la rândul lor variabile independente în raport cu factorii de intrare. Deci, pe baza cunoașterii exacte a interdependențelor dintre aceste mărimi, se poate acționa asupra sistemului tehnologic în sensul obținerii unor valori impuse ale indicatorilor tehnologici și/sau tehnico-economici. Însă, datorită faptului că sistemele tehnologice sunt complexe, difuze și slab organizate, aceste dependențe nu pot fi întotdeauna pe deplin cunoscute și cuantificate matematic ([N1]).

2.1.2. Tendințe în evoluția proceselor de prelucrare prin rectificare

Ca orice proces de prelucrare, și procesul de rectificare se supune tendinței permanente de creștere a cerințelor privind calitatea pieselor realizate, concomitent cu creșterea productivității, micșorarea costurilor, obținerea unor parametri de uzare cât mai favorabili.

În scopul realizării acestor deziderate una din soluțiile adoptate a urmărit creșterea nivelului tehnic al metodelor și mijloacelor de măsurare și control. Astfel, raționale au devenit acele mijloace și metode care asigură construirea calității suprafeței prelucrate, adică dirijarea procesului de obținere a ei. Prin urmare, mai ales la producții de serie și masă, s-au introdus și dezvoltat sisteme de control activ ([D14], [G5], [S4]).

Sistemele de control activ sunt sisteme de reglare automată, care pe baza măsurării uneia sau mai multor mărimi variabile ale procesului de prelucrare, acționează asupra mașinii–unelte în timpul procesului tehnologic, modificând desfășurarea acestuia în scopul obținerii în final a valorilor impuse pentru unul sau mai mulți indicatori ([G5], [O3]).

Capacitatea sistemelor de control activ al proceselor de rectificare a evoluat în timp, concomitent cu evoluția mașinilor–unelte și cu parcurgerea treptelor succesive de automatizare. Pentru a putea aprecia sensul evoluției acestor sisteme de control activ, este deci utilă o analiză a principalelor tendințe de dezvoltare și domenii de cercetare ale procesului de rectificare ([G6], [I2]). Această analiză, având ca țintă îmbunătățirea indicatorilor de performanță prezentați în *figura 2.1*, ia în considerare

cvasitotalitatea mărimilor de intrare ce determină desfășurarea și finalitatea procesului.

a. *Direcțiile de evoluție legate de corpul abraziv* presupun realizarea și utilizarea unor discuri cu proprietăți deosebite cum ar fi ([G6], [I2]):

– discuri abrazive cu granule ultrafine (10...20 nm), realizate utilizând depunerea prin electroforeză;

– discuri superabrazive cu pulberi diamantate;

– discuri cu pudră diamantată, obținută din filme de diamant sintetizate utilizând depunere prin vaporizare chimică.

b. *Direcțiile de evoluție legate de procesul de îndreptare* implică ([G3], [I2], [K2]):

– rectificarea cu îndreptarea electrolitică *in process* a discurilor diamantate;

– introducerea unor sisteme de monitorizare avansată a procesului de rectificare, care pe baza măsurării unor parametri de proces ca puterea consumată sau amplitudinea vibrațiilor comandă procesul de îndreptare a discurilor abrazive.

c. *Direcțiile de evoluție legate de răcire–ungere* presupun ([G4], [I2], [K2]):

– utilizarea lichidelor de răcire-ungere biodegradabile;

– ungerea și răcirea cu spray-uri, jeturi de gaz lichefiat de mare viteză;

– rectificarea fără ungere, cu protejarea operatorului și a mașinii-unelte.

d. *Direcțiile de evoluție legate de alegerea mărimilor de reglare* se referă la ([G6], [I2], [K1], [K2], [T3], [V1], [W1]):

– optimizarea cu ajutorul calculatorului a unor funcții multiobiectiv cu respectarea constrângerilor specifice operațiilor de degroșare, respectiv finisare;

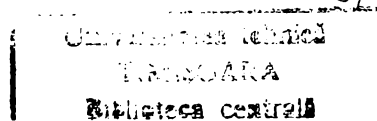
– optimizarea procesului de rectificare prin realizarea unor sisteme expert ce utilizează baze de date și de cunoștințe, incluzând rezultatele și concluziile cercetării științifice și experienței industriale;

– utilizarea simulărilor pe calculator a proceselor de rectificare pentru analiza zonei de contact corp abraziv–piesă cu ajutorul dinamicii moleculare;

– rectificarea intensivă, cu randamente unitare $Q_w' = 10...20 \text{ mm}^3/\text{mms}$;

– rectificarea rapidă, cu viteze de așchiere $v_c = 150...250 \text{ m/s}$ și ultrarapidă, cu $v_c > 250 \text{ m/s}$;

– rectificarea de înaltă performanță, cu viteze și adâncimi de așchiere foarte mari, atingându-se randamente de așchiere unitare $Q_w' = 100 \text{ mm}^3/\text{mms}$, comparabile valorilor obținute la strunjirea de degroșare.



637-898
369B

Rectificările rapide și/sau intensive presupun utilizarea discurilor diamantate sau cu nitrură cubică de bor, presiuni și debite ridicate ale LRU și măsuri speciale de construcție a mașinilor–unelte.

e. Direcțiile de evoluție legate de mașina-unealtă și de integrarea activităților de producție ([D11], [F1], [O2], [X13], [X14], [X17], [X18]):

Ținând cont de dinamica pieței, care cere produse noi sau modele noi ale aceluiași produs la intervale de timp tot mai scurte, concomitent cu existența concurenței între numeroși producători, s-a înregistrat continuu o tendință de reducere a loturilor și a seriilor de fabricație ale diverselor piese.

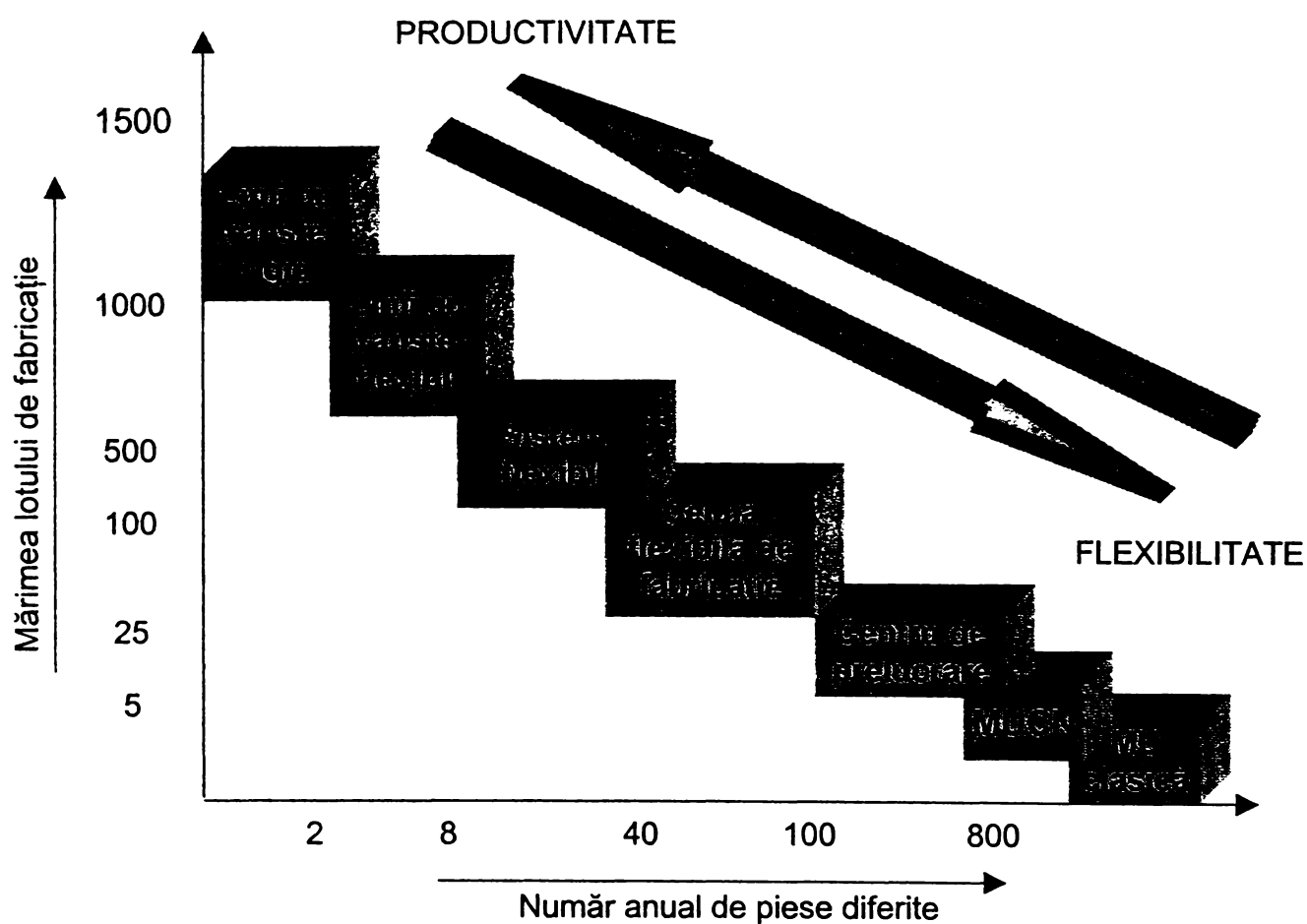


Figura 2.2 Competitivitatea sistemelor de prelucrări mecanice

Astfel, pe lângă cerințele de calitate, de productivitate ridicată și deci, de cost competitiv, se impune și o flexibilitate deosebită în fabricație, adică eforturi cât mai reduse pentru pregătire, reglare în cazul pieselor și procedeele de fabricație diferite. Țelul urmărit se constituie în obținerea unei eficiențe bune în condiții de flexibilitate acceptabile, ceea ce implică identificarea unei soluții de compromis în alegerea sistemului tehnologic de fabricație între două extreme și anume, fabricație în loturi

mici cu productivitate redusă și producție funcțională flexibilă și, fabricație în loturi mari pe linii automatizate cu transport rigid sau flexibil (figura 2.2, [D11], [O1], [O2]).

Armonizarea celor două tendințe divergente se poate obține prin automatizarea comenzilor și ciclurilor de prelucrare, a alimentării cu semifabricate și scule, precum și a sistemelor de măsurare și control, concomitent cu asigurarea posibilității de a transfera date de toate tipurile prin interfețe și rețele.

Acestor tendințe generale se supun și mașinile de rectificat, cu atât mai mult cu cât, în pofida dezvoltării considerabile a tehnologiilor, utilizarea acestora presupune operatori de înaltă calificare și experiență. În scopul reducerii necesității intervenției umane, s-a trecut la etapa automatizării inteligente, deci având ca finalitate realizarea unor *sisteme autonome de rectificare* (figura 2.3, [12]). Sistemul se bazează pe o strategie de minimizare a ciclului de prelucrare cu satisfacerea constrângerilor impuse de calitatea pieselor și de mărimile de proces. Această strategie realizează o conducere cu calculatorul a ciclului de rectificare, sistemul trebuind să atingă punctul de operare optim ca răspuns la datele senzoriale. Variabilele independente reglate de blocul "Comanda axelor" sunt viteza de avans radial $v_f(t)$ și viteza de avans circular a piesei v_w .

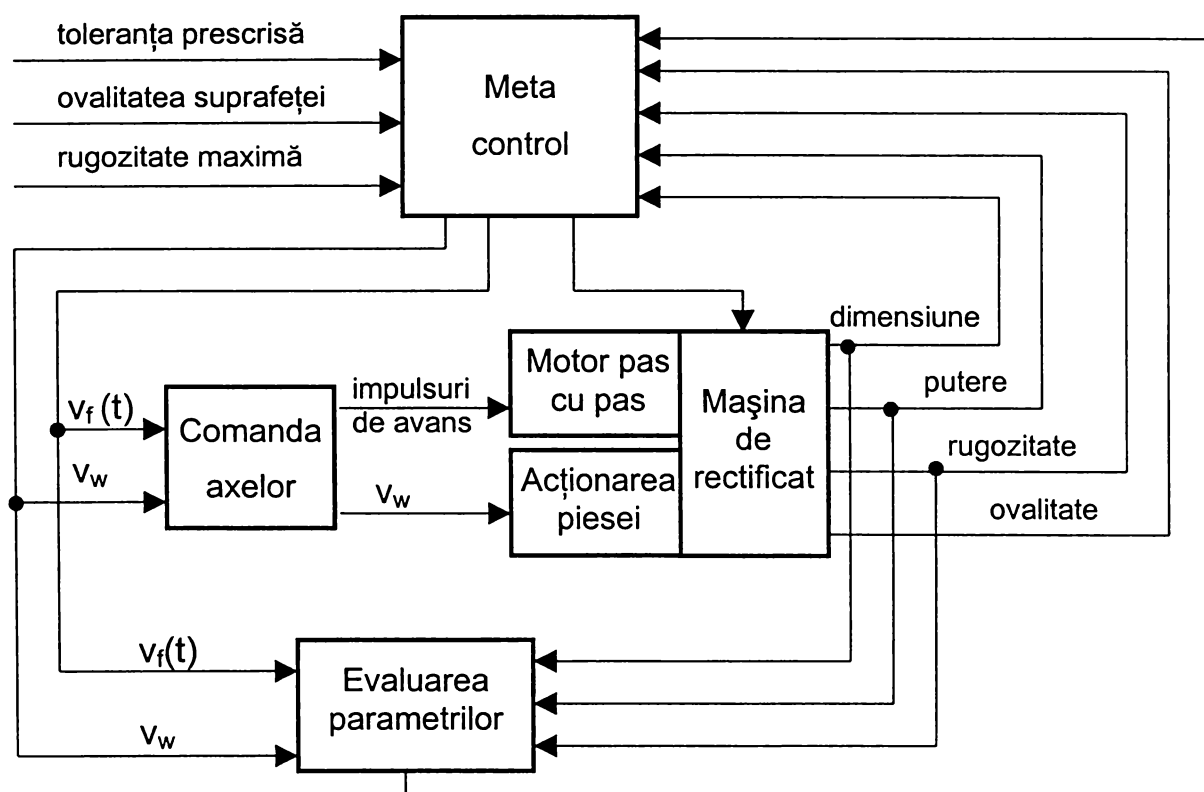


Figura 2.3 Sistem autonom de rectificare cilindrică cu avans de pătrundere

Funcțiile obiectiv pentru reglarea acestor variabile sunt selectate de blocul "Meta Control", care constituie creierul întregului sistem. Acest bloc ajustează continuu mărimile de reglare și identifică, de asemenea, combinația optimă a mărimilor de proces. Intrările de referință ale acestui bloc sunt: toleranța la dimensiune prescrisă, abaterile de la circularitate și rugozitatea maxime admise. Mărimile de reacție includ valori măsurate *on-line* ale puterii și dimensiunii, valori măsurate postoperațional ale rugozității și ovalității, precum și valorile adiționale – uzura discului abraziv, adâncimea stratului influențat termic, etc. – furnizate de blocul "Evaluarea parametrilor", care le estimează din datele livrate de senzori în urma determinărilor *in-process* și *post-process*.

Direcțiile de evoluție ale prelucrărilor prin rectificare, cu precădere ultimele prezentate, sugerează locul și importanța controlului activ în aceste procese. Astfel măsurarea în timpul prelucrării urmează tendința generală actuală de transformare a controlului calității în asigurarea calității ([D1]).

Implementarea calculatorului în sistemele de control activ oferă o flexibilitate nelimitată în privința achiziției și memorării datelor, a prelucrărilor prin filtrare sau posibilitatea efectuării unor operații de modificare dinamică a referințelor, de analiză a variației acestora și a trecerii peste pragul de valoare semnificativă, asigurând suportul pentru luarea deciziilor de comandă a procesului ([D11]). Îmbunătățirea performanțelor de flexibilitate și implicit lărgirea domeniului de aplicabilitate a sistemelor de control activ și pentru loturi mici de piese se realizează și prin construcția captorilor universali din elemente tipizate, cu seturi de palpatoare de diverse forme geometrice, specifice diferitelor tipuri de suprafețe sau familii de piese, cu domenii largi de măsurare și posibilități de reglare rapidă.

Prin urmare se poate afirma că prin echiparea cu sisteme de control activ a mașinilor de rectificat, acestea se deplasează pe scara prezentată în *figura 2.2* pe o treaptă superioară celor clasice, în apropierea MUCN, utilizarea lor asigurând obținerea unor productivități mai ridicate, în detrimentul flexibilității. Se poate aprecia că precizia și eficiența sunt comparabile celor obținute pe mașini-unelte de rectificat cu comandă numerică, la prelucrarea unor piese de forme relativ simple, în condițiile în care cheltuielile de investiție sunt favorabile mașinilor-unelte echipate cu control activ.

Pe de altă parte, prelucrarea semnalului de măsurare și conducerea procesului de rectificare cu calculatorul permit integrarea firească într-un sistem de

producție asistat CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) ([O2]), sistemele de control activ intervenind direct atât în componenta de fabricație asistată CAM (*Computer Aided Manufacturing*), cât și în cea de asigurare a calității asistată CAQ (*Computer Aided Quality Assurance*).

2.2. Controlul activ în construcția de mașini

2.2.1. Efecte tehnico-economice ale introducerii controlului activ pe mașini-unelte

Ca orice activitate tehnică, procesul de fabricație presupune controlul competent, efectuat cu precizie și productivitate, în scopul de a asigura alinierea și menținerea la nivelul impus de cerințele de calitate. Automatizarea sistemelor de control reprezintă una dintre cele mai mari resurse de eficiență, siguranță și obiectivitate, acestea fiind orientate dinamic spre o tehnicizare de vârf, prin mărirea preciziei, scăderea consumului de muncă și de energie, schimbarea esențială a atributului controlului din constatativ în preventiv.

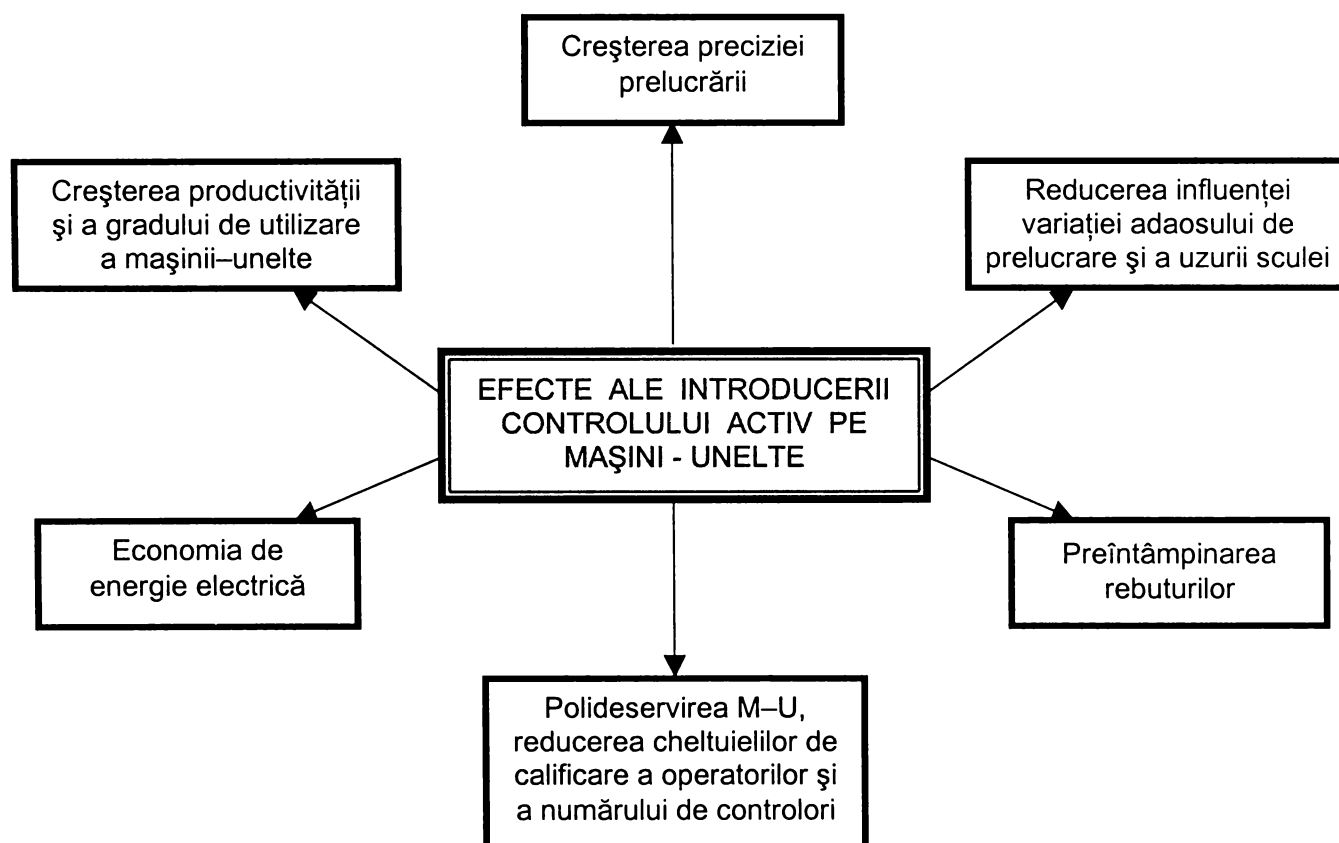


Figura 2.4 Efectele tehnico-economice ale controlului activ

În acest sens, se evidențiază sistemele de control activ, care pe baza informației despre stadiul prelucrării dimensionale, furnizată prin măsurare, dirijează simultan una sau mai multe mărimi de intrare ale procesului, cu scopul obținerii unor mărimi de ieșire cu caracteristicile dorite. Deși există o multitudine de realizări concrete ale acestor sisteme, caracteristicile lor definitorii sunt aceleași și asigură o operare eficientă a mașinilor-unelte.

Decizia utilizării controlului activ pentru conducerea unui proces de prelucrare se ia în urma analizei concrete a eficienței economice și a câștigurilor de calitate rezultate în urma acestei opțiuni.

Efectele tehnico-economice ale introducerii controlului activ în sistemele de prelucrare mecanice sunt prezentate în *figura 2.4* ([G5]).

Unul din principalele efecte este creșterea productivității și implicit a gradului de utilizare a mașinii-unelte. Prelucrarea pieselor cu toleranțe restrânse prin folosirea măsurărilor de probă necesită opriri frecvente ale mașinii, timpul necesar măsurării depășindu-l, de multe ori, pe cel de bază. Prin folosirea controlului activ, timpul de măsurare suprapunându-se cu cel de bază, se obține o creștere minimă a productivității de 15 % ([D14]).

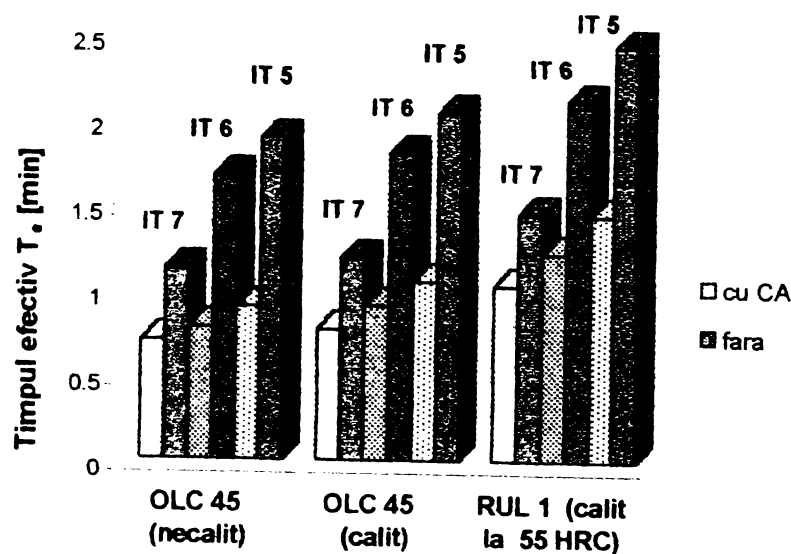


Figura 2.5. Timpul efectiv la rectificarea cu și fără control activ

Astfel, la rectificarea cilindrică exterioară cu avans de pătrundere a unor piese având diametrul exterior $\Phi 10$ mm și lungime 30 mm, s-au obținut, pentru diverse materiale și trepte de toleranță impuse, timpii efectivi prezentați în *figura 2.5* ([X4]). Economii de timp în valoare absolută sunt cu atât mai mari cu cât treapta de

toleranță impusă este mai precisă, iar în ceea ce privește valorile procentuale, acestea sunt cuprinse între 29...54 %.

O consecință imediată a creșterii productivității este reducerea cheltuielilor de salarizare prin folosirea unor operatori mai puțin calificați și prin polideservire, în unele cazuri putându-se ajunge la patru sau chiar cinci mașini.

De asemenea, prin eliminarea rebuturilor și a timpului de mers în gol al mașinii de rectificat în perioada măsurărilor de probă, se realizează o importantă economie de energie electrică.

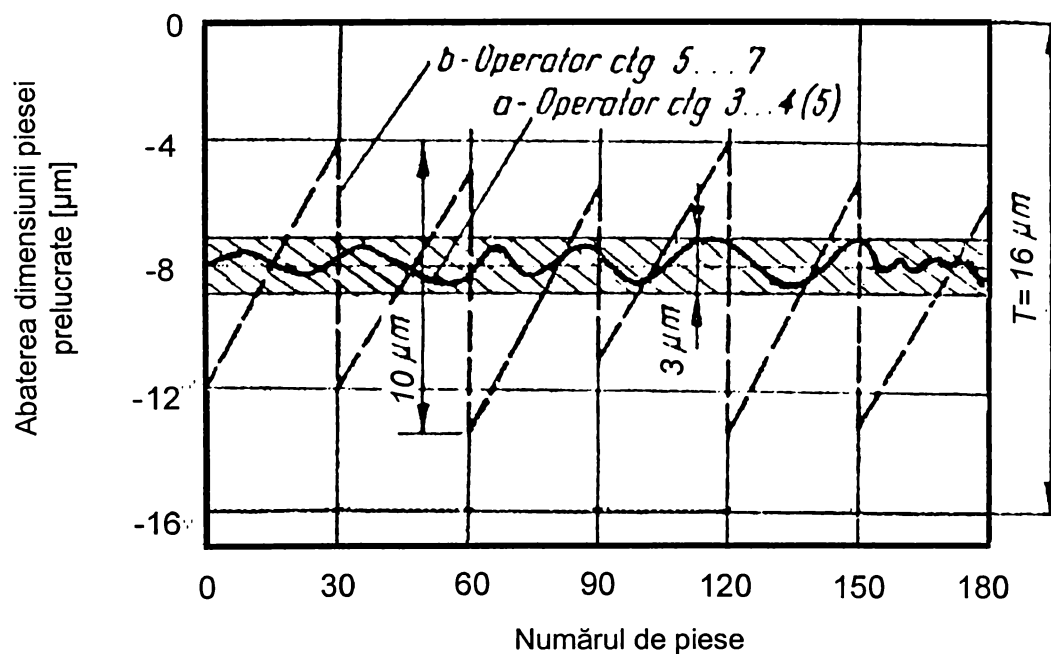


Figura 2.6. Variația preciziei de prelucrare la rectificarea cu avans transversal

Un alt efect important este creșterea preciziei prelucrării. După cum se observă în figura 2.6 ([S4]), împrăștierea dimensiunii obținute la prelucrarea unui lot de 180 de piese prin folosirea controlului activ operațional de către un operator de categoria 4–5 (cazul a) este de 3 μm , față de cazul b al prelucrării convenționale, realizate de către un operator de categoria 6–7, când se obține o împrăștiere a dimensiunii prelucrate de 10 μm .

Folosirea controlului activ operațional asigură și eliminarea rebuturilor prin urmărirea continuă a variației adaosului de prelucrare și oprirea mașinii-unelte la atingerea cotei finale. Acest efect se manifestă cu atât mai pregnant, cu cât piesele de prelucrat au o geometrie mai complexă, rigiditate mai mică și toleranțe impuse mai restrânse ([G5]).

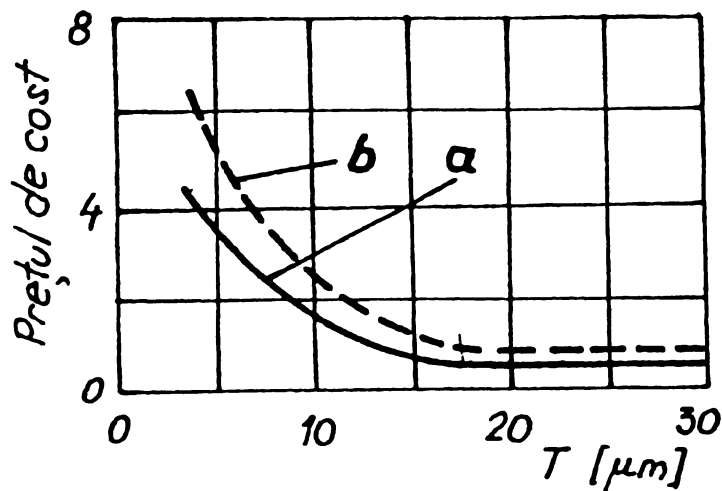


Figura 2.7. Costul la rectificarea cu (a) și fără control activ (b)

Datorită efectelor menționate anterior, costul pieselor rectificate cu control activ este mai mic decât al aceleiași prelucrări efectuate fără control activ. la aceeași precizie a prelucrării. Așa cum se evidențiază în figura 2.7, această diferență crește odată cu precizia prelucrării ([S4]).

2.2.2. Schema-bloc a sistemelor de control activ

Mijloacele de control activ reprezintă sisteme de reglare automată în buclă închisă cu reacție negativă, a căror structură este prezentată în figura 2.8, ce evidențiază unitățile componente ale acestora. Ele leagă în aceeași secvență informația prelevată din procesul de prelucrare și decizia ce trebuie luată, pe baza evaluării rezultatelor măsurării, pentru corectarea abaterilor detectate și modificarea valorii mărimilor de reglare ([C1], [N3], [S4]).

Mașina-unealtă reglată (blocul D), împreună cu elementul de execuție și cu cel de măsurare constituie sistemul condus. Conducerea se face de către subsistemul numit dispozitiv de automatizare, adică de comparatorul electronic B ([D9], [D10], [D18], [G5], [P6]).

Sesizorul mărimii măsurate A furnizează mărimea de reacție x (ieșirea de măsurare) dispozitivului de automatizare compus dintr-un element de prescriere, care generează mărimea de conducere w , un element de comparare, care livrează mărimea de acționare x_w și un regulator, care are rolul de a prelucra operațional mărimea de acționare și de a elabora semnalul de comandă u pentru elementul de execuție. Mărimea de acționare este considerată a fi o măsură a erorii de reglare:

$$x_w = w - x \quad (2.1)$$

Prelucrearea operațională de către regulator constă în supunerea mărimii de acționare x_w unui algoritm de calcul denumit *algoritm de reglare*, care are ca rezultat mărimea de comandă u . În final, elementul de execuție asigură adaptarea acesteia la natura fizică și nivelul de putere cerute de mărimea de execuție y , transmisă mașinii-unelte.

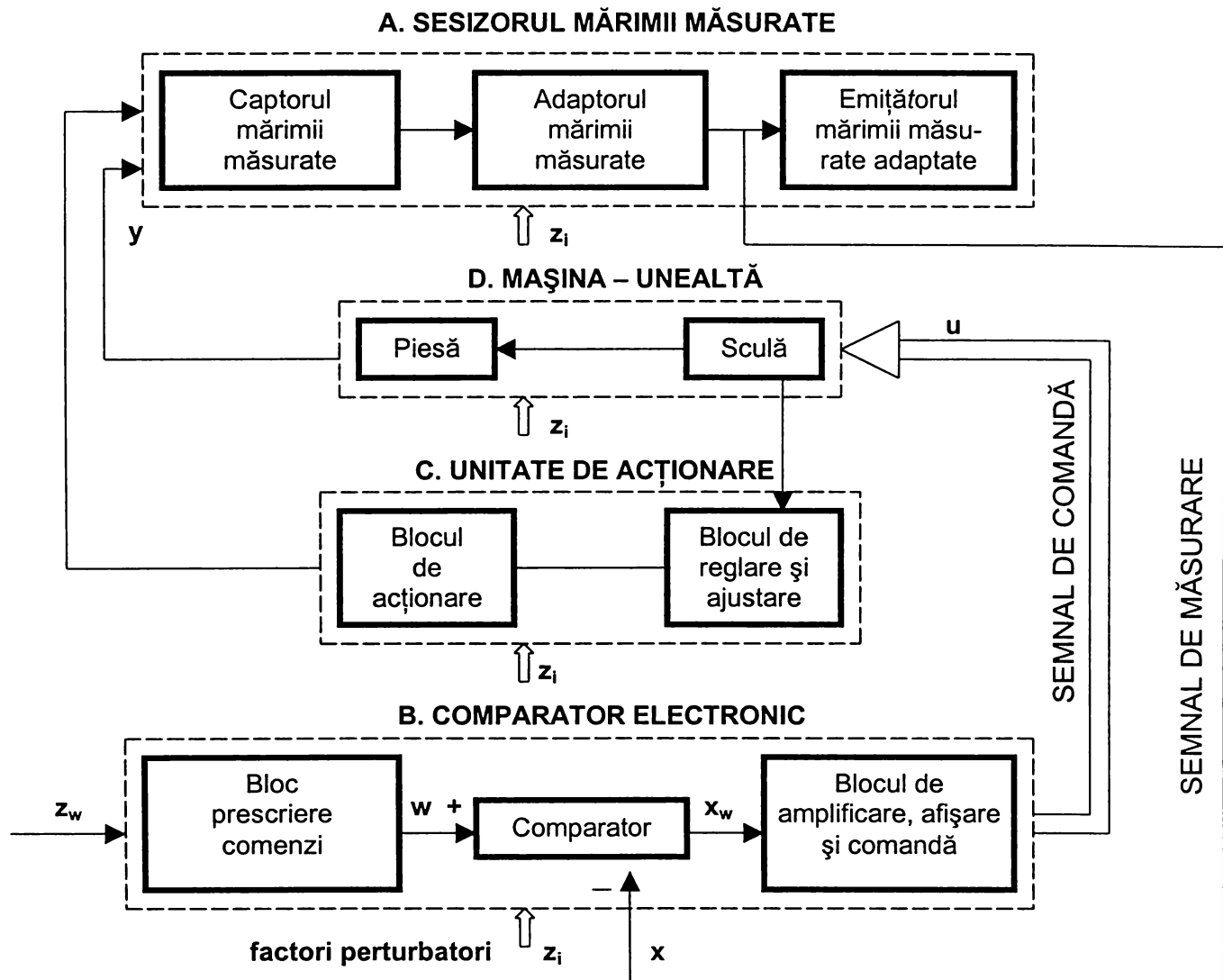


Figura 2.8 Schema-bloc a sistemelor de control activ

Subsistemul de măsurare A este un ansamblu complex, capabil să capteze, să prelucreze și să emită informații privitoare la un măsurand. Structural este compus din următoarele subansamble, care în unele cazuri nu pot fi strict delimitate ([D6], [D8], [M2], [S5], [X6], [X10], [X21]):

- *captorul*, cu rol de a prelua mărimea de măsurat la intrare și de a o transforma într-un semnal primar ce poate fi prelucrat în continuare;
- *adaptorul*, cu rol de a transmite și prelucra semnalele primite de la captor (ex.: amplificator, punte, modulator, filtru, stabilizator, convertizor, calculator, amortizor);

– *emițătorul*, cu rol de a livra direct sau indirect valoarea măsurată a mărimii de intrare (ex.: indicator, înregistrator, numărător).

Funcționalitatea captorului se realizează prin intermediul unui *traductor* definit ca "un dispozitiv ce furnizează un semnal de ieșire util ca răspuns la un măsurand precizat", prin măsurand înțelegându-se "o cantitate fizică, o proprietate sau o condiție care este măsurată" (ANSI MC 6.1 1975, [G2]). Restricția inițială care limita semnalele de ieșire la cele electrice a fost astăzi înlăturată. De asemenea, odată cu creșterea performanțelor microprocesoarelor și apariția ideii dezvoltării unui analog tehnic al inteligenței și simțurilor (*senses* în limba engleză) umane, denumirea de *senzor* a început să fie preferată celei de traductor. În prezent sunt folosite ambele denumiri echivalente ([G2]), existând însă autori care înțeleg prin senzor fie un traductor de intrare, fie elementul primar al unui lanț de măsurare.

Dintre criteriile de clasificare a senzorilor, cel mai important este cel referitor la principiul de transformare al semnalului primar.

2.2.3. Clasificarea metodelor și procedeele de control activ

În funcție de modul de realizare a măsurării, metodele de control activ pot fi prin condiționarea directă a dimensiunii piesei sau prin condiționarea indirectă a dimensiunii piesei (*figura 2.9* [G5]).

În cadrul primei metode, care presupune măsurarea variației adaosului de prelucrare, întâlnim procedee de control activ preoperațional, la care măsurarea se face înaintea prelucrării, procedee de control activ operațional, la care măsurarea se face în timpul prelucrării, procedee de control activ postoperațional, la care măsurarea se face după prelucrare și procedee de control activ combinat, la care măsurarea se face atât în timpul prelucrării cât și după aceasta ([D14], [D18], [S4], [S5], [X13]).

Cea de-a doua metodă presupune fie măsurarea deplasării organului de execuție, cu sau fără compensarea uzurii sculei, fie măsurarea deplasării sculei.

Mijloacele pentru controlul activ preoperațional, numite de protecție și blocare, asigură prin controlul pieselor de prelucrat protecția la deteriorare a sculei sau mecanismelor mașinii-unelte, precum și compensarea variației mărimii adaosului de prelucrare (*figura 2.10.b* [G5]).

Sistemele de control activ operațional (*figura 2.10.a* [G5]) asigură măsurarea continuă în timpul prelucrării, conducerea și oprirea operației pe baza evaluării și

comparării unuia sau mai multor parametri de precizie măsurăți cu cei impuși. De asemenea, o posibilitate aparte a acestor mijloace este prelucrarea cu ajustaj garantat, dimensiunea de referință fiind stabilită în acest caz prin măsurarea piesei pereche.

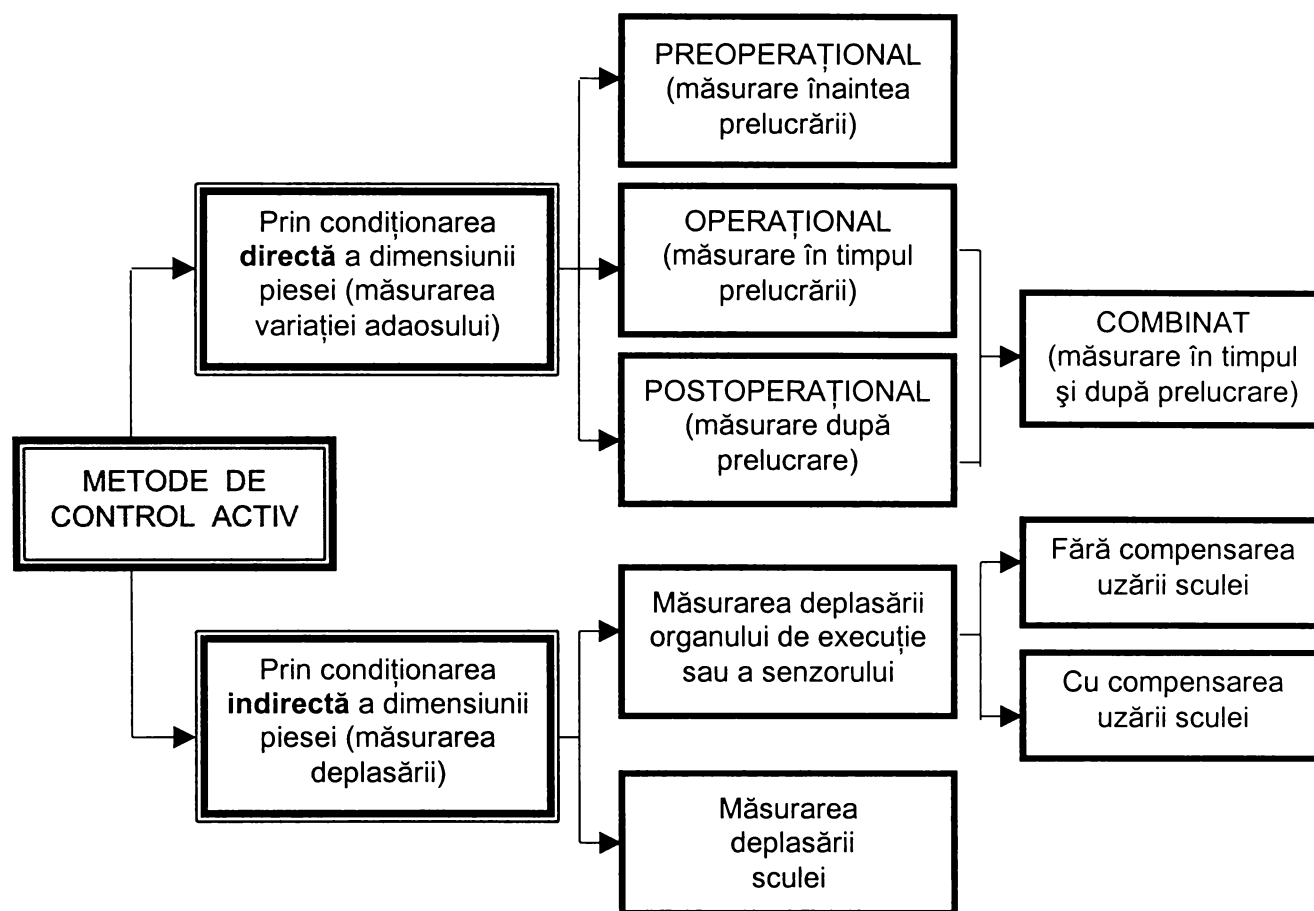


Figura 2.9 Clasificarea metodelor și procedeeelor de control activ

Mijloacele pentru controlul activ postoperațional (figura 2.10.c [G5]) realizează compensarea erorii cumulate de execuție, cauzate de efectul conjugat al diferiților factori perturbatori, prin reglarea intermediară automată a mașinii-unelte sau sortarea dimensională a pieselor și eliminarea rebuturilor. Se aplică în deosebi în situațiile în care măsurarea în timpul prelucrării nu este posibilă, datorită inaccesibilității la suprafața prelucrată sau a duratei scurte de realizare a piesei. Folosirea cu succes a controlului postoperațional presupune procese de prelucrare cu o caracteristică de derivă lentă în timp a dimensiunilor prelucrate, spre valori care ies din câmpul de toleranță admis.

Sistemele pentru controlul activ combinat (figura 2.10.d [G5]) asigură măsurarea, conducerea și oprirea operației pe baza uneia sau mai multor condiții de precizie impuse, în același timp cu reglarea intermediară pe o porțiune a câmpului de toleranță sau proporțional cu mărimea abaterii constatată postoperațional.

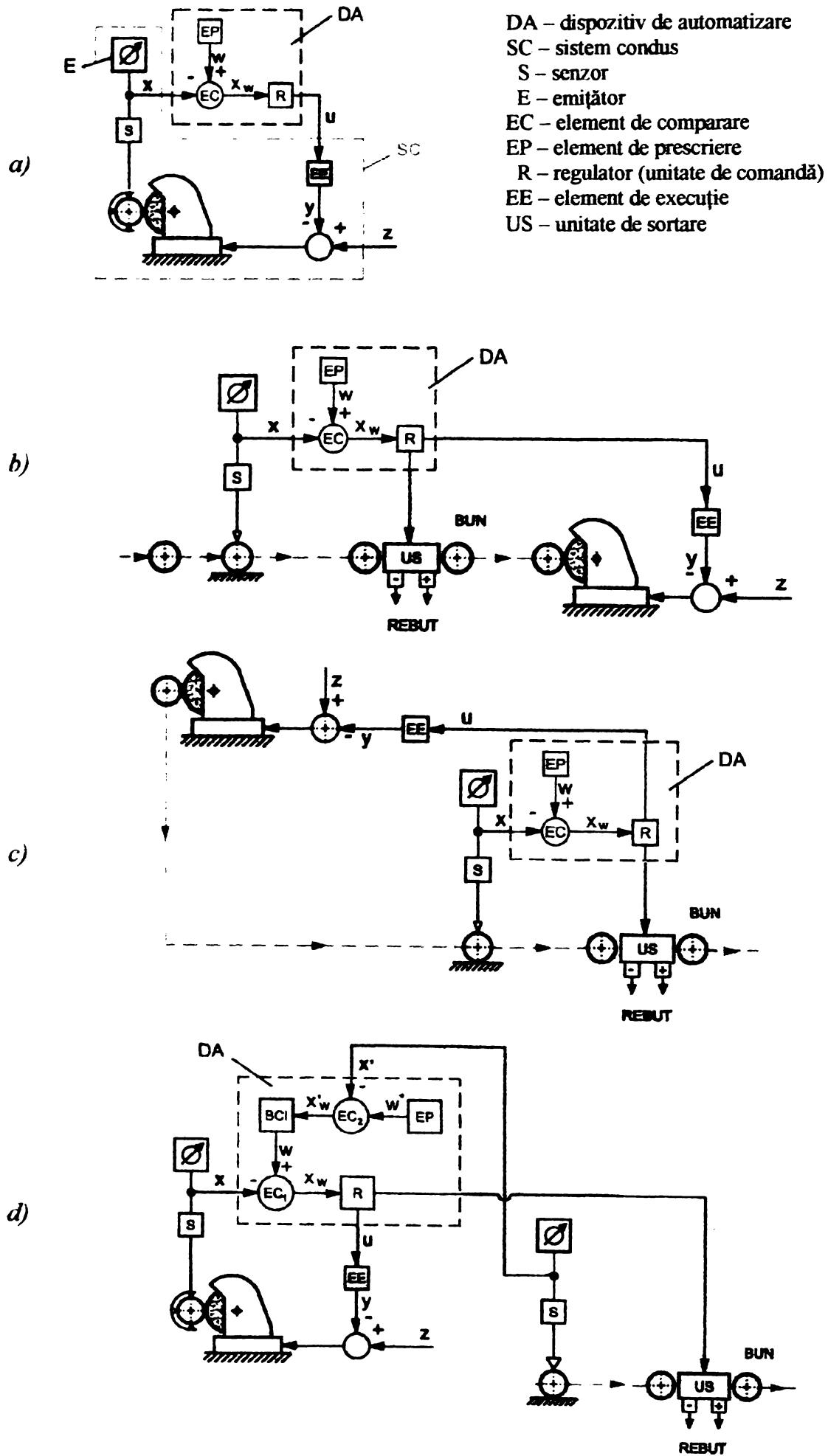


Figura 2.10 Metode de control activ

Rezultate superioare în ceea ce privește precizia, productivitatea și stabilitatea prelucrării s-au obținut în cazul procedurilor operaționale și combinate.

2.3. Metoda pneumatică de măsurare

2.3.1. Analiza metodei pneumatice de măsurare

Funcționarea sistemelor pneumatice de măsurare a lungimilor se bazează pe legile de curgere a gazelor. Utilizarea lor pe scară largă în practica controlului uzinal și de laborator se datorează faptului că, în raport cu celelalte metode de măsurare (mecanice, optice, electronice), cele pneumatice prezintă o serie de *avantaje* importante ([D14], [G5], [M4], [N2], [X12], [X19], [X23]):

- rezoluție ridicată (până la 1 μm), ca urmare a rapoartelor de amplificare foarte mari (40000...50000) realizate la aparatele curențe, putându-se obține chiar precizii superioare cu amplificări de 100000....200000;

- posibilitatea măsurării fără contact a pieselor de rigiditate scăzută, fragile, eliminând erorile datorate deformațiilor, frecărilor, precum și uzurii palpatorului sau a obiectului de prelucrat;

- simplitate și robustețe constructivă, fiabilitate ridicată;

- obiectivitate excepțională;

- simplitatea reglării și controlului aparatului;

- productivitate ridicată, măsurarea fiind de scurtă durată;

- posibilitatea controlului simultan al mai multor dimensiuni;

- posibilitatea comandării de la distanță, deci posibilitatea utilizării în condiții de automatizare a controlului;

- rezultate independente de însușirile controlorului, deci nu necesită personal de înaltă calificare;

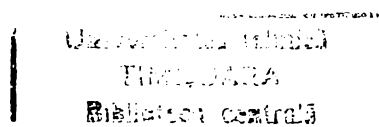
- posibilitatea măsurării în locuri greu accesibile, cum ar fi măsurarea găurilor adânci și de diametru mic;

- sensibilitate scăzută la vibrații, aparatele acționând ca un filtru al frecvențelor înalte;

- preț de cost redus.

Trebuie avute în vedere și unele *dezavantaje* ale acestor sisteme pneumatice de măsurare, cum ar fi:

- necesitatea existenței unei surse de aer comprimat;



- necesitatea purificării aerului de praf, ulei, pentru a evita înfundarea duzelor;
- gabaritul relativ mare al unor instalații de semnalizare.

2.3.2. Clasificarea procedeeleor pneumatice de măsurare

Clasificarea procedeeleor pneumatice de măsurare în funcție de mărimea caracteristică a circuitului pneumatic care este influențată de către măsurand este arătată în *figura 2.11* ([G5]), iar *tabelul 2.1* cuprinde o prezentare sintetică a acestor procedee ([B1], [B3], [D2], [D6], [D7], [G5], [I1], [M2], [M4], [N3], [S5], [V2], [X20]).

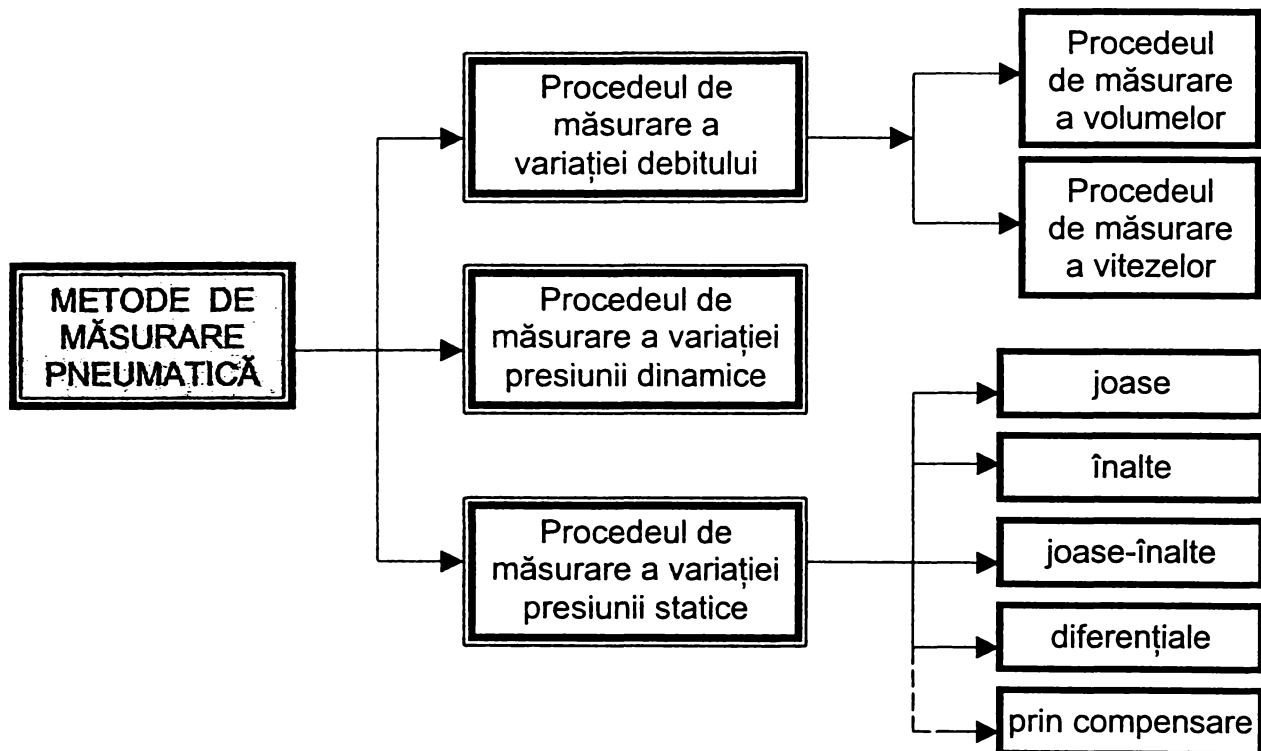


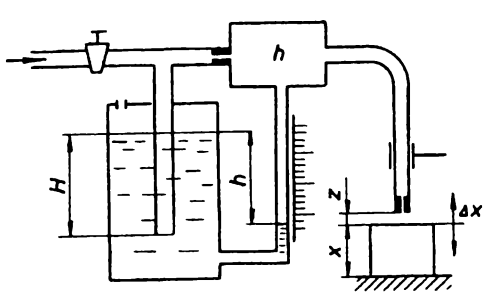
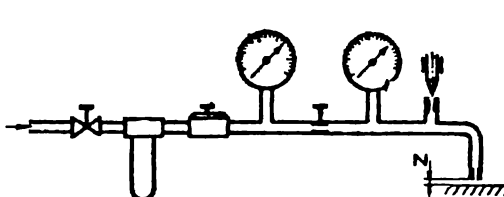
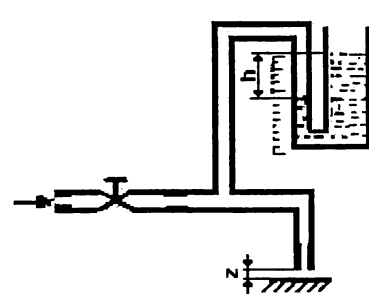
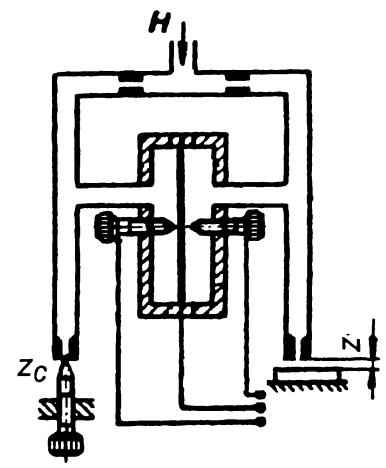
Figura 2.11 Clasificarea procedeeleor pneumatice de măsurare a lungimilor

2.3.3. Principiul de măsurare a presiunii statice

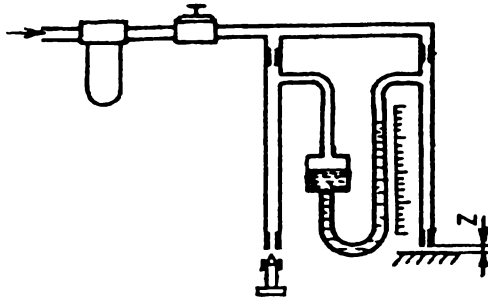
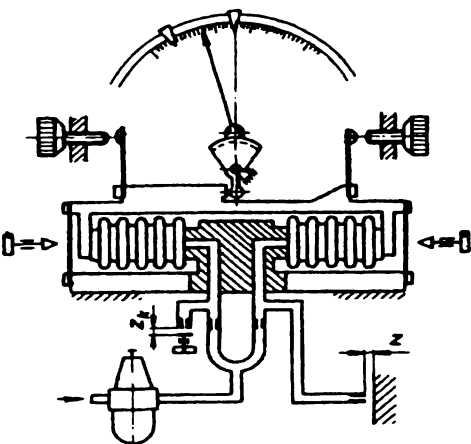
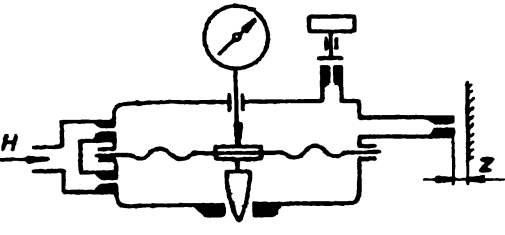
Marea majoritate a sistemelor pneumatice, îndeosebi cele folosite la controlul activ, este realizată pe baza principiului de măsurare a presiunii statice, datorită avantajelor evidențiate în *tabelul 2.1*.

Schema principală a acestui procedeu e prezentată în *figura 2.12.a*. Aerul cu presiunea constantă H intră prin duza de intrare cu diametrul d_1 în camera de măsurare și iese prin duza de ieșire și prin interstițiul inelar cu diametrul d_2 și înălțimea z în atmosferă. Prin modificarea Δx a dimensiunii piesei controlate se modifică mărimea interstițiului z și prin aceasta se schimbă debitul de aer Q , care se scurge prin duza de ieșire. Odată cu debitul se modifică și presiunea h din camera de măsurare.

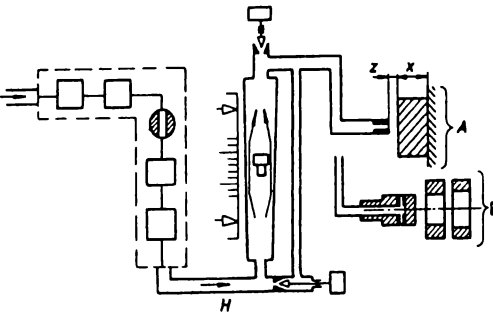
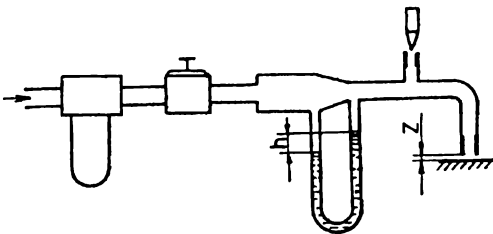
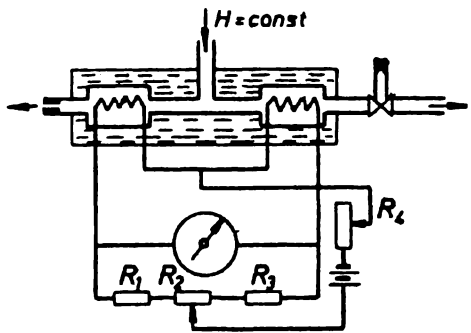
Tabelul 2.1. Metode și procedee de control activ

| Parametrul pneumatic măsurat | Schema principială a sistemului de măsurare | Funcția de transfer | Caracteristici | |
|------------------------------|---|---|---|---|
| PRESIUNE STATICĂ | joasă |  | $h = \frac{H}{1 + 16 \cdot \frac{\alpha_2^2 d_2^2 z^2}{\alpha_1^2 d_1^4}}$ | – presiunea de lucru: 900..15000 Pa; – rapoarte de transmitere mari; – construcție simplă a stabilizatorului; – consum mic de aer; – etanșare ușoară a conductelor |
| | întăită |  | z – interstițiul de măsurare; d ₁ – diametrul duzei de intrare; d ₂ – diametrul duzei de măsurare; α ₁ , α ₂ – coeficienți de debit ai duzelor de intrare, măsurare; h – presiunea de măsurare H – presiunea de lucru | – presiunea de lucru: (15...35)·10 ⁶ Pa; – curățire bună a suprafețelor de prelucrat |
| | joasă-întăită |  | h – presiunea de măsurare H – presiunea de lucru | – curățirea suprafețelor de prelucrat |
| | diferențială | – cu membrană elastică  | $\Delta h = H \left(\frac{1}{1 + C_1 \cdot z^2} - \frac{1}{1 + C_2 \cdot z_c^2} \right)$ <p> Δh – presiunea diferențială; C₁, C₂ – constante de aparat, care depind de raportul coeficienților de debit și de dimensiunile duzelor din fiecare ramură; z_c – interstițiul de reglare; </p> $f = \frac{R^4}{5.86 \cdot E \cdot g^3} \cdot \Delta h$ <p> f – săgeata membranei plane; g – grosimea membranei; R – raza membranei elastice; E – modulul de elasticitate </p> | – nu este necesară o presiune de lucru riguros constantă; – presiunea de lucru: (5...20)·10 ⁶ Pa |

Tabelul 2.1. (continuare)

| Parametrul pneumatic măsurat | Schema principală a sistemului de măsurare | Funcția de transfer | Caracteristici | |
|------------------------------|--|---|--|---|
| PRESIUNE STATICĂ | diferențială | <p>– cu manometru cu lichid</p>  | $\Delta h' = \Delta h \cdot \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right)$ <p>$\Delta h'$ – presiunea diferențială totală; d – diametrul tubului piezometric; D – diametrul rezervorului</p> | <p>– presiunea de lucru: $(35 \dots 70) \cdot 10^6 \text{ Pa}$; – precizia de măsurare: $\pm(1,5 \dots 3) \text{ mmH}_2\text{O}$</p> |
| | | <p>– cu tuburi gofrate</p>  | $i = K_M \cdot \frac{A_e}{R} \cdot \Delta h$ <p>i – indicația aparatului comparator; K_M – raportul de amplificare a aparatului comparator; A_e – suprafața efectivă a silfonului; R – rigiditatea sistemului elastic</p> | <p>– rigiditate și sensibilitate ridicată a silfoanelor; – presiunea de lucru: $(5 \dots 90) \cdot 10^6 \text{ Pa}$</p> |
| | prin compensare | <p>– cu membrană</p>  | $\delta = \frac{d_2}{d_a \cdot \sin \varphi / 2} \cdot z$ <p>δ – deplasarea acului conic; d_2 – diametrul duzei de măsurare; z – interstițiul de scăpare a aerului; d_a – diametrul tijei acului conic; φ – unghiul la vârf al acului conic;</p> $i = K_M \cdot \delta$ <p>i – indicația aparatului comparator; K_M – raportul de amplificare a aparatului comparator</p> | <p>– construcție simplă; – precizie mare; – robustețe; – mai puțin sensibile la variația presiunii de lucru</p> |

Tabelul 2.1. (continuare)

| Parametrul pneumatic măsurat | Schema principială a sistemului de măsurare | Funcția de transfer | Caracteristici |
|--|---|---|--|
| <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">DEBIT</p> | <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">prin variația volumului</p>  | $h = \alpha \rho_r \cdot \frac{\pi d_2 z v_2}{b} \sqrt{\frac{C_\beta \rho S}{2\beta}} - \frac{a}{b}$ <p> h – înălțimea de echilibru a flotorului; α – coeficient de debit; ρ_r – densitatea relativă a aerului; v₂ – viteza aerului în secțiunea de ieșire; a, b – constante în funcție de dimensiunile constructive ale aparatului; C_β – coeficientul forței frontale a flotorului; β – rezistența frontală a flotorului; ρ – densitatea flotorului; S – aria frontală a flotorului </p> | <ul style="list-style-type: none"> – presiunea de lucru: < 10⁶ Pa; – presiunea aerului de la rețea: (30...100)10⁶ Pa – raportul de amplificare: 2000...10000; – liniaritatea scării gradate pe întreg domeniul de măsurare; – inerție mică; – curățire foarte bună a suprafeței; – precizie 0,5...2,5 %; – temperatura de lucru T < 120° |
| | <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">prin variația vitezei</p> <p>– cu tuburi Venturi</p>  | $h = k \cdot d_1^2 \cdot 3 \sqrt{\frac{\chi}{\chi - 1} \cdot \frac{p_a}{d_2^2 \cdot z}}$ <p> h – căderea de presiune în ajutorul Venturi; d₁ – diametrul fantei ajutorului Venturi; d₂ – diametrul duzei de măsurare; z – interstițiul de măsurare; p_a – presiunea atmosferică; χ – exponent adiabatic; k – constanta aparatului </p> | <ul style="list-style-type: none"> – căderea de presiune reziduală: h = 10 200 Pa; – perturbă foarte puțin procesul de curgere; – domeniu liniar îngust; – clasa de precizie: 0,5...1,5; – temperatura de lucru T < 300° |
| <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">prin variația vitezei</p> <p>– cu bolometru</p>  | $R_{fl} = R_f - \frac{I^2 \cdot R_f}{A + B \sqrt{v}}$ <p> R_{fl} – rezistența electrică a firului la temperatura curentului fluid înconjurător; R_f – rezistența firului la temperatura sa de funcționare; I – intensitatea curentului electric; A, B – constante ce depind de dimensiunile și caracteristicile firului și natura fluidului </p> | <ul style="list-style-type: none"> – precizie ridicată ± (0,5...1)%; – presiune de lucru: < 2 MPa; – se pot utiliza în condiții variate; – limita superioară de măsurare a debitului 2,8 m³/s; – pot fi utilizate pentru debite foarte mici, diametrul conductei d > 2...3mm; – fir din platină sau wolfram: d = 0,6...10 μm | |

Dependența presiunii de măsurare h de interstițiul z reprezintă caracteristica statică a aparatului pneumatic (figura 2.12.b), ea obținându-se scriind relațiile deduse la teoria curgerii gazelor prin ajutaje, curgere ce se consideră adiabatică ([D14], [M4], [S5]):

$$h = \frac{H}{1 + \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot \frac{A_2}{A_1} \right)^2} \quad (2.2)$$

în care: $A_{1,2}$ – ariile secțiunilor de trecere a aerului prin duza de intrare, respectiv măsurare;

$\alpha_{1,2}$ – coeficienții de debit ai duzelor de intrare, respectiv măsurare.

Explicitând ariile:

$$A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (2.3)$$

$$A_2 = \pi d_2 z \quad (2.4)$$

relația (2.2) devine:

$$h = \frac{H}{1 + 16 \cdot \frac{\alpha_2^2 d_2^2 z^2}{\alpha_1^2 d_1^4}} \quad (2.5)$$

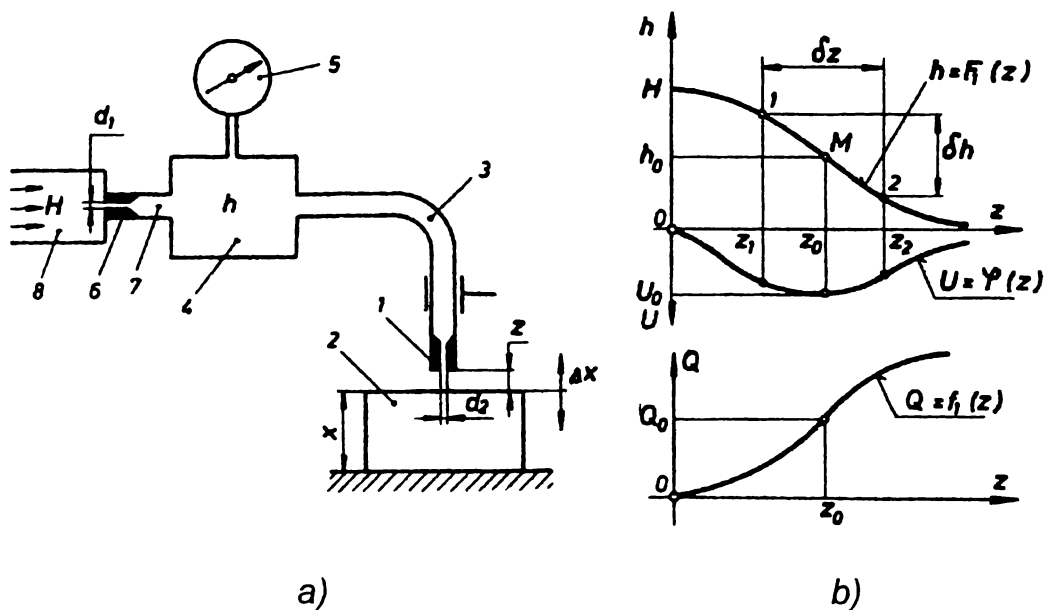


Figura 2.12 Procedul de măsurare a variației presiunii statice

Raportul de transmitere sau sensibilitatea U a schemei de măsurare se determină derivând în raport cu z relația (2.5):

$$U = \frac{dh}{dz} = - \frac{32 H \frac{\alpha_2^2}{\alpha_1^2} \frac{d_2^2}{d_1^4} z}{\left(1 + 16 \frac{\alpha_2^2}{\alpha_1^2} \frac{d_2^2}{d_1^4} z\right)^2} \quad (2.6)$$

Expresia arată că asupra valorii raportului de transmitere, cea mai mare influență o au diametrele duzelor de intrare d_1 și de ieșire d_2 . Această influență urmează să fie studiată experimental pentru un sistem pneumatic ales, modelarea experimentală fiind justificată cu atât mai mult cu cât raportul coeficienților de debit, care intervine la puterea a doua în relațiile (2.5) și (2.6), diferă de unitate, valoare considerată în calculele analitice uzuale ([D14]).

Reprezentând caracteristica statică și variația raportului de transmitere în funcție de interstițiul z (*figura 2.12.b*), se observă că valoarea maximă U_0 a acestuia se obține la punctul de inflexiune al caracteristicii statice. Această valoare maximă este menținută pentru toată porțiunea liniară a caracteristicii statice, zonă folosită pentru măsurare.

Domeniul de măsurare va fi:

$$\delta z = z_2 - z_1 \quad (2.7)$$

el îngustându-se, pentru o anumită valoare a presiunii de lucru, pe măsura creșterii raportului de transmitere și invers. Modificarea domeniului de măsurare δz și a raportului de transmitere U se poate face prin schimbarea duzelor de intrare (d_1) sau de ieșire (d_2).

Tabelul 2.2 Regimuri de lucru ale sistemelor pneumatice de măsurare a presiunii

| Regimul de lucru | Duza de intrare | | Duza de măsurare | |
|------------------|-----------------|-------------|------------------|-------------|
| | h / H | Regim | H_{atm} / h | Regim |
| I | $> 0,528$ | Subcritic | $> 0,528$ | Subcritic |
| II | $\leq 0,528$ | Supracritic | $> 0,528$ | Subcritic |
| III | $> 0,528$ | Subcritic | $\leq 0,528$ | Supracritic |
| IV | $\leq 0,528$ | Supracritic | $\leq 0,528$ | Supracritic |

Sistemele pneumatice bazate pe măsurarea variației presiunii statice pot lucra în diferite regimuri, după cum raportul dintre presiunea din avalul și amonte

fiecareia dintre cele două duze este superior sau inferior valorii critice 0,528. Sunt posibile teoretic patru regimuri de lucru, conform *tabelului 2.2* ([B5]).

Pe baza principiului general prezentat au apărut o serie de variante ale procedurii de măsurare a presiunii statice (*figura 2.11*). Pentru sistemele de măsurare a presiunii joase, înalte sau joase-înalte este recomandabil să lucreze în regimul I sau al III-lea, ceea ce permite obținerea sensibilității maxime pe porțiunea liniară a caracteristicii statice (*figura 2.12.b*), în timp ce sistemele de măsurare a presiunii prin compensare funcționează în regimul al IV-lea din *tabelul 2.2*.

Datorită multiplelor avantaje pe care le prezintă, dintre care esențiale sunt precizia și sensibilitatea ridicată, simplitatea constructivă și consumul redus de aer comprimat, s-a optat pentru utilizarea în cercetările ulterioare a unui sistem pneumatic de joasă presiune. În plus, acesta permite conversia semnalului pneumatic în semnal electric, prin intermediul unor traductoare diferențiale magnetofluidice, conversie necesară pentru comanda procesului de prelucrare prin rectificare. Folosirea procedurii de măsurare a presiunii diferențiale permite utilizarea unei presiuni nominale de lucru, care nu trebuie menținută la o valoare riguros constantă, ceea ce constituie un avantaj suplimentar față de cele menționate anterior.

2.4. Elemente structurale ale sistemelor pneumatice de control activ

2.4.1. Construcția captorilor pneumatici

Captorii pneumatici urmăresc continuu sau intermitent evoluția dimensiunii care se măsoară, transformând semnalul primar de măsurare într-un semnal pneumatic ce urmează să fie ulterior prelucrat. Abaterile dimensionale ale pieselor se determină prin metoda comparativă, față de o piesă etalon sau de referință.

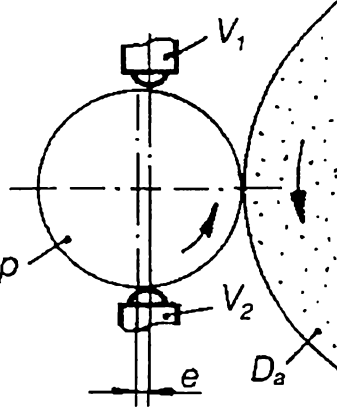
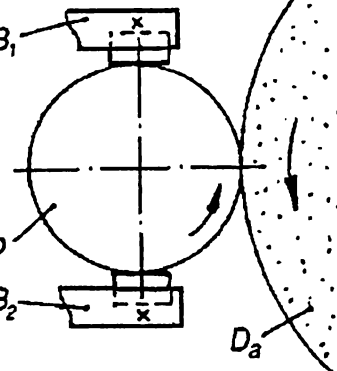
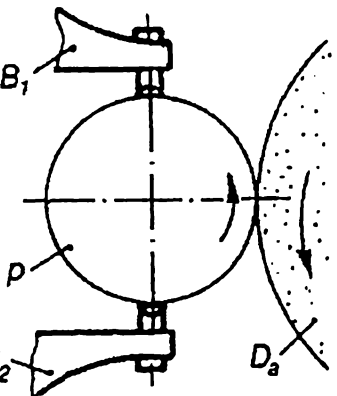
Structura captorului conține elemente specifice îndeplinirii funcțiilor sale, care vor fi analizate în continuare.

2.4.1.1. Elemente de contactare

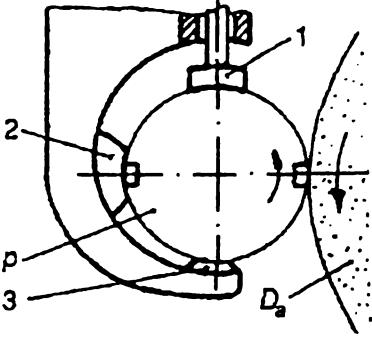
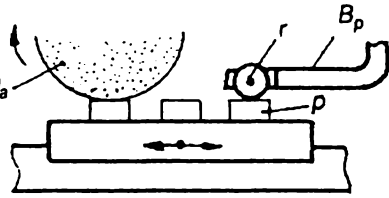
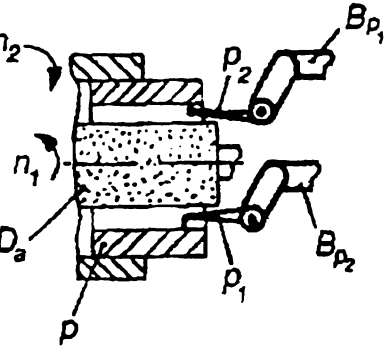
Se întâlnesc în construcția captorilor ce realizează măsurarea prin contact nemijlocit cu suprafața, care le determină forma și dimensiunile ([N3]). Elementele de contactare trebuie să îndeplinească o serie de caracteristici tehnico-funcționale:

- gabarit mic;

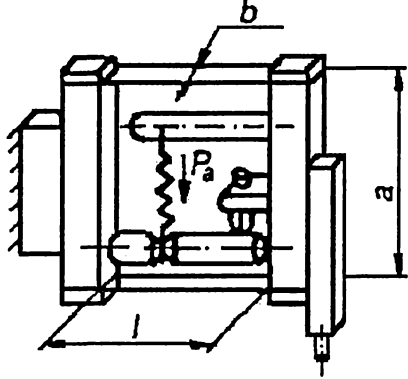
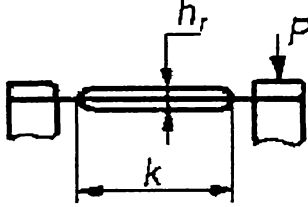
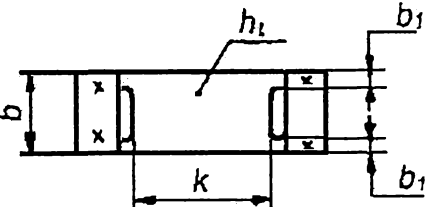
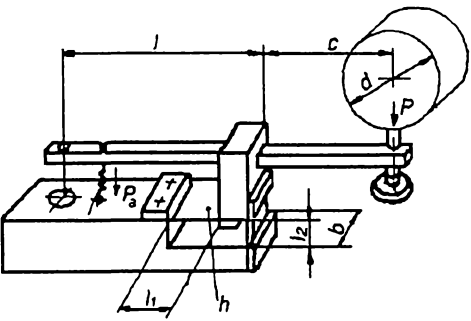
Tabelul 2.3. Tipuri de palpatoare utilizate în construcția captorilor

| Nr. crt. | Tip palpator | Schita palpării | Domeniul de utilizare | Caracteristici |
|----------|--------------|--|---|---|
| 1 | Sferice |  <p>V_1, V_2 – palpatoare sferice; e – excentricitate; p – piesa; D_a – disc abraziv</p> | <p>– la măsurarea diametrelor exterioare, prelucrate pe mașini de rectificat rotund exterior între vârfuri și fără centre</p> | <p>Cerințe:</p> <ul style="list-style-type: none"> – execuție precisă; – asigurarea alinierii față de axa piesei și poziționarea exactă pe diametru în timpul prelucrării; – $e_{max} = 0.05$ mm la prelucrarea unui lot. |
| 2 | Cilindrice |  <p>B_1, B_2 – brațe de palpare cu role cilindrice</p> | <p>– la măsurarea diametrelor exterioare, prelucrate pe mașini de rectificat rotund exterior între vârfuri și fără centre</p> | <p>– prezintă avantajul eliminării efortului de căutare a diametrului, datorită paralelismului generatoarelor lor</p> |
| 3 | Tip cuțit |  <p>B_1, B_2 – brațe de palpare cu palpator de tip cuțit</p> | <p>– la măsurarea diametrelor exterioare, prelucrate pe mașini de rectificat rotund exterior între vârfuri și fără centre</p> | <p>– prezintă aceleași avantaje în raport cu cele sferice, ca și palpatoarele cilindrice</p> |

Tabelul 2.3 (continuare)

| Nr. crt. | Tip palpator | Schița palpării | Domeniul de utilizare | Caracteristici |
|----------|--------------|--|---|---|
| 4 | Profilete |  <p>1, 2, 3 – bacuri de măsurare</p> | <p>– la controlul activ al suprafețelor cilindrice discontinue</p> | <p>– forma și dimensiunile palpatoarelor, care depind de diametrul de prelucrat, influențează funcționarea lină și precizia a captoarelor;</p> <p>– este necesar ca lățimea palpatoarelor să fie de cel puțin două ori lățimea canalelor piesei</p> |
| 5 | Cu role |  <p>r – rolă fixă; B_p – braț palpator</p> | <p>– în cazul controlului activ al suprafețelor plane, când există o bază precisă de măsurare</p> | <p>– rolele mobile au o uzură minimă, datorită frecării de rostogolire;</p> <p>– pentru o măsurare precisă este necesar ca bătaia radială a acestora să fie sub 0,002 mm;</p> <p>– este mai utilizată soluția rozelor conice fixe</p> |
| 6 | Tip vârf |  <p>B_{p1}; B_{p2} – brațe de palpate;</p> <p>p_1; p_2 – palpatoare cu diamant încorporat;</p> <p>n_1 – turația corpului abraziv;</p> <p>n_2 – turația piesei</p> | <p>– la controlul activ al suprafețelor cilindrice interioare</p> | <p>– brațele de palpate sunt profilete pentru a fi posibil accesul în zona de măsurare și conțin o montură cu vârf de diamant, cu o rază la vârf mai mică de 0,2 mm;</p> <p>– forțele de contactare trebuie să fie mici (50...70 cN), pentru a se evita producerea deformațiilor elastice</p> |

Tabelul 2.4 Tipuri de sisteme de ghidare și de realizare a forței de măsurare

| Sistem de ghidare | | Relații de dimensionare | Caracteristici |
|----------------------------|-------------------------|--|--|
| tip paralelogram cu lamele | cu arcuri nerigidizate |  $P = \frac{W}{l/2} \sigma_{ai} = \frac{1}{6} \frac{bh_l^2}{l} \sigma_{ai}$ $f = \frac{Pl^3}{24 EI_z} = \frac{Pl^3}{2 E bh_l^3}$ <p>P – forța de contactare; f – săgeata maximă; I, b, h_l – lungimea, lățimea, respectiv grosimea lamelei; E – modulul de elasticitate longitudinal; σ_{ai} – rezistența admisibilă la încovoiere a materialului lamelei</p> | <p>Avantaje:</p> <ul style="list-style-type: none"> – lipsa jocului și a frecării; – capacitate de încărcare bună; – rezistență bună la șoc; – fiabilitate; – stabilitate termică ridicată; – uzură practic nulă, în lipsa contactului între părțile mobile <p>Dezavantaje:</p> <ul style="list-style-type: none"> – intervalele mici de măsurare (0,4...0,6 mm); – răsucirea părții mobile la încărcări longitudinale |
| | cu arcuri rigidizate | <p>– rigidizate prin placare</p>  <p>– rigidizate prin decupare</p>  $f = \frac{P(l-k)^2}{12 EI_z} + k \frac{P(l-k)^2}{8 EI_z}$ $h_r = (5..10) \cdot h_l$ $b_1 \cong 0,2 \cdot b$ | |
| | cu articulație în cruce |  $M_v = \frac{G}{m \operatorname{tg} ml} \operatorname{tg} \varphi$ $f = \frac{M_v}{G} \frac{1 - \cos ml}{\cos ml}$ <p>M_v – momentul de torsiune ce încarcă arcul vertical; G – greutatea elementelor mobile; f – săgeata maximă; φ – unghiul de rotire;</p> $m = (G/EI_z)^{1/2}$ | <p>Avantaje:</p> <ul style="list-style-type: none"> – lipsa jocului și a frecării; – rigiditate și capacitate de încărcare bună – fiabilitate; – stabilitate termică ridicată; – durabilitate ridicată <p>Dezavantaje:</p> <ul style="list-style-type: none"> – intervalul mic de deplasare (unghiuri de rotație sub 2°); – rezistență mică la șocuri; – sensibilitate la vibrații; – instabilitatea centrului de rotație în funcție de unghiul de rotire |

- rugozitatea suprafețelor active $R_a < 0,0001$ mm;
- rezistență mare la uzura mecanică;
- duritate ridicată;
- coeficient de dilatație termică redus.

Materialele care îmbină aceste cerințe cel mai bine sunt carburile metalice K05...K30 STAS 6374–90. Cele mai utilizate elemente de contactare sunt prezentate în *tabelul 2.3*.

Forma, dimensiunile și materialele utilizate la realizarea palpatoarelor influențează esențial anumite componente ale erorii sistematice de măsurare, deci justetea sistemului pneumatic de control activ. Aceste componente sunt cauzate de poziționarea relativă dintre sistemul de măsurare și obiectul de măsurat, de uzura palpatoarelor, de deformațiile de contact. Studiul teoretic al influențelor amintite pentru unele categorii de erori este dezvoltat în capitolul al 3-lea.

2.4.1.2. Sisteme de ghidare a palpatoarelor și de realizare a forței de măsurare

Sistemele de ghidare a palpatoarelor și de realizare a forței de măsurare (*tabelul 2.4*, [D3], [G1] [N3]), urmăresc variațiile dimensionale ale piesei prin două moduri de deplasare pe intervale mici:

- liniară (mișcare de translație);
- unghiulară (mișcare de rotație).

Aceste deplasări ce sunt transmise traductorului de măsurare trebuie să fie exacte, repetabile și să aibă rezoluție de poziționare.

Ghidajele tip paralelogram cu lamele elastice se deplasează în mișcare de translație când sunt deformat elastic. Ele reprezintă un ansamblu de două arcuri lamelare paralele, încastrate la ambele capete, în placa fixă, respectiv în placa mobilă, care poartă brațul palpator.

Mișcarea elementului mobil în jurul poziției de echilibru se produce pe o traiectorie parabolică, deplasarea principală având loc pe direcția de măsurare.

Pentru deplasări mai mari, sub acțiunea unor forțe și momente care produc torsiune și flambaj, stabilitatea lamelor se menține prin mărirea momentului de inerție în zona lor centrală, secțiunea lamelor devenind variabilă, cu valori mai mari în porțiunile de lungime k , celelalte zone fiind de deformație elastică mărită.

Ghidajele cu pârghie oscilantă cu articulație în cruce preiau variațiile dimensionale ale piesei care se prelucrează ca mărimi unghiulare, care sunt transmise traductorului de măsurare. În construcția captorilor pentru controlul activ s-a impus varianta cu arcurile lamelare concurente la 90° , încastrate cu o extremitate în partea fixă, iar cu cealaltă la partea mobilă. Forța de contactare între palpator și piesă este asigurată, ca și în cazul ghidajelor tip paralelogram, de un arc elicoidal.

Proiectarea sistemelor pneumatice de măsurare cu contact trebuie să ia în considerare relațiile de dimensionare, indicațiile de utilizare prezentate în *tabelul 2.4*, dar și precizia dimensională și de montaj a elementelor ghidajelor, ce influențează eroarea totală de măsurare.

2.4.1.3. Variante constructive de senzori pneumatici

Senzorii pneumatici fac parte din categoria celor analogici parametrici, fiind incluși în primele sisteme de control activ. După modul de prelevare a informației din zona de măsurare, pot fi:

- fără contact;
- cu contact.

Senzorii pneumatici fără contact permit măsurarea suprafețelor fără pericolul degradării acestora și elimină erorile datorate frecărilor, deformărilor, care apar mai ales în cazul pieselor puțin rigide și din materiale fragile. Se recomandă folosirea lor în cazul prelucrărilor cu viteze și cu temperaturi de așchiere ridicate.

Cercetările efectuate au impus diverse variante ale duzelor de măsurare (*figura 2.13*), care au urmărit îmbunătățirea caracteristicilor statice ale sistemelor pneumatice, în sensul măririi porțiunilor liniare ale acestora ([D8], [G5], [H1], [T2], [V2], [X9]). Astfel, pornindu-se de la forma prezentată în *figura 2.13.a*, s-a obținut acest deziderat prin rotunjirea muchiilor interioare ale duzei (*figura 2.13.b*), prin realizarea unei degajări $x_0 = 0,06$ mm la ieșire (*figura 2.13.c*), prin recurgerea la soluția duzelor ejectoare (*figura 2.13.e*) sau de tip manta (*figura 2.13.g,h*), în acest din urmă caz scăzând însă sensibilitatea sistemului.

