

GEOMETRIA TOPOLOGICA A CONSTRUCTIILOR MECANICE

**Raport anual grant ID_791
Contract 738/2009**

**Colectiv: ș. l. dr. ing. Virgil Gabriel TEODOR
 prof. dr. ing. Nicolae OANCEA
 prof. dr. ing. Alexandru EPUREANU
 asist. dr. ing. Florin Bogdan MARIN
 cercet. drd. ing. Ionut POPA**

Anul 2009

Cuprins

Cuprins	2
Obiectivul I. Dezvoltarea conceptului de geometrie topologică	
a construcțiilor mecanice	3
1.1. Modelarea topologică a suprafețelor	3
1.2. Metodologia de abordare a problematicii privind modelarea suprafețelor prin algoritmi genetici, rețele neuronale și prin metoda circulației parametrilor.....	15
1.3. Modelarea topologică a geometriei construcțiilor mecanice	21
1.4. Geometria topologică a construcțiilor funcționale.....	22
1.5. Geometria topologică a construcțiilor tehnologice	24
1.6. Geometria topologică a construcțiilor metrologice.....	26
Obiectivul II. Identificarea (modelarea) structurilor topologice	34
2.1. Descrierea topologică a geometriei construcțiilor mecanice	34
2.2. Structurarea topologică a construcțiilor mecanice	50
2.3. Tolerarea dimensională și de formă a structurilor topologice	55
Obiectivul III. Elaborarea unor principii de proiectare topologică	
a construcțiilor mecanice	66
3.1. Principii de proiectare topologică	66
Bibliografie	80
Anexe	83
Lista lucrărilor publicate în cadrul grantului ID_791/2009.....	83
Topological Modelling of the Part Geometry in Manufacturing.....	84
The Gear Hub Profiling for Machining Surfaces with Discreetly Expressed Surfaces.....	90
A New Approach of the Mechanical Structures	
Topological Geometry – Curves Types Identification.....	96
Multi-Flute Helical Drill With Elliptical Cutting Edges	100

Obiectivul I. Dezvoltarea conceptului de geometrie topologică a construcțiilor mecanice

1.1. Modelarea topologică a suprafețelor

În manufacturare, exigențele privind calitatea tind să fie îndeplinite în timp real și totodată să fie integrate în procesul de fabricație. În zilele noastre, mașinile-unelte moderne sunt capabile să genereze suprafețe de o mare complexitate și, ca urmare, principala problemă nu o mai constituie prelucrarea suprafețelor ci controlul geometriei acestor suprafețe.

Problema controlului dimensional este una dintre cele mai importante datorită cererii tot mai mari, din partea clienților, de produse personalizate, realizate în loturi mici de fabricație.

Este demn de remarcat faptul că strategia de compensare a deviațiilor tinde să o înlocuiască pe cea de reducere a erorilor.

Literatura tehnică de specialitate prezintă două tendințe privind generarea, măsurarea și tolerarea geometriei pieselor. Prima tendință este reprezentată de monitorizarea continuă a dimensiunilor și formei în cursul prelucrării semifabricatului, pe toată durata procesului de fabricație. Cea de a doua tendință o reprezintă tolerarea, în principal, după criteriul funcționalității reperelor.

Literatura de specialitate evidențiază faptul că nu există o abordare unitară privind generarea, inspectarea și tolerarea suprafețelor din punctul de vedere al poziționării acestora în ansamblul din care fac parte.

Din aceste motive putem afirma că standardele actuale referitoare la abaterile dimensionale și de poziție nu mai corespund evoluțiilor recente în domeniul proiectării și fabricării mașinilor-unelte.

Acest aspect este subliniat și de faptul că evaluarea deviațiilor de formă, poziție și dimensiuni geometrice se face pe baza a două standarde principale: ISO/FDIS 1101:2000 (E) „*Geometrical specification of the product—Geometrical tolerance—Form, orientation, position and beat tolerances*” și ISO/TR 5460:1985 „*Geometrical tolerances —Form, orientation, position and beat tolerances— Guiding principles*”

O analiză aprofundată a standardelor prezentate evidențiază că acestea prezintă unele ambiguități din punct de vedere matematic.

În condițiile în care fiecare producător de mașini de măsurat în coordonate poate interpreta în mod diferit aceste standarde, este posibil ca softurile utilizate pentru identificarea suprafețelor să conducă la rezultate diferite la măsurarea aceluiași reper.

Acest lucru poate fi evidențiat de următorul exemplu: În conformitate cu ISO/FDIS 1101:2000 (E), pentru o suprafață cilindrică, zona toleranței de la cilindricitate este limitată la doi cilindri coaxiali a căror diferență de rază este T . În același timp, standardul arată că cilindricitatea suprafeței este considerată corectă dacă suprafața respectivă este conținută între doi cilindri coaxiali a căror diferență de raze este T . Depinzând de poziția axelor celor doi cilindri și de valorile razelor lor, aceștia pot fi aleși astfel încât diferențele dintre razele lor să aibă cea mai mică valoare posibilă.

În figura 1.1, sunt prezentate cele două cazuri, primul fiind reprezentat de doi cilindri coaxiali A_1 având axa z_1 și diferență axelor Δr_1 , și al doilea caz reprezentat de doi cilindri coaxiali A_2 de rază z_2 și având diferența razelor Δr_2 . Standardul nu menționează nimic despre modul în care sunt determinați cei doi cilindri, modul în care

aceștia trebuie să aproximeze neregularitățile suprafeței reale sau dacă există zone în care aceste neregularități depășesc suprafața cilindrilor. Aceste ambiguități sunt generate de faptul că nu sunt utilizate metode matematice riguroase pentru descrierea suprafețelor.

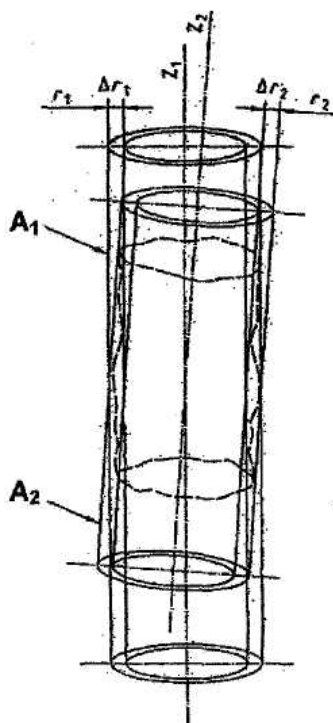


Fig. 1.1. Cilindri coaxiali care limitează suprafața reală

Similar, poate fi luat în considerație cazul în care se tolerează distanța și abaterea de poziție a două suprafețe plane. Dacă cele două plane nu sunt perfect paralele, distanța între cele două suprafețe nu poate avea decât o definiție ambiguă.

Concluzia celor prezentate mai sus este că, în determinarea abaterilor de formă, poziție și dimensiuni, conform standardelor în vigoare, sunt introduse o serie de erori a căror mărime și natură nu pot fi determinate și care influențează rezultatele măsurătorilor.

În ultimul timp este utilizată pe scară tot mai largă metoda măsurării suprafețelor pe mașini de măsurat în coordonate (**Coordinate Measuring Machines – CMM**).

Utilizarea mașinilor de măsurat în coordonate pentru culegerea norilor de puncte de pe suprafața reală și interpretarea acestor puncte are o serie de avantaje față de sistemul clasic de măsurare, ceea ce a condus la extinderea utilizării CMM ca și la îmbunătățirea modului de lucru al acestora.

Totuși, există câteva neajunsuri care nu pot fi neglijate:

- mașinile de tip CMM nu comunică definiția erorii pe care o afișează, chiar producătorii de mașini de măsurat în coordonate introduc propriile definiții ale deviațiilor, ceea ce impune necesitatea adoptării unor standarde care să definească tipurile de erori în mod clar și pe baze matematice riguroase;

- se afirmă că este posibil a se culege un număr mare de puncte la explorarea suprafeței și că, odată cu creșterea numărului de puncte, crește și precizia evaluării suprafeței. Pe de altă parte nu se arată cât de mare trebuie să fie acest număr de puncte sau care este riscul dacă se investighează un număr mic de puncte. Practic, nu se poate arăta care este gradul de încredere atunci când se analizează un anumit număr de puncte.

Drept urmare, ar fi necesar un sistem de standarde care să definească mai corect, din punct de vedere matematic, modul de interpretare al norilor de puncte culese de pe suprafața reală prelucrată.

Putem afirma că, un model, mai aproape de realitate al geometriei reperelor, este cel bazat pe modelarea topologică a geometriei reperelor prin care se propune înlocuirea modelării individuale a suprafețelor elementare cu modelarea ansamblurilor de suprafețe, care formează interfețele între reperele din componența unui ansamblu. Prin acest mod de a privi suprafețele reperelor, se minimizează eroarea apărută la identificarea acestora.

Este important de subliniat faptul că familiile de suprafețe trebuie alese astfel încât să se ia în considerare acele forme, care sunt importante din punctul de vedere al funcționalității piesei. Aceasta reprezintă un prim criteriu de selectare a acelor, care vor alcătui ansamblul de suprafețe.

Cel de al doilea criteriu îl constituie modul de prindere pentru prelucrare. Ansamblul de suprafețe poate fi privit ca fiind compus din acele suprafețe care se prelucreează la o singură prindere și suprafețele pe care se face prinderea reperului.

În această lucrare, sunt prezentate câteva dintre tehnicile dezvoltate de către autori în scopul de a realiza modelarea topologică a geometriei pieselor.

1.1.1. Determinarea toleranțelor la abaterile de formă pe baza măsurării punctelor cu CMM [1]

Se propune utilizarea unui nou mod de inspecție a suprafețelor generate, grație sistemului CAI, care este frecvent utilizat în manufacturarea suprafețelor pieselor, utilizând produse soft din domeniul CAM.

Astfel, se modifică percepția asupra dimensiunii unei suprafețe și asupra câmpului de toleranță al acesteia, forma clasică de acceptare a preciziei de realizare a dimensiunii, mai ales pentru producția în masă.