Soluțiile constructive adoptate în cazul senzorilor pneumatici cu contact, de tip ventil, (*figura 2.14*) au de asemenea ca scop realizarea unor interstiții de scăpare a aerului care să asigure liniarizarea caracteristicilor statice ([D8], [G5], [V2], [X8]). Acești senzori se recomandă la măsurarea cu joasă presiune a suprafețelor murdare cu ulei, precum și a celor cu rugozitate mare. Forța de măsurare nedepășind $0,3$ daN, uzura palpatoarelor este practic neglijabilă între două reglaje consecutive, ceea ce

denotă posibilitatea neglijării acestei surse în cadrul analizei comparative a erorilor sistematice introduse de măsurarea pneumatică cu și fără contact, prezentată în capitolul al 3-lea.

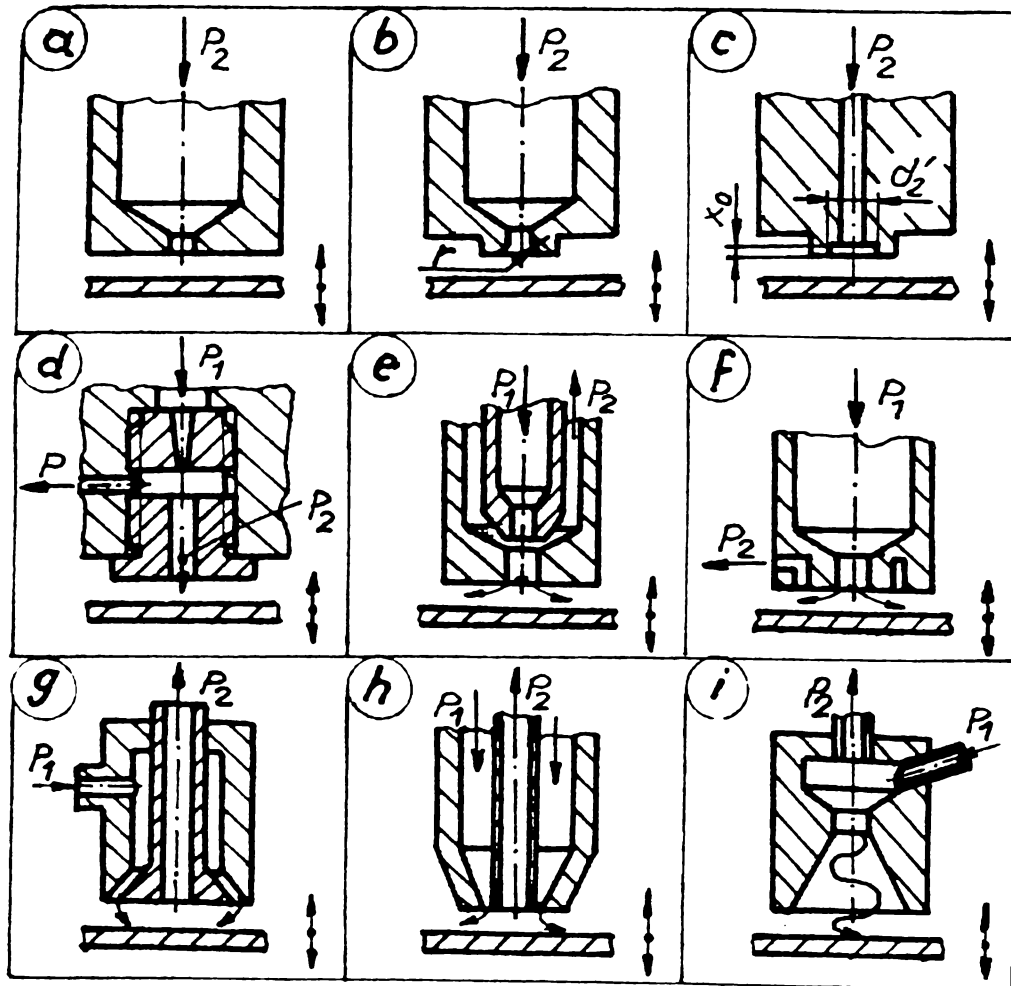


Figura 2.13 Soluții constructive de senzori pneumatici fără contact

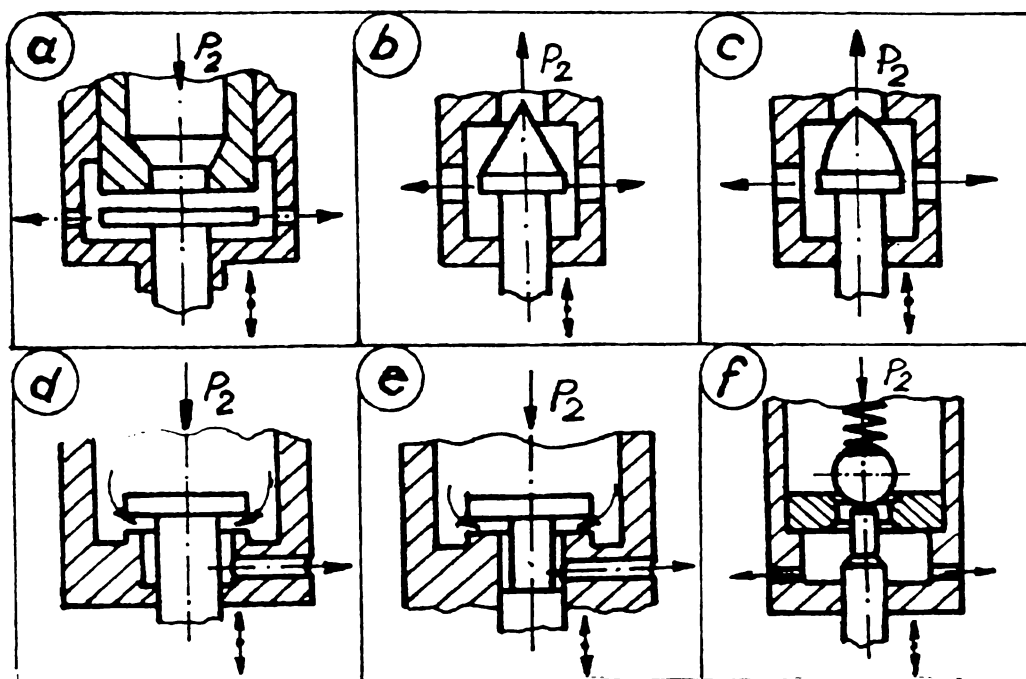


Figura 2.14 Soluții constructive de senzori pneumatici cu contact

Rezultatele evidențiate în literatură ([D12], [D13], [G9], [V2]) pentru senzorii cu duză ejectoare, în ceea ce privește liniaritatea caracteristicii statice, coroborată cu sensibilitatea obținută, recomandă folosirea acestora în sistemele pneumatice de control activ studiate în capitolul al 4-lea.

2.4.1.4. Elemente de amortizare a vibrațiilor

Vibrațiile și șocurile care apar în timpul măsurării suprafețelor cu discontinuități au un efect dăunător asupra integrității și stabilității structurii captorilor. Pentru atenuarea și înlăturarea acestui efect, se introduc elemente de amortizare, de absorbire a șocurilor și vibrațiilor.

Se cunosc mai multe tipuri de amortizoare ([D4], [P1]), fiecare având o serie de avantaje și dezavantaje:

a) Amortizoare cu lichid:

- produc forțe și momente de amortizare importante;
- au gabarit mic;
- au stabilitate termică ridicată;
- necesită o etanșare totală;

b) Amortizoare cu aer:

- produc forțe și momente mici de amortizare;
- au gabarit mic;
- au stabilitate termică ridicată;
- nu necesită etanșare;

c) Amortizoare cu frecare uscată:

- amortizează în special vibrațiile torsionale;
- amortizează în mică măsură vibrațiile longitudinale;
- amortizarea este independentă de viteza de oscilație;

d) Amortizoare magnetoinductive

- produc forțe și momente mici de amortizare, proporționale cu viteza de oscilație;
- au stabilitate termică ridicată;

e) Amortizoare inerțiale:

- amortizează numai vibrațiile torsionale;
- au gabarit mare;

– au o eficacitate ridicată doar în cadrul sistemelor supuse la excitații de frecvență constantă.

În practică, în cele mai multe cazuri se folosesc amortizoarele cu lichid datorită capacității ridicate de amortizare, realizată prin generarea unei forțe de frecare de tip vâscos.

2.4.1.5. Elemente de protecție

Elementele de protecție etanșează captorul împotriva pătrunderii lichidului de răcire–ungere, a șpanului și prafului abraziv. După modul de etanșare, capetele de măsurare se realizează în varianta deschisă sau închisă, practicată de majoritatea producătorilor ([S4], [X9], [X13]).

Protecția poate fi cu elemente pasive – garnituri sau inele O, fixate între carcasă și capace sau conectoare – sau cu elemente active – membrane și burdufuri gofrate, cu pereți subțiri, fixate între carcasă și elementele de contactare.

2.4.2. Unități de acționare

Unitățile de acționare au rolul de introducere, menținere și retragere a captorilor din zona de lucru, constituind un suport mobil de avans al acestora ([N3], [X2]). Ele trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- precizie ridicată de poziționare;
- acționare simplă și rapidă, ușor de automatizat;
- repetabilitate 0,002 mm;
- robustețe și insensibilitate la vibrații;
- imunitate la contaminarea prin praf, șpan, lichid de răcire-ungere.

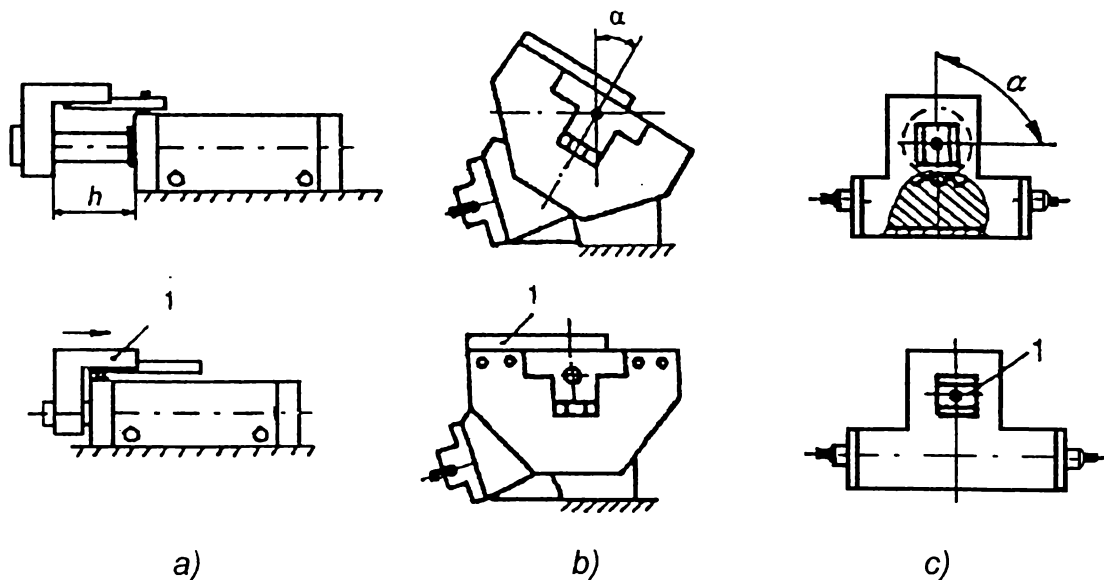


Figura 2.15 Variante de unități de acționare

Forma și dimensiunile unității de acționare depind de tipul mașinii-unelte, de dimensiunile, forma și gabaritul pieselor prelucrate. În funcție de mișcarea care trebuie transmisă, există următoarele tipuri de unități:

a) *cu deplasare liniară (figura 2.15.a)*– cilindri hidraulici cu dublă acționare, pentru controlul suprafețelor cilindrice exterioare;

b) *cu deplasare unghiulară în plan vertical (figura 2.15.b)*– cilindri hidraulici cu simplă acționare, pentru poziționări axiale;

c) *cu deplasare unghiulară în plan orizontal (figura 2.15.c)*– mecanisme pinion-cremalieră pentru transformarea mișcării de translație a cilindrilor hidraulici cu dublă acționare, într-o mișcare de rotație, pentru controlul suprafețelor cilindrice interioare.

Acționarea unităților se face hidraulic, de la sistemul mașinii-unelte sau, dacă acest lucru nu este posibil, pneumatic.

2.4.3. Unități electronice de achiziție, prelucrare, afișare și comandă

Unitatea electronică are rolul de a procesa informația furnizată de sistemul de măsurare propriu-zis, a o compara cu o valoare de referință și de a comanda ciclul de prelucrare, semnalizând în același timp operatorului în mod continuu variația adaosului de prelucrare ([G5], [X8]).

Comparatoarele electronice sunt în construcție modulară, de configurații analogice în marea majoritate a cazurilor și asigură până la patru nivele de comutație reglabile, corespunzătoare ciclurilor de așchiere standard ([S4], [X2], [X7]). Uneori în scopul măririi productivității, a preciziei dimensiunii și a formei geometrice, se recurge la cicluri modificate și anume la retragerea controlată a sculei înaintea finisării pentru relaxarea contactului de așchiere.

2.5. Sisteme pneumatice de control activ al preciziei dimensionale în procesele de rectificare

Mijloacele de control activ se folosesc cu precădere pentru conducerea proceselor de prelucrare finale, în urma cărora piesele trebuie să îndeplinească condițiile de precizie dimensională impuse. Prin urmare, sunt controlate procesele de prelucrare prin strunjire fină, honuire și rectificare, acesta din urmă fiind cel mai reprezentativ.

Sistemele pneumatice de control activ folosite la rectificare sunt, în marea lor majoritate, operaționale, clasificarea acestora fiind prezentată în *figura 2. 16*.

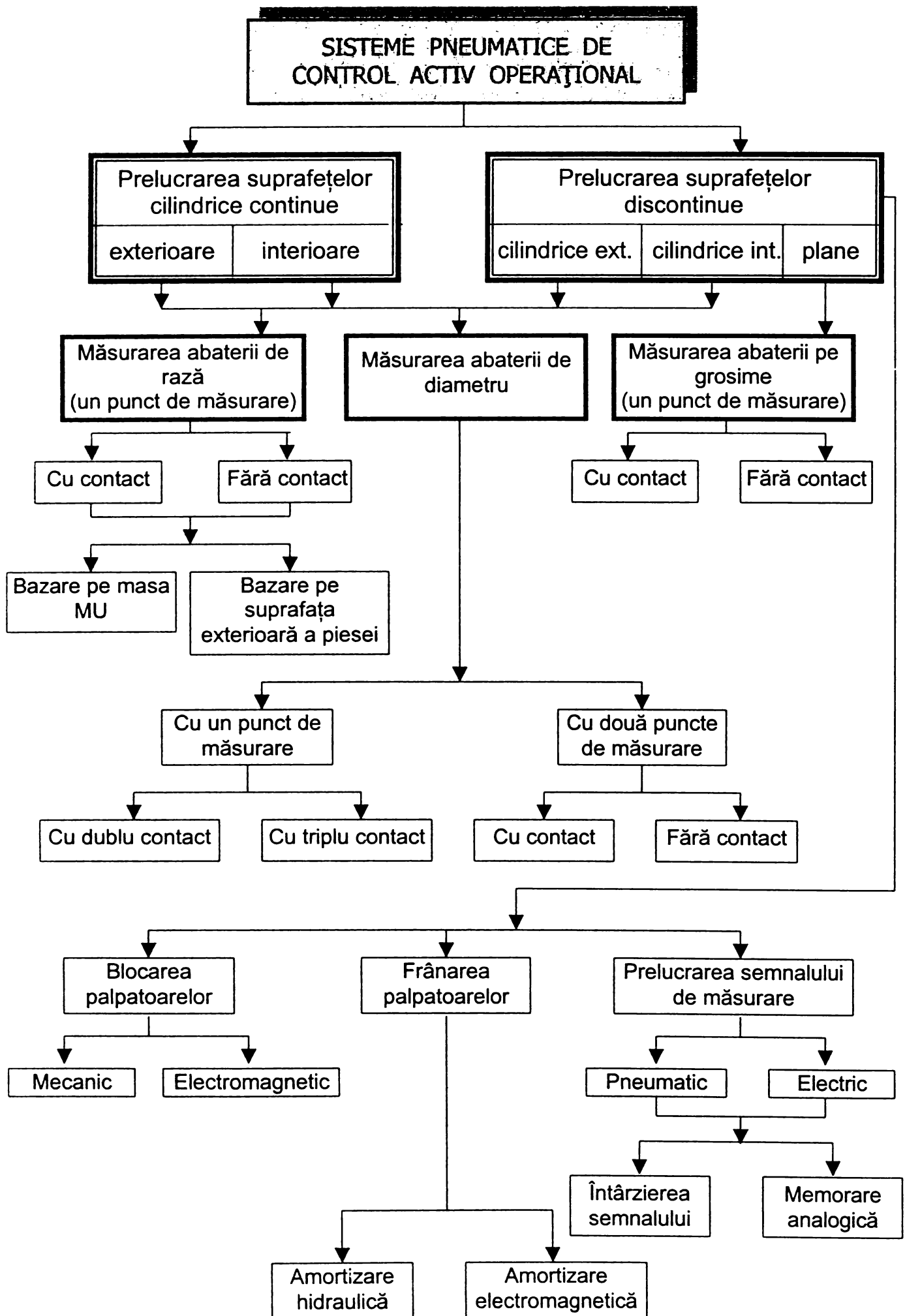


Figura 2.16 Clasificarea sistemelor pneumatice de control activ operațional

2.5.1. Sisteme pneumatice de control activ la rectificarea suprafețelor cilindrice continue exterioare și interioare

Sistemele pneumatice de control activ sunt sisteme de măsurare referențiale, care realizează controlul suprafețelor cilindrice în două variante ([N3]):

- măsurarea abaterii de rază;
- măsurarea abaterii de diametru.

Măsurarea abaterii de rază se poate realiza folosind senzori cu sau fără contact, cu un singur punct de măsurare, bazarea captorilor putându-se realiza în două moduri:

a) Bazarea pe masa mașinii-unelte, rezultatul măsurării fiind influențat de deformarea sistemului tehnologic elastic și de precizia fixării piesei. Ca atare sunt recomandate pentru piesele rigide, prinse între vârfuri fixe. Dintre cele trei variante de dispunere a punctului de măsurare, într-un punct superior al semifabricatului, într-unul diametral opus punctului de așchiere, sau într-un punct inferior, ultima este cea mai indicată, fiind afectată de eroarea minimă și asigurând totodată garanția protejării la manipularea piesei (figura 2.17, [S4]).

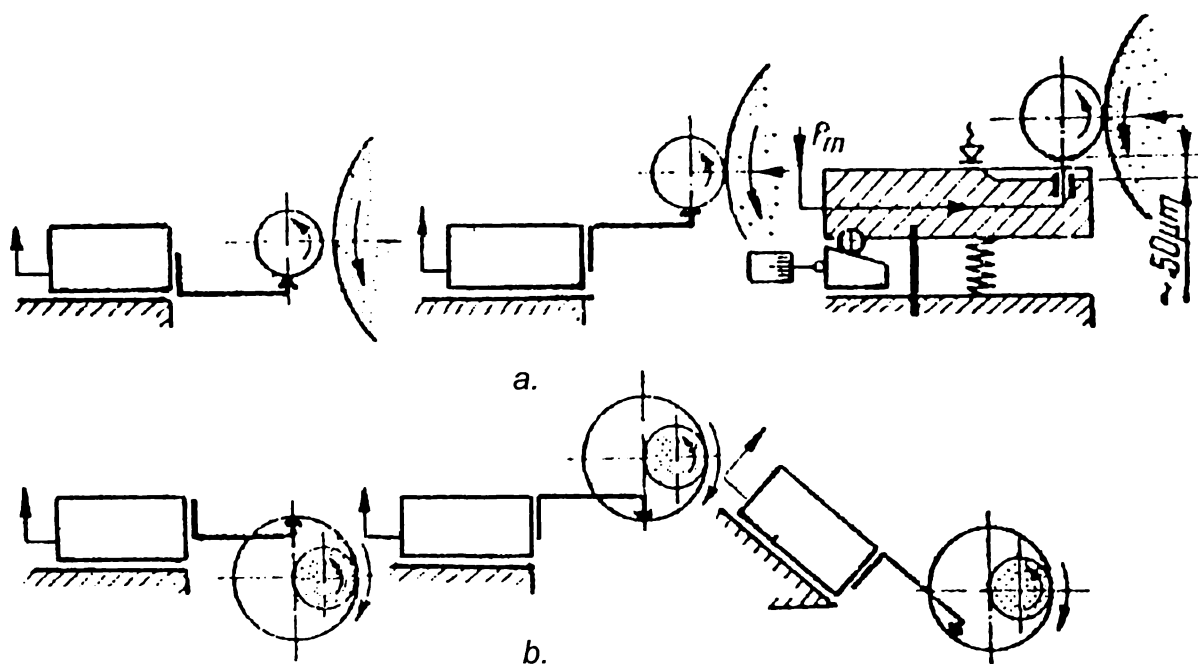


Figura 2.17 Dispunerea optimă a senzorilor la rectificarea exterioară (a) și interioară (b)

b) Bazarea pe suprafața cilindrică exterioară a piesei care se măsoară, utilizată la rectificarea arborilor lungi, sprijiniți suplimentar în linetă. Erorile date de orientarea prin efect de prismă se reduc în cazul stabilirii punctului de măsurare pe o direcție perpendiculară pe bisectoarea unghiului prisme (figura 2.18 [V2]). Figura 2.18.a prezintă o măsurare pneumatică prin compensare, cu contact, folosind un

senzor duză-clapetă, iar *figura 2.18.b* arată măsurarea fără contact cu duză ejectoare.

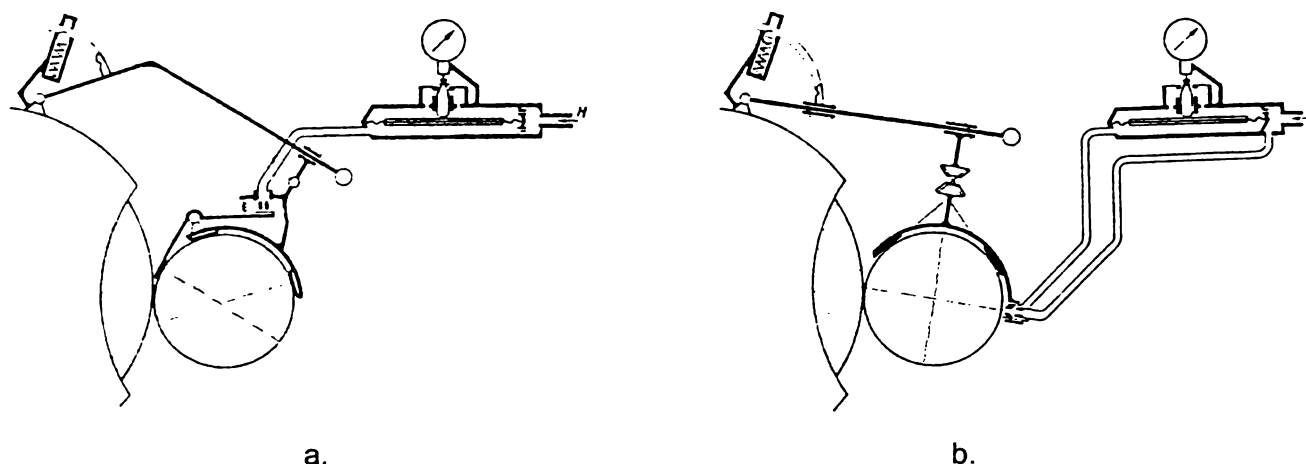


Figura 2.18 Măsurarea pneumatică cu orientarea captorilor prin efect de prismă

Măsurarea abaterii de diametru elimină erorile de măsurare ale abaterii de rază, datorate variației poziției axei piesei în timpul prelucrării, pe direcția componentei tangențiale a forței rezultante de așchiere. Nu necesită punct de referință exterior și se realizează cu captori cu două sau trei puncte de contact.

Captorii cu dublu contact au în componența lor unul sau două traductoare, care sesizează variațiile distanței dintre cele două puncte de contact ale suprafeței care se măsoară cu palpatoarele. Principalul lor avantaj îl constituie precizia măsurării, practic nefiind influențați de deformarea sistemului tehnologic elastic și de perturbatorii de mediu.

În cazul folosirii a două traductoare, semnalele generate se însumează pneumatic sau electronic, fiind apoi prelucrate ca un singur semnal corespunzător mărimii diametrului măsurat. Eroarea de măsurare este însă dublă față de cazul unui singur traductor.

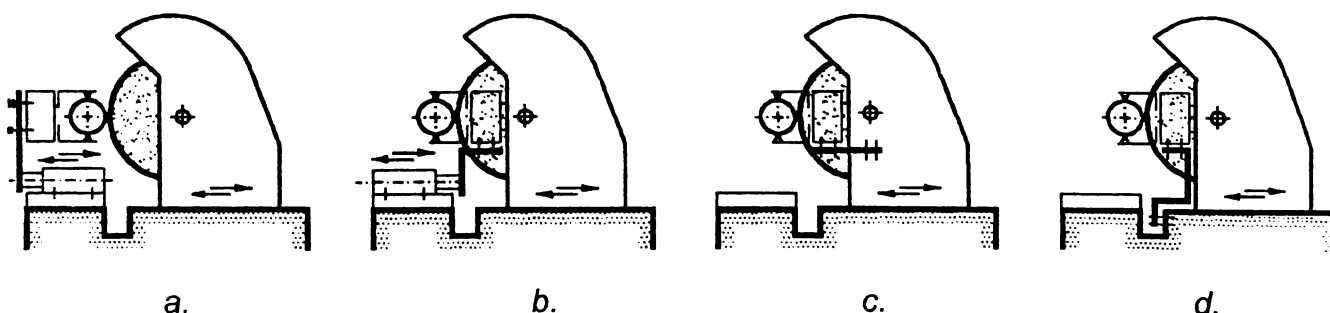


Figura 2.19 Fixarea captorilor cu dublu contact la rectificarea exterioară

Modul de fixare a captorilor pe mașina-unealtă este dictat de prinderea semifabricatului, de accesibilitatea la suprafața prelucrată, dimensiunile, geometria și precizia impusă, tipul mașinii-unelte, forma palpatoarelor.

La prelucrările exterioare (*figura 2.19*, [G5]), cea mai frecventă fixare este pe masa mașinii cu angajare din față (*a*) sau din spatele discului abraziv (*b*) cu un cilindru hidraulic. La fixarea pe păpușa portpiatră (*c*), palpatoarele trebuie să fie cilindrice, cu o eroare de paralelism a generatoarelor de maximum 5 μm , deoarece captorul se deplasează simultan cu avansul tehnologic de pătrundere. O ultimă variantă de fixare este cea pe batiul mașinii-unelte (*d*).

La rectificările interioare (*figura 2.20* [S4], [X13]), apar probleme generate de accesibilitatea redusă în zona de prelucrare. Astfel, captorii pot fi fixați pe masa sau pe batiul mașinii-unelte (*a*) doar pentru diametre interioare mai mari de 30 mm, pe păpușa portpiatră (*b*) sau în interiorul păpușii portpiesă (*c*), dacă acest lucru este permis de construcția mașinii. Planul de măsurare este situat la o distanță de 2...15 mm față de suprafața frontală a piesei, în urma (*a*, *b*) sau în fața (*c*) pietrei de rectificat. La fixarea pe păpușa portpiatră, în cazul diametrelor interioare ale semifabricatelor mai mari de 30 mm, planul de măsurare poate coincide cu cel de prelucrare (*b*).

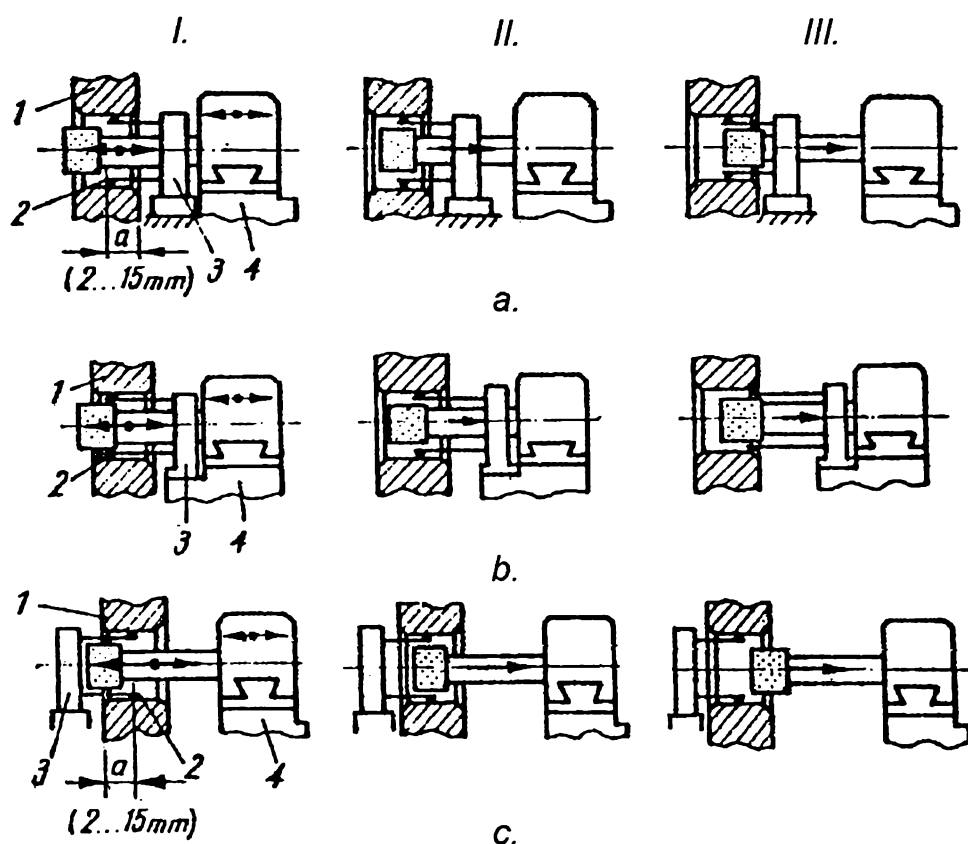


Figura 2.20 Fixarea captorilor cu dublu contact la rectificarea interioară

După aplicabilitate, captorii cu dublu contact sunt realizați fie în variante specializate pentru prelucrări exterioare respectiv interioare, fie în variante universale, cu palpatoare de diverse forme geometrice specifice tipului de prelucrare.

Variantele universale sunt configurate din elemente tipizate care permit lărgirea domeniului dimensiunilor controlate, dar care influențează negativ asupra robusteții captorilor. Indiferent de soluția constructivă adoptată, aceștia sunt prevăzuți cu subansambluri de protecție la lovire, precum și de blocare și memorare la ieșirea din poziția de măsurare.

Captorii cu triplu contact, cu centrare pe diametrul care se prelucrează, au o construcție specifică, sub forma unei potcoave flotante (*figura 2.21*, [M4]). Cele trei puncte de contact cu piesa sunt dispuse pe 180° , contactele 4, de așezare, orientat înclinat cu $3^\circ \dots 8^\circ$ spre piatră și 5, de poziționare, realizând bazarea pe suprafața controlată, iar cel de-al treilea contact fiind de măsurare. Variația distanței dintre punctele de măsurare și de așezare este transmisă traductorului pneumatic 2.

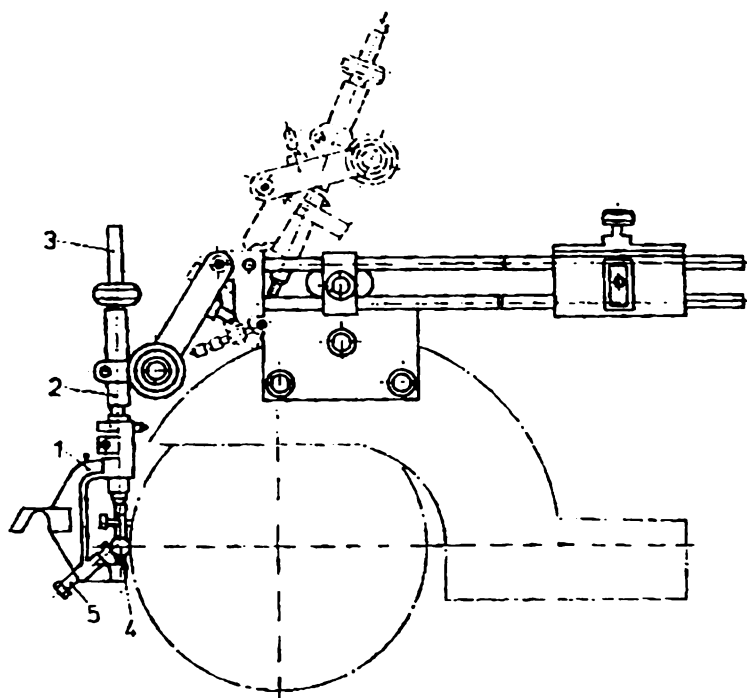


Figura 2.21 Captor pneumatic cu triplu contact la rectificarea exterioară

În cele mai dese cazuri, la captorii cu potcoavă s-a automatizat numai retragerea și ridicarea în poziția de așteptare, prin sprijinire pe tampon fix sau prin împingere cu cilindru hidraulic. Aducerea în situația de măsurare se face manual, iar fixarea se realizează pe apărătoarea pietrei pentru prelucrările cu avans transversal, sau pe păpușile fixă și/sau mobilă pentru cele cu avans longitudinal. În cazurile mai rare de automatizare atât a aducerii cât și retragerii captorilor prin folosirea de cilindrii hidraulici cu dublu efect, fixarea lor se face pe masa sau batiul mașinii-unelte.

La prelucrarea suprafețelor exterioare de diametre mici ($1 \dots 8$ mm), precum și a celor interioare, construcția potcoavelor este ușor diferită față de varianta prezentată, contactul de poziționare, reglabil, sprijinindu-se pe un suport fixat pe

masa mașinii, iar forma celorlalte fiind modificată: cel de măsurare este cilindric, iar cel de așezare pe piesă este plan.

Cele două variante de măsurare a abaterii, de rază și de diametru, precum și numărul punctelor de măsurare și de contact dintre elementele de palpate și obiectul de măsurat, influențează erorile de captare a măsurandului, un studiu detaliat în acest sens fiind prezentat în capitolul al 3-lea.

Din analiza calitativă făcută pe baza informațiilor existente în acest stadiu, se poate aprecia că, din acest punct de vedere, pentru cercetările ulterioare, prezintă interes atât sistemele pneumatice fără contact, cât și cele cu dublu contact, având elemente de captare de formă cilindrică. Alegerea ultimelor se justifică prin excluderea influenței deplasării axei de captare în plan diametral, dar și prin posibilitatea utilizării la măsurarea operațională cu joasă presiune a suprafețelor murdare cu ulei.

2.5.2. Sisteme pneumatice de control activ la rectificarea suprafețelor cilindrice discontinue și a suprafețelor plane

Suprafețele prelucrate prin rectificare în construcția de mașini sunt în proporție de peste 25% discontinue, în cazul celor plane constituind chiar marea majoritate. Sistemele de control activ al acestor suprafețe, nu diferă principial față de cele pentru suprafețe continue, fiind completate cu dispozitive suplimentare necesare pentru rezolvarea următoarelor cerințe ([D14], [D15], [G5], [S4]):

- evitarea introducerii semnalelor false în circuitul de măsurare și comandă;
- prevenirea deteriorării captorilor și a piesei.

Soluționarea problemelor enunțate se face prin adoptarea uneia din următoarele variante principiale:

- blocarea palpatoarelor;
- frânarea palpatoarelor;
- prelucrarea semnalului de măsurare.

Blocarea palpatoarelor se poate realiza în mai multe moduri, din care cel mai simplu este blocarea mecanică prin formă, cu ajutorul palpatoarelor profilate de tip sabot în arc de cerc. Datorită efectului de șoc produs de discontinuitate, a necesității selecționării prealabile a semifabricatelor, precum și a erorilor introduse de metodă, practica a limitat utilizarea captorilor cu saboți la piese cu discontinuități longitudinale înguste, de maximum 10...20 mm și toleranță la dimensiune de 20...30 μm.

O altă variantă este stabilirea condiționată a contactului de măsurare doar pe porțiunile continue ale suprafețelor de măsurat. Coborârea comandată, mecanic sau electric, a palpatoarelor și păstrarea lor în contact cu piesa pe o durată determinată de timp se realizează prin urmărirea unui șablon geometric conjugat formei suprafeței prelucrate, respectiv prin acționarea unui microîntrerupător de punere sub tensiune a bobinei unui electromagnet. Metoda prezintă dezavantajul unei construcții mai complicate, pretinzând introducerea unui subansamblu de blocare și a unui dispozitiv de sincronizare a perioadei de blocare cu cea de trecere a golurilor suprafeței controlate pe sub palpator. Se utilizează cu precădere la rectificarea pieselor plane cu o lungime mai mare de 30 mm cu viteze de avans mici, de până la 10 m/min.

Frânarea palpatoarelor se face prin intermediul amortizoarelor hidraulice sau electromagnetice. Când palpatorul ajunge în dreptul unui gol, el nu cade în acesta, ci coboară cu o viteză de amortizare mică, care trebuie să fie totuși puțin mai mare decât viteza de îndepărtare a adaosului de prelucrare. Forma palpatorului fiind în mod uzual sferică, prin ciocnirea sa de marginea discontinuității se produce ridicarea și urmărirea în continuare a dimensiunii care se prelucrează.

Prelucrarea semnalului de măsurare se realizează pneumatic sau electronic, presupunând fie întârzierea, fie memorarea analogică a acestuia. Frânarea pneumatică se bazează pe inerția proprie metodei de măsurare, ce devine o calitate esențială în problema evitării comenzilor false. Datorită inerției, determinată de variația masei aerului, variația presiunii din camera de măsurare nu poate urmări instantaneu modificarea interstițiului de scăpare a aerului. Prin urmare, la măsurările dinamice, perioada de defilare a discontinuității prin fața senzorului având valori inferioare duratei regimului tranzitoriu, se vor produce modificări mici ale indicației sistemului de control ([D15]).

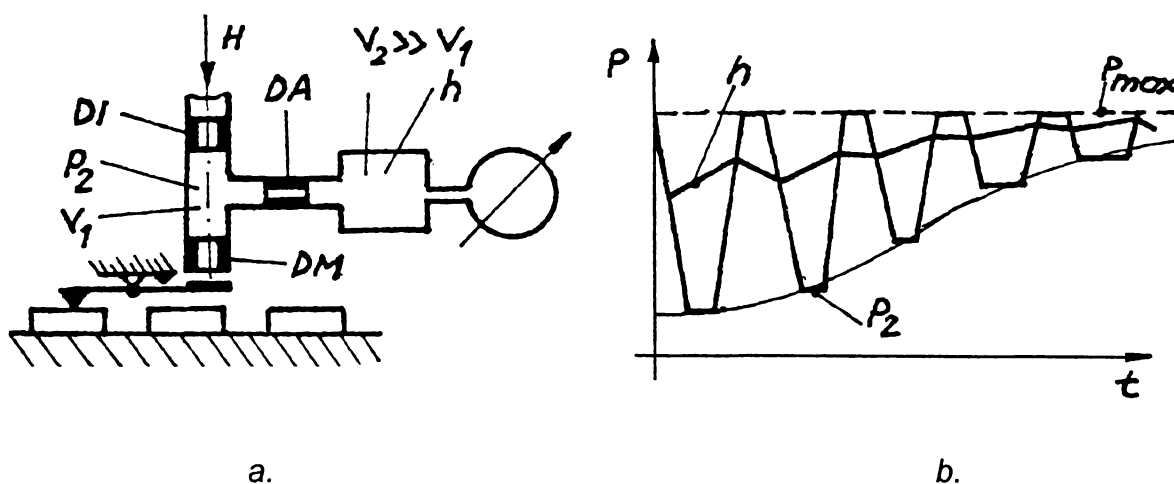


Figura 2.22 Sistem pneumatic de control activ al suprafețelor discontinue

Această modificare poate fi și mai mult atenuată prin introducerea unui volum suplimentar V_2 racordat la camera de măsurare, soluție adoptată în general în practică. Mărirea inerției aparatului duce însă la întâzieri în darea comenzilor ciclului de lucru al mașinii-unelte și deci la creșterea erorilor de prelucrare.

Durata de întârziere se micșorează de 2...3 ori dacă se introduce pe conducta de legătură dintre camera de măsurare de volum V_1 și camera tampon de volum V_2 un drosel de amortizare DA , în fapt un tub capilar (*figura 2.22.a*). Variația pulsatorie a presiunii p_2 din camera de măsurare, determinată de schimbarea bruscă a interstițiului se transmite în camera de volum V_2 cu o amplitudine mult redusă datorită rezistenței droselului, variația presiunii de indicare-comandă h fiind un proces exponențial, similar celui de încărcare-descărcare a unei capacități (*figura 2.22.b*). Îmbunătățirea caracteristicii presiunii $h(t)$ se realizează prin legarea în paralel cu droselul DA a unei supape de întoarcere, care va determina oscilații neînsemnate ale presiunii dinamice în comparație cu mărimea ei statică. În cazul măsurărilor cu contact, sistemele necesită și un opritor prereglabil pentru limitarea căderii palpatorului în discontinuitate.

Frânarea semnalului poate fi realizată și după convertirea sa în semnal electric, caz în care locul droselului DA și a camerei de volum mărit V_2 e luat de un circuit RC , iar rolul supapei de întoarcere de o diodă.

Memorarea analogică a semnalului măsurat presupune introducerea în circuitele de măsurare a unor relee duble cu membrană de comandă pe presiunea maximă sau minimă. Deși simple, aceste construcții pneumatice nu și-au găsit confirmarea definitivă, fiind preferate sistemele cu verigă de memorare electronică, datorită vitezelor de răspuns superioare.

2.6. Sisteme pneumatice de control activ al preciziei formei geometrice a suprafețelor

Sistemele pneumatice de control activ al preciziei formei geometrice nu diferă principial față de cele pentru controlul preciziei dimensionale, majoritatea fiind însă postoperaționale.

În cazul suprafețelor cilindrice, pentru determinarea abaterilor în secțiunea transversală a pieselor, măsurarea se face pe toată circumferința sau după cel puțin patru direcții. Numărul senzorilor de măsurare este de obicei cuprins între unu și

patru, recurgându-se de multe ori la procedeul de măsurare a presiunii diferențiale (figura 2.23.a,b,c) sau prin compensare (figura 2.23.d) ([S5]).

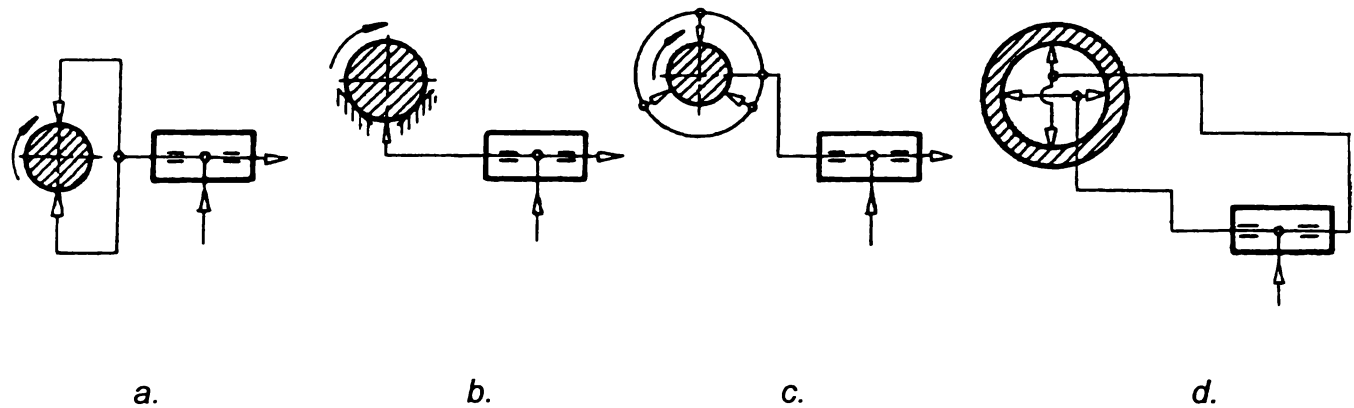


Figura 2.23 Scheme de măsurare pneumatică a abaterilor de la circularitate

De asemenea, se utilizează frecvent măsurarea fără contact, cu ajutorul calibrelor inel (figura 2.24) cu două (a) sau trei duze de măsurare (b) sau a calibrelor potcoavă (figura 2.24.c) în cazul arborilor, respectiv cu ajutorul calibrelor tampon (figura 2.25) cu una, două sau mai multe duze în cazul alezajelor ([M4]). Controlul se execută prin rotirea piesei sau a captorului, cu înregistrarea valorilor extreme pe baza cărora se determină valoarea abaterii de la circularitate.

Necesitatea măsurării piesei pe circumferință sugerează efectuarea *in process* a acesteia, cu ajutorul unor sisteme de control activ multivariabile, care asigură în același timp și precizia dimensională ([X2], [X13], [X15]). Astfel de sisteme se utilizează în special la rectificarea cu avans de pătrundere, la care ovalizarea piesei se datorează și întreruperii bruște a prelucrării, dar precizia determinării abaterii formei geometrice e influențată negativ de inerția proprie metodei pneumatice de măsurare.

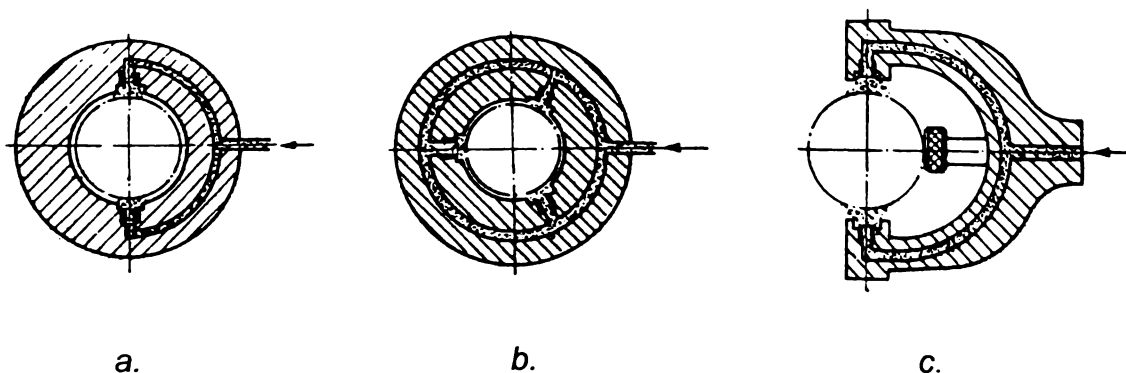


Figura 2.24 Captori pneumatici pentru controlul abaterilor de la circularitate ale arborilor

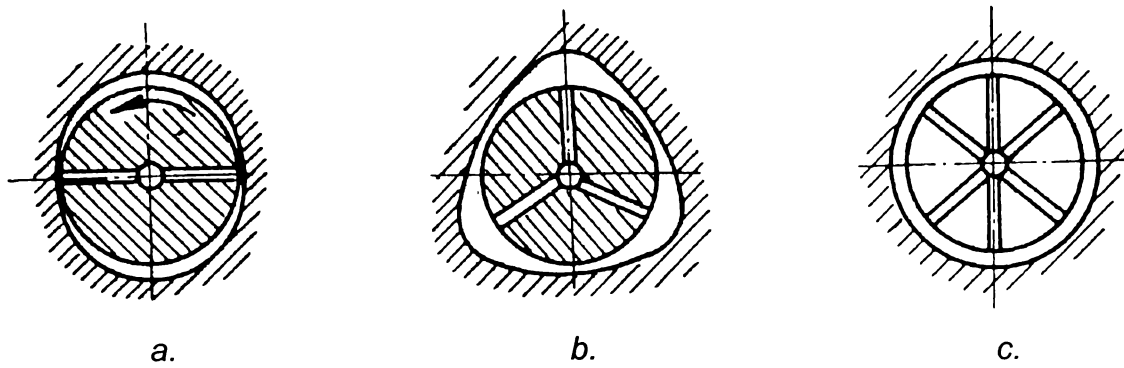


Figura 2.25 Captori pneumatici pentru controlul abaterilor de la circularitate ale alezajelor

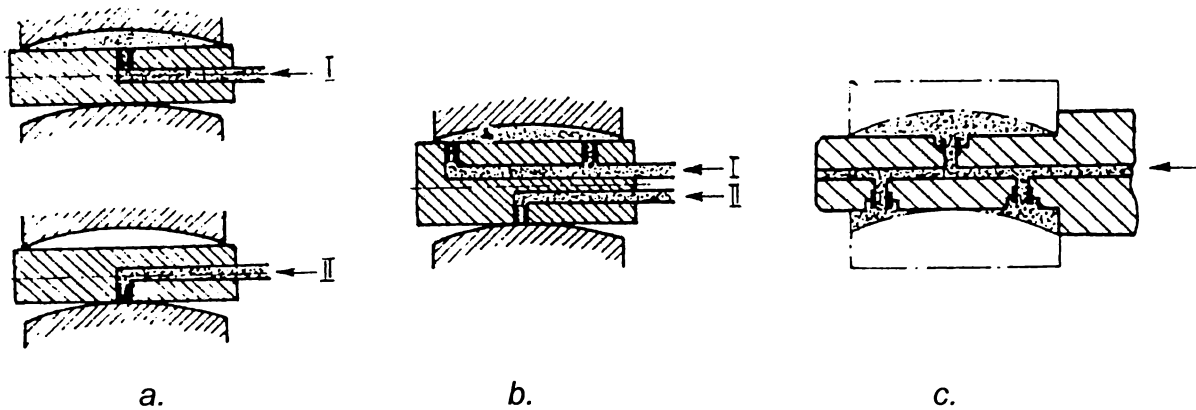


Figura 2.26 Captori pneumatici pentru controlul abaterilor de la cilindricitate ale alezajelor

Pentru măsurarea corectă a abaterilor în secțiunea longitudinală a pieselor cilindrice se impune alegerea corectă a bazelor de referință, măsurarea făcându-se în lungul axei în cel puțin trei plane. Soluțiile constructive ale captorilor pentru controlul abaterilor de la cilindricitate ale alezajelor sunt prezentate în figura 2.26, o mai bună apreciere a formei reale a generatoarei piesei obținându-se cu variantele *b* și *c*, cu câte trei duze de măsurare ([M4]).

2.7. Sisteme pneumatice de control activ al preciziei poziției reciproce a suprafețelor

Controlul activ al poziției reciproce a suprafețelor se face aproape în exclusivitate *post process*, datorită condițiilor dificile de accesibilitate în timpul prelucrării și influenței negative a factorilor perturbatori asupra preciziei de măsurare. Pe de altă parte, datorită imposibilității identificării rapide a cauzelor ce determină aceste abateri, nu e posibilă exercitarea comenzii de corecție în timp real.

În figura 2.27 ([S5]) sunt prezentate câteva scheme de măsurare pneumatică a unor abateri de la poziția reciprocă a suprafețelor: abaterea de la perpendicularitate (*a*, *b*, *c*), bătaia axială (*d*), abaterea distanței dintre axele a două alezaje (*e*). O influență esențială asupra preciziei de măsurare a acestor abateri o au erorile de

instalare a piesei în sistemul de control, deci precizia de materializare a suprafețelor și axelor de referință.

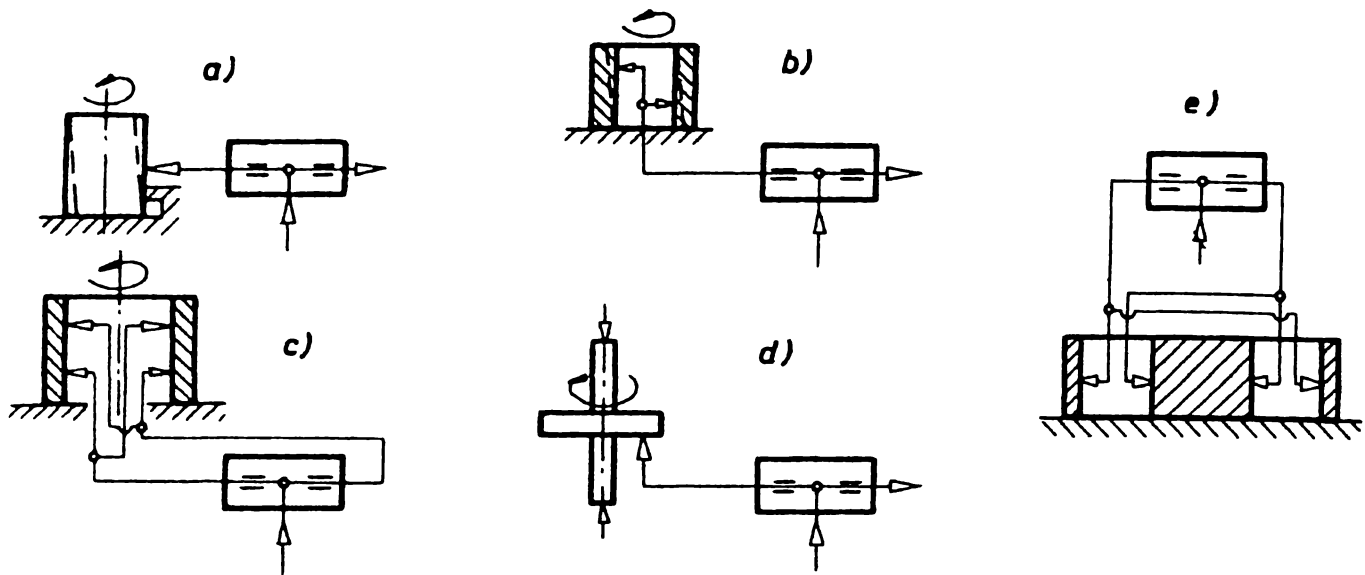


Figura 2.27 Scheme de măsurare pneumatică a abaterilor de la poziția reciprocă

În cele mai multe situații un sistem de control postoperațional determină simultan mai mulți parametri ce definesc precizia de formă și poziția reciprocă a suprafețelor unui reper ([M3]).

2.8. Sisteme pneumatice de control activ al rugozității suprafețelor

Măsurarea rugozității suprafețelor prin folosirea metodei pneumatice se poate realiza în două moduri:

- prin *palpare*, procedeu la care aparatele pneumatice de măsurare realizează măsurarea rugozității printr-o apreciere cantitativă a mărimii microneregularităților suprafeței cercetate;

- cu *aparate integratoare*, metodă care se bazează pe variația interstițiului dintre suprafața piesei și suprafața plană a duzei de măsurare.

În figura 2.28.a este prezentat principiul măsurării prin palpare ([M4]). Se observă că înălțimea înregistrată a rizurilor este mai mică decât cea reală, depinzând de forma vârfului acului palpator. Din considerente de uzură a vârfului, este indicat ca acul de înregistrare să aibă raza la vârf $R \leq 0,2 \mu\text{m}$, ceea ce duce la dificultăți de realizare practică.

La cea de-a doua metodă pneumatică de măsurare a rugozității, cantitatea de aer ce iese din duză, printre muchia duzei și suprafață, depinde de mărimea

rugozității piesei de măsurat. Mărimea secțiunii rămase liberă pentru trecerea aerului (figura 2.28.b) este dată de relația (2.8), care arată dependența direct proporțională între mărimea secțiunii F și înălțimea medie a neregularităților:

$$F = \int_0^l h ds = h_{med} l \quad (2.8)$$

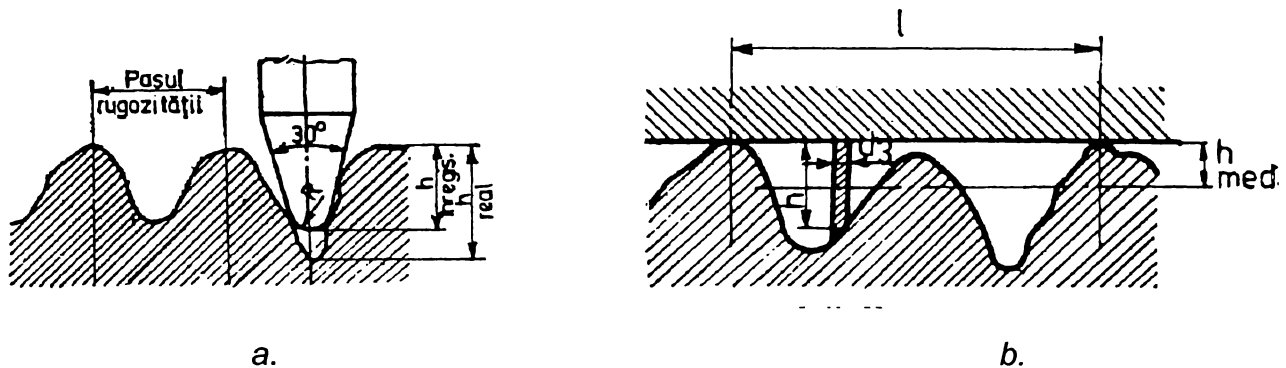


Figura 2.28 Metode de măsurare pneumatică a rugozității suprafețelor

În figura 2.29 sunt prezentate două soluții constructive ale senzorilor pentru măsurarea rugozității suprafețelor cu aparate integratoare ([M4], [W2], [X9]). Aerul pătrunde prin tamponul 1, deasupra ventuzei 2, care datorită resortului 4 se așează etanș pe suprafața de măsurat 3. Membrana elastică din cauciuc 5 permite oscilația ventuzei și obligă aerul să treacă numai prin secțiunea formată de microneregularitățile suprafeței (figura 2.29.a).

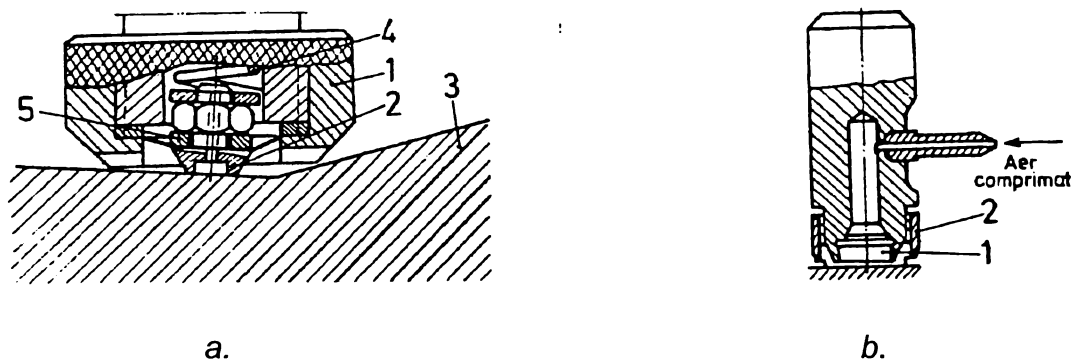


Figura 2.29 Senzori pneumatici pentru măsurarea rugozității prin integrare

La varianta prezentată în figura 2.29.b, duza 1 este așezată pe un inel 2 cu reazem de protecție, asigurându-se o distanță de câțiva micrometri între suprafața de măsurat și suprafața frontală a duzei. La acest tip constructiv de traductor de măsurare, diametrul duzei este cuprins între 0,35...2 mm. Senzorii au fost înglobați în captori pneumatici în formă de tampon, ce au și duze pentru măsurarea diametrului alezajelor, captori care fac parte din sisteme de control activ operaționale. Comanda ciclului de rectificare presupune conducerea prelucrării după dimensiunea controlată și calitatea evaluată a suprafeței.

2.9. Integrarea traductoarelor magnetofluidice în sistemele pneumatice de control activ

Cerințele actuale de prelucrare a pieselor în toleranțe tot mai restrânse au determinat realizarea unor sisteme pneumatice de control activ, care, pe lângă sesizarea cu ușurință a variațiilor dimensionale ale pieselor prelucrate, să asigure rapoarte de amplificare mărite. Acest deziderat s-a îndeplinit prin conceperea unor lanțuri de măsurare cu transformări succesive de mărimi ([C3]).

În plus, pătrunderea tot mai accentuată a automatizării avansate și a sistemelor numerice de procesare a datelor și informațiilor în procesele de prelucrare, deci și în procesele de rectificare cu control activ a condus la necesitatea livrării unei mărimi de ieșire sub forma unui semnal electric unificat, tensiune sau curent.

Din aceste motive s-au integrat în sistemele pneumatice de control traductoare cu fluid magnetic, rezultând lanțul de măsurare prezentat în *figura 2.30* ([A2], [D12], [D16], [G6], [G9]).

Variația interstițiului de scăpare a aerului z , care depinde de variația dimensiunii piesei de prelucrat, este sesizată de comparatorul pneumatic CP, alimentat cu aer la o presiune de intrare prereglată de către regulatorul de presiune RP. Semnalul pneumatic h , care poate fi indicat analogic de către comparatorul pneumatic CP, este aplicat împreună cu presiunea nominală H , reglată de stabilizatorul S, celor două ramuri ale traductorului diferențial magnetofluidic TMF. Diferența de inductivitate ΔL dintre ramurile acestui traductor determină apariția unei tensiuni de dezechilibru ΔU_m pe diagonala de măsurare a punții tensometrice PT, în ale cărei brațe a fost conectat traductorul. Conversia acestei tensiuni se realizează într-un convertor analog-numeric care afișează mărimea de ieșire N .

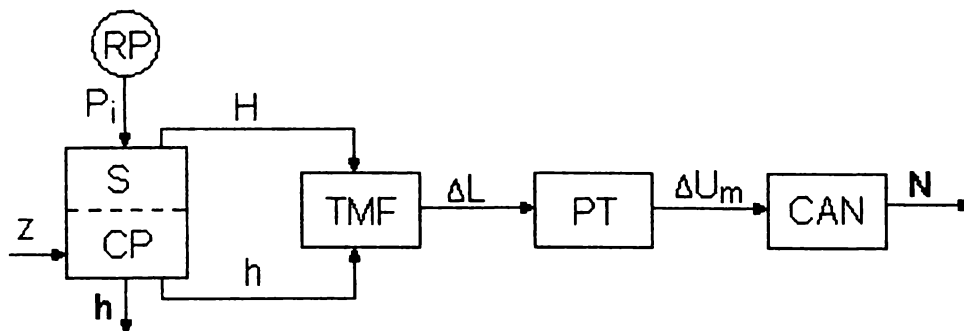
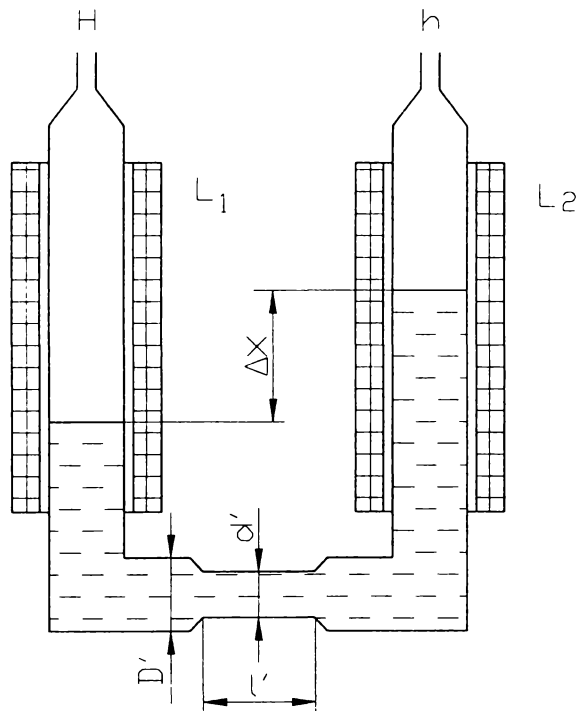


Figura 2.30 Schema funcțională a lanțului de măsurare cu transformări succesive de mărimi

Diferența de inductivitate ΔL dintre ramurile acestui traductor determină apariția unei tensiuni de dezechilibru ΔU_m pe diagonala de măsurare a punții tensometrice PT, în ale cărei brațe a fost conectat traductorul. Conversia acestei tensiuni se realizează într-un convertor analog-numeric care afișează mărimea de ieșire N .

Traductoarele pneumatice magnetofluidice (figura 2.31) sunt dispozitive de



mare sensibilitate, de construcție relativ simplă, ce permit măsurarea presiunilor diferențiale joase și foarte joase ([P2], [P5]).

Ele constau în două tuburi cilindrice verticale din material nemagnetic (sticlă sau teflon), care comunică printr-o zonă orizontală de secțiune micșorată. Tuburile verticale sunt înconjurate de două bobine identice. Fluidul magnetic umple jumătate din lungimea tuburilor. Când diferența Δh a presiunilor din cele două ramuri este nulă, inductivitățile bobinelor sunt identice, semnalul de ieșire electric fiind, de asemenea, nul:

Figura 2.31 Principiul constructiv al traductorului magnetofluidic

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 0 \quad (2.9)$$

Pentru orice diferență de presiune $\Delta h \neq 0$, fluidul magnetic este deplasat în tuburi și inductivitățile bobinelor se schimbă, astfel încât:

$$\Delta L = L_1 - L_2 \neq 0 \quad (2.10)$$

Diferența de inductivitate ΔL este direct proporțională cu presiunea diferențială aplicată Δh .

Fluidele magnetice ([A1], [B7], [L2], [P3]) sunt suspensii coloidale ultrastabile de particule feri-feromagnetice (magnetită – Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , Fe, Co-Ni), dispersate în diverse lichide de bază care își păstrează starea cvasiomogenă chiar și sub acțiunea unui câmp magnetic neuniform intens. Lichidele magnetice au o structură bifazică (S+L), particulele magnetice cu dimensiuni de circa 30..120 Å integrându-se în structura lichidului de bază, de regulă prin intermediul unei substanțe organice tensioactive cu rol de stabilizator, prin formarea unui înveliș elastic al respectivelor particule. Moleculele acestor substanțe formează un strat monomolecular pe fiecare particulă (10^{18} particule/cm³) și realizează cuplajul cu lichidul de bază.

Proprietățile microstructurale reologice, termice, electrice și optice ale ferofluidelor sunt o sumă a proprietăților unui lichid și ale unui mediu magnetizabil ([A3], [P2]).

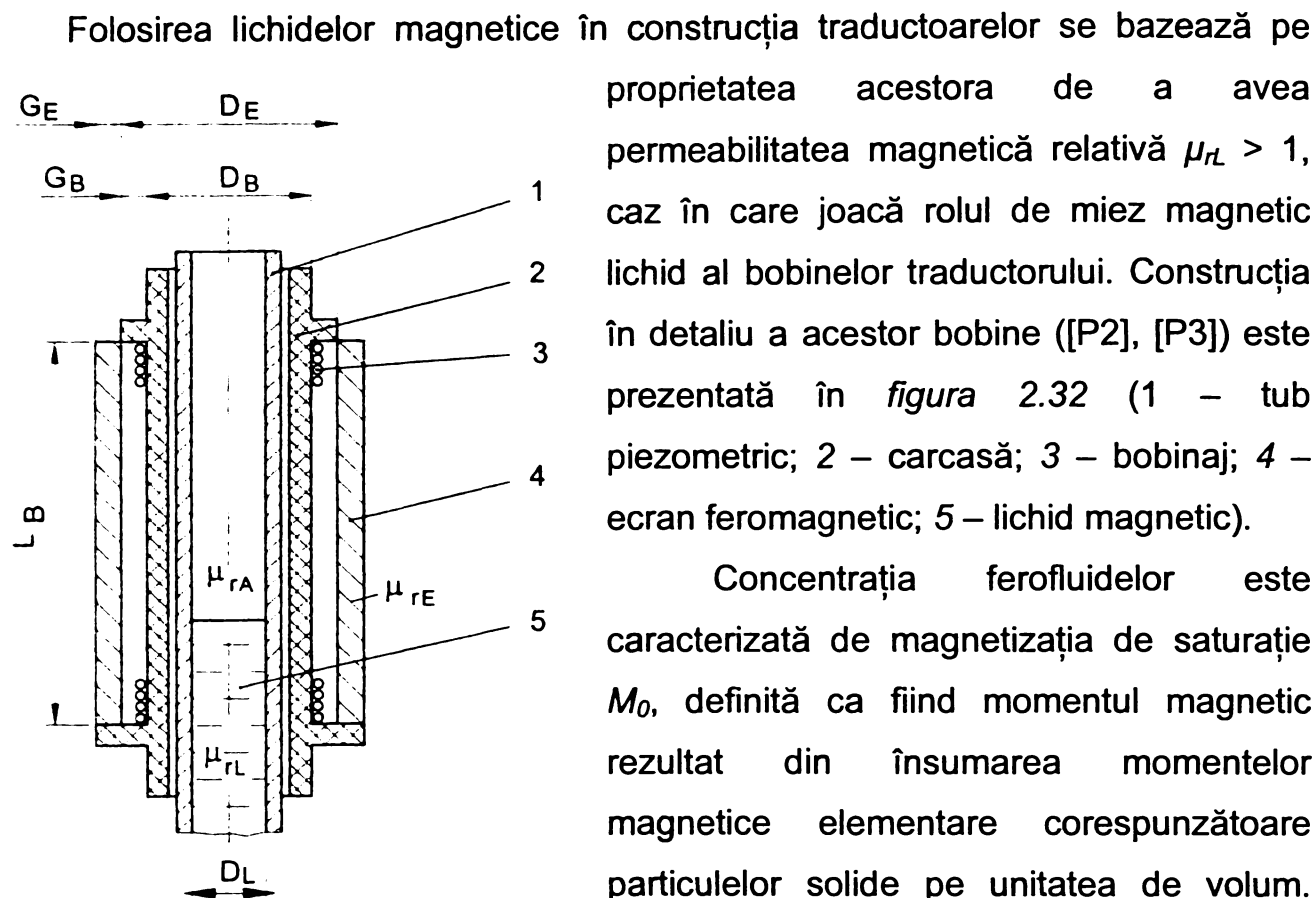


Figura 2.32 Parametrii geometrici ai bobinelor electrice ale traductoarelor magnetofluidice

mărește cu creșterea magnetizației, această variație fiind liniară.

Concentrația ferrofluidelor este caracterizată de magnetizația de saturație M_0 , definită ca fiind momentul magnetic rezultat din însumarea momentelor magnetice elementare corespunzătoare particulelor solide pe unitatea de volum. Sensibilitatea a traductorului este influențată de magnetizația M_0 . Astfel, așa cum reiese din figura 2.33 ([P5]), sensibilitatea se

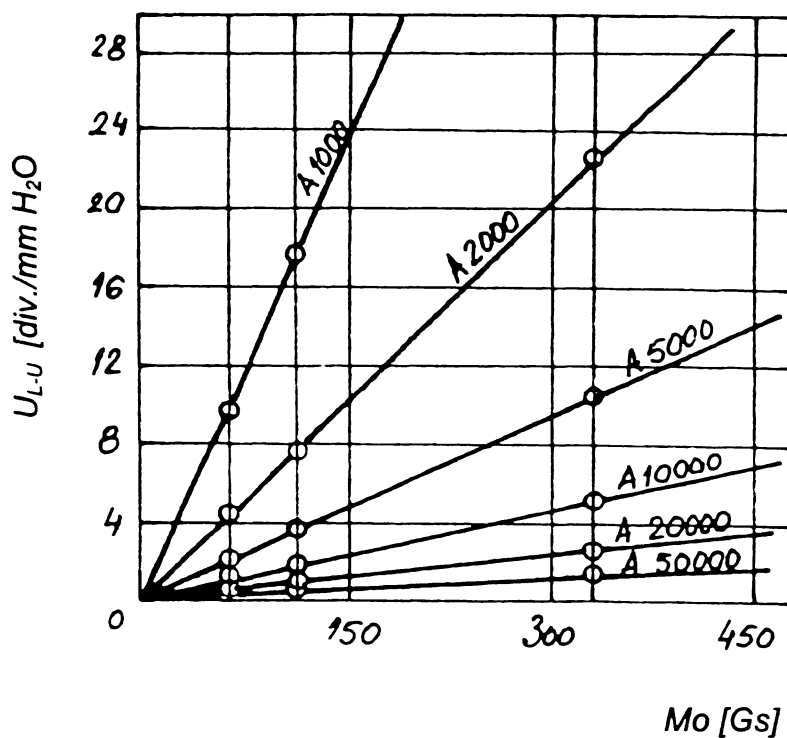


Figura 2.33 Influența magnetizației ferofluidului asupra sensibilității traductorului

Regimul tranzitoriu al traductorului depinde de vâscozitatea cinematică a ferofluidului, după cum rezultă din curbele de relaxare prezentate în figura 2.34 ([P5]). Pentru un fluid magnetic pe bază de petrol ($M_0 = 300$ Gs), cu vâscozitate redusă, coloana de lichid are o mișcare oscilatorie, dar pentru fluide cu vâscozitate mare, cum ar fi uleiul mineral ($M_0 = 327$ Gs), mișcarea devine aperiodică.

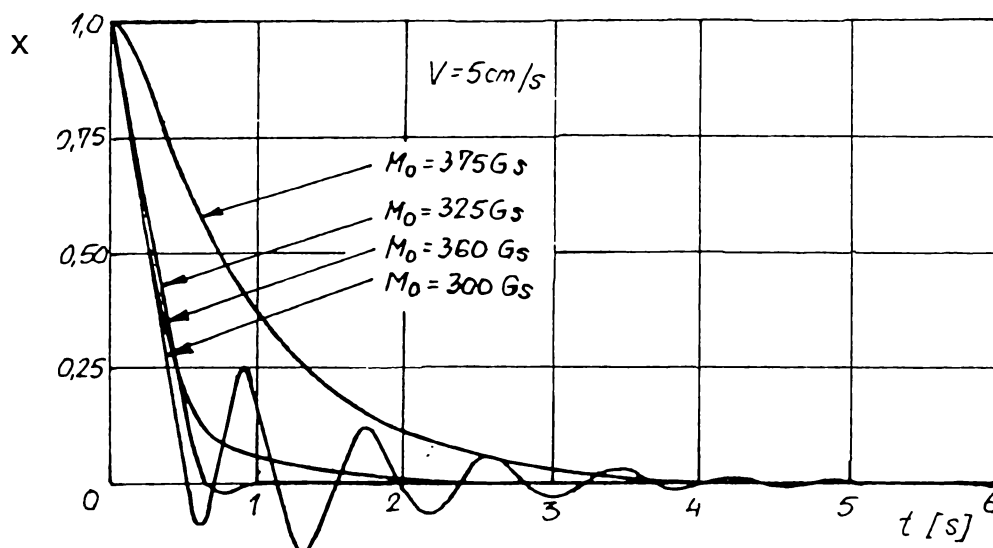


Figura 2.34 Curbele de relaxare ale traductorului magnetofluidic

Sensibilitatea ridicată a traductorului magnetofluidic, precum și conversia semnalului pneumatic în semnal electric unificat de $10 V_{cc}$ la ieșire, justifică implementarea sa în sistemele pneumatice de control activ.

2.10. Perspective ale controlului activ pneumatic în procesele de rectificare

Modernizarea și perfecționarea tehnologiilor de prelucrare și a mașinilor-unelte aferente, diversificarea mare a tipodimensiunilor pieselor prelucrate și tot mai puternica pătrundere a microelectronicii, automatizării avansate, a informaticii și sistemelor numerice de procesare a datelor și informațiilor în procesele de producție din construcția de mașini au condus, în ultimele decenii, la o creștere accentuată a importanței măsurărilor și controlului automat în sistemele de prelucrări mecanice ([N3]).

Această importanță este cu atât mai mare în cazul proceselor de rectificare, cu cât acestea reprezintă prelucrări finale într-un itinerar tehnologic de realizare a unui reper, în urma cărora piesa trebuie să se încadreze în cerințele de precizie impuse de către proiectant. În acest sens, controlul activ constituie una dintre variantele de

automatizare cele mai folosite. Pornind de la stadiul actual al sistemelor de control activ și de la condițiile în care are loc dezvoltarea acestui domeniu, se pot evidenția câteva dintre direcțiile generale de evoluție în viitor:

- creșterea performanțelor și a eficacității sistemelor de control activ în sensul mării preciziei de măsurare, a fiabilității părților componente și a ansamblului;
- inițierea și efectuarea de cercetări tehnico-experimentale referitoare la diferitele categorii de erori de măsurare, la propagarea erorilor în rezultatul final al măsurării, cu evidențierea ponderilor de participare la eroarea totală, la stabilirea performanțelor de duranță și fiabilitate ale sistemelor de control activ;
- conceperea și realizarea de mijloace de control activ destinate măsurării unor reperi cu geometrie complexă;
- efectuarea de cercetări privind modelarea matematică în regim dinamic a procesului de control activ, a influențelor acestui caracter nestatic al măsurării asupra erorilor de măsurare și de comandă a ciclului de rectificare;
- flexibilizarea sistemelor de control activ, îndeosebi a captorilor pneumatici integrați acestora;
- introducerea traductoarelor de înaltă precizie pentru conversia semnalului pneumatic în semnal electric unificat;
- realizarea și dezvoltarea sistemelor de control activ multivariabile și a sistemelor integrate operaționale și postoperaționale;
- introducerea controlului numeric, a microprocesoarelor specializate și dezvoltarea programelor de calculator pentru achiziția și analiza datelor, precum și pentru conducerea procesului de măsurare și prelucrare.

2.11. Concluzii

Cercetările din lucrare se concentrează asupra studiului sistemelor pneumatice pentru controlul activ al preciziei dimensionale, datorită faptului că, pe de o parte această temă de măsurare cunoaște cea mai largă răspândire, iar pe de altă parte pentru că sistemele pentru controlul preciziei formei geometrice, al preciziei poziției reciproce a suprafețelor sau al rugozității reprezintă în marea lor majoritate variante extrapolate ale celor anterioare, rezultate prin multiplicarea punctelor de măsurare, prelucrarea semnalelor pneumatice sau utilizarea unor captori de construcție adecvată.

În principal, aceleași două motive – folosirea preponderentă și gradul ridicat de generalitate – au condus la ideea canalizării cercetărilor asupra obiectelor de măsurat cilindrice, cu suprafețe continue. În raport cu indicatorul tehnologic urmărit – precizia dimensională – pentru tipul de suprafață investigată, ținând cont de cerințele enunțate în debutul paragrafului 2.9, de tendințele de evoluție a prelucrărilor prin rectificare și de posibilitățile de îmbunătățire a performanțelor sistemelor pneumatice de control activ (*figura 1.2*), pe baza cărora s-au jalonat obiectivele tezei de doctorat, s-a optat, în vederea continuării cercetării, pentru concretizarea și analiza unui sistem pneumatic realizat pe baza lanțului de măsurare prezentat în *figura 2.30*.

În această etapă, din motivele amintite în finalul paragrafului 2.5.1, nu s-a adoptat o decizie fermă în utilizarea măsurării cu sau fără contact. Se poate afirma însă, că una din problemele de rezolvat în cazul lanțului de măsurare prezentat este aceea de extindere a porțiunii liniare a caracteristicii comparatorului pneumatic CP, deoarece în cazul indicațiilor digitale nu se pot utiliza decât zonele liniare ale acesteia. Din acest motiv se recurge la măsurarea fără contact cu duză ejectoare (*figura 2.13.e*), folosită uzual în cazul presiunilor înalte.

Revenind la necesitatea luării în considerare și a variantei de măsurare cu contact, aceasta își poate dovedi utilitatea în cazul măsurării operaționale cu joasă presiune, datorită evitării erorilor introduse de lichidul de răcire-ungere, care aderă la semifabricat. În plus, presiunea de dirijare a lichidul de răcire-ungere spre suprafața de prelucrat poate influența eroarea de măsurare a sistemelor pneumatice fără contact, atunci când depășește valoarea de $15 \cdot 10^4$ Pa.

Dezavantajul unor domenii de măsurare mai înguste în cazul măsurării cu contact poate fi limitat prin alegerea corespunzătoare a valorii factorilor de influență, în detrimentul sensibilității sistemului pneumatic – relațiile (2.6), (2.7). Sensibilitatea întregului sistem se poate menține la valori ridicate, prin aplicarea ulterioară a unei amplificări electrice corespunzătoare.

Urmărind punctele de convergență dintre direcțiile de evoluție ale controlului activ pneumatic și obiectivele tezei de doctorat cercetările au parcurs, pentru sistemele precizate anterior următoarele etape succesive:

- analiza teoretică și cuantificarea unor erori specifice măsurării pneumatice, cu și fără contact, care dețin o pondere semnificativă în eroarea de măsurare sistematică și influențează implicit *justețea* sistemului de control activ;

- identificarea pentru sistemul de control activ cercetat a factorilor de influență și alegerea indicatorilor de performanță;
- modelarea analitică și experimentală a sensibilității – indicator metrologic de importanță esențială în caracterizarea performanțelor sistemelor pneumatice de control activ;
- simularea controlului activ pe mașini de rectificat suprafețe cilindrice exterioare, prin reglarea numerică a sistemului și validarea acestuia prin verificarea preciziei de oprire la cotă.

3.

ANALIZA ERORILOR DE MĂSURARE SPECIFICE SISTEMELOR PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV

3.1. Surse de erori la prelucrarea cu control activ

Scopul oricărui proces de prelucrare este obținerea unei precizii impuse de destinația și rolul funcțional al piesei. Gradul de concordanță între parametrii ideali și cei efectivi definește precizia de prelucrare, care e influențată de o sumă de erori ce determină *eroarea totală de prelucrare* ([R1]):

- eroarea de orientare a semifabricatului, respectiv sculei;
- eroarea de fixare;
- eroarea de reglare;
- eroarea de prelucrare propriu-zisă, influențată de caracteristicile sistemului tehnologic și parametrii de reglare prezentați în *figura 2.1*, blocul A;
- eroarea de măsurare.

Deci, precizia de prelucrare este în strânsă legătură cu precizia de măsurare, aceasta din urmă asigurând, în general, certificarea realizării practice a preciziei de prelucrare.

În cazul rectificării cu control activ, funcționarea sistemului reglat fiind dependentă de mărimea adaosului de prelucrare măsurat, se elimină sau se micșorează influența multor erori ale sistemului tehnologic asupra erorii totale de prelucrare, crescând ponderea erorilor de măsurare și comandă, legate de sistemul de control activ. Este de amintit totodată și influența, în cazul controlului activ

operațional, a unor componente ale erorii totale de prelucrare enumerate mai sus asupra erorii totale de măsurare.

Prelucrarea cu control activ fiind comparativă, în urma realizării reglajului cu un etalon, abaterile de la valoarea nominală, cu caracter sistematic, ale mărimilor de intrare ale sistemului, fie nu intervin direct în influențarea preciziei de prelucrare, fie influența acestora se compensează prin corecția comenzii de oprire a operației de rectificare la atingerea cotei finale, în funcție de rezultatele controlului postoperațional. Însă, modificările în timp ale acestor abateri afectează precizia, putându-se vorbi de abaterea abaterii, considerată eroare de gradul doi. Deci, precizia reală a sistemului provine din natura sa funcțională și din eliminarea erorilor primare ale componentelor sale, fiind în funcție doar de erorile de gradul doi ale acestor componente ([C1]).

Prin urmare, calitatea sistemului de prelucrare în ansamblul său depinde în mod esențial de acuratețea operației de măsurare, fiind necesară o analiză aprofundată a *erorii totale de măsurare*. Aceasta rezultă prin însumarea a două categorii de erori: sistematice și aleatoare. În timp ce erorile aleatoare pot fi evidențiate doar pe cale experimentală, cele sistematice pot fi determinate aprioric, luând în considerare, pentru diversele cazuri concrete, sursele care generează aceste erori. În schimb, este imposibilă separarea componentelor erorilor sistematice în cadrul erorii totale experimentale.

Ținând cont de influența importantă asupra preciziei pieselor obținute prin rectificare cu control activ exercitată de erorile sistematice, este utilă evaluarea lor cu ajutorul unor modele matematice adecvate și adoptarea unor soluții pentru diminuarea sau anihilarea lor. Condițiile de măsurare conduc la generarea de erori având ca surse procesul propriu-zis, diferitele părți componente ale sistemului tehnologic elastic, deci erori care se manifestă la captarea măsurandului, precum și erori care intervin pe parcursul transmiterii și prelucrării semnalelor.

Sistematizând diferitele categorii de erori care afectează eroarea limită totală, aceasta poate fi exprimată prin relația ([B1], [D7], [G6], [M2], [M3], [N1], [N3], [S5]):

$$\varepsilon_t = f(\varepsilon_{er}, \varepsilon_{sc}, \varepsilon_{op}, \varepsilon_p, \varepsilon_{int p}, \varepsilon_{int m}, \varepsilon_{med}) \quad (3.1)$$

unde:

ε_{er} – eroarea datorată etaloanelor de reglare;

ε_{sc} – eroarea datorată sistemului de control, determinată de:

– principiul de măsurare utilizat;

- precizia de prelucrare și montaj a elementelor și mecanismelor sistemului de control;
- eroarea de coardă;
- precizia de reglare și poziționare;
- gradul de uzură al palpatoarelor și al dispozitivelor de ghidare;
- gradul de inerție al semnalelor captate și transmise;
- deriva de zero.

ε_{op} – eroarea datorată operatorului;

ε_p – eroarea datorată piesei, determinată de:

- precizia de instalare a piesei;
- precizia formei geometrice, a poziției reciproce și a calității suprafețelor.

$\varepsilon_{int p}$ – eroarea datorată interacțiunii dintre sistemul tehnologic de prelucrare și piesă, dată de:

- deformațiile termice ale sistemului tehnologic;
- deformațiile elastice ale sistemului tehnologic, cauzate de componentele forței rezultante de așchiere;
- vibrații ale sistemului tehnologic;
- presiunea lichidului de răcire-ungere.