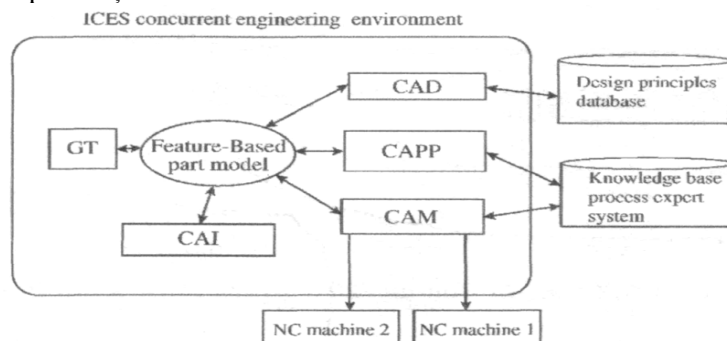


Fig. 1.2. Mediul de inginerie concurențială [1]

O problemă specifică este cea referitoare la numărul de puncte de măsurare pentru caracterizarea suficientă a formei și dimensiunii suprafeței generate. Astfel, Bernard [1] propune un set de reguli specifice pentru măsurarea unui cerc sau a unui cilindru de revoluție a unei piese supuse măsurării utilizând CMM.

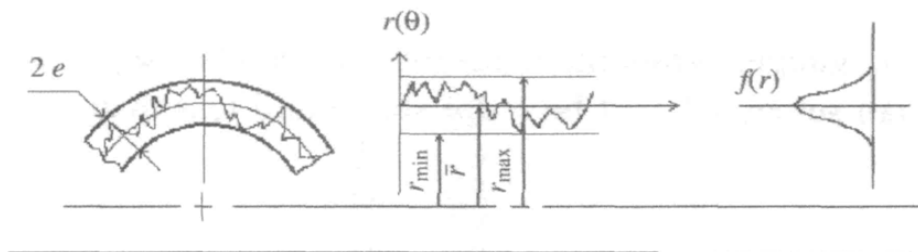


Fig. 1.3. Distribuția normală a erorii de la cilindricitate [1]

Se propune un algoritm pentru determinarea numărului de puncte de măsurare „n” în forma:

$$n_1 \geq \left[\frac{t_{1-\alpha/2} \cdot S}{e} \right]^2 \text{ și } t_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \leq e \quad (1.1)$$

cu $t_{0.975} = 2 \dots 5$, pentru un interval de încredere de 95% și e – mărimea erorii dimensionale (toleranța).

Se stabilește o regulă a punctelor măsurate, concluzionând că un număr de 5-7 măsurători sunt necesare pentru satisfacerea cerinței.

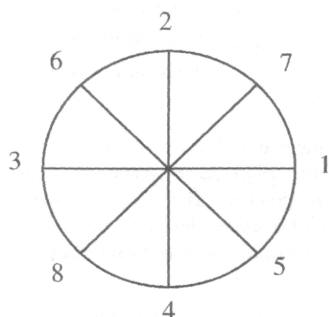


Fig. 1.4. Determinarea punctelor măsurate [1]

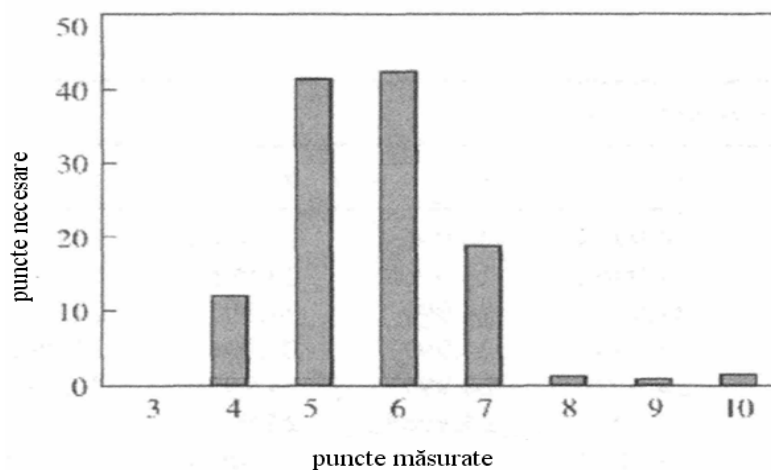


Fig. 1.5. Rezultate pentru măsurarea unui calibru-inel [1]

1.1.2. O abordare statistică a evaluării toleranțelor de la circularitate și cilindricitate [2]

În cele mai multe cazuri, coordonatele obținute pe CMM pot caracteriza forma și dimensiunea unei suprafețe.

Mult mai aproape de realitatea descrierii formei dimensiunii și poziției unei suprafețe se demonstrează a fi rezultatul prelucrării coordonatelor punctelor măsurate, în vederea estimării mărimii toleranței unei dimensiuni, utilizând modele specifice.

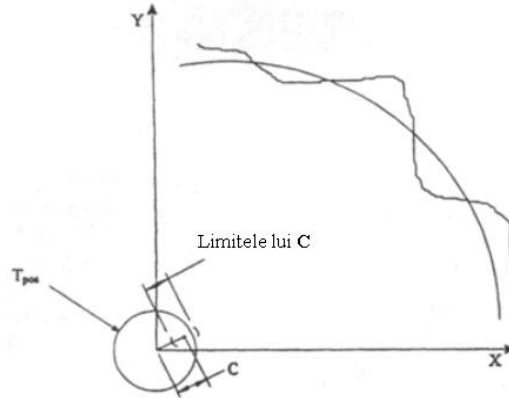


Fig. 1.6. Toleranța de poziție a unui cerc [2]

Pentru o formă circulară, în figură este prezentată poziția evaluată a abaterilor. Centrul cercului, în poziția nominală, este prezentat în originea sistemului de coordonate și zona toleranței este reprezentată ca o zonă circulară, putându-se calcula excentricitatea estimată:

$$\hat{C} + \sqrt{g \cdot F_{1-2\alpha; g, n-3} \cdot S^2 \cdot (\hat{C})} \leq \frac{T_{pos}}{2} \quad (1.2)$$

T_{pos} – toleranța de poziție pentru cerc;

$\hat{C}$ - excentricitatea estimată;

$(1-\alpha)$ – gradul de încredere;

n – numărul de puncte de măsurat;

$g = 2$, pentru cerc;

S – deviația standard;

Se pot evalua, astfel, mărimea și poziția toleranței, pentru o figură cerc sau pentru un cilindru de revoluție, în baza unui model neliniar de aproximare (fitting) a figurii plane (cercul) sau a suprafeței cilindrice circulare.

1.1.3. Verificarea toleranțelor geometrice cu ajutorul super-cuadricelor [4]

Se propune utilizarea reprezentării suprafețelor sub forma unor „super-cuadrice” (super-elipsă, super-hiperboloizi, super-toroizi).

Pentru o super-elipsă, se definește vectorul de poziție pe suprafața, în formă parametrică, ca fiind de forma

$$X(\eta, \omega) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x \cdot \cos(\eta)^{e_1} \cdot \cos(\omega)^{e_2} \\ a_y \cdot \cos(\eta)^{e_1} \cdot \sin(\omega)^{e_2} \\ a_z \cdot \sin(\eta)^{e_1} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \eta \leq \frac{\pi}{2}; \pi \leq \omega \leq \pi \quad (1.4)$$

Cu a_x, a_y, a_z se definesc dimensiunile super-cuadrice pe cele trei axe; e_1 și e_2 definesc dimensiunea în două direcții perpendiculare, în forma:

$$F(x, z, y) = (((X/a_x)^{2/e_2} + (Y/a_y)^{2/e_1})^{e_2/e_1} + (Z/a_z)^{2/e_1})^{e_1}; \quad (1.5)$$

$$F(x, z, y) = (((X/a_x)^{2/e_2} + (Y/a_y)^{2/e_1})^{e_2/e_1} + (Z/a_z)^{2/e_1})^{e_1}, \quad (1.6)$$

care permite aprecierea poziției unui punct (X_0, Y_0, Z_0) ca aparținând suprafeței sau aflându-se în exteriorul (interiorul) acesteia.

Forma de reprezentare permite abordarea problemei compunerii toleranței dimensionale și de formă a unei suprafețe, prin calculul intervalului de încredere, prin metoda „minimum zone” (MZ).

Metodica permite evaluarea formei, de exemplu a unui cilindru de revoluție, cu stabilirea formei erorilor generatoare și a poziției câmpului de toleranță a dimensiunii transversale.

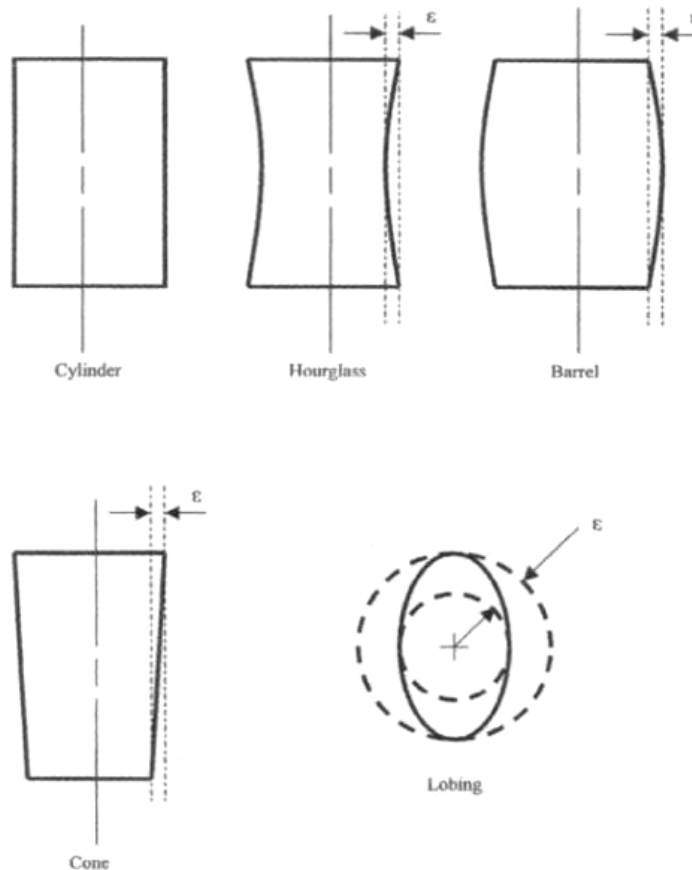


Fig. 1.7. Erorile de formă ale suprafețelor [4]

1.1.4. Evaluarea zonei de minim a planeității prin metoda planelor normale și prin metoda simplex [5]

Se urmărește a fi introduse metode pentru a caracteriza forma suprafeței (de exemplu planeitatea), care să satisfacă două obiective: valoarea minimă a toleranței pentru a caracteriza forma; timpul de procesare pe calculator.