$\varepsilon_{int m}$ – eroarea datorată interacțiunii dintre sistemul de control și piesă, dată de:

- deformațiile de contact cauzate de mărimea și neuniformitatea forțelor de măsurare și de duritatea suprafețelor de controlat;
- deformațiile elastice ale elementelor sistemului de control și piesei, datorate forței de măsurare și greutatei proprii.

ε_{med} – eroarea datorată mediului ambiant, determinată de:

- temperatură;
- umiditatea și puritatea aerului;
- presiunea atmosferică;
- latitudinea geografică;
- apariția de câmpuri electromagnetice;
- vibrații.

O parte din sursele enumerate vor genera erori ale căror expresii sunt comune mai multor procese de măsurare. Există însă și erori ale căror expresii au o formă particulară, specifică controlului activ pneumatic, care vor fi analizate separat pentru măsurarea cu și fără contact.

3.2. Erori de captare la măsurarea fără contact

3.2.1. Eroarea de captare cauzată de curbura suprafeței de măsurat

La măsurarea fără contact a suprafețelor cilindrice apare o eroare sistematică datorată curburii suprafeței piesei de măsurat ([M4], [S4]). Această curbura face ca aria suprafeței reale de scăpare a aerului să difere de cea teoretică, obținută în cazul măsurării suprafețelor plane. Astfel, relația (2.4), va deveni:

$$A_{2C} = A_2 \pm A_S = \pi \cdot d_2 \cdot z \pm A_S \quad (3.2)$$

în care semnul "+" se adoptă la măsurarea suprafețelor cilindrice exterioare, iar semnul "-" la măsurarea celor interioare.

Prin urmare, valoarea presiunii de măsurare h , nu va fi determinată de un interstițiu z care depinde de dimensiunea controlată, ci de un interstițiu z' mai mare, în cazul măsurărilor exterioare, respectiv de un interstițiu z'' mai mic, în cazul celor interioare:

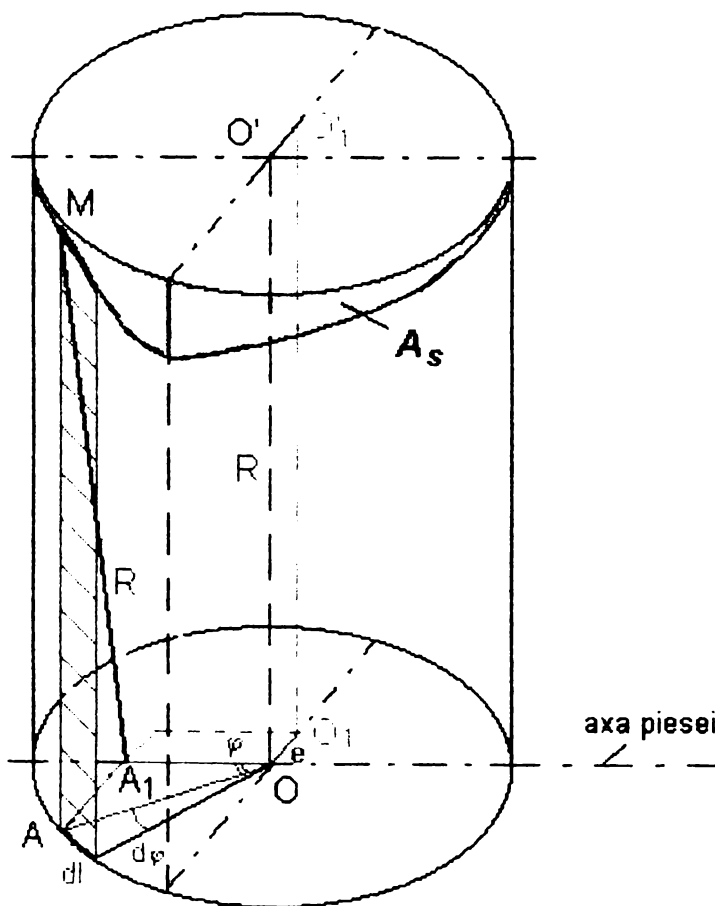


Figura 3.1. Determinarea ariei suplimentare A_S

$$z' = \frac{A_{2C}}{\pi \cdot d_2} = z + \frac{A_S}{\pi \cdot d_2} = z + \Delta z_1 \quad (3.3)$$

$$z'' = z - \frac{A_S}{\pi \cdot d_2} = z - \Delta z_1 \quad (3.4)$$

Pentru calculul ariei suplimentare A_S și a erorii de curbura Δz_1 , în figura 3.1 s-a reprezentat un cilindru imaginat, ale cărui axă și diametru d_2 coincid cu cele ale duzei de măsurare. Acest cilindru este limitat inferior de planul axial al piesei cilindrice de diametru D , perpendicular pe axa duzei, iar superior de planul paralel, tangent la suprafața piesei. Aria laterală A_S , marcată pe figură este delimitată de curba de intersecție a doi cilindri cu axe perpendiculare și poate fi

calculată cu relația:

$$A_S = A_{cil} - A_L \quad (3.5)$$

în care:

A_{cil} – aria laterală a cilindrului imaginar;

A_L – aria laterală rezultată din însumarea suprafețelor elementare hașurate;

$$A_{cil} = l_1 \cdot R = \frac{1}{2} \pi \cdot d_2 \cdot D \quad (3.6)$$

$$A_L = \int_0^{l_1} \overline{AM} \, dl \quad (3.7)$$

unde:

$R = D/2$ – raza piesei care se măsoară, egală cu înălțimea cilindrului;

l_1 – circumferința cercului de bază al cilindrului.

Din $\triangle OA_1A$ ($A_1 = 90^\circ$):

$$\overline{AA_1} = \overline{OA_1} \cdot \sin \varphi = \frac{d_2}{2} \cdot \sin \varphi \quad (3.8)$$

Ținând cont de relația precedentă și de faptul că punctul M se găsește și pe suprafața piesei de măsurat, se poate determina segmentul \overline{AM} din $\triangle A_1AM$ ($\hat{A} = 90^\circ$):

$$\overline{AM} = \sqrt{A_1M^2 - \overline{AA_1}^2} = \sqrt{R^2 - \frac{d_2^2}{4} \cdot \sin^2 \varphi} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{D^2 - d_2^2 \cdot \sin^2 \varphi} \quad (3.9)$$

$$dl = \frac{d_2}{2} d\varphi \quad (3.10)$$

Înlocuind relațiile (3.9) și (3.10) în (3.7) obținem:

$$A_L = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cdot \sqrt{D^2 - d_2^2 \cdot \sin^2 \varphi} \cdot \frac{d_2}{2} d\varphi = \frac{d_2 \cdot D}{4} \cdot \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \frac{d_2^2}{D^2} \sin^2 \varphi} \, d\varphi \quad (3.11)$$

Substituind în (3.10) expresiile (3.6) și (3.11), aria suplimentară devine:

$$A_S = \frac{d_2 \cdot D}{4} \cdot \left(2\pi - \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{D}\right)^2 \sin^2 \varphi} \, dl \right) \quad (3.12)$$

În final, eroarea cauzată de curbura suprafeței de măsurat poate fi determinată cu relația:

$$\Delta z_1 = \frac{A_s}{\pi \cdot d_2} = \frac{D}{4\pi} \cdot \left(2\pi - \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{D}\right)^2 \sin^2 \varphi} dl \right) \quad (3.13)$$

Pentru cuantificarea acestei erori s-a elaborat un program de calcul, care să permită utilizarea facilităților oferite de mediul Excel ([N4], [W2]). Integrala s-a determinat prin însumarea ariilor unor trapeze elementare. Programul-sursă, scris în Visual Basic ([B4]), realizează calculul și reprezentarea grafică a expresiei (3.13) pentru diferite valori ale diametrelor duzei de măsurare d_2 și piesei controlate D .

În *tabelul 3.1* sunt prezentate valorile erorii cauzate de curbura suprafeței de măsurat, pentru dimensiuni ale piesei cuprinse între 10...100 mm și diferite diametre ale duzei de măsurare, iar în *figura 3.2* este reprezentată variația acestei erori.

Tabelul 3.1. Eroarea de captare cauzată de curbura suprafeței de măsurat ($D > 10$ mm)

| Diametrul piesei D [mm] | Eroarea de curbură Δz_1 [μm] | | | | | | |
|---------------------------------|---|----------------|--------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------|
| | Diametrul duzei de măsurare d_2 [mm] | | | | | | |
| | $d_{21} = 1$ | $d_{22} = 1.5$ | $d_{23} = 2$ | $d_{24} = 2.25$ | $d_{25} = 2.5$ | $d_{26} = 2.75$ | $d_{27} = 3$ |
| 10 | 12.5235 | 28.2448 | 50.3814 | 63.8950 | 79.0652 | 95.9157 | 114.4733 |
| 15 | 8.3403 | 18.7853 | 33.4453 | 42.3672 | 52.3578 | 63.4237 | 75.5721 |
| 20 | 6.2529 | 14.0774 | 25.0471 | 31.7161 | 39.1777 | 47.4345 | 56.4896 |
| 25 | 5.0015 | 11.2576 | 20.0241 | 25.3511 | 31.3088 | 37.8987 | 45.1222 |
| 30 | 4.1675 | 9.3794 | 16.6806 | 21.1160 | 26.0757 | 31.5602 | 37.5706 |
| 35 | 3.5720 | 8.0385 | 14.2945 | 18.0944 | 22.3428 | 27.0403 | 32.1873 |
| 40 | 3.1254 | 7.0331 | 12.5059 | 15.8297 | 19.5456 | 23.6538 | 28.1547 |
| 45 | 2.7780 | 6.2513 | 11.1152 | 14.0691 | 17.3712 | 21.0217 | 25.0209 |
| 50 | 2.5002 | 5.6259 | 10.0030 | 12.6611 | 15.6323 | 18.9170 | 22.5152 |
| 55 | 2.2729 | 5.1143 | 9.0932 | 11.5093 | 14.2101 | 17.1956 | 20.4660 |
| 60 | 2.0834 | 4.6880 | 8.3351 | 10.5497 | 13.0251 | 15.7614 | 18.7588 |
| 65 | 1.9232 | 4.3274 | 7.6937 | 9.7378 | 12.0226 | 14.5482 | 17.3146 |
| 70 | 1.7858 | 4.0182 | 7.1440 | 9.0419 | 11.1634 | 13.5084 | 16.0770 |
| 75 | 1.6667 | 3.7503 | 6.6676 | 8.4389 | 10.4188 | 12.6073 | 15.0045 |
| 80 | 1.5625 | 3.5159 | 6.2507 | 7.9113 | 9.7674 | 11.8190 | 14.0662 |
| 85 | 1.4706 | 3.3090 | 5.8830 | 7.4458 | 9.1927 | 11.1235 | 13.2384 |
| 90 | 1.3889 | 3.1252 | 5.5561 | 7.0321 | 8.6818 | 10.5053 | 12.5026 |
| 95 | 1.3158 | 2.9607 | 5.2636 | 6.6619 | 8.2248 | 9.9522 | 11.8443 |
| 100 | 1.2500 | 2.8126 | 5.0004 | 6.3287 | 7.8134 | 9.4545 | 11.2519 |

Valorile obținute și reprezentate arată influența deosebită a diametrului duzei de măsurare asupra erorii de curbură Δz_1 , influență care se estompează pe măsura creșterii diametrului piesei de măsurat. De altfel, pentru valori mai mari de 55 mm ale

acestui diametru, eroarea nu depășește 20 μm , cu excepția cazului folosirii unei duze de diametru $d_2 = 3 \text{ mm}$, când eroarea se situează puțin peste această valoare.

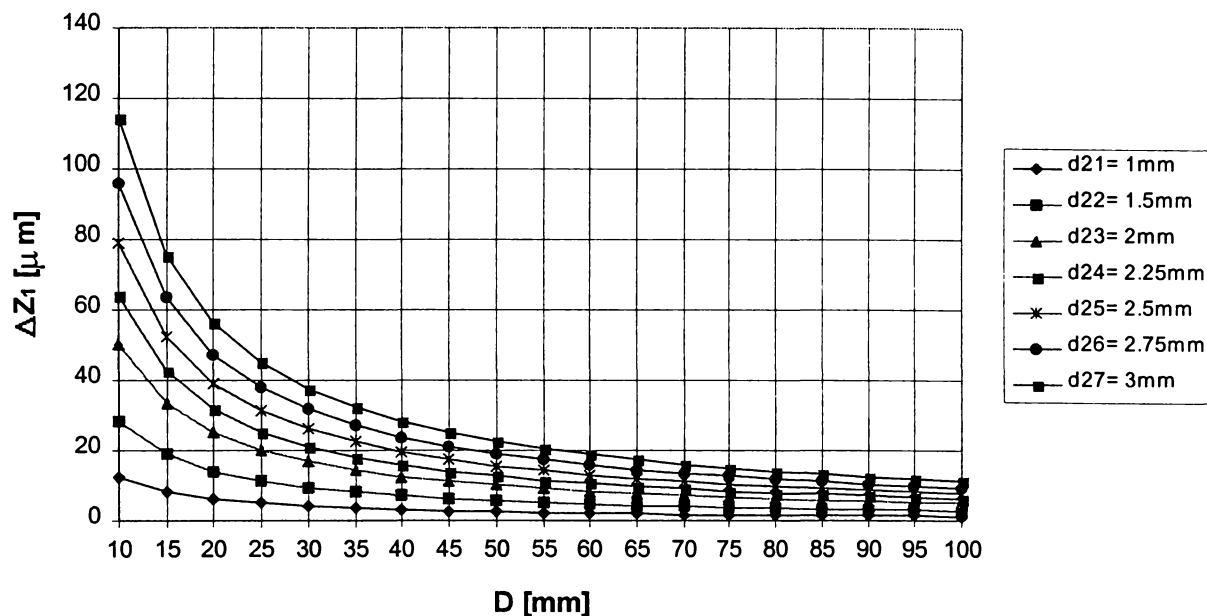


Figura 3.2. Influența diametrului piesei de măsurat asupra erorii de curbură
($D = 10 \dots 100 \text{ mm}$)

Problemele specifice care apar la prelucrarea/măsurarea pieselor de diametre $D < 10 \text{ mm}$, legate de rigiditatea scăzută și curbura mare a suprafeței, implică limitări ale forțelor de așchiere și măsurare, ale dimensiunilor constructive ale elementelor de captare și deci, o analiză separată. Rezultatele obținute prin utilizarea programului de calcul amintit sunt prezentate în tabelul 3.2, respectiv figura 3.3. Ele sugerează necesitatea micșorării, în unele situații, a diametrului duzei de măsurare, în scopul asigurării preciziei necesare.

Tabelul 3.2. Eroarea de captare cauzată de curbura suprafeței de măsurat ($D < 10 \text{ mm}$)

| Diametrul piesei D [mm] | Eroarea de curbură Δz_1 [μm] | | | | | | |
|---------------------------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|----------------|
| | Diametrul duzei de măsurare d_2 [mm] | | | | | | |
| | $d_{21} = 1$ | $d_{22} = 1.2$ | $d_{23} = 1.4$ | $d_{24} = 1.6$ | $d_{25} = 1.8$ | $d_{26} = 2$ | $d_{27} = 2.2$ |
| 5 | 25.1907 | 36.3984 | 49.7449 | 65.2844 | 83.0828 | 103.2195 | 125.7894 |
| 5.5 | 22.8701 | 33.0253 | 45.1018 | 59.1392 | 75.1853 | 93.2970 | 113.5414 |
| 6 | 20.9431 | 30.2288 | 41.2599 | 54.0664 | 68.6840 | 85.1551 | 103.5290 |
| 6.5 | 19.3170 | 27.8718 | 38.0267 | 49.8047 | 63.2335 | 78.3454 | 95.1780 |
| 7 | 17.9261 | 25.8577 | 35.2670 | 46.1721 | 58.5950 | 72.5608 | 88.0989 |
| 7.5 | 16.7226 | 24.1164 | 32.8832 | 43.0378 | 54.5977 | 67.5830 | 82.0171 |
| 8 | 15.6711 | 22.5958 | 30.8031 | 40.3051 | 51.1160 | 63.2522 | 76.7326 |
| 8.5 | 14.7443 | 21.2563 | 28.9718 | 37.9009 | 48.0554 | 59.4487 | 72.0964 |
| 9 | 13.9212 | 20.0672 | 27.3470 | 35.7691 | 45.3433 | 56.0808 | 67.9947 |
| 9.5 | 13.1854 | 19.0044 | 25.8955 | 33.8655 | 42.9229 | 53.0772 | 64.3393 |
| 10 | 12.5235 | 18.0489 | 24.5908 | 32.1553 | 40.7494 | 50.3814 | 61.0604 |

Referitor la valorile *tabelelor 3.1 și 3.2*, ținând cont de faptul că sistemele pneumatice de control activ sunt referențiale, acestea nu trebuie tratate în marea majoritate a cazurilor ca erori de captare propriu-zise, care contribuie la eroarea totală de măsurare. Astfel, considerând că reglarea la zero a sistemului se face cu un etalon de diametru D_E , între indicația curentă a aparatului și valoarea reală a diametrului măsurat, există o eroare dată de curbura suprafeței, care se determină cu relația:

$$\Delta z_{1E} = \frac{D_E}{4\pi} \left(2\pi - \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{D_E}\right)^2 \sin^2 \varphi} dl \right) - \frac{D}{4\pi} \left(2\pi - \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{D}\right)^2 \sin^2 \varphi} dl \right) \quad (3.14)$$

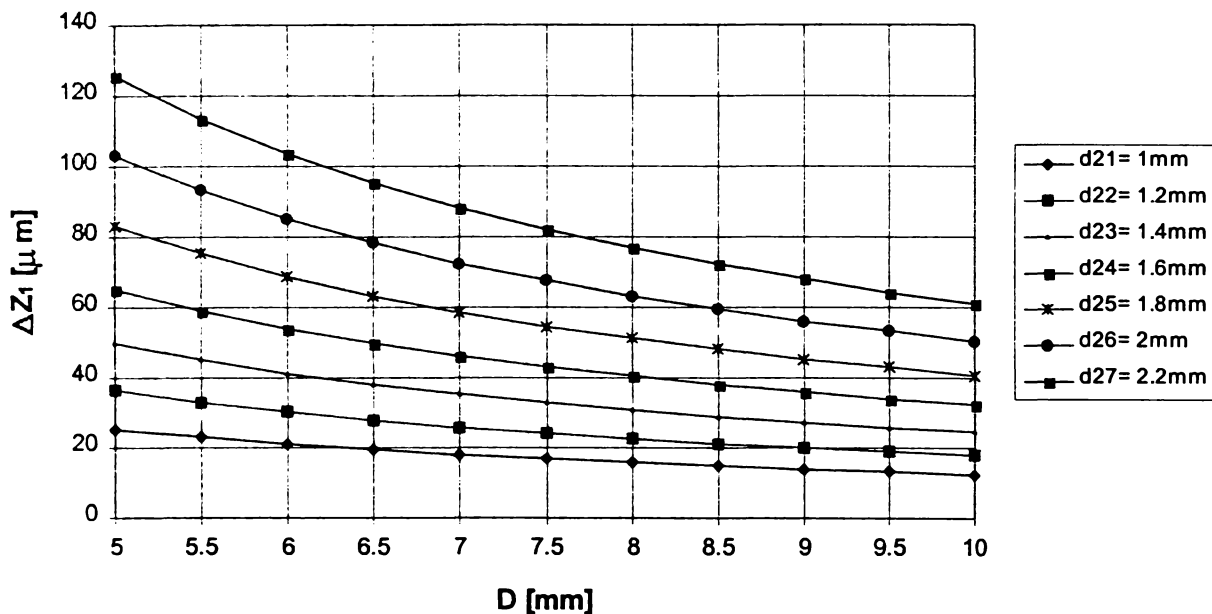


Figura 3.3. Influența diametrului piesei de măsurat asupra erorii de curbură
($D < 10$ mm)

Valorile date de relația precedentă sunt mici, pentru că diferența maximă dintre diametrele D și D_E nu poate depăși mărimea adaosului de prelucrare. Pe de altă parte, aceste erori se micșorează pe măsură ce D tinde spre D_E , deci diametrul curent se apropie de cel prescris. Tocmai aceste valori sunt cele care pot influența rezultatul măsurării și implicit comanda opririi ciclului de prelucrare și practic precizia de prelucrare.

Analiza acestei erori de gradul doi cu ajutorul programului realizat se prezintă pentru două valori generice ale diametrului etalonului: $D_E = 50$ mm (*tabelul 3.3 și figura 3.4*) și $D_E = 8$ mm (*tabelul 3.4 și figura 3.5*).

Valorile obținute în primul caz indică posibilitatea neglijării acestei erori, care nu depășește 0,1% din toleranța fundamentală $IT5 = 11$ μm pentru situația cea mai

defavorabilă, calculată pentru un diametru al duzei de măsurare de 3 mm, la un diametru efectiv al piesei de 50,025 mm.

Tabelul 3.3 Eroarea de curbură relativă pentru $D_E = 50$ mm

| Diametrul piesei D [mm] | Eroarea relativă de curbură Δz_{1E} [μm] | | | | | | |
|---------------------------------|---|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| | Diametrul duzei de măsurare d_2 [mm] | | | | | | |
| | $d_{21}= 1$ | $d_{22}= 1.2$ | $d_{23}= 1.4$ | $d_{24}= 1.6$ | $d_{25}= 1.8$ | $d_{26}= 2$ | $d_{27}= 2.2$ |
| 50.000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50.005 | 0.0003 | 0.0006 | 0.0010 | 0.0013 | 0.0016 | 0.0019 | 0.0022 |
| 50.010 | 0.0005 | 0.0011 | 0.0020 | 0.0025 | 0.0031 | 0.0038 | 0.0045 |
| 50.015 | 0.0007 | 0.0017 | 0.0030 | 0.0038 | 0.0047 | 0.0057 | 0.0067 |
| 50.020 | 0.0010 | 0.0023 | 0.0040 | 0.0051 | 0.0063 | 0.0076 | 0.0090 |
| 50.025 | 0.0012 | 0.0028 | 0.0050 | 0.0063 | 0.0078 | 0.0095 | 0.0112 |

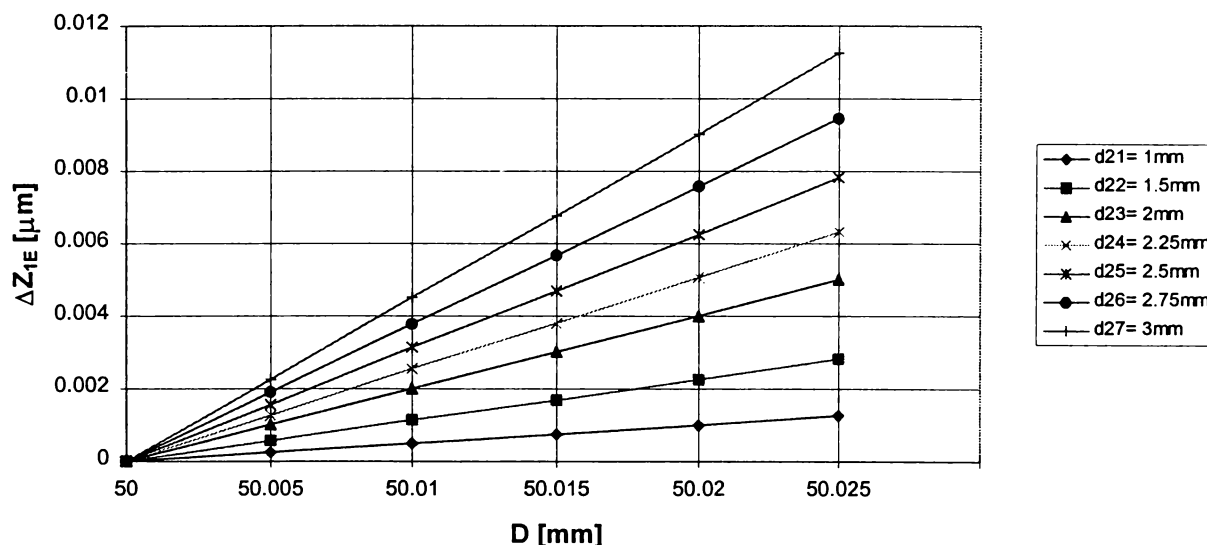
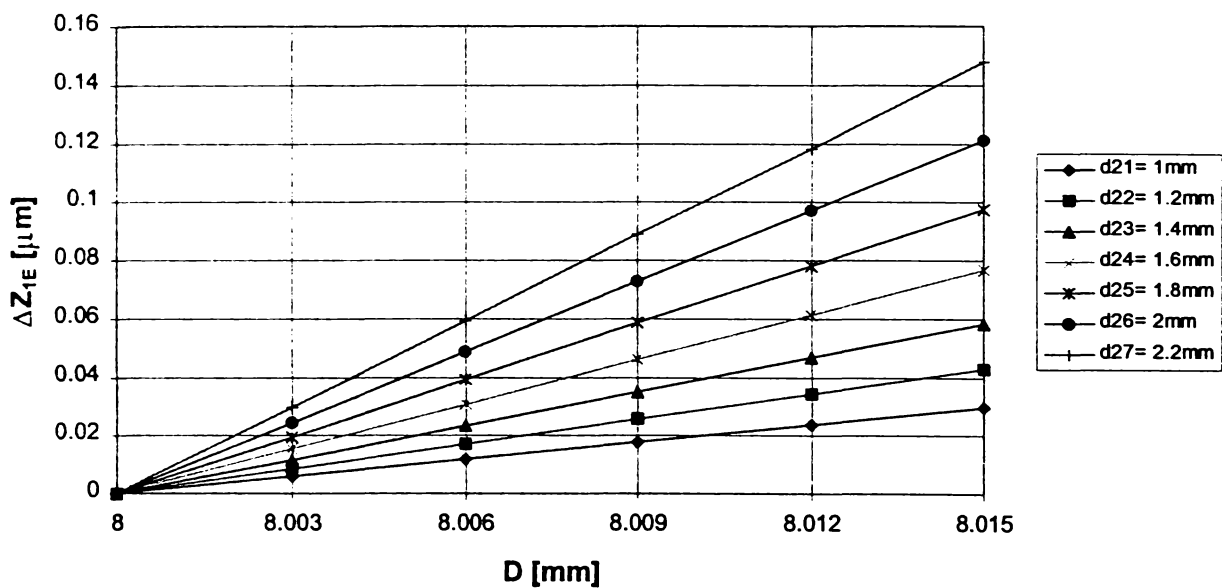


Figura 3.4 Variația erorii relative de curbură pentru $D_E = 50$ mm

Pe măsură ce diametrul nominal prescris al piesei de rectificat este mai mic, în general sub 10 mm, creșterea acestei erori relative determină deplasarea dimensiunii de frecvență maximă, dinspre mijlocul câmpului de toleranță prescris spre dimensiunea limită corespunzătoare maximului de material. Valorile calculate în al doilea caz analizat arată însă, că această deplasare nu poate determina ieșirea piesei din câmpul de toleranță prescris, eroarea relativă maximă nedepășind 2,5% din toleranța fundamentală $IT5 = 6 \mu\text{m}$ pentru situația cea mai defavorabilă, calculată pentru un diametru al duzei de măsurare de 2,2 mm, la un diametru efectiv al piesei de 8,015 mm.

Tabelul 3.4 Eroarea de curbură relativă pentru $D_E = 8 \text{ mm}$

| Diametrul piesei D [mm] | Eroarea relativă de curbură Δz_{1E} [μm] | | | | | | |
|---------------------------------|---|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| | Diametrul duzei de măsurare d_2 [mm] | | | | | | |
| | $d_{21}= 1$ | $d_{22}= 1.2$ | $d_{23}= 1.4$ | $d_{24}= 1.6$ | $d_{25}= 1.8$ | $d_{26}= 2$ | $d_{27}= 2.2$ |
| 8.000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8.003 | 0.0059 | 0.0085 | 0.01168 | 0.0153 | 0.0195 | 0.0243 | 0.0296 |
| 8.006 | 0.0118 | 0.0171 | 0.02336 | 0.0307 | 0.0391 | 0.0486 | 0.0592 |
| 8.009 | 0.0177 | 0.0256 | 0.03502 | 0.046 | 0.0586 | 0.0728 | 0.0888 |
| 8.012 | 0.0236 | 0.0341 | 0.04667 | 0.0613 | 0.0781 | 0.097 | 0.1183 |
| 8.015 | 0.0295 | 0.0426 | 0.05832 | 0.0766 | 0.0975 | 0.1213 | 0.1479 |

Figura 3.5 Variația erorii relative de curbură pentru $D_E = 8 \text{ mm}$

3.2.2. Eroarea de captare cauzată de deplasarea duzei de măsurare în plan diametral pe direcția avansului de pătrundere

O influență importantă la controlul suprafețelor cilindrice prin metoda pneumatică fără contact o are deplasarea axei duzei de măsurare în plan diametral, cauzată de imprecizia de poziționare a senzorilor în raport cu suprafața de măsurat, de erorile de instalare ale piesei și, în cazul controlului activ operațional, de deformația elastică a sistemului tehnologic determinată de acțiunea forțelor dezvoltate în procesul de rectificare.

Ca urmare a acestei deplasări se modifică suprafața de trecere a aerului comprimat, eroarea rezultată cumulată cu cea cauzată de curbura suprafeței determinându-se prin luarea în considerare la calculul ariei A_L cu relația (3.11), a

deplasării axei cu valoarea e pe direcția AA_1 (figura 3.1). Astfel, relația (3.11) va deveni:

$$A'_L = \int_0^{2\pi} \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left(e + \frac{d_2}{2} \sin \varphi\right)^2} \cdot \frac{d_2}{2} d\varphi = \frac{d_2 \cdot D}{4} \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \frac{4\left(e + \frac{d_2}{2} \sin \varphi\right)^2}{D^2}} d\varphi \quad (3.15)$$

Această expresie permite calcularea unei arii suplimentare A'_S și a unei erori cumulate Δz_2 :

$$A'_S = \frac{d_2 \cdot D}{4} \left(2\pi - \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \frac{4\left(e + \frac{d_2}{2} \sin \varphi\right)^2}{D^2}} d\varphi \right) \quad (3.16)$$

$$\Delta z_2 = \frac{A'_S}{\pi \cdot d_2} = \frac{D}{4\pi} \left(2\pi - \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \frac{4\left(e + \frac{d_2}{2} \sin \varphi\right)^2}{D^2}} d\varphi \right) \quad (3.17)$$

Pentru a evidenția influența deplasării axei de măsurare, se exclude influența erorii de curbura Δz_1 , obținându-se:

$$\Delta z = \Delta z_2 - \Delta z_1 \quad (3.18)$$

$$\Delta z = \frac{D}{4\pi} \left(\int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \frac{4\left(e + \frac{d_2}{2} \sin \varphi\right)^2}{D^2}} d\varphi - \int_0^{2\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{D}\right)^2 \sin^2 \varphi} d\varphi \right) \quad (3.18)'$$

Cuantificarea valorilor și reprezentarea grafică a acestei erori cu ajutorul programului de calcul permite următoarele observații (tabelul 3.5 și figurile 3.6, 3.7):

- s-au obținut erori sensibil mai mari decât precedentele, pentru ambele valori adoptate ale excentricității $e_1 = 0,1$ mm, respectiv $e_2 = 0,5$ mm;
- dacă pentru valoarea e_1 aceste valori se păstrează în domeniul submicrometric, în cazul valorii e_2 ele pot depăși 15 μ m pentru valoarea minimă analizată a diametrului piesei, $D = 5$ mm;

– atât tabelar, cât și grafic rezultă că practic începând cu diametrul $D = 13$ mm, valoarea acestei erori nu mai este influențată de diametrul duzei de măsurare d_2 .

Tabelul 3.5 Eroarea de captare cauzată de deplasarea axei duzei de măsurare

| D [mm] | Eroarea de deplasare a axei Δz [μm] | | | | | | | |
|-----------|--|----------------|--------------|----------------|--------------------------------|----------------|--------------|----------------|
| | Excentricitatea $e_1 = 0.1$ mm | | | | Excentricitatea $e_2 = 0.5$ mm | | | |
| | Diametrul duzei de măsurare d_2 [mm] | | | | | | | |
| | $d_{21} = 1$ | $d_{22} = 1.5$ | $d_{23} = 2$ | $d_{24} = 2.5$ | $d_{21} = 1$ | $d_{22} = 1.5$ | $d_{23} = 2$ | $d_{24} = 2.5$ |
| 5 | 0.5156 | 0.5369 | 0.5708 | 0.6230 | 12.9262 | 13.4664 | 14.3262 | 15.6593 |
| 7 | 0.3627 | 0.3700 | 0.3809 | 0.3960 | 9.0802 | 9.2635 | 9.5363 | 9.9182 |
| 9 | 0.2804 | 0.2837 | 0.2886 | 0.2951 | 7.0151 | 7.0990 | 7.2206 | 7.3850 |
| 11 | 0.2287 | 0.2305 | 0.2331 | 0.2365 | 5.7203 | 5.7656 | 5.8305 | 5.9167 |
| 13 | 0.1932 | 0.1943 | 0.1958 | 0.1978 | 4.8310 | 4.8582 | 4.8969 | 4.9479 |
| 15 | 0.1672 | 0.1679 | 0.1689 | 0.1702 | 4.1818 | 4.1994 | 4.2244 | 4.2571 |
| 17 | 0.1474 | 0.1479 | 0.1486 | 0.1495 | 3.6868 | 3.6989 | 3.7160 | 3.7382 |
| 19 | 0.1319 | 0.1322 | 0.1327 | 0.1333 | 3.2969 | 3.3055 | 3.3177 | 3.3335 |
| 21 | 0.1193 | 0.1195 | 0.1199 | 0.1203 | 2.9817 | 2.9881 | 2.9970 | 3.0087 |
| 23 | 0.1089 | 0.1090 | 0.1093 | 0.1097 | 2.7216 | 2.7264 | 2.7332 | 2.7421 |
| 25 | 0.1001 | 0.1003 | 0.1005 | 0.1008 | 2.5033 | 2.5070 | 2.5123 | 2.5192 |
| 27 | 0.0927 | 0.0928 | 0.0930 | 0.0932 | 2.3174 | 2.3204 | 2.3246 | 2.3300 |
| 29 | 0.0863 | 0.0864 | 0.0865 | 0.0867 | 2.1573 | 2.1597 | 2.1631 | 2.1674 |

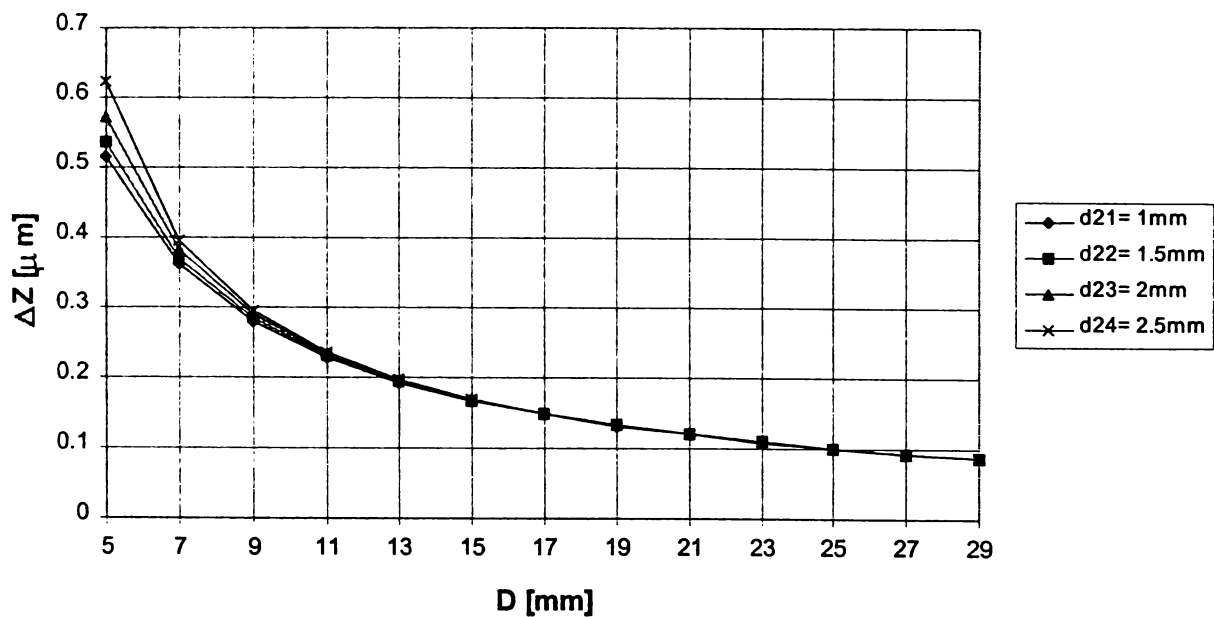


Figura 3.6 Influența diametrului piesei de măsurat asupra erorii de deplasare a axei duzei de măsurare ($e = 0,1$ mm)

Au fost alese valori relativ mari pentru excentricitatea e , luându-se în considerare influența cumulată asupra acesteia, a mai multor cauze expuse anterior.

Programul permite și reprezentarea relației (3.18') în funcție de mărimea deplasării e , pentru diferite diametre prescrise D . Graficele realizate ca exemplificare

În figurile 3.8, 3.9 dau posibilitatea identificării unei excentricități maxime permise, astfel încât eroarea cauzată de aceasta să se situeze sub o anumită valoare impusă.

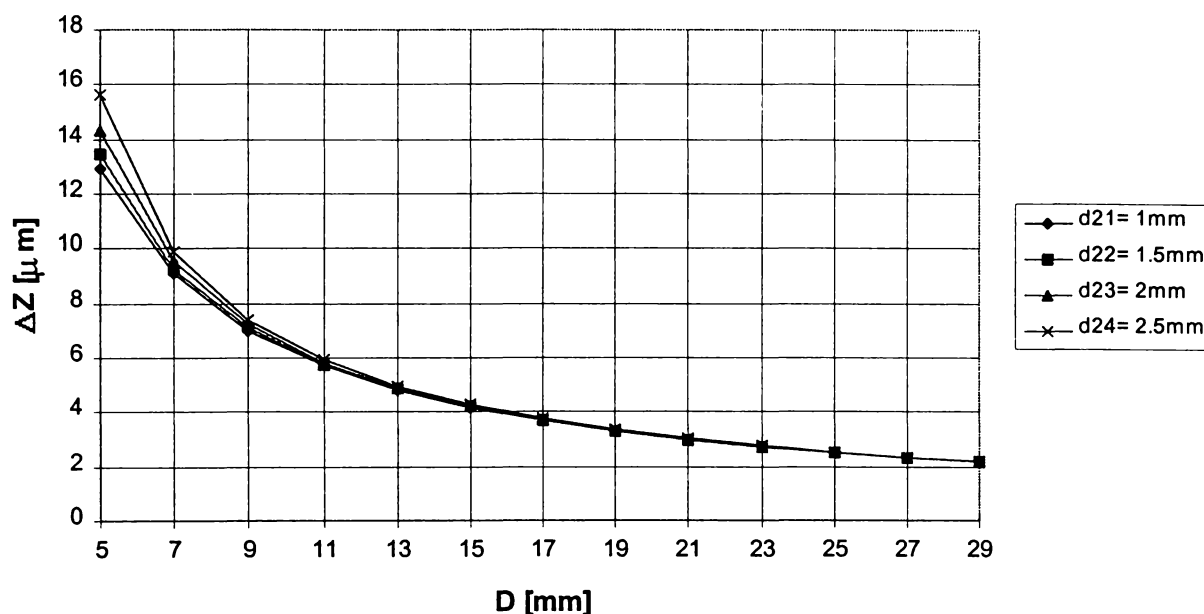


Figura 3.7 Influența diametrului piesei de măsurat asupra erorii de deplasare a axei duzei de măsurare ($e = 0,5\text{ mm}$)

Pe baza acestei valori maxime a excentricității se pot proiecta preciziile dispozitivelor de poziționare a senzorului și de instalare a semifabricatului, respectiv se pot alege în mod corespunzător parametrii regimului de așchiere, ce determină mărimea componentelor forței rezultante de așchiere. Referitor la acest ultim aspect, în practică se recomandă orientarea duzei de măsurare astfel încât axa sa să fie perpendiculară pe forța rezultantă de așchiere F . În acest caz deformațiile elastice ale semifabricatului provocate de forța F vor da o eroare minimă de captare.

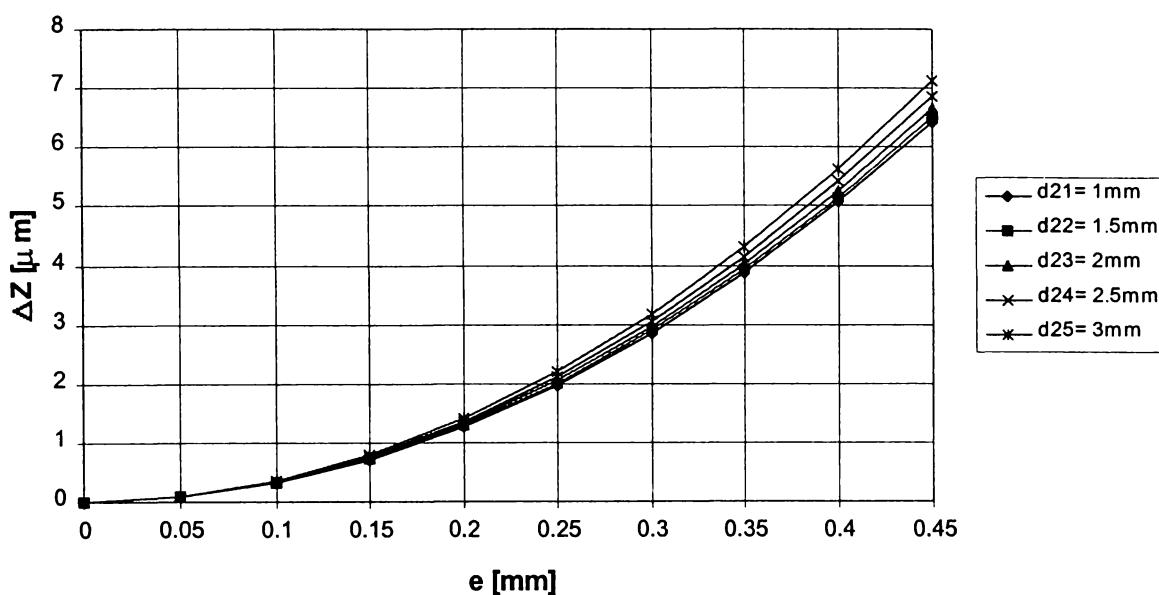


Figura 3.8 Influența excentricității asupra erorii de captare ($D = 8\text{ mm}$)

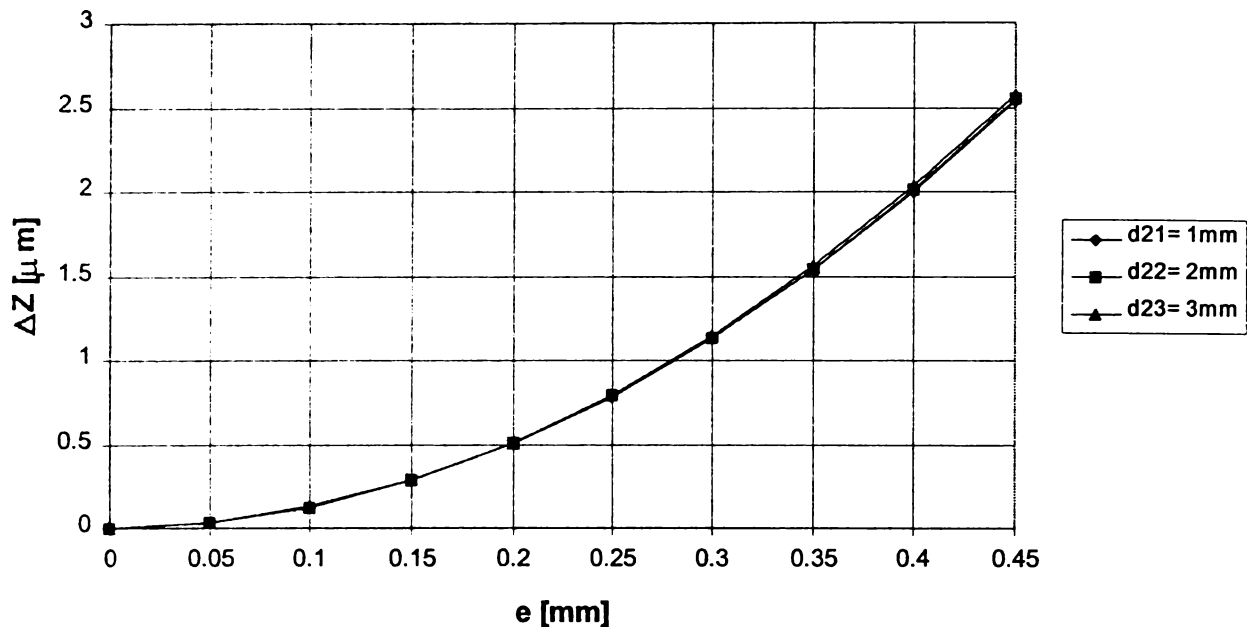
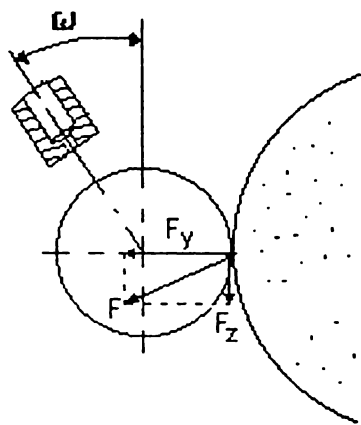


Figura 3.9 Influența excentricității asupra erorii de captare ($D = 20 \text{ mm}$)

Neglijând componenta axială, forța rezultantă de așchiere va fi:

$$F = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} \quad (3.19)$$

Cum în practică raportul dintre componenta tangențială F_z și cea radială F_y este $1/3 \dots 1$, pentru a respecta recomandarea menționată, valorile extreme ale unghiului de orientare ω a axei duzei față de verticală (figura 3.10) vor fi ([M4]):



$$\omega_{\min} = \arctg \left(\frac{F_z}{F_y} \right)_{\min} = \arctg \frac{1}{3} = 18^\circ 30' \quad (3.20)$$

$$\omega_{\max} = \arctg \left(\frac{F_z}{F_y} \right)_{\max} = \arctg 1 = 45^\circ \quad (3.21)$$

Figura 3.10 Unghiul de orientare
a duzei de măsurare

componenta F_z se mărește în raport cu componenta F_y , la prelucrări de finisare se alege $\omega = 20$, iar la degroșare $\omega = 40$. În cazul producției de unicate sau de serie mică, deoarece atât degroșarea cât și finisarea se execută la aceeași prindere este rațional să se adopte unghiul $\omega = 25$, ținând cont că dimensiunile finale ale piesei se obțin în urma finisării.

3.3. Erori de captare la măsurarea cu contact

3.3.1. Eroarea de captare datorată deformațiilor de contact

Măsurarea prin palpare directă provoacă deformarea contactului de măsurare, cauzată de forța statică de măsurare, ale cărei valori sunt cuprinse între 0,05...3 N. Mărimea acestei deformații elastice, ca de altfel și geometria suprafeței de contact și distribuția presiunilor pe aceasta depind, pe lângă valoarea componentei normale a forței de apăsare, de cuplul de materiale, de forma, dimensiunile, duritatea și rugozitatea suprafețelor în contact.

Pentru calculul deformării se consideră contactul dintre palpator și suprafața de măsurat ca fiind de tip Hertz. Se introduc următoarele ipoteze simplificatoare ([D7], [N3], [S4]):

- sarcina este aplicată lent, fiind constantă și normală;
- corpurile în contact sunt omogene și izotrope;
- deformațiile produse sunt elastice;
- suprafețele în contact sunt considerate ideale, netede, neglijându-se în primă instanță influența rugozităților;
- contactul este direct, fără lubrefiant;
- corpurile sunt fixe, deci nu se ia în considerare influența frecării dintre cele două suprafețe.

Pentru diversele cazuri reale care nu se înscriu în cel ideal prezentat, se adoptă relații de corecție care vor fi prezentate ulterior.

Apropierea elastică a suprafețelor în contact δ_c este:

$$\delta_c = \delta'_c \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{3}{2} \frac{P}{E_{1,2}}\right)^2} \quad (3.22)$$

în care:

P – forța de apăsare (măsurare), în daN,

$E_{1,2}$ – modulul de elasticitate echivalent,

ρ – raza de curbură echivalentă, în mm,

se calculează cu relațiile (figura 3.11):

$$\frac{1}{E_{1,2}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (3.23)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{\rho_{11}} + \frac{1}{\rho_{12}} \right) \pm \left(\frac{1}{\rho_{21}} + \frac{1}{\rho_{22}} \right) \right] \quad (3.24)$$

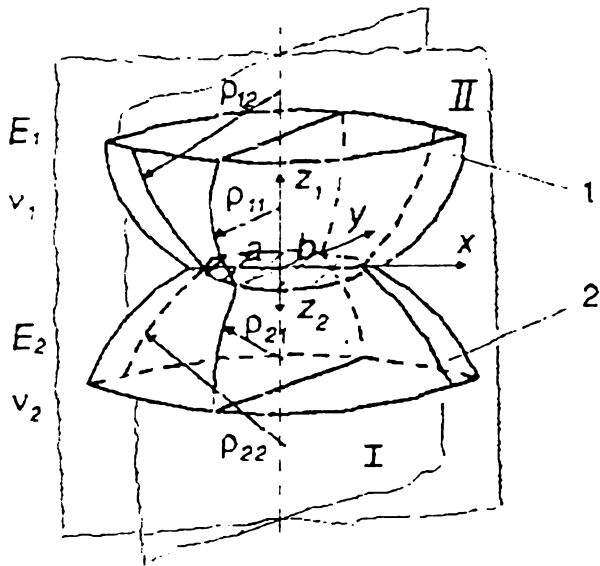


Figura 3.11 Schemă explicativă pentru contactul hertzian dintre două corpuri

unde:

$E_{1,2}$ [daN/mm²] – modulele de elasticitate ale materialelor palpatorului, respectiv piesei de măsurat;

$\nu_{1,2}$ – coeficienții lui Poisson ai materialelor corpurilor în contact;

$\rho_{11, 12}$ – razele de curbură ale suprafeței palpatorului;

$\rho_{21, 22}$ – razele de curbură ale suprafeței piesei de măsurat.

În relația anterioară semnul “+” se adoptă pentru curbura convexă a suprafeței de contact, iar semnul “-” pentru curbura concavă a suprafeței.

Coeficientul δ'_c se determină în raport de valoarea funcției formei petei de contact $F\left(\frac{1}{\rho}\right)$:

$$F\left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{\left(\frac{1}{\rho_{11}} - \frac{1}{\rho_{12}}\right) + \left(\frac{1}{\rho_{21}} - \frac{1}{\rho_{22}}\right)}{\frac{1}{\rho_{11}} + \frac{1}{\rho_{12}} + \frac{1}{\rho_{21}} + \frac{1}{\rho_{22}}} \quad (3.25)$$

În cazul controlului activ operațional, deci al contactului de măsurare dinamic, deformația de contact se corectează cu un factor care ține cont de influența frecării ([S4]):

$$C_f = \sqrt[3]{2 \left(1 - \frac{1}{6} f^2\right)} \quad (3.26)$$

unde f este coeficientul de frecare dintre suprafețele în contact.

De asemenea, se poate determina deformația elastică suplimentară datorată rugozității piesei, pentru o abatere medie aritmetică a rugozității suprafeței palpatorului sub 0,4 μm, cu relația ([N3]):

$$\delta_{cr} = 0.26 \cdot R_a \cdot P \text{ } [\mu\text{m}] \quad (3.27)$$

unde R_a [μm] este rugozitatea suprafeței piesei măsurate.

Ca urmare a influenței rugozității suprafeței piesei asupra deformării contactului de măsurare, pentru rugozități $R_a = 1,6 \dots 6,3 \mu\text{m}$, nu se pot folosi palpatori

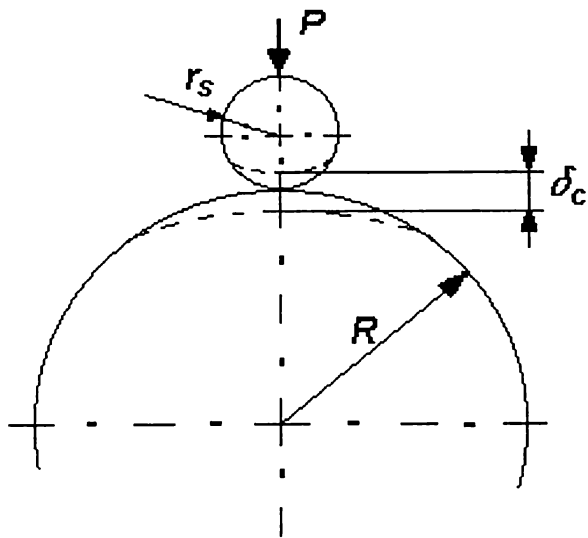


Figura 3.12 Schemă explicativă pentru contactul exterior palpator sferic-piesă cilindrică

cu raze mai mari de 5 mm, întrucât înălțimile rugozității sunt mai mari decât mărimea deformării.

Valoarea mărimii deformațiilor de contact cu ajutorul relațiilor prezentate anterior se poate face particularizând contactul pentru diverse forme geometrice caracteristice palpatorului, respectiv piesei de măsurat. Scopul acestei evaluări este alegerea forței de măsurare astfel încât să fie suficient de mare pentru a asigura un contact de măsurare ferm și suficient de mică pentru ca deformarea să nu afecteze

rezultatele măsurării decât într-o măsură neglijabilă. De regulă, această deformare nu trebuie să depășească 10% din toleranța etalonului.

Considerând cazul măsurării unei suprafețe cilindrice exterioare de rază R [mm] cu un palpator de forma sferică, de rază r_s [mm] (figura 3.12), relațiile (3.24), (3.25) devin:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_s} + \frac{1}{R} + 0 \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{2R + r_s}{R \cdot r_s} \right) \quad (3.27)$$

$$F \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{\frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_s} + \frac{1}{R} - 0}{\frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_s} + \frac{1}{R} + 0} = \frac{r_s}{2R + r_s} \quad (3.28)$$

Pentru cazul particular precizat, mărimea deformației de contact se va determina cu relația ([S4]):

$$\delta_c = 615,24 \cdot \delta'_c \cdot \left[P^2 \cdot \left(\frac{E_1 + E_2}{E_1 \cdot E_2} \right)^2 \cdot \left(\frac{2R + r_s}{R \cdot r_s} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad [\mu\text{m}] \quad (3.29)$$

în care:

$$\delta'_c = \left(1 - F^2 \left(\frac{1}{\rho} \right) \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.30)$$

Înlocuind (3.28) în relația precedentă, aceasta devine:

$$\delta'_c = \left[\frac{(2R + r_s)^2 - r_s^2}{(2R + r_s)^2} \right]^{\frac{1}{4}} = \left[\frac{4R \cdot (R + r_s)}{(2R + r_s)^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3.31)$$

Ținând cont de această ultimă expresie, pentru cazul unei piese din oțel și a unui palpator din carbură metalică K10, cu modulele de elasticitate

$$E_1 = 6,310^4 \text{ daN/mm}^2,$$

$$E_2 = 2,110^4 \text{ daN/mm}^2,$$

relația de calcul a deformației de contact va deveni:

$$\delta_c = 0,97916 \cdot P^{\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{4R(R + r_s)}{(2R + r_s)^2} \right]^{\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{2R + r_s}{R \cdot r_s} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.31')$$

$$\delta_c = 1,38475 \cdot P^{\frac{2}{3}} \cdot r_s^{-\frac{1}{3}} \cdot R^{-\frac{1}{12}} \cdot (R + r_s)^{\frac{1}{4}} \cdot (2R + r_s)^{-\frac{1}{6}} \quad (3.32)$$

Pe baza acestei relații matematice, programul de calcul elaborat permite determinarea valorilor și trasarea diagramelor deformațiilor de contact, pentru diferite valori ale razei palpatorului și forței de măsurare. În *tabelele* 3.6 și 3.8, precum și în *figurile* 3.13 și 3.15 s-au ales valori extreme recomandate pentru forța de măsurare P , iar în *tabelul* 3.7 și *figura* 3.14 s-a luat în considerare o valoare medie uzuală pentru această forță.

Analiza rezultatelor evidențiază valorile reduse ale acestor deformații, valori de ordinul sutimilor sau zecimilor de micrometru, care permit în cele mai multe situații neglijarea lor. De asemenea, se remarcă faptul că, începând cu o anumită valoare a diametrului piesei de măsurat ($D = 20 \text{ mm}$), deformația se menține pe un anumit palier, fiind cu atât mai mare cu cât raza palpatorului este mai mică.

Tabelul 3.6 Eroarea datorată deformațiilor de contact pentru forța de măsurare $P = 0,05\text{ N}$

| Diametrul piesei D [mm] | Eroarea cauzată de deformațiile elastice de contact δ_c [μm] | | | | | | |
|---------------------------------|--|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|
| | Raza palpatorului sferic r_s [mm] | | | | | | |
| | $r_{s1} = 0,2$ | $r_{s2} = 0,5$ | $r_{s3} = 0,7$ | $r_{s4} = 1$ | $r_{s5} = 1,2$ | $r_{s6} = 1,5$ | $r_{s7} = 2$ |
| 5 | 0.0625 | 0.0468 | 0.0423 | 0.0381 | 0.0361 | 0.0339 | 0.0314 |
| 15 | 0.062 | 0.0459 | 0.0412 | 0.0368 | 0.0348 | 0.0325 | 0.0297 |
| 25 | 0.0618 | 0.0457 | 0.041 | 0.0365 | 0.0345 | 0.0321 | 0.0293 |
| 35 | 0.0618 | 0.0457 | 0.0409 | 0.0364 | 0.0343 | 0.0319 | 0.0291 |
| 45 | 0.0618 | 0.0456 | 0.0408 | 0.0363 | 0.0342 | 0.0319 | 0.029 |
| 55 | 0.0618 | 0.0456 | 0.0408 | 0.0363 | 0.0342 | 0.0318 | 0.029 |
| 65 | 0.0617 | 0.0456 | 0.0408 | 0.0363 | 0.0342 | 0.0317 | 0.0289 |
| 75 | 0.0617 | 0.0455 | 0.0408 | 0.0362 | 0.0341 | 0.0317 | 0.0289 |
| 85 | 0.0617 | 0.0455 | 0.0407 | 0.0362 | 0.0341 | 0.0317 | 0.0289 |
| 95 | 0.0617 | 0.0455 | 0.0407 | 0.0362 | 0.0341 | 0.0317 | 0.0288 |
| 105 | 0.0617 | 0.0455 | 0.0407 | 0.0362 | 0.0341 | 0.0317 | 0.0288 |

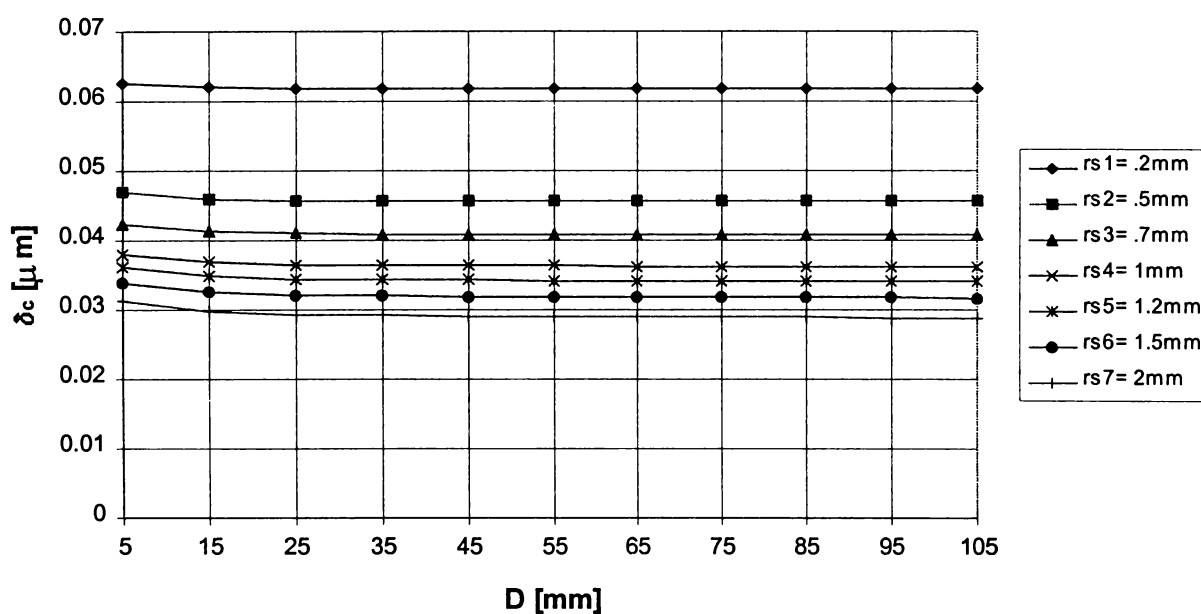
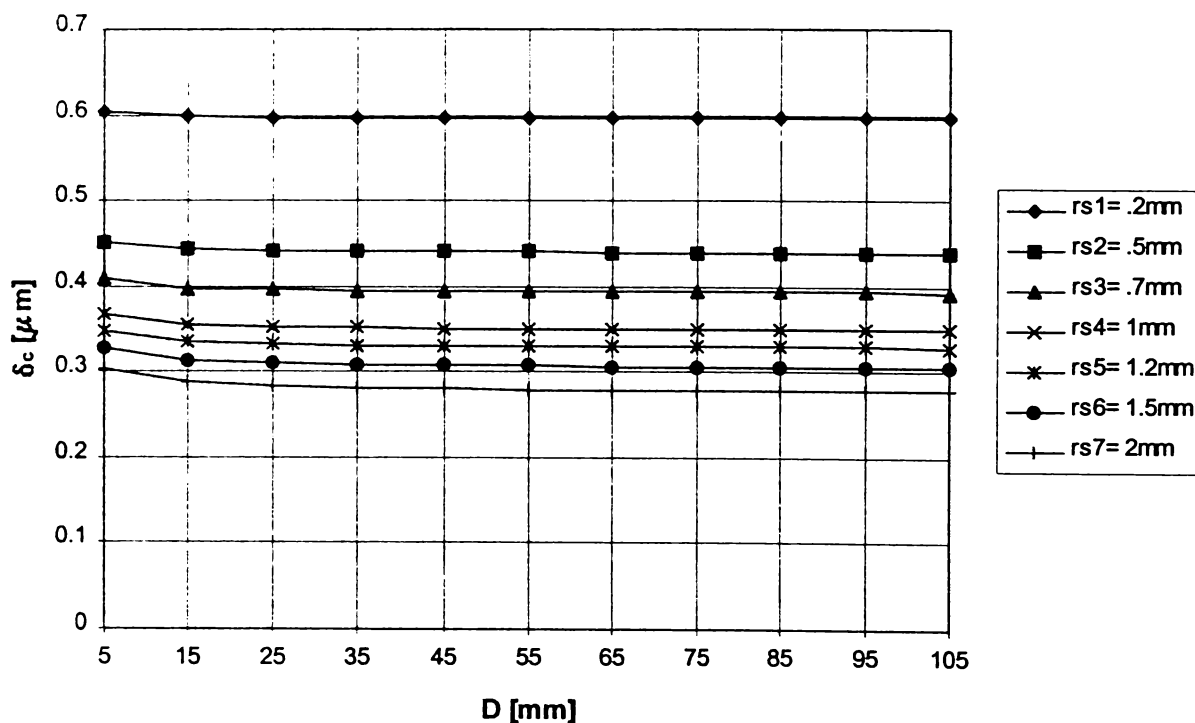


Figura 3.13 Variația erorii datorate deformațiilor de contact în funcție de diametrul piesei pentru forța de măsurare $P = 0,05\text{ N}$

Această observație, coroborată cu caracterul referențial al măsurărilor, permite o dată în plus să se avanseze concluzia neglijării acestor deformații, așa cum rezultă din tabelul 3.9 și figura 3.16, care prezintă erorile de gradul II cauzate de deformațiile de contact. Pentru exemplificare, s-a ales o valoare medie a forței de măsurare $P = 1,5\text{ N}$ și un diametru al etalonului $D_E = 50\text{ mm}$.

Tabelul 3.7 Eroarea datorată deformațiilor de contact pentru forța de măsurare $P = 1,5 \text{ N}$

| Diametrul piesei D [mm] | Eroarea cauzată de deformațiile elastice de contact δ_c [μm] | | | | | | |
|---------------------------------|--|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|
| | Raza palpatorului sferic r_s [mm] | | | | | | |
| | $r_{s1} = 0,2$ | $r_{s2} = 0,5$ | $r_{s3} = 0,7$ | $r_{s4} = 1$ | $r_{s5} = 1,2$ | $r_{s6} = 1,5$ | $r_{s7} = 2$ |
| 5 | 0.6032 | 0.452 | 0.4082 | 0.3675 | 0.3488 | 0.3275 | 0.3027 |
| 15 | 0.5982 | 0.4435 | 0.3981 | 0.3555 | 0.3358 | 0.3134 | 0.2872 |
| 25 | 0.5971 | 0.4417 | 0.3958 | 0.3527 | 0.3327 | 0.31 | 0.2832 |
| 35 | 0.5967 | 0.4409 | 0.3948 | 0.3515 | 0.3314 | 0.3084 | 0.2814 |
| 45 | 0.5964 | 0.4404 | 0.3942 | 0.3508 | 0.3306 | 0.3075 | 0.2803 |
| 55 | 0.5963 | 0.4401 | 0.3939 | 0.3504 | 0.3301 | 0.3069 | 0.2797 |
| 65 | 0.5962 | 0.4399 | 0.3936 | 0.3500 | 0.3297 | 0.3065 | 0.2792 |
| 75 | 0.5961 | 0.4398 | 0.3935 | 0.3498 | 0.3295 | 0.3062 | 0.2788 |
| 85 | 0.596 | 0.4397 | 0.3933 | 0.3496 | 0.3293 | 0.306 | 0.2785 |
| 95 | 0.596 | 0.4396 | 0.3932 | 0.3495 | 0.3291 | 0.3058 | 0.2783 |
| 105 | 0.5959 | 0.4395 | 0.3931 | 0.3494 | 0.329 | 0.3057 | 0.2781 |

Figura 3.14 Variația erorii datorate deformațiilor de contact în funcție de diametrul piesei pentru forța de măsurare $P = 1,5 \text{ N}$

Ținând cont de ordinul de mărime al erorilor relative determinate în tabelul 3.9 și având în vedere că deformațiile elastice de contact se încadrează între anumite valori, oricare ar fi tipul suprafețelor în contact, materialele celor două corpuri sau forța de măsurare, se poate extinde concluzia desprinsă în urma analizei efectuate mai sus, și anume, datorită faptului că sistemele pneumatice de control activ sunt referențiale, ponderea erorilor cauzate de deformațiile de contact în eroarea totală de măsurare poate fi neglijată.

Tabelul 3.8 Eroarea datorată deformațiilor de contact pentru forța de măsurare $P = 3\text{ N}$

| Diametrul piesei D [mm] | Eroarea cauzată de deformațiile elastice de contact δ_c [μm] | | | | | | |
|---------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Raza palpatorului sferic r_s [mm] | | | | | | |
| | $r_{s1} = 0,2$ | $r_{s2} = 1$ | $r_{s3} = 2$ | $r_{s4} = 3$ | $r_{s5} = 4$ | $r_{s6} = 5$ | $r_{s7} = 6$ |
| 10 | 0.9515 | 0.5695 | 0.463 | 0.4127 | 0.3814 | 0.3594 | 0.3426 |
| 20 | 0.9485 | 0.5616 | 0.452 | 0.3999 | 0.3675 | 0.3447 | 0.3275 |
| 30 | 0.9475 | 0.5588 | 0.4479 | 0.3949 | 0.3619 | 0.3386 | 0.321 |
| 40 | 0.9469 | 0.5573 | 0.4457 | 0.3922 | 0.3588 | 0.3352 | 0.3174 |
| 50 | 0.9466 | 0.5565 | 0.4444 | 0.3905 | 0.3568 | 0.3331 | 0.3151 |
| 60 | 0.9464 | 0.5559 | 0.4435 | 0.3894 | 0.3555 | 0.3316 | 0.3134 |
| 70 | 0.9463 | 0.5555 | 0.4429 | 0.3886 | 0.3545 | 0.3305 | 0.3122 |
| 80 | 0.9462 | 0.5551 | 0.4424 | 0.3879 | 0.3538 | 0.3296 | 0.3113 |
| 90 | 0.9461 | 0.5549 | 0.442 | 0.3874 | 0.3532 | 0.329 | 0.3106 |
| 100 | 0.9460 | 0.5547 | 0.4417 | 0.387 | 0.3527 | 0.3284 | 0.31 |

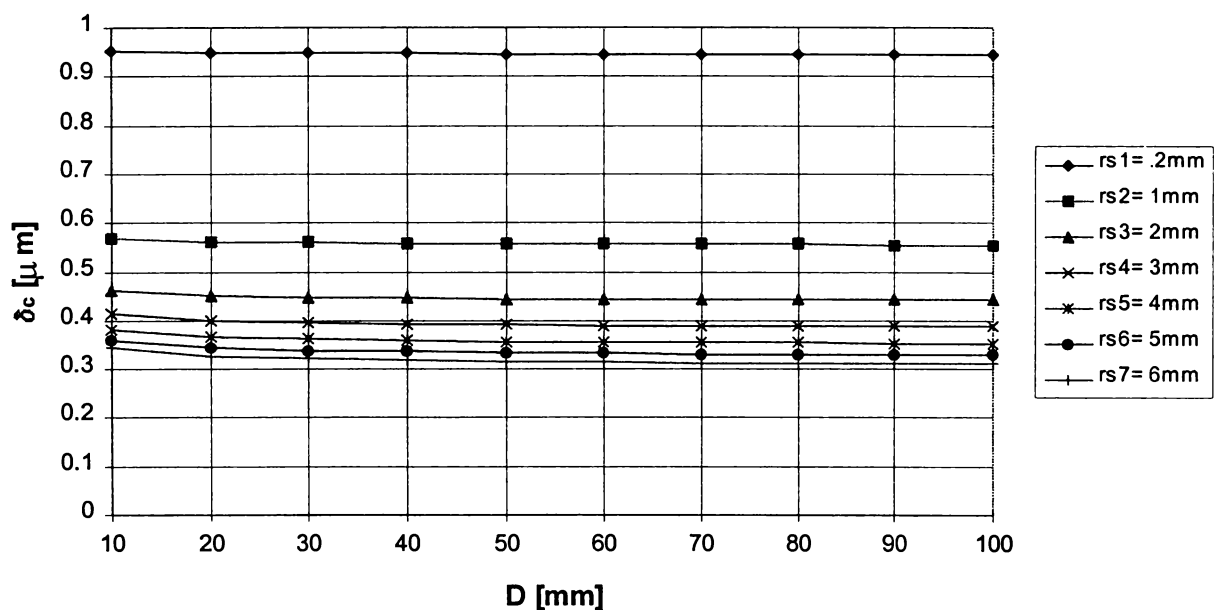


Figura 3.15 Variația erorii datorate deformațiilor de contact în funcție de diametrul piesei pentru forța de măsurare $P = 3\text{ N}$

Tabelul 3.9 Eroarea relativă datorată deformațiilor de contact pentru $P = 1,5\text{ N}$ și $D_E = 50\text{ mm}$

| Diametrul piesei D [mm] | Eroarea relativă cauzată de deformațiile elastice de contact $\delta_{cE} 10^3$ [μm] | | | | | | |
|---------------------------------|---|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Raza palpatorului sferic r_s [mm] | | | | | | |
| | $r_{s1} = 0,2$ | $r_{s2} = 0,5$ | $r_{s3} = 1$ | $r_{s4} = 2$ | $r_{s5} = 3$ | $r_{s6} = 4$ | $r_{s7} = 5$ |
| 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50.005 | 0.00008 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0005 | 0.0006 |
| 50.010 | 0.0002 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0007 | 0.0009 | 0.001 | 0.0011 |
| 50.015 | 0.0002 | 0.0004 | 0.0007 | 0.001 | 0.0013 | 0.0015 | 0.0017 |
| 50.020 | 0.0003 | 0.0006 | 0.0009 | 0.0014 | 0.0017 | 0.002 | 0.0022 |
| 50.025 | 0.0004 | 0.0007 | 0.0011 | 0.0017 | 0.0021 | 0.0025 | 0.0028 |

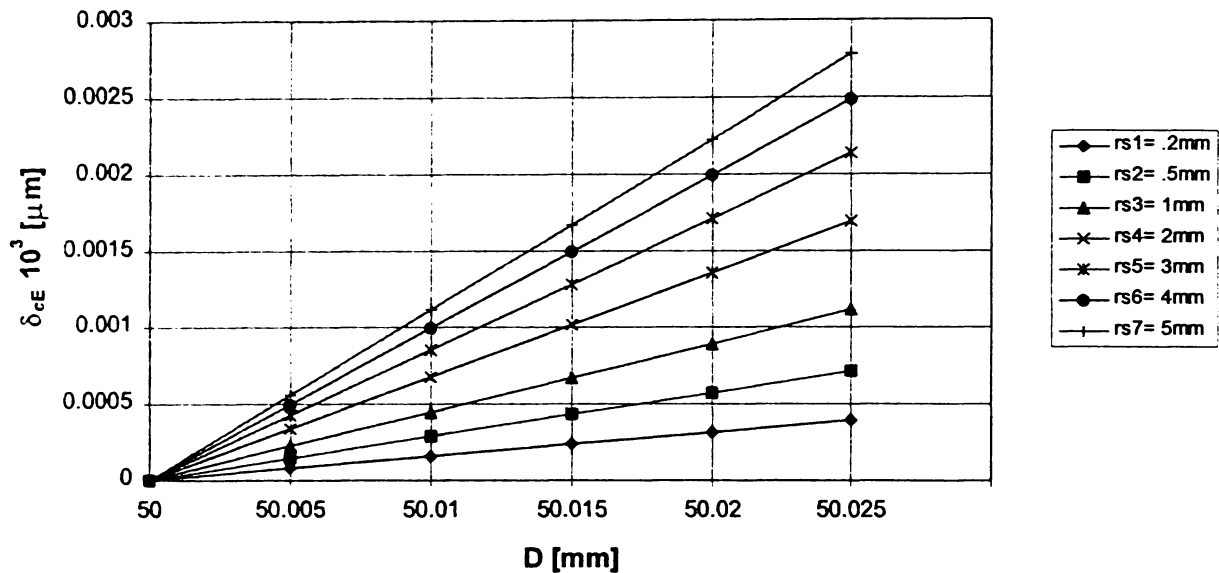


Figura 3.16 Variația erorii relative datorate deformațiilor de contact pentru $P = 1,5N$ și $D_E = 50$ mm

3.3.2. Eroarea de captare cauzată de deplasarea palpatorului în plan diametral pe direcția avansului de pătrundere

Din cauze similare celor prezentate la măsurarea fără contact, apare și în cazul palpării mecanice eroare de captare δ_p , cauzată de necoincidența dintre axa palpatorului și cea verticală a piesei.

Pentru cazul palpării exterioare a unei piese cilindrice cu o suprafață sferică (figura 3.17), această eroare poate fi dedusă prin explicitarea diferenței a două segmente:

$$\delta_p = \overline{OM} - \overline{OA} = R - \overline{OA} \quad (3.33)$$

Din asemănarea triunghiurilor ΔOAN și ΔO_1A_1N rezultă:

$$\frac{\overline{AN}}{R} = \frac{\overline{NA_1}}{r_s} \Leftrightarrow \frac{\overline{AN} + \overline{NA_1}}{R + r_s} = \frac{\overline{AN}}{R} \Leftrightarrow \frac{e}{R + r_s} = \frac{\overline{AN}}{R} \quad (3.34)$$

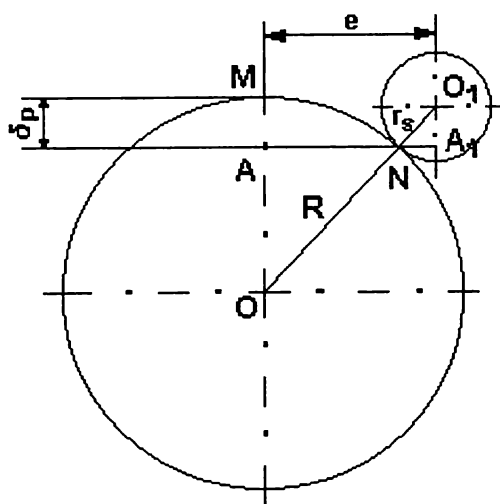
Din ΔOAN ($\hat{A} = 90^\circ$) se deduce:

$$\overline{OA} = \sqrt{R^2 - \overline{AN}^2} \quad (3.35)$$

Ținând cont de (3.34) în relația (3.35), se obține:

$$\overline{OA} = \sqrt{R^2 - \left(\frac{R \cdot e}{R + r_s}\right)^2} = R \sqrt{1 - \left(\frac{e}{R + r_s}\right)^2} \quad (3.36)$$

Înlocuind această ultimă expresie în (3.33) rezultă:



$$\delta_p = R \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{e}{R + r_s} \right)^2} \right) \quad (3.37)$$

Pe baza relației anterioare a fost cuantificată, cu ajutorul programului de calcul, eroarea de captare cauzată de deplasarea palpatorului în plan diametral (tabelul 3.10) și, în același timp, s-a urmărit variația acestei erori, atât în funcție de diametrul piesei D (figurile 3.18 și 3.19), cât și în funcție de valoarea excentricității e (figurile 3.20 și 3.21).

Figura 3.17 Schemă explicativă pentru calculul erorii de deplasare în plan diametral, la palparea exterioară

Tabelul 3.10. Eroarea de captare δ_p cauzată de deplasarea axei palpatorului

| D [mm] | Eroarea de deplasare a axei palpatorului δ_p [μm] | | | | | | | |
|-----------|---|--------------|----------------|--------------|--------------------------------|--------------|----------------|--------------|
| | Excentricitatea $e_1 = 0.1$ mm | | | | Excentricitatea $e_2 = 0.5$ mm | | | |
| | Raza palpatorului sferic r_s [mm] | | | | | | | |
| | $r_{s1} = 0.2$ | $r_{s2} = 1$ | $r_{s3} = 1.5$ | $r_{s4} = 2$ | $r_{s1} = 0.2$ | $r_{s2} = 1$ | $r_{s3} = 1.5$ | $r_{s4} = 2$ |
| 5 | 1.7153 | 1.0206 | 0.7814 | 0.6174 | 43.241 | 25.642 | 19.608 | 15.480 |
| 7 | 1.2785 | 0.8643 | 0.7001 | 0.5786 | 32.105 | 21.672 | 17.544 | 14.493 |
| 9 | 1.0187 | 0.7439 | 0.625 | 0.5326 | 25.536 | 18.634 | 15.652 | 13.333 |
| 11 | 0.8465 | 0.6509 | 0.5613 | 0.4889 | 21.201 | 16.296 | 14.049 | 12.236 |
| 13 | 0.7240 | 0.5778 | 0.5078 | 0.4498 | 18.125 | 14.461 | 12.708 | 11.255 |
| 15 | 0.6325 | 0.5190 | 0.4630 | 0.4155 | 15.829 | 12.987 | 11.583 | 10.395 |
| 17 | 0.5615 | 0.4709 | 0.425 | 0.3855 | 14.049 | 11.781 | 10.632 | 9.642 |
| 19 | 0.5048 | 0.4308 | 0.3926 | 0.3592 | 12.629 | 10.777 | 9.819 | 8.983 |
| 21 | 0.4586 | 0.3970 | 0.3646 | 0.3360 | 11.470 | 9.929 | 9.118 | 8.403 |
| 23 | 0.4201 | 0.3680 | 0.3402 | 0.3155 | 10.506 | 9.203 | 8.509 | 7.890 |
| 25 | 0.3875 | 0.3429 | 0.3189 | 0.2973 | 9.691 | 8.576 | 7.974 | 7.433 |
| 27 | 0.3596 | 0.3211 | 0.3000 | 0.2810 | 8.993 | 8.028 | 7.502 | 7.025 |
| 29 | 0.3355 | 0.3018 | 0.2832 | 0.2663 | 8.390 | 7.546 | 7.081 | 6.659 |

Valorile calculate sunt mult mai mari decât cele obținute în condiții similare la măsurarea fără contact, în cazul unei eventuale excentricități $e = 0,5$ mm fiind evidentă rebutarea pieselor, chiar în condițiile neglijării altor tipuri de erori. Pe măsura creșterii diametrului piesei de măsurat, eroarea de captare cauzată de deplasarea

axei palpatorului scade semnificativ, motiv pentru care intervalul de diametre analizat a fost cuprins între 5 mm și 30 mm.

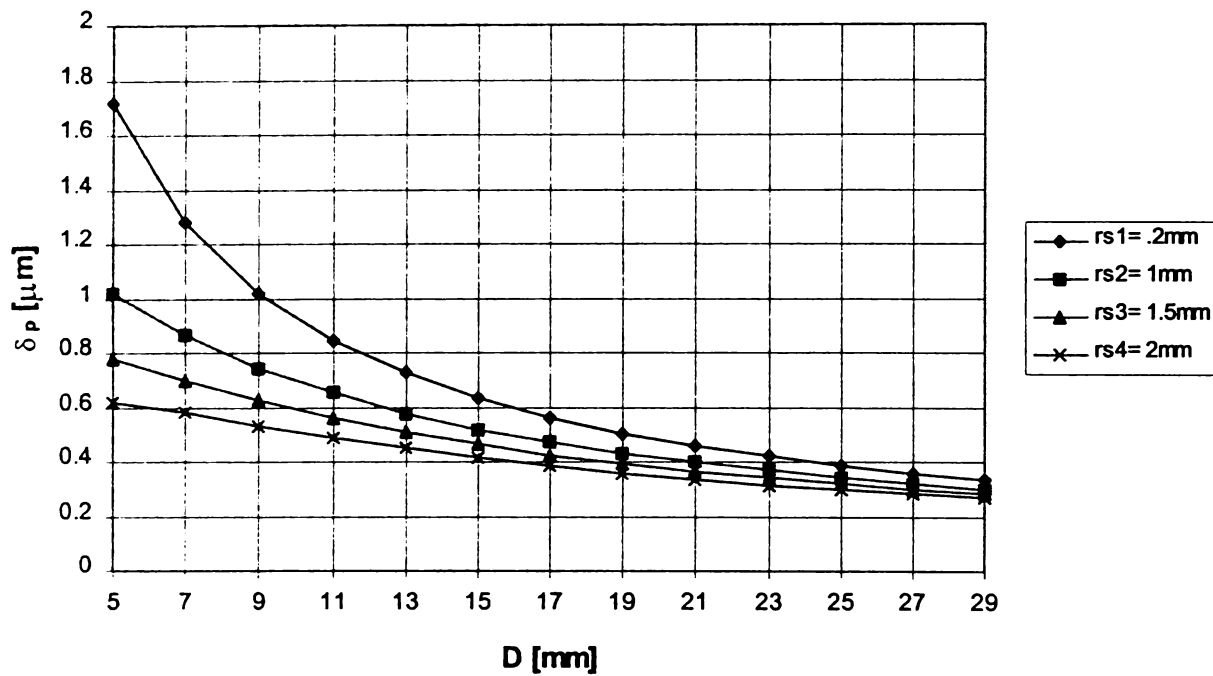


Figura 3.18 Influența diametrului piesei de măsurat asupra erorii δ_p de deplasare a axei palpatorului ($e = 0,1$ mm)

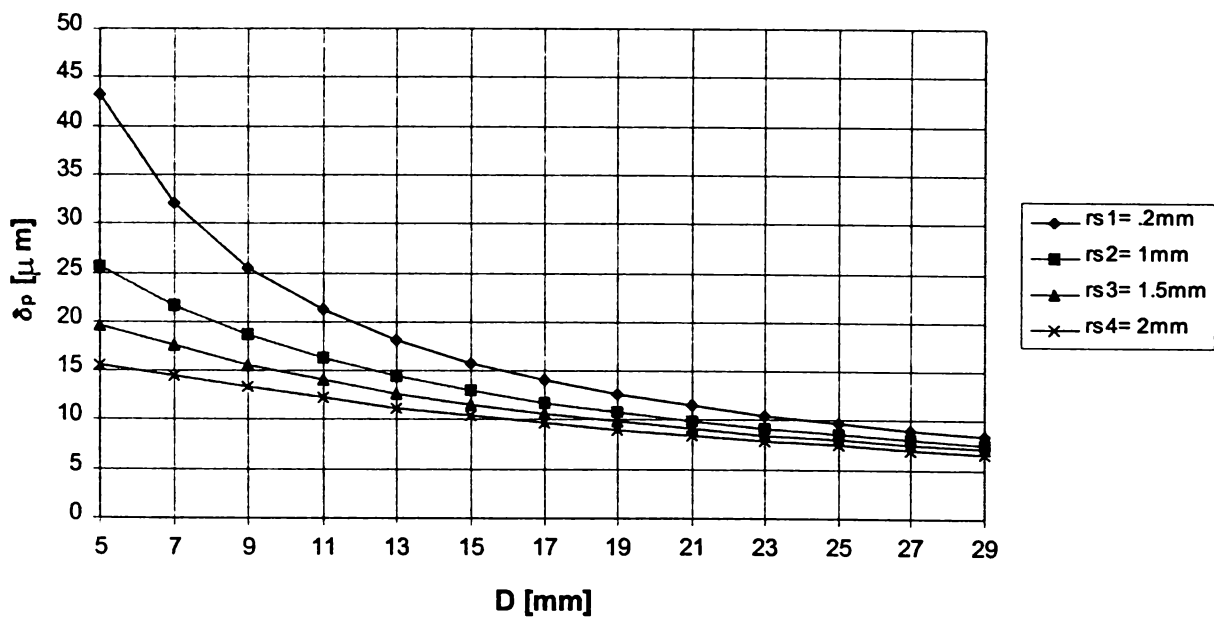


Figura 3.19 Influența diametrului piesei de măsurat asupra erorii δ_p de deplasare a axei palpatorului ($e = 0,5$ mm)

De asemenea, se observă influența importantă pe care o are raza palpatorului r_s asupra mărimii erorii în cauză. Această influență se manifestă pregnant pentru valori ale diametrului de măsurat D , situate spre limita inferioară a intervalului

considerat și se estompează odată cu creșterea diametrului de măsurat, indiferent de valoarea excentricității e .