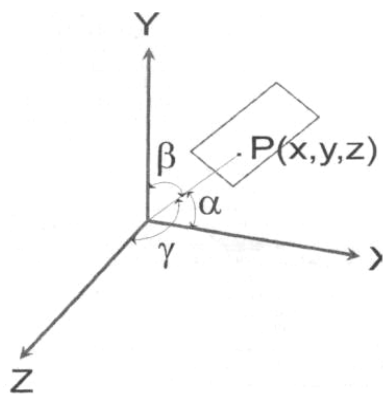


Fig. 1.8. Unghiurile directe ale unui plan conținând un punct [5]

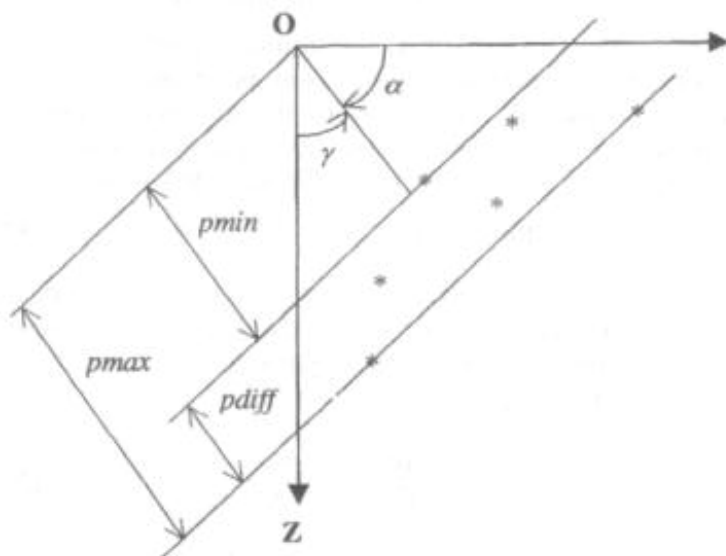


Fig. 1.9. Valorile $p_{\min}$, $p_{\max}$ și p_{diff} ale setului de puncte [5]

Algoritmul numit *metoda normalei* definește pentru p (distanța la planul considerat măsurată din originea sistemului de referință) forma, în cazul problemei în plan,

$$P_i(\alpha) = x_i \cos \alpha + z_i \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} . \quad (1.7)$$

Dacă se notează cu $p_{\max}$ și respectiv $p_{\min}$ mărimile maximă și minimă p , pentru setul de valori considerate (măsurate),

$$\begin{aligned} p_{\max} &= \max(p_i(\alpha)), i = 1, 2, \dots, n, \\ p_{\min} &= \min(p_i(\alpha)), i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (1.8)$$

atunci, distanța între cele două paralele, care includ cele n puncte măsurate, pentru acel set de date, este:

$$P_{\text{diff}}(\alpha) = P_{\max}(\alpha) - P_{\min}(\alpha), \quad 0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ . \quad (1.9)$$

Cele două paralele, determinate pentru o mărime a parametrului α (fie aceasta α_0) determină zona minimă căutată, care caracterizează planeitatea suprafeței.

În mod similar, se tratează și problema spațială.

Metoda este simplă și rapidă dar nu ține seama de forma efectivă a suprafeței.

1.1.5. Alegerea simultană a toleranțelor din fazele de proiectare și fabricare, utilizând diverse condiții de stivă prin căutare difuză [6]

O preocupare frecventă este cea prin care se urmărește optimizarea alocării toleranțelor într-un ansamblu.

În mod tradițional, se parcurg doi pași în proiectarea CAD: se alocă toleranțele pentru diferitele dimensiuni ale componentelor, considerând capacitatea funcțională a produsului; stabilirea toleranțelor în CAPP (computer aided of process planning) se face în baza alegerii toleranțelor în funcție de diferitele operații de prelucrare posibile în prelucrarea pieselor ansamblului, în funcție de capacitatea tehnologică a proceselor de manufacturare, urmărind fiecare operație în succesiunea planificată a acesteia, planificare dependentă de contextul tehnologic specific.

Se propune o optimizare a modelării proiectării și a prelucrării, prin prisma atribuirii toleranțelor dimensiunii elementelor unui ansamblu, prin metoda căutării difuze (*scatter search*), vezi figura 1.10, pornind de la populația de soluții tehnologice cunoscute, numită *set de referință*, urmând ca, prin combinări, să se ajungă la o soluție nouă. Aceasta presupune introducerea unor metode diferite: *de generare* (diversification generation method—DGM), *de dezvoltare* (improvement method—IM), *de actualizare* a setului de referință (reference set update method—RSUM), *de combinare* (solution combination method—SCM).

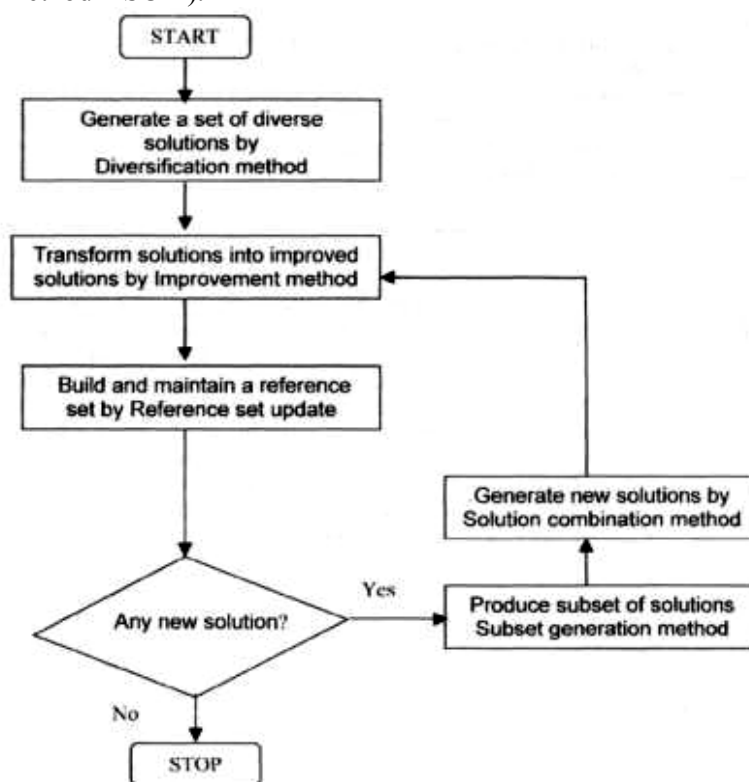


Fig. 1.10. Algoritmul de căutare pentru metoda „scatter search” [6]

Exemplele prezentate dovedesc faptul că metoda permite obținerea unor rezultate așteptate pentru astfel de probleme neliniare de optimizare.

1.1.6. Metodologia programării parametrice pentru compensarea erorilor la prelucrarea pe mașini CNC [7]

O metodă pentru compensarea erorilor unei suprafețe o constituie, pentru mașinile-unelte cu comandă numerică, programarea parametrică, în vederea realizării unor forme foarte complicate ale piesei generate. O astfel de metodologie de programare a mașinii-unelte are puține limite în aplicarea sa.

Programarea parametrică poate fi utilizată și în scopul compensării erorilor pieselor generate, prin reprogramarea unor traiectorii ale sculei, în funcție de eroarea prognozată.

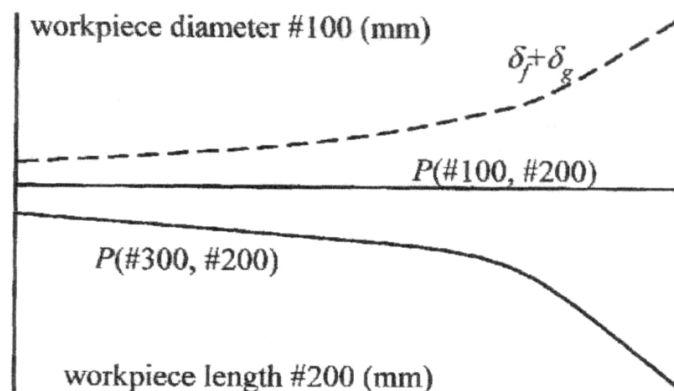


Fig. 1.11. Traectoria programată a sculei [7]

Erorile prognozate impun ca generatoarea piesei să se obțină prin introducerea unei mișcări suplimentare în lungul generatoarei programate.

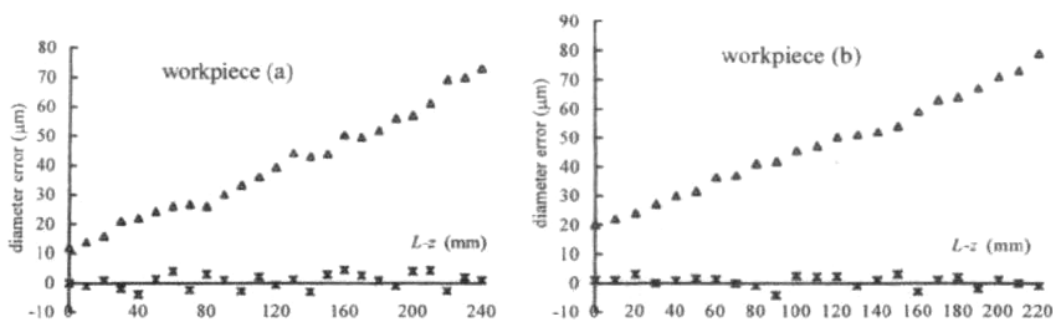


Fig. 1.12. Performanțele compensării erorilor prin programarea parametrică (Δ eroarea diametrelor în lipsa compensării; *eroarea diametrelor la prelucrarea cu compensare) [7]

Rezultatele arată îmbunătățiri importante ale formei semifabricatelor generate.