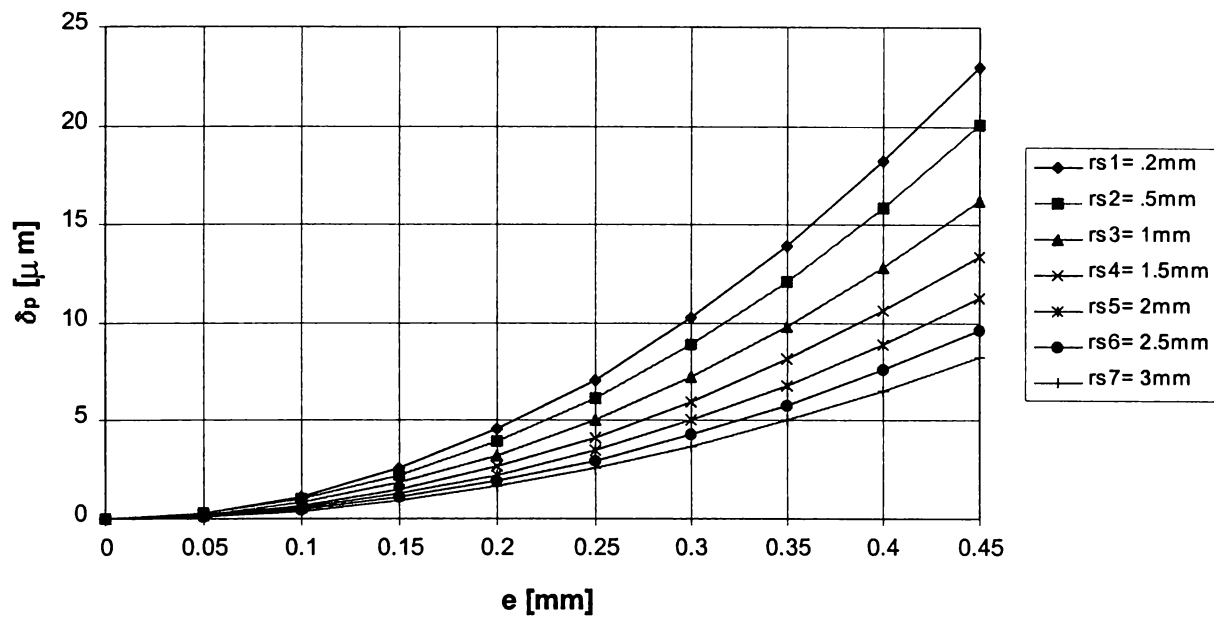


Figura 3.20 Influența excentricității asupra erorii δ_p de captare ($D = 8\text{ mm}$)

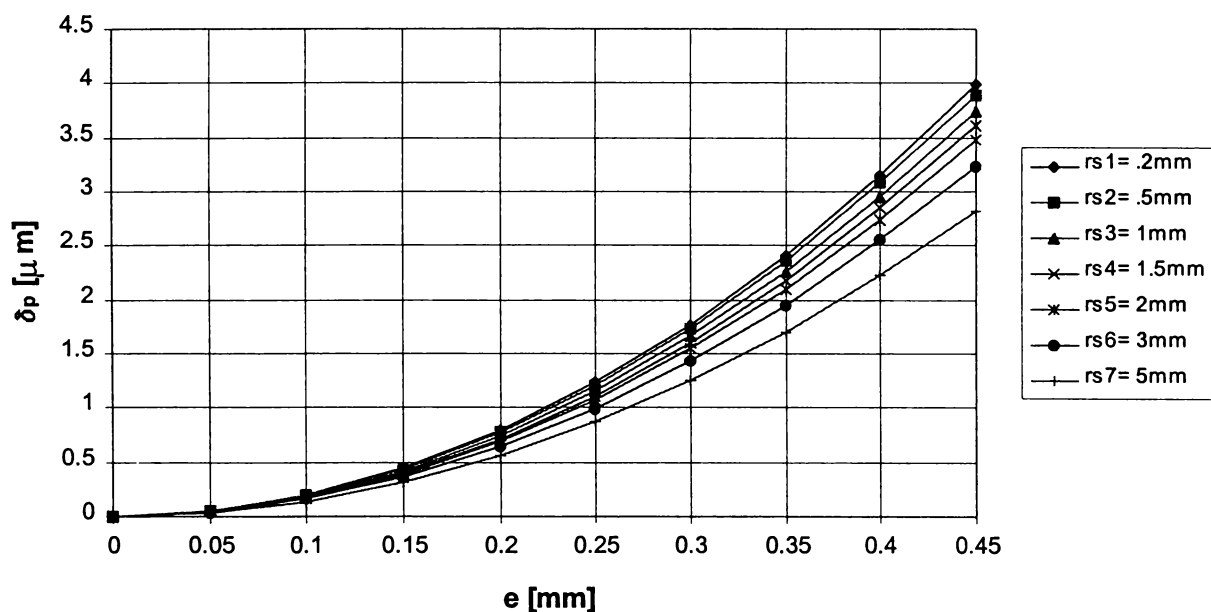


Figura 3.21 Influența excentricității asupra erorii δ_p de captare ($D = 50\text{ mm}$)

Ultimele două reprezentări indică necesitatea luării unor măsuri de limitare a valorii excentricității dintre axa piesei și cea de palpate, similare celor prezentate în cazul măsurării fără contact. Pe măsura creșterii diametrului piesei de măsurat, în general pentru $D > 25\text{ mm}$, se pot accepta și valori mai mari ale excentricității, observându-se totodată și micșorarea importantă a influenței razei palpatorului asupra erorii de captare.

Pentru cazul controlării unei suprafețe cilindrice interioare cu un palpator (figura 3.22), această eroare poate fi dedusă, similar cazului unei suprafețe cilindrice exterioare, prin explicitarea diferenței a două segmente:

$$\delta'_p = \overline{OM} - \overline{OA} = R - \overline{OA} \quad (3.38)$$

Din asemănarea triunghiurilor ΔOAN și ΔO_1A_1N (figura 3.22) rezultă:

$$\frac{\overline{AN}}{R} = \frac{\overline{NA_1}}{r_s} \Leftrightarrow \frac{\overline{AN} - \overline{NA_1}}{R - r_s} = \frac{\overline{AN}}{R} \Leftrightarrow \frac{e}{R - r_s} = \frac{\overline{AN}}{R} \quad (3.39)$$

Din ΔOAN ($\hat{A} = 90^\circ$) se deduce:

$$\overline{OA} = \sqrt{R^2 - \overline{AN}^2} \quad (3.40)$$

Ținând cont de (3.39) în relația (3.40) se obține:

$$\overline{OA} = \sqrt{R^2 - \left(\frac{R \cdot e}{R - r_s}\right)^2} = R \sqrt{1 - \left(\frac{e}{R - r_s}\right)^2} \quad (3.41)$$

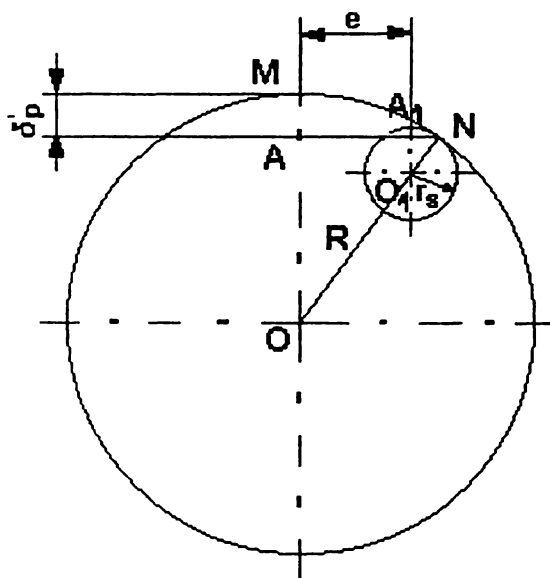


Figura 3.22 Schemă explicativă pentru calculul erorii de deplasare în plan diametral, la palparea interioară

Înlocuind această ultimă expresie în (3.38) rezultă:

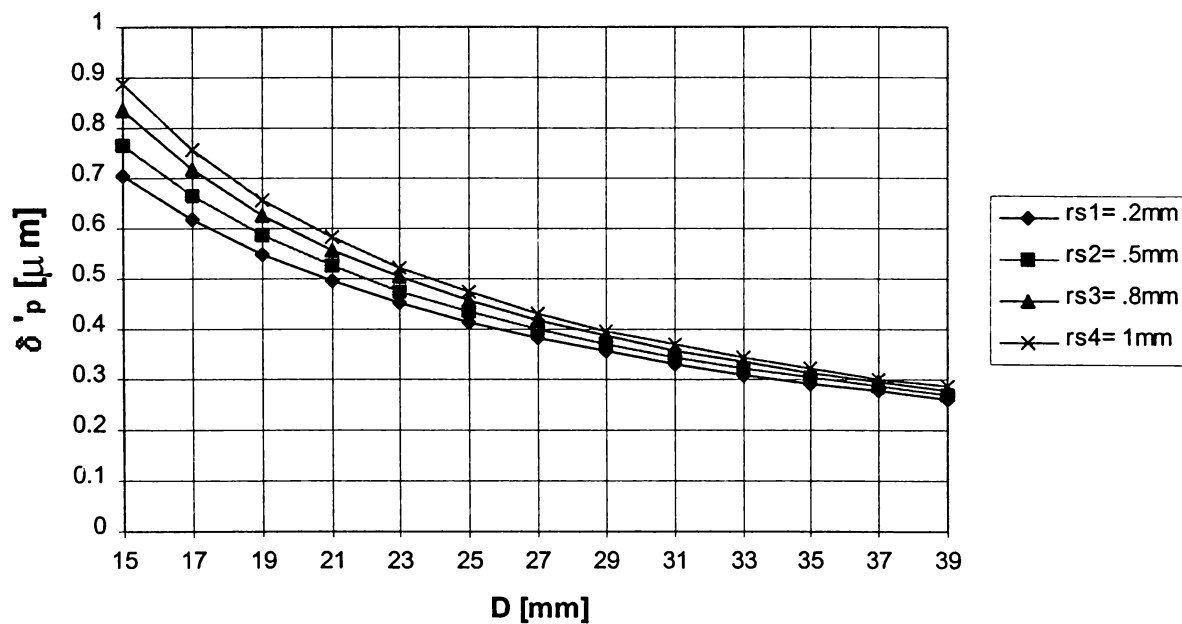
$$\delta'_p = R \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{e}{R - r_s}\right)^2} \right) \quad (3.42)$$

Prin compararea relațiilor (3.37) și (3.42) se observă că eroarea de captare datorată deplasării axei de măsurare în plan diametral este mai mare în cazul palpării interioare decât în cel al palpării exterioare, pentru aceleași valori ale diametrului de măsurat D și ale razei palpatorului r_s .

Folosind relația anterioară a fost cuantificată, cu ajutorul programului de calcul, eroarea de captare δ'_p cauzată de deplasarea palpatorului în plan diametral (tabelul 3.11) și, în același timp, s-a urmărit variația acestei erori, atât în funcție de diametrul piesei D (figurile 3.23 și 3.24), cât și în funcție de valoarea excentricității e (figura 3.25).

Tabelul 3.11 Eroarea de captare δ'_p cauzată de deplasarea axei palpatorului

| D [mm] | Eroarea de deplasare a axei palpatorului δ'_p [μm] | | | | | | | |
|-----------|--|----------------|----------------|--------------|--------------------------------|----------------|----------------|--------------|
| | Excentricitatea $e_1 = 0.1$ mm | | | | Excentricitatea $e_2 = 0.5$ mm | | | |
| | Raza palpatorului sferic r_s [mm] | | | | | | | |
| | $r_{s1} = 0.2$ | $r_{s2} = 0.5$ | $r_{s3} = 0.8$ | $r_{s4} = 1$ | $r_{s1} = 0.2$ | $r_{s2} = 0.5$ | $r_{s3} = 0.8$ | $r_{s4} = 1$ |
| 15 | 0.7037 | 0.7653 | 0.8354 | 0.8876 | 17.6130 | 19.157 | 20.914 | 22.222 |
| 17 | 0.6169 | 0.6641 | 0.7168 | 0.7556 | 15.437 | 16.618 | 17.939 | 18.910 |
| 19 | 0.5492 | 0.5864 | 0.6276 | 0.6575 | 13.740 | 14.672 | 15.702 | 16.45 |
| 21 | 0.4949 | 0.525 | 0.558 | 0.5817 | 12.379 | 13.133 | 13.959 | 14.553 |
| 23 | 0.4503 | 0.4752 | 0.5022 | 0.5216 | 11.263 | 11.886 | 12.563 | 13.046 |
| 25 | 0.4131 | 0.434 | 0.4566 | 0.4726 | 10.332 | 10.855 | 11.419 | 11.820 |
| 27 | 0.3816 | 0.3994 | 0.4185 | 0.432 | 9.5432 | 9.9889 | 10.467 | 10.804 |
| 29 | 0.3545 | 0.3699 | 0.3863 | 0.3978 | 8.8662 | 9.2504 | 9.6601 | 9.9485 |
| 31 | 0.3311 | 0.3444 | 0.3587 | 0.3686 | 8.2789 | 8.6135 | 8.9688 | 9.218 |
| 33 | 0.3105 | 0.3223 | 0.3347 | 0.3434 | 7.7646 | 8.0586 | 8.3696 | 8.587 |
| 35 | 0.2924 | 0.3028 | 0.3137 | 0.3214 | 7.3105 | 7.5708 | 7.8454 | 8.0367 |
| 37 | 0.2762 | 0.2855 | 0.2953 | 0.302 | 6.9065 | 7.1387 | 7.3828 | 7.5526 |
| 39 | 0.2618 | 0.2701 | 0.2788 | 0.2849 | 6.5449 | 6.7532 | 6.9717 | 7.1233 |

Figura 3.23 Influența diametrului piesei de măsurat asupra erorii δ'_p de deplasare a axei palpatorului ($e = 0,1$ mm)

Într-adevăr, valorile calculate pentru palparea interioară (tabelul 3.11) sunt superioare celor obținute pentru aceleași diametre D și raze ale palpatoarelor r_s la palparea exterioară (tabelul 3.10). Și în acest caz este evident că o eventuală excentricitate $e = 0,5$ mm conduce la rebutarea pieselor, chiar în condițiile neglijării

altor tipuri de erori, deși s-au analizat erorile începând cu diametre ale piesei de 15 mm.

De asemenea, se observă influența importantă pe care o are raza palpatorului r_s asupra mărimii erorii în cauză, deși intervalul de variație pentru această rază s-a restrâns la valorile uzuale folosite în cazul măsurărilor interioare. În plus, se observă că spre deosebire de palparea exterioară mărirea razei determină creșterea acestei componente a erorii de măsurare.

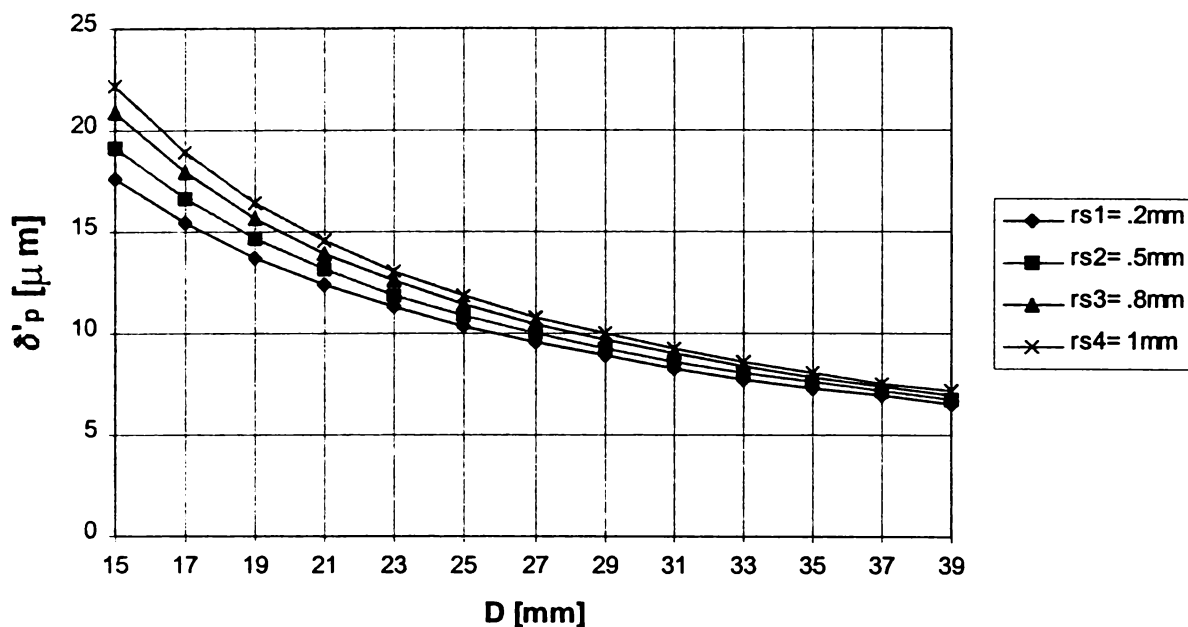


Figura 3.24 Influența diametrului piesei de măsurat asupra erorii δ'_p de deplasare a axei palpatorului ($e = 0,5\text{ mm}$)

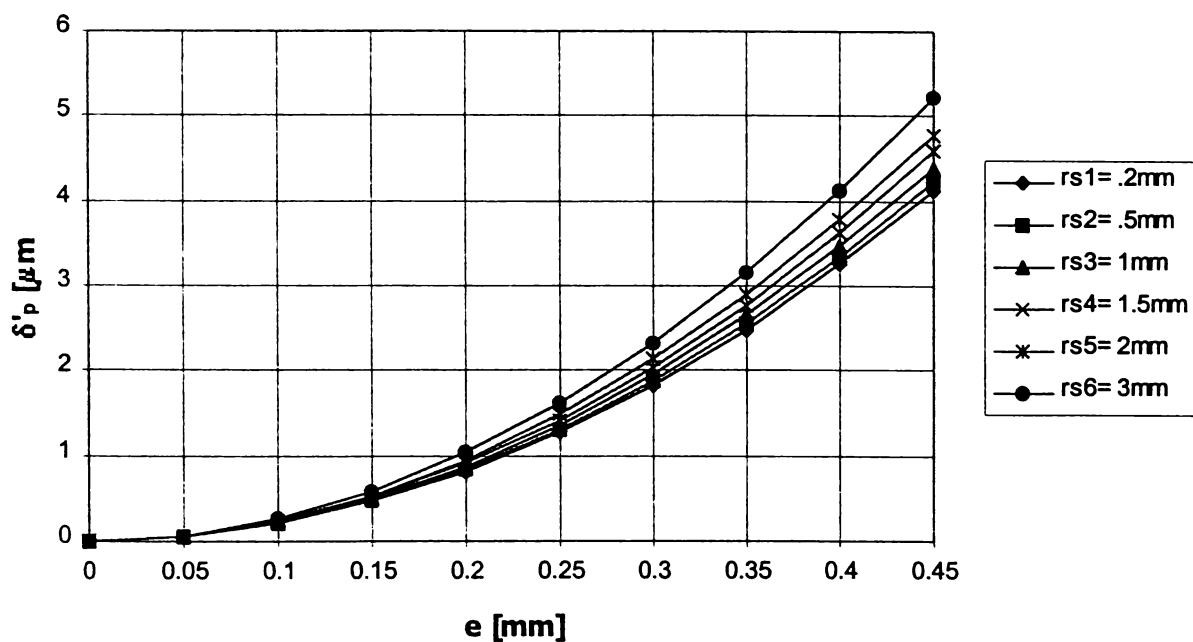


Figura 3.25 Influența excentricității asupra erorii δ'_p de captare ($D = 50\text{ mm}$)

Reprezentarea din *figura 3.25* confirmă valorile mai mari ale erorii obținute la palparea interioară și necesitatea adoptării unor măsuri de limitare a excentricității dintre axa piesei și cea de captare. Pentru valoarea generică adoptată $D = 50$ mm, se observă diminuarea influenței razei palpatorului asupra erorii de captare.

3.4. Analiza comparativă a erorilor datorate deplasării axei de captare în plan diametral, la măsurarea pneumatică cu și fără contact

Deși analiza separată, făcută în paragrafele anterioare, a erorilor datorate deplasării axei de captare în plan diametral arăta posibilitatea micșorării acestora prin adoptarea metodei de măsurare fără contact, s-a pus problema identificării unor eventuale situații în care erorile obținute la măsurarea prin palpate să fie comparabile, sau chiar mai mici. S-a folosit în acest scop, același program de calcul, care permite identificarea și compararea rapidă a erorilor ce afectează măsurarea în cele două cazuri, pentru diverse valori ale parametrilor.

Într-adevăr, prin reprezentarea în același sistem de coordonate a curbelor de eroare caracteristice măsurării cu și fără contact, s-au putut evidenția, pentru unele cazuri concrete, punctele de intersecție ce delimitează intervalele de dimensiuni în care acest tip de eroare este mai mic la măsurarea cu contact.

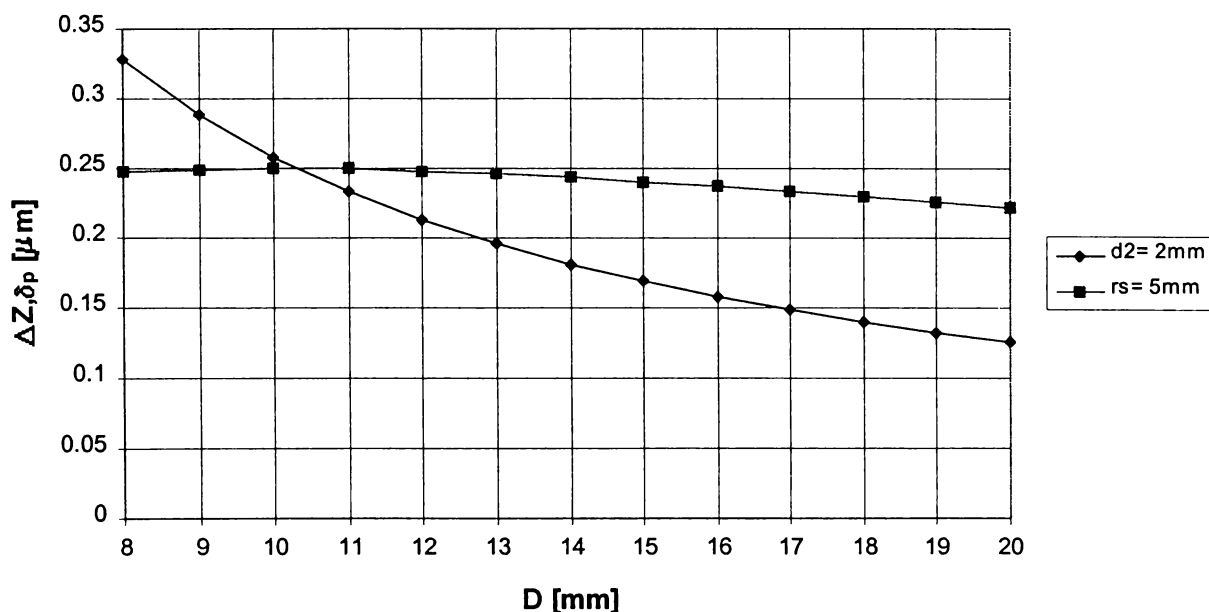


Figura 3.26 Comparație între erorile de deplasare a axei la măsurarea cu și fără contact pentru $e = 0,1$ mm, $d_2 = 2$ mm, $r_s = 5$ mm

Însă, aceste rezultate s-au obținut pentru valori ale razelor palpatoarelor situate spre limita superioară acceptată în practica măsurărilor cu contact, mai rar folosite în construcția sistemelor pneumatice de control activ, respectiv $r_s = 5 \text{ mm}$ (figurile 3.26 și 3.27) sau $r_s = 4 \text{ mm}$ (figura 3.28).

Din aceste figuri se observă că pe măsură ce r_s crește punctul de intersecție al celor două curbe se deplasează spre valori mai mari ale lui D , deci domeniul în care $\Delta z > \delta_p$ se lărgeste. De asemenea, comparând abscisele punctelor de intersecție obținute în figurile 3.26 și 3.27, se poate conchide că diametrul duzei de măsurare d_2 influențează în mică măsură mărimea domeniului amintit.

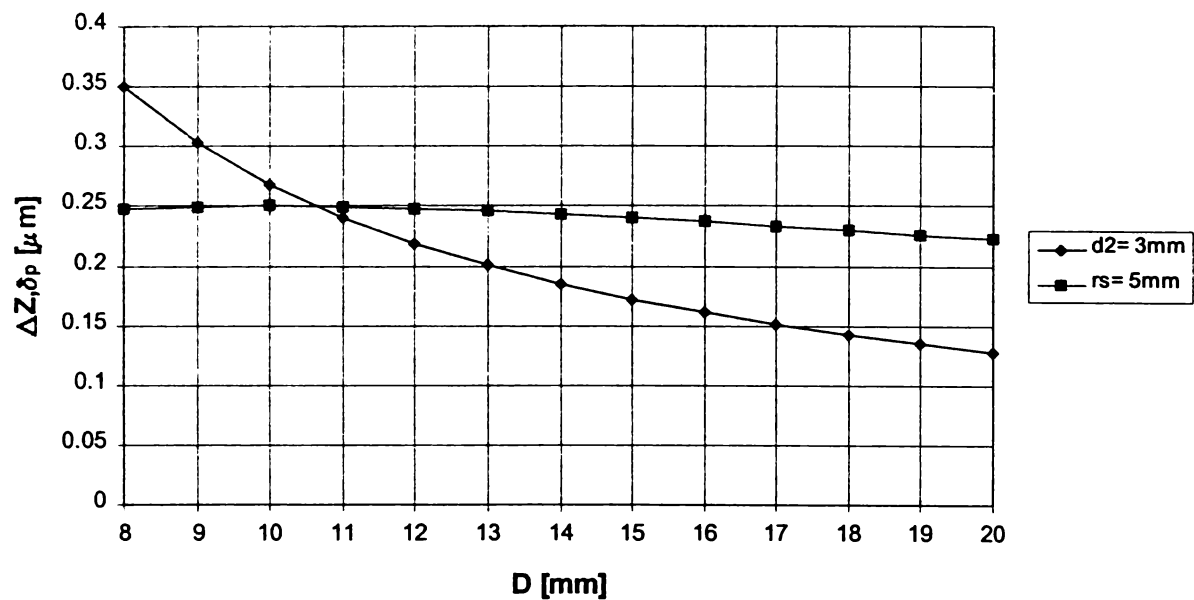


Figura 3.27 Comparație între erorile de deplasare a axei la măsurarea cu și fără contact pentru $e = 0,1 \text{ mm}$, $d_2 = 3 \text{ mm}$, $r_s = 5 \text{ mm}$

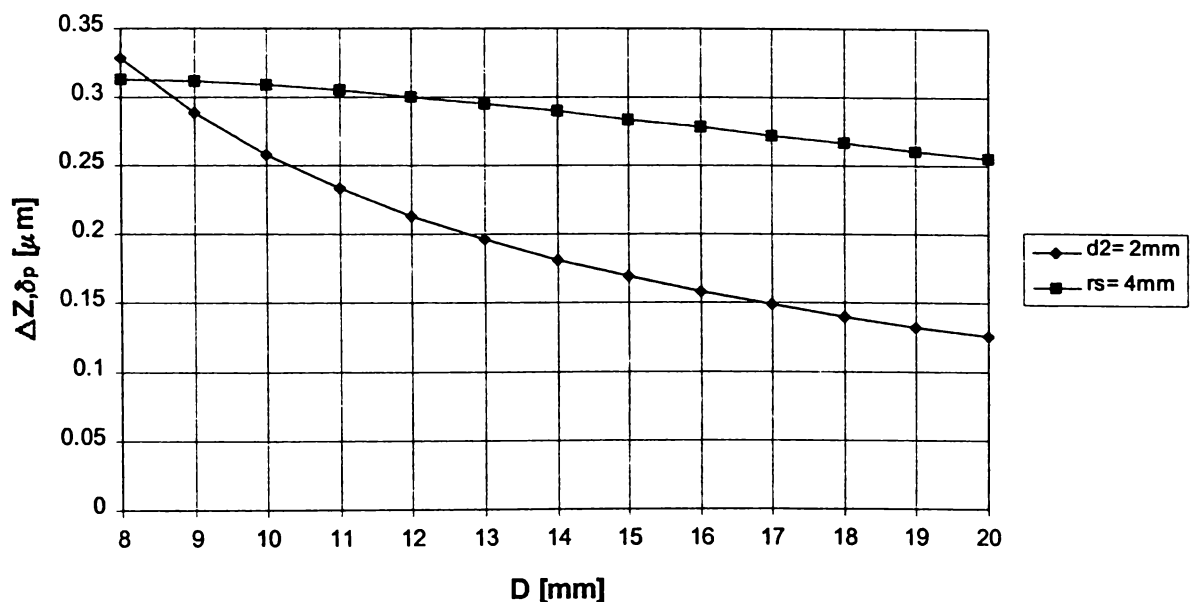


Figura 3.28 Comparație între erorile de deplasare a axei la măsurarea cu și fără contact pentru $e = 0,1 \text{ mm}$, $d_2 = 2 \text{ mm}$, $r_s = 4 \text{ mm}$

Aceste observații sunt întărite de o serie de reprezentări grafice prezentate în anexa 1, pentru diverse valori ale parametrilor r_s și d_2 . În plus, adoptarea unor valori diferite pentru excentricitatea e , arată că practic mărimea acesteia nu influențează valoarea diametrului D , obținută la intersecția celor două curbe de eroare.

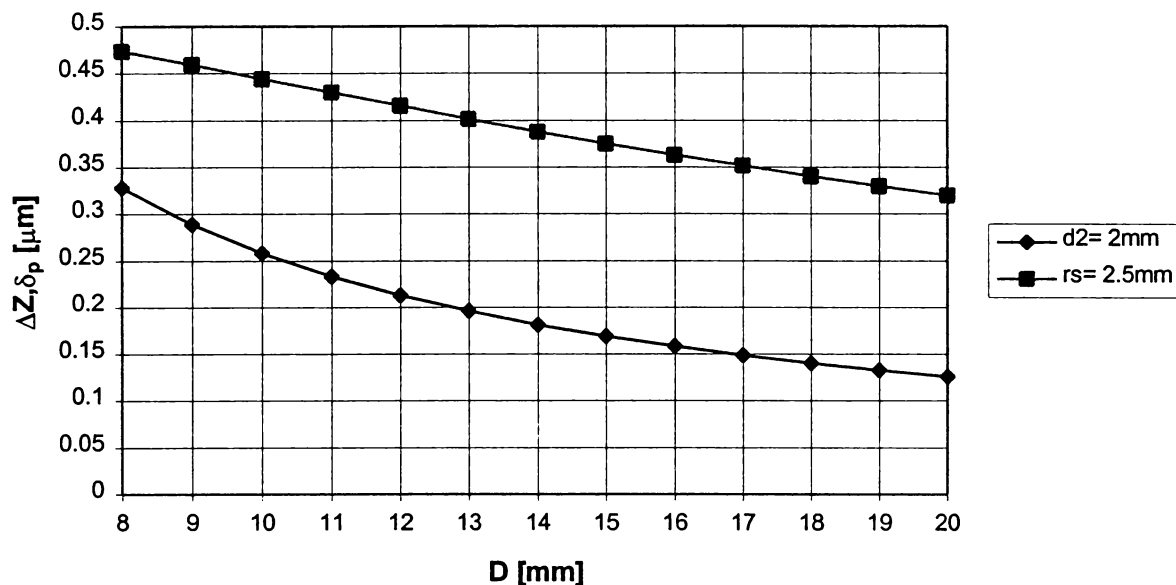


Figura 3.29 Comparație între erorile de deplasare a axei la măsurarea cu și fără contact pentru $e = 0,1 \text{ mm}$, $d_2 = 2 \text{ mm}$, $r_s = 2,5 \text{ mm}$

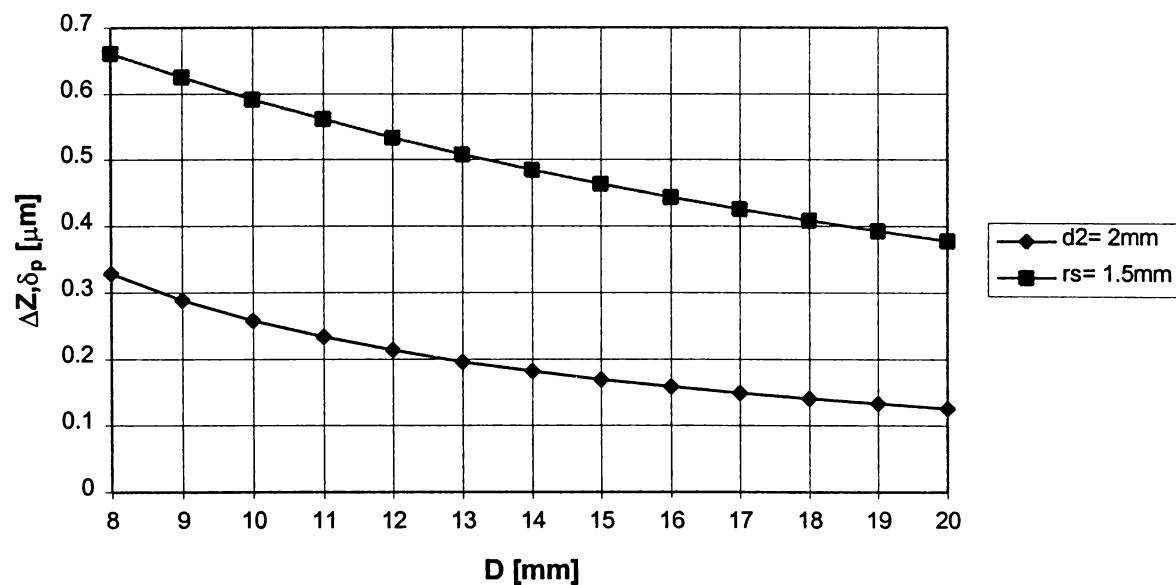


Figura 3.30 Comparație între erorile de deplasare a axei la măsurarea cu și fără contact pentru $e = 0,1 \text{ mm}$, $d_2 = 2 \text{ mm}$, $r_s = 1,5 \text{ mm}$

Pe de altă parte, în cazul valorilor adoptate uzual pentru raza palatoarelor, așa cum rezultă din figurile 3.29 și 3.30, erorile datorate deplasării axei de captare în plan diametral sunt mai mici la măsurarea pneumatică fără contact, pe întreg domeniul de măsurare. Această concluzie este confirmată și pentru alte diametre ale duzei de măsurare sau valori ale excentricității, în reprezentările din anexa 1.

3.5. Prezentarea programului de calcul realizat

Programul de calcul al expresiilor matematice care definesc diversele tipuri de erori s-a realizat într-un limbaj derivat din Visual Basic, adaptat pentru Excel ([B4]).

Limbajul Excel permite utilizatorului crearea unei comenzi speciale pentru automatizarea unor operații repetabile și foarte bine precizate. Această comandă specială se numește *macro*, la apelarea căruia se lansează programul. Pentru a mări viteza de lucru, acestui macro i se asignează un buton (pictogramă), care asigură desfășurarea procedurii de calcul doar executând clic pe el ([M5], [N4]).

Primul pas în crearea aplicației în Visual Basic a fost realizarea interfeței, partea vizuală a aplicației cu care utilizatorul intră în contact. Aceasta conține ferestre de dialog, cu ajutorul cărora utilizatorul își selectează opțiunile în funcție de ceea ce dorește să realizeze.

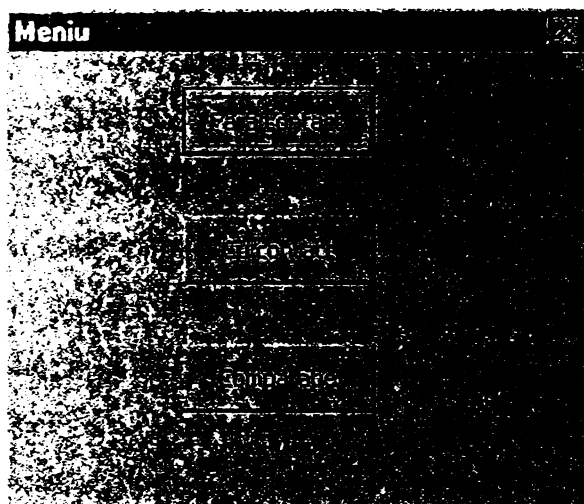


Figura 3.31 Meniul principal

Prima fereastră de dialog (figura 3.31), care apare la apelarea macro-ului, permite alegerea tipului de analiză ce se dorește a fi parcursă:

- a erorilor de captare la măsurarea pneumatică fără contact;
- a erorilor de captare la măsurarea cu contact;
- comparativă, a celor două categorii prezentate anterior.

Alegerea primei opțiuni implică apariția următoarei ferestre de dialog (figura 3.32), care afișează tipurile de erori ce pot fi calculate și reprezentate grafic:

- eroarea cauzată de curbura suprafeței de măsurat Δz_1 ;
- eroarea relativă de curbură Δz_{1E} ;
- eroarea cauzată de deplasarea axei duzei de măsurare, pe direcția avansului de pătrundere $\Delta z = f(D)$;
- eroarea cauzată de deplasarea axei duzei de măsurare, pe direcția avansului de pătrundere $\Delta z = f(e)$;
- suma erorilor de curbură și de deplasare Δz_2 .

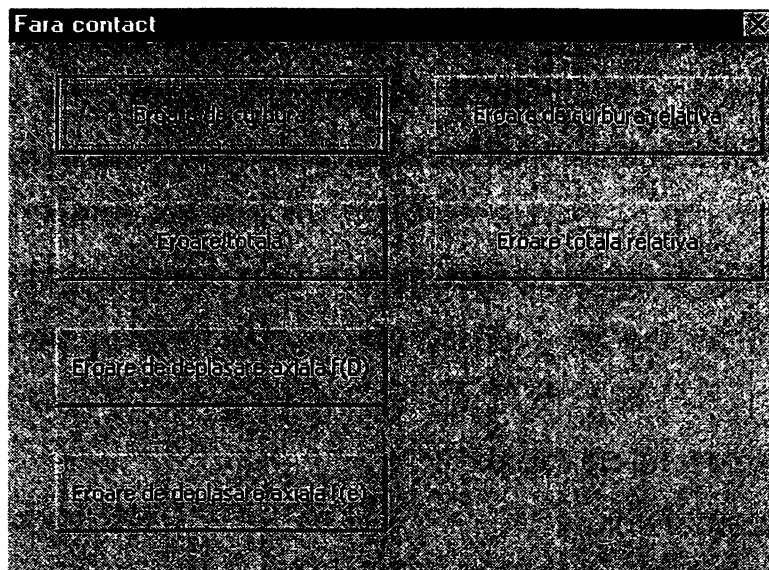


Figura 3.32 Fereastră de dialog pentru măsurarea fără contact

Activarea butonului “Cu contact” conduce la apariția unei noi ferestre de dialog (figura 3.33), care permite alegerea erorii de analizat:

- eroarea cauzată de deplasarea axei palpatorului $\delta_p = f(D)$, pe direcția avansului de pătrundere, la controlul suprafețelor cilindrice exterioare;
- eroarea cauzată de deplasarea axei palpatorului $\delta'_p = f(D)$, pe direcția avansului de pătrundere, la controlul suprafețelor cilindrice interioare;
- eroarea cauzată de deplasarea axei palpatorului $\delta_p = f(e)$, pe direcția avansului de pătrundere, la controlul suprafețelor cilindrice exterioare;
- eroarea cauzată de deplasarea axei palpatorului $\delta'_p = f(e)$, pe direcția avansului de pătrundere, la controlul suprafețelor cilindrice interioare;
- eroarea datorată deformațiilor elastice de contact δ_c , la controlul suprafețelor cilindrice exterioare;
- eroarea relativă de contact δ_{cE} .

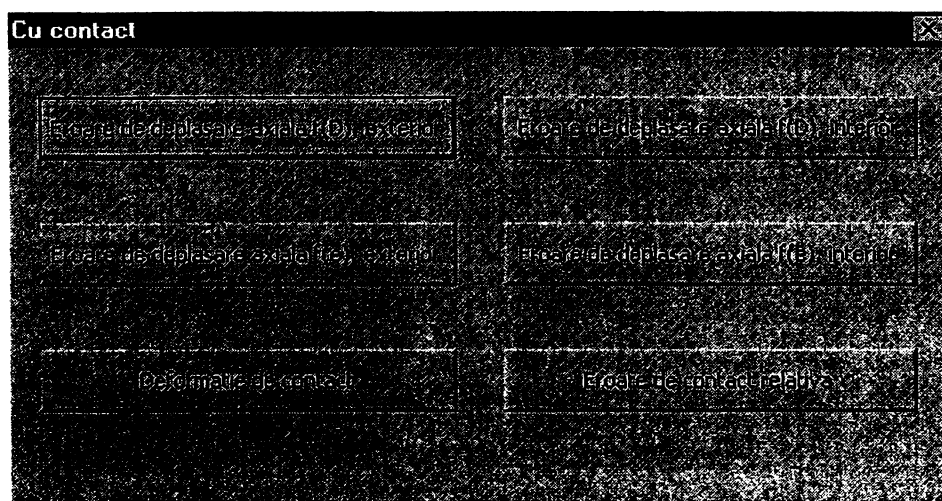


Figura 3.33 Fereastră de dialog pentru măsurarea cu contact

Pentru calculul și reprezentarea grafică a fiecărei erori, trebuie introduse în fereastra de dialog corespunzătoare, exemplificată în *figura 3.34* pentru determinarea erorii cauzate de curbura suprafeței de măsurat, datele inițiale referitoare la:

- diametrul d_2 al duzei de măsurare;
- domeniul de analiză, precizat prin valorile inițiale și finale ale diametrului D al piesei;
- valoarea pasului de calcul;
- raza palpatoarelor r_s ;
- forța de măsurare P ;
- excentricitatea e .

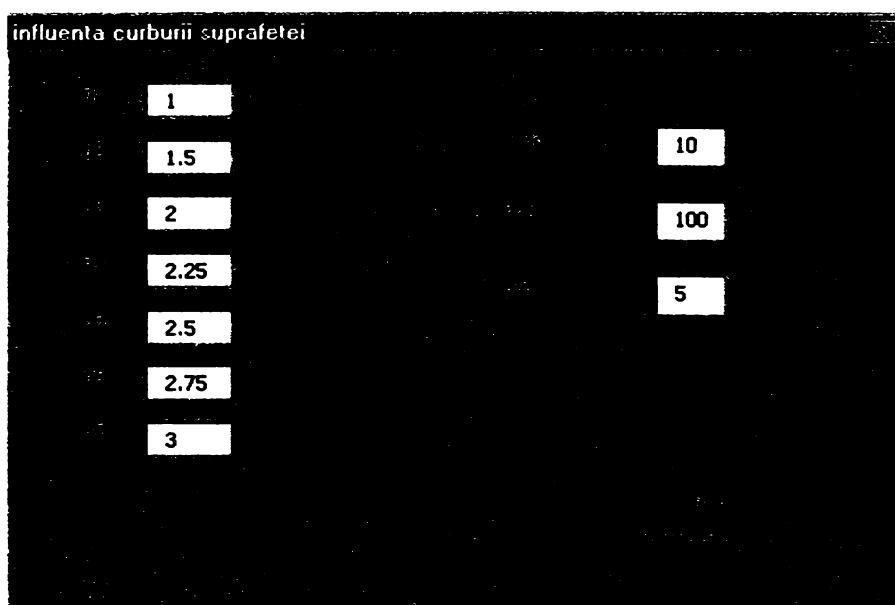


Figura 3.34 Exemplu de fereastră pentru introducerea datelor

Programul nu rulează atunci când se introduc date inițiale care conduc la apariția unor situații incompatibile, imposibile din punct de vedere practic. Același lucru se întâmplă și când se omite introducerea unor valori necesare ale parametrilor precizați anterior. În ambele cazuri, utilizatorul primește mesaje pentru a realiza corecțiile necesare (*figura 3.35*).

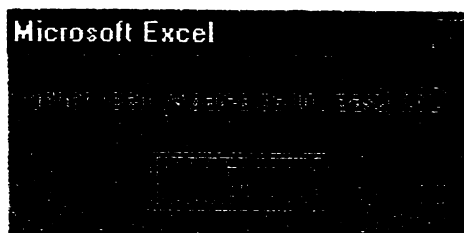
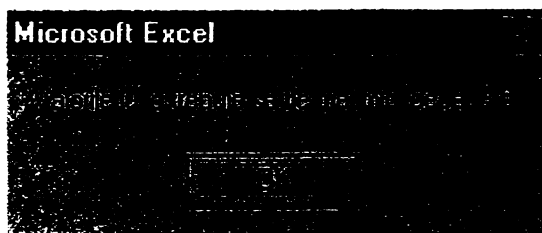


Figura 3.35 Exemple de mesaje de eroare

Pentru fiecare tip de eroare se realizează o foaie de calcul, numită în funcție de acesta, în care sunt prezentate tabelar și grafic valorile calculate. Alegerea corespunzătoare a pasului și a diametrelor piesei permite analiza focalizată, foarte rapidă a erorilor, pe diverse domenii de interes.

În *anexa 1* sunt înfățișate, spre exemplificare, alte valori și reprezentări grafice obținute prin utilizarea programului, iar în *anexa 2* este prezentat, cu comentarii, programul-cod realizat.

3.6. Concluzii

Analiza efectuată asupra unor erori de captare specifice controlului activ pneumatic permite avansarea următoarelor concluzii:

1. Datorită caracterului referențial al sistemelor pneumatice de control activ, precum și a valorilor absolute reduse ale unor erori elementare – cum ar fi erorile cauzate de curbura suprafeței și de deformațiile de contact – influența acestora asupra erorii totale de măsurare poate fi neglijată.

2. Pentru valori ale diametrului măsurat $D > 13$ mm, eroarea datorată deplasării axei duzei de măsurare în plan diametral, pe direcția avansului de pătrundere, nu depinde de diametrul acesteia.

3. Erorile importante cauzate de necoincidența dintre axa piesei și axa de captare impun, atât la măsurarea cu contact, cât și la cea fără contact, adoptarea unor măsuri de limitare cum ar fi, de exemplu, plasarea înclinată a captorilor față de verticală.

4. În cazul măsurărilor cu contact, eroarea de captare datorată deplasării axei de măsurare pe direcția avansului de pătrundere este mai mare la palparea suprafețelor cilindrice interioare decât la palparea celor exterioare, în aceleași condiții inițiale de măsurare.

5. Există situații în care eroarea cauzată de deplasarea axei de captare pe direcția avansului de pătrundere este mai mare la măsurarea fără contact, față de cea cu contact.

Toate erorile au fost calculate pentru cazul unui singur punct de măsurare. Existența a două puncte de măsurare conduce la dublarea valorilor analizate, dar nu neapărat la obținerea unei erori totale mai mari, pentru că există și alte categorii de erori care se compensează sau se diminuează, cum ar fi de exemplu, eroarea

determinată de deplasarea axei de captare în plan diametral, perpendicular pe avansul de pătrundere.

Ponderea erorilor datorate deplasării axei de captare pe direcția avansului de pătrundere în eroarea de măsurare sistematică se estimează a fi una importantă, comparabilă cu cea a erorilor cauzate de fenomenele termice din timpul prelucrării, legate de transformarea cvasitotală a lucrului mecanic specific de așchiere în căldură. Aprecierea semnificației acestor erori trebuie făcută în funcție de tema concretă de control, respectiv de precizia dimensională impusă. În acest scop, programul de calcul realizat poate cuantifica erorile pentru orice valoare a diametrului de prelucrat și a parametrilor constructivi ai captorilor, indicați pe parcursul capitolului.

Se recomandă, din punctul de vedere al limitării acestor erori, folosirea captorilor fără contact (în conformitate cu rezultatele sintetizate în *figurile 3.29 și 3.30*) sau a captorilor cu contact, cu palpatoare cilindrice, care sunt insensibili la deplasările axei de captare în plan diametral. În acest ultim caz, eroarea determinată de neparalelismul palpatoarelor este foarte redusă, datorită caracterului referențial al măsurărilor pneumatice.

4.

MODELAREA MATEMATICĂ A CONTROLULUI PNEUMATIC AL DIMENSIUNILOR

4.1. Factori de influență și indicatori de performanță la modelarea controlului pneumatic al dimensiunilor

În conformitate cu considerațiile prezentate în paragraful 2.9 și cu concluziile din paragraful 2.11, modelarea matematică a controlului pneumatic al dimensiunilor s-a realizat pentru un sistem cu traductor pneumo-magnetofluidic, având un subansamblu de captare cu duză ejectoare. După analiza tuturor factorilor de influență și a indicatorilor de performanță, modelarea s-a concentrat asupra unui singur indicator – sensibilitatea sistemului de control – considerat esențial în obținerea unei precizii dimensionale ridicate la prelucrarea prin rectificare.

Modelarea analitică, având o importanță practică limitată datorită ipotezelor simplificatoare acceptate, a constituit baza formulării unor concluzii parțiale, pornind de la care s-a conceput modelarea experimentală ulterioară. Aceasta din urmă s-a concretizat prin explicitarea unui model de ordinul I pentru sensibilitatea sistemului de control și prin trasarea curbelor de nivel constant, ce permit alegerea unor valori ale mărimilor de reglare ce asigură nivelul impus pentru indicatorul de performanță modelat.

Pentru identificarea analitică și/sau empirică a sistemului pneumatic de control a cărui schemă–bloc este prezentată în *figura 2.30*, este utilă reprezentarea sa ca sistem cibernetic. Comportamentul și tendințele de evoluție ale sistemului, determinate de factorii de influență, sunt definite și evaluate de către indicatorii de performanță (*figura 4.1*).

Factorii de influență pot fi grupați în funcție de subsistemul cărora le aparțin, în modul prezentat în *figura 4.1*, blocul A:

A1 – Factori de influență determinați de comparatorul pneumatic;

A2 – Factori de influență determinați de comparatorul magnetofluidic;

A3 – Factori de influență determinați de amplificatorul de semnal.

Aceste mulțimi de factori conțin, pe de o parte o serie de mărimi calitative sau cantitative cu caracter cvasirigid, iar pe de altă parte mărimi cantitative de reglare.

Caracterul cvasirigid al primei categorii este dat de faptul că, pentru o anumită construcție a sistemului de măsurare, factorii nu pot fi modificați în vederea creșterii performanței procesului de control. Studiarea influenței acestor factori asupra indicatorilor de performanță este utilă în etapa de proiectare a sistemului, în schimb mărimile de reglare pot fi modificate, cu relativă ușurință, în funcție de cerințele impuse de către tema de măsurare.

Mulțimea factorilor de influență determinați de comparatorul pneumatic a fost analizată în paragrafele 2.3.3, 2.4.1, 2.5, *figurile 2.12* și *2.13*.

Factorii de influență de natură geometrică referitori la bobină, ecranul feromagnetic și tuburile piezometrice verticale, cuprinși în mulțimea A2, pot fi identificați în *figurile 2.31* și *2.32*. Parametrii de intrare ce caracterizează fluidul magnetic și influența acestora asupra unor indicatori de performanță au fost prezentați în paragraful 2.9.

Indicatorii de performanță ai sistemului de control activ, pe baza cărora acesta poate fi evaluat, sunt prezentați în blocul C, *figura 4.1*. Acești indicatori au fost grupați în următoarele trei mulțimi:

C1 – Caracteristici metrologice, referitoare la regimul staționar al sistemului de control;

C2 – Caracteristici dinamice;

C3 – Caracteristici de exploatare.

Mulțimea caracteristicilor metrologice C1 cuprinde indicatorii care se definesc după cum urmează ([B1], [C3], [D6], [M2], [N3]):

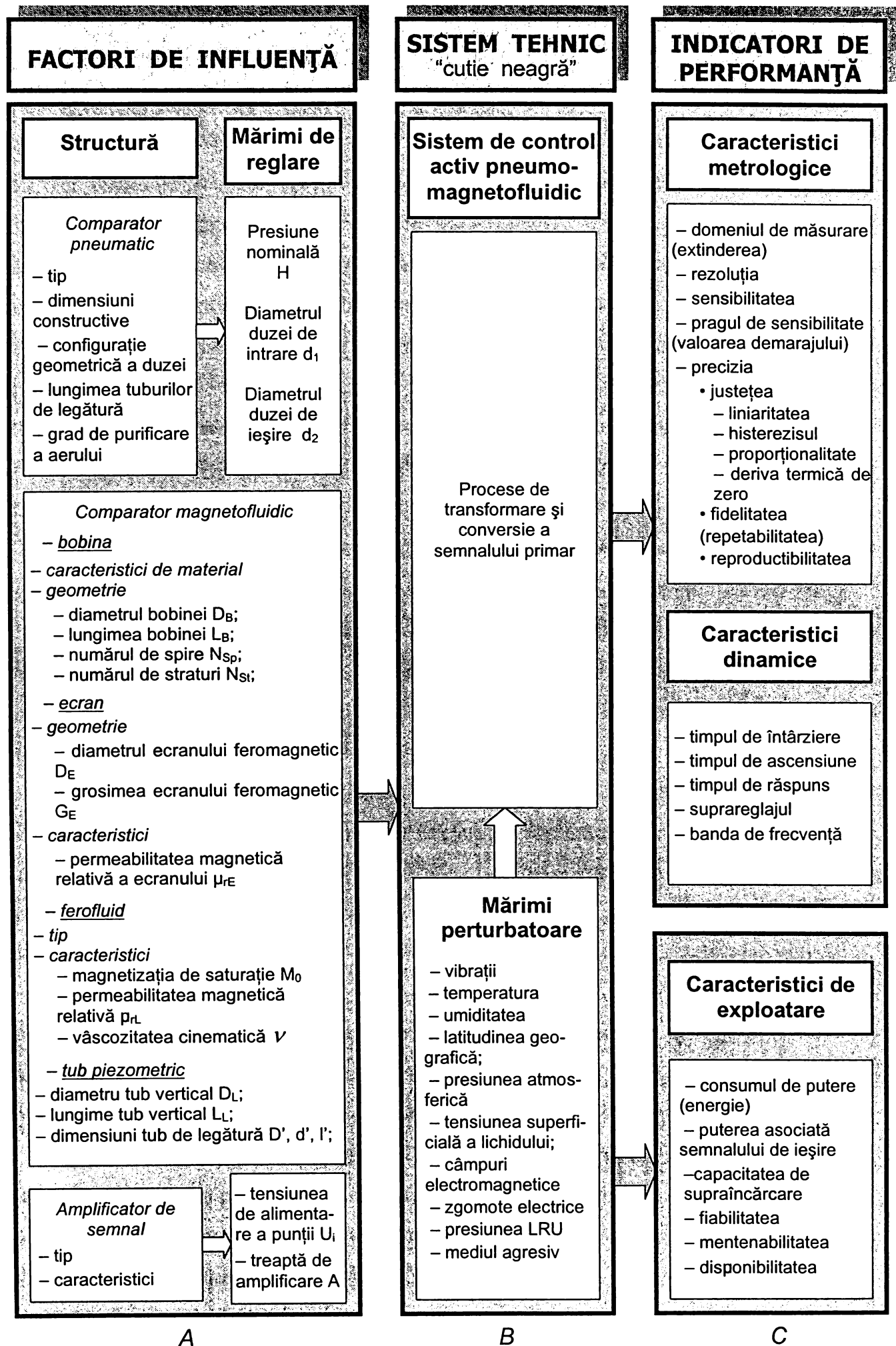


Figura 4.1 Modelul intrări-ieșiri al sistemului de control pneumo-magnetofluidic

- *domeniul de măsurare* reprezintă mulțimea de valori cuprinse între limita minimă și cea maximă măsurabilă;
- *extinderea* este raportul dintre valorile limită maxime și minime ce pot fi măsurate; fiind adimensional, caracterizează mai bine decât indicatorul precedent metoda de măsurare;
- *rezoluția* reprezintă cea mai mică diferență dintre indicațiile sistemului de măsurare care poate fi percepută în mod semnificativ. Cu alte cuvinte, este intervalul de variație minimă a măsurandului, necesar pentru a determina apariția unui salt al semnalului de ieșire, adică în cazul aparatelor cu afișare numerică, modificarea cu o unitate a cifrei cu cea mai mică semnificație;
- *sensibilitatea* exprimă raportul între variația semnalului de ieșire și variația corespunzătoare a semnalului de intrare; poate fi definită o sensibilitate medie, una punctuală (locală) sau una relativă. Mărimea inversă a sensibilității reprezintă constanta sistemului de măsurare;
- *pragul de sensibilitate* sau *valoarea demarajului* reprezintă valoarea minimă a măsurandului care poate fi pusă în evidență cu ajutorul sistemului de control, în condițiile reale de funcționare ale acestuia. Pragul de sensibilitate este determinat de rezoluție, fluctuațiile proprii și exterioare ale procesului de măsurare și de afișajul de zero al sistemului;
- *precizia* reprezintă gradul de apropiere a rezultatului măsurării cu sistemul considerat, față de o valoare convențional adevărată a măsurandului. Este descrisă de eroarea totală a sistemului de control, obținută din însumarea erorilor sistematice și aleatoare ale acestuia. Analog preciziei se introduc indicatori ce caracterizează performanța sistemului, luând în considerare doar unele dintre aceste categorii de erori;
- *justețea* este caracteristica metrologică a unui sistem de control, ce exprimă măsura în care media rezultatelor obținute în urma efectuării unui număr mare de măsurări este apropiată de o valoare convențional adevărată a măsurandului. Se exprimă prin erorile sistematice ale sistemului, care, după identificarea surselor care le generează, pot fi cuantificate teoretic în modul prezentat în capitolul al 3-lea și, în multe situații, pot fi astfel eliminate. Justețea poate fi determinată de:
 - *liniaritate*, care reprezintă diferența maximă dintre curba de etalonare și dreapta ce trece prin punctele corespunzătoare valorii minime și maxime ale semnalului de intrare; se exprimă în procente față de scara de ieșire;

– *histerezis*, ce este caracteristica sistemului exprimând proprietatea valorii maxime de ieșire de a fi dependentă atât de valoarea mărimii de intrare, cât și de sensul de variație al acesteia;

– *deriva termică de zero*, care reprezintă variațiile semnalului de ieșire produse de modificarea temperaturii în prezența sarcinii; se exprimă în procente față de scala de ieșire, pentru variația temperaturii cu 1 C.

– *fidelitatea sau repetabilitatea* este proprietatea sistemului de control de a furniza valori foarte apropiate între ele la măsurarea succesivă a aceluiași obiect de măsurat și în aceleași condiții, adică utilizând același program de operare, în același loc, în aceleași condiții de mediu, într-un interval relativ scurt de timp și eliminând erorile sistematice. Se exprimă prin erorile aleatoare ale sistemului, care nu pot fi determinate teoretic și, prin urmare, se tolerează;

– *reproductibilitatea* reprezintă gradul de concordanță între rezultatele măsurărilor succesive ale aceluiași obiect, efectuate în condiții de măsurare diferite (programe de operare diferite, în locuri diferite și/sau în momente diferite de timp).

Indicatorii ce compun mulțimea caracteristicilor dinamice C2 se definesc astfel ([B1], [C3], [D6], [M2]):

– *timpul de întârziere* reprezintă diferența între momentul începutului variației mărimii de intrare și momentul începutului modificării mărimii de ieșire;

– *timpul de ascensiune* reprezintă durata de evoluție a semnalului de ieșire de la 10% la 90% din valoarea acestei mărimi, în regim staționar;

– *timpul de răspuns sau durata regimului tranzitoriu* reprezintă durata de la începutul variației mărimii de intrare până în momentul încadrării mărimii de ieșire într-un interval de eroare admis;

– *suprareglajul* reprezintă depășirea maximă de către semnalul de ieșire a mărimii din regimul staționar;

– *banda de frecvență* exprimă intervalul de frecvențe în care amplificarea se găsește între anumite limite.

Din mulțimea caracteristicilor de exploatare C3 fac parte indicatorii ([B1], [D8]):

– *consumul de putere* necesar funcționării la parametrii prescriși, caracterizează din punct de vedere energetic sistemul de măsurare, impunându-se din considerente tehnice și economice minimizarea sa;

– *puterea asociată semnalului de ieșire* este un indicator energetic, ce condiționează utilizarea ulterioară a acestuia;

- *capacitatea de supraîncărcare* reprezintă proprietatea de a suporta valori ale mărimii de intrare, care depășesc valoarea maximă admisă;
- *fiabilitatea* reprezintă aptitudinea unui sistem de a-și îndeplini funcția stabilită de-a lungul unei durate prevăzute, în condiții date, deci probabilitatea ca sistemul de măsurare să funcționeze în acest interval de timp, în limitele parametrilor săi metrologici;
- *mentenabilitatea* exprimă activitatea de menținere a caracteristicilor calitative ale unui sistem;
- *disponibilitatea* exprimă capacitatea sistemului de a funcționa un timp cât mai îndelungat.

4.2. Modelarea analitică a sistemului de control pneumo-magnetofluidic

4.2.1. Modelarea sistemului pneumatic

Modelarea matematică a comparatorului pneumatic cu duză ejectoare își propune, pentru început stabilirea funcției de transfer a acestuia, adică determinarea relației dintre mărimea de intrare reprezentată de interstițiul de scăpare a aerului z și mărimea de ieșire, adică presiunea h din camera de măsurare.

Modelarea se bazează pe teoria curgerii gazelor prin ajutaje ([D14], [M3]). Ca *ipoteză simplificatoare* inițială, această teorie consideră curgerea aerului adiabatică, deoarece se neglijează conductibilitatea termică a acestuia (temperatura absolută $T = \text{const}$). Este valabilă deci relația:

$$p \cdot V^\kappa = \text{const} \quad (4.1)$$

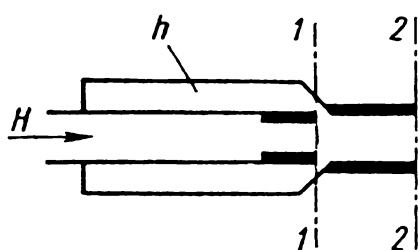


Figura 4.2 Schema de principiu a unui captor pneumatic cu duză ejectoare

unde:

p – presiunea aerului;

V – volumul specific;

κ – exponent adiabatic;

Calculul sistemelor pneumatice cu duză ejectoare pornește de la legea de conservare a impulsului, scrisă între secțiunile 1–1 și 2–2 din figura 4.2, adică între secțiunile de ieșire ale duzei de intrare, respectiv ale duzei ejectoare ([V2]). Ecuația amintită se scrie sub forma:

$$Q_1 \cdot v_1 - (Q_1 + Q_2) \cdot v_2 = A_2 \cdot (p_a - p_t) + \Delta P - F_r \quad (4.2)$$

unde:

Q_1 – debitul masic ce trece prin duza de intrare;

v_1 – viteza curentului de aer ce trece prin duza de intrare;

v_2 – viteza curentului de aer ce trece prin duza de măsurare;

Q_2 – debitul masic al aerului ejectat;

A_2 – aria laterală a interstițiului de scăpare a aerului din duza de măsurare;

p_a – presiunea atmosferică;

p_t – presiunea absolută de măsurare, dată de relația:

$$p_t = p_a + h \quad (4.3)$$

h – presiunea din camera de măsurare indicată de tubul piezometric;

ΔP – forța de presiune suplimentară, ce apare la muchia de ieșire a duzei de măsurare;

F_r – forța de frecare între secțiunile 1–1 și 2–2.

Determinarea funcției de transfer se face în continuare adoptând o serie de ipoteze suplimentare:

1. Pentru un regim permanent stabilizat, valoarea debitului masic $Q_2 = 0$;
2. Se consideră forța de frecare $F_r = 0$, datorită valorii scăzute a acesteia;
3. Se poate considera nulă forța suplimentară ΔP , în scopul simplificării calculelor.

Ținând cont de aceste observații și înlocuind relația (4.3) în (4.2):

$$Q_1 \cdot (v_1 - v_2) + A_2 \cdot h = 0 \quad (4.4)$$

$$\Rightarrow Q_1 \cdot v_1 \cdot \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) + A_2 \cdot h = 0 \quad (4.4')$$

Debitul masic al curentului de aer ce trece prin duza de intrare este dat de relația:

$$Q_1 = A_1 \cdot \rho_1 \cdot v_1 \quad (4.5)$$

unde:

A_1 – aria secțiunii de trecere a aerului prin duza de intrare;

ρ_1 – densitatea aerului ce trece prin duza de intrare.

Înlocuind expresia debitului în relația (4.4'), aceasta devine:

$$A_1 \cdot \rho_1 \cdot v_1^2 \cdot \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) + A_2 \cdot h = 0 \quad (4.6)$$

Conform legii lui Bernoulli, a transferului de energie, se poate scrie următoarea expresie, între două secțiuni situate înainte și după duza de intrare:

$$\frac{p_n}{\gamma_1} + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{p_t}{\gamma_1} + \frac{v_1^2}{2g} \quad (4.7)$$

unde:

v_0 – viteza aerului înaintea duzei de intrare, care poate fi considerată nulă, ținând cont de volumul camerei de presiune constantă în raport cu debitul ce trece prin duză ($v_0 = 0$);

γ_1 – greutatea specifică a aerului ce trece prin duza de intrare;

$$\gamma_1 = \rho_1 \cdot g \quad (4.8)$$

g – accelerația gravitațională;

p_n – presiunea nominală absolută, dată de relația:

$$p_n = p_a + H \quad (4.9)$$

unde:

H – suprapresiunea din camera de presiune constantă.

În relația (4.7) s-au neglijat pierderile prin frecări, prin vârtejuri și datorate contracției la intrarea duzei, precum și variația potențialului forțelor masice specifice. În aceste condiții, valoarea vitezei v_1 va fi:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g \cdot (p_n - p_t)}{\gamma_1}} \quad (4.10)$$

Ținând cont de relațiile (4.3), (4.8) și (4.9), expresia precedentă devine:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g \cdot (H - h)}{\gamma_1}} = \sqrt{\frac{2(H - h)}{\rho_1}} \quad (4.11)$$

Pornind de la ecuația de continuitate, poate fi exprimat raportul vitezelor curentului de aer ce trece prin cele două duze:

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (4.12)$$

$$\Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{\rho_1 \cdot A_1}{\rho_2 \cdot A_2} \quad (4.12')$$

unde:

ρ_2 – densitatea aerului ce trece prin duza de măsurare.

Înlocuind în relația (4.6) expresiile (4.11) și (4.12'), rezultă:

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot \frac{2(H-h)}{\rho_1} \cdot \left(1 - \frac{\rho_1 \cdot A_1}{\rho_2 \cdot A_2}\right) + A_2 \cdot h = 0 \quad (4.13)$$

$$\text{Notând } \varepsilon = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (4.14)$$

și înmulțind ecuația precedentă cu raportul $\frac{A_2}{A_1^2}$, aceasta devine:

$$2 \cdot (H-h) \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} - \varepsilon\right) + \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 = 0 \quad (4.15)$$

$$\Rightarrow h = \frac{2H \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} - \varepsilon\right)}{2 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} - \varepsilon\right) - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} \quad (4.16)$$

Pentru cazul uzual al duzelor de formă cilindrică, cele două arii se calculează cu relațiile:

$$A_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \quad (4.17)$$

$$A_2 = \pi \cdot d_2 \cdot z \quad (4.18)$$

unde:

d_1 –diametrul duzei de intrare;

d_2 diametrul duzei de măsurare;

z – interstițiul de scăpare a aerului.

Înlocuind valorile celor două arii date de relațiile (4.17) și (4.18) în expresia (4.16), caracteristica de transfer a comparatorului pneumatic va fi de forma:

$$h = \frac{2H \cdot \left(\frac{4 \cdot d_2 \cdot z - \varepsilon}{d_1^2}\right)}{\left(\frac{4 \cdot d_2 \cdot z - \varepsilon}{d_1^2}\right) - \frac{8 \cdot d_2^2}{d_1^4} \cdot z^2} \quad (4.19)$$

În figura 4.3 ([D12], [V2]) s-a reprezentat calitativ alura acestei caracteristici (curba 2) împreună cu cea a unui sistem pneumatic cu captor obișnuit duză-clapetă (curba 1), dată de relația (2.5). Comparând cele două caracteristici, reprezentate pentru aceeași valoare a raportului de amplificare, se remarcă o zonă mult mai extinsă a porțiunii liniare a caracteristicii 2, a sistemului cu duză ejectoare.

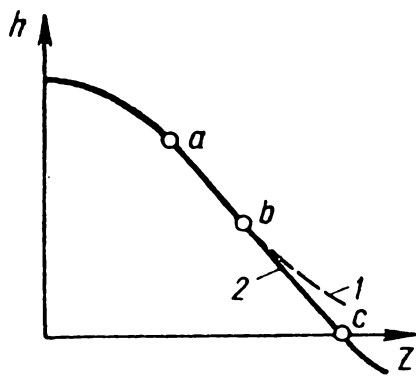


Figura 4.3 Caracteristica statică la măsurarea cu duză ejectoare

Aceasta se explică prin faptul că la sistemul cu duză ejectoare, pentru valori mari ale interstițiului de scăpare a aerului z , crește cantitatea de aer ejectată din camera de măsurare și, ca urmare, scade mai rapid presiunea h din camera respectivă, putând lua chiar valori negative.

Raportul ε al densităților aerului în cele două duze depinde atât de presiunea nominală de lucru H , cât și de raportul ariilor A_2/A_1 . Experimental s-a demonstrat această dependență ca fiind:

$$\varepsilon = 1 + \exp \left(- \frac{1}{m_H \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2} \right) \quad (4.20)$$

unde:

m_H – constantă, care depinde de presiunea de lucru H .

Sensibilitatea sau raportul de amplificare U_h al sistemului pneumatic cu duză ejectoare se determină derivând în raport cu z expresia (4.19) a funcției de transfer.

Pentru simplificarea calculelor, notăm:

$$a(z) = \frac{A_2}{A_1} = \frac{4 \cdot d_2}{d_1^2} \cdot z \quad (4.21)$$

Atunci relațiile (4.19) și (4.20) devin:

$$h = \frac{2H \cdot (a - \varepsilon)}{2 \cdot (a - \varepsilon) - a^2} \quad (4.22)$$

$$\varepsilon = 1 + \exp \left(- \frac{1}{m_H \cdot a^2} \right) \quad (4.23)$$

Cu aceste notații, sensibilitatea se va calcula cu:

$$U_h = \left| \frac{dh}{da} \cdot \frac{da}{dz} \right| \quad (4.24)$$

$$\frac{dh}{da} = \frac{f'(a) \cdot g(a) - g'(a) \cdot f(a)}{g^2(a)} \quad (4.25)$$

unde:

$$f(a) = 2H \cdot (a - \varepsilon) \quad (4.26)$$

$$g(a) = 2 \cdot (a - \varepsilon) - a^2 \quad (4.27)$$

$$\Rightarrow f'(a) = 2H \cdot \left(1 - \frac{d\varepsilon}{da} \right) \quad (4.38)$$

$$\Rightarrow g'(a) = 2 - 2 \frac{d\varepsilon}{da} - 2a \quad (4.39)$$

unde:

$$\frac{d\varepsilon}{da} = \frac{2}{m_H \cdot a^3} \cdot \exp \left(-\frac{1}{m_H \cdot a^2} \right) = \frac{2(\varepsilon - 1)}{m_H \cdot a^3} \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} f'(a) \cdot g(a) - g'(a) \cdot f(a) &= \\ &= 2H \cdot \left[1 - \frac{2(\varepsilon - 1)}{m_H \cdot a^3} \right] \cdot [2(a - \varepsilon) - a^2] - 2 \left[1 - a - \frac{2(\varepsilon - 1)}{m_H \cdot a^3} \right] \cdot 2H(a - \varepsilon) \end{aligned} \quad (4.31)$$

După efectuarea calculelor și înlocuirea în formula (4.25), obținem:

$$\frac{dh}{da} = \frac{2H \cdot \left[a(a - 2\varepsilon) + \frac{2(\varepsilon - 1)}{m_H \cdot a} \right]}{[2(a - \varepsilon) - a^2]^2} \quad (4.32)$$

Cum

$$\frac{da}{dz} = \frac{4d_2}{d_1^2} \quad (4.33)$$

înlocuind relațiile (4.32) și (4.33) în expresia (4.24), se obține:

$$U_h = \left| \frac{8H \cdot \left[a(a - 2\varepsilon) + \frac{2(\varepsilon - 1)}{m_H \cdot a} \right]}{[2(a - \varepsilon) - a^2]^2} \cdot \frac{d_2}{d_1^2} \right| \quad (4.34)$$

Explicitând raportul a , sensibilitatea se poate calcula cu relația:

$$U_h = \left| \frac{8H \cdot \left[\frac{16d_2^2}{d_1^4} \cdot z^2 - \frac{8d_2 \cdot \varepsilon}{d_1^2} \cdot z + \frac{d_1^2(\varepsilon - 1)}{2m_H \cdot d_2 \cdot z} \right]}{\left[\left(\frac{4d_2}{d_1^2} \cdot z - \varepsilon \right) - \frac{8d_2^2}{d_1^4} \cdot z^2 \right]^2} \cdot \frac{d_2}{d_1^2} \right| \quad (4.35)$$

Relația (4.35) indică faptul că sensibilitatea comparatorului pneumatic este influențată de diametrele duzei de intrare d_1 și duzei de măsurare d_2 , precum și de presiunea nominală H .

4.2.2. Modelarea sistemului magnetofluidic

Modelarea analitică a traductorului magnetofluidic presupune găsirea unor relații matematice care să exprime legătura dintre inductanța unei bobine cu miez magnetic lichid și nivelul ferofluidului din bobina respectivă.

Modelarea pentru cazul bobinelor reale, ale căror parametri sunt arătați în figura 2.32 este posibilă doar prin metode de investigare numerică, mai precis prin simularea numerică a câmpului magnetic al bobinei. Abordările analitice ale calculului inductanței bobinei presupun considerarea acesteia, în absența carcusei și a ecranului, cufundată în lichid magnetic.

O aproximare relativ bună a realității, existentă în literatură ([D5], [P2], [P4]), având avantajul prezentării unor relații matematice simple, pornește de la următoarele ipoteze inițiale:

1. Fluidul magnetic este considerat un mediu:
 - liniar, deoarece, intensitatea câmpului magnetic fiind mică, se folosește porțiunea liniară a curbei de magnetizare;
 - omogen;
 - fără magnetizație permanentă;
2. Bobina se consideră cu spire filiforme, deoarece raportul dintre diametrul secțiunii sale transversale și diametrul conductorului este foarte mare, determinat de faptul că în cazul traductoarelor diferențiale magnetofluidice, factorul de calitate al bobinelor nu prezintă importanță deosebită și deci, se recomandă un conductor de dimensiune cât mai redusă;
3. Vectorul inducție magnetică are aceeași valoare în toate punctele din planul unei spire, valoare egală cu cea din centrul spirei.

Renunțarea la această ultimă ipoteză simplificatoare conduce la obținerea unor expresii analitice complicate, având ca termeni integrale eliptice complete de modul variabil. Prin urmare, se preferă menținerea acestei ipoteze, chiar dacă, datorită faptului că valoarea fluxului magnetic este mai mare în vecinătatea conductorului decât în centrul spirei, inductanța va fi aproximată cu o valoare mai mică ([P3]).

Fie h_1 înălțimea coloanei de fluid magnetic din interiorul unei bobine de lungime l (figura 2.32). Atunci inductivitatea L a acestei bobine va fi dată de relația:

$$L(h_1) = \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot D_B^2 \cdot N_{Sp}^2}{8l^2} \cdot \frac{\mu_{rR} - \mu_{rA}}{\mu_{rR} + \mu_{rA}} \cdot [4\mu_{rL} \cdot \sqrt{h_1^2 + \frac{D_B^2}{4}} - 4\mu_{rA} \cdot \sqrt{(l - h_1)^2 + \frac{D_B^2}{4}} + \mu_{rA} \cdot \sqrt{4(l - h_1)^2 + \frac{D_B^2}{4}} - \mu_{rL} \cdot \sqrt{4h_1^2 + \frac{D_B^2}{4}} + \frac{4\mu_{rL} \cdot \mu_{rA}}{\mu_{rL} - \mu_{rA}} \cdot \sqrt{l^2 + \frac{D_B^2}{4}} - \frac{3(\mu_{rL}^2 + \mu_{rA}^2) - 2\mu_{rL} \cdot \mu_{rA}}{\mu_{rL} - \mu_{rA}} \cdot \frac{D_B}{2}] \quad (4.36)$$

unde:

D_B – diametrul bobinei;

N_{Sp} – numărul de spire al bobinei;

μ_{rL} – permeabilitatea magnetică relativă a lichidului magnetic;

μ_{rA} – permeabilitatea magnetică relativă a aerului;

μ_0 – permeabilitatea magnetică absolută a vidului.

În cazul traductorului diferențial magnetofluidic (figura 2.31), în absența semnalului pneumatic de intrare, nivelul fluidului magnetic în interiorul celor două bobine se ridică până la jumătatea lungimii totale l a acestora. Deci, se poate scrie relația:

$$h_1 + h_2 = l \quad (4.37)$$

sau

$$h_1 = l - h_2 \quad (4.37')$$

unde:

h_1 – înălțimea fluidului magnetic din tubul piezometric racordat la presiunea constantă H ;

h_2 – înălțimea fluidului magnetic din tubul piezometric racordat la presiunea de măsurare h .

Calculând $L(h_2) = L(l - h_1)$ cu formula (4.36), diferența de inductivitate dintre ramurile traductorului va fi:

$$\begin{aligned} \Delta L(h_1) &= L(h_1) - L(l - h_1) = \\ &= \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot D_B^2 \cdot N_{Sp}^2}{8l^2} \cdot \frac{\mu_{rR} - \mu_{rA}}{\mu_{rR} + \mu_{rA}} \cdot [4(\mu_{rL} + \mu_{rA}) \cdot \sqrt{h_1^2 + \frac{D_B^2}{4}} - \\ &- 4(\mu_{rL} + \mu_{rA}) \cdot \sqrt{(l - h_1)^2 + \frac{D_B^2}{4}} + (\mu_{rL} + \mu_{rA}) \cdot \sqrt{4(l - h_1)^2 + \frac{D_B^2}{4}} - \\ &- (\mu_{rL} + \mu_{rA}) \cdot \sqrt{4h_1^2 + \frac{D_B^2}{4}}] \end{aligned} \quad (4.38)$$

Cu notațiile adoptate, diferența dintre nivelele lichidului în tuburile piezometrice (figura 2.31) poate fi scrisă:

$$\Delta x = h_2 - h_1 \quad (4.39)$$

Adunând membru cu membru relațiile (4.37) și (4.39), rezultă:

$$h_1 = \frac{l - \Delta x}{2} \quad (4.40)$$

După înlocuirea înălțimii h_1 a lichidului, expresia (4.38) a diferenței de inductivitate în funcție de diferența de nivel Δx se scrie:

$$\begin{aligned} \Delta L(\Delta x) &= \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot (\mu_{rL} - \mu_{rA}) \cdot D_B^2 \cdot N_{Sp}^2}{16l^2} \cdot [4\sqrt{(l - \Delta x)^2 + D_B^2} - \\ &- 4\sqrt{(l + \Delta x)^2 + D_B^2} + \sqrt{4(l + \Delta x)^2 + D_B^2} - \sqrt{4(l - \Delta x)^2 + D_B^2}] \end{aligned} \quad (4.41)$$

Diferența de nivel Δx dintre ramurile traductorului diferențial este determinată de diferența de presiune Δh între prizele tubului în formă de U:

$$\Delta h = \gamma_L \cdot \Delta x \quad (4.42)$$

$$\Rightarrow \Delta x = \frac{\Delta h}{\gamma_L} = \frac{H - h}{\gamma_L} \quad (4.43)$$

Sensibilitatea traductorului de presiune magnetofluidic este prin definiție:

$$U_L = \left| \frac{d(\Delta L)}{dh} \right| = \left| \frac{d(\Delta L)}{d(\Delta x)} \right| \cdot \left| \frac{d(\Delta x)}{dh} \right| = \frac{1}{\gamma_L} \cdot \left| \frac{d(\Delta L)}{d(\Delta x)} \right| \quad (4.44)$$

Derivând relația (4.41) se obține expresia următoare, care introdusă în relația precedentă explicitează sensibilitatea U_L a traductorului:

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta L)}{d(\Delta x)} = & \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot (\mu_{rL} - \mu_{rA}) \cdot D_B^2 \cdot N_{Sp}^2}{4l^2} \cdot \Delta x \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{4(l - \Delta x)^2 + D_B^2}} + \right. \\ & \left. + \frac{1}{\sqrt{4(l + \Delta x)^2 + D_B^2}} - \frac{1}{\sqrt{(l - \Delta x)^2 + D_B^2}} - \frac{1}{\sqrt{(l + \Delta x)^2 + D_B^2}} \right] \quad (4.45) \end{aligned}$$

Evidențierea diferenței de inductivitate, datorată denivelării lichidului magnetic în cele două ramuri ale traductorului diferențial, se face cu ajutorul schemei din figura 4.4, prin măsurarea tensiunii de dezechilibru a punții U_m .

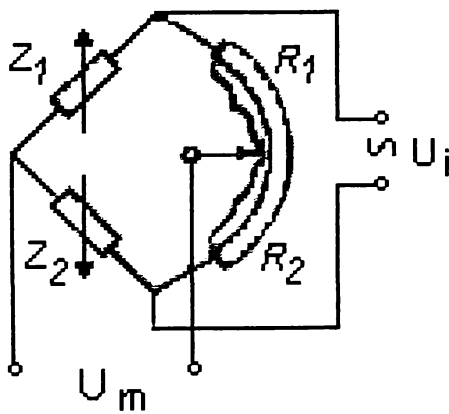


Figura 4.4 Schema punții de măsurare cu traductor diferențial magnetofluidic

Această tensiune este defazată față de tensiunea de alimentare U_i , pentru echilibrarea punții fiind necesare două reglaje, unul de fază și altul de amplitudine ([X1]). În cazul lichidelor magnetice defazajul este foarte mic indiferent de poziția lichidului magnetic, ceea ce permite măsurarea cu puntea dezechilibrată fără ca amplificatoarele de curent alternativ să intre în limitare ([P2]).

Aducerea la zero a punții de măsurare se realizează cu un singur element de reglaj, rezistiv, ca mărime de ieșire considerându-se valoarea medie a tensiunii $U_{m\ med}$ obținută prin redresarea dublă alternanță în fază cu tensiunea de alimentare, a tensiunii de dezechilibru U_m . Realizând bobinele cu rezistențe egale, impedanțele Z_1 și Z_2 din schema prezentată în figura 4.4 pot fi exprimate:

$$Z_1 = R + j \cdot X_1 \quad (4.46)$$

$$Z_2 = R + j \cdot X_2 \quad (4.47)$$

unde:

R – rezistențele bobinelor;

$X_{1,2}$ – reactanțele inductive ale bobinelor.

Conform relațiilor (4.36) și (4.37) se poate accepta:

$$X_1 + X_2 = 2X \quad (4.48)$$

unde:

X – reactanța inductivă a bobinelor în lipsa semnalului pneumatic.

Factorul de calitate al bobinelor se definește:

$$Q_B = \frac{X}{R} \quad (4.49)$$

În cazul în care semnalul pilot de comandă a redresării în fază este dat de tensiunea de alimentare U_i , iar aducerea la zero a punții s-a făcut în momentul în care inductanțele bobinelor erau egale, prin reglarea potențiometrului astfel încât $R_1=R_2$, tensiunea medie redresată se determină cu relația ([P2]):

$$U_{m\ med} = \frac{\sqrt{2} U_i}{2\pi} \cdot \frac{Q_B^2}{1+Q_B^2} \cdot \frac{\Delta L(\Delta x)}{L} = \frac{\sqrt{2} U_i}{2\pi} \cdot \frac{\omega^2 L}{R^2 + \omega^2 L^2} \cdot \Delta L(\Delta x) \quad (4.50)$$

unde:

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (4.51)$$

ω – pulsația tensiunii de alimentare;

f – frecvența purtătoare.

Sensibilitatea schemei de măsurare va rezulta derivând relația (4.50):

$$U_U = \frac{dU_{m\ med}}{d(\Delta L)} = \sqrt{2} U_i \cdot \frac{2\pi f^2 L}{R^2 + 4\pi^2 f^2 L^2} \quad (4.52)$$

Cu relațiile (4.44), (4.45) și (4.52) se poate determina sensibilitatea U_{L-U} a sistemului magnetofluidic, iar având în vedere și relația (4.35) este posibilă exprimarea sensibilității U a întregului lanț de măsurare prezentat în *figura 2.30*:

$$U_{L-U} = U_L \cdot U_U \quad (4.53)$$

$$U = U_h \cdot U_{L-U} = U_h \cdot U_L \cdot U_U \quad (4.54)$$

4.3. Modelarea experimentală a sistemului pneumo-magnetofluidic

4.3.1. Prezentarea instalației experimentale

Instalația experimentală folosită pentru modelare, realizată în conformitate cu lanțul de măsurare prezentat în *figura 2.30* este concepută pe baza principiului aparatelor pneumatice de joasă presiune, de tip Solex, valoarea presiunii nominale din camera de presiune constantă, $H = 200 \text{ mm H}_2\text{O}$, fiind însă mult sub cea minimă folosită în cazul acestor aparate.