1.1.7. Utilizarea pantei derivatei prin metoda diferențelor finite pentru estimarea erorii de formă în prelucrarea reperelor de precizie ridicată [8]

Pentru estimarea erorilor de formă ale suprafețelor prelucrate se propune folosirea metodei diferențelor finite.

Abaterile de formă se reprezintă sub formă de funcții aplicate tuturor punctelor recoltate în procesul măsurării sub forma unor *matrice ale erorii*.

Sunt considerate matrice de forma „*span seminorm*” ca diferență între maximum și minimum deviației exprimată prin

$$sp(\vec{e}) = (\max e_i - \min e_i) = |\max e_i| + |\min e_i|. \quad (1.10)$$

$i=1...n$, pentru a doua parte a egalității, se acceptă că vectorul deviație conține ambele semne (+ și -).

Când criteriul „*span seminorm*” este minimizat suprafața pentru care se face referire este denumită „*minimum zone surface*” (MZS), asociată noțiunii de *zonă* din metrologia clasică. Evident, o problemă ce trebuie considerată pentru o astfel de metodă este aceea de a studia proprietățile de continuitate sau derivabilitate a funcției de eroare (proprietăți definite în sens numeric).

Metoda poate fi utilizată pentru a caracteriza forma erorii pentru cazurile: planeitate, cilindricitate, sfericitate, circularitate etc.

1.1.8. Metoda Newton pentru modelarea suprafețelor parametrice [10, 11]

În vederea aplicării la generarea suprafețelor sculpturale, pe mașini cu comandă numerică, se introduce noțiunea de „*surface registration*”, care reprezintă un model al suprafeței în raport cu punctele măsurate pe aceasta (puncte ce formează locul geometric ce constituie suprafața reală, pentru care „distanța” la model să fie minimă).

Diferența între suprafețe —cea reală (punctele măsurate) și model (nominală) trebuie să fie minimă. Aceasta este evaluată frecvent prin metoda celor mai mici pătrate (LSM). Pe aceste supoziții, se propune un algoritm de minimizare bazat pe metoda Newton (vezi figura 1.13):

$$\|d_i\| = \min_{u,v} \|p_i - S(u,v)\| \quad (1.11)$$

cu $S(u,v)$ modelul generatoarei și p_i punctul aparținând matricei $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ (forma măsurată a suprafeței).

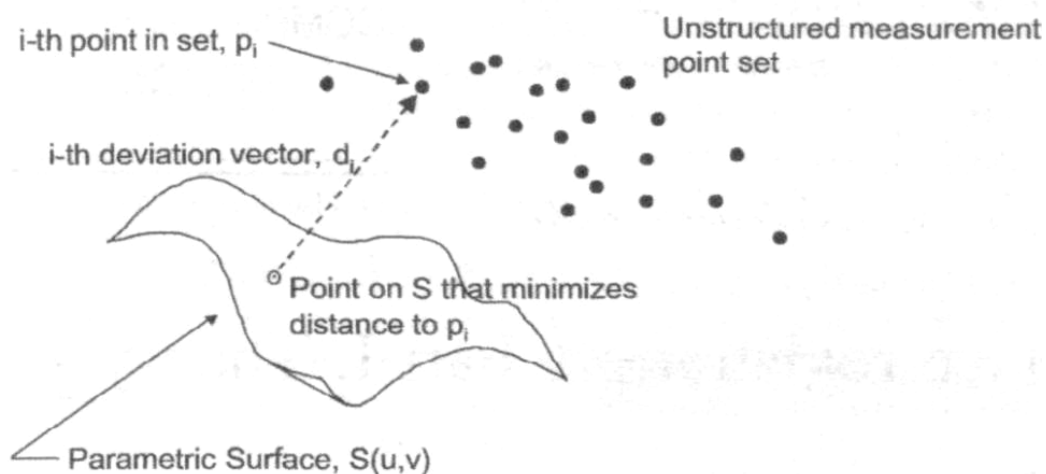


Fig. 1.13. Poziționarea punctelor măsurate față de suprafață [10]

Aplicată în comparație cu alte metodologii, metoda Newton permite obținerea unor bune rezultate, dar unul dintre dezavantajele acestei metode este dependența rezultatelor de starea inițială a punctelor față de model (parametrii estimați ai modelului), după cum este evidențiat în figura 1.14. Fiecare dintre pozițiile prezentate

arată rezultatele obținute pentru parametri estimați ai modelului, din ce în ce mai îndepărtați de cei reali.