Instalația, a cărei imagine de ansamblu este arătată în *figurile 4.5 și 4.6*, se compune din:

- sursa de aer comprimat (motocompresorul, *figura 4.6, E*);
- grupul de preparare a aerului (filtrul și regulatorul grosier de presiune, *figura 4.6, C*);
- comparatorul pneumatic (*figura 4.6, B și C*);
- traductorul magnetofluidic (*figura 4.6, A*);
- sistemul electronic de măsurare și procesare analogică și digitală a semnalului electric (*figura 4.6, D*).

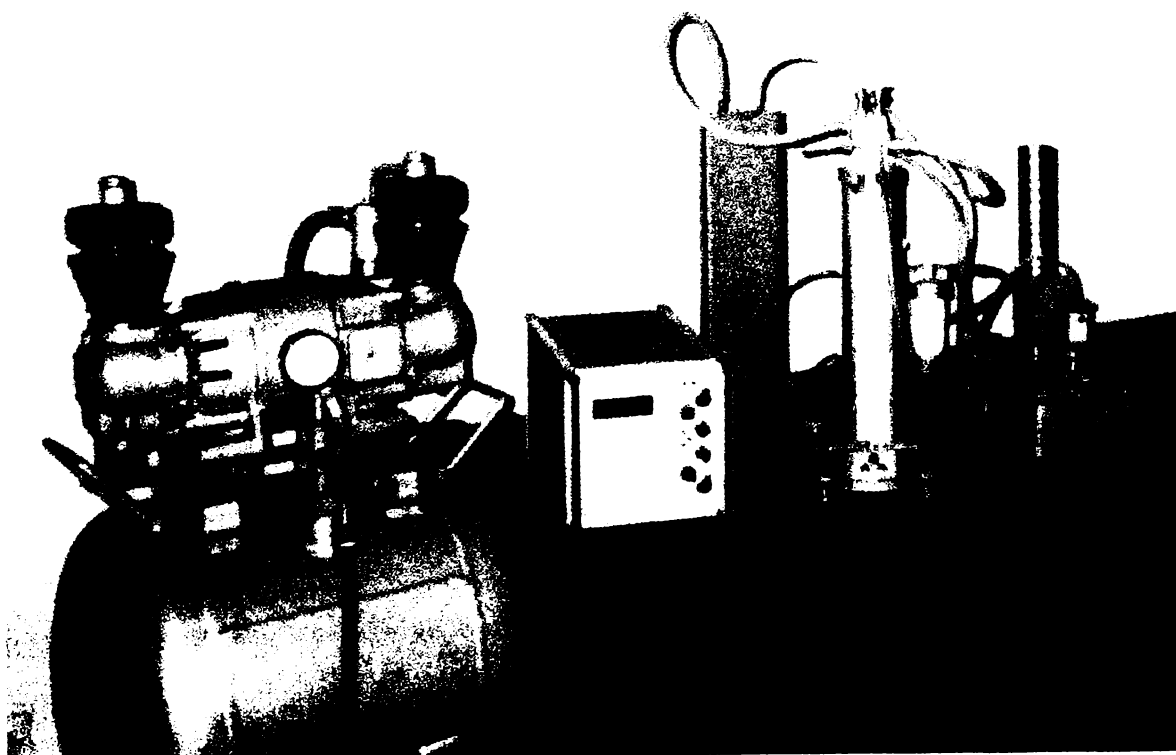


Figura 4.5 Vedere generală a instalației experimentale

Conexiunile subsistemelor

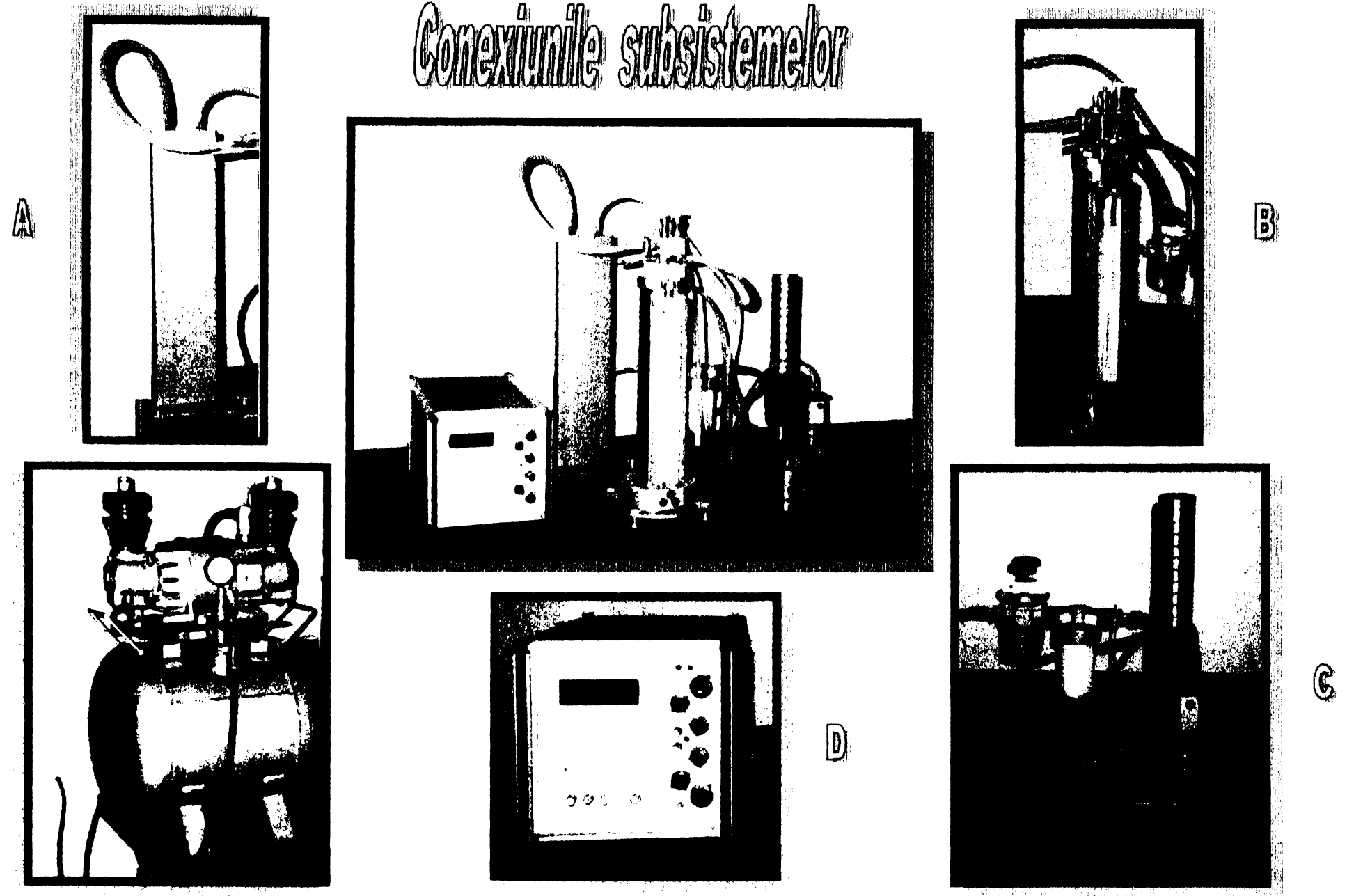


Figura 4.6 Principalele subsisteme componente ale instalației experimentale

Comparatorul pneumatic este format din:

- sistemul de reglare fină a presiunii și indicare analogică (figura 4.6, B);
- sistemul de captare a măsurandului (figura 4.6, C).

Schema principală a instalației folosite la determinările experimentale este prezentată în figura 4.7. Aerul comprimat, provenind de la motocompresor, prestabilizat și filtrat, trece în camera de presiune constantă CPC a sistemului de reglare fină a presiunii și indicare analogică, cu o presiune puțin mai ridicată decât cea nominală H . Valoarea constantă a presiunii din această cameră se menține cu ajutorul stabilizatorului de reglaj fin, format dintr-un rezervor în care este cufundată o țeavă pe adâncimea de aproximativ 275 mm. Surplusul de aer se elimină în atmosferă din camera de presiune constantă CPC, sub formă de bule.

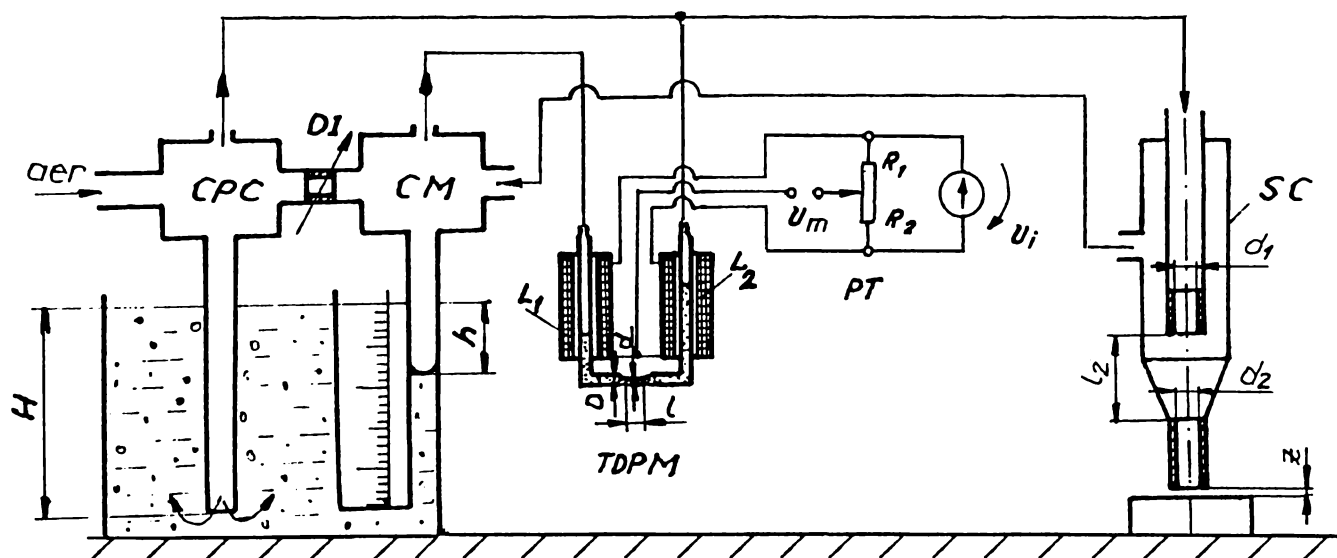


Figura 4.7 Schema principală a instalației experimentale

Două camere de presiune variabilă (de măsurare) CM sunt în legătură cu câte un tub piezometric pentru indicarea analogică a mărimii măsurandului și pot comunica cu camera de presiune constantă CPC prin intermediul unor drosele cu fantă oblică, de reglare a amplificării prin modificarea lungimii libere a fantei. Drozele permit obținerea unor secțiuni dreptunghiulare de trecere a aerului, având aria echivalentă cu a unor duze cilindrice de diferite diametre d_i . La folosirea unor captori cu duză ejectoare, măsurările se vor efectua cu aceste drosele complet închise. Fiecare cameră de măsurare CM este prevăzută în partea superioară cu câte un drosel cu fantă oblică, de reglaj la zero, care poate modifica nivelul lichidului din tubul piezometric aferent. Datorită faptului că, la determinările experimentale nu se folosesc simultan ambele camere și pentru a ușura reprezentarea modului de

conexiune între diversele subsisteme componente ale instalației, în schema din *figura 4.7* e arătată o singură cameră de măsurare CM.

Din camera de presiune constantă CPC aerul trece prin duza de intrare de diametru d_1 a captorului și de aici, prin duza ejectoare de diametru d_2 , iese în atmosferă. În funcție de variația măsurandului, se modifică interstițiul de scăpare a aerului și implicit presiunea în camera de măsurare, care este racordată la duza ejectoare de diametru d_2 . Această presiune, h , este indicată la tubul piezometric legat de camera respectivă.

Sistemul de captare SC permite efectuarea reglajului grosier, semifin și fin pe direcție verticală al captorului propriu-zis. Variația lungimii de măsurat și, deci, a interstițiului de scăpare a aerului se realizează prin utilizarea unui set de cale plan-paralele, așezate pe măsura-suport a sistemului de captare. Captorul pneumatic propriu-zis este prevăzut cu duze de intrare și de eiecție amovibile, respectând corelațiile dintre dimensiunile constructive recomandate în literatura de specialitate ([D12], [G8], [W2]). Astfel, s-au adoptat pentru lungimile l_1 ale secțiunii duzei de măsurare valorile optime date de relația:

$$l_1 = 13,5 \frac{d_1^2}{d_2} - 1,5 \cdot d_2 \quad (4.55)$$

iar pentru lățimea suprafeței frontale a duzei ejectoare, nu s-a depășit valoarea limită, peste care apar salturi bruște de presiune pe curbele caracteristice:

$$\frac{D_2 - d_2}{2} \leq 0,5 \quad (4.56)$$

Presiunea nominală H , împreună cu presiunea de măsurare h determinată de mărimea măsurată, intră în cele două ramuri ale *traductorului diferențial pneumo-magnetofluidic* TDPM. Diferența de presiune între cele două prize ale tubului în formă de U determină denivelarea lichidului magnetic și modifică inductanțele L_1 și L_2 ale bobinelor electrice cu bobinaj uniform, de construcție prezentată în *figura 2.32*. Diferența de inductivitate ΔL este sesizată de un sistem electronic de măsurare, astfel încât prin intermediul traductorului magnetofluidic, semnalul de intrare pneumatic se transformă în semnal electric. Alegerea schemei de măsurare diferențiale anulează influența temperaturii traductorului asupra rezultatelor măsurărilor, deoarece în cazul miezului feromagnetic lichid apare problema variației

termice de volum mai pronunțate pentru fluidul magnetic decât pentru tubul în care se află.

Sistemul electronic ce asistă traductorul magnetofluidic este o punte tensometrică PT de curent alternativ *I.E.M.I.* ([X1]) Puntea este alimentată cu o tensiune armonică de 5 kHz furnizată de un oscilator. Utilizarea unei frecvențe de lucru mai mari ar implica măsuri speciale de ecranare, iar utilizarea unei frecvențe de lucru mai mici ar conduce la necesitatea utilizării unor bobine de dimensiuni mai mari în construcția traductorului. Stabilitatea amplitudinii oscilațiilor, care influențează direct proporțional precizia de măsurare, este de $5 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ \text{C}^{-1}$.

Tensiunea diferențială armonică dintre brațele punții este amplificată într-un bloc de amplificare de curent alternativ și redresată în fază cu tensiunea de alimentare a oscilatorului. Amplificarea în curent alternativ nu poate fi oricât de mare, deși acest lucru ar fi de dorit din punctul de vedere al stabilității termice, deoarece lanțul de amplificatoare operaționale ar intra în limitare. Prin urmare, tensiunea continuă obținută este amplificată suplimentar într-un amplificator de curent continuu, reglabil în trepte, și după prelucrarea sa de către un convertor analog-numeric, este afișată sub formă de indicație digitală, proporțională cu diferența de presiune ce dezechilibrează puntea. Aducerea la zero a afișajului se realizează cu două reglaje "zero brut", cu câte 12 trepte și a unui potențiomtru multitur, de reglaj fin.

4.3.2. Stabilirea prin metoda analizei regresionale a funcției de transfer a sistemelor pneumo-magnetofluidice cu duză ejectoare

Relația (4.19) ce stabilește pe cale analitică funcția de transfer al sistemelor pneumatice cu duză ejectoare are o importanță practică limitată, pe de o parte datorită faptului că raportul densităților ε depinde atât de presiunea nominală H , cât și de raportul ariilor de trecere ale duzelor de ejecție, respectiv de intrare, și deci de interstițiul z , iar pe de altă parte pentru că nu explicitează influența distanței l_2 (*figura 4.7*) dintre duzele subansamblului ejector asupra funcției amintite ([D16], [G7]).

Prin urmare, prezintă interes determinarea experimentală a funcției de transfer a comparatorului pneumatic, precum și a întregului lanț de măsurare prezentat în *figura 2.30*. Eventuala influență a distanței l_2 urmează să fie evidențiată experimental, prin studiul curbelor caracteristice pentru diverse valori ale acestei distanțe.

4.3.2.1. Conceperea și realizarea experimentelor

Cu instalația prezentată în paragraful 4.3.1 s-au ridicat caracteristicile statice de transfer, efectuându-se mai multe serii de determinări pentru diferite valori ale distanței l_2 :

- seria I, pentru diametrele $d_1 = 0,8$ mm și $d_2 = 2,5$ mm;
- seria a II-a, pentru diametrele $d_1 = 0,8$ mm și $d_2 = 1,48$ mm.

Tabelul 4.1 Valori experimentale ale funcției $N = f(z)$, pentru $d_1 = 0,8$ mm și $d_2 = 2,5$ mm

| Nr. crt. | z [μm] | Indicații digitale N | | | | |
|----------|--------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | $l_2 = 2,7$ mm | $l_2 = 2,6$ mm | $l_2 = 2,5$ mm | $l_2 = 2,3$ mm | $l_2 = 2,1$ mm |
| 1 | 50 | 0 | 13 | 27 | 56 | 86 |
| 2 | 60 | 20 | 33 | 47 | 77 | 108 |
| 3 | 70 | 40 | 52 | 68 | 96 | 127 |
| 4 | 80 | 61 | 73 | 88 | 118 | 148 |
| 5 | 90 | 81 | 93 | 107 | 137 | 168 |
| 6 | 100 | 102 | 115 | 126 | 158 | 187 |

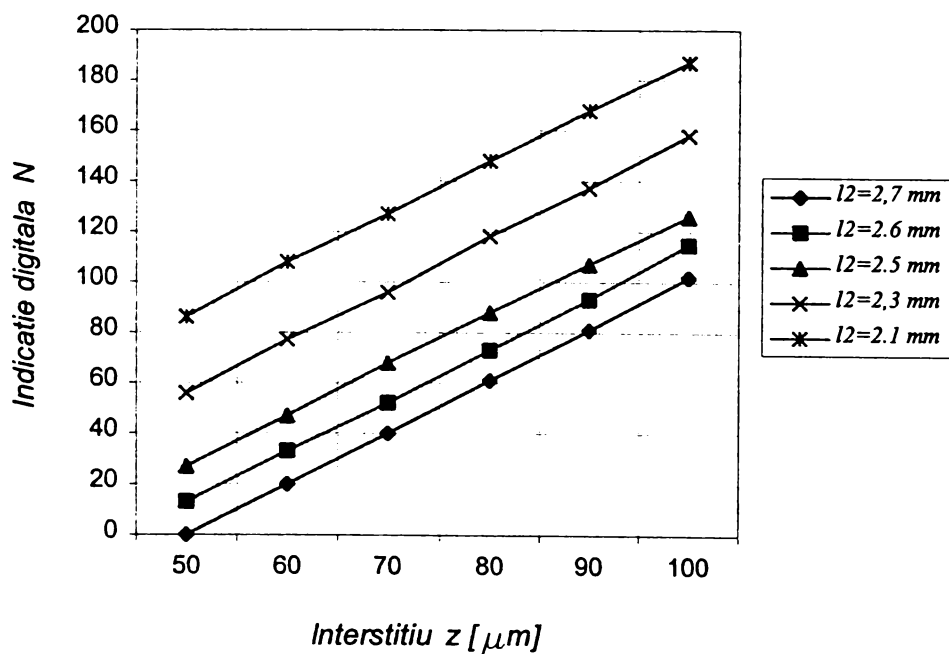


Figura 4.8 Funcția de transfer $N = f(z)$ pentru $d_1 = 0,8$ mm și $d_2 = 2,5$ mm

Valorile experimentale sunt prezentate în *tabelele* 4.1 și 4.2, iar familiile de curbe obținute cu aceste date s-au reprezentat în *figurile* 4.8...4.11. Pentru toate seriile s-au urmărit ca variabile dependente atât indicația digitală N , cât și cea analogică h , luându-se pentru parametrul l_2 valori maxime în concordanță cu

recomandările din literatură, astfel încât secțiunea jetului liber la intrarea în duza ejectoare să nu depășească secțiunea de intrare în această duză:

$$l_2 = \frac{d_1 - d_2}{0,63} \quad (4.57)$$

Valorile efective ale distanței dintre duzele subansamblului ejector sunt precizate pe reprezentările grafice realizate. Toate determinările s-au realizat pentru valoarea presiunii nominale $H = 200 \text{ mm H}_2\text{O}$.

Tabelul 4.2 Valori experimentale ale funcției $h = (z)$, pentru $d_1 = 0,8 \text{ mm}$ și $d_2 = 2,5 \text{ mm}$

| Nr. crt. | z [μm] | Indicații analogice h [mm] | | | | |
|----------|---------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | $l_2 = 2,7 \text{ mm}$ | $l_2 = 2.6 \text{ mm}$ | $l_2 = 2.5 \text{ mm}$ | $l_2 = 2,3 \text{ mm}$ | $l_2 = 2.1 \text{ mm}$ |
| 1 | 50 | 176 | 171 | 167 | 160 | 152 |
| 2 | 60 | 163 | 159 | 154 | 148 | 141 |
| 3 | 70 | 152 | 147 | 141 | 135 | 129 |
| 4 | 80 | 139 | 134 | 129 | 122 | 116 |
| 5 | 90 | 126 | 121 | 116 | 111 | 103 |
| 6 | 100 | 114 | 109 | 104 | 98 | 91 |

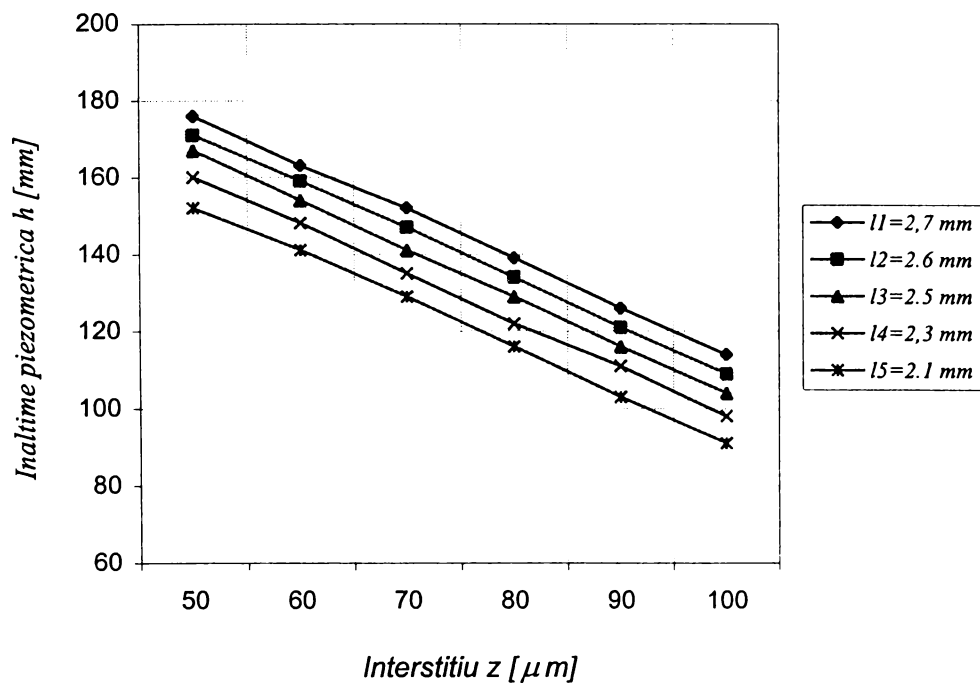


Figura 4.9 Funcția de transfer $h = (z)$ pentru $d_1 = 0,8 \text{ mm}$ și $d_2 = 2,5 \text{ mm}$

Tabelul 4.3 Valori experimentale ale funcțiilor $N=f(z)$ și $h=f(z)$, pentru $d_1=0,8\text{mm}$ și $d_2=1,48\text{mm}$

| Nr. crt. | z [μm] | Indicații digitale N | | | Indicații analogice h [mm] | | |
|----------|--------|----------------------|-------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|----------------------|
| | | $l_2=1.1\text{ mm}$ | $l_2=1\text{ mm}$ | $l_2=0.75\text{ mm}$ | $l_2=1.1\text{ mm}$ | $l_2=1\text{ mm}$ | $l_2=0.75\text{ mm}$ |
| 1 | 50 | 0 | 13 | 27 | 168 | 165 | 158 |
| 2 | 60 | 20 | 33 | 47 | 157 | 154 | 149 |
| 3 | 70 | 40 | 52 | 68 | 148 | 144 | 140 |
| 4 | 80 | 61 | 73 | 88 | 136 | 132 | 129 |
| 5 | 90 | 81 | 93 | 107 | 127 | 124 | 118 |
| 6 | 100 | 102 | 115 | 126 | 117 | 113 | 108 |

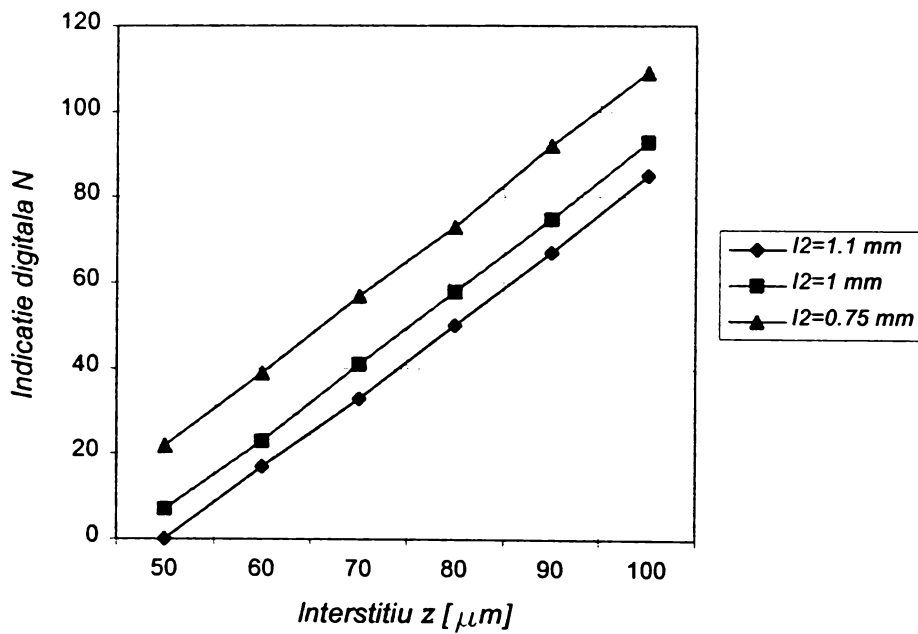


Figura 4.10 Funcția de transfer $N = f(z)$ pentru $d_1 = 0,8\text{ mm}$ și $d_2 = 1,48\text{ mm}$

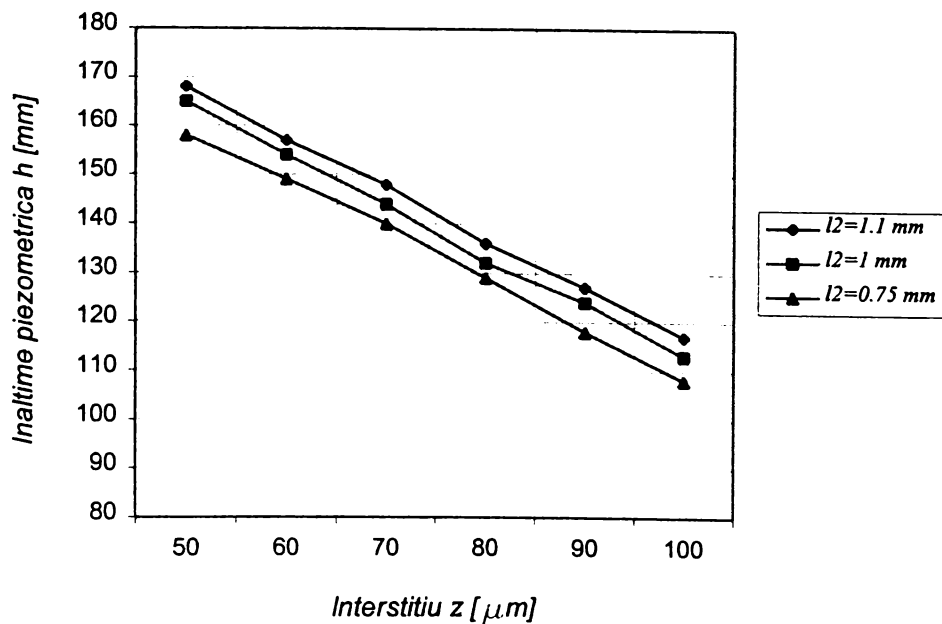


Figura 4.11 Funcția de transfer $h = (z)$ pentru $d_1 = 0,8\text{ mm}$ și $d_2 = 1,48\text{ mm}$

4.3.2.2. Prelucrarea datelor și concluzii

Cu perechile de valori găsite experimental s-a determinat modelul regresional de dependență a indicației digitale N , respectiv a înălțimii piezometrice h de mărimea interstițiului de scăpare a aerului z . Prelucrarea datelor s-a făcut cu ajutorul programului STATGRAPHICS ([X22]).

Relațiile de regresie se determină aplicând metoda celor mai mici pătrate, prin particularizarea coeficienților din expresiile polinoamelor de gradul I:

$$N = a_N + b_N z \quad (4.58)$$

$$h = a_h + b_h z \quad (4.59)$$

Valorile acestor coeficienți sunt prezentate în *tabelul 4.4*, pentru diversele distanțe dintre duze și diametre ale duzelor adoptate în cadrul experimentărilor. Preciziile de estimare ale coeficienților unghiulari și ale ordonatelor la origine găsite depășesc în toate cazurile 99%.

Tabelul 4.4. Coeficienții relațiilor regresionale pentru $H = 200 \text{ mm H}_2\text{O}$ și $d_1 = 0,8 \text{ mm}$

| Coef. model | Diametrul duzei $d_2 = 2,5 \text{ mm}$ | | | | | Diam. duzei $d_2 = 1,48 \text{ mm}$ | | |
|-------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------------------|-------------|--------------|
| | $l_2 = 2,7$ | $l_2 = 2,6$ | $l_2 = 2,5$ | $l_2 = 2,3$ | $l_2 = 2,1$ | $l_2 = 1,1$ | $l_2 = 1,0$ | $l_2 = 0,75$ |
| a_N | -102,33 | -89,19 | -72,66 | -45,57 | -13,95 | -84,85 | -74,71 | -65,381 |
| b_N | 2,04 | 2,03 | 2,00 | 2,03 | 2,01 | 1,69 | 1,72 | 1,74 |
| a_h | 238,00 | 238,33 | 230,14 | 222,00 | 214,57 | 218,66 | 216,23 | 208,61 |
| b_h | -1,24 | -1,32 | -1,26 | -1,24 | -1,23 | -1,02 | -1,03 | -0,99 |

Relațiile găsite pot fi folosite pentru determinarea analitică a presiunii din camera de măsurare, deci a valorii măsurandului, în condițiile concrete de lucru și în limitele erorii precizate anterior.

Cercetările efectuate confirmă influența importantă a distanței l_2 dintre duzele subansamblului ejector asupra funcției de transfer, datorată creșterii lățimii jetului de aer ce trece din duza de intrare în cea de măsurare, pe măsură ce jetul se îndepărtează de duza de intrare.

O altă concluzie importantă este aceea că distanța l_2 nu influențează sensibilitatea sistemului pneumatic, panta caracteristicilor obținute la aceleași diametre ale duzelor de intrare și de măsurare fiind constantă, așa cum rezultă atât din *figurile 4.8...4.11*, cât și din valorile coeficienților unghiulari b_N și b_h , prezentate în *tabelul 4.4*.

4.3.3. Modelarea empirică a sensibilității sistemului de control activ pneumo-magnetofluidic cu duză ejectoare, prin experiment factorial complet

4.3.3.1. Proiectarea și realizarea experimentului

Din mulțimea indicatorilor de performanță prezentați în *figura 4.1*, pentru modelare a fost aleasă sensibilitatea, ea îndeplinind următoarele cerințe ([N1]):

- caracterizează cuprinzător eficiența obiectului cercetării;
- poate fi exprimată cantitativ;
- are un caracter univoc;
- are o semnificație fizică clară, arătată în paragraful 4.1, și poate fi exprimată simplu matematic.

Dintre factorii de influență prezentați în *figura 4.1*, au fost selectați doar trei, și anume mărimile de reglare ale comparatorului pneumatic:

- presiunea nominală H [mm H₂O];
- diametrul duzei de intrare d_1 [mm];
- diametrul duzei ejectoare d_2 [mm].

Renunțarea la ceilalți factori de influență arătați în *figura 4.1* s-a făcut, pe de o parte, din rațiuni de limitare a volumului și, implicit, a costurilor experimentării, iar pe de altă parte, deoarece, pentru o structură dată a sistemului, factorii păstrați pot fi modificați cu relativă ușurință și deci, influența lor prezintă importanță din punct de vedere practic.

Evident, alegerea factorilor de influență pentru modelarea experimentală a ținut cont de rezultatele modelării analitice, care explicitează legătura dintre sensibilitate și factorii respectivi. Aceștia din urmă îndeplinesc următoarele condiții ([N1]):

- sunt independenți, deci pot fi comandați la orice nivel al domeniului de existență, indiferent de nivelele celorlalți factori;
- exercită o influență univocă asupra obiectului cercetării;
- sunt controlabili, deci pot fi măsurați și reglați la un nivel comandat;
- sunt compatibili, permițând realizarea oricărei combinații a nivelelor factorilor.

Pentru a studia sensibilitatea sistemului s-a optat pentru un experiment factorial complet de ordinul I, EFC 2³, realizat cu instalația experimentală prezentată în paragraful 4.2. Alegerea unui program experimental activ conduce la obținerea unei serii de avantaje, în raport cu utilizarea experimentului clasic ([T1]):

- micșorarea numărului de determinări experimentale;
- simplificarea considerabilă a calculelor;
- creșterea preciziei de determinare a coeficienților ecuației de regresie.

Pe baza informațiilor din literatura de specialitate și a unor experimentări preliminare, s-au ales coordonatele punctului central al experimentului și intervalele de variație, rezultând nivelele factorilor de influență prezentate în *tabelul 4.5*.

Pentru presiunea nominală H , s-a ales nivelul zero de 200 mm H₂O și un domeniu de determinare restrâns, limitate de imposibilitatea măsurării unor diferențe de presiune mai mari cu ajutorul traductorului magnetofluidic, datorită imposibilității realizării unor tuburi piezometrice mai lungi, de secțiune transversală constantă, în limitele unor erori admisibile.

Nivelul zero pentru diametrul duzei de intrare d_1 s-a identificat în jurul valorii de 1 mm, intervalul de variație adoptat, coroborat cu posibilitățile concrete de realizare a duzelor, au condus la nivelele prezentate în *tabelul 4.5*.

Datorită faptului că presiunea nominală de lucru H este mult mai mică decât cea minimă folosită în mod uzual la măsurările cu joasă presiune, sensibilitatea obținută de comparatorul pneumatic, la utilizarea aceluiași dimensiuni pentru duzele de intrare și de ieșire, ar fi de 2,5...7 ori mai mică decât în cazurile obișnuite. Se impune folosirea, pe cât posibil, a unor duze de intrare cu diametru cât mai mic și a unor duze de ieșire cu diametru cât mai mare. Prin urmare, se justifică limitarea superioară a domeniului de determinare al factorului d_1 și limitarea inferioară a domeniului de existență al factorului d_2 . Aceeași ultimă concluzie, pe baza căreia s-au ales nivelele factorului d_2 , rezultă și ca o consecință a realizării următoarelor cerințe:

- asigurarea compatibilității factorilor;
- realizarea unor rapoarte a ale ariilor secțiunilor de trecere ale aerului recomandate în literatură;
- asigurarea posibilității practice de realizare a unor distanțe l_2 , calculate cu relația (4.57), ținând cont de dimensiunile constructive ale captorului pneumatic.

Neglijând interacțiunile superioare ordinului II, modelul matematic ce urmează a fi explicitat va fi de forma:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (4.60)$$

Tabelul 4.5 Nivelele factorilor de influență

| Factor de influență | Valoare codificată | Valoare naturală | | |
|----------------------|--------------------|---------------------------------|------------------|------------------|
| | | $x_1 = H$ [mm H ₂ O] | $x_2 = d_1$ [mm] | $x_3 = d_2$ [mm] |
| Punct central | 0 | 200 | 1.05 | 2.88 |
| Interval de variație | Δ_j | 20 | 0.25 | 0.38 |
| Nivel inferior | -1 | 180 | 0,8 | 2,5 |
| Nivel superior | +1 | 220 | 1,3 | 3,26 |

Matricea-program a experimentului este prezentată în tabelul 4.6. Coloanele cu nivelele factorilor de influență sunt construite după regula alternării nivelelor inferior și superior pentru factorul n , după puterile lui 2^{n-1} , rezultând următoarele proprietăți ale matricei ([C2], [M6], [T1]):

- simetrie în raport cu punctul central al experimentului;
- normalitate;
- ortogonalitate;
- rotabilitate, dispersia valorilor calculate ale variabilei dependente fiind minimă și aceeași în orice punct al spațiului factorial.

Tabelul 4.6 Matricea-program a experimentului

| Nr. măs. | Nivelele factorilor de influență | | | | | | Valori măsurate | | Valori calculate | |
|----------|--------------------------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|---|----------|------------------|---------|
| | $x_1 \equiv H$ [mm H ₂ O] | | $x_2 \equiv d_1$ [mm] | | $x_3 \equiv d_2$ [mm] | | $y \equiv U \left[\frac{incr}{10 \mu m} \right]$ | | \bar{y}_i | S_1^2 |
| | Cod. | Nat. | Cod. | Nat. | Cod. | Nat. | y_{i1} | y_{i2} | | |
| 1 | -1 | 180 | -1 | 0,8 | -1 | 2,5 | 18,4 | 18,6 | 18,5 | 0,020 |
| 2 | +1 | 220 | -1 | 0,8 | -1 | 2,5 | 8,3 | 8,6 | 8,45 | 0,045 |
| 3 | -1 | 180 | +1 | 1,3 | -1 | 2,5 | 23,3 | 23,3 | 23,3 | 0 |
| 4 | +1 | 220 | +1 | 1,3 | -1 | 2,5 | 14,9 | 15,0 | 14,95 | 0,005 |
| 5 | -1 | 180 | -1 | 0,8 | +1 | 3,26 | 22,0 | 22,2 | 22,1 | 0,020 |
| 6 | +1 | 220 | -1 | 0,8 | +1 | 3,26 | 8,8 | 8,9 | 8,85 | 0,005 |
| 7 | -1 | 180 | +1 | 1,3 | +1 | 3,25 | 27,9 | 27,2 | 27,55 | 0,245 |
| 8 | +1 | 220 | +1 | 1,3 | +1 | 3,26 | 17,0 | 16,3 | 16,56 | 0,245 |

Pentru determinarea erorii de măsurare, întregul experiment a fost replicat, realizându-se în blocuri de câte 8 determinări, fără randomizare. Valorile funcției obiectiv au fost obținute la o amplificare electrică minimă a punții tensometrice, astfel

că sensibilitatea completului de măsurare atinge valori superioare celor prezentate, permițând măsurări cu o valoare a diviziunii submicronică.

4.3.3.2. Explicitarea modelului matematic

Rezultatele măsurărilor efectuate au fost prelucrate cu ajutorul programului STATGRAPHICS ([X22]).

Programul estimează coeficienții de regresie ai polinomului (4.60), aceștia fiind prezentați în *tabelul 4.7* pentru valorile codificate ale factorilor de influență. Coeficienții modelului regresional exprimă influența celor trei factori aleși și a interacțiunilor dintre aceștia asupra sensibilității sistemului pneumatic de măsurare. Semnul și mărimea coeficientului indică sensul și amplitudinea influenței factorului sau interacțiunii corespunzătoare.

Tabelul 4.7 Valorile coeficienților de regresie

| Coef. | Val. | Coef. | Val. | Coef. | Val. | Coef. | Val. |
|-------|--------|-------|--------|----------|--------|----------|-------|
| b_0 | 17,543 | b_2 | -5,318 | b_{12} | -0,718 | b_{23} | 0,506 |
| b_1 | 1,243 | b_3 | 3,068 | b_{13} | 0,243 | | |

Programul ne permite și ierarhizarea efectelor pe care factorii de intrare și interacțiunile le produc asupra sensibilității sistemului. Valoarea acestor efecte este egală cu dublul coeficientului de regresie corespunzător, efectul mediu fiind egal cu constanta b_0 a polinomului de regresie. Amplitudinea efectelor produsă asupra indicatorului de performanță analizat este prezentată prin histograma Pareto (*figura 4.12*) și prin segmentele efectelor principale (*figura 4.13*).

În *tabelul 4.6* sunt prezentate valorile calculate ale mediei aritmetice \bar{y}_i și ale dispersiei s_i^2 pentru fiecare încercare, determinate cu relația:

$$s_i^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{k=1}^m (y_{ik} - \bar{y}_i)^2 \quad i = \overline{1, N} \quad (4.61)$$

unde:

m – numărul determinărilor paralele în fiecare punct;

N – numărul de încercări.

Omogenitatea acestor dispersii se verifică cu ajutorul criteriului Cochran ([T1]):

$$\mathcal{G}_c = \frac{s_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^N s_i^2} = \frac{0,245}{0,585} = 0,4188 \quad (4.62)$$

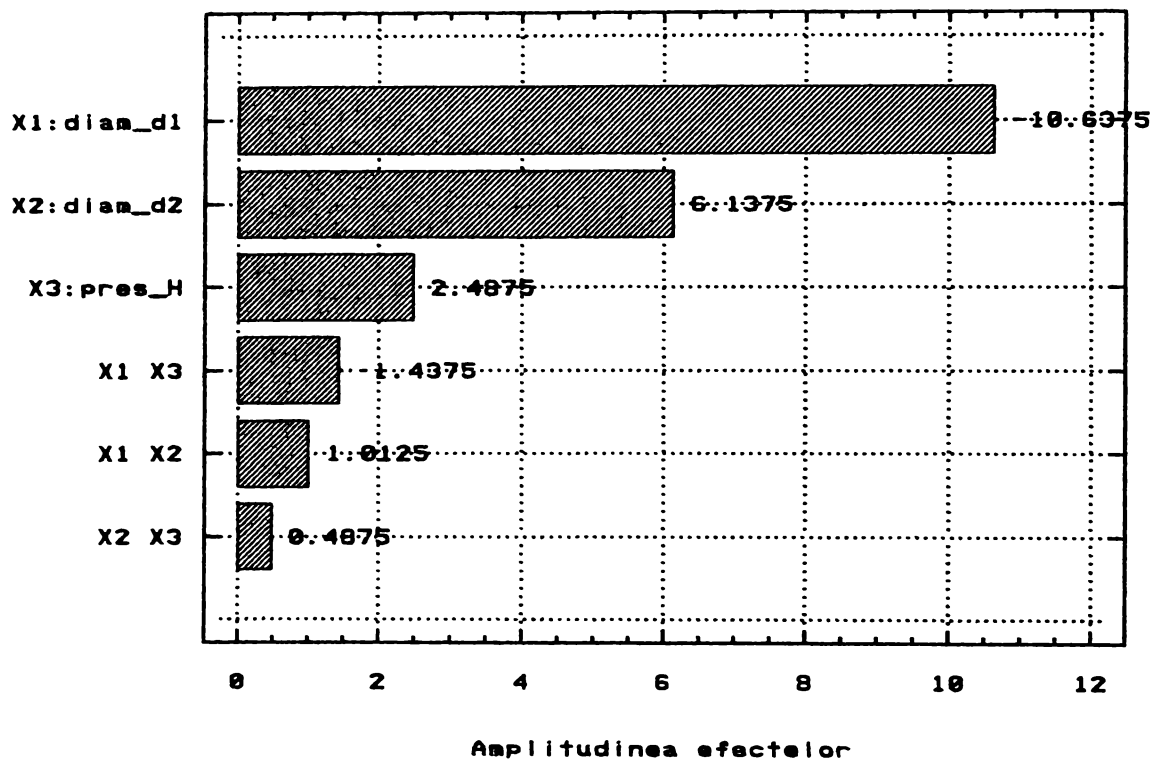


Figura 4.12 Histograma Pareto

Deoarece:

$$\mathcal{G}_c \leq \mathcal{G}_{0,05}(1,8) = 0,679 \quad (4.63)$$

se admite ipoteza că dispersiile sunt omogene, caz în care se calculează o dispersie medie, care va reprezenta dispersia reproductibilității:

$$s_0^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{i=1}^N s_i^2 = \frac{0,585}{8} = 0,073 \quad (4.64)$$

Dispersia coeficienților ecuației de regresie se calculează cu relația:

$$s_{b_j}^2 = \frac{s_0^2}{N \cdot m} = \frac{0,073}{8 \cdot 2} = 3,046 \cdot 10^{-3} \quad (4.65)$$

Verificarea semnificației statistice a coeficienților se testează folosind criteriul Student ([C2], [N1]), valoarea tabelată a acestuia pentru un prag de semnificație de 0,05 și un număr de grade de libertate $\nu_0 = N(m-1) = 8$, fiind:

$$t_{0,05}(8) = 2,306$$

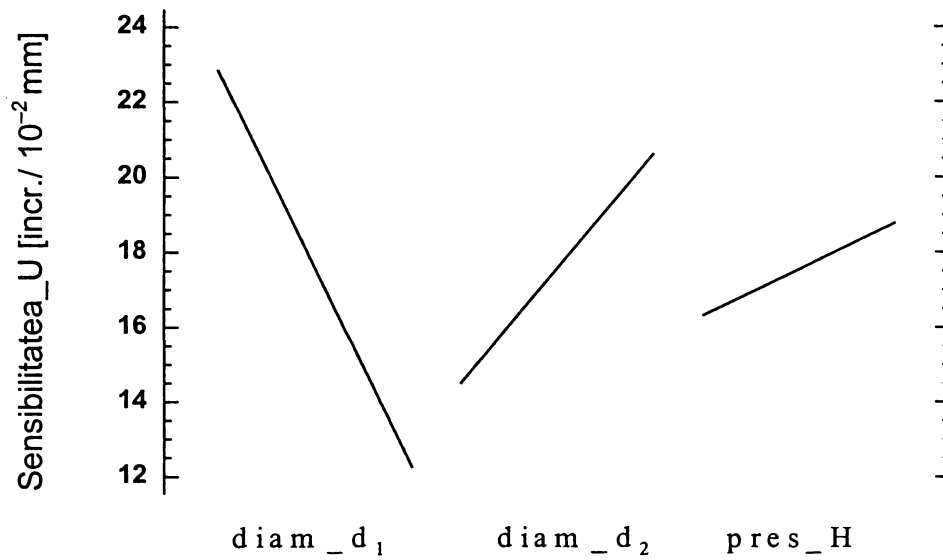


Figura 4.13 Efectele produse de factori

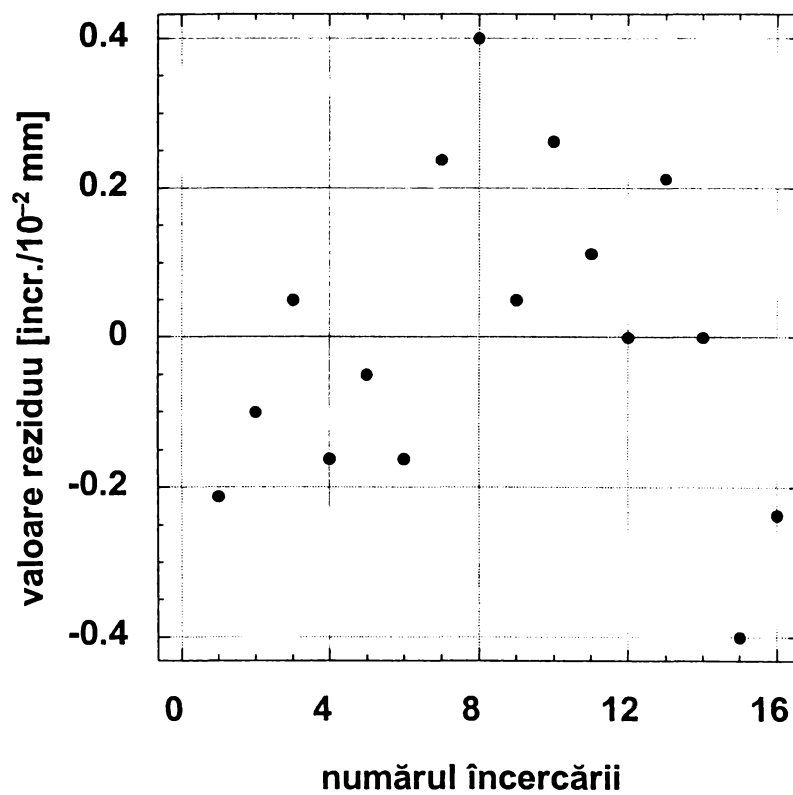


Figura 4.14 Evoluția reziduurilor

Deoarece inegalitățile:

$$|b_j| \geq t_{0,05}(8) \cdot s_{b_j} = 2,306 \cdot 0,0174 = 0,040 \quad (4.66)$$

$$|b_{jl}| \geq t_{0,05}(8) \cdot s_{b_j} = 2,306 \cdot 0,0174 = 0,040 \quad j \neq l \quad (4.67)$$

sunt respectate pentru toți coeficienții prezentați în *tabelul 4.7*, rezultă că aceștia sunt semnificativi, forma modelului de ordinul I fiind:

$$y = 17,543 + 1,243 \cdot x_1 - 5,318 \cdot x_2 + 3,068 \cdot x_3 - 0,718 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,243 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,506 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (4.68)$$

Reprezentarea reziduurilor în funcție de ordinea de realizare a încercărilor (*figura 4.14*) confirmă ipotezele de normalitate a reziduurilor, excluzând necesitatea randomizării experimentului, și de distribuție aleatoare a acestora, argumentând corectitudinea modelului găsit. Foarte buna concordanță dintre valorile estimate cu ajutorul polinomului (4.68), rezultă și din *figura 4.15*.

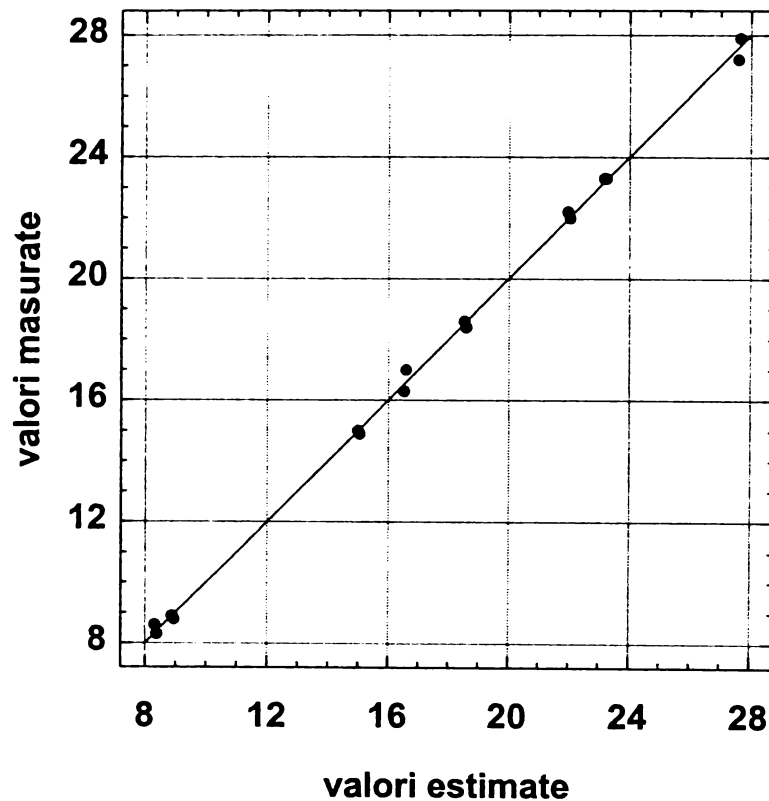


Figura 4.15 Concordanța dintre valorile estimate și cele măsurate

4.3.3.3. Analiza dispersională a modelului

Prelucrarea datelor experimentale este prezentată în *tabelul 4.8*, valorile criteriului Fisher au fost calculate în ultima coloană a tabelului, raportând dispersiile provocate asupra valorile funcțiilor obiectiv de către un anumit factor de influență sau o anumită interacțiune de ordinul al II-lea și, respectiv, de către erorile experimentale ([C2], [N1]).

Aceste valori calculate se compară cu valoarea tabelată a criteriului:

$$\mathcal{F}_{0,05(1,8)} = 5,32$$

Deoarece valorile calculate îndeplinesc condiția:

$$F > F_{0,05(1,8)}$$

se poate aprecia, cu o siguranță de 95%, că factorii și interacțiunile dintre aceștia produc efecte semnificative, concluzie similară cu cea obținută din analiza dispersiei coeficienților modelului.

Coeficientul de adecvanță al modelului este:

$$R_c^2 = 0,9980 ,$$

ceea ce indică o precizie de estimare a modelului de peste 99%.

Tabelul 4.8 Analiza dispersională a modelului

| Suma dispersiei | Suma pătratelor | Grade de libertate | Dispersii | Valoarea calculată a criteriului F |
|---------------------------|-----------------|--------------------|-----------|--------------------------------------|
| Nivelele factorului x_1 | 452,62 | 1 | 452,62 | 5364,45 |
| Nivelele factorului x_2 | 150,67 | 1 | 150,67 | 1785,79 |
| Nivelele factorului x_3 | 24,75 | 1 | 24,75 | 293,34 |
| Interacțiunea x_1x_2 | 4,10 | 1 | 4,10 | 48,60 |
| Interacțiunea x_1x_3 | 8,26 | 1 | 8,26 | 97,96 |
| Interacțiunea x_2x_3 | 0,95 | 1 | 0,95 | 11,27 |
| Replică | 0,0156 | 1 | 0,0156 | |
| Eroarea experimentală | 0,675 | 8 | 0,084 | |
| Dispersia totală | 622,059 | 15 | 622,059 | |

4.3.3.4. Interpretarea rezultatelor modelării

Cu ajutorul modelului determinat se reprezintă porțiuni din suprafețele de răspuns ale funcției obiectiv, pentru câte doi dintre factorii de intrare (*figurile 4.16, 4.17 și 4.18*). Prin secționarea suprafețelor de răspuns cu plane orizontale, se obțin curbele de nivel constant pentru sensibilitatea traductorului pneumo-magnetofluidic, prezentate în *figurile 4.19, 4.20 și 4.21*. În toate reprezentările grafice, factorul de influență considerat ca parametru constant se află la nivelul corespunzător valorii centrale a intervalelor prezentate mai sus.

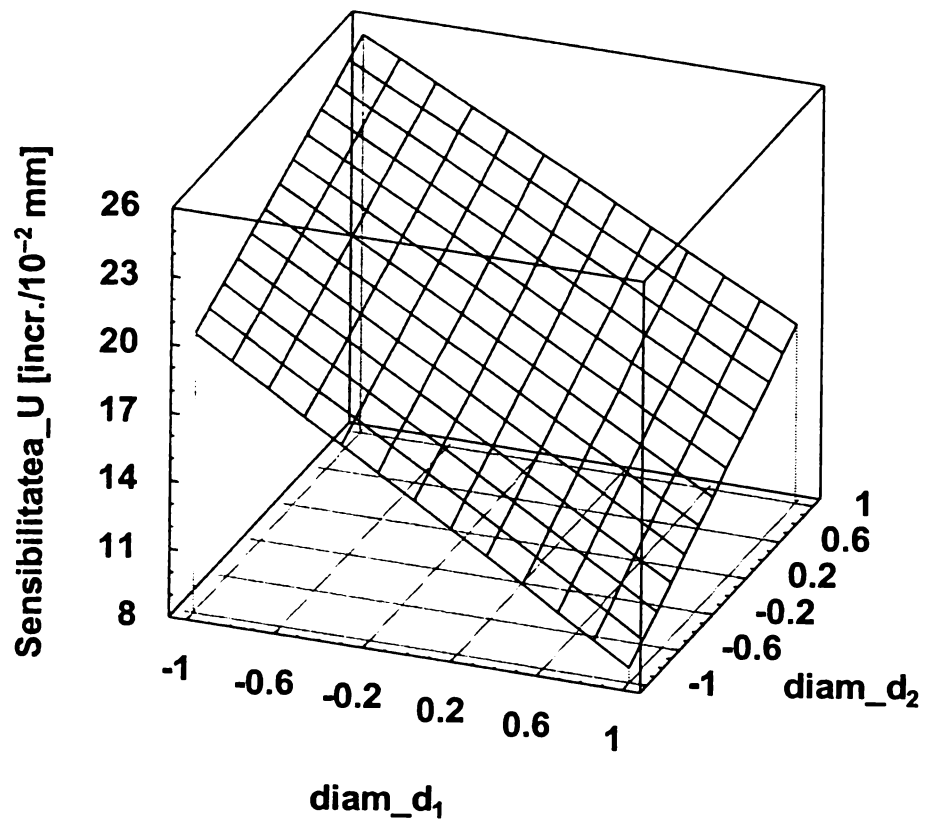


Figura 4.16 Suprafață de răspuns $U = f(d_1, d_2)$

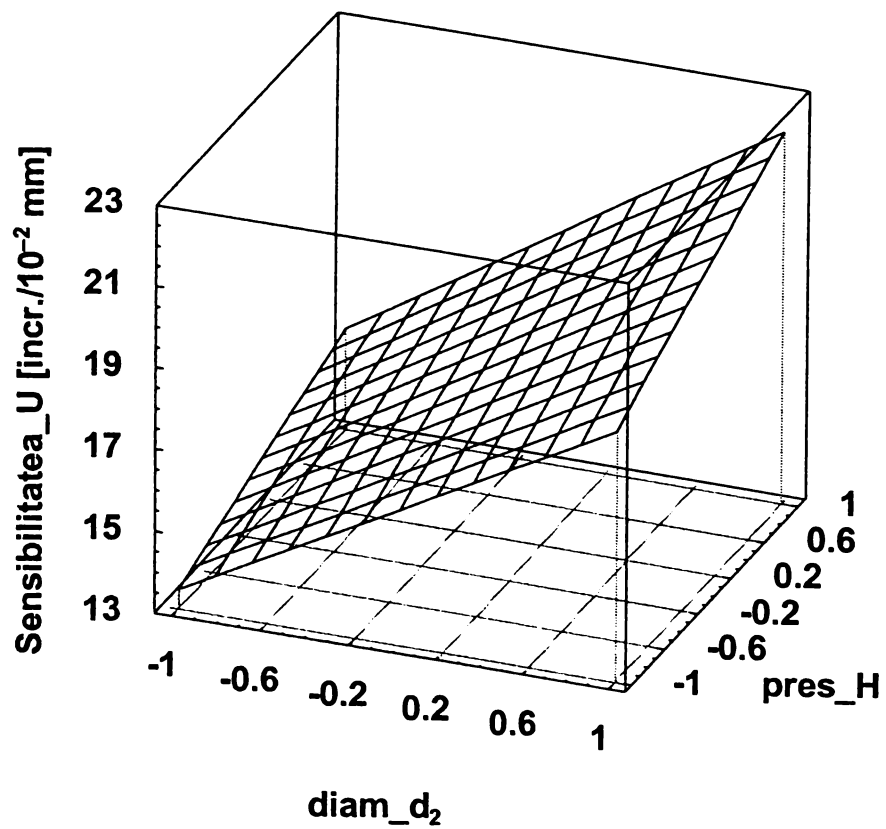


Figura 4.17 Suprafață de răspuns $U = f(H, d_2)$

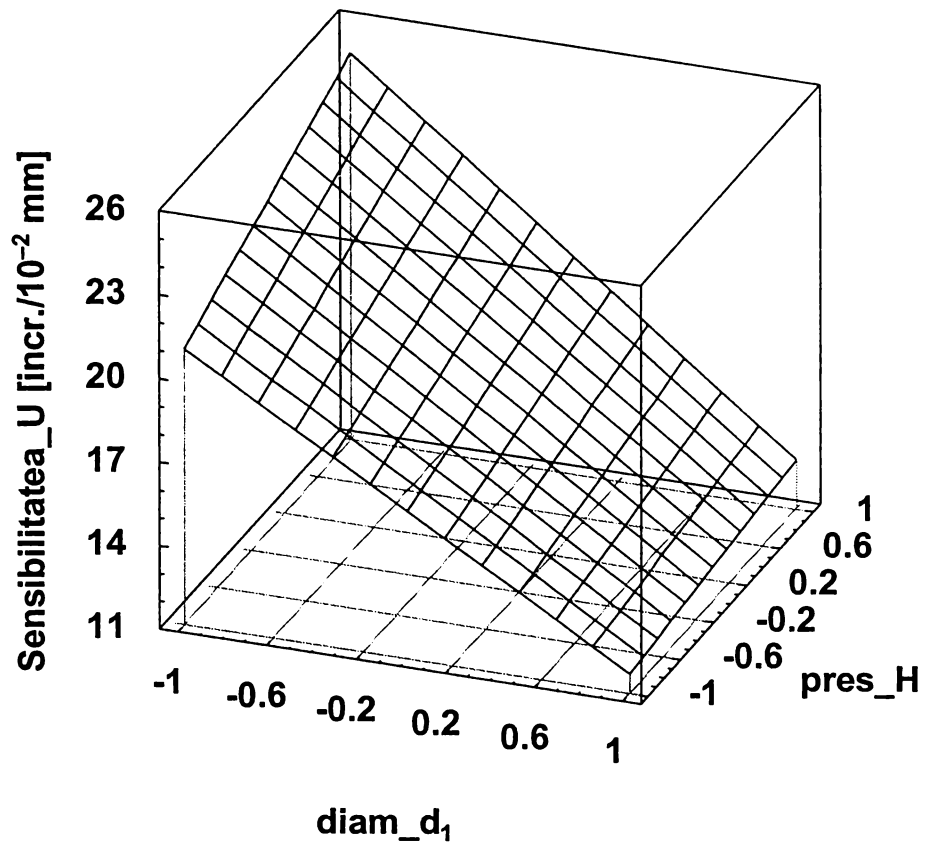


Figura 4.18 Suprafață de răspuns $U = f(H, d_1)$

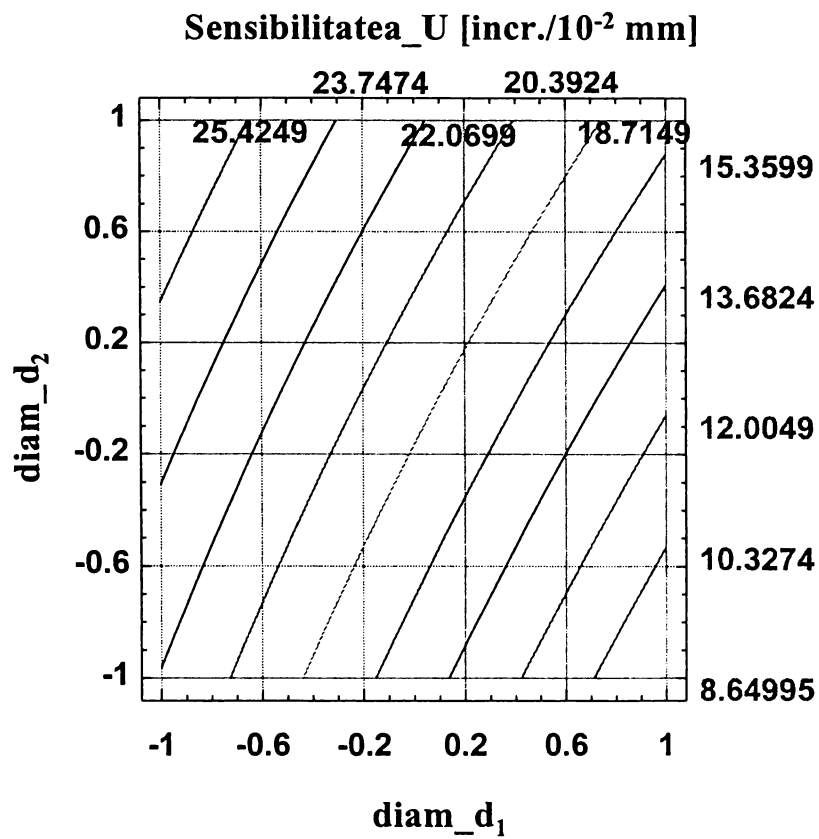


Figura 4.19 Curbe de nivel constant $U = f(d_1, d_2)$

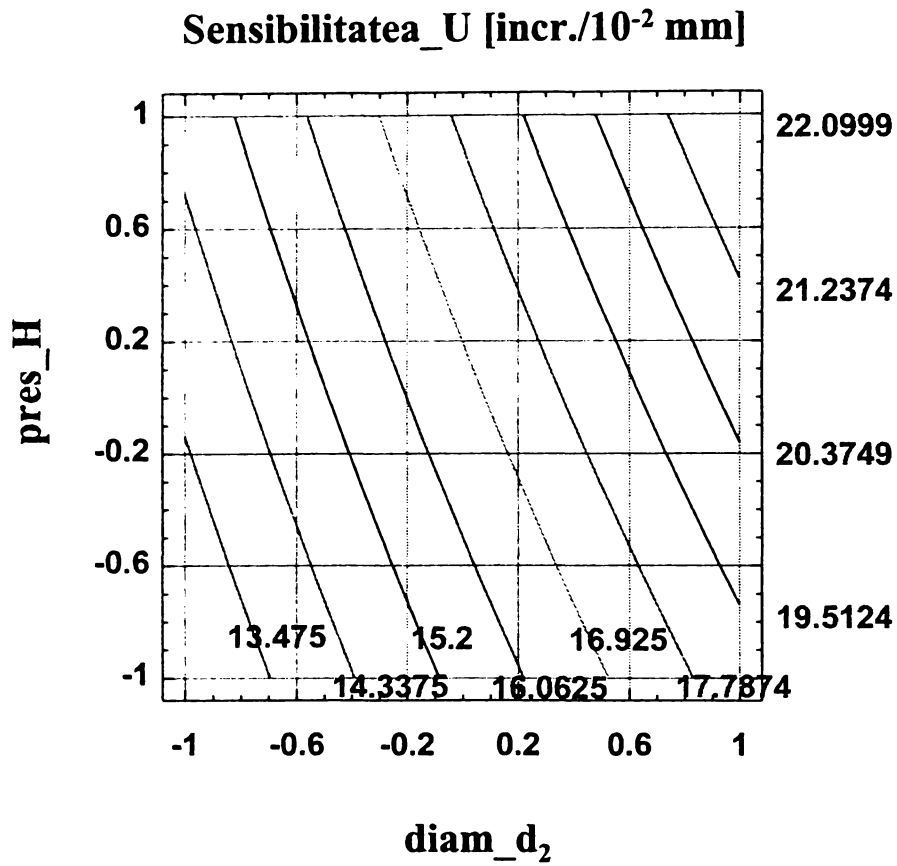


Figura 4.20 Curbe de nivel constant $U = (H, d_2)$

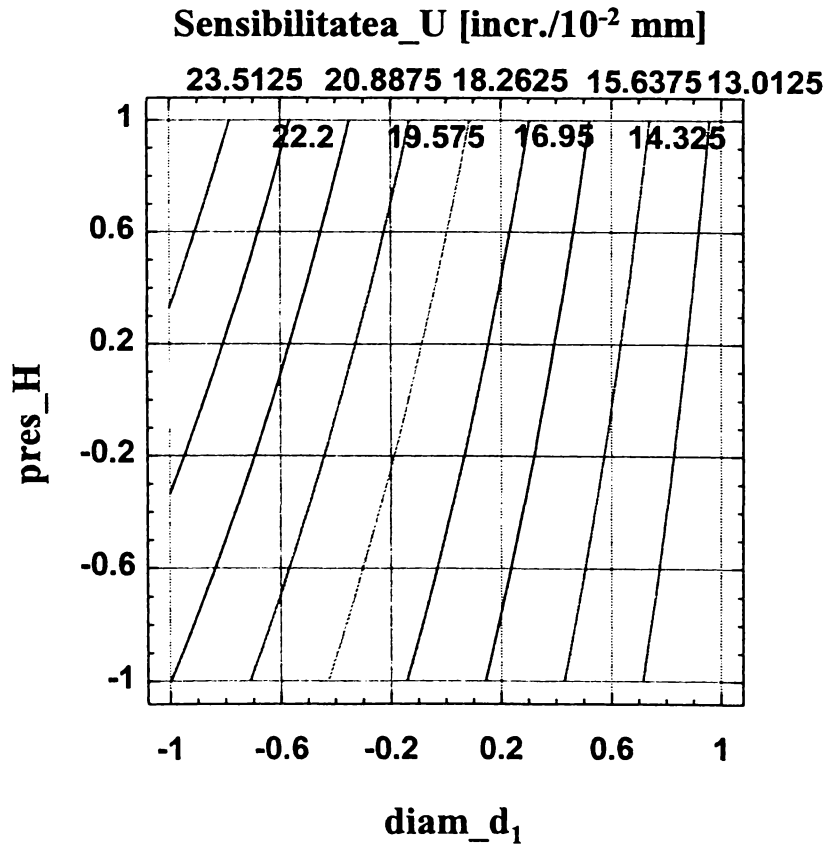


Figura 4.21 Curbe de nivel constant $U = (H, d_1)$

Pe baza analizei relațiilor și reprezentărilor grafice obținute în urma prelucrării datelor experimentale, se pot formula următoarele concluzii:

- modelul de ordinul I explicat estimează suprafața de răspuns în domeniul investigat din spațiul multifactorial cu o precizie de peste 99%;

- factorii de influență selectați, precum și interacțiunile lor provoacă efecte semnificative asupra sensibilității sistemului, aceasta fiind influențată preponderent de diametrul de intrare d_1 , fapt ce concordă cu modelările analitico-matematice anterioare;

- faptul că toate interacțiunile factorilor de influență provoacă efecte semnificative este explicat și de rezultatele modelării analitice a sistemului pneumatic, care arată dependența sensibilității acestuia de raportul ε al densităților aerului în cele două duze, care la rândul lui depinde de setul de valori adoptat pentru cei trei factori de influență luați în considerare;

- efectul de mărime mai redusă generat de presiunea nominală H se explică și prin alegerea unui domeniu de variație îngust, din motivele prezentate la începutul paragrafului;

- curbele de nivel constant prezentate în *figurile 4.19, 4.20 și 4.21* permit alegerea unor valori concrete ale factorilor de influență considerați, care să determine o anumită valoare necesară, impusă a indicatorului de performanță studiat. Astfel, pentru a obține o anumită sensibilitate dorită, din *figura 4.19* se poate alege combinația de duze corespunzătoare, iar din *figurile 4.20 și 4.21* se pot identifica presiunea nominală și diametrul duzei de măsurare necesare, respectiv presiunea nominală și diametrul duzei de intrare necesare.

5.

VERIFICAREA PRECIZIEI DE OPRIRE LA COTĂ A UNUI SISTEM DE CONTROL ACTIV PNEUMO-MAGNETOFLUIDIC

5.1. Introducere

Tendința de transformare a mașinilor de rectificat în sisteme autonome de rectificare ([12]), prezentată în *figura 1.3* și în paragraful 1.1, face necesară achiziția și analiza unui volum mare de valori măsurate ale unor parametri geometrici sau dinamici și impune stocarea și prelucrarea acestora cu ajutorul unui sistem de calcul.

Prin urmare, devine logică implementarea calculatorului în sistemul de control activ integrat în sistemul autonom de rectificare. Calculatorul realizează două clase de aplicații ([D11]):

- informaționale, ce presupun achiziția și prelucrarea informației în raport cu algoritmi utilizați (culegerea semnalului de măsurare de la sistemul de control activ, filtrarea și conversia semnalelor, extragerea semnalului util, compararea semnalului cu valoarea de referință, afișarea și stocarea continuă a valorii măsurate);

- de conducere, ce presupun decizia, transmiterea semnalelor și comanda referitoare la ciclul de lucru (schimbarea valorii parametrilor regimului de

așchiere, oprirea prelucrării) și schimbul de informații cu calculatoarele de conducere din structura modulară a sistemului autonom, care stabilesc parametrii optimi ai regimului de așchiere și gestionează procesele legate de reascuțirea corpului abraziv.

Pe de altă parte, elementele de execuție care realizează mișcările de avans la mașinile de rectificat clasice tind să fie înlocuite cu motoare pas cu pas sau servomotoare de curent continuu cu inerție redusă, comandate cu ajutorul microcalculatorului ([F1], [G6], [X5], [X14]). Astfel, lanțul cinematic al mișcării de avans (de pătrundere sau intermitent, de poziționare) devine în fapt un sistem de reglare automată incrementală a poziției, caracterizat prin conversia electromecanică discretă atât a informației, cât și a energiei ([K3]). Utilizarea sistemelor cu microprocesoare pentru comanda circuitelor electrice de acționare se justifică datorită următoarelor avantaje ([B2], [K3], [S3]):

- îmbunătățirea preciziei;
- flexibilitatea algoritmilor de conducere, care pot fi modificați prin simpla schimbare a unui program;
- micșorarea timpului de răspuns;
- creșterea fiabilității și asigurarea insensibilității la perturbații;
- scăderea prețului de cost și a consumului de energie.

Luând în considerare cele de mai sus, pentru verificarea preciziei de oprire la cotă a sistemelor de control activ s-a utilizat un stand care permite simularea prelucrării prin rectificare exterioară a pieselor prinse între vârfuri, prin deplasarea captorului sistemului de control activ de-a lungul unei piese-etalon de conicitate redusă. Comanda acestei deplasări se asimilează cu cea a mișcării de avans de pătrundere din cazul rectificării reale. Sistemul de reglare automată astfel realizat este similar unui sistem de control activ operațional, a cărui schemă-bloc a fost prezentată în *figura 2.10.a*. Pentru verificarea propriu-zisă a preciziei de oprire la cotă a sistemului de control activ s-a conceput și realizat un sistem paralel de măsurare a deplasărilor captorului pneumatic, utilizând un traductor fotoelectric numeric incremental liniar.

Pe baza argumentelor expuse în paragraful 4.1 s-a experimentat un sistem de control activ pneumo-magnetofluidic, prezentat în *figurile 4.5 și 4.6*. În locul captorului fără contact cu duză ejectoare (subsistemul C din *figura 4.6*), s-a folosit un captor pneumatic cu contact, cu două puncte de măsurare și palpatoare

cilindrice, ținând cont de analizele comparative și concluziile prezentate în paragrafele 2.5.1, 2.11, 3.3 și 3.6.

Cercetările au avut ca scop principal urmărirea modului în care sensibilitatea sistemului de control activ și viteza de deplasare a captorului, identică cu cea de avans tehnologic, influențează precizia de oprire la cotă. În paralel s-a urmărit realizarea unor structuri de programe pentru comanda standului experimental, care pot fi utilizate, cu modificări minime, în cazul controlului activ pneumatic în procesul de rectificare.

Pe de altă parte, standul experimental poate fi utilizat ca un sistem de control activ postoperațional al abaterilor de formă geometrică. În acest scop au fost concepute programe de achiziție și stocare a datelor, precum și de calcul și de reprezentare grafică a unor abateri de la forma geometrică a suprafețelor.

5.2. Prezentarea standului experimental

Standul experimental multifuncțional asistat de calculator poate fi utilizat în două scopuri principale:

- verificarea preciziei de oprire la cotă, prin simularea controlului activ pe mașini de rectificat exterior între vârfuri;
- măsurarea postoperațională a abaterilor de la forma geometrică a pieselor cilindrice, în secțiune transversală și longitudinală, precum și măsurarea bătăii radiale.

Pentru realizarea acestor scopuri standul asistat de calculator realizează următoarele funcții:

- măsurarea continuă directă a unei piese-etalon cu ajutorul unui sistem de control pneumo-magnetofluidic;
- măsurarea continuă indirectă a unei piese-etalon cu ajutorul unui traductor fotoelectric incremental liniar;
- achiziția și conversia analogic/numerică a semnalelor de măsurare;
- comanda prin reglare numerică a deplasării de simulare a controlului activ și de oprire a ciclului de prelucrare;
- afișarea, compararea și reprezentarea grafică a valorilor măsurate;
- stocarea datelor într-un fișier-text, utilizând resurse de memorie nevolatilă ale calculatorului;

- TFNIL – traductor fotoelectric numeric incremental liniar
- TP-MF – traductor pneumo-magnetofluidic
- EAMPP – echipament de acționare motor pas cu pas

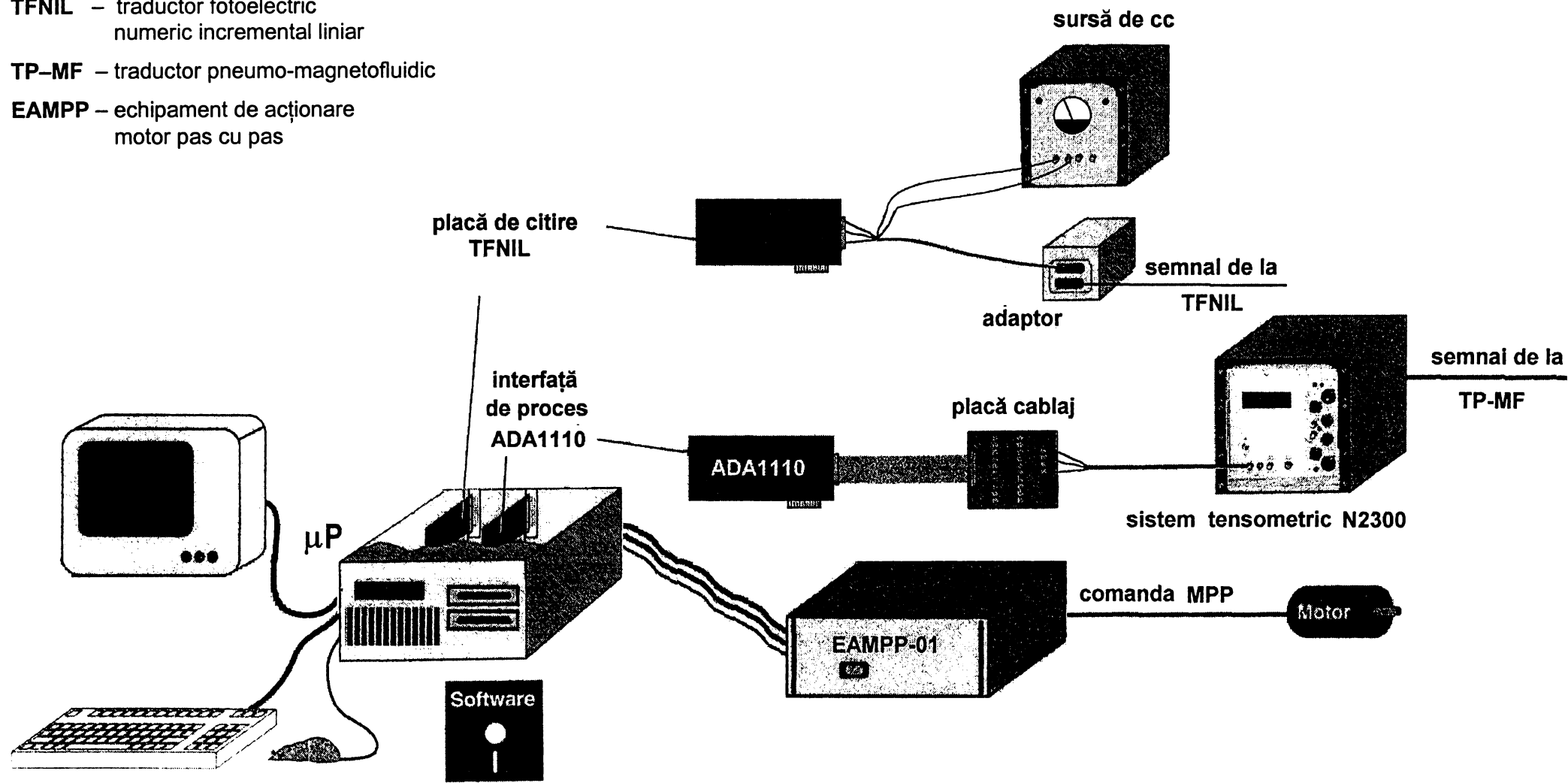


Figura 5.1 Schema principală a standului experimental
 a – sistemul de achiziție de date și control asistat de calculator

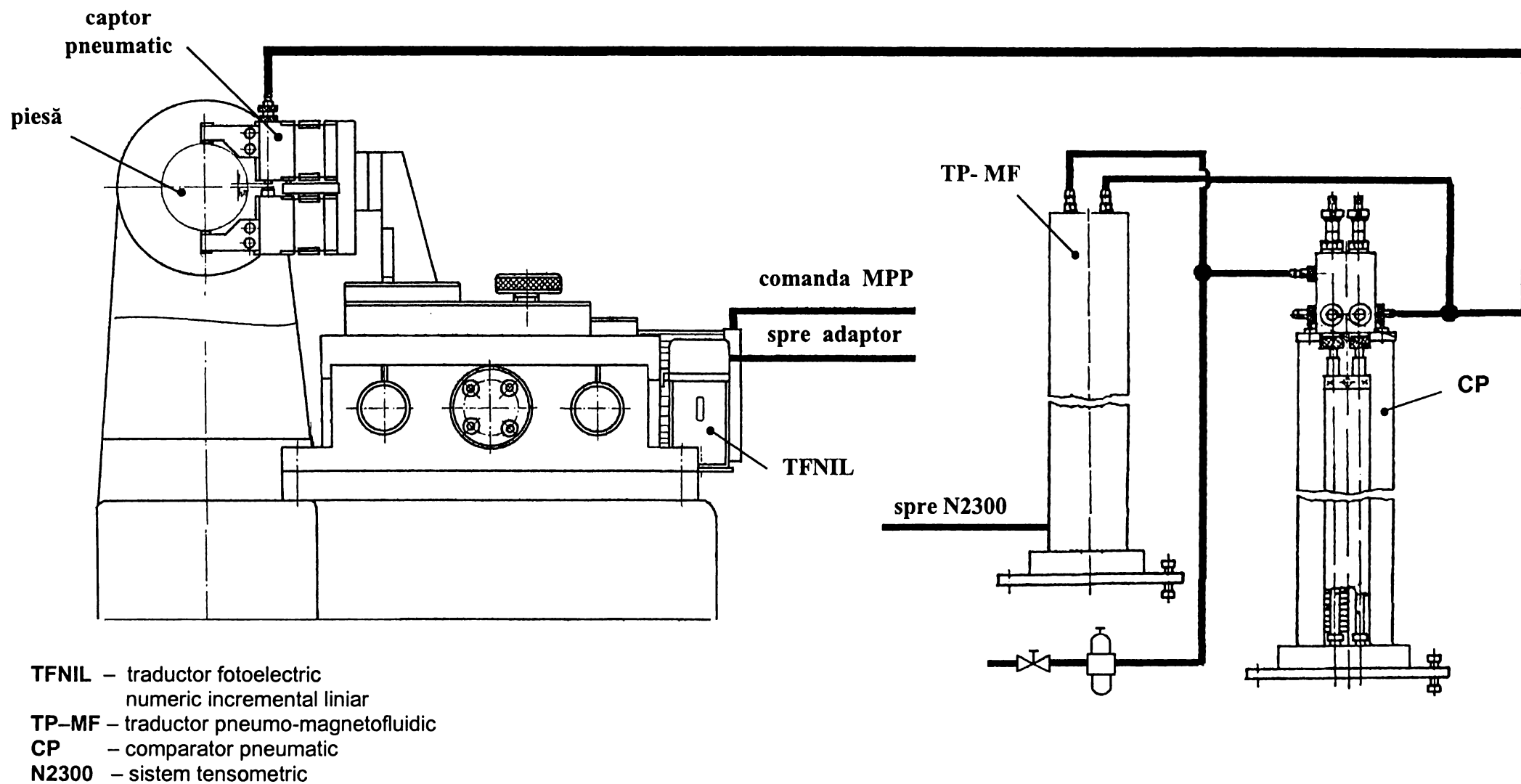


Figura 5.1 Schema principală a standului experimental
 b – captarea semnalelor primare de măsurare

– prelucrarea datelor achiziționate în vederea determinării abaterilor de la forma geometrică a suprafețelor și reprezentarea grafică profilurilor obținute.

Schema principială a standului experimental, ce evidențiază principalele module componente și legăturile dintre acestea, este prezentată în *figura 5.1*, vederea de ansamblu fiind cea din *figura 5.2*.

Figura 5.1.a arată compunerea generală a sistemului de achiziție de date și control asistat de calculator, evidențiindu-se cele două lanțuri de culegere și transfer de date de la traductorul pneumo-magnetofluidic *TP-MF* și de la traductorul fotoelectric numeric incremental liniar *TFNIL* la microcalculator, precum și lanțul de comandă a acționării sistemului de reglare incrementală a poziției. *Figura 5.1.b* prezintă particularitățile constructive ale standului, dispunerea traductoarelor, captarea și prelucrarea primară a semnalelor de măsurare.

Spre deosebire de schema prezentată în *figura 5.1.a*, în vederea din *figura 5.2* este prezentată o soluție alternativă, de achiziționare a semnalului furnizat de adaptorul traductorului fotoelectric incremental liniar, de către un modul specializat de citire și afișare numerică, care preia rolul microprocesorului și al plăcii de citire aferente.

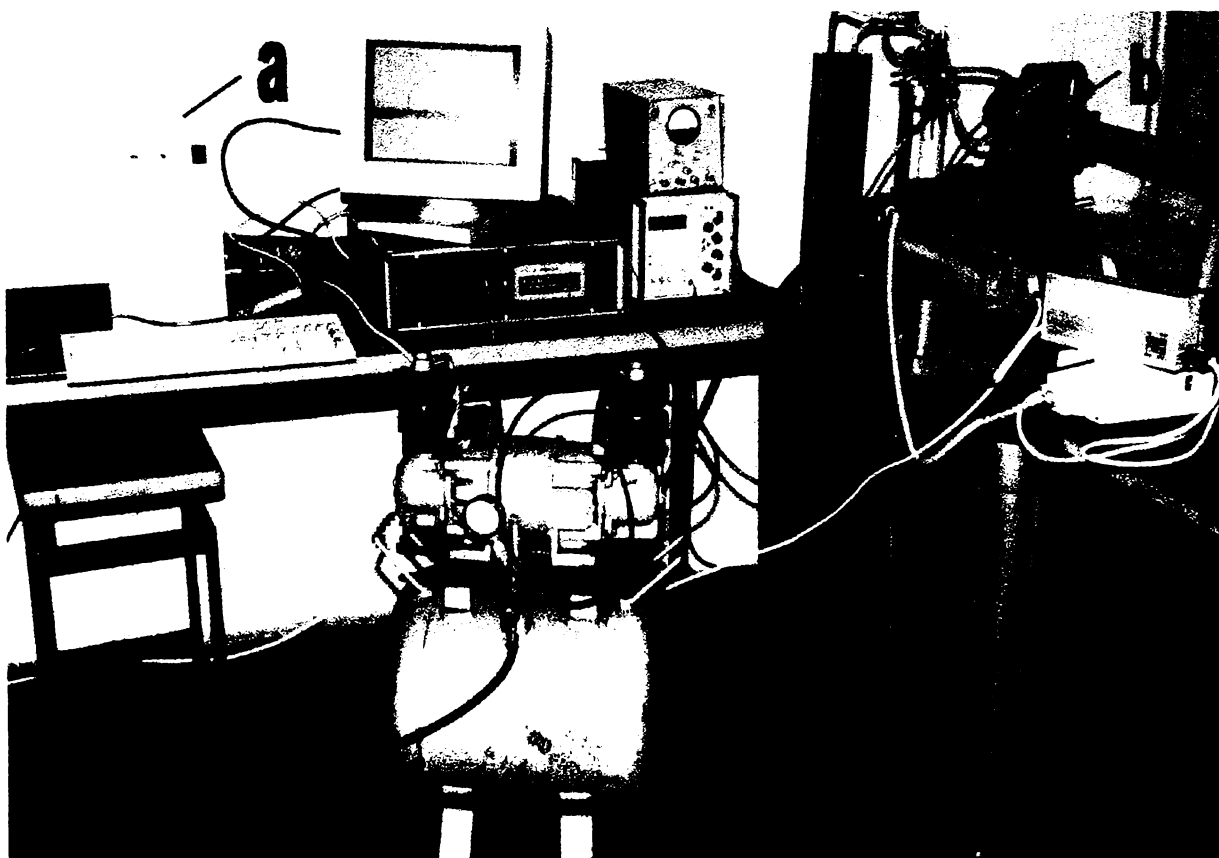


Figura 5.2 Vedere generală a standului experimental

a – calculator personal, b – sistem de control activ, c – sistem de măsurare a deplasării

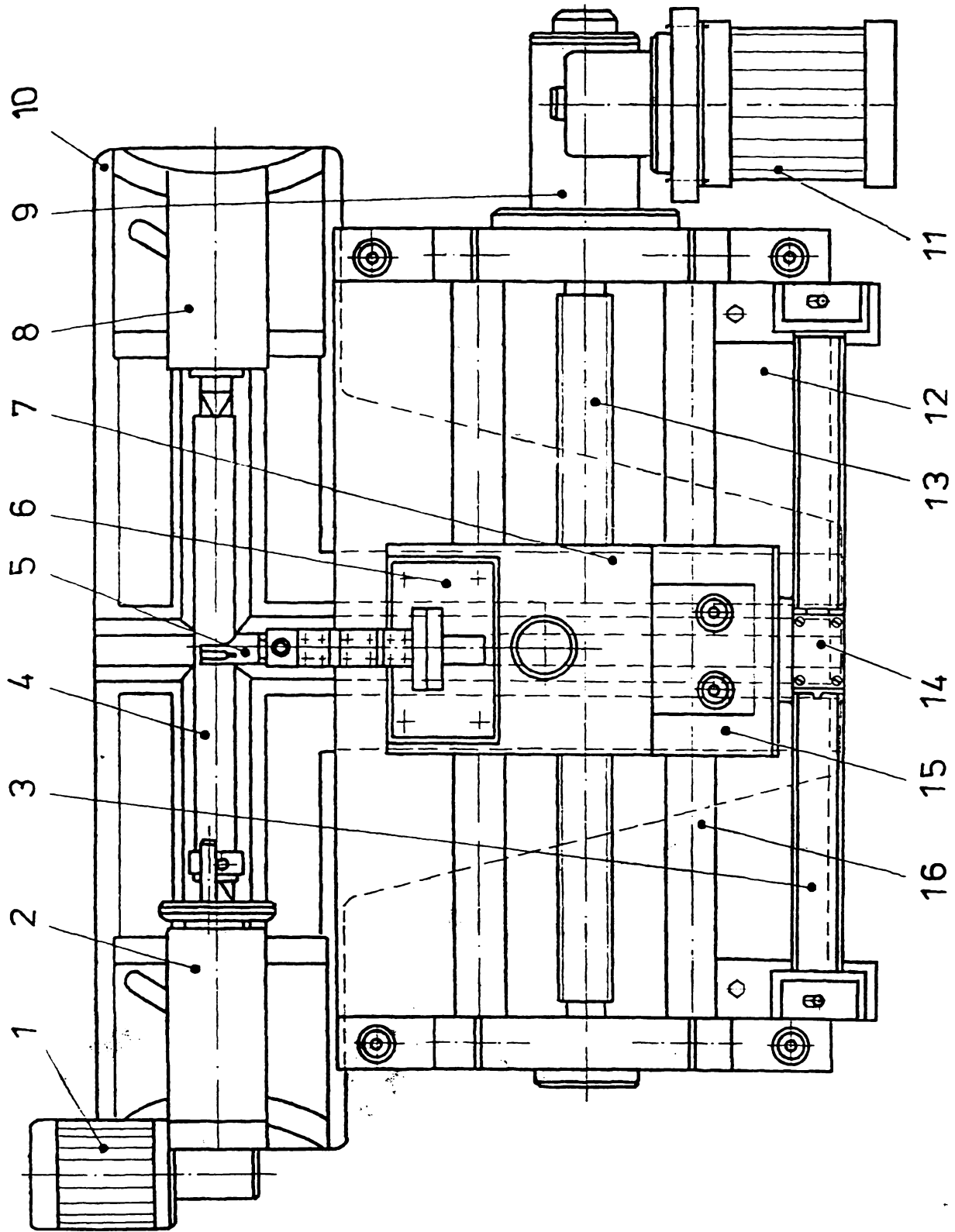


Figura 5.3 Structura mecanică a standului experimental

Structura mecanică a standului este prezentată în figura 5.3. Componentele standului sunt susținute de un batiu 10 în formă de T. Pe ghidajele acestuia este fixată păpușa fixă 2, care are rolul de a susține și de a antrena în mișcare de rotație piesa-etalon. Antrenarea se realizează printr-un motor de curent continuu și un reductor melcat 1, care permite reglarea continuă a turației prin alimentarea cu o tensiune variabilă.

Piesa-etalon 4, având conicitatea de $1 \mu\text{m}/\text{mm}$, este fixată între vârfurile păpușii fixe 2 și păpușii mobile 8. La măsurarea abaterilor de la forma geometrică a suprafețelor aceasta se înlocuiește cu piesa de măsurat. Poziția în care păpușa mobilă se fixează pe ghidajele batiului se stabilește în funcție de lungimea piesei instalate între vârfuri, astfel încât să asigure atât forța de strângere prin intermediul arcului păpușii mobile, cât și posibilitatea scoaterii ușoare a piesei, prin acționarea pârghiei prevăzute în acest scop.

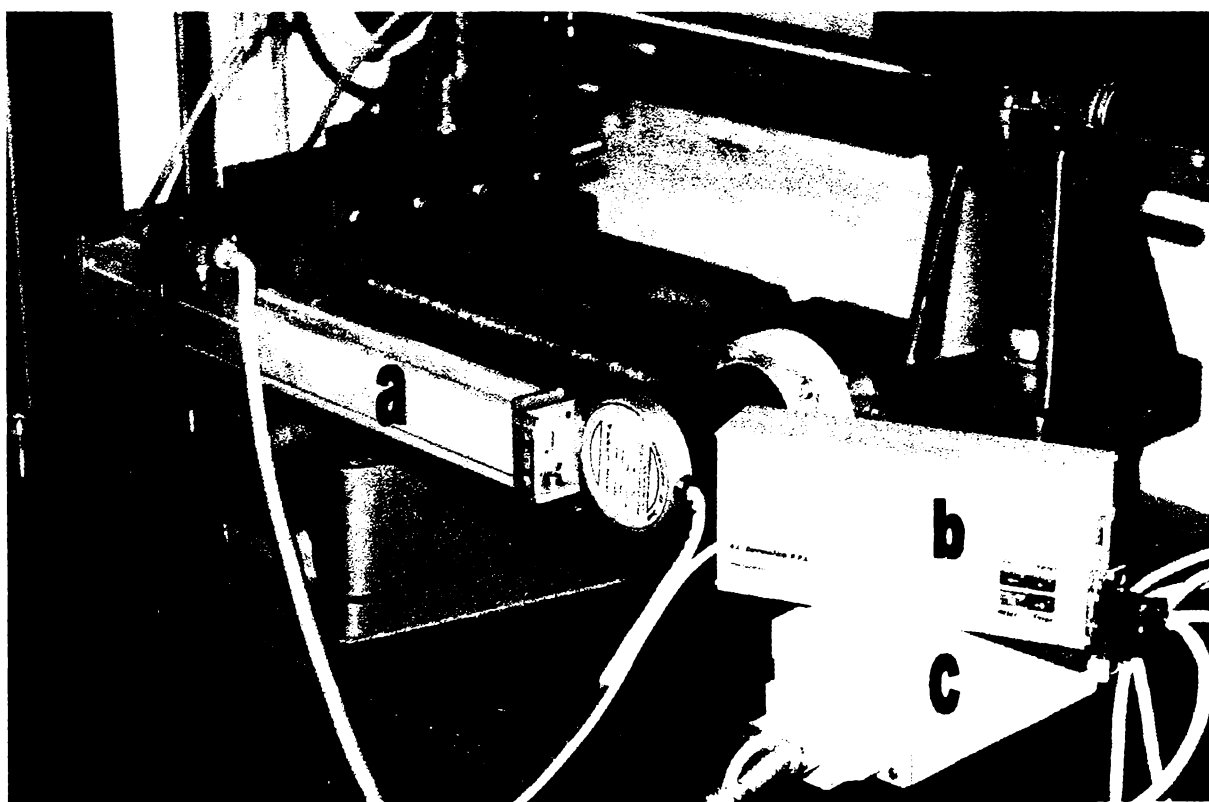


Figura 5.4 Vedere a traductorului fotoelectric numeric incremental liniar

a – traductor fotoelectric incremental liniar, b – modul de citire și afișare, c – adaptor

Captorul pneumatic 5 are palpatoarele de măsurare susținute cu ajutorul unor paralelograme elastice. Deplasarea acestora prin intermediul unui mecanism pinion-cremalieră, pe ghidajele în formă de coadă de rândunică permite reglarea domeniului de măsurare pentru dimensiuni cuprinse între 20–75 mm. Reglarea la

zero a sistemului de măsurare se face cu ajutorul duzei de măsurare, prevăzută cu filet cu pas fin. Captorul este fixat cu ajutorul unui suport sudat și a plăcii 6 pe sania transversală 7, care permite poziționarea și fixarea acestuia în poziția de măsurare. Suportul și placa au fost dimensionate astfel încât să permită și utilizarea sistemelor inductive de control activ realizate de *IMF București*.

Deplasarea captorului 5 în lungul piesei-etalon, în scopul simulării controlului activ la rectificarea cu avans de pătrundere, se face prin intermediul saniei longitudinale 15 pe ghidajele cilindrice 16. Sania 15 este acționată de un motor pas cu pas 11, prin intermediul unui reductor melcat 9 și a unui mecanism șurub-piuliță 13 cu filet trapezoidal, având pasul $p_{SC} = 4$ mm.

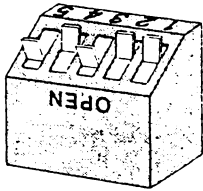
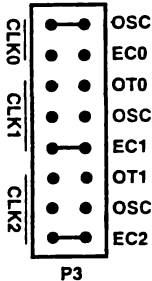
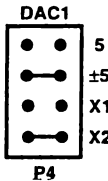
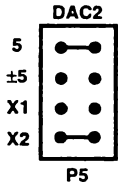
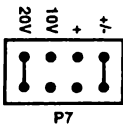
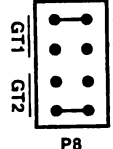
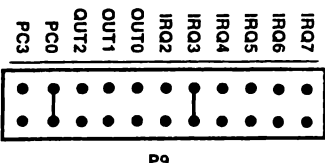
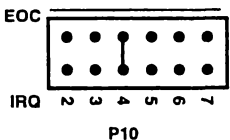
Întregul sistem de susținere și deplasare a captorului se sprijină pe platoul 12, fixat pe ghidajele în formă de T ale batiului 10. Pe același platou 12 este fixată rigla optică 3 a traductorului fotoelectric liniar *TFNIL*. Capul de citire 14 al acestui traductor este fixat în partea posterioară a saniei longitudinale, deplasându-se solidar cu aceasta și, implicit, cu captorul pneumatic 5. Verificarea și reglarea paralelismului dintre rigla 3 și direcția de deplasare a saniei longitudinale 15 s-a realizat cu ajutorul unui comparator cu cadran, cu valoarea diviziunii scării de 0,001 mm. În *figura 5.4* este prezentată amplasarea pe stand a traductorului *TFNIL*.

5.3. Conexiunile modulelor componente ale standului experimental

Semnalul de măsurare furnizat de traductorul pneumo-magnetofluidic TP-MF (*figura 5.1.a*) este convertit în semnal electric prin intermediul *Sistemului modular de aparatură tensometrică N2300*, compus din amplificatorul de măsură cu frecvență purtătoare *N2314* și modulul de alimentare și afișare *N2323*. Tensiunea livrată la ieșire de acesta este achiziționată de un calculator compatibil PC, prin intermediul interfeței de proces *ADA1110* ([X24]). Aceasta face parte din clasa produselor universale, realizate de firma *Real Time Devices*, reunind 4 circuite majore:

- de conversie analog-numerică;
- de conversie numeric-analogică;
- de gestionare a factorului timp (timer/counters);
- de intrări/ieșiri logice.

Tabelul 5.1 Inițializarea interfeței de proces ADA1110

| Jumper/ Switch | Funcția controlată | Poziția jumper/switch | Opțiunea setată |
|-------------------|---|--|--|
| S1 | Selecția adresei de bază, în raport cu care se vor utiliza adresele porturilor specifice ale interfeței |  | Adresa de bază 832 (340 hex), se selectează prin deschiderea pozițiilor 3 și 5 ale DIP switch-ului (1 = open) |
| P3 | Selecția intrării de ceas (CLK) pentru cele trei canale TC0, TC1, TC2 ale circuitului timer/numărător 8254 |  | TC0 – OSC conectare la oscilatorul intern de 8 MHz TC1 – EC1 conectare la un ceas extern TC2 – EC2 conectare la un ceas extern |
| P4 | Selectarea domeniului de tensiuni pentru ieșirea analogică AOUT1 |  | Domeniul tensiunilor de ieșire [-10, +10] V |
| P5 | Selectarea domeniului de tensiuni pentru ieșirea analogică AOUT2 |  | Domeniul tensiunilor de ieșire [0, 10] V |
| P7 | Selectarea gamei și polarității tensiunilor de intrare |  | Domeniul tensiunilor de intrare [-10, +10] V |
| P8 | Selecția semnalelor porții de comandă (gate) ale canalelor TC1, TC2 |  | Poarta 1 este conectată la +5 V Poarta 2 este comandabilă din exterior |
| P9 | Conectarea uneia din cele cinci surse de întrerupere la un canal de întrerupere |  | Sursa de întrerupere PC0 (INTRB) a interfeței paralele programabile 8255 este conectată la canalul IRQ3 |
| P10 | Conectarea semnalului EOC generat de CAN la sfârșitul conversiei la unul dintre canalele pentru cererile de întrerupere |  | Sursa de întrerupere EOC (End Of Conversion) este conectată la canalul IRQ4 |

Semnalul de măsurare se aplică prin conectarea la intrarea AIN1, în timp ce masa acestuia se leagă la pinul ANALOG GND al conectorului P2 cu 50 de pini. Pentru a nu fi afectată precizia rezultatelor, canalele de intrare neutilizate (AIN2...AIN16) se leagă la masă.

Conversia semnalului se realizează cu ajutorul unui convertor analog-numeric cu aproximație succesivă, având următoarele caracteristici ([X24]):

- rezoluție de 12 biți, semnificând 4,88 mV pentru domeniul tensiunilor de intrare ales de 20 V;

- liniaritate \pm LSB;
- viteză de conversie 20 ps;
- timp de achiziție pentru eșantionare-memorare 5 μ s;
- rată de achiziție 40 kHz.

Inițializarea interfeței de proces presupune configurarea switch-ului S1 pentru alocarea adresei de bază și plasarea jumper-ilor în pozițiile alese pentru o anumită aplicație. *Tabelul 5.1* arată selecția adoptată în cazul standului experimental utilizat.

Pentru măsurarea deplasării captorului pneumatic în lungul piesei-etalon, se utilizează un traductor fotoelectric numeric incremental liniar IAL-K, produs de firma *Carl Zeiss Jena*, al cărui cap de citire este conectat cu un adaptor ZE-10, alimentat de la o sursă de curent continuu (*figura 5.1.a*). Traductorul furnizează două trenuri de impulsuri de nivel TTL, defazate între ele în funcție de sensul de deplasare. Unitatea centrală a fost eliberată de funcția de contorizare a impulsurilor venite de la traductor, cu scopul de a se asigura o rezervă suficientă de timp de execuție, pentru celelalte operații necesare în cadrul reglării. Funcția de măsurare permanentă a poziției este astfel preluată de o placă de citire, utilizând în scopul conectării cu adaptorul, pinii 1 și 3, respectiv 2 – pentru masă, ai conectorului.

Pentru comanda deplasării captorului pneumatic în lungul piesei-etalon, s-a ales ca element de execuție un motor pas cu pas cu reluctanță variabilă tip MPPA, produs la I.P.P.C. Sfântu Gheorghe. Acesta prezintă următoarele caracteristici:

- număr de faze 2/4;
- pasul unghiular 0,9 grd./1,8 grd.;
- cuplul nominal 2,5 Nm;
- rezistența unei faze 0,9 Ohm;

- inductanța fazei 7,5 mH;
- curentul nominal 3 A.

Utilizarea motorului pas cu pas în sistemul de reglare numerică se datorează următoarelor avantaje conferite de acesta ([B2], [K3]):

- asigură univocitatea conversiei impuls-deplasare și poate fi utilizat în circuit deschis;
- gamă largă de frecvențe de comandă;
- precizie de poziționare și rezoluție mare;
- permite porniri, opriri, reversări, fără pierderi de pași;
- memorează poziția;
- este compatibil cu comanda numerică.

Alimentarea motorului cu un tren de impulsuri de comandă de amplitudine constantă, aplicate înfășurărilor de fază, se realizează prin intermediul unui *Echipament de acționare EAMPP-01* produs de *I.P.P.C. Sfântu Gheorghe*. Practic, acest bloc îndeplinește și funcția de amplificator de putere, compatibilizând nivelele TTL ale semnalelor (4–5 V) existente la ieșirea din calculator, cu nivelele de tensiune și curent necesare pentru comanda motorului pas cu pas ([S2]).

Comanda blocului de acționare de către calculator se face prin utilizarea interfeței paralele LPT2, care permite transferul bidirecțional de date pe 8 biți. Dintre cei 8 biți ai registrului de date având adresa 378 hex, se folosesc ca parametri de intrare câte un bit pentru sens și pentru tactul de comandă, și anume:

- pentru sens, bitul 0 corespunzând pinului 2 de pe conectorul cu 25 de pini;
- pentru tact, bitul 2 corespunzând pinului 4 de pe conector.

În concluzie, modulele interfațate, componente ale standului, compun un sistem de comandă și culegere a datelor, realizat în jurul unui microprocesor μP (*figura 5.1.a*) din familia 80x86, reprezentând unitatea de control, calcul și comenzi.

5.4. Structura sistemului de reglare numerică

În conceperea structurii sistemului de reglare numerică materializat prin standul experimental, s-a pornit de la schema bloc a sistemului de control activ operațional (*figura 2.10.a*), în fapt a unui sistem de reglare automată convențional continuu ([D9], [S1], [S2]). În cazul variantei numerice, funcțiile regulatorului *RG*, ale elementelor de comparare și, uneori, de prescriere sunt înglobate într-un

algoritm de reglare numerică *ARN* (figura 5.5), implementat cu ajutorul unui program în limbajul C++.

Sistemul condus propriu-zis este o acționare cu motor pas cu pas *MPP*, comandată de un element de execuție reprezentat de blocul *BC*. Prezența în sistemul de reglare automată a unui motor pas cu pas, ce are proprietatea fundamentală de a transforma informația discretă, sub formă de impulsuri, direct în deplasare incrementală, face posibilă eliminarea din structura sistemului a interfeței de ieșire, având ca element central convertorul numeric-analog.

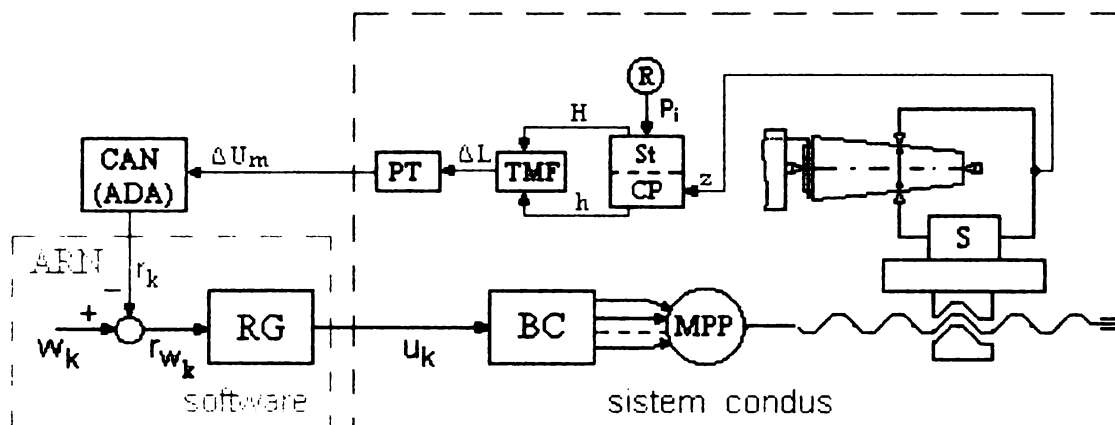


Figura 5.5 Structura sistemului de reglare automată convențională numerică

Elementul de măsurare este, de fapt, un lanț cu transformări succesive de mărimi, prezentat amănunțit în paragrafele 2.9, 4.3.1 și 5.3. Interfața de intrare conține, ca element principal, un convertor analog-numeric CAN, care realizează două operații ([L1], [X16]):

- eșantionarea semnalului analogic ΔU_m , care reprezintă ieșirea de măsurare a procesului, adică înlocuirea sa printr-o secvență de valori ce se succed la intervale constante corespunzătoare perioadei de eșantionare T_e , valori egale cu semnalul analogic la momentele de eșantionare;
- cuantificarea, adică reprezentarea amplitudinii semnalului printr-un număr finit, valoarea acestuia fiind, în general, codificată binar.

Utilizând codificarea pe 12 biți, se va putea face abstracție de efectele cuantificării, acestea devenind neglijabile.

Deci, semnalele discontinue în timp r_k , w_k , reprezintă codurile numerice corespunzătoare mărimii de reacție r , respectiv mărimii de conducere w , cunoscute numai la anumite momente:

$$t_k = k T_e \quad k \in Z \quad (5.1)$$

Echipamentul de comandă numerică elaborează, pe baza algoritmului de reglare numerică, codul numeric al mărimii de comandă u , în funcție de w și r . Luând în considerare mărimile discrete, ARN va fi de forma ([B2]):

$$u_k = f(w_k, r_k, u_{k-1}) \quad (5.2)$$

Datorită faptului că modelarea matematică a devansat mult posibilitățile de aplicare riguroasă în practică, algoritmi deduși teoretic determinând neîncadrarea în domeniul sistemelor de reglare automată în timp real și omiterea unor cerințe practice în favoarea rigurozității matematice ([S2]), s-a recurs la deducerea cvasiempirică a algoritmului de reglare numerică ARN .

5.5. Structura programului utilizat pentru comanda standului experimental

Programul realizat trebuie să asigure îndeplinirea, de către sistem, a următoarelor funcții de bază:

1. Selecția regimului de utilizare a standului, comandă manuală sau reglare automată;
2. Preluarea mărimilor prescrise, valorile cotei finale și ale vitezei de avans, de la operator;
3. Măsurarea diametrului curent al piesei r_k , ceea ce presupune conversia analog-numerică a semnalului furnizat de sistemul de control activ pneumo-magnetofluidic;
4. Stabilirea poziției curente prin contorizarea impulsurilor venite de la traductorul fotoelectric numeric incremental liniar;
5. Sintetizarea duratei necesare a impulsurilor de comandă și distribuirea lor pe fazele motorului pas cu pas printr-unul din porturile de ieșire ale calculatorului;
6. Generarea unui număr prescris de impulsuri, necesar pentru realizarea opririi sistemului în poziția dorită.

Programul-sursă pentru comanda sistemului, elaborat în limbajul C++ ([B6], [M7], [S2]), este prezentat în anexa 3. S-a optat pentru acest limbaj de programare, datorită flexibilității și eficienței sale, care i-a conferit rolul de limbaj dominant în etapa actuală. Funcțiile din program au următoarele roluri:

- **main()** este funcția principală a întregului program, care permite selecția regimului de lucru al standului, manual sau automat, prin apelarea funcțiilor cu

același nume, în raport cu opțiunea introdusă de la tastatură de către operator. În același timp, preia tot prin intermediul tastaturii valoarea codificată a vitezei de avans, realizează inițializările pentru citirea traductorului incremental liniar și apelează funcția **pregatire_axa()**, care continuă aceste inițializări.

– **manual()** este utilizată pentru operații de poziționare în principal și la etalonarea traductoarelor. În acest scop se redefinesc rolurile tastelor, funcția **kbstatus()** returnând starea acestora, inspectată prin apelul unei întreruperi BIOS. Astfel, prin apăsarea tastelor *Shift*, dreapta respectiv stânga, se execută o instrucțiune compusă, care determină deplasarea captorului pneumatic într-un sens sau celălalt, concomitent cu afișarea pe monitor a valorilor curente citite cu ajutorul celor două traductoare, în urma apelării funcțiilor **can()** și **trad()**. Tasta *Caps Lock*, cu automenținere, determină prin apăsare încheierea programului.

– **automat()** implementează mecanismul de reglare numerică în urma preluării valorii cotei finale de la tastatură, prin intermediul unei bucle *while* în corpul căreia se face apel la funcțiile **axa x()**, **can()** și **trad()**.

– **axa x()** realizează trimiterea impulsurilor spre blocurile de comandă ale motorului pas cu pas și gestionează temporizările dintre două secvențe succesive, pentru obținerea unei anumite viteze de avans.

– **trad()** determină poziția curentă asociată axei de măsurare a traductorului incremental liniar *TFNIL*, prin compunerea valorilor momentane citite din trei registre, încărcate permanent în raport cu impulsurile primite de la traductor.

– **can()** realizează conversia analog-numerică a semnalului sistemului de control activ.

Etapele parcurse în scopul realizării unei conversii analog-numerice sunt următoarele ([X24]):

– Inițializarea interfeței 8255, stabilind portul B ca port de ieșire prin utilizarea cuvântului de comandă 1XXXX00X (valorile marcate X nu prezintă importanță), înscris la adresa BA+3, unde BA reprezintă adresa de bază.

– Selectarea canalului dorit prin înscrierea la adresa BA+1 a unui octet adecvat; pentru selectarea canalului AIN1 se transmite octetul XXXX0000.

– Declanșarea conversiei analog-numerice pe 12 biți prin înscrierea unei valori oarecare la adresa BA+8.

– Urmărirea evoluției conversiei prin citirea bitului 0 EOC (end-of-convert) al octetului de stare de la adresa BA+10, a cărei tranziție de la 0 la 1 indică terminarea conversiei.

– Citirea succesivă, după o perioadă de minimum 20 μ s de la începutul conversiei, a LSB (least significant byte) – la adresa BA+9 – și a MSB (most significant byte) – la adresa BA+8.

– Obținerea rezultatului conversiei, utilizând relația:

$$V_b = 16 \text{ MSB} + \frac{\text{LSB}}{16} \quad (5.3)$$

– Transformarea rezultatului conversiei, obținut în biți, într-o valoare exprimată în Volt, ținând cont de domeniul d_V și polaritatea p_V a tensiunilor de intrare:

$$V_V = \frac{V_b}{2^{12}} d_V - p_V \frac{d_V}{2} \quad (5.4)$$

Pentru intervalul ales [-10 V, +10 V] al tensiunilor de intrare:

$$d_V = 20 \text{ V} \quad p_V = 1 \quad (5.5)$$

Structurile de program realizate și prezentate pot fi utilizate, ca atare sau cu modificări minore, și la reglarea numerică a procesului real de rectificare cu control activ.

5.6. Prezentarea și interpretarea rezultatelor experimentale

Pentru a aprecia precizia de oprire la cotă a sistemului de control activ, a influenței sensibilității sistemului de măsurare pneumo-magnetofluidic și a vitezei de deplasare a captorului asupra acestei precizii, s-au efectuat trei serii de determinări:

– prima, pentru o sensibilitate a sistemului amintit, determinată de alegerea unui diametru al duzei de intrare $d_1 = 0,5$ mm și o amplificare electrică $A = 50000$, precum și pentru o viteză de avans $v_s = 1$ mm/min (*tabelul 5.2*);

– a doua, pentru aceeași sensibilitate și pentru o viteză de avans $v_s = 3$ mm/min (*tabelul 5.3*);

– a treia, pentru o sensibilitate a sistemului amintit, determinată de alegerea unui diametru al duzei de intrare $d_1 = 0,75$ mm și o amplificare electrică $A = 100000$, precum și pentru o viteză de avans $v_s = 1$ mm/min (*tabelul 5.4*).

Opțiunea aleasă pentru modificarea sensibilității sistemului a ținut cont de ierarhizarea factorilor de influență rezultată în urma cercetărilor experimentale prezentate în paragraful 4.1.2. (în cazul diametrului de intrare d_1) și de posibilitatea modificării cu ușurință (în cazul amplificării electrice A). Selectarea valorilor pentru diametrul d_1 și pentru amplificarea A a avut în vedere faptul că odată cu creșterea sensibilității se îngustează domeniul de măsurare al sistemului. Valorile vitezei de avans v_s s-au ales în conformitate cu cele recomandate la rectificarea cu avans de pătrundere ([V3]).

Tabelul 5.2 Rezultate experimentale pentru $d_1 = 0,5 \text{ mm}$, $A = 50000$, $v_s = 1 \text{ mm/min}$

| Nr. exp. | Indicație inițială $TFNIL$ [mm] | Indicație finală $TFNIL$ [mm] | Deplasare măsurată [mm] | Abaterea deplasării [mm] | Cotă finală calculată [mm] |
|----------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1 | 14650.397 | 14625.241 | 25.156 | 0.156 | 37.1002 |
| 2 | | 14625.146 | 25.251 | 0.251 | 37.1003 |
| 3 | | 14625.326 | 25.071 | 0.071 | 37.1001 |
| 4 | | 14625.374 | 25.023 | 0.023 | 37.1000 |
| 5 | | 14624.726 | 25.671 | 0.671 | 37.1007 |
| 6 | | 14625.608 | 24.789 | -0.211 | 37.0998 |
| 7 | | 14624.932 | 25.465 | 0.465 | 37.1005 |
| 8 | | 14624.290 | 26.107 | 1.107 | 37.1011 |
| 9 | | 14625.174 | 25.223 | 0.223 | 37.1002 |
| 10 | | 14626.048 | 24.349 | -0.651 | 37.0993 |
| 11 | | 14624.996 | 25.401 | 0.401 | 37.1004 |
| 12 | | 14624.552 | 25.845 | 0.845 | 37.1008 |
| 13 | | 14625.284 | 25.113 | 0.113 | 37.1001 |
| 14 | | 14625.594 | 24.803 | -0.197 | 37.0998 |
| 15 | | 14624.844 | 25.553 | 0.553 | 37.1006 |
| 16 | | 14625.216 | 25.181 | 0.181 | 37.1002 |
| 17 | | 14625.181 | 25.216 | 0.216 | 37.1002 |
| 18 | | 14625.865 | 24.532 | -0.468 | 37.0995 |
| 19 | | 14625.269 | 25.128 | 0.128 | 37.1001 |
| 20 | | 14625.484 | 24.913 | -0.087 | 37.0999 |
| 21 | | 14625.458 | 24.939 | -0.061 | 37.0999 |
| 22 | | 14625.066 | 25.331 | 0.331 | 37.1003 |
| 23 | | 14624.596 | 25.801 | 0.801 | 37.1008 |
| 24 | | 14624.278 | 26.119 | 1.119 | 37.1011 |
| 25 | | 14626.307 | 24.090 | -0.910 | 37.0991 |
| 26 | | 14625.016 | 25.381 | 0.381 | 37.1004 |
| 27 | | 14624.799 | 25.598 | 0.598 | 37.1006 |
| 28 | | 14625.006 | 25.391 | 0.391 | 37.1004 |
| 29 | | 14624.995 | 25.402 | 0.402 | 37.1004 |
| 30 | | 14625.221 | 25.176 | 0.176 | 37.1002 |

Comanda de oprire a deplasării captorului a fost dată la atingerea cotei finale $\Phi 37,1$ mm, dimensiune pentru care s-a făcut și etalonarea sistemului de control activ. Diametrul efectiv obținut în urma comenzii de oprire a deplasării s-a calculat determinând mărimea acestei deplasări cu ajutorul traductorului fotoelectric numeric incremental liniar *TFNIL* și ținând cont de conicitatea piesei. Astfel, abaterile măsurate în milimetri ale deplasării pot fi considerate abateri în micrometri ale piesei controlate pneumatic.

Histograma frecvențelor

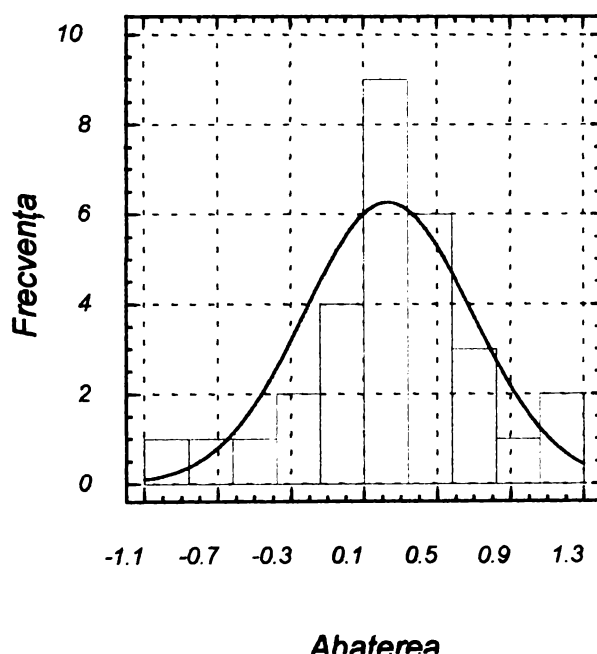


Figura 5.6 Histograma frecvențelor pentru $d_1 = 0,5$ mm, $A = 50000$, $v_s = 1$ mm/min

Histograma frecvențelor

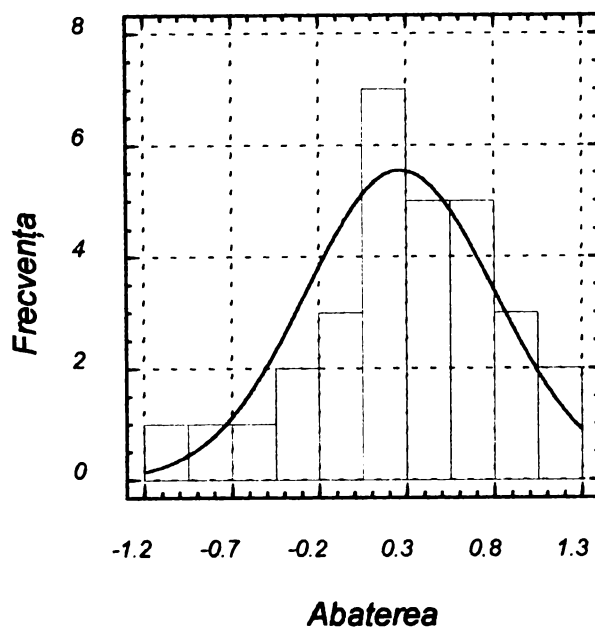


Figura 5.7 Histograma frecvențelor pentru $d_1 = 0,5$ mm, $A = 50000$, $v_s = 3$ mm/min

Pentru cele trei serii de determinări s-au reprezentat histogramele frecvențelor în figurile 5.6, 5.7 și 5.8, utilizând programul STATGRAPHICS ([X22]). Valorile mărimilor statistice, media aritmetică și intervalul de împrăștiere, au fost calculate pentru cele trei cazuri:

- $\bar{x}_1 = 0,234 \mu\text{m}$ și $6 s_1 = 2,75 \mu\text{m}$;
- $\bar{x}_2 = 0,263 \mu\text{m}$ și $6 s_2 = 3,23 \mu\text{m}$;
- $\bar{x}_3 = 0,164 \mu\text{m}$ și $6 s_3 = 4,08 \mu\text{m}$.

Tabelul 5.3 Rezultate experimentale pentru $d_1 = 0,5 \text{ mm}$, $A = 50000$, $v_s = 3 \text{ mm/min}$

| Nr. exp. | Indicație inițială TFNIL [mm] | Indicație finală TFNIL [mm] | Deplasare măsurată [mm] | Abaterea deplasării [mm] | Cotă finală calculată [mm] |
|----------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1 | 14650.397 | 14625.181 | 25.216 | 0.216 | 37.1002 |
| 2 | | 14625.176 | 25.221 | 0.221 | 37.1002 |
| 3 | | 14625.041 | 25.356 | 0.356 | 37.1004 |
| 4 | | 14624.421 | 25.976 | 0.976 | 37.1010 |
| 5 | | 14624.408 | 25.989 | 0.989 | 37.1010 |
| 6 | | 14625.208 | 25.189 | 0.189 | 37.1002 |
| 7 | | 14626.248 | 24.149 | -0.851 | 37.0991 |
| 8 | | 14626.046 | 24.351 | -0.649 | 37.0994 |
| 9 | | 14624.836 | 25.561 | 0.561 | 37.1006 |
| 10 | | 14625.326 | 25.071 | 0.071 | 37.1001 |
| 11 | | 14624.996 | 25.401 | 0.401 | 37.1004 |
| 12 | | 14625.450 | 24.947 | -0.053 | 37.0999 |
| 13 | | 14624.598 | 25.799 | 0.799 | 37.1008 |
| 14 | | 14624.248 | 26.149 | 1.149 | 37.1011 |
| 15 | | 14626.390 | 24.007 | -0.993 | 37.0990 |
| 16 | | 14624.963 | 25.434 | 0.434 | 37.1004 |
| 17 | | 14624.979 | 25.418 | 0.418 | 37.1004 |
| 18 | | 14625.696 | 24.701 | -0.299 | 37.0997 |
| 19 | | 14625.575 | 24.822 | -0.178 | 37.0998 |
| 20 | | 14624.846 | 25.551 | 0.551 | 37.1006 |
| 21 | | 14624.805 | 25.592 | 0.592 | 37.1006 |
| 22 | | 14624.252 | 26.145 | 1.145 | 37.1011 |
| 23 | | 14624.784 | 25.613 | 0.613 | 37.1006 |
| 24 | | 14625.281 | 25.116 | 0.116 | 37.1001 |
| 25 | | 14625.412 | 24.985 | -0.015 | 37.1000 |
| 26 | | 14624.584 | 25.813 | 0.813 | 37.1008 |
| 27 | | 14625.709 | 24.688 | -0.312 | 37.0997 |
| 28 | | 14625.012 | 25.385 | 0.385 | 37.1004 |
| 29 | | 14625.180 | 25.217 | 0.217 | 37.1002 |
| 30 | | 14625.239 | 25.158 | 0.158 | 37.1002 |

Pentru a aprecia dacă viteza de deplasare a captorului a influențat semnificativ precizia determinărilor, se compară dispersiile de selecție obținute pentru primele două serii de determinări. Se calculează criteriul Fisher ([C2], [N1]):

$$F_{calc} = \frac{s_2^2}{s_1^2} = \frac{0,290874}{0,210314} = 1,38 \quad (5.6)$$

Tabelul 5.4 Rezultate experimentale pentru $d_1 = 0,75 \text{ mm}$, $A = 100000$, $v_s = 1 \text{ mm/min}$

| Nr. exp. | Indicație inițială TFNIL [mm] | Indicație finală TFNIL [mm] | Deplasare măsurată [mm] | Abaterea deplasării [mm] | Cotă finală calculată [mm] |
|----------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1 | 14650.397 | 14626.372 | 24.025 | -0.975 | 37.0990 |
| 2 | | 14625.222 | 25.175 | 0.175 | 37.1002 |
| 3 | | 14624.530 | 25.867 | 0.867 | 37.1009 |
| 4 | | 14624.803 | 25.594 | 0.594 | 37.1006 |
| 5 | | 14625.652 | 24.745 | -0.255 | 37.0997 |
| 6 | | 14625.514 | 24.883 | -0.117 | 37.0999 |
| 7 | | 14625.122 | 25.275 | 0.275 | 37.1003 |
| 8 | | 14624.979 | 25.418 | 0.418 | 37.1004 |
| 9 | | 14624.180 | 26.217 | 1.217 | 37.1012 |
| 10 | | 14625.234 | 25.163 | 0.163 | 37.1002 |
| 11 | | 14625.415 | 24.982 | -0.018 | 37.1000 |
| 12 | | 14624.390 | 26.007 | 1.007 | 37.1010 |
| 13 | | 14624.281 | 26.116 | 1.116 | 37.1011 |
| 14 | | 14625.858 | 24.539 | -0.461 | 37.0995 |
| 15 | | 14624.785 | 25.612 | 0.612 | 37.1006 |
| 16 | | 14626.559 | 23.838 | -1.162 | 37.0988 |
| 17 | | 14624.513 | 25.884 | 0.884 | 37.1009 |
| 18 | | 14625.224 | 25.173 | 0.173 | 37.1002 |
| 19 | | 14625.993 | 24.404 | -0.596 | 37.0994 |
| 20 | | 14625.884 | 24.513 | -0.487 | 37.0995 |
| 21 | | 14624.954 | 25.443 | 0.443 | 37.1004 |
| 22 | | 14625.174 | 25.223 | 0.223 | 37.1002 |
| 23 | | 14626.421 | 23.976 | -1.024 | 37.0990 |
| 24 | | 14624.462 | 25.935 | 0.935 | 37.1009 |
| 25 | | 14625.331 | 25.066 | 0.066 | 37.1001 |
| 26 | | 14625.688 | 24.709 | -0.291 | 37.0997 |
| 27 | | 14624.120 | 26.277 | 1.277 | 37.1013 |
| 28 | | 14625.400 | 24.997 | -0.003 | 37.1000 |
| 29 | | 14624.819 | 25.578 | 0.578 | 37.1006 |
| 30 | | 14626.114 | 24.283 | -0.717 | 37.0993 |

Deoarece:

$$F_{calc} \leq F_{tab 0,05, 29, 29} = 1,86 \quad (5.7)$$

se acceptă ipoteza de nul cu o probabilitate de 0.95, adică faptul că între cele două dispersii nu există diferențe semnificative.

Pentru a aprecia dacă sensibilitatea sistemului pneumo-magnetofluidic a influențat semnificativ precizia determinărilor, se compară dispersiile de selecție obținute pentru prima și a treia serie de determinări. Se calculează criteriul Fisher:

$$\mathcal{F}_{calc} = \frac{s_3^2}{s_1^2} = \frac{0,463939}{0,210314} = 2,205 \quad (5.8)$$

Deoarece:

$$\mathcal{F}_{calc} \leq \mathcal{F}_{tab\ 0,05,\ 29,\ 29} = 1,86 \quad (5.7)$$

se respinge ipoteza de nul, acceptându-se, cu o probabilitate de 0,95, că între cele două dispersii există diferențe semnificative.

Histograma frecvențelor

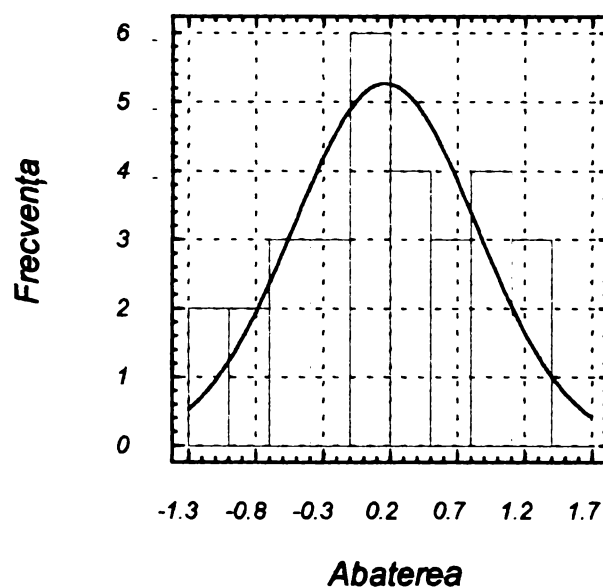


Figura 5.8 Histograma frecvențelor pentru $d_1 = 0,75\text{ mm}$, $A = 100000$, $v_s = 1\text{ mm/min}$

În concluzie, în urma determinărilor experimentale, se poate aprecia că erorile de fidelitate ale sistemului de control activ pneumo-magnetofluidic sunt mai mici decât cele ale unui sistem pneumatic clasic, apropiindu-se de cele ale sistemelor de control activ cu transductor inductiv diferențial cu miez mobil ([X7], [X11]). Valorile obținute în urma calculului statistic trebuie interpretate ca premise pentru obținerea unor piese rectificate de precizie ridicată, ținând cont însă, de faptul că la prelucrările propriu-zise, precizia este afectată de o serie de erori specifice, cauzate de deformațiile sistemului tehnologic elastic, de vibrații, de

temperatura de aşchiere. De asemenea, este de aşteptat ca sub sarcină, erorile de fidelitate în transmiterea comenzilor să fie superioare celor determinate experimental.

Prelucrarea statistică a datelor experimentale a evidenţiat şi influenţa semnificativă a sensibilităţii sistemului de control asupra preciziei de oprire la cotă. Prin urmare, este de subliniat din nou avantajul conferit, în cazul sistemelor pneumo-magnetofluidice, de posibilitatea amplificării electronice a semnalului.

Dezvoltarea acestor sisteme este strict legată de cea a lichidelor magnetice, de obţinerea unor astfel de lichide fără aderenţă la pereţii tuburilor sau cu permeabilitate magnetică relativă mai ridicată. Pe de altă parte, performanţe superioare pot fi obţinute prin perfecţionarea programului de reglare, în sensul realizării funcţiei suplimentare de sintetizare a treptelor de accelerare la pornire şi de decelerare înainte de oprire, asigurându-se astfel trei regimuri de funcţionare pentru motorul pas cu pas.

6.

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ PRIN CONTROL POSTOPERĂTIONAL A UNOR ABATERI DE FORMĂ GEOMETRICĂ ALE SUPRAFETELOR CILINDRICE EXTERIOARE

6.1. Utilizarea standului experimental la controlul postoperațional al suprafețelor cilindrice exterioare

Așa cum s-a menționat în debutul capitolului precedent, standul experimental realizat are un caracter multifuncțional, una din utilizările importante ale sale, constând în determinarea postoperațională a abaterilor de formă ale suprafețelor cilindrice exterioare. În acest sens, au fost concepute, în limbajul C++, programe de conversie și achiziție a datelor măsurate, precum și programe de calcul și grafică pentru abaterea de la circularitate și abaterea de la cilindricitate.

Spre deosebire de măsurările dimensionale anterioare, în cazul cărora explorarea suprafețelor s-a făcut de-a lungul generatoarelor piesei sau urmărind o elice cu pas constant, măsurările efectuate în scopul determinării abaterilor de formă se realizează pe cerc, punctele de măsurare deplasându-se pe traiectorii circulare, situate la diferite distanțe în plane perpendiculare pe axa piesei.

În plus, luând în considerare faptul că definirea abaterilor de formă se face prin diferența a două mărimi radiale, se poate accepta ca măsurarea, realizată prin metoda măsurării relative a variației diametrului, să fie făcută prin comparație cu o valoare inițială considerată nulă, nefiind absolut necesară utilizarea unei piese etalon. Există însă și situații în care se recurge la măsurare relativă prin comparație succesivă, ce presupune utilizarea unei piese etalon pentru măsurarea inițială.

6.2. Determinarea abaterii de la circularitate

Metoda utilizată presupune conversia analogic-numerică a semnalelor de măsurare și achiziția valorilor rezultate ale diametrului piesei din secțiunea considerată, perpendiculară pe axa piesei. Valorile achiziționate t_{d_i} sunt salvate într-un fișier deschis în memoria calculatorului, programul-sursă fiind prezentat în anexa 4. Măsurarea diametrului se realizează într-un număr prestabilit de puncte de pe profil P_i (figura 6.1), decalate între ele cu același unghi la centru.

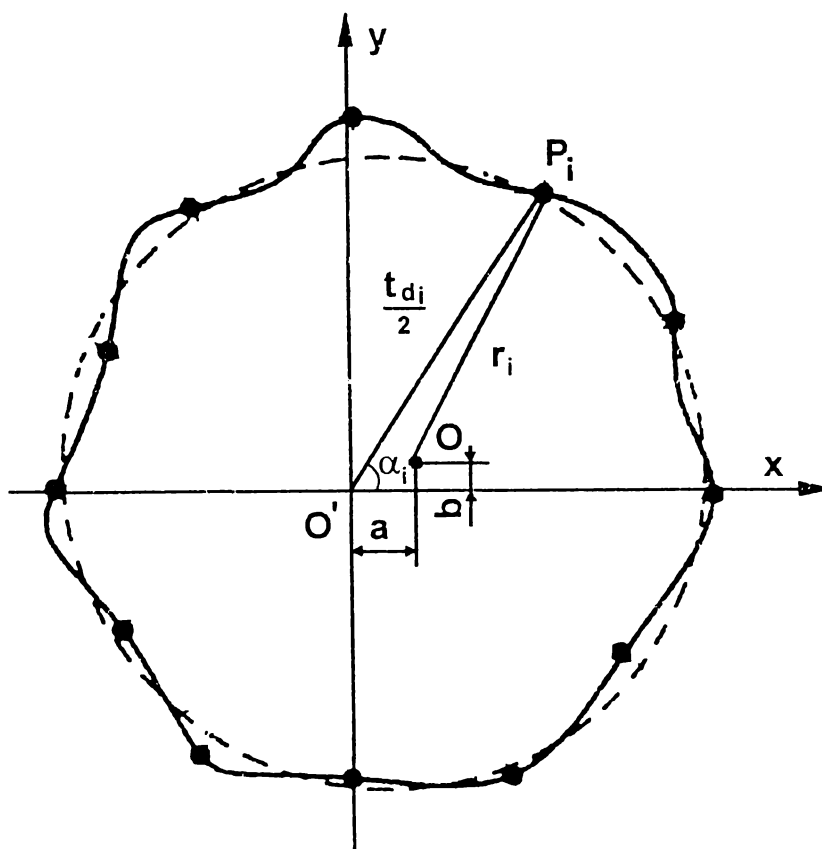


Figura 6.1 Explicativă pentru determinarea cercului celor mai mici pătrate

Programul de calcul și reprezentare grafică ia în considerare definirea abaterii de la circularitate ca diferență între raza maximă și cea minimă a profilului,

calculate în raport cu centrul cercului de referință ales. Dintre variantele prevăzute în standarde a fost preferat cercul celor mai mici pătrate, considerându-se că asigură în final o reflectare mai fidelă a valorii abaterii. Determinarea coordonatelor a , b ale centrului O al acestui cerc se face pe baza razelor măsurate ale profilului real (corespunzătoare punctelor P_i) în raport cu centrul de rotație al piesei O' :

$$a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{di} \cos \alpha_i \quad (6.1)$$

$$b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{di} \sin \alpha_i \quad (6.2)$$

Raza r a cercului celor mai mici pătrate se aproximează ca medie aritmetică a distanțelor r_i dintre centrul cercului celor mai mici pătrate și punctele situate pe profilul real al piesei:

$$r_i = \sqrt{\left(a - \frac{1}{2} t_{di} \cos \alpha_i\right)^2 + \left(b - \frac{1}{2} t_{di} \sin \alpha_i\right)^2} \quad (6.3)$$

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \quad (6.4)$$

Abaterea de la circularitate AF_C se calculează conform definiției ca diferență dintre razele r_{\min} și r_{\max} ale cercului înscris, respectiv circumscris profilului piesei, cercuri concentrice cu cel al celor mai mici pătrate determinat prin relațiile anterioare:

$$r_{\min} = \min \{r_i\} \quad (6.5)$$

$$r_{\max} = \max \{r_i\} \quad i = \overline{1, N} \quad (6.6)$$

$$AF_C = r_{\max} - r_{\min} \quad (6.7)$$

| | | |
|----------------------|----------------------|-------------------|
| a= 1.1742e-05 | b= 3.5839e-06 | r= 18.5154 |
| Rmax= 18.539 | Rmin= 18.4799 | AFC= 0.059 |

Figura 6.2 Exemplu de afișare a valorilor calculate de program la determinarea abaterii de la circularitate

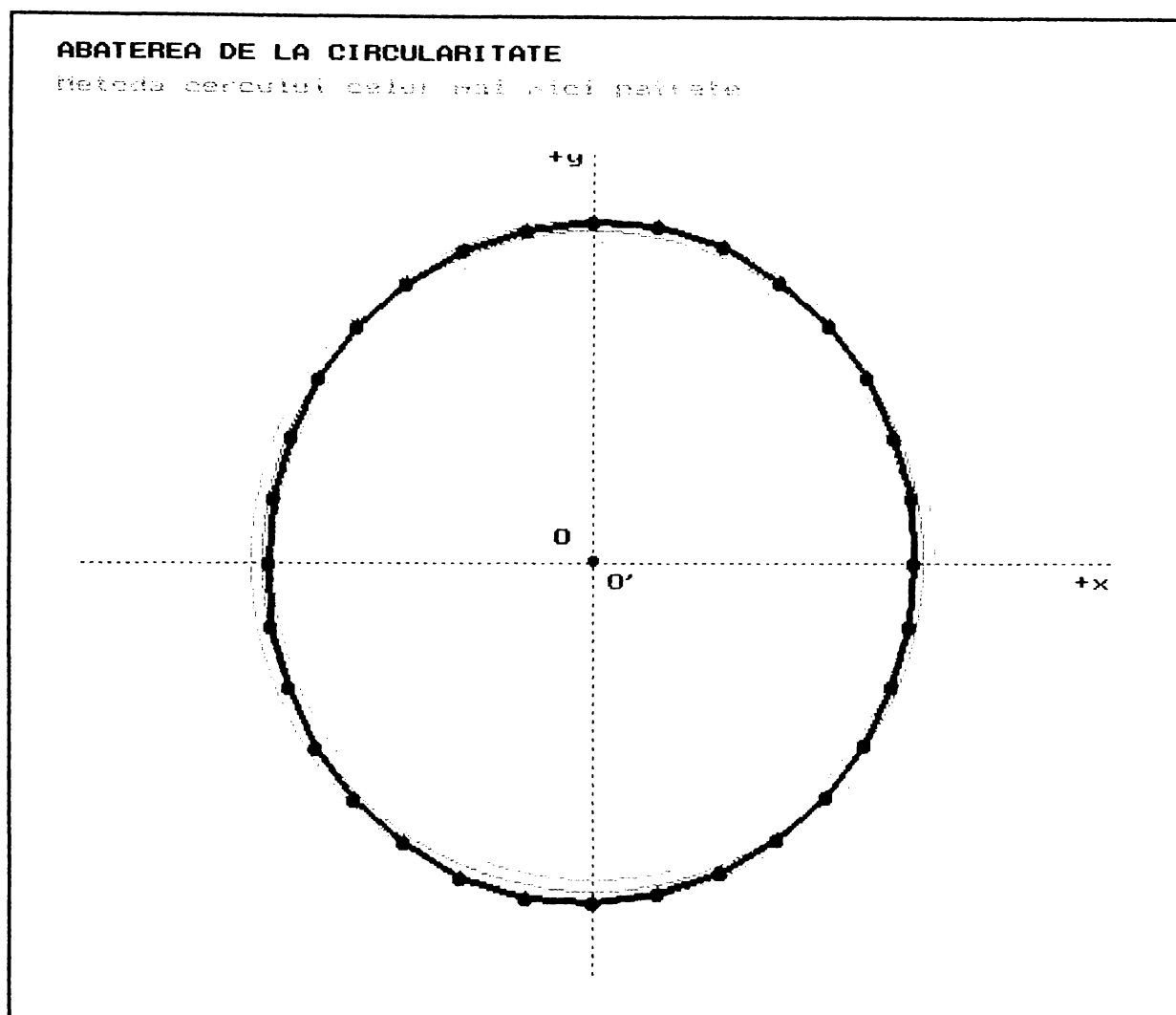


Figura 6.3 Exemplu de reprezentare grafică realizată prin program, la determinarea abaterii de la circularitate ($\Phi 15 \text{ mm}$, $AF_C = 0,49 \text{ mm}$)

Programul realizat și prezentat în anexa 4 calculează și afișează valorile în milimetri determinate cu relațiile precedente (figura 6.2), folosind și facilitățile oferite de mediul Borland C în utilizarea modului grafic și de afișare text al adaptorului video ([B6], [M7]). Astfel, se realizează reprezentarea grafică a profilului rezultat prin măsurare, a cercurilor înscris, circumscris și al celor mai mici pătrate, precum și marcarea centrului acestor cercuri (figura 6.3).

6.3. Determinarea abaterii de la cilindricitate

Abateră de la cilindricitate este o abatere de la forma geometrică a suprafețelor cu caracter complex, rezultată din compunerea abaterii de la circularitate cu abaterea profilului longitudinal. Datorită acestui caracter complex, tehnologiile de măsurare standardizate s-au axat pe identificarea unor situații particulare care permit aproximarea acestei abateri cu ajutorul unuia din

elementele sale componente, ușor măsurabile ([S6]). Influența unui mare număr de parametri tehnologici asupra abaterilor de formă în secțiunile radială și axială face imposibilă găsirea unei corelații între acestea și implicit extinderea gradului de valabilitate a unor metode de măsurare particularizate, amintite anterior.

De aceea, strategia de măsurare adoptată pornește de la definiția abaterii de la cilindricitate și ține cont de ambele elemente componente ale sale. Metoda constă în determinarea axei medii a suprafeței efective, proiectarea profilelor secțiunilor transversale ale piesei pe un plan perpendicular pe această axă și determinarea razelor cercurilor înscris, respectiv circumscris acestor proiecții.

Programul de conversie și achiziție a datelor, prezentat în anexa 4, înregistrează valorile diametrelor măsurate în fișiere corespunzătoare fiecărei secțiuni transversale în care se realizează măsurarea. Numărul acestor secțiuni m , precum și lungimea de referință l se introduc de către utilizator în urma apelului lansat de program. Distanța dintre secțiunile transversale se măsoară cu ajutorul traductorului fotoelectric numeric incremental liniar *TFNIL*.

Pentru calculul și reprezentarea grafică corespunzătoare metodei adoptate, se pornește de la ecuațiile dreptei în spațiu:

$$x = q_{x1} z + q_{x0} \quad (6.8)$$

$$y = q_{y1} z + q_{y0} \quad (6.9)$$

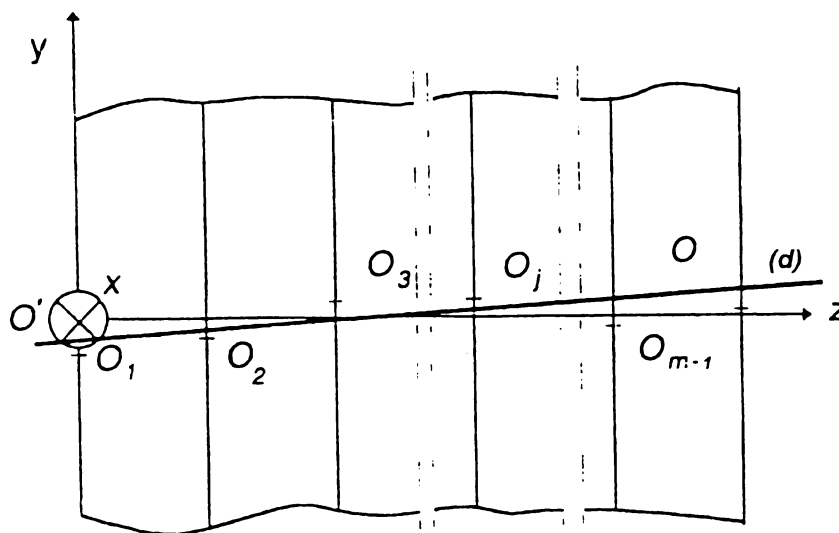


Figura 6.4 Explicativă pentru determinarea axei medii (d)

Explicitarea acestor ecuații se face punând condiția de minim al sumei pătratelor distanțelor dintre centrele O_j ale secțiunilor transversale considerate și

dreapta (d) reprezentând axa medie (figura 6.4). Coordonatele a_j , b_j față de sistemul $xO'y$, ale centrului O_j al cercului celor mai mici pătrate în secțiunea j , se determină cu formule similare cu relațiile (6.1) și (6.2).

$$a_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{dij} \cos \alpha_i \quad (6.10)$$

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{dij} \sin \alpha_i \quad (6.11)$$

Condițiile se exprimă prin formulele:

$$\sum_{j=1}^m (a_j - q_{x1} z_{Oj} - q_{x0})^2 = \min \quad (6.12)$$

$$\sum_{j=1}^m (b_j - q_{y1} z_{Oj} - q_{y0})^2 = \min \quad (6.13)$$

Derivând după q_{x0} , q_{x1} , q_{y0} , q_{y1} expresiile anterioare, rezolvând sistemul astfel obținut și înlocuind

$$z_{Oj} = (j-1) \frac{l}{m-1} \quad (6.14)$$

se obțin coordonatele punctelor de intersecție C_j ale axei medii cu secțiunile transversale de măsurare ([N3]):

$$c_j = 2 \frac{3(2j-m-1) \sum_{j=1}^m j a_j + (m-1)(2m-3j+5) \sum_{j=1}^m a_j}{m(m^2-1)} \quad (6.15)$$

$$d_j = 2 \frac{3(2j-m-1) \sum_{j=1}^m j b_j + (m-1)(2m-3j+5) \sum_{j=1}^m b_j}{m(m^2-1)} \quad (6.16)$$

În raport cu centrele C_j , pentru fiecare secțiune j și pentru fiecare punct de măsurare precizat prin poziția unghiulară α_i , se calculează valorile radiale r_{ij} (figura 6.5). Ținând cont că:

$$\overline{O'C_j}^2 = c_j^2 + d_j^2 \quad (6.17)$$

din $\Delta O'C_jP_{ij}$ se poate scrie :

$$r_{ij}^2 = c_j^2 + d_j^2 + \frac{t_{dij}^2}{4} - t_{dij} \sqrt{c_j^2 + d_j^2} \cos \hat{O}' \quad (6.18)$$

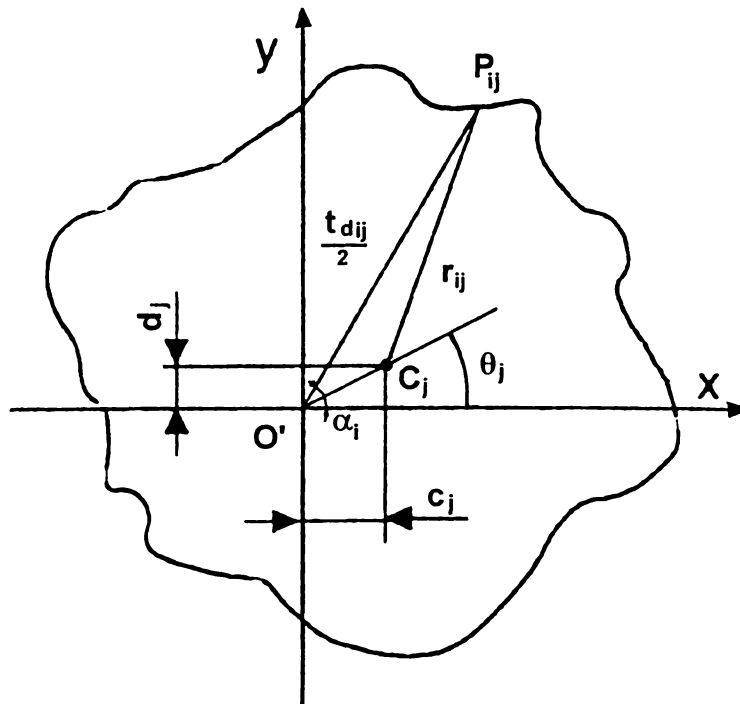


Figura 6.5 Explicativă pentru determinarea abaterii de la cilindricitate

Dar

$$\cos \hat{O}' = \cos(\alpha_i - \theta_j) = \cos \alpha_i \cos \theta_j + \sin \alpha_i \sin \theta_j \quad (6.19)$$

Cum

$$\cos \theta_j = \frac{c_j}{\sqrt{c_j^2 + d_j^2}} \quad \text{și} \quad \sin \theta_j = \frac{d_j}{\sqrt{c_j^2 + d_j^2}} \quad (6.20)$$

rezultă:

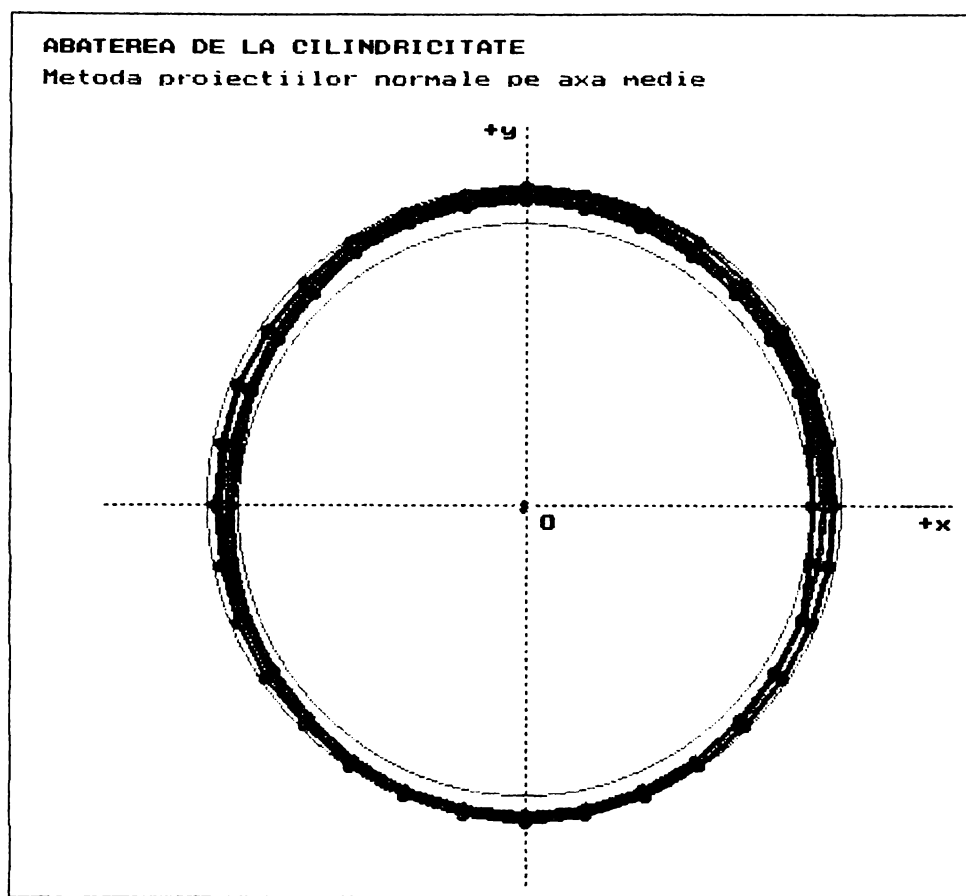
$$\cos \hat{O}' = \frac{c_j \cos \alpha_i}{\sqrt{c_j^2 + d_j^2}} + \frac{d_j \sin \alpha_i}{\sqrt{c_j^2 + d_j^2}} \quad (6.21)$$

Înlocuind această relație în (6.18), se obține raza căutată:

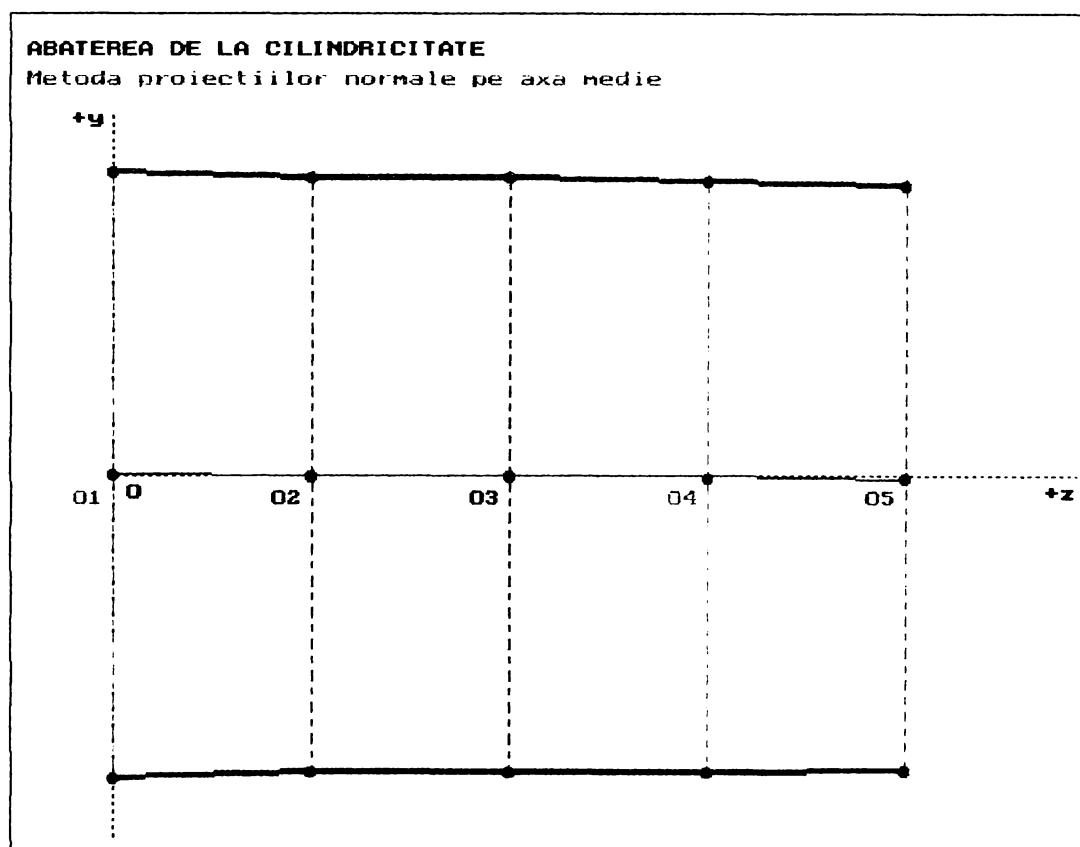
$$r_{ij} = \sqrt{c_j^2 + d_j^2 + \frac{t_{dij}^2}{4} - t_{dij} (c_j \cos \alpha_i + d_j \sin \alpha_i)} \quad (6.22)$$

Abaterea de la cilindricitate se determină cu relația:

$$AF_i = \max \{r_{ij}\} - \min \{r_{ij}\} \quad i = \overline{1, N} \quad j = \overline{1, m} \quad (6.23)$$



a.



b.

Figura 6.6 Exemplu de reprezentare grafică la determinarea abaterii de la cilindricitate
a – în secțiune transversală; b – în secțiune longitudinală

Programul-sursă pentru calculul și reprezentarea grafică a abaterii de la cilindricitate (*anexa 4*) afișează valorile determinate cu relațiile precedente de o manieră similară cu cea prezentată în *figura 6.2* pentru abaterea de la circularitate, reprezintă proiecțiile profilurilor secțiunilor transversale ale piesei și cercurile înscris și circumscris acestora (*figura 6.6.a*), precum și profilul longitudinal al piesei și poziția axei medii (*figura 6.6.b*).

6.4. Concluzii

În concluzie, standului experimental asistat de calculator, echipat cu sistemul de măsurare pneumo-magnetofluidic, i se poate da o întrebuințare practică imediată la controlul postoperațional al abaterilor dimensionale și de formă geometrică ale suprafețelor cilindrice exterioare.

Programele originale realizate permit automatizarea ciclurilor de măsurare, precum și achiziția, prelucrarea datelor și reprezentarea grafică a profilurilor pieselor măsurate. Există posibilitatea rezolvării și a altor teme de măsurare, necesitând un software adecvat, similar cu cele ce au făcut obiectul paragrafelor anterioare. Astfel, ca exemplificare se prezintă în *anexa 4* programul de calcul și reprezentare grafică a bății radiale.

Rezultatele obținute la măsurările postoperaționale pot constitui mărimi de intrare în stabilirea unor algoritmi de corecție în timp a valorilor de referință prescrise la controlul activ în procesele de rectificare (paragraful 2.2.3 și [G6]) sau în luarea unor decizii de modificare a unor parametri tehnologici ai regimului de prelucrare la rectificarea cu comanda adaptivă (paragraful 2.1.3).

7.

CONCLUZII

7.1. Concluzii finale

Echiparea cu sisteme de control activ a mașinilor-unelte de rectificat asigură o precizie și o productivitate a prelucrării comparabile cu cele obținute la prelucrarea pe mașini de rectificat cu comandă numerică a pieselor de formă geometrică relativ simplă, fondurile mobilizate pentru investiții fiind mai reduse în prima situație.

Implementarea cvasigenerală a microcalculatoarelor în sistemele de control activ constituie o premisă a transformării mașinilor de rectificat în sisteme autonome de rectificare și a integrării într-un sistem de producție asistat CIM. Calculatorul conferă sistemelor de control activ o flexibilitate practic nelimitată în achiziția și prelucrarea de date, ca suport pentru conducerea procesului pe baza unor algoritmi de reglare prestabiliți și pentru schimbul de informații cu calculatoarele situate pe un nivel ierarhic superior al sistemului autonom, care optimizează parametrii regimului de prelucrare și gestionează procesele legate de reasucuirea corpului abraziv.

Sistemele pneumatice de control activ s-au impus și s-au menținut în actualitate datorită capacității lor de a sesiza, cu ușurință și cu acuratețe, variațiile dimensionale ale pieselor prelucrate. Integrarea în aceste sisteme a traductoarelor magnetofluidice, caracterizate printr-o precizie ridicată și printr-un timp de răspuns suficient de mic, a permis obținerea la ieșire a unui semnal electric analogic și,

ulterior, conceperea unui sistem de reglare numerică, ca premise de îmbunătățire a performanțelor sistemelor pneumatice de control activ.

Sistemele de control activ pneumo-magnetofluidice cumulează avantajele conferite de procedeele de măsurare a presiunii joase și a presiunii diferențiale. În plus, în cazul măsurărilor fără contact, utilizarea unui senzor pneumatic cu duză ejectoare, asigură obținerea unei sensibilități ridicate și a unei caracteristici statice de transfer cu o liniaritate foarte bună. Modelarea analitică a funcției de transfer și a sensibilității sistemului are o importanță practică limitată, datorită ipotezelor simplificatoare acceptate, dar constituie, prin concluziile parțiale formulate, punctul de plecare în abordarea modelării experimentale. Aceasta din urmă demonstrează dependența funcției de transfer de unii parametri constructivi ai captorului pneumatic, ce nu au fost evidențiați explicit la modelarea analitică.

Modelarea experimentală a sensibilității sistemului pneumatic de control, concretizată prin explicitarea unui model de ordinul I, permite, cu ajutorul curbelor de nivel constant trasate, alegerea valorilor parametrilor constructivi ai captorului pneumatic, reglabili cu relativă ușurință, ce asigură nivelul impus pentru indicatorul de performanță modelat.

Pe lângă domeniul controlului activ fără contact, unde constituie practic singura alternativă, sistemele pneumo-magnetofluidice își dovedesc utilitatea și în varianta cu contact, înlăturând dezavantajul unor domenii de măsurare liniare relativ înguste, prin adoptarea unor valori corespunzătoare ale parametrilor constructivi ai captorului pneumatic. Chiar dacă această măsură determină scăderea sensibilității subsistemului pneumatic, sensibilitatea întregului sistem se poate menține la valori ridicate prin mărirea amplificării electrice ulterioare.

Verificările experimentale efectuate prin simularea controlului activ au evidențiat îmbunătățirea fidelității sistemului pneumatic, erorile obținute fiind comparabile cu cele avansate de firmele producătoare de sisteme de control activ cu traductor inductiv diferențial liniar LDST, soluție adoptată cu prioritate, care asigură preciziile cele mai ridicate.

Analiza teoretică și cuantificarea unor erori specifice măsurării pneumatice, cu și fără contact, care dețin o pondere semnificativă în eroarea de măsurare sistematică și influențează implicit justetea sistemului de control activ, a evidențiat posibilitatea neglijării acestor categorii de erori la controlul suprafețelor cilindrice

cu dimensiuni mai mari de 15 mm, precum și necesitatea compensării lor, în general, la controlul dimensiunilor mai mici decât această valoare.

Utilizarea sistemelor pneumo-magnetofluidice de control activ asistate de calculator încurajează tendințele din construcția mașinilor de rectificat, de renunțare la soluțiile clasice de realizare a avansurilor, recurgându-se la elemente de execuție special adaptate tehnicii numerice de reglare, cum ar fi motoarele pas cu pas sau servomotoarele de curent continuu cu inerție redusă.

7.2. Contribuții originale

Contribuțiile aduse de autor în scopul atingerii obiectivelor acestei lucrări pot fi sintetizate:

a) în domeniul teoretic:

1. Analiza sistemică a rectificării cu control activ, cu evidențierea mărimilor de intrare, de proces și a indicatorilor de performanță.

2. Conceperea schemelor structurale ale sistemelor de control activ, specifice metodelor de control activ prin condiționarea directă a dimensiunilor.

3. Analiza detaliată, structurată tabelar, a metodelor și procedeeleor pneumatice de măsurare și a elementelor constructive ale sistemelor pneumatice de control activ.

4. Propunerea unei variante originale de clasificare a sistemelor pneumatice de control activ operațional.

5. Demonstrarea expresiilor analitice ale unor erori specifice sistemelor pneumatice de control activ; cuantificarea și reprezentarea grafică parametrică a acestora.

6. Elaborarea unei metode numerice pentru calculul unor erori de gradul II specifice sistemelor pneumatice de control activ, prin asimilarea lor unor erori relative.

7. Evidențierea posibilității de neglijare a ponderii erorilor cauzate de curbura suprafeței și de deformațiile de contact în eroarea totală de măsurare, datorită caracterului referențial al sistemelor pneumatice de control activ.

8. Evidențierea, pentru cazurile de importanță practică, a valorilor superioare ale erorii de captare cauzate de deplasarea axei de măsurare pe direcția avansului de pătrundere, la măsurarea pneumatică cu contact față de cea

fără contact, respectiv la măsurarea pneumatică a suprafețelor cilindrice interioare față de cele exterioare.

9. Realizarea unui program de calcul în limbajul Visual Basic pentru calculul, reprezentarea grafică și analiza comparativă a unor erori specifice controlului activ cu și fără contact, care permite cuantificarea acestor erori în funcție de valorile alese ale mărimilor de intrare.

10. Elaborarea unui model intrări-ieșiri al sistemului de control pneumo-magnetofluidic, cu identificarea și gruparea factorilor de influență și a indicatorilor de performanță, în scopul modelării analitice și/sau empirice.

11. Demonstrarea expresiei caracteristicii statice de transfer a sistemelor pneumatice de control activ cu duză ejectoare.

12. Elaborarea unui model analitic al sensibilității sistemului pneumatic, sistemului magnetofluidic și, în final, a întregului sistem de control activ.

b) în domeniul aplicativ:

1. Stabilirea prin metoda analizei regresionale a funcției de transfer a sistemelor pneumo-magnetofluidice cu duză ejectoare, cu evidențierea influenței distanței dintre duzele subansamblului ejector asupra acesteia.

2. Excluderea, pe baza rezultatelor experimentale, a distanței dintre duzele subansamblului ejector din mulțimea factorilor ce influențează sensibilitatea sistemelor pneumo-magnetofluidice.

3. Proiectarea și realizarea unui experiment factorial complet, care a permis:

- ierarhizarea efectelor pe care factorii de influență și interacțiunile lor le produc asupra sensibilității sistemului de control activ pneumo-magnetofluidic cu duză ejectoare;
- explicitarea unui model regresional de ordinul I pentru indicatorul de performanță studiat, care estimează cu precizie ridicată suprafața de răspuns în domeniul investigat;
- trasarea curbelor de nivel constant, utilizate pentru selecția valorilor mărimilor de intrare care determină o anumită valoare necesară, impusă pentru sensibilitatea sistemului.

4. Realizarea unui stand multifuncțional asistat de calculator, pentru verificarea preciziei de oprire la cotă a sistemului de control activ pneumo-

magnetofluidic și pentru determinarea abaterilor de la forma geometrică a suprafețelor cilindrice exterioare, prin:

- conversia analogic-numerică a semnalului de ieșire al sistemului de control activ pneumo-magnetofluidic și achiziția datelor cu ajutorul calculatorului;
- conceperea unei metode de validare a sistemului de control activ pneumo-magnetofluidic, prin utilizarea în paralel a unui traductor fotoelectric numeric incremental liniar;
- conceperea unui sistem de poziționare cu motor pas cu pas, comandat de microprocesor.

5. Determinarea experimentală prin simularea controlului activ a erorilor de fidelitate ale sistemului pneumo-magnetofluidic, cu evidențierea influenței sensibilității sistemului de măsurare asupra mărimii acestor erori.

6. Realizarea unui program în limbajul C++ pentru implementarea algoritmului de reglare numerică și validarea sistemului de control activ pneumo-magnetofluidic.

7. Realizarea unui pachet de programe în limbajul C++ pentru conversia, achiziția și reprezentarea grafică a datelor, în scopul determinării abaterilor de la forma geometrică a suprafețelor cilindrice exterioare.

Cercetările efectuate lasă deschise o serie de noi direcții de studiu, dintre care mai importante ar fi:

- ❖ Determinarea erorilor de justețe și de fidelitate ale sistemului de control activ pneumo-magnetofluidic în condițiile concrete ale procesului de rectificare.
- ❖ Modelarea experimentală și optimizarea procesului de rectificare cu control activ.
- ❖ Perfecționarea și adaptarea programelor de reglare numerică a procesului de rectificare.
- ❖ Îmbogățirea pachetului de programe pentru determinarea postoperațională a altor abateri ale suprafețelor cilindrice exterioare.

BIBLIOGRAFIE

- A1 **Anton, I., De Sabata, I., Vekas, L.** – *Proprietăți și aplicații ale lichidelor magnetice*. Tehnologii, calitate, mașini, materiale, vol. 1, Editura tehnică, 1987.
- A2 **Anton, I., Dreucean, A., Vekas, L., Potencz, I.** – *Comparator pneumatic magnetofluidic de mare precizie*. CNTN Timișoara, 1989.
- A3 **Anton, I., De Sabata, I., Vekas, L.** – *Tendențe actuale în domeniul lichidelor magnetice*. Conferința de “Mașini Hidraulice și Hidrodinamică”, Timișoara, 1990.
- B1 **Bărglăzan, M.** – *Măsurări hidraulice și pneumatice*. Lito UT Timișoara, 1992.
- B2 **Bogdanov, I.** – *Microprocesorul în comanda acționărilor electrice*. Editura Facla, Timișoara, 1989.
- B3 **Bonfig, K.W.** – *Technische Durchflußmessung*. Vulkan-Verlag, Essen, 1987.
- B4 **Braicu, L., Limona, L.** (traducere) – *Microsoft Visual Basic 6.0. Ghidul programatorului*. Editura Teora, 1998.
- B5 **Buicliu, G.** – *Regimul de lucru al sistemelor pneumatice de măsurare în punte cu autoechilibrare*. Construcția de mașini, 30 (1978), nr.7.
- B6 **Bulac, C.** – *Inițiere în Turbo C++ și Borland C*. Editura Teora, București, 1995.
- B7 **Bica, Doina** – *Asupra obținerii unor lichide magnetice polare și nepolare*. Conferința de “Mașini Hidraulice și Hidrodinamică”, Timișoara, 1990.
- C1 **Călinescu, V.** – *Precizia reală a sistemului mașină-unealtă – aparat de control*. Construcția de mașini nr.7, 30, 1978.
- C2 **Cicală, E.F.** – *Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale*. Editura Politehnica Timișoara, 1999.
- C3 **Ciocârdia, C., Ungureanu, I.** – *Bazele cercetării experimentale în tehnologia construcțiilor de mașini*. Editura tehnică, București, 1978.

- D1 **D'Antonio, M.** – *SPC als wichtiger Beitrag zur Qualitätssicherung. „Automobil Industrie“*, Marposs, Fellbach, 1993.
- D2 **David, I., Bagiu, L.** – *Mijloace mecanice și hidropneumatice de măsurare și control*. Lito IPTV Timișoara, 1991.
- D3 **Demian, T.** – *Elemente constructive de mecanică fină*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1976.
- D4 **Demian, T., Tudor, D., Grecu, E.** – *Mecanisme de mecanică fină*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- D5 **De Sabata, I., Popa, N. C.** – *Calculul inductivității unei bobine în mediu eterogen folosind inducția magnetică pe o axă a bobinei*. Conferința de “Mașini Hidraulice și Hidrodinamică”, Timișoara, 1990.
- D6 **Dodoc, P.** – *Metode și mijloace moderne în mecanica fină și construcția de mașini*. Editura tehnică, București, 1978.
- D7 **Dodoc, P.** – *Metrologie generală*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- D8 **Dolga, V.** – *Construcția traductoarelor și senzorilor*. Lito UT Timișoara, 1993.
- D9 **Dragomir, T.L.** – *Regulatoare automate, vol. I*. Lito IPTV Timișoara, 1986.
- D10 **Dragomir, T.L., Preitl, Ș., Trica, A.R.** – *Regulatoare automate, vol. II*. Lito IPTV Timișoara, 1988.
- D11 **Drăgoi, G., Guran, M.** – *Sisteme integrate de producție asistate de calculator*. Editura tehnică, București, 1997.
- D12 **Dreucean, A.** – *Dinamometru cu traductor pneumo-magnetofluidic, partea I*. Conferința de “Mașini Hidraulice și Hidrodinamică”, Timișoara, 1990.
- D13 **Dreucean, A.** – *Dinamometru cu traductor pneumo-magnetofluidic, partea a II-a*. Conferința de “Mașini Hidraulice și Hidrodinamică”, Timișoara, 1990.
- D14 **Dreucean, A.** – *Studiul unui sistem de control activ cu traductori pneumatici de joasă presiune utilizat pe mașina de rectificat plan. Teză de doctorat*. IPTV Timișoara, 1972.
- D15 **Dreucean, A., Gubencu, D.** – *Evitarea comenzilor false ale sistemelor pneumatice de control activ la rectificarea arborilor cu canal de pană*. Analele Universității din Oradea, 1992.

- D16 **Dreucean A., Gubencu, D.** – *Influența distanței dintre duzele subansamblului ejector asupra funcției de transfer a traductoarelor pneumo–magnetofluidice.* “Revista de Tehnologii Neconvenționale”, Nr. 2, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- D17 **Dreucean, A., Paulescu, Gh.** – *Curbele caracteristice ale unui model experimental de comparator pneumatic magnetofluidic de mare precizie.* CNTN Timișoara, 1989.
- D18 **Dutschke, W.** – *Fertigungsmeßtechnik.* B.G.Teubner, Stuttgart, 1993
- F1 **Ferrara, B.** – *Anforderungen und Möglichkeiten von CNC–Steuerungen zum Schleifen.* “Werkstatt und Betrieb”, No. 8, Carl Hanser Verlag, München, 1990.
- G1 **Gafițanu, M.** – *Organe de mașini.* Editura Tehnică București, 1985
- G2 **Grandke, T., Ko, W.H.,** - *SENSORS. Fundamentals and General Aspects.* VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1989.
- G3 **Gubencu, D.** – *Considerații asupra procesului de îndreptare a discurilor abrazive.* Analele Universității din Oradea, 1993.
- G4 **Gubencu, D.** – *Considerații asupra lichidelor de răcire–ungere la rectificare.* Analele Universității din Oradea, 1993.
- G5 **Gubencu, D.** – *Stadiul actual al controlului activ pneumatic în procesele de rectificare.* Referat doctorat, Universitatea “Politehnica” Timișoara.
- G6 **Gubencu, D.** – *Posibilități și tendințe în creșterea performanțelor sistemelor pneumatice de control activ pentru procesele de rectificare.* Referat doctorat, Universitatea “Politehnica” Timișoara.
- G7 **Gubencu, D.** – *Modelarea matematică a proceselor de rectificare cu control activ.* Referat doctorat, Universitatea “Politehnica” Timișoara.
- G8 **Gubencu, D., Dreucean, A.** – *Stabilirea influenței parametrilor de intrare asupra sensibilității traductoarelor pneumo–magnetofluidice.* “Revista de Tehnologii Neconvenționale”, Nr. 1, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- G9 **Gubencu, D., Dreucean, A., Mălaimare, G.** – *Stabilirea funcției de transfer a dinamometrelor cu traductoare pneumo-magnetofluidice cu duză ejectoare.* “Eficiența tehnologiilor neconvenționale” – conferință internațională, voi. 2, Editura Augusta, Timișoara, 1998.
- H1 **Haug, R.** – *Pneumatische Steuerungstechnik.* B.G.Teuber, Stuttgart, 1991.
- I1 **Ignea, A.** – *Măsurarea electrică a mărimilor neelectrice.* Editura de Vest, Timișoara, 1996.

- I2 **Inasaki, I., Tönshoff, H.K., Howes, T.D.** – *Abrasive Machining in the Future*. Annals of the CIRP, Vol. 42/2/1993.
- K1 **Kerekes, L., Laza, Marta, Itu, T.** – *Considerații privind rolul unei bănci de date pentru regimurile de rectificare*. Buletin științific, nr. 27, IP Cluj-Napoca, 1984.
- K2 **König, W.** – *Fertigungsverfahren*. VDI Verlag, 1986.
- K3 **Kuo, B.C., Kelemen, A., Crivii, M., Trifa, V.** – *Sisteme de comandă și reglare incrementală a poziției*. Editura tehnică, București, 1981.
- L1 **Landau, I.D.** – *Identificarea și comanda sistemelor*. Editura tehnică, București, 1997.
- L2 **Luca, E., Călugăru, Gh, Bădescu, R., Cotaș, C., Bădescu, V.** – *Ferofluidele și aplicațiile lor în industrie*. Editura tehnică, București, 1978.
- L3 **Lungu, M., Vișan, A.** – *Studiul sistemic al proceselor care caracterizează prelucrarea prin eroziune electrochimică*, CNTN 6, 1993
- M1 **Mălaimare, G., Gubencu, D.** – *Factorii de influență și funcțiile obiectiv la modelarea prelucrării cu unde ultrasonice*. "Eficiența Tehnologiilor Neconvenționale" – conferință internațională, voi 1, Editura Augusta, Timișoara, 1999
- M2 **Micu, C., Dodoc, P., Diaconescu, Gh., Manolescu, Anca** – *Aparate și sisteme de măsurare în construcția de mașini*. Editura tehnică, București, 1978.
- M3 **Militaru, C., Moldoveanu, M.** – *Controlul dimensiunilor mari în construcția de mașini*. Editura tehnică, București, 1991.
- M4 **Militaru, C., Gheorghe, I., Sturzu, A., Matache, V.** – *Măsurări pneumatice în construcția de mașini*. Editura tehnică, București, 1977.
- M5 **Mocian, I.** – *Proiectare tehnologică asistată de calculator în construcția de mașini*. Editura Universității "Petru Maior" Târgu Mureș, 1999.
- M6 **Montgomery, D. C.** – *Design and Analysis of Experiments for Industry and Research*. John Wiley & Sons, New York, 1991.
- M7 **Muslea, I.** – *C++*. Programarea orientată pe obiecte. MicroInformatica, Cluj, 2002.
- N1 **Nichici, A., Cicală, E., Mee, R.** – *Prelucrarea datelor experimentale*. Lito UP Timișoara, 1996.
- N2 **Niculiță, Lidia** – *Măsurarea pneumatică utilizată în controlul automat pe linii de prelucrare*. Revista română de mecanică fină și optică, nr. 2, 1995.

- N3 **Niculiță, Lidia, Palade, D. D., Abălaru, I. A., Mocanu, N., Dăbuleanu, E. M.** – *Controlul automat integrat în sistemele de prelucrări mecanice*. Editura tehnică, București, 1998.
- N4 **Nossiter, J. C.** – *Excel pentru Windows 95*. Editura Teora, București, 1999.
- O1 **Oberländer, R.** – *Qualitätsdatennetze*. Sommerkurs „Qualitätssicherung und –management für Klein– und mittelbetriebe“, TU Wien, 1994.
- O2 **Ossana, P. H., Oberländer, R., Durakbasa, M. N., Waczek, G.** – *CIM – Ein Schlagwort unter der Lupe*. WUV Universitätsverlag, Wien, 1991.
- O3 **Ossana, P. H., Waczek, G., Durakbasa, M. N., Oberländer, R.** – *Stichwort QUALITÄT. Produktionmeßtechnik zur Qualitätssicherung*. WUV Universitätsverlag, Wien, 1992.
- P1 **Pavelescu, D., Rădulescu, Gh., Gafițanu, M., Crudu, I., Gheorghiu, N.** – *Organe de mașini, vol. I*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1985.
- P2 **Popa, N. C.** – *Traductoare inductive cu lichid magnetic și aplicațiile lor în tehnică. Teză de doctorat*. Universitatea “Politehnica” Timișoara, 1997.
- P3 **Popa, N. C.** – *Calculul analitic și numeric a unor traductoare inductive cu lichid magnetic*. Editura Politehnica, Timișoara, 1999.
- P4 **Popa, N. C., De Sabata, I., Potencz, I., Vekas, L.** – *Metodă de dimensionare a unor traductoare inductive cu lichid magnetic*. Conferința de “Mașini Hidraulice și Hidrodinamică”, Timișoara, 1990.
- P5 **Potencz, I., Suci, E., Vekas, L.** – *Magnetofluidic Transducers for Low Pressure Differences*. Revue Roumaine des Sciences Techniques – Mecanique Appliquée, Tome 30, Nr. 2-3, Editura Academiei R.S.R., București, 1985.
- P6 **Preitl, Șt.** – *Teoria sistemelor și reglaj automat*. Lito UT Timișoara, 1992.
- R1 **Rădulescu, Al., Vlase, A., Neagu, C.** – *Bazele tehnologiei mașinilor-unelte*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- S1 **Sângeorzan, D.** – *Echipamente de reglare numerică*. Editura Militară, București, 1990.
- S2 **Slavici, T.** – *Conducerea cu calculatorul a sistemelor tehnologice*. Lito UP Timișoara, 1996.
- S3 **Slavici, T.** – *Calculatoare personale. Aplicații la conducerea proceselor*. Editura Mirton, Timișoara, 1999

- S4 **Spineanu, U.** – *Automatizarea controlului dimensiunilor în construcția de mașini*. Editura tehnică, București, 1987.
- S5 **Stanić, J.** – *Tehnološki merni sistemi*. Mašinski Fakultet Beograd, 1988.
- S6 **Ștețiu, Cosmina-Elena, Oprean, C.** – *Măsurări geometrice în construcția de mașini*. Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1988.
- T1 **Taloi, D.** – *Optimizarea proceselor tehnologice*. Editura Academiei RSR, București, 1987.
- T2 **Töpfer, H., Schrepel, D.** – *Berechnung und experimentelle Untersuchungen eines verbesserten Systems Düse-Prallplatte*. Messen-steuern-regeln 8, 1965.
- T3 **Trmal, G.J., Zhu, C.B., Midha, P.S.** – *An expert system for grinding process optimization*. Journal of Materials Processing Technology, 33, 1992.
- V1 **Venk, S.** – *A System Approach for Decision Making in Production Grinding*. Annals of the CIRP, Voi. 40/1/1991.
- V2 **Volosov, S.S., Ped, E.I.** – *Priborî dlia avtomaticheskovo controlia v mașinostroenii*. Izdatelstvo "Mașinostroenie", Moskva, 1970.
- V3 **Vlase, A.** – *Regimuri de așchiere, adaosuri de prelucrare și norme tehnice de timp, vol. II*. Editura Tehnică București, 1984.
- W1 **Wen, X.M., Tay, A.A.O., Nee, A.Y.C.** – *Micro-computer-based optimization of the surface grinding process*. Journal of Materials Processing Technology, 29, 1992.
- W2 **Winter, R., Winter, Patty** – *Utilizare Microsoft OFFICE pentru Windows'95*, Editura Teora, 1996
- X1 * * * *Amplificator N 2314. Carte tehnică*. IEMI București, 1986.
- X2 * * * *Aparate pentru control activ și pasiv*. IMF București, 1988.
- X3 * * * *Bazele pentru obținerea unor piese de calitate. Mașini de rectificat*. VOUMARD Machines, La Chaux-de-Fonds, 1991.
- X4 * * * *Catalogue FORTUNA*, Germany, 1997.
- X5 * * * *Catalogue 1600.211.01, 1603.001.01*. PARKER Motion&Control, Dorset, U.K., 1997.
- X6 * * * *Controls Shortform. Control-it News*. HAWCO Limited, Guildford, England, 1996.

- X7 * * * *DCT Instruments. Product Selection Guide.* SENSOTEC, Columbus, Ohio, U.S.A., 1998.
- X8 * * * *Displacement and pressure transducers. Instrumentation for control and data acquisition.* GEFTRAN, Provaglio D'Iseo, Italia, 1996.
- X9 * * * *Electronische und Pneumatische Längenmeß-u. Steuergeräte,* MAHR, Feinprüf, 1993.
- X10 * * * *Guide Solutions.* BOURNS AGE, Baar, Switzerland, 1995.
- X11 * * * *In Control. Position Sensors.* Penny+Giles, Dorset, U.K. 1997.
- X12 * * * *Kistler Information 54.* KISTLER Instrumente AG Winterthur, Switzerland, 1997.
- X13 * * * *Meßtechnik in der Fertigung.* MARPOSS, Fellbach, 1993.
- X14 * * * *NUM Information No. 24, 25.* NUM S.A., Argenteuil Cedex, France, 1995.
- X15 * * * *Oberflächenprüfgeräte, Formtester für Fertigung und Meßraum.* Mahr, Perthen, 1993.
- X16 * * * *PC Systems Handbook for Scientists and Engineers.* CyberResearch, New Haven, U.S.A., 1996.
- X17 * * * *QS-1-2-3-4 Qualitätssoftware für CAQ.* CAT, Stuttgart, 1993.
- X18 * * * *Qualitätssicherung QS-1-2-3-4 Softwareübersicht.* CAT, Stuttgart, 1993.
- X19 * * * *Quick Ship Catalog.* DWYER Instruments, Michigan City, U.S.A., 1996.
- X20 * * * *ROTA Apparate-und Maschinenbau.* Wehr/Baden, 1993.
- X21 * * * *Short Form Catalog.* LUKAS Control Systems Products, Hampton, U.S.A., 1997.
- X22 * * * *STATGRAPHICS – Reference Manual.* Manugistic, 1992.
- X23 * * * *Transducers.* FAIRCHILD Winston-Salem, U.S.A., 1997.
- X24 * * * *User's Manual AD1110/ADA1110.* Real Time Devices, Inc., Pennsylvania, USA, 1993.

CUANTIFICAREA UNOR ERORI DE MĂSURARE SPECIFICE SISTEMELOR PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV

A1.1. Erori de captare la măsurarea pneumatică fără contact

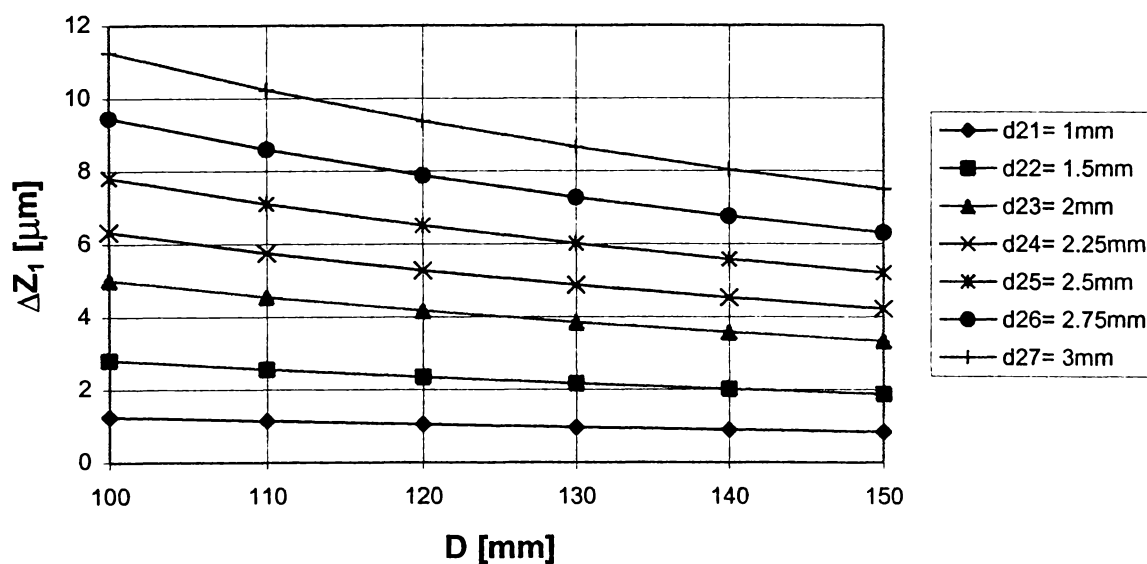


Figura A1.1 Eroarea cauzată de curbura suprafeței de măsurat ($D = 100 \dots 150$ mm)

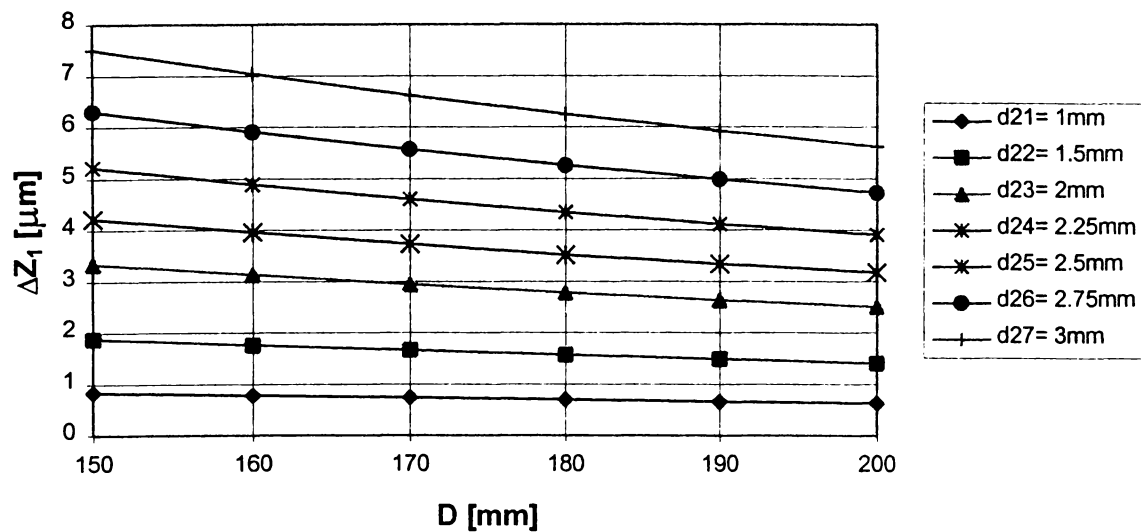


Figura A1.2 Eroarea cauzată de curbura suprafeței de măsurat ($D = 150 \dots 200$ mm)

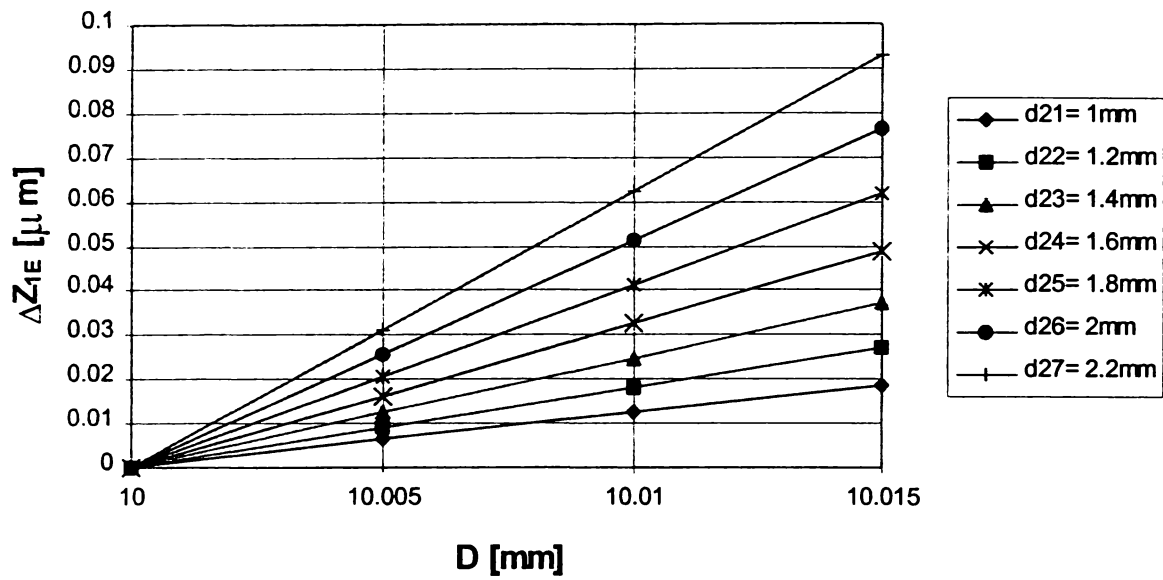


Figura A1.3 Eroarea relativă de curbură pentru $D_E = 10 mm$

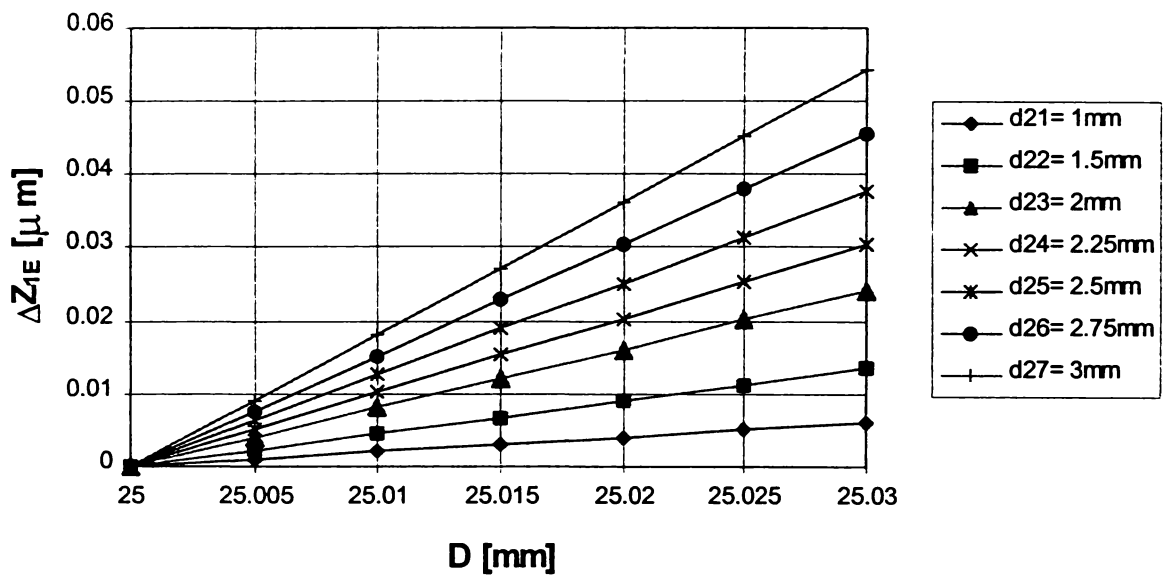


Figura A1.4 Eroarea relativă de curbură pentru $D_E = 25 mm$

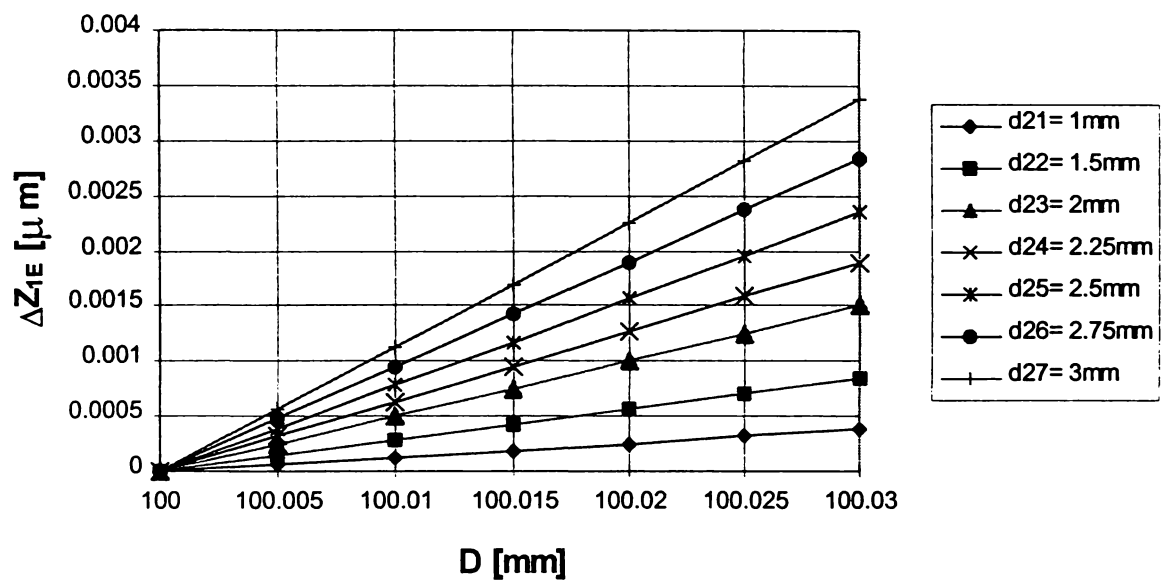


Figura A1.5 Eroarea relativă de curbură pentru $D_E = 100 mm$

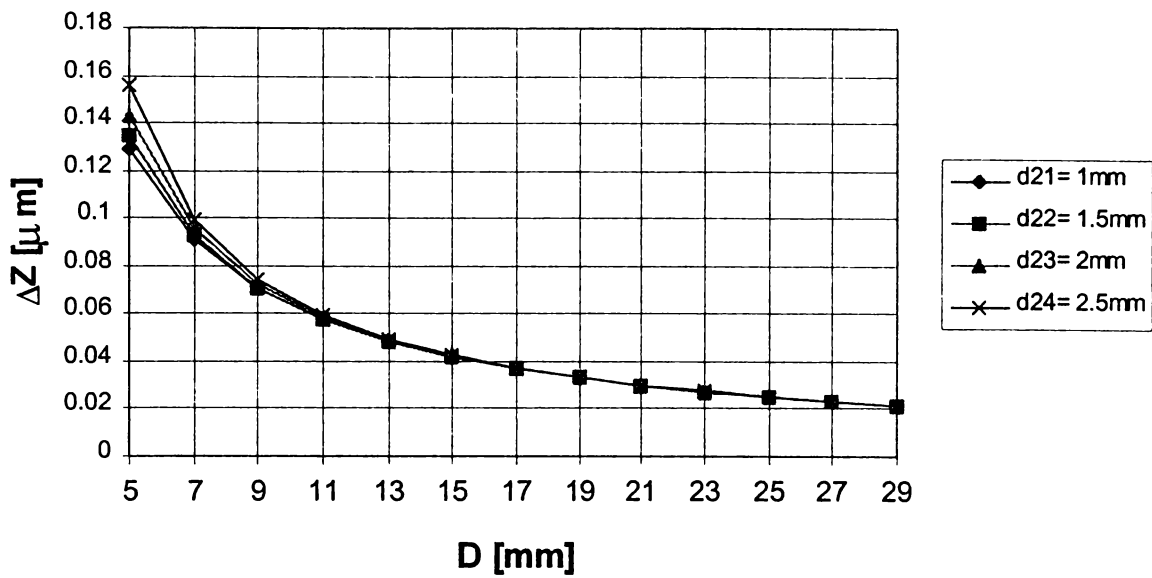


Figura A1.6 Eroarea de deplasare a axei duzei de măsurare (e = 0,05 mm)

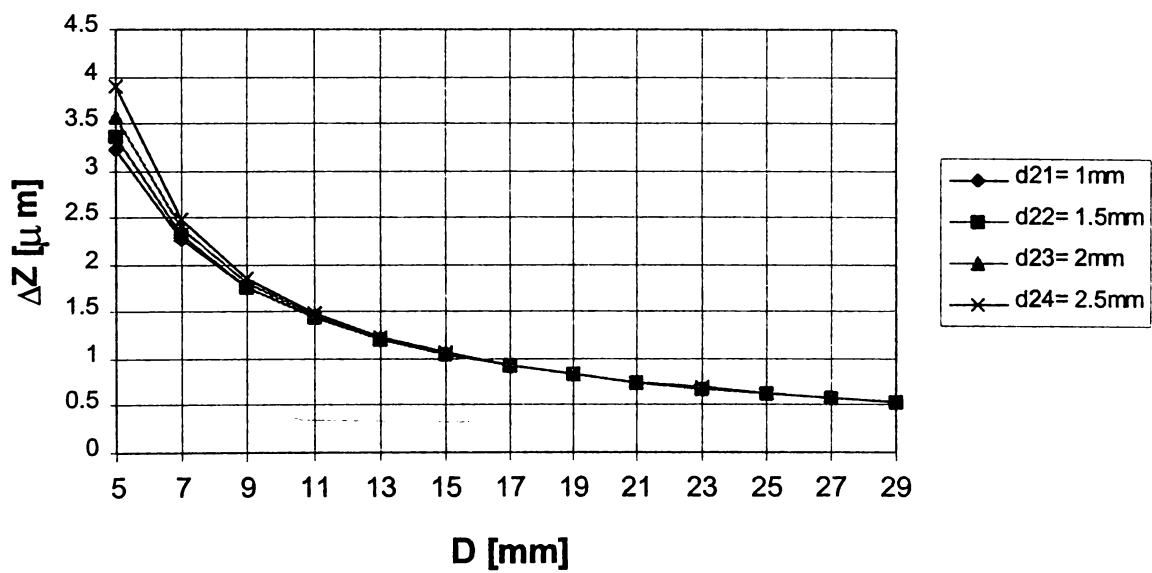


Figura A1.7 Eroarea de deplasare a axei duzei de măsurare (e = 0,25 mm)

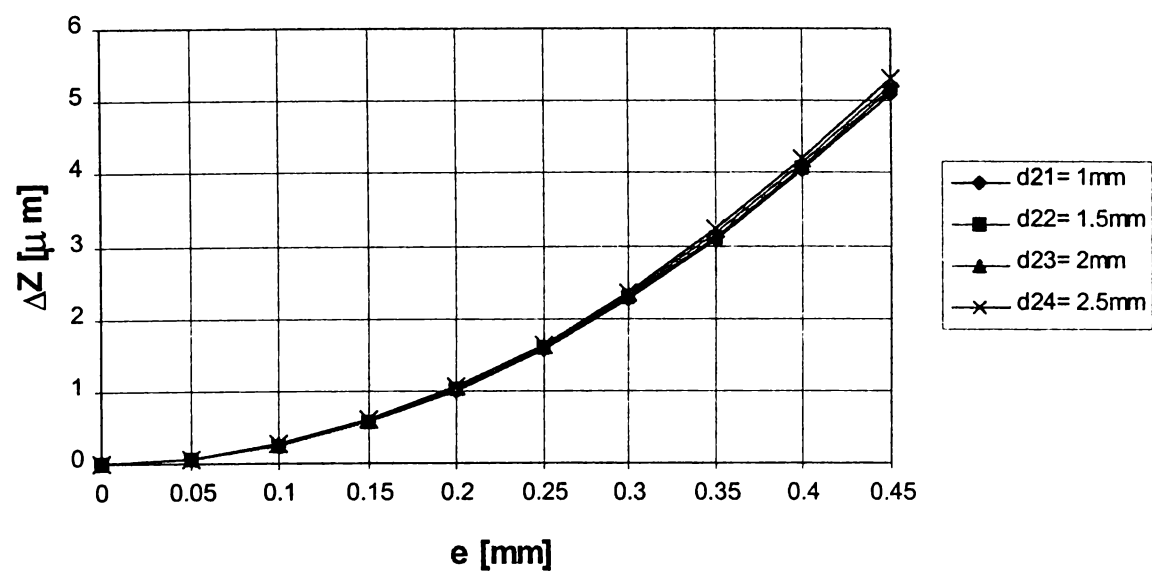


Figura A1.8 Eroarea de deplasare a axei duzei de măsurare (D = 10 mm)

A1.2. Erori de captare la măsurarea cu contact

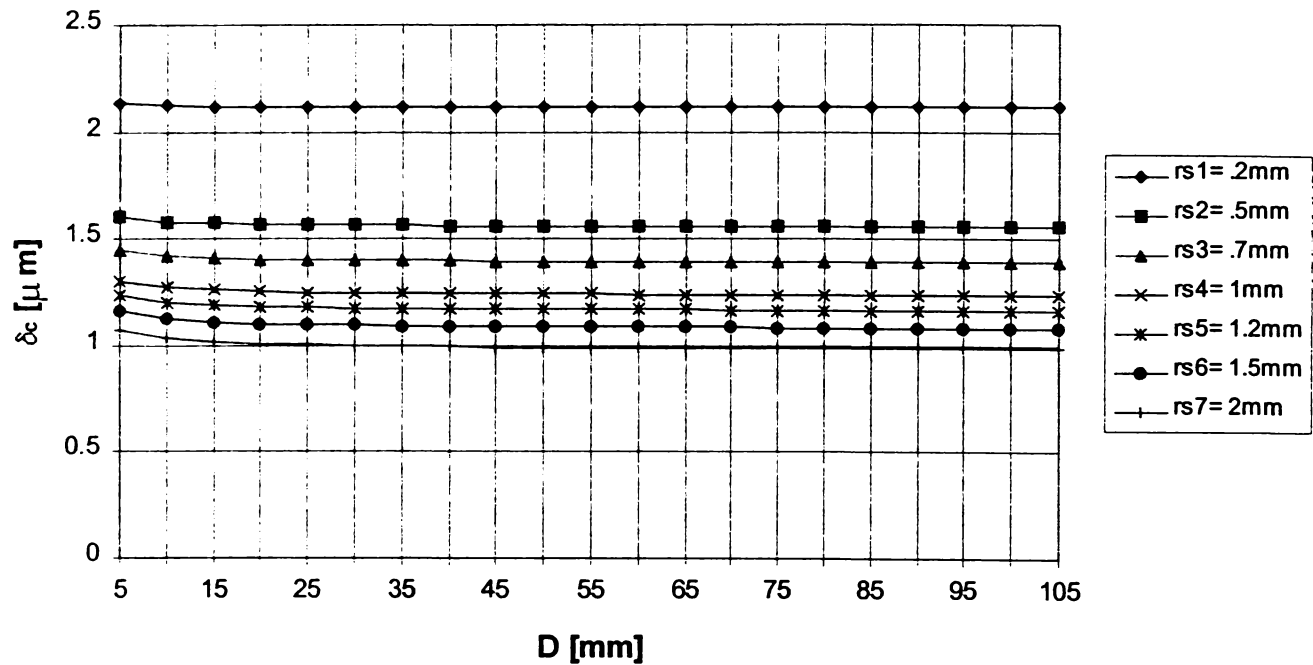


Figura A1.9 Eroarea datorată deformațiilor de contact, la măsurarea suprafețelor cilindrice exterioare cu palpatoare sferice, pentru forța de măsurare $P = 1 \text{ N}$

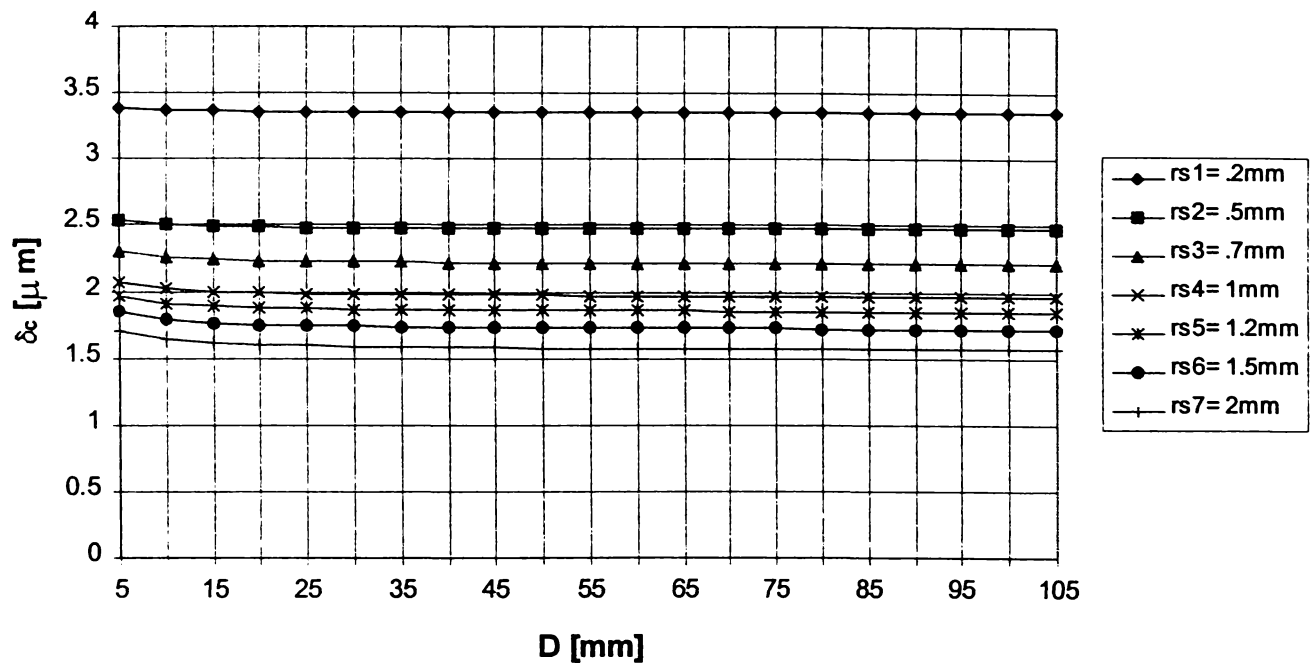


Figura A1.10 Eroarea datorată deformațiilor de contact, la măsurarea suprafețelor cilindrice exterioare cu palpatoare sferice, pentru forța de măsurare $P = 2 \text{ N}$

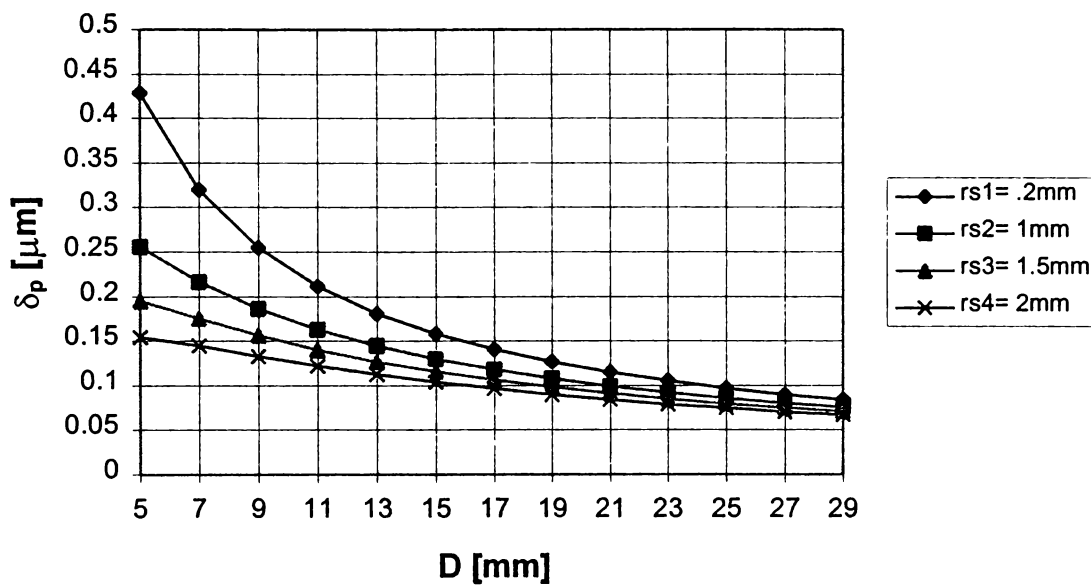


Figura A1.11 Eroarea de deplasare a axei de captare la palparea exterioară ($e = 0,05$ mm)

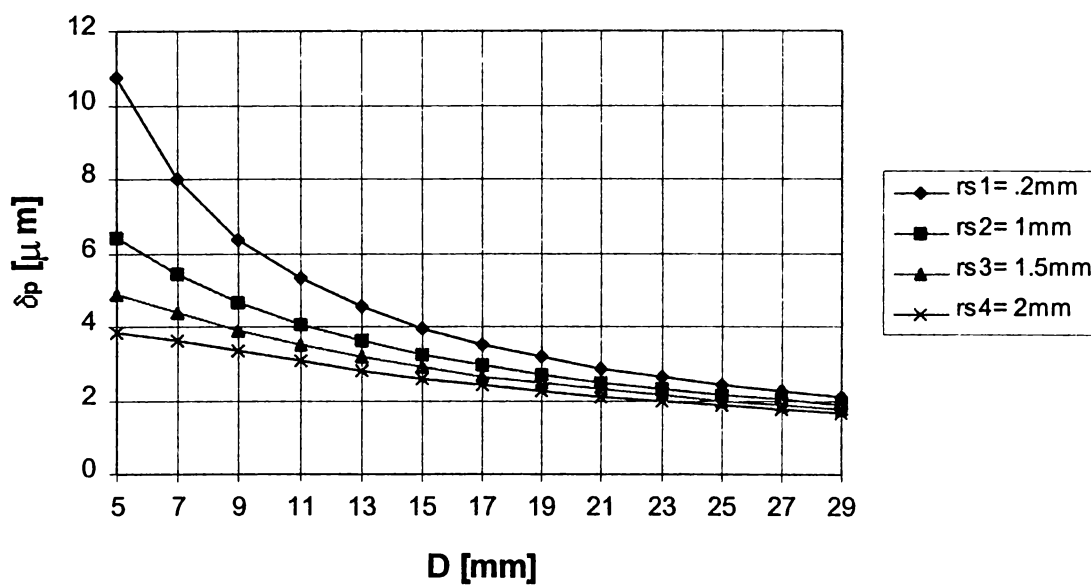


Figura A1.12 Eroarea de deplasare a axei de captare la palparea exterioară ($e = 0,25$ mm)

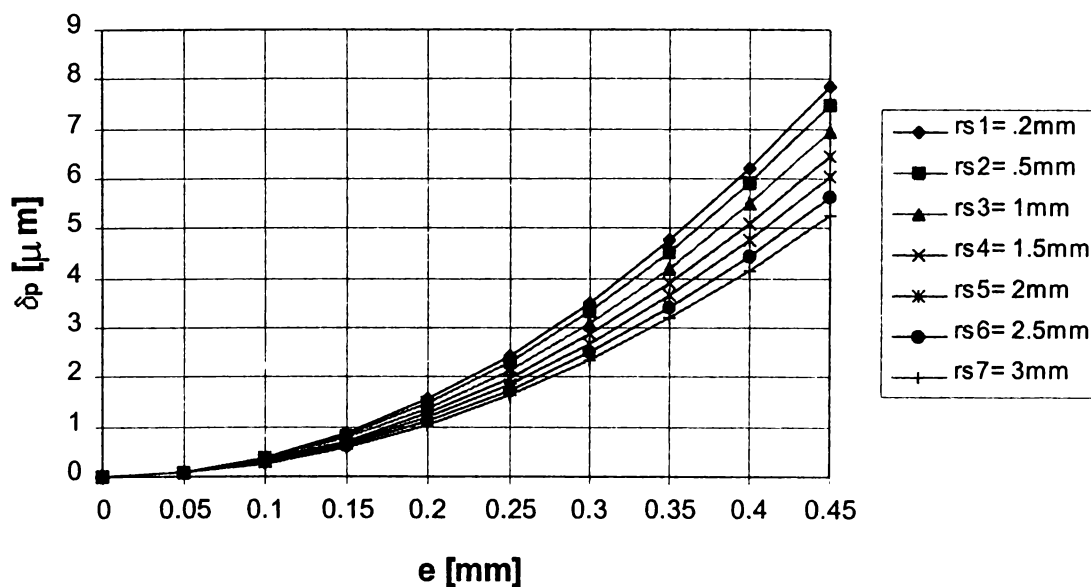


Figura A1.13 Eroarea de deplasare a axei de captare la palparea exterioară ($D = 25$ mm)

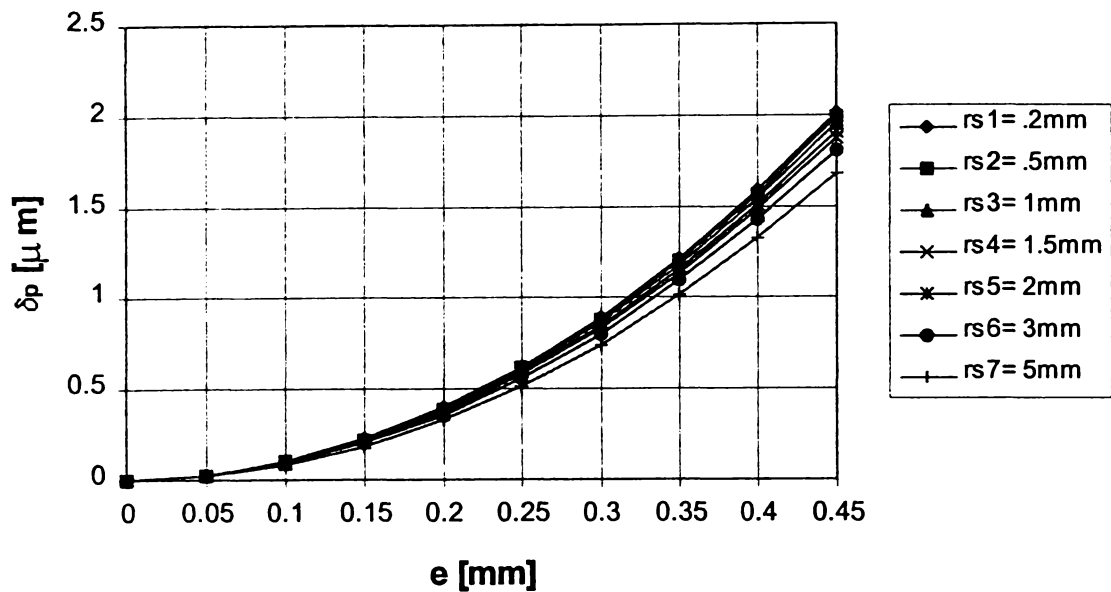


Figura A1.14 Eroarea de deplasare a axei de captare la palparea exterioară ($D = 100$ mm)

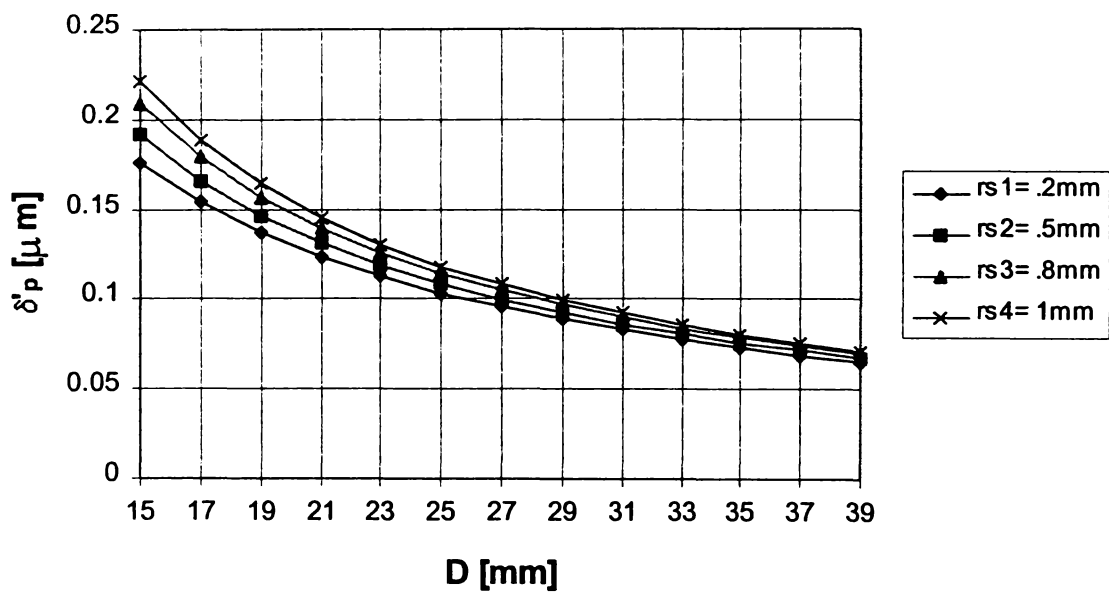


Figura A1.15 Eroarea de deplasare a axei de captare la palparea interioară ($e = 0,05$ mm)

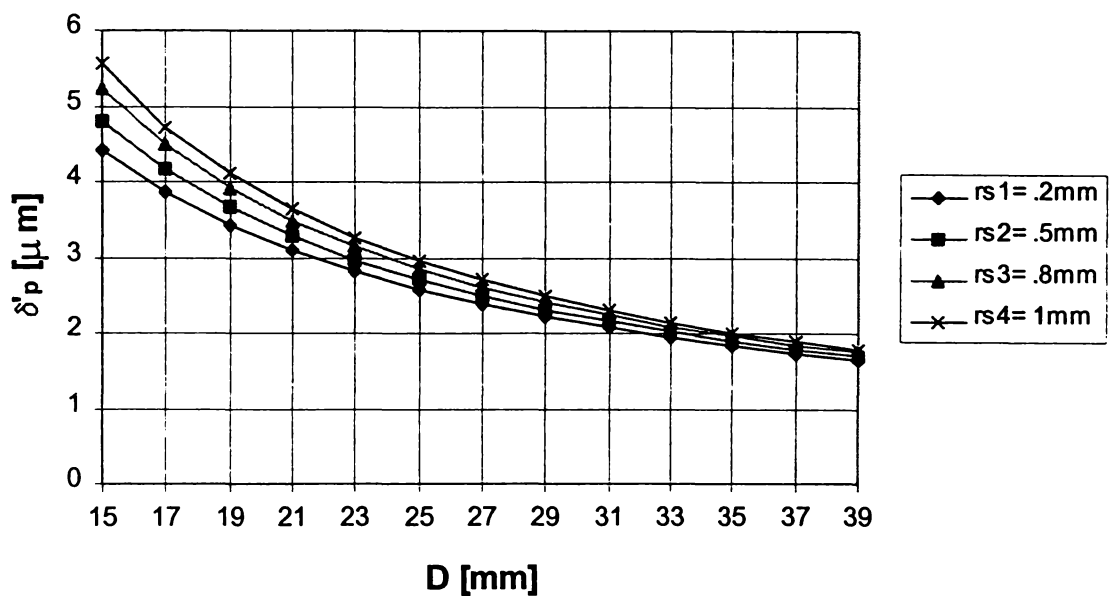


Figura A1.16 Eroarea de deplasare a axei de captare la palparea interioară ($e = 0,25$ mm)

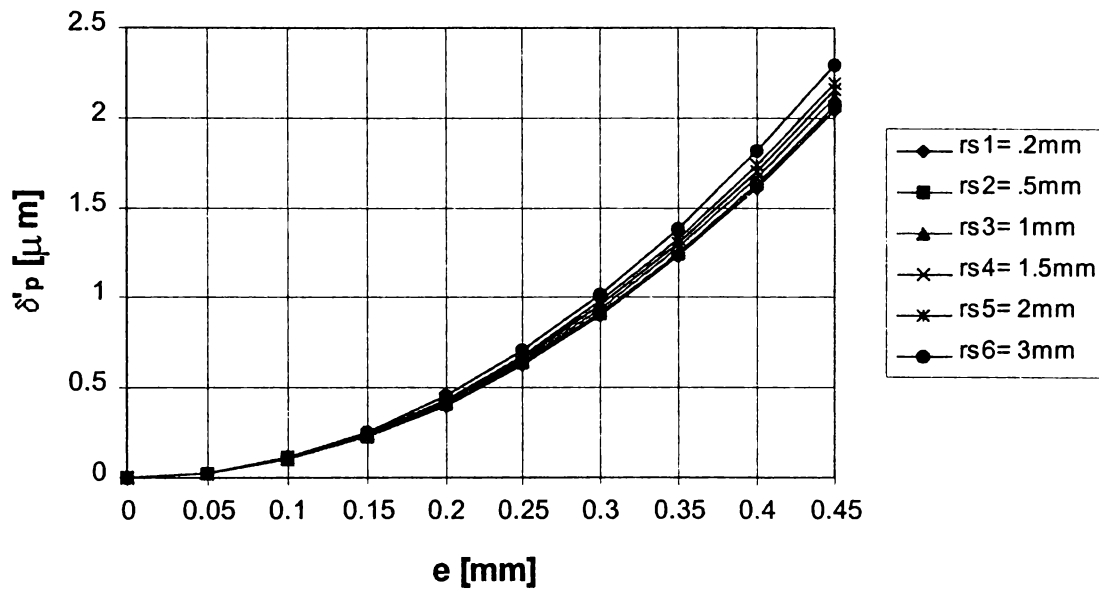


Figura A1.17 Eroarea de deplasare a axei de captare la palparea interioară (D = 100 mm)

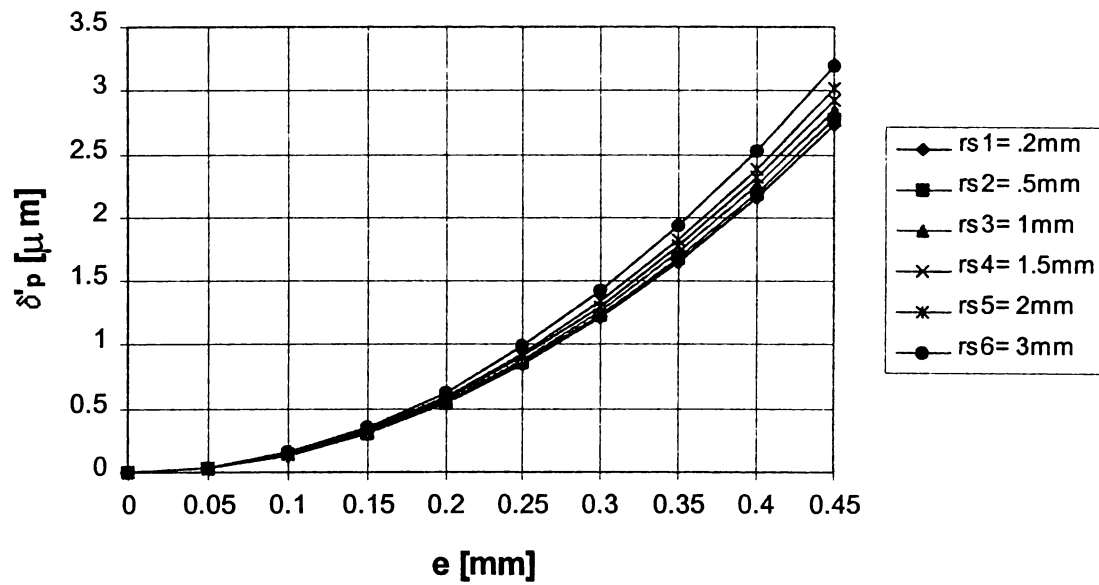


Figura A1.18 Eroarea de deplasare a axei de captare la palparea interioară (D = 75 mm)

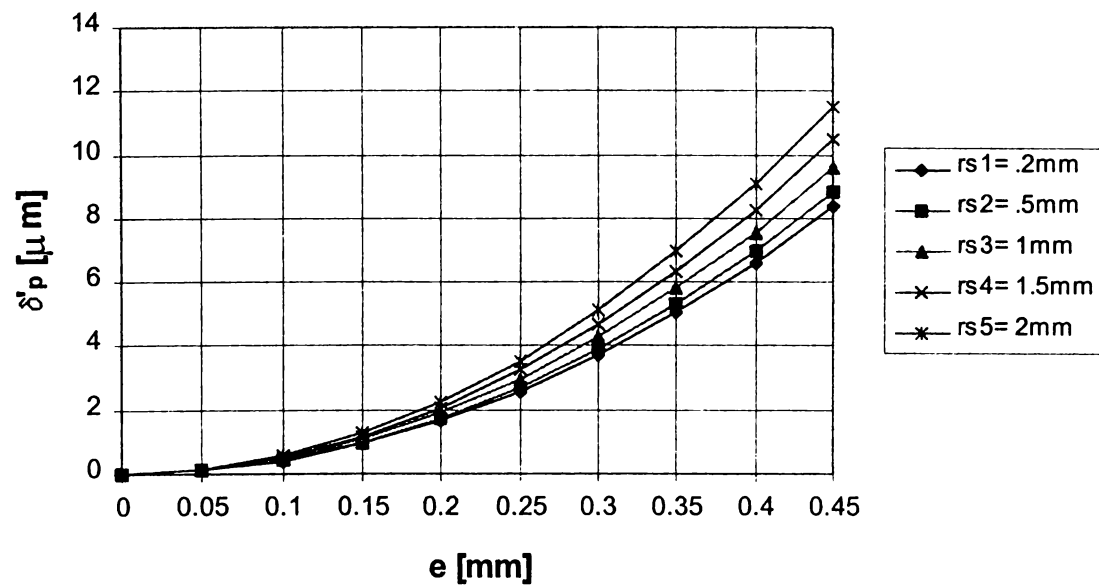


Figura A1.19 Eroarea de deplasare a axei de captare la palparea interioară (D = 25 mm)

A1.3 Comparația erorilor datorate deplasării axei de captare la măsurarea cu și fără contact

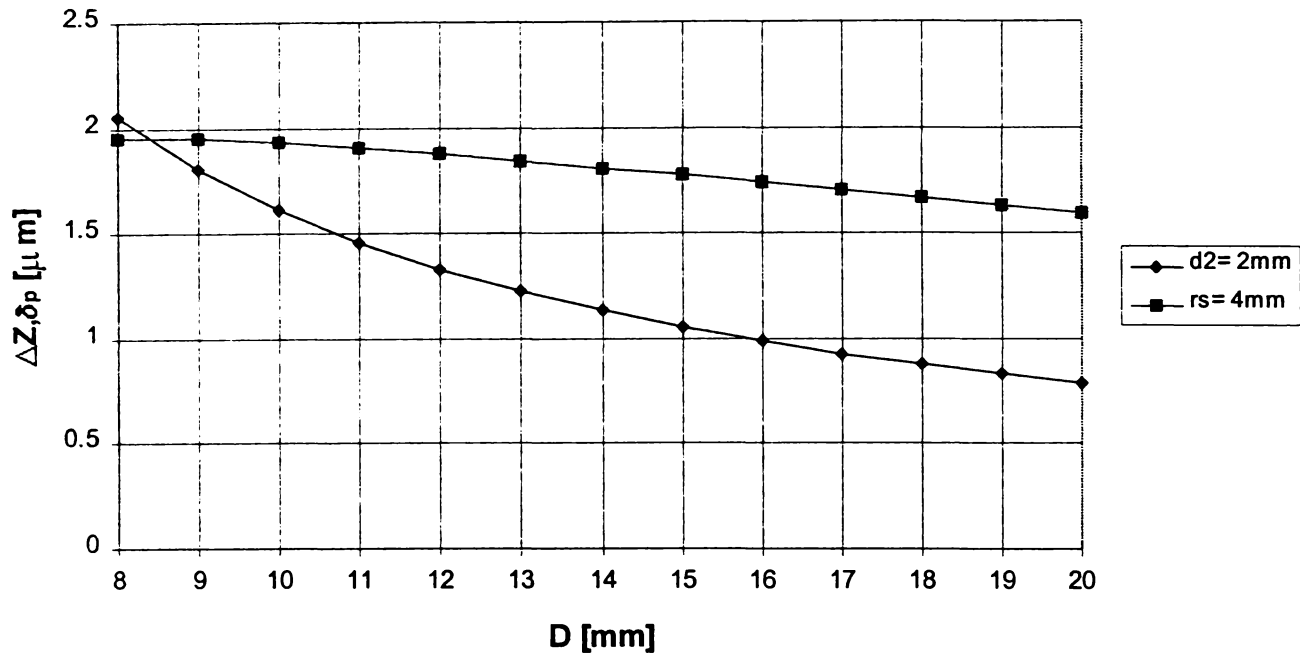


Figura A1.20 Comparație între erorile de deplasare a axei la măsurarea cu și fără contact pentru $e = 0,25 \text{ mm}$, $d_2 = 2 \text{ mm}$, $r_s = 4 \text{ mm}$

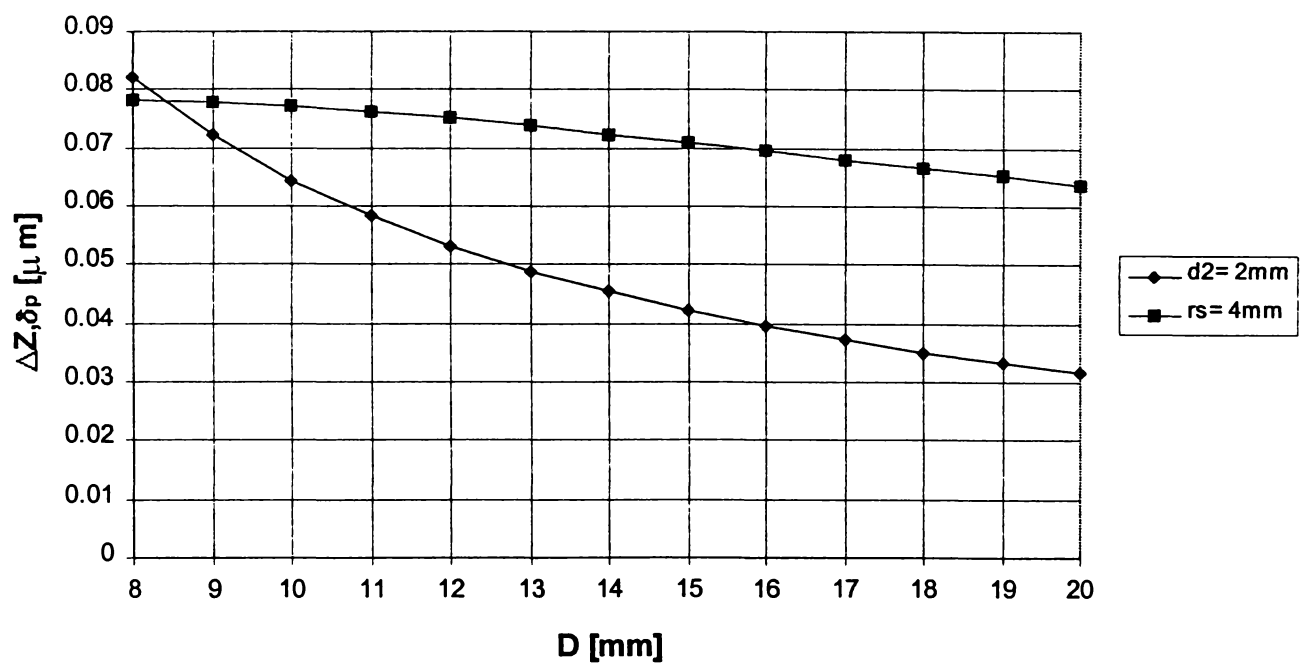


Figura A1.21 Comparație între erorile de deplasare a axei la măsurarea cu și fără contact pentru $e = 0,05 \text{ mm}$, $d_2 = 2 \text{ mm}$, $r_s = 4 \text{ mm}$

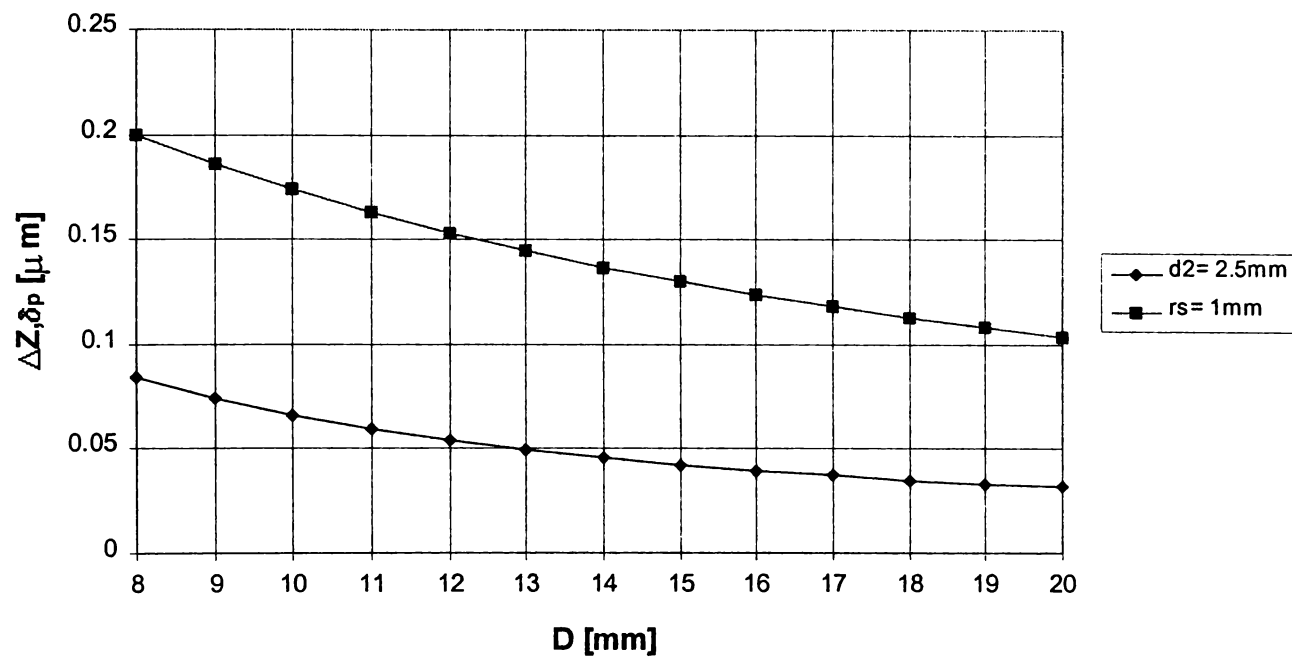


Figura A1.22 Comparație între erorile de deplasare a axei la măsurarea cu și fără contact pentru $e = 0,05 mm$, $d_2 = 2,5 mm$, $r_s = 1 mm$

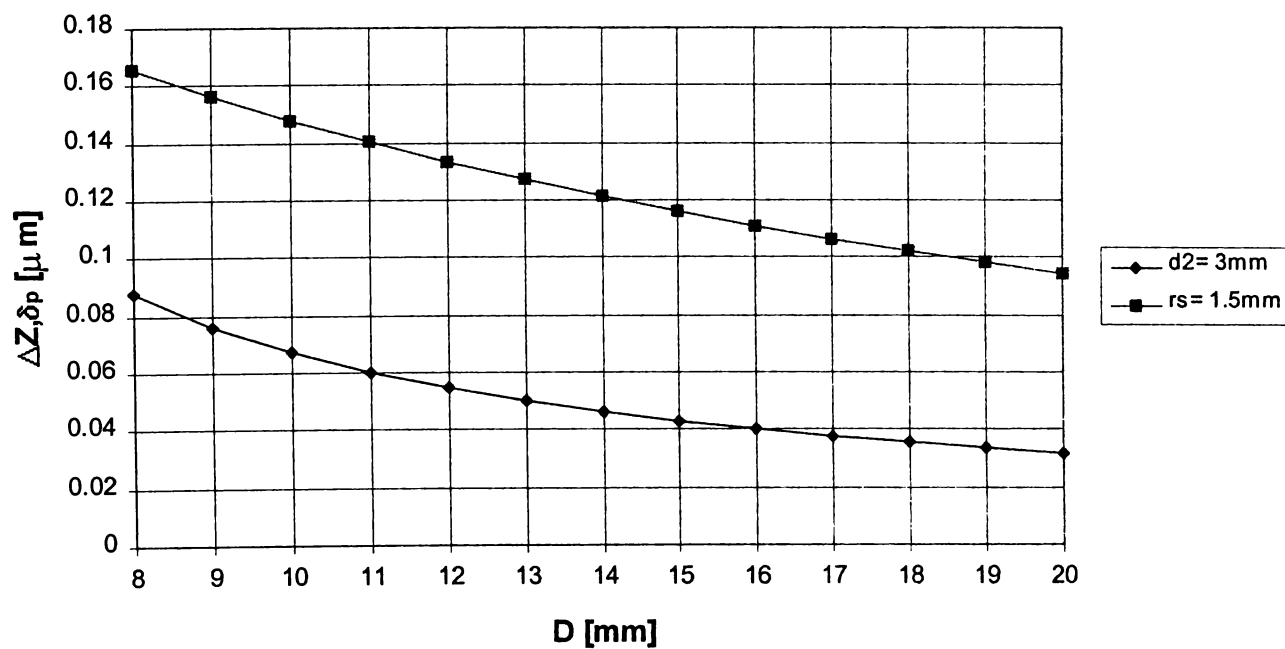


Figura A1.23 Comparație între erorile de deplasare a axei la măsurarea cu și fără contact pentru $e = 0,05 mm$, $d_2 = 3 mm$, $r_s = 1,5 mm$

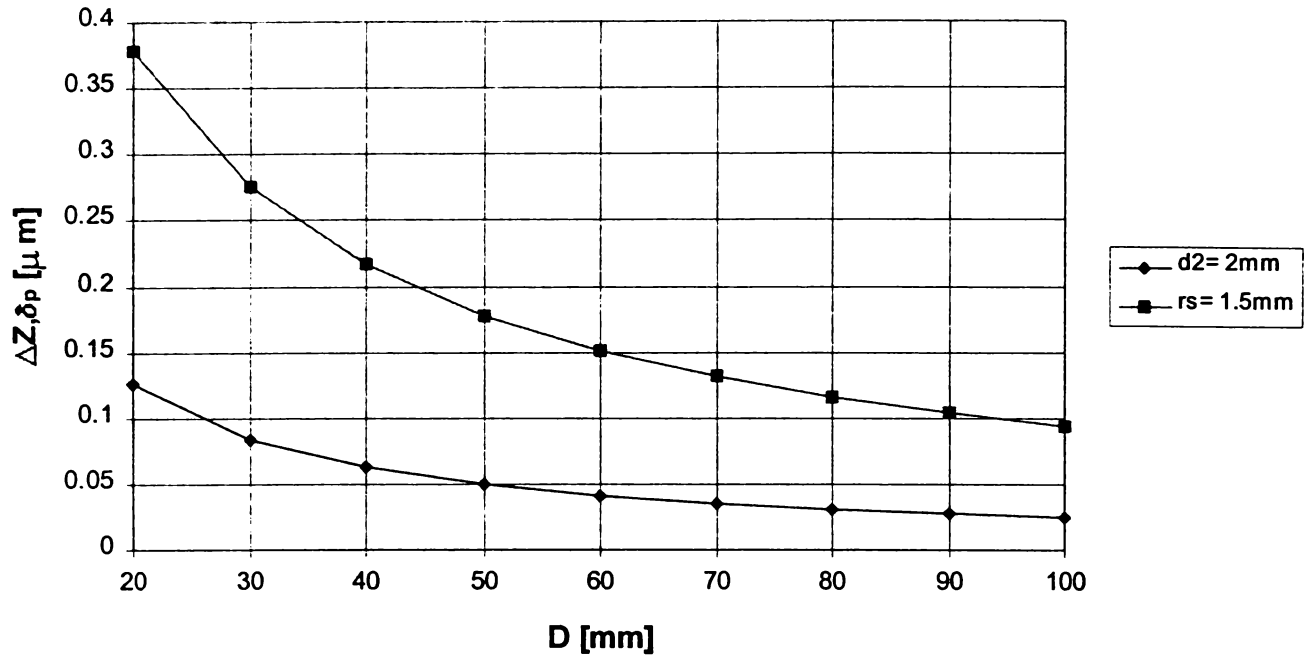


Figura A1.24 Comparație între erorile de deplasare a axei la măsurarea cu și fără contact pentru $e = 0,1$ mm, $d_2 = 2$ mm, $r_s = 1,5$ mm

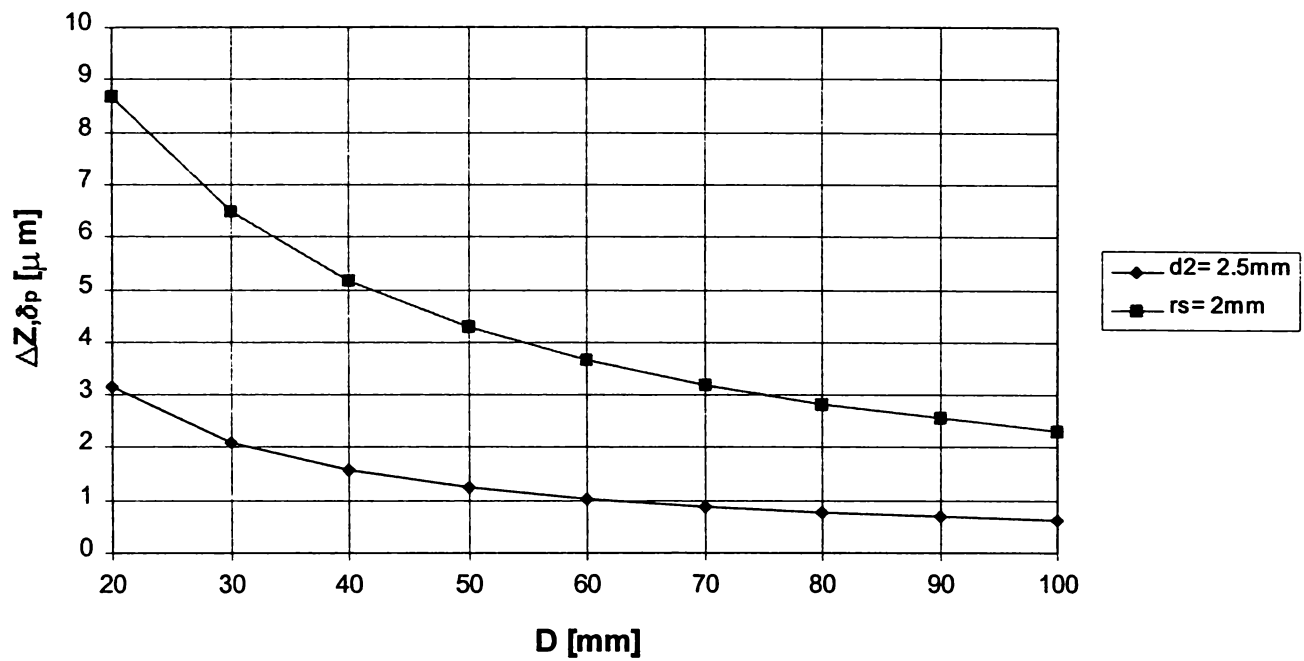


Figura A1.25 Comparație între erorile de deplasare a axei la măsurarea cu și fără contact pentru $e = 0,5$ mm, $d_2 = 2,5$ mm, $r_s = 2$ mm

ANEXA 2

PROGRAM–SURSĂ DE EVALUARE A ERORILOR DE MĂSURARE SPECIFICE SISTEMELOR PNEUMATICE DE CONTROL ACTIV

‘Meniu principal

```
Private Sub Comparatie_Click()  
Compara.Show  
End Sub
```

```
Private Sub Cu_contact_Click()  
Cu.Show  
End Sub
```

```
Private Sub fara_contact_Click()  
fara.Show  
End Sub
```

‘Meniu control fără contact

```
Private Sub Curbura_Click()  
curbura_suprafata.Show  
End Sub
```

```
Private Sub curbura1_Click()  
curbura_relativa.Show  
End Sub
```

```
Private Sub deplasare_Click()  
Deplasarii_axei.Show  
End Sub
```

```
Private Sub deplasare1_Click()  
deplasarii_axei1.Show  
End Sub
```

```
Private Sub totala_Click()  
Cumulata_influenta.Show  
End Sub
```

```
Private Sub totala1_Click()  
totala_relativa.Show  
End Sub
```

‘Meniu control cu contact

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
pozitionare_axa_int.Show  
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()  
pozitionare_axa1_int.Show  
End Sub
```

```
Private Sub contact_Click()  
deformare_contact.Show  
End Sub
```

```
Private Sub contact1_Click()  
contact_relativa.Show  
End Sub
```

```
Private Sub deplasare_Click()  
pozitionare_axa.Show  
End Sub
```

```
Private Sub deplasare1_Click()  
pozitionare_axa1.Show  
End Sub
```

‘Eroare de curbură

```
Const MAX = 2.5  
' numărul de ordine al parametrului  
Dim lev As Integer
```

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
If verificare() Then  
    citeste  
    grafic  
    curbura_suprafata.Hide  
    fara.Hide  
    meniu.Hide  
End If  
End Sub
```

```
Private Sub calcul(dd As Double)  
    ' integrala se calculează cu formula  
    trapezelor  
    Const pi = 3.141592653  
    ' n este numărul de diviziuni în care se  
    împarte intervalul  
    Const n = 100  
    Dim D As Double  
    ' valoarea abscisei (0..pi/2)  
    Dim x As Double  
    Dim s As Double  
    ' baza mică
```

```

Dim bmi As Double
    ' baza mare
Dim bma As Double
    ' variabila ajutătoare(calculul efectiv al
    lui DZ)
Dim a As Double
Dim sir As String
    ' înălțimea trapezelor
Dim h As Double
h = pi / (2 * n)
D = Dst.Text
i = 2
    ' atât timp cât D este mai mic decât D
    final
While D <= Dsf.Text
    s = 0
    x = 0
    For j = 0 To n - 1
        ' se calculează baza mică
        bmi = Sqr(1 - dd * dd * Sin(x) *
Sin(x) / (D * D))
        x = x + h
        ' se calculează baza mare
        bma = Sqr(1 - dd * dd * Sin(x) *
Sin(x) / (D * D))
        ' se calculează integrala
        s = s + (bmi + bma) * h / 2
    Next j
        ' se calculează DZ (în
micrometri)
a = pi / 2 - s
a = a * D / pi
a = a * 1000
Sheets("influenta curburii
suprafetei").Cells(i, 1) = D
    ' datele se scriu in celulele
corespunzătoare
Sheets("influenta curburii
suprafetei").Cells(i, lev) = a
    ' D se incrementează cu pasul
D = D + Dpas.Text
i = i + 1
Wend
sir = "d"
sir = sir + Right(Str(2), 1)
sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
sir = sir + "="
sir = sir + Str(dd)
sir = sir + "mm"
Sheets("influenta curburii
suprafetei").Cells(1, lev) = sir
Sheets("influenta curburii
suprafetei").Cells(1, lev).Characters(2,
2).Font.Subscript = True
End Sub

Public Sub grafic()
    'variabila va conține domeniul valid al
    datelor din tabel
Dim sir As String
    ' nr de valori
Dim k As Integer
k = Int((Dsf.Text - Dst.Text) / Dpas.Text) + 2
sir = "a1:"
sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)
sir = sir + LTrim(Str(k))
    'ch graficul care se va crea din cod
Dim ch As ChartObject
Sheets("influenta curburii suprafetei").Activate
    ' se șterg toate graficele existente
Sheets("influenta curburii
suprafetei").ChartObjects.Delete
Set ch = Worksheets("influenta curburii
suprafetei").ChartObjects.Add(25, 20, 480,
240)
    ' se apelează ChartWizard pentru
crearea graficului
ch.Chart.ChartWizard _
Source:=Worksheets("influenta curburii
suprafetei").Range(sir), Gallery:=xlLine, _
Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1
ch.Chart.PlotArea.Interior.Color = RGB(255,
255, 255)
ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle =
xlLineStyleNone
ch.Chart.Legend.Font.Size = 9
ch.Activate
With ActiveChart
    .HasTitle = False
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.NumberFormat = "General"
    .HasTitle = True
With .AxisTitle
        .Font.Name = "arial"
        .Font.Size = 12
        .Caption = "DZ1 [mm]"
        .Characters(3, 1).Font.Subscript = True
        .Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
        .Characters(6, 1).Font.Name = "symbol"
        .Characters(6, 1).Font.Size = 14
    End With
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .HasMajorGridlines = True

```



```

Private Sub CommandButton1_Click()
  If verificare() Then
    citeste
    grafic
    curbura_relativa.Hide
    fara.Hide
    meniu.Hide
  End If
End Sub

Private Sub calcul(dd As Double)
  ' Integrala se calculează cu formula
  trapezelor
  Const pi = 3.141592653
  ' n este numărul de diviziuni in care se
  împarte intervalul
  Const n = 100
  Dim D As Double
  ' valoarea abscisei (0..pi/2)
  Dim x As Double
  Dim s As Double
  ' baza mică
  Dim bmi As Double
  ' baza mare
  Dim bma As Double
  ' variabila ajutătoare (calculul efectiv
  al lui DZ)
  Dim a As Double
  Dim sir As String
  ' înălțimea trapezelor
  Dim h As Double
  Dim vmax As Double
  h = pi / (2 * n)
  D = Dst.Text
  i = 2
  While D <= Dsf.Text
    s = 0
    x = 0
    For j = 0 To n - 1
      ' se calculează baza mică
      bmi = Sqr(1 - dd * dd * Sin(x) *
Sin(x) / (D * D))
      x = x + h
      ' se calculează baza mare
      bma = Sqr(1 - dd * dd * Sin(x) *
Sin(x) / (D * D))
      ' se calculează integrala
      s = s + (bmi + bma) * h / 2
    Next j
    ' se calculează DZ(în micrometri)
    a = pi / 2 - s
    a = a * D / pi
    a = a * 1000
    If i = 2 Then
      vmax = a

```

```

      End If
      Sheets("eroare relativa
(curbura)").Cells(i, 1) = D
      ' datele se scriu în celulele
      corespunzătoare
      Sheets("eroare relativa
(curbura)").Cells(i, lev) = vmax - a
      ' D se incrementează cu pasul
      D = D + Dpas.Text
      i = i + 1
    Wend
    sir = "d"
    sir = sir + Right(Str(2), 1)
    sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
    sir = sir + "="
    sir = sir + Str(dd)
    sir = sir + "mm"
    Sheets("eroare relativa (curbura)").Cells(1,
lev) = sir
    Sheets("eroare relativa (curbura)").Cells(1,
lev).Characters(2, 2).Font.Subscript = True
  End Sub

Public Sub grafic()
  'variabila va conține domeniul valid al
  datelor din tabel
  Dim sir As String
  ' nr de valori
  Dim k As Integer
  k = Int((Dsf.Text - Dst.Text) / Dpas.Text) + 2
  sir = "a1:"
  sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)
  sir = sir + LTrim(Str(k))
  'ch graficul care se va crea din cod
  Dim ch As ChartObject
  Sheets("eroare relativa (curbura)").Activate
  ' se șterg toate graficele existente
  Sheets("eroare relativa
(curbura)").ChartObjects.Delete
  Set ch = Worksheets("eroare relativa
(curbura)").ChartObjects.Add(25, 20, 410,
220)
  ' Se apelează ChartWizard pentru
  crearea graficului
  ch.Chart.ChartWizard _
Source:=Worksheets("eroare relativa
(curbura)").Range(sir), Gallery:=xlLine, _
Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1
ch.Chart.PlotArea.Interior.Color = RGB(255,
255, 255)
ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle =
xlLineStyleNone
ch.Chart.Legend.Font.Size = 8

```

```

ch.Activate
With ActiveChart
.HasTitle = False
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlValue)
.HasMajorGridlines = True
.TickLabels.Font.Size = 8
.TickLabels.NumberFormat = "General"
.HasTitle = True
With .AxisTitle
.Font.Name = "arial"
.Font.Size = 11
.Caption = "DZ1E [mm]"
.Characters(3, 2).Font.Subscript = True
.Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
.Characters(7, 1).Font.Name = "symbol"
.Characters(7, 1).Font.Bold = True
.Characters(7, 1).Font.Size = 14

End With
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
.HasMajorGridlines = True
.TickLabels.Font.Size = 8
.TickLabels.Orientation = 0
.HasTitle = True
With .AxisTitle
.Caption = "D [mm]"
.Font.Size = 11
End With
End With
End Sub

Public Sub citeste()
Sheets("eroare relativa
(urbura)").Cells.ClearContents
lev = 1
If d1.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d1.Text)
End If
If d2.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d2.Text)
End If
If d3.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d3.Text)
End If
If d4.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d4.Text)
End If
If d5.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d5.Text)
End If
If d6.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d6.Text)
End If
If d7.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d7.Text)
End If
End Sub

Public Function verificare() As Boolean
'Verifică datele de intrare (daca sunt
introduse corect)
Dim sir As String
Dim m As Double
' Avem introdus cel puțin un d?
If d1.Text = "" And d2.Text = "" And d3.Text
= "" And _
d4.Text = "" And d5.Text = "" And d6.Text
= "" And d7.Text = "" Then
MsgBox ("Trebuie introdusa cel puțin o
valoare pentru d ")
verificare = False
Exit Function
End If
' Am introdus D initial?
If Dst.Text = "" Then
MsgBox ("introduceti valoarea lui D
initial")
Dst.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
' Am introdus D final?
If Dsf.Text = "" Then
MsgBox ("introduceti valoarea lui D final")
Dsf.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
' D inițial este mai mic decât D final?
If val(Dst.Text) > val(Dsf.Text) Then
MsgBox (" Valoarea lui D initial trebuie sa
fie mai mica decat cea a lui D final")
Dst.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
' Am introdus pasul lui D?
If Dpas.Text = "" Then
MsgBox ("Introduceti valoarea pentru pasul
lui D")
Dpas.SetFocus

```

```

verificare = False
Exit Function
End If
m = Dst.Text - MAX
' Valorile lui D sunt mai mici decat D initial -
MAX
If val(d1.Text) > m Or val(d2.Text) > m Or
val(d3.Text) > m Or _
val(d4.Text) > m Or val(d5.Text) > m Or _
val(d6.Text) > m Or val(d7.Text) > m Then
sir = "Valorile lui d trebuie sa fie mai mici
decat"
sir = sir + Str(m)
MsgBox sir
verificare = False
Exit Function
End If
verificare = True
End Function

```

'Eroarea cumulată

```

Const MAX = 2.5
' numărul de ordine al parametrului
Dim lev As Integer
Private Sub CommandButton1_Click()
' If Dst.Text <> "" And Dsf <> "" And
Dpas.Text <> "" And e1 <> "" Then
If verificare() Then
citeste
grafic
Cumulata_influenta.Hide
fara.Hide
menuu.Hide
End If
End Sub
Private Sub calcul(dd As Double)
' integrala se calculează cu formula
trapezelor
Const pi = 3.141592653
' n este numărul de diviziuni in care se
împarte intervalul
Const n = 100
Dim D As Double
Dim i As Integer
' valoarea abscisei (0..2*pi)
Dim x As Double
' valoarea integralei
Dim s As Double
Dim e As Double
' baza mică
Dim bmi As Double
' baza mare
Dim bma As Double

```

```

' variabila ajutoare (calculul efectiv
al lui DZ)
Dim a As Double
Dim sir As String
' înălțimea trapezelor
Dim h As Double
h = 2 * pi / n
e = e1.Text
D = Dst.Text
i = 2
' atât timp cât D este mai mic decât D
final
While D <= Dsf.Text
s = 0
x = 0
For j = 0 To n - 1
' se calculează baza mică
bmi = Sqr(1 - (e + dd * Sin(x)) * (e +
dd * Sin(x)) / (D * D))
x = x + h
' se calculează baza mare
bma = Sqr(1 - (e + dd * Sin(x)) * (e +
dd * Sin(x)) / (D * D))
' se calculează integrala
s = s + (bmi + bma) * h / 2
Next j
' se calculează DZ (în micrometri)
a = 2 * pi - s
a = a * D / (4 * pi)
a = a * 1000
Sheets("influenta cumulata").Cells(i, 1) =
D
' datele se scriu in celulele
corespunzătoare
Sheets("influenta cumulata").Cells(i, lev)
= a
' D se incrementează cu pasul
D = D + Dpas.Text
i = i + 1
Wend
sir = "d"
sir = sir + Right(Str(2), 1)
sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
sir = sir + "="
sir = sir + Str(dd)
sir = sir + "mm"
Sheets("influenta cumulata").Cells(1, lev) =
sir
Sheets("influenta cumulata").Cells(1,
lev).Characters(2, 2).Font.Subscript = True
End Sub
Public Sub grafic()
' variabila va conține domeniul valid al
datelor din tabel

```

```

Dim sir As String
    ' nr de valori
Dim k As Integer
k = Int((Dsf.Text - Dst.Text) / Dpas.Text) + 2
sir = "a1:"
sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)
sir = sir + LTrim(Str(k))
    'ch graficul care se va crea din cod
Dim ch As ChartObject
Sheets("influenta cumulata").Activate
    ' se șterg toate graficele existente
Sheets("influenta
cumulata").ChartObjects.Delete
    ' se apelează ChartWizard pentru
crearea graficului
Set ch = Worksheets("influenta
cumulata").ChartObjects.Add(25, 20, 520,
280)
ch.Chart.ChartWizard _
Source:=Worksheets("influenta
cumulata").Range(sir), Gallery:=xlLine, _
Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1
ch.Chart.PlotArea.Interior.Color = RGB(255,
255, 255)
ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle =
xlLineStyleNone
ch.Chart.Legend.Font.Size = 9
ch.Activate
With ActiveChart
    .HasTitle = False
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.NumberFormat = "General"
    .HasTitle = True
    With .AxisTitle
        .Font.Name = "arial"
        .Font.Size = 12
        .Caption = "DZ2 [mm]"
        .Characters(3, 1).Font.Subscript = True
        .Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
        .Characters(6, 1).Font.Name = "symbol"
        .Characters(6, 1).Font.Size = 14
    End With
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.Orientation = 0
    .HasTitle = True
    With .AxisTitle
        .Caption = "D [mm]"
        .Font.Size = 12
    End With
End With
End Sub

Public Sub citeste()
    Sheets("influenta
cumulata").Cells.ClearContents
    lev = 1
    If d1.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d1.Text)
    End If
    If d2.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d2.Text)
    End If
    If d3.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d3.Text)
    End If
    If d4.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d4.Text)
    End If
    If d5.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d5.Text)
    End If
    If d6.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d6.Text)
    End If
    If d7.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d7.Text)
    End If
End Sub

Public Function verificare() As Boolean
    'verifică datele de intrare (daca sunt
introduse corect)
Dim sir As String
Dim m As Double
    ' Avem introdus cel puțin un d?
If d1.Text = "" And d2.Text = "" And d3.Text
= "" And _
d4.Text = "" And d5.Text = "" And d6.Text
= "" And d7.Text = "" Then
    MsgBox ("Trebuie introdusa cel puțin o
valoare pentru d ")
    verificare = False
Exit Function

```

```

End If
    ' Am introdus e?
If e1.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui e")
    e1.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
    ' Am introdus D initial?
If Dst.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui D
initial")
    Dst.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
    ' Am introdus D final?
If Dsf.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui D final")
    Dsf.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
    ' D inițial este mai mic decât D final?
If val(Dst.Text) > val(Dsf.Text) Then
    MsgBox (" Valoarea lui D initial trebuie sa
fie mai mica decat cea a lui D final")
    Dst.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
    ' Am introdus pasul lui D?
If Dpas.Text = "" Then
    MsgBox ("Introduceti valoarea pentru pasul
lui D")
    Dpas.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
m = Dst.Text - MAX
    ' Valorile lui D sunt mai mici decât D
inițial - MAX
If val(d1.Text) > m Or val(d2.Text) > m Or
val(d3.Text) > m Or _
val(d4.Text) > m Or val(d5.Text) > m Or _
val(d6.Text) > m Or val(d7.Text) > m Then
    sir = "Valorile lui d trebuie sa fie mai mici
decat"
    sir = sir + Str(m)
    MsgBox sir
    verificare = False
    Exit Function
End If
verificare = True
End Function

```

```

'Eroarea de deplasare a axei f(D)
Const MAX = 2.5
Dim lev As Integer
Private Sub CommandButton1_Click()
    If verificare() Then
        citeste
        grafic
        Deplasarii_axei.Hide
        fara.Hide
        meniu.Hide
    End If
End Sub
Private Sub calcul(dd As Double)
    Const pi = 3.141592653
    Const n = 100
    Dim D As Double
    Dim i As Integer
        ' valoarea abscisei (0..2*pi)
    Dim x As Double
    Dim s1 As Double
    Dim s2 As Double
    Dim e As Double
        ' baza mică
    Dim bmi1 As Double
    Dim bmi2 As Double
        ' baza mare
    Dim bma1 As Double
    Dim bma2 As Double
        ' variabila ajutătoare (calculul efectiv
al lui DZ)
    Dim a1 As Double
    Dim a2 As Double
    Dim sir As String
    ' inaltimea trapezelor
    Dim h As Double
    h = 2 * pi / n
    e = e1.Text
    D = Dst.Text
    i = 2
    While D <= Dsf.Text
        s1 = 0
        s2 = 0
        x = 0
        For j = 0 To n - 1
            ' se calculează baza mică
            bmi1 = Sqr(1 - (e + dd * Sin(x)) * (e +
dd * Sin(x)) / (D * D))
            bmi2 = Sqr(1 - dd * dd * Sin(x) *
Sin(x) / (D * D))
            x = x + h
            ' se calculează baza mare
            bma1 = Sqr(1 - (e + dd * Sin(x)) * (e
+ dd * Sin(x)) / (D * D))
            bma2 = Sqr(1 - dd * dd * Sin(x) *
Sin(x) / (D * D))

```

```

' se calculează integrala
  s1 = s1 + (bmi1 + bma1) * h / 2
  s2 = s2 + (bmi2 + bma2) * h / 2
Next j
  ' se calculează DZ (în micrometri)
  a1 = 2 * pi - s1
  a1 = a1 * D / (4 * pi)
  a1 = a1 * 1000
  a2 = 2 * pi - s2
  a2 = a2 * D / (4 * pi)
  a2 = a2 * 1000
  Sheets("influenta deplasarii axei
f(D)").Cells(i, 1) = D
  Sheets("influenta deplasarii axei
f(D)").Cells(i, lev) = a1 - a2
  D = D + Dpas.Text
  i = i + 1
Wend
sir = "d"
sir = sir + Right(Str(2), 1)
sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
sir = sir + "="
sir = sir + Str(dd)
sir = sir + "mm"
Sheets("influenta deplasarii axei
f(D)").Cells(1, lev) = sir
  Sheets("influenta deplasarii axei
f(D)").Cells(1, lev).Characters(2,
2).Font.Subscript = True
End Sub
Public Sub grafic()
Dim sir As String
' Nr de valori
Dim k As Integer
k = Int((Dsf.Text - Dst.Text) / Dpas.Text) + 2
sir = "a1:"
sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)
sir = sir + LTrim(Str(k))
Dim ch As ChartObject
Sheets("influenta deplasarii axei
f(D)").Activate
Sheets("influenta deplasarii axei
f(D)").ChartObjects.Delete
Set ch = Worksheets("influenta deplasarii axei
f(D)").ChartObjects.Add(25, 20, 410, 220)
ch.Chart.ChartWizard _
Source:=Worksheets("influenta deplasarii axei
f(D)").Range(sir), Gallery:=xlLine, _
Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1
ch.Chart.PlotArea.Interior.Color = RGB(255,
255, 255)
ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle =
xlLineStyleNone
ch.Chart.Legend.Font.Size = 8
ch.Activate
With ActiveChart
.HasTitle = False
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlValue)
.HasMajorGridlines = True
.TickLabels.Font.Size = 8
.TickLabels.NumberFormat = "General"
.HasTitle = True
With .AxisTitle
.Font.Name = "arial"
.Font.Size = 11
.Caption = "DZ [mm]"
.Characters(3, 1).Font.Subscript = True
.Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
.Characters(5, 1).Font.Name = "symbol"
.Characters(5, 1).Font.Size = 14
End With
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
.HasMajorGridlines = True
.TickLabels.Font.Size = 10
.TickLabels.Orientation = 0
.HasTitle = True
With .AxisTitle
.Caption = "D [mm]"
.Font.Size = 12
End With
End With
End Sub
Public Sub citeste()
Sheets("influenta deplasarii axei
f(D)").Cells.ClearContents
lev = 1
If d1.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d1.Text)
End If
If d2.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d2.Text)
End If
If d3.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d3.Text)
End If
If d4.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d4.Text)
End If
If d5.Text <> "" Then

```

```

    lev = lev + 1
    calcul (d5.Text)
End If
If d6.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d6.Text)
End If
If d7.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d7.Text)
End If
End Sub

Public Function verificare() As Boolean
Dim sir As String
Dim m As Double
If d1.Text = "" And d2.Text = "" And d3.Text = "" And _
d4.Text = "" And d5.Text = "" And d6.Text = "" And d7.Text = "" Then
    MsgBox ("Trebuie introdusa cel puțin o valoare pentru d ")
    verificare = False
    Exit Function
End If
' Am introdus e?
If e1.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui e")
    e1.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
' Am introdus D initial?
If Dst.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui D initial")
    Dst.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Dsf.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui D final")
    Dsf.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If val(Dst.Text) > val(Dsf.Text) Then
    MsgBox (" Valoarea lui D initial trebuie sa fie mai mica decat cea a lui D final")
    Dst.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Dpas.Text = "" Then

```

```

    MsgBox ("Introduceti valoarea pentru pasul lui D")
    Dpas.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
m = Dst.Text - MAX
If val(d1.Text) > m Or val(d2.Text) > m Or val(d3.Text) > m Or _
val(d4.Text) > m Or val(d5.Text) > m Or _
val(d6.Text) > m Or val(d7.Text) > m Then
    sir = "Valorile lui d trebuie sa fie mai mici decat"
    sir = sir + Str(m)
    MsgBox sir
    verificare = False
    Exit Function
End If
verificare = True
End Function

```

'Eroarea de deplasare a axei f(e)

```

Const MAX = 2.5
Dim lev As Integer
Private Sub CommandButton1_Click()
If verificare() Then
    citeste
    grafic
    deplasarii_axei1.Hide
    fara.Hide
    meniu.Hide
End If
End Sub

Private Sub calcul(dd As Double)
    Const pi = 3.141592653
    Const n = 100
    Dim D As Double
    Dim i As Integer
    Dim x As Double
    Dim s1 As Double
    Dim s2 As Double
    Dim e As Double
        ' baza mică
    Dim bmi1 As Double
    Dim bmi2 As Double
        ' baza mare
    Dim bma1 As Double
    Dim bma2 As Double
        ' variabila ajutătoare (calculul efectiv al lui DZ)
    Dim a1 As Double
    Dim a2 As Double
    Dim sir As String
    Dim h As Double

```



```

h = 2 * pi / n
e = Est.Text
D = D_1.Text
i = 2
While e <= Esf.Text
    s1 = 0
    s2 = 0
    x = 0
    For j = 0 To n - 1
        ' se calculează baza mica
        bmi1 = Sqr(1 - (e + dd * Sin(x)) * (e +
dd * Sin(x)) / (D * D))
        bmi2 = Sqr(1 - dd * dd * Sin(x) *
Sin(x) / (D * D))
        x = x + h
        ' se calculează baza mare
        bma1 = Sqr(1 - (e + dd * Sin(x)) * (e
+ dd * Sin(x)) / (D * D))
        bma2 = Sqr(1 - dd * dd * Sin(x) *
Sin(x) / (D * D))
        ' se calculează integrala
        s1 = s1 + (bmi1 + bma1) * h / 2
        s2 = s2 + (bmi2 + bma2) * h / 2
    Next j
    ' se calculează DZ (in micrometri)
    a1 = 2 * pi - s1
    a1 = a1 * D / (4 * pi)
    a1 = a1 * 1000
    a2 = 2 * pi - s2
    a2 = a2 * D / (4 * pi)
    a2 = a2 * 1000
    Sheets("influenta deplasarii axei
f(e)").Cells(i, 1) = e
    Sheets("influenta deplasarii axei
f(e)").Cells(i, lev) = a1 - a2
    e = e + Epas.Text
    i = i + 1
Wend
sir = "d"
sir = sir + Right(Str(2), 1)
sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
sir = sir + "="
sir = sir + Str(dd)
sir = sir + "mm"
Sheets("influenta deplasarii axei
f(e)").Cells(1, lev) = sir
    Sheets("influenta deplasarii axei
f(e)").Cells(1, lev).Characters(2,
2).Font.Subscript = True
End Sub

Public Sub grafic()
Dim sir As String
' Nr de valori
Dim k As Integer

k = Int((Esf.Text - Est.Text) / Epas.Text) + 2
sir = "a1:"
sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)
sir = sir + LTrim(Str(k))
Dim ch As ChartObject
Sheets("influenta deplasarii axei
f(e)").Activate
Sheets("influenta deplasarii axei
f(e)").ChartObjects.Delete
Set ch = Worksheets("influenta deplasarii axei
f(e)").ChartObjects.Add(25, 20, 410, 220)
ch.Chart.ChartWizard _
Source:=Worksheets("influenta deplasarii axei
f(e)").Range(sir), Gallery:=xlLine, _
Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1
ch.Chart.PlotArea.Interior.Color = RGB(255,
255, 255)
ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle =
xlLineStyleNone
ch.Chart.Legend.Font.Size = 8
ch.Activate
With ActiveChart
    .HasTitle = False
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 8
    .TickLabels.NumberFormat = "General"
    .HasTitle = True
With .AxisTitle
        .Font.Name = "arial"
        .Font.Size = 11
        .Caption = "DZ [mm]"
        .Characters(3, 1).Font.Subscript = True
        .Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
        .Characters(5, 1).Font.Name = "symbol"
        .Characters(5, 1).Font.Size = 14
    End With
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 8
    .TickLabels.Orientation = 0
    .HasTitle = True
With .AxisTitle
        .Caption = "e [mm]"
        .Font.Size = 11
    End With
End With
End Sub

Public Sub citeste()

```

```

Sheets("influenta deplasarii axei
f(e)").Cells.ClearContents
lev = 1
If d1.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d1.Text)
End If
If d2.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d2.Text)
End If
If d3.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d3.Text)
End If
If d4.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d4.Text)
End If
If d5.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d5.Text)
End If
If d6.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d6.Text)
End If
If d7.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d7.Text)
End If
End Sub
Public Function verificare() As Boolean
Dim sir As String
Dim m As Double
If d1.Text = "" And d2.Text = "" And d3.Text
= "" And _
d4.Text = "" And d5.Text = "" And d6.Text
= "" And d7.Text = "" Then
    MsgBox ("Trebuie introdusa cel putin o
valoarea pentru d ")
    verificare = False
    Exit Function
End If
If D_1.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui D")
    D_1.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Est.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui e initial")
    Est.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function

```

```

End If
If Esf.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui e final")
    Esf.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If val(Est.Text) > val(Esf.Text) Then
    MsgBox (" Valoarea lui e initial trebuie sa
fie mai mica decat cea a lui e final")
    Est.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Epas.Text = "" Then
    MsgBox ("Introduceti valoarea pentru pasul
lui e")
    Epas.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
m = D_1.Text - MAX
If val(d1.Text) > m Or val(d2.Text) > m Or
val(d3.Text) > m Or _
val(d4.Text) > m Or val(d5.Text) > m Or _
val(d6.Text) > m Or val(d7.Text) > m Then
    sir = "Valorile lui d trebuie sa fie mai mici
decat"
    sir = sir + Str(m)
    MsgBox sir
    verificare = False
    Exit Function
End If
verificare = True
End Function

```

'Eroarea de contact

```

Const MAX = 3
Dim lev As Integer
Private Sub CommandButton1_Click()
    If verificare() Then
        citeste
        grafic
        deformare_contact.Hide
        Cu.Hide
        meniu.Hide
    End If
End Sub
Public Sub citeste()
    Sheets("influenta deformarii de
contact").Cells.ClearContents
    lev = 1
    If d1.Text <> "" Then
        lev = lev + 1

```

```

calcul (d1.Text)
End If
If d2.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d2.Text)
End If
If d3.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d3.Text)
End If
If d4.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d4.Text)
End If
If d5.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d5.Text)
End If
If d6.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d6.Text)
End If
If d7.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d7.Text)
End If
End Sub

Public Sub grafic()
Dim sir As String
Dim k As Integer
    k = Int((Dsf.Text - Dst.Text) / Dpas.Text) +
2
    sir = "a1:"
    sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)
    sir = sir + LTrim(Str(k))
Dim ch As ChartObject
Sheets("influenta deformatiei de
contact").Activate
    Sheets("influenta deformatiei de
contact").ChartObjects.Delete
    Set ch = Worksheets("influenta deform. de
contact").ChartObjects.Add(25, 20, 520, 280)
    ch.Chart.ChartWizard _
    Source:=Worksheets("influenta deform. de
contact").Range(sir), Gallery:=xlLine, _
    Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
CategoryLabels:=1, _
    SeriesLabels:=1
    ch.Chart.PlotArea.Interior.Color =
RGB(255, 255, 255)
    ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle =
xlLineStyleNone
    ch.Chart.Legend.Font.Size = 9
    ch.Activate

```

```

With ActiveChart
    .HasTitle = False
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.NumberFormat = "General"
    .HasTitle = True
With .AxisTitle
    .Font.Name = "arial"
    .Font.Size = 12
    .Caption = "dc [mm]"
    .Characters(2, 1).Font.Subscript = True
    .Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
    .Characters(5, 1).Font.Name = "symbol"
    .Characters(5, 1).Font.Size = 14
End With
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.Orientation = 0
    .HasTitle = True
With .AxisTitle
    .Caption = "D [mm]"
    .Font.Size = 12
End With
End With
End Sub

Private Sub calcul(dd As Double)
Dim D As Double
Dim i As Integer
Dim a As Double
Dim sir As String
e = e1.Text
D = Dst.Text
i = 2
While D <= Dsf.Text
    a = 1.3847536
    a = a * Exp(2 / 3 * Log(e))
    a = a * Exp(-1 / 3 * Log(dd))
    a = a * Exp(-1 / 12 * Log(D / 2))
    a = a * Exp(1 / 4 * Log(D / 2 + dd)) *
Exp(-1 / 6 * Log(D + dd))
    Sheets("influenta deformatiei de
contact").Cells(i, 1) = D
    Sheets("influenta deformatiei de
contact").Cells(i, lev) = a
    D = D + Dpas.Text
    i = i + 1
Wend
sir = "rs"

```

```

'sir = sir + Right(Str(2), 1)
sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
sir = sir + "="
sir = sir + Str(dd)
sir = sir + "mm"
Sheets("influenta deformatiei de
contact").Cells(1, lev) = sir
Sheets("influenta deformatiei de
contact").Cells(1, lev).Characters(2,
2).Font.Subscript = True
End Sub

Public Function verificare() As Boolean
Dim sir As String
Dim m As Double
If d1.Text = "" And d2.Text = "" And d3.Text
= "" And _
d4.Text = "" And d5.Text = "" And d6.Text
= "" And d7.Text = "" Then
MsgBox ("Trebuie introdusa cel putin o
valoare pentru rs ")
verificare = False
Exit Function
End If
If e1.Text = "" Then
MsgBox ("introduceti valoarea lui p")
e1.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
If Dst.Text = "" Then
MsgBox ("introduceti valoarea lui D
initial")
Dst.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
If Dsf.Text = "" Then
MsgBox ("introduceti valoarea lui D final")
Dsf.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
If val(Dst.Text) > val(Dsf.Text) Then
MsgBox (" Valoarea lui D initial trebuie sa
fie mai mica decat cea a lui D final")
Dst.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
If Dpas.Text = "" Then
MsgBox ("Introduceti valoarea pentru pasul
lui D")
Dpas.SetFocus
verificare = False

```

```

Exit Function
End If
m = Dst.Text - MAX
If val(d1.Text) > m Or val(d2.Text) > m Or
val(d3.Text) > m Or _
val(d4.Text) > m Or val(d5.Text) > m Or _
val(d6.Text) > m Or val(d7.Text) > m Then
sir = "Valorile lui rs trebuie sa fie mai mici
decat"
sir = sir + Str(m)
MsgBox sir
verificare = False
Exit Function
End If
verificare = True
End Function

```

```

'Eroarea relativă de contact
Const MAX = 3
Dim lev As Integer
Private Sub CommandButton1_Click()
If verificare() Then
citeste
grafic
contact_relativa.Hide
Cu.Hide
meniu.Hide
End If
End Sub

Public Sub citeste()
Sheets("eroare relativa
(contact)").Cells.ClearContents
lev = 1
If d1.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d1.Text)
End If
If d2.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d2.Text)
End If
If d3.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d3.Text)
End If
If d4.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d4.Text)
End If
If d5.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d5.Text)
End If

```

```

If d6.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d6.Text)
End If
If d7.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d7.Text)
End If
End Sub

Public Sub grafic()
Dim sir As String
Dim k As Integer
k = Int((Dsf.Text - Dst.Text) / Dpas.Text) + 2
sir = "a1:"
sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)
sir = sir + LTrim(Str(k))
Dim ch As ChartObject
Sheets("eroare relativa (contact)").Activate
Sheets("eroare relativa
(contact)").ChartObjects.Delete
Set ch = Worksheets("eroare relativa
(contact)").ChartObjects.Add(25, 20, 520, 280)
ch.Chart.ChartWizard _
Source:=Worksheets("eroare relativa
(contact)").Range(sir), Gallery:=xlLine, _
Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1
ch.Chart.PlotArea.Interior.Color = RGB(255,
255, 255)
ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle =
xlLineStyleNone
ch.Chart.Legend.Font.Size = 9
ch.Activate
With ActiveChart
    .HasTitle = False
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.NumberFormat = "General"
    .HasTitle = True
    With .AxisTitle
        .Font.Name = "arial"
        .Font.Size = 12
        .Caption = "dcE [mm]"
        .Characters(2, 2).Font.Subscript = True
        .Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
        .Characters(5, 1).Font.Name = "symbol"
        .Characters(5, 1).Font.Size = 14
    End With
End With
ch.Activate

With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.Orientation = 0
    .HasTitle = True
    With .AxisTitle
        .Caption = "D [mm]"
        .Font.Size = 12
    End With
End With
End Sub
Private Sub calcul(dd As Double)
Dim D As Double
Dim i As Integer
Dim a As Double
Dim sir As String
Dim vmax As Double
e = e1.Text
D = Dst.Text
i = 2
While D <= Dsf.Text
    a = 1.3847536
    a = a * Exp(2 / 3 * Log(e))
    a = a * Exp(-1 / 3 * Log(dd))
    a = a * Exp(-1 / 12 * Log(D / 2))
    a = a * Exp(1 / 4 * Log(D / 2 + dd)) *
Exp(-1 / 6 * Log(D + dd))
    If i = 2 Then
        vmax = a
    End If
    Sheets("eroare relativa
(contact)").Cells(i, 1) = D
    Sheets("eroare relativa
(contact)").Cells(i, lev) = vmax - a
    D = D + Dpas.Text
    i = i + 1
Wend
sir = "rs"
' sir = sir + Right(Str(2), 1)
sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
sir = sir + "="
sir = sir + Str(dd)
sir = sir + "mm"
Sheets("eroare relativa (contact)").Cells(1,
lev) = sir
Sheets("eroare relativa (contact)").Cells(1,
lev).Characters(2, 2).Font.Subscript = True
End Sub
Public Function verificare() As Boolean
Dim sir As String
Dim m As Double
If d1.Text = "" And d2.Text = "" And d3.Text
= "" And _
d4.Text = "" And d5.Text = "" And d6.Text
= "" And d7.Text = "" Then

```

```

MsgBox ("Trebuie introdusa cel putin o
valoare pentru rs ")
verificare = False
Exit Function
End If
If e1.Text = "" Then
MsgBox ("introduceti valoarea lui p")
e1.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
If Dst.Text = "" Then
MsgBox ("introduceti valoarea lui D
initial")
Dst.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
If Dsf.Text = "" Then
MsgBox ("introduceti valoarea lui D final")
Dsf.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
If val(Dst.Text) > val(Dsf.Text) Then
MsgBox (" Valoarea lui D initial trebuie sa
fie mai mica decat cea a lui D final")
Dst.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
If Dpas.Text = "" Then
MsgBox ("Introduceți valoarea pentru pasul
lui D")
Dpas.SetFocus
verificare = False
Exit Function
End If
m = Dst.Text - MAX
If val(d1.Text) > m Or val(d2.Text) > m Or
val(d3.Text) > m Or _
val(d4.Text) > m Or val(d5.Text) > m Or _
val(d6.Text) > m Or val(d7.Text) > m Then
sir = "Valorile lui rs trebuie sa fie mai mici
decat"
sir = sir + Str(m)
MsgBox sir
verificare = False
Exit Function
End If
verificare = True
End Function

Private Sub UserForm_Click()
End Sub

```

```

'Eroarea de deplasare a axei
palpatorului exterior f(D)
Const MAX = 3
Dim lev As Integer
Private Sub CommandButton1_Click()
If verificare() Then
citeste
grafic
pozitionare_axa.Hide
Cu.Hide
meniu.Hide
End If
End Sub

Public Sub citeste()
Sheets("influenta pozitiei axiale f(D)-
ext").Cells.ClearContents
lev = 1
If d1.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d1.Text)
End If
If d2.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d2.Text)
End If
If d3.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d3.Text)
End If
If d4.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d4.Text)
End If
If d5.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d5.Text)
End If
If d6.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d6.Text)
End If
If d7.Text <> "" Then
lev = lev + 1
calcul (d7.Text)
End If
End Sub

Public Sub grafic()
Dim sir As String
Dim k As Integer
k = Int((Dsf.Text - Dst.Text) / Dpas.Text) +
2
sir = "a1:"
sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)

```

```

    sir = sir + LTrim(Str(k))
Dim ch As ChartObject
    Sheets("influenta pozitiei axiale f(D)-
ext").Activate
    Sheets("influenta pozitiei axiale f(D)-
ext").ChartObjects.Delete
    Set ch = Worksheets("influenta pozitiei
axiale f(D)-ext").ChartObjects.Add(25, 20,
420, 240)
    ch.Chart.ChartWizard _
    Source:=Worksheets("influenta pozitiei
axiale f(D)-ext").Range(sir), Gallery:=xlLine,
    Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
CategoryLabels:=1, _
    SeriesLabels:=1
    ch.Chart.PlotArea.Interior.Color =
RGB(225, 225, 225)
    ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle =
xlLineStyleNone
    ch.Chart.Legend.Font.Size = 9
    ch.Activate
With ActiveChart
    .HasTitle = False
End With
    ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.NumberFormat = "General"
    .HasTitle = True
With .AxisTitle
    .Font.Name = "arial"
    .Font.Size = 12
    .Caption = "dp [mm]"
    .Characters(2, 1).Font.Subscript = True
    .Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
    .Characters(5, 1).Font.Name = "symbol"
    .Characters(5, 1).Font.Size = 14
End With
End With
    ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.Orientation = 0
    .HasTitle = True
With .AxisTitle
    .Caption = "D [mm]"
    .Font.Size = 12
End With
End With
End Sub
Private Sub calcul(dd As Double)
    Dim D As Double

```

```

    Dim i As Integer
    Dim a As Double
    Dim sir As String
    e = e1.Text
    D = Dst.Text
    i = 2
    While D <= Dsf.Text
        a = 1 - Sqr(1 - e * e / ((D / 2 + dd) * (D /
2 + dd)))
        a = a * 1000 * D / 2
        Sheets("influenta pozitiei axiale f(D)-
ext").Cells(i, 1) = D
        Sheets("influenta pozitiei axiale f(D)-
ext").Cells(i, lev) = a
        D = D + Dpas.Text
        i = i + 1
    Wend
    sir = "rs"
' sir = sir + Right(Str(2), 1)
    sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
    sir = sir + "="
    sir = sir + Str(dd)
    sir = sir + "mm"
    Sheets("influenta pozitiei axiale f(D)-
ext").Cells(1, lev) = sir
    Sheets("influenta pozitiei axiale f(D)-
ext").Cells(1, lev).Characters(2,
2).Font.Subscript = True
End Sub

Public Function verificare() As Boolean
    Dim sir As String
    Dim m As Double
    If d1.Text = "" And d2.Text = "" And d3.Text
= "" And _
        d4.Text = "" And d5.Text = "" And
d6.Text = "" And d7.Text = "" Then
        MsgBox ("Trebuie introdusa cel putin o
valoare pentru rs ")
        verificare = False
    Exit Function
End If
If e1.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui e")
    e1.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Dst.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui D
initial")
    Dst.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If

```

```

If Dsf.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui D final")
    Dsf.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If val(Dst.Text) > val(Dsf.Text) Then
    MsgBox (" Valoarea lui D initial trebuie sa
fie mai mica decat cea a lui D final")
    Dst.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Dpas.Text = "" Then
    MsgBox ("Introduceti valoarea pentru pasul
lui D")
    Dpas.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
m = Dst.Text - MAX
If val(d1.Text) > m Or val(d2.Text) > m Or
val(d3.Text) > m Or _
val(d4.Text) > m Or val(d5.Text) > m Or _
val(d6.Text) > m Or val(d7.Text) > m Then
    sir = "Valorile lui rs trebuie sa fie mai mici
decat"
    sir = sir + Str(m)
    MsgBox sir
    verificare = False
    Exit Function
End If
verificare = True
End Function

Private Sub UserForm_Click()
End Sub

```

'Eroarea de deplasare a palpatorului

```

exterior f(e)
Const MAX = 3
Dim lev As Integer
Private Sub CommandButton1_Click()
If verificare() Then
    citeste
    grafic
    pozitionare_axa1.Hide
    Cu.Hide
    meniu.Hide
End If
End Sub
Public Sub citeste()
    Sheets("influenta pozit axiale f(e)-
ext").Cells.ClearContents
    lev = 1

```

```

If d1.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d1.Text)
End If
If d2.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d2.Text)
End If
If d3.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d3.Text)
End If
If d4.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d4.Text)
End If
If d5.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d5.Text)
End If
If d6.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d6.Text)
End If
If d7.Text <> "" Then
    lev = lev + 1
    calcul (d7.Text)
End If
End Sub
Public Sub grafic()
Dim sir As String
Dim k As Integer
k = Int((Esf.Text - Est.Text) / Epas.Text) + 2
sir = "a1:"
sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)
sir = sir + LTrim(Str(k))
Dim ch As ChartObject
Sheets("influenta pozit axiale f(e)-
ext").Activate
Sheets("influenta pozit axiale f(e)-
ext").ChartObjects.Delete
Set ch = Worksheets("influenta pozit axiale
f(e)-ext").ChartObjects.Add(25, 20, 420, 240)
ch.Chart.ChartWizard _
Source:=Worksheets("influenta pozit axiale
f(e)-ext").Range(sir), Gallery:=xlLine, _
Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1
ch.Chart.PlotArea.Interior.Color = RGB(255,
255, 255)
ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle =
xlLineStyleNone
ch.Chart.Legend.Font.Size = 9
ch.Activate

```



```

With ActiveChart
  .HasTitle = False
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlVValue)
  .HasMajorGridlines = True
  .TickLabels.Font.Size = 10
  .TickLabels.NumberFormat = "General"
  .HasTitle = True
  With .AxisTitle
    .Font.Name = "arial"
    .Font.Size = 12
    .Caption = "dp [mm]"
    .Characters(2, 1).Font.Subscript = True
    .Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
    .Characters(5, 1).Font.Name = "symbol"
    .Characters(5, 1).Font.Size = 14
  End With
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
  .HasMajorGridlines = True
  .TickLabels.Font.Size = 10
  .TickLabels.Orientation = 0
  .HasTitle = True
  With .AxisTitle
    .Caption = "e [mm]"
    .Font.Size = 12
  End With
End With
End Sub
Private Sub calcul(dd As Double)
  Dim D As Double
  Dim i As Integer
  Dim a As Double
  Dim sir As String
  Dim e As Double
  e = Est.Text
  D = D_1.Text
  i = 2
  While e <= Esf.Text
    a = 1 - Sqr(1 - e * e / ((D / 2 + dd) * (D /
2 + dd)))
    a = a * 1000 * D / 2
    Sheets("influenta pozit axiale f(e)-
ext").Cells(i, 1) = e
    ' datele se scriu in celulele
corespunzatoare
    Sheets("influenta pozit axiale f(e)-
ext").Cells(i, lev) = a
    ' d se incrementeaza cu pasul
    e = e + Epas.Text
    i = i + 1
  Wend
  sir = "rs"
  ' sir = sir + Right(Str(2), 1)
  sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
  sir = sir + "="
  sir = sir + Str(dd)
  sir = sir + "mm"
  Sheets("influenta pozit axiale f(e)-
ext").Cells(1, lev) = sir
  Sheets("influenta pozit axiale f(e)-
ext").Cells(1, lev).Characters(2,
2).Font.Subscript = True
End Sub
Public Function verificare() As Boolean
Dim sir As String
Dim m As Double
If d1.Text = "" And d2.Text = "" And d3.Text
= "" And _
d4.Text = "" And d5.Text = "" And d6.Text
= "" And d7.Text = "" Then
  MsgBox ("Trebuie introdusa cel putin o
valoare pentru rs ")
  verificare = False
  Exit Function
End If
If D_1.Text = "" Then
  MsgBox ("introduceti valoarea lui D")
  D_1.SetFocus
  verificare = False
  Exit Function
End If
If Est.Text = "" Then
  MsgBox ("introduceti valoarea lui e initial")
  Est.SetFocus
  verificare = False
  Exit Function
End If
If Esf.Text = "" Then
  MsgBox ("introduceti valoarea lui e final")
  Esf.SetFocus
  verificare = False
  Exit Function
End If
If val(Est.Text) > val(Esf.Text) Then
  MsgBox (" Valoarea lui e initial trebuie sa
fie mai mica decat cea a lui e final")
  Est.SetFocus
  verificare = False
  Exit Function
End If
If Epas.Text = "" Then
  MsgBox ("Introduceti valoarea pentru pasul
lui e")
  Epas.SetFocus
  verificare = False
  Exit Function
End If

```

```

m = D_1.Text - MAX
If val(d1.Text) > m Or val(d2.Text) > m Or
val(d3.Text) > m Or _
  val(d4.Text) > m Or val(d5.Text) > m Or _
  val(d6.Text) > m Or val(d7.Text) > m Then
  sir = "Valorile lui rs trebuie sa fie mai mici
decat"
  sir = sir + Str(m)
  MsgBox sir
  verificare = False
  Exit Function
End If
verificare = True
End Function

```

'Eroarea de deplasare a palpatorului

interior f(D)

```
Const MAX = 3
```

```
Dim lev As Integer
```

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
  If verificare() Then
```

```
    citeste
```

```
    grafic
```

```
    pozitionare_axa_int.Hide
```

```
    Cu.Hide
```

```
    meniu.Hide
```

```
  End If
```

```
End Sub
```

```
Public Sub citeste()
```

```
  Sheets("influenta pozit axiale f(D)-
int").Cells.ClearContents
```

```
  lev = 1
```

```
  If d1.Text <> "" Then
```

```
    lev = lev + 1
```

```
    calcul (d1.Text)
```

```
  End If
```

```
  If d2.Text <> "" Then
```

```
    lev = lev + 1
```

```
    calcul (d2.Text)
```

```
  End If
```

```
  If d3.Text <> "" Then
```

```
    lev = lev + 1
```

```
    calcul (d3.Text)
```

```
  End If
```

```
  If d4.Text <> "" Then
```

```
    lev = lev + 1
```

```
    calcul (d4.Text)
```

```
  End If
```

```
  If d5.Text <> "" Then
```

```
    lev = lev + 1
```

```
    calcul (d5.Text)
```

```
  End If
```

```
  If d6.Text <> "" Then
```

```
    lev = lev + 1
```

```
    calcul (d6.Text)
```

```
  End If
```

```
  If d7.Text <> "" Then
```

```
    lev = lev + 1
```

```
    calcul (d7.Text)
```

```
  End If
```

```
End Sub
```

```
Public Sub grafic()
```

```
  Dim sir As String
```

```
  Dim k As Integer
```

```
  k = Int((Dsf.Text - Dst.Text) / Dpas.Text) +
2
```

```
  sir = "a1:"
```

```
  sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)
```

```
  sir = sir + LTrim(Str(k))
```

```
  Dim ch As ChartObject
```

```
  Sheets("influenta pozit axiale f(D)-
int").Activate
```

```
  Sheets("influenta pozit axiale f(D)-
int").ChartObjects.Delete
```

```
  Set ch = Worksheets("influenta pozit axiale
f(D)-int").ChartObjects.Add(25, 20, 420,
240)
```

```
  ch.Chart.ChartWizard _
```

```
  Source:=Worksheets("influenta pozit axiale
f(D)-int").Range(sir), Gallery:=xlLine, _
```

```
  Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
```

```
  CategoryLabels:=1, _
```

```
  SeriesLabels:=1
```

```
  ch.Chart.PlotArea.Interior.Color = RGB(225,
225, 225)
```

```
  ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle =
xlLineStyleNone
```

```
  ch.Chart.Legend.Font.Size = 9
```

```
  ch.Activate
```

```
  With ActiveChart
```

```
    .HasTitle = False
```

```
  End With
```

```
  ch.Activate
```

```
  With ActiveChart.Axes(xlValue)
```

```
    .HasMajorGridlines = True
```

```
    .TickLabels.Font.Size = 10
```

```
    .TickLabels.NumberFormat = "General"
```

```
    .HasTitle = True
```

```
  With .AxisTitle
```

```
    .Font.Name = "arial"
```

```
    .Font.Size = 12
```

```
    .Caption = "d'p [mm]"
```

```
    .Characters(3, 1).Font.Subscript = True
```

```
    .Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
```

```
    .Characters(6, 1).Font.Name = "symbol"
```

```
    .Characters(6, 1).Font.Size = 14
```

```
  End With
```

```

End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.Orientation = 0
    .HasTitle = True
With .AxisTitle
    .Caption = "D [mm]"
    .Font.Size = 12
End With
End With
End Sub

Private Sub calcul(dd As Double)
Dim D As Double
Dim i As Integer
Dim a As Double
Dim sir As String
e = e1.Text
D = Dst.Text
i = 2
While D <= Dsf.Text
    a = 1 - Sqr(1 - e * e / ((D / 2 - dd) * (D / 2 - dd)))
    a = a * 1000 * D / 2
    Sheets("influenta pozit axiale f(D)-int").Cells(i, 1) = D
    Sheets("influenta pozit axiale f(D)-int").Cells(i, lev) = a
    D = D + Dpas.Text
    i = i + 1
Wend
sir = "rs"
sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
sir = sir + "="
sir = sir + Str(dd)
sir = sir + "mm"
Sheets("influenta pozit axiale f(D)-int").Cells(1, lev) = sir
Sheets("influenta pozit axiale f(D)-int").Cells(1, lev).Characters(2, 2).Font.Subscript = True
End Sub

Public Function verificare() As Boolean
Dim sir As String
Dim m As Double
If d1.Text = "" And d2.Text = "" And d3.Text = "" And _
d4.Text = "" And d5.Text = "" And d6.Text = "" And d7.Text = "" Then
    MsgBox ("Trebuie introdusa cel putin o valoare pentru rs ")
    verificare = False
    Exit Function
End If
If e1.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui e")
    e1.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Dst.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui D initial")
    Dst.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Dsf.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui D final")
    Dsf.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If val(Dst.Text) > val(Dsf.Text) Then
    MsgBox (" Valoarea lui D initial trebuie sa fie mai mica decat cea a lui D final")
    Dst.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Dpas.Text = "" Then
    MsgBox ("Introduceti valoarea pentru pasul lui D")
    Dpas.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
m = Dst.Text - MAX
If val(d1.Text) > m Or val(d2.Text) > m Or val(d3.Text) > m Or _
val(d4.Text) > m Or val(d5.Text) > m Or _
val(d6.Text) > m Or val(d7.Text) > m Then
    sir = "Valorile lui rs trebuie sa fie mai mici decat"
    sir = sir + Str(m)
    MsgBox sir
    verificare = False
    Exit Function
End If
verificare = True
End Function

Private Sub UserForm_Click()
End Sub

```

'Eroarea de deplasare a palpatorului interior f(e)

```

Const MAX = 3
Dim lev As Integer
Private Sub CommandButton1_Click()
If verificare() Then
    citeste
    grafic
    pozitionare_axa1_int.Hide
    Cu.Hide
    meniu.Hide
End If
End Sub
Public Sub citeste()
    Sheets("influenta pozit axiale f(e)-int").Cells.ClearContents
    lev = 1
    If d1.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d1.Text)
    End If
    If d2.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d2.Text)
    End If
    If d3.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d3.Text)
    End If
    If d4.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d4.Text)
    End If
    If d5.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d5.Text)
    End If
    If d6.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d6.Text)
    End If
    If d7.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d7.Text)
    End If
End Sub
Public Sub grafic()
Dim sir As String
' Nr de valori
Dim k As Integer
k = Int((Esf.Text - Est.Text) / Epas.Text) + 2
sir = "a1:"
sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)
sir = sir + LTrim(Str(k))
Dim ch As ChartObject

```

```

Sheets("influenta pozit axiale f(e)-int").Activate
Sheets("influenta pozit axiale f(e)-int").ChartObjects.Delete
Set ch = Worksheets("influenta pozit axiale f(e)-int").ChartObjects.Add(25, 20, 420, 240)
ch.Chart.ChartWizard _
Source:=Worksheets("influenta pozit axiale f(e)-int").Range(sir), Gallery:=xlLine, _
Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1
ch.Chart.PlotArea.Interior.Color = RGB(255, 255, 255)
ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle = xlLineStyleNone
ch.Chart.Legend.Font.Size = 9
ch.Activate
With ActiveChart
    .HasTitle = False
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.NumberFormat = "General"
    .HasTitle = True
    With .AxisTitle
        .Font.Name = "arial"
        .Font.Size = 12
        .Caption = "d'p [mm]"
        .Characters(3, 1).Font.Subscript = True
        .Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
        .Characters(6, 1).Font.Name = "symbol"
        .Characters(6, 1).Font.Size = 14
    End With
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.Orientation = 0
    .HasTitle = True
    With .AxisTitle
        .Caption = "e [mm]"
        .Font.Size = 12
    End With
End With
End Sub
Private Sub calcul(dd As Double)
    Dim D As Double
    Dim i As Integer
    Dim a As Double
    Dim sir As String
    Dim e As Double

```

```

e = Est.Text
D = D_1.Text
i = 2
While e <= Esf.Text
    a = 1 - Sqr(1 - e * e / ((D / 2 - dd) * (D / 2
- dd)))
    a = a * 1000 * D / 2
    Sheets("influenta pozit axiale f(e)-
int").Cells(i, 1) = e
    Sheets("influenta pozit axiale f(e)-
int").Cells(i, lev) = a
    e = e + Epas.Text
    i = i + 1
Wend
sir = "rs"
' sir = sir + Right(Str(2), 1)
sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
sir = sir + "="
sir = sir + Str(dd)
sir = sir + "mm"
Sheets("influenta pozit axiale f(e)-
int").Cells(1, lev) = sir
Sheets("influenta pozit axiale f(e)-
int").Cells(1, lev).Characters(2,
2).Font.Subscript = True
End Sub
Public Function verificare() As Boolean
Dim sir As String
Dim m As Double
If d1.Text = "" And d2.Text = "" And d3.Text
= "" And _
d4.Text = "" And d5.Text = "" And d6.Text
= "" And d7.Text = "" Then
    MsgBox ("Trebuie introdusa cel putin o
valoare pentru rs ")
    verificare = False
    Exit Function
End If
If D_1.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui D")
    D_1.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Est.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui e initial")
    Est.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Esf.Text = "" Then
    MsgBox ("introduceti valoarea lui e final")
    Esf.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function

```

```

End If
If val(Est.Text) > val(Esf.Text) Then
    MsgBox (" Valoarea lui e initial trebuie sa
fie mai mica decat cea a lui e final")
    Est.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
If Epas.Text = "" Then
    MsgBox ("Introduceti valoarea pentru pasul
lui e")
    Epas.SetFocus
    verificare = False
    Exit Function
End If
m = D_1.Text - MAX
' Valorile lui D sunt mai mici decat D initial -
MAX
If val(d1.Text) > m Or val(d2.Text) > m Or
val(d3.Text) > m Or _
val(d4.Text) > m Or val(d5.Text) > m Or _
val(d6.Text) > m Or val(d7.Text) > m Then
    sir = "Valorile lui rs trebuie sa fie mai mici
decat"
    sir = sir + Str(m)
    MsgBox sir
    verificare = False
    Exit Function
End If
verificare = True
End Function

```

'Comparație

```

Const MAX = 3
Dim lev As Integer
Private Sub CommandButton1_Click()
If verificare() Then
    citeste
    grafic
    Compara.Hide
    meniu.Hide
End If
End Sub
Private Sub calcul(dd As Double)
Const pi = 3.141592653
Const n = 100
Dim D As Double
Dim i As Integer
Dim x As Double
Dim s1 As Double
Dim s2 As Double
Dim e As Double
Dim bmi1 As Double
Dim bmi2 As Double

```

```

Dim bma1 As Double
Dim bma2 As Double
Dim a1 As Double
Dim a2 As Double
Dim sir As String
Dim h As Double
h = 2 * pi / n
e = e1.Text
D = Dst.Text
i = 2
While D <= Dsf.Text
    s1 = 0
    s2 = 0
    x = 0
    For j = 0 To n - 1
        bmi1 = Sqr(1 - (e + dd * Sin(x)) * (e +
dd * Sin(x)) / (D * D))
        bmi2 = Sqr(1 - dd * dd * Sin(x) *
Sin(x) / (D * D))
        x = x + h
        bma1 = Sqr(1 - (e + dd * Sin(x)) * (e
+ dd * Sin(x)) / (D * D))
        bma2 = Sqr(1 - dd * dd * Sin(x) *
Sin(x) / (D * D))
        s1 = s1 + (bmi1 + bma1) * h / 2
        s2 = s2 + (bmi2 + bma2) * h / 2
    Next j
    a1 = 2 * pi - s1
    a1 = a1 * D / (4 * pi)
    a1 = a1 * 1000
    a2 = 2 * pi - s2
    a2 = a2 * D / (4 * pi)
    a2 = a2 * 1000
    Sheets("comparatie").Cells(i, 1) = D
    Sheets("comparatie").Cells(i, lev) = a1 -
a2
    D = D + Dpas.Text
    i = i + 1
Wend
sir = "d"
sir = sir + Right(Str(2), 1)
' sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
sir = sir + "="
sir = sir + Str(dd)
sir = sir + "mm"
Sheets("comparatie").Cells(1, lev) = sir
Sheets("comparatie").Cells(1,
lev).Characters(2, 2).Font.Subscript = True
End Sub
Private Sub calcul1(dd As Double)
    Dim D As Double
    Dim i As Integer
    Dim a As Double
    Dim sir As String
    e = e1.Text

```

```

D = Dst.Text
i = 2
While D <= Dsf.Text
    a = 1 - Sqr(1 - e * e / ((D / 2 + dd) * (D /
2 + dd)))
    a = a * 1000 * D / 2
    Sheets("comparatie").Cells(i, 1) = D
    Sheets("comparatie").Cells(i, lev) = a
    D = D + Dpas.Text
    i = i + 1
Wend
sir = "rs"
' sir = sir + Right(Str(2), 1)
' sir = sir + Right(Str(lev - 1), 1)
sir = sir + "="
sir = sir + Str(dd)
sir = sir + "mm"
Sheets("comparatie").Cells(1, lev) = sir
Sheets("comparatie").Cells(1,
lev).Characters(2, 2).Font.Subscript = True
End Sub
Public Sub grafic()
Dim sir As String
Dim k As Integer
k = Int((Dsf.Text - Dst.Text) / Dpas.Text) + 2
sir = "a1:"
sir = sir + Chr(Asc("a") + lev - 1)
sir = sir + LTrim(Str(k))
'ch graficul care se va crea din cod
Dim ch As ChartObject
Sheets("comparatie").Activate
Sheets("comparatie").ChartObjects.Delete
Set ch =
Worksheets("comparatie").ChartObjects.Add(2
5, 20, 520, 280)
ch.Chart.ChartWizard _
Source:=Worksheets("comparatie").Range(sir),
Gallery:=xlLine, _
Format:=1, PlotBy:=xlColumns,
CategoryLabels:=1, _
SeriesLabels:=1
ch.Chart.PlotArea.Interior.Color = RGB(255,
255, 255)
ch.Chart.ChartArea.Border.LineStyle =
xlLineStyleNone
ch.Chart.Legend.Font.Size = 9
ch.Activate
With ActiveChart
    .HasTitle = False
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlValue)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.NumberFormat = "General"

```

```

.HasTitle = True
With .AxisTitle
    .Font.Name = "arial"
    .Font.Size = 12
    .Caption = "DZ,dp [mm]"
    'Characters(3, 1).Font.Subscript = True
    .Characters(1, 1).Font.Name = "symbol"
    .Characters(4, 1).Font.Name = "symbol"
    .Characters(8, 1).Font.Name = "symbol"
    .Characters(8, 1).Font.Size = 14
    .Characters(5, 1).Font.Subscript = True
End With
End With
ch.Activate
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
    .HasMajorGridlines = True
    .TickLabels.Font.Size = 10
    .TickLabels.Orientation = 0
    .HasTitle = True
    With .AxisTitle
        .Caption = "D [mm]"
        .Font.Size = 12
    End With
End With
End Sub
Public Sub citeste()
    Sheets("comparatie").Cells.ClearContents
    'lev = 1
    lev = 1
    ' Daca am introdus o valoare
    'If d1.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul (d1.Text)
    'End If
    'If rs.Text <> "" Then
        lev = lev + 1
        calcul1 (rs.Text)
    'End If
End Sub
Public Function verificare() As Boolean
    Dim sir As String
    Dim m As Double
    If d1.Text = "" Then
        MsgBox ("Introduceti valoarea lui d ")
        verificare = False
        Exit Function
    End If
    If rs.Text = "" Then
        MsgBox ("Introduceti valoarea lui rs ")
        verificare = False
        Exit Function
    End If
    If e1.Text = "" Then
        MsgBox ("introduceti valoarea lui e")
        e1.SetFocus
        verificare = False
        Exit Function
    End If
    If Dst.Text = "" Then
        MsgBox ("introduceti valoarea lui D
initial")
        Dst.SetFocus
        verificare = False
        Exit Function
    End If
    If Dsf.Text = "" Then
        MsgBox ("introduceti valoarea lui D final")
        Dsf.SetFocus
        verificare = False
        Exit Function
    End If
    If val(Dst.Text) > val(Dsf.Text) Then
        MsgBox (" Valoarea lui D initial trebuie sa
fie mai mica decat cea a lui D final")
        Dst.SetFocus
        verificare = False
        Exit Function
    End If
    If Dpas.Text = "" Then
        MsgBox ("Introduceti valoarea pentru pasul
lui D")
        Dpas.SetFocus
        verificare = False
        Exit Function
    End If
    m = Dst.Text - MAX
    If val(d1.Text) > m Then
        sir = "d trebuie sa fie mai mici decat"
        sir = sir + Str(m)
        MsgBox sir
        d1.SetFocus
        verificare = False
        Exit Function
    End If
    If val(rs.Text) > m Then
        sir = "rs trebuie sa fie mai mici decat"
        sir = sir + Str(m)
        rs.SetFocus
        MsgBox sir
        verificare = False
        Exit Function
    End If
    verificare = True
End Function

```

ANEXA 3

PROGRAM-SURSĂ DE REGLARE NUMERICĂ ȘI ACHIZIȚIE DE DATE ÎN FIȘIER

```
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include <iostream.h>
#include<math.h>
#include <graphics.h>
#include <process.h>
#include <alloc.h>
#include <dos.h>
#define ADRTIRO 0x320
#define AB 0x340
#define PI 3.1415926
#define LPT0 0x378
#define TRAD 1
int i,i1,se=2,v=5,count;
float x,valmm;
void axax(void);
void manual (void);
void automat (void);
void pregatire_axa(void);
void can(void);
float trad (int axa);
int kbstatus(void);

void main()
{
    char metoda;
    clrscr();
    printf("\n introduceti codificarea vitezei:");
    scanf("%d",&v);
    // initializari
    outportb(0x32f,0xc3);    outportb(0x32f,0x80);    outportb(0x32f,0x49);
                           // canal 7
    outportb(0x32d,0xc3);    outportb(0x32d,0x80);    outportb(0x32d,0x49);
                           // canal 6
    outportb(0x32b,0xc0);    outportb(0x32b,0x80);    outportb(0x32b,0x48);
                           // canal 5

    pregatire_axa();
    printf("/n doriti deplasare manuala sau reglare automata?
           (m pt. manual):");
    cin>>metoda;
    if (metoda=='m')

        manual();
    else
        automat();
}

void automat(void)
{
```



```

clrscr();
float cota;
cout<<"\n introduceti cota finala:";
cin>>cota;
can();
cout<<"cota="<<cota<<"val_mm="<<valmm;
while (valmm>cota)
{
    se=2; axax();
    x=trad(0);
    can();
    gotoxy(5,17);
    printf(" indicatie TFNIL=%6.3f indicatie TP-MF=%6.3f ", x,valmm);
}
}

void manual(void)
{
    int capslock=1,kbst,z1,z2,z5=0;
    clrscr();
    printf("\n mentineti apasat shift dr. -> X+, shift stg. -> X-");
    printf("\n          Caps Lock pt. terminare program  \n");
    while( z5==0)
    {
        x=trad(0);
        kbst=kbstatus();
        z1=kbst & 0x01;
        z2=kbst & 0x02;
        z5=kbst & 0x40;
        i++;
        if(z1) { se=1;    axax();}
        if(z2) { se=2;    axax();}
        x=trad(0);
        gotoxy(5,17);
        printf(" pozitie curenta x=%6.3f  COUNT=%d", x, count);
        can();
    }
}

void pregatire_axa(void)
{
    outportb(ADRTIRO+0x5,0x4);
    outportb(ADRTIRO+0xf,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0x4,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0xe,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0x9,0x4);
    outportb(ADRTIRO+0xb,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0x8,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0xa,0x00);
}

float trad (int axa)
{
    unsigned long impuls=0L;
    int i, result[4], port;
    long rez;
    if(axa==0) {port=ADRTIRO+0xe; outportb(ADRTIRO+0xf,0x3);}
    else {if(axa==1) {port=ADRTIRO+0xc; outportb(ADRTIRO+0xd,0x3);}}
    for (i=0; i<=3; i++)
    {
        result[i]=inportb(port);
    }
    impuls=1L*result[0]+256L*result[1]+256L*256*result[2];
}

```

```

    rez=(impuls-262144);
    return 0.001*rez*TRAD;
}

void can(void)
{
    float valv, valv1, et=37.1, k=0.07142;
    int dom=20, nr_biti=12, polar=1, te=1;
    int msb, lsb, val, i, j=0;
    FILE *fpo;
    if((fpo=fopen("c:\\bc\\files\\date.txt", "w"))==NULL)
    {
        puts("nu pot crea fisierul destinatie");
        return ;
    }

    outportb (AB + 3, 0x99); /* programarea portului B-8255 ca port iesire */
    outportb (AB+1, j); /* selectare canal */
    outportb (AB + 8, 0); /* start conversie pe 12 bitii */
    while ( (inportb (AB + 10) && 1) != 1 )
        { delay(200); } /* asteptare pina la terminare conversie */
    delay(te); /* perioada esantionare intre 2 CAN */
    msb = inportb (AB + 8);
    lsb = inportb (AB + 9);
    gotoxy(5,21);
    val = msb*16+ lsb/16;
    valv=(val/pow(2,nr_biti))*dom;
    valv1=valv- polar*dom/2;
    valmm=et+valv1*k;
    printf( " valbiti=%4d msb=%3d lsb=%3d valv=%5.3f val_V=%5.3f
            val_mm=%5.3f", val,msb,lsb,valv,valv1,valmm);
    fprintf(fpo, " \n valbiti=%d msb=%d lsb=%d valv=%5.3f val_V=%5.3f
            val_mm=%5.3f", val,msb,lsb,valv,valv1,valmm);
    fclose(fpo);
}

int kbstatus(void)
{
    union REGS ireg;
    ireg.h.ah=0x02;
    int86(0x16,&ireg,&ireg);
    return ireg.h.al;
}

void axax(void)
{
    if(se==1) /* sens X+ pe reper, spre stanga */
    {
        i1++;
        outport (LPT0, 0x05);
        delay(v); gotoxy(15,15); printf(" i+=%d", i1);
        outport (LPT0, 0x01);
        delay(v);
    }
    if(se==2) /* sens X- pe reper, spre dreapta */
    {
        i1--;
        outport (LPT0, 0x04);
        delay(v); gotoxy(15,16); printf(" i-=%d", i1);
        outport (LPT0, 0x00);
        delay(v);
    }
}

```

ANEXA 4

PROGRAME-SURSĂ DE DETERMINARE A ABATERILOR DE LA CIRCULARUTATE, DE LA CILINDRICITATE ȘI A BĂȚĂII RADIALE

```
/*Program de achizitie & conversie pentru determinarea  
ABATERII DE LA CIRCULARITATE */
```

```
#include<stdio.h>  
#include<conio.h>  
#include <iostream.h>  
#include<math.h>  
#include <graphics.h>  
#include <process.h>  
#include <alloc.h>  
#include <dos.h>  
#define ADRTIRO 0x320  
#define AB 0x340  
#define PI 3.1415926  
#define LPT0 0x378  
#define TRAD 1  
int i,i1,se=2,v=5;  
float x,valmm;  
void axax(void);  
void manual (void);  
void automat (void);  
void pregatire_axa(void);  
void can(void);  
float trad (int axa);  
int kbstatus(void);  
  
void main()  
{  
    char metoda;  
    clrscr();  
    printf("\n introduceti codificarea vitezei:");  
    scanf("%d",&v);  
    // initializari  
    outportb(0x32f,0xc3);    outportb(0x32f,0x80);    outportb(0x32f,0x49);  
                           // canal 7  
    outportb(0x32d,0xc3);    outportb(0x32d,0x80);    outportb(0x32d,0x49);  
                           // canal 6  
    outportb(0x32b,0xc0);    outportb(0x32b,0x80);    outportb(0x32b,0x48);  
                           // canal 5  
    pregatire_axa();  
    while(1) // ciclu infinit-iesire cu CTRL-BREAK  
    {  
        printf("/n Doriti deplasare manuala sau reglare automata? m pt.  
deplasare manuala");  
        cin>>metoda;  
        if (metoda=='m')    manual();  
                            else automat();  
    }  
}
```

```

    }
void automat(void)
{
    clrscr();
    int kbst, z5=0;
    float poz;
    printf("\n Caps Lock pentru iesire din modul de lucru automat  \n");
    while( z5==0)
    {
        kbst=kbstatus();
        z5=kbst & 0x40;
        cout<<"\n introduceti pozitia sectiunii:";
        cin>>poz;
        x=trad(0);
        if (fabs(x-poz)<=0.003)
            can();
        else
        {
            if (x > (poz+0.003)) // deplasare spre dreapta
                { se=2; axax();}
            if (x < (poz-0.003)) // deplasare spre stanga
                {se=1; axax();}
        }
        gotoxy(5,17);
        printf(" indicatie TFNIL: x=%6.3f  indicatie TP-MF: d=%6.3f ",
x, valmm);
    }
}

void manual(void)
{
    int kbst,z1,z2,z5=0;
    clrscr();
    printf("\n mentineti apasat shift dr. -> X+,  shift stg. -> X-");
    printf("\n Caps Lock pentru iesire din modul de lucru manual  \n");
    while( z5==0)
    {
        kbst=kbstatus();
        z1=kbst & 0x01;
        z2=kbst & 0x02;
        z5=kbst & 0x40;
        i++;
        if(z1) { se=1;    axax();}
        if(z2) { se=2;    axax();}
        x=trad(0);
        gotoxy(5,17);
        printf("indicatie TFNIL: x=%6.3f ", x);
        can();
    }
}

void pregatire_axa(void)
{
    outportb(ADRTIRO+0x5,0x4);
    outportb(ADRTIRO+0xf,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0x4,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0xe,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0x9,0x4); // o axa este initializata cu 2^18=262.144
    outportb(ADRTIRO+0xb,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0x8,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0xa,0x00);
}

```

```

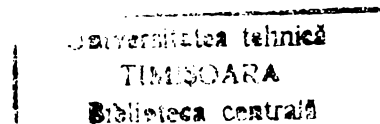
float trad (int axa)
{
    unsigned long impuls=0L;
    int i, result[4], port;
    long rez;
    if(axa==0) {port=ADRTIRO+0xe; outportb(ADRTIRO+0xf,0x3);}
        else {if(axa==1) {port=ADRTIRO+0xc;
outportb(ADRTIRO+0xd,0x3);}}
    for (i=0; i<=3; i++)
        {
            result[i]=inportb(port);
        }
    impuls=1L*result[0]+256L*result[1]+256L*256*result[2];
    rez=(impuls-262144);
    return 0.001*rez*TRAD;
}

void can(void)
{
    float valv, valv1, et=37.1, k=0.07142;
    int dom=20, nr_biti=12, polar=1, te=1;
    int msb, lsb, val, i, j=0;
    FILE *fpo;
    if((fpo=fopen("c:\\bc\\files\\date.txt", "w"))==NULL)
        {
            puts("nu pot crea fisierul destinatie");
            return;
        }
    outportb (AB + 3, 0x99); /*programarea portului B-8255 ca port
iesire*/
    outportb (AB+1, j); /* selectare canal */
    outportb (AB + 8, 0); /* start conv. pe 12 biti */
    while ( (inportb (AB + 10) && 1) != 1 )
        { delay(200); } /* asteptare pina la terminare conv */
    delay(te); /* perioada esantionare intre 2 CAN */
    msb = inportb (AB + 8);
    lsb = inportb (AB + 9);
    gotoxy(5,21);
    val = msb*16+ lsb/16;
    valv=(val/pow(2,nr_biti))*dom;
    valv1=valv- polar*dom/2;
    valmm=et+valv1*k;
    printf( "\n indicatia curenta a trad. pneumo-magnetofluidic: \n" );
    printf( " val_biti=%4d msb=%3d lsb=%3d valv=%5.3f val_V=%5.3f
val_mm=%5.3f", val,msb,lsb,valv,valv1,valmm);
    fprintf(fpo, " \n %5.3f",valmm);
    fclose(fpo);
}

int kbstatus(void)
{
    union REGS ireg;
    ireg.h.ah=0x02;
    int86(0x16,&ireg,&ireg);
    return ireg.h.al;
}

void axax(void)
{
    if(se==1) /* sens x+ pe reper */
        {
            il++;
        }
}

```



```

        outport(LPT0,0x05);
        delay(v);
        gotoxy(15,15);
        printf(" i+=%d",i1);
        outport(LPT0,0x01);
        delay(v);
    }
    if(se==2)
    {
        i1--;
        outport(LPT0,0x04);
        delay(v);
        gotoxy(15,16);
        printf(" i-=%d",i1);
        outport(LPT0,0x00);
        delay(v);
    }
}

/* Program de prelucrare de date achizitionate in fisier ,
de calcul & grafica a abaterii de la circularitate
prin metoda cercului celor mai mici patrate */

#include<iostream.h>
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<graphics.h>
#define PI 3.141592653
#define N 32

void grafic (void);
float sqr(float);
float td[32];

void main(void)
{
    FILE *fpo;
    if((fpo=fopen("c:\\bc\\files\\date.txt","r"))==NULL)
    {
        printf("nu s-a gasit fisierul");
        return ;
    }
    for(int i=0;i<N && fscanf(fpo,"%f",&td[i])>0;i++);
    if(i!=N)
    {
        printf("\n date insufciente");
        return;
    }
    /*float bb;
    if(fscanf(fpo,"%f",&bb)>0)
    {
        printf("\ndate prea multe");
        return;
    } */
    fclose(fpo);
    grafic();
}

void grafic (void)
{
    clrscr();
    int gdriver=DETECT, gmode, ks=40, x_max, y_max;

```

```

initgraph (&gdriver, &gmode, "c:\\bc\\bgi");
x_max=getmaxx();
y_max=getmaxy();
setbkcolor(15);
setcolor(8);
setlinestyle(1,1,1);
line(x_max/2,55,x_max/2,y_max-55);
outtextxy(x_max-105,y_max/2+5,"+x");
line(90,y_max/2,x_max-90,y_max/2);
outtextxy(x_max/2-20,55,"+y");
outtextxy(x_max/2+7,y_max/2+5,"O'");
setcolor(4);
setlinestyle(0,1,3);
outtextxy(20,20,"ABATEREA DE LA CIRCULARITATE");
setcolor(12);
outtextxy(20,35,"Metoda cercului celor mai mici patrute");
int i1;
float a=0, b=0, r=0, alfa;
for(i1=alfa=0; alfa<2*PI;i1++,alfa+=2*PI/N)
{
    a=a+td[i1]/2*cos(alfa);
    b=b+td[i1]/2*sin(alfa);
}
a=2*a/N;
b=2*b/N;
float r_max,r_min,r_calc,afc;
r_max=r_min=sqrt(sqr(a-td[0]/2)+sqr(b));
for(r=i1=alfa=0; alfa<2*PI;i1++,alfa+=2*PI/N)
{
    r_calc=sqrt(sqr(a-td[i1]/2*cos(alfa))+sqr(+b-
td[i1]/2*sin(alfa)));
    if(r_max<r_calc)
        r_max=r_calc;
    if(r_min>r_calc)
        r_min=r_calc;
    r+=r_calc;
}
r/=N;
afc=r_max-r_min;
setcolor(12);
setlinestyle(0,1,1);
circle(x_max/2+a*ks,y_max/2-b*ks,r*ks);
setcolor(13);
circle(x_max/2+a*ks,y_max/2-b*ks,r_max*ks);
circle(x_max/2+a*ks,y_max/2-b*ks,r_min*ks);
setcolor(1);
circle(x_max/2+a*ks,y_max/2-b*ks,2);
setfillstyle(1,1);
floodfill(x_max/2+a*ks,y_max/2-b*ks,1);
outtextxy(x_max/2-17,y_max/2-15,"O");
moveto(x_max/2+ks*td[0]/2*cos(alfa), y_max/2-ks*td[0]/2*sin(alfa));
for(i1=alfa=0; alfa<2*PI;i1++,alfa+=2*PI/N)
{
    setlinestyle(0,1,3);
    lineto(x_max/2+ks*td[i1]/2*cos(alfa), y_max/2-
ks*td[i1]/2*sin(alfa));
    circle(x_max/2+ks*td[i1]/2*cos(alfa), y_max/2-
ks*td[i1]/2*sin(alfa), 2);
}
lineto(x_max/2+ks*td[0]/2*cos(alfa), y_max/2-ks*td[0]/2*sin(alfa));
getch();
closegraph();

```

```

    cout<<"\n a= "<<a<<" b= "<<b<<" r= "<<r<<"\n Rmax= "<<r_max<<" Rmin=
"<<r_min<<" AFC= "<<afc;
    getch();
}

```

```

float sqr(float x)
{
    return x*x;
}

```

/*Program de achizitie & conversie pentru determinarea
ABATERII DE LA CILINDRICITATE */

```

#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include <iostream.h>
#include<math.h>
#include <graphics.h>
#include <process.h>
#include <alloc.h>
#include <dos.h>
#define ADRTIRO 0x320
#define AB 0x340
#define PI 3.1415926
#define LPT0 0x378
#define TRAD 1
int i, i1, j, se=2, v=5, m, l, t;
float x, valmm;
void axax(void);
void manual (void);
void automat (void);
void pregatire_axa(void);
void can(void);
float trad (int axa);
int kbstatus(void);

void main()
{
    char metoda;
    clrscr();
    printf("\n introduceti codificarea vitezei:");
    scanf("%d",&v);
    // initializari
    outportb(0x32f,0xc3);    outportb(0x32f,0x80);    outportb(0x32f,0x49);
                          // canal 7
    outportb(0x32d,0xc3);    outportb(0x32d,0x80);    outportb(0x32d,0x49);
                          // canal 6
    outportb(0x32b,0xc0);    outportb(0x32b,0x80);    outportb(0x32b,0x48);
                          // canal 5
    pregatire_axa();
    while(1) // ciclu infinit-iesire cu CTRL-BREAK
    {
        printf("/n Doriti deplasare manuala sau automata? m pt.
deplasare manuala");
        cin>>metoda;
        if (metoda=='m')    manual();
            else automat();
    }
}

void automat(void)
{
    clrscr();

```



```

int kbst, z5=0;
printf("\n Caps Lock pentru iesire din modul de lucru automat \n");
while( z5==0)
{
    float poz, init;
    kbst=kbstatus();
    z5=kbst & 0x40;
    cout<<"\n introduceti pozitia sectiunii initiale:";
    cin>>init;
    printf("introduceti numarul de sectiuni m=");
    scanf("%d",&m);
    printf("introduceti lungimea de referinta l=");
    scanf("%d",&l);
    printf("introduceti timpul de achizitie in s =");
    scanf("%d",&t);
    x=trad(0);
    for(int j=1;j<=m;j++)
    {
        poz=init+l*(j-1)/m;
        if (fabs(x-poz)<=0.003)
        {
            can();
            sleep(t);
        }
        else
        {
            if (x > (poz+0.003)) // deplasare spre dreapta
                { se=2; axax();}
            if (x < (poz-0.003)) // deplasare spre stanga
                {se=1; axax();}
        }
    }
    gotoxy(5,17);
    printf(" indicatie TFNIL: x=%6.3f  indicatie TP-MF: d=%6.3f ",
x, valmm);
}

void manual(void)
{
    int kbst,z1,z2,z5=0;
    clrscr();
    printf("\n mentineti apasat shift dr. -> X+,  shift stg. -> X-");
    printf("\n Caps Lock pentru iesire din modul de lucru manual \n");
    while( z5==0)
    {
        kbst=kbstatus();
        z1=kbst & 0x01;
        z2=kbst & 0x02;
        z5=kbst & 0x40;
        i++;
        if(z1) { se=1; axax();}
        if(z2) { se=2; axax();}
        x=trad(0);
        gotoxy(5,17);
        printf("indicatie TFNIL: x=%6.3f ", x);
    }
}

void pregatire_axa(void)
{
    outportb(ADRTIRO+0x5,0x4);
}

```

```

    outportb(ADRTIRO+0xf,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0x4,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0xe,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0x9,0x4); // o axa este initializata cu 2^18=262.144
    outportb(ADRTIRO+0xb,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0x8,0x00);
    outportb(ADRTIRO+0xa,0x00);
}

float trad (int axa)
{
    unsigned long impuls=0L;
    int i, result[4], port;
    long rez;
    if(axa==0) {port=ADRTIRO+0xe; outportb(ADRTIRO+0xf,0x3);}
    else {if(axa==1) {port=ADRTIRO+0xc;
outportb(ADRTIRO+0xd,0x3);}}
    for (i=0; i<=3; i++)
        {
            result[i]=inportb(port);
        }
    impuls=1L*result[0]+256L*result[1]+256L*256*result[2];
    rez=(impuls-262144);
    return 0.001*rez*TRAD;
}

void can(void)
{
    float valv, valv1, et= 37.1, k=0.07142;
    int dom=20, nr_biti=12, polar=1, te=1;
    int msb, lsb, val,i;
    char *path="c:\\bc\\files\\date";
    char nume[100];
    FILE *fpo;
    sprintf(nume,"%s%d%s",path,j,".txt");
    if((fpo=fopen(nume,"w"))==NULL)
        {
            printf("nu pot crea fisierul destinatie");
            return ;
        }
    outportb (AB + 3, 0x99); /*programarea portului B-8255 ca port
iesire*/
    outportb (AB+1, 0); /* selectare canal */
    outportb (AB + 8, 0); /* start conv. pe 12 biti */
    while ( (inportb (AB + 10) && 1) != 1 )
        { delay(200);} /* asteptare pina la terminare conv */
    delay(te);/* perioada esantionare intre 2 CAN */
    msb = inportb (AB + 8);
    lsb = inportb (AB + 9);
    gotoxy(5,21);
    val = msb*16+ lsb/16;
    valv=(val/pow(2,nr_biti))*dom;
    valv1=valv- polar*dom/2;
    valmm=et+valv1*k;
    printf( "\n indicatia curenta a trad. pneumo-magnetofluidic: \n" );
    printf( " val_biti=%4d msb=%3d lsb=%3d valv=%5.3f val_V=%5.3f
val_mm=%5.3f", val,msb,lsb,valv,valv1,valmm);
    fprintf(fpo, " \n %5.3f",valmm);
    fclose(fpo);
}

int kbstatus(void)
{

```

```

    union REGS ireg;
    ireg.h.ah=0x02;
    int86(0x16,&ireg,&ireg);
    return ireg.h.al;
}

void axax(void)
{
    if(se==1) /* sens x+ pe reper */
    {
        il++;
        outport(LPT0,0x05);
        delay(v);
        gotoxy(15,15);
        printf(" i+=%d",il);
        outport(LPT0,0x01);
        delay(v);
    }
    if(se==2)
    {
        il--;
        outport(LPT0,0x04);
        delay(v);
        gotoxy(15,16);
        printf(" i-=%d",il);
        outport(LPT0,0x00);
        delay(v);
    }
}

/* Program de prelucrare de date achizitionate in fisier ,
de calcul & grafica a abaterii de la cilindricitate
prin metoda proiectiilor normale pe axa medie */

#include<iostream.h>
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<graphics.h>
#define PI 3.141592653
#define N 32
#define M 20

void grafic (void);
float sqr(float);
float td[N][M];
int m,l;

void main(void)
{
    char *path="c:\\bc\\files\\date";
    char nume[100];
    printf("\n introduceti numarul de sectiuni j=");
    scanf("%d",&m);
    printf(" introduceti lungimea de referinta l=");
    scanf("%d",&l);
    FILE *fpo;
    for(int j=1;j<=m;j++)
    {
        sprintf(nume,"%s%d%s",path,j,".txt");
        if((fpo=fopen(nume,"r"))==NULL)
        {
            printf("nu s-a gasit fisierul");
        }
    }
}

```

```

        return ;
    }
    for(int i=0;i<N && fscanf(fpo,"%f",&td[i][j])>0;i++);
    if(i!=N)
    {
        printf("\n date insuficiente");
        return;
    }
    /*float bb;
    if(fscanf(fpo,"%f",&bb)>0)
    {
        printf("\n date suplimentare");
        return;
    } */

    }
    fclose(fpo);
    grafic();
}

void grafic (void)
{
    clrscr();
    int gdriver=DETECT, gmode,ks=40, x_max, y_max;
    initgraph (&gdriver, &gmode, "c:\\bc\\bgi");
    x_max=getmaxx();
    y_max=getmaxy();
    setbkcolor(15);
    setcolor(8);
    setlinestyle(1,1,1);
    line(x_max/2, 55,x_max/2,y_max-55);
    outtextxy(x_max-105,y_max/2+5,"+x");
    line(90,y_max/2,x_max-90,y_max/2);
    outtextxy(x_max/2-20,55,"+y");
    outtextxy(x_max/2+7,y_max/2+5,"O");
    setcolor(4);
    setlinestyle(0,1,3);
    outtextxy(20,20,"ABATEREA DE LA CILINDRICITATE");
    setcolor(12);
    outtextxy(20,35,"Metoda proiectiilor normale pe axa medie");
    float alfa;
    int j,il;
    float a[M],b[M],c[N][M];
    for(j=1;j<=m;j++)
    {
        a[j]=b[j]=0;
        for(il=alfa=0; alfa<2*PI;il++,alfa+=2*PI/N)
        {
            a[j]=a[j]+td[il][j]/2*cos(alfa);
            b[j]=b[j]+td[il][j]/2*sin(alfa);
        }
        a[j]=2*a[j]/N;
        b[j]=2*b[j]/N;
    }
    float sx=0,sy=0,sjx=0,sjy=0;
    float d[M],e[M],r[N][M];
    float num=(float)2/(m*(m*m-1));
    for(j=1;j<=m;j++)
    {
        sx+=a[j];
        sy+=b[j];
        sjx+=j*a[j];
        sjy+=j*b[j];
    }
}

```

```

    d[j]=3*(2*j-m-1)*sjx+(m-1)*(-3*j+2*m+5)*sx;
    e[j]=3*(2*j-m-1)*sjy+(m-1)*(-3*j+2*m+5)*sy;
    d[j]*=num;
    e[j]*=num;
}
float teta[M];
for(j=1;j<=m;j++)
    for(i1=alfa=0; alfa<2*PI;i1++,alfa+=2*PI/N)
        {
            teta[j]=atan(e[j]/d[j]);
            r[i1][j]=sqrt(d[j]*d[j]+e[j]*e[j]+td[i1][j]*td[i1][j]/4-
td[i1][j]*(d[j]*cos(alfa)+e[j]*sin(alfa)));
        }
float rmax,rmin,afl;
int jmax, jmin;
rmax=rmin=r[0][1];
jmax=jmin=1;
for(j=1;j<=m;j++)
    for(i1=alfa=0; alfa<2*PI;i1++,alfa+=2*PI/N)
        {
            if(rmax<r[i1][j])
                {
                    rmax=r[i1][j];
                    jmax=j;
                }
            if(rmin>r[i1][j])
                {
                    rmin=r[i1][j];
                    jmin=j;
                }
        }
afl=rmax-rmin;
//printf("rmax = %5.4f rmin= %5.4f",rmax,rmin);
setlinestyle(0,1,1);
circle(x_max/2+d[jmax]*ks,y_max/2-e[jmax]*ks,rmax*ks);
circle(x_max/2+d[jmin]*ks,y_max/2-e[jmin]*ks,rmin*ks);
for(j=1;j<=m;j++)
    {
        setlinestyle(0,1,3);
        setcolor(j+2);
        circle(x_max/2+d[j]*ks,y_max/2-e[j]*ks,1);
        moveto(x_max/2+ks*td[0][j]/2, y_max/2);
        for(i1=alfa=0; alfa<2*PI;i1++,alfa+=2*PI/N)
            {
                lineto(x_max/2+ks*td[i1][j]/2*cos(alfa), y_max/2-
ks*td[i1][j]/2*sin(alfa));
                circle(x_max/2+ks*td[i1][j]/2*cos(alfa), y_max/2-
ks*td[i1][j]/2*sin(alfa), 2);
            }
        lineto(x_max/2+ks*td[0][j]/2*cos(alfa), y_max/2-
ks*td[0][j]/2*sin(alfa));
    }
getch();
closegraph();

initgraph (&gdriver, &gmode, "c:\\bc\\bgi");
x_max=getmaxx();
y_max=getmaxy();
setbkcolor(15);
setcolor(8);
setlinestyle(1,1,1);
line(x_max/10, 55,x_max/10,y_max-55);
outtextxy(x_max-105,y_max/2+5,"+z");

```

```

line(x_max/10,y_max/2,x_max-90,y_max/2);
outtextxy(x_max/10-20,55,"+y");
outtextxy(x_max/10+7,y_max/2+5,"0");
setcolor(4);
setlinestyle(0,1,3);
outtextxy(20,20,"ABATEREA DE LA CILINDRICITATE");
setcolor(12);
outtextxy(20,35,"Metoda proiectiilor normale pe axa medie");
for(j=1;j<=m;j++)
{
    setcolor(j+2);
    setlinestyle(1,1,3);
    circle(x_max/10+1*(j-1)/M,y_max/2-b[j]*ks,2);
    setlinestyle(2,1,1);
    line(x_max/10+1*(j-1)/M,y_max/2-td[8][j]/2*ks, x_max/10+1*(j-
1)/M,y_max/2+td[24][j]/2*ks);
    char numar[5];
    sprintf(numar,"O%d",j);
    outtextxy(x_max/10+1*(j-1)/M-20,y_max/2+8,numar);
}
setcolor(4);
setlinestyle(0,1,1);
for(j=1;j<m;j++)
    line(x_max/10+1*(j-1)/M,y_max/2-e[j]*ks, x_max/10+1*j/M,y_max/2-
e[j+1]*ks);
setcolor(12);
setlinestyle(0,1,3);
for(j=1;j<=m;j++)
{
    if(j!=m)
    {
        line(x_max/10+1*(j-1)/M,y_max/2-td[8][j]/2*ks,
x_max/10+1*j/M,y_max/2-td[8][j+1]/2*ks);
        line(x_max/10+1*(j-1)/M,y_max/2+td[24][j]/2*ks,
x_max/10+1*j/M,y_max/2+td[24][j+1]/2*ks);
    }
    circle(x_max/10+1*(j-1)/M,y_max/2-td[8][j]/2*ks,2);
    circle(x_max/10+1*(j-1)/M,y_max/2+td[24][j]/2*ks,2);
}
getch();
closegraph();
cout<<" AFL= "<<afl;
getch();
}

float sqr(float x)
{
    return x*x;
}

/*    Program de prelucrare de date achizitionate in fisier ,
      de calcul & grafica a bataii radiale    */

#include<iostream.h>
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<graphics.h>
#define PI 3.141592653
#define N 32

void grafic (void);
float sqr(float);

```

```

float td[32];

void main(void)
{
    FILE *fpo;
    if((fpo=fopen("c:\\bc\\files\\date.txt","r"))==NULL)
    {
        printf("\n fisierul nu exista");
        return ;
    }
    for(int i=0;i<N && fscanf(fpo,"%f",&td[i])>0;i++);
    if(i!=N)
    {
        printf("\n date insufciente");
        return;
    }
    /*float bb;
    if(fscanf(fpo,"%f",&bb)>0)
    {
        printf("\n date suplimentare");
        return;
    } */
    fclose(fpo);
    grafic();
}

```

```

void grafic (void)
{
    for(int i1=0; i1<32; i1++)
    {
        cout<<"\n"<<td[i1];
    }
    clrscr();
    int gdriver=DETECT, gmode,ks=20, x_max, y_max;
    initgraph (&gdriver, &gmode, "c:\\bc\\bgi");
    x_max=getmaxx();
    y_max=getmaxy();
    setbkcolor(15);
    setcolor(8);
    setlinestyle(1,1,1);
    line(x_max/2, 55,x_max/2,y_max-55);
    outtextxy(x_max-105,y_max/2+5,"+x");
    line(90,y_max/2,x_max-90,y_max/2);
    outtextxy(x_max/2-20,55,"+y");
    outtextxy(x_max/2+7,y_max/2+5,"O'");
    setcolor(4);
    setlinestyle(0,1,3);
    outtextxy(20,20,"BATAIA RADIALA");
    float r_max,r_min,r_calc,br,alfa;
    r_max=r_min=td[0];
    for(i1=alfa=0; alfa<2*PI;i1++,alfa+=2*PI/N)
    {
        r_calc=td[i1];
        if(r_max<r_calc)
            r_max=r_calc;
        if(r_min>r_calc)
            r_min=r_calc;
    }
    br=r_max-r_min;
    setlinestyle(0,1,1);
    setcolor(13);
    circle(x_max/2,y_max/2,r_max*ks);
    circle(x_max/2,y_max/2,r_min*ks);
}

```

```
setcolor(1);
moveto(x_max/2+ks*td[0]*cos(alfa), y_max/2-ks*td[0]*sin(alfa));
for(i1=alfa=0; alfa<2*PI;i1++,alfa+=2*PI/N)
{
    setlinestyle(0,1,3);
    lineto(x_max/2+ks*td[i1]*cos(alfa), y_max/2-
ks*td[i1]*sin(alfa));
    circle(x_max/2+ks*td[i1]*cos(alfa), y_max/2-
ks*td[i1]*sin(alfa), 2);
}
lineto(x_max/2+ks*td[0]*cos(alfa), y_max/2-ks*td[0]*sin(alfa));
getch();
closegraph();
cout<<"\n Rmax= "<<r_max<<" Rmin= "<<r_min<<" Br= "<<br;
getch();
}

float sqr(float x)
{
    return x*x;
}
```