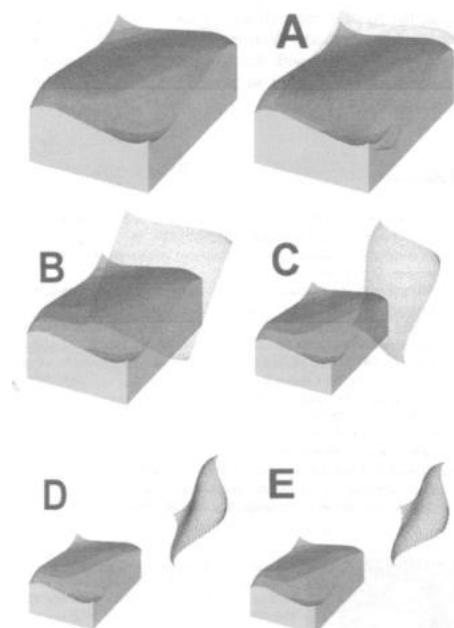


Fig. 1.14. Rezultatele aplicării metodei Newton în funcție de starea inițială a punctelor față de model [11]

1.1.9. Abordarea pe baza funcției distanță pentru localizarea și evaluarea erorii de profil a suprafețelor complexe [12]

Se formulează problema *localizării erorii unui profil* și a evaluării mărimii acesteia, pe suprafețe complexe, ca fiind o problemă neliniară, dezvoltându-se pentru rezolvarea acesteia un algoritm de *aproximări secvențiale* pentru puncte cunoscute discret prin măsurare.

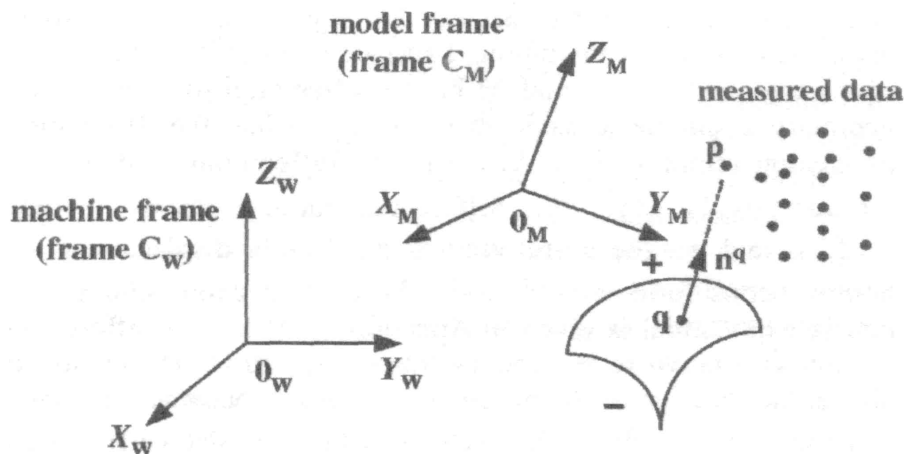
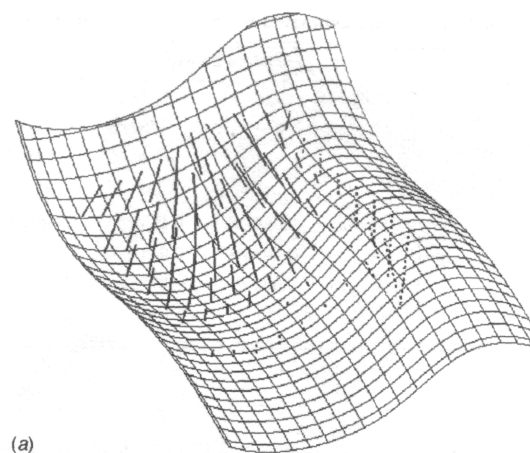
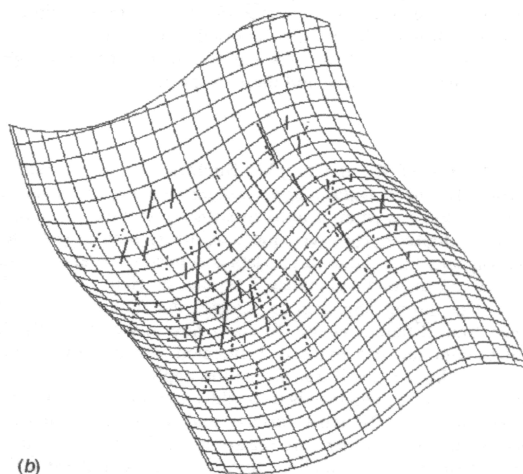


Fig. 1.15. Funcția distanță punct-suprafață [12]

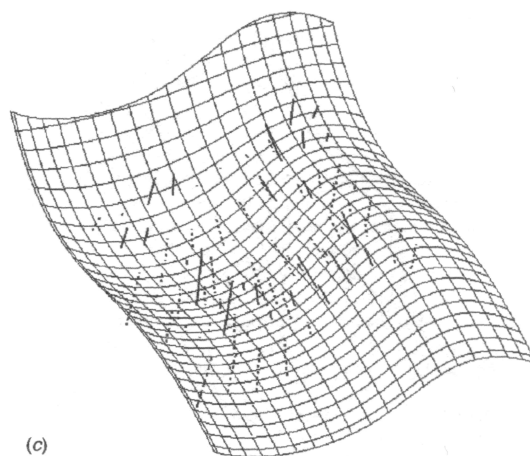
Algoritmul permite, prin aplicarea secvențială a unuia dintre criteriile — *zona minimă* (MZM) sau *abaterii medii pătratice minime* (LSM), diminuarea abaterilor modelului (deviation).



(a)



(b)



(c)

Fig. 1.16. Abaterile înainte și după aproximare: a). abaterile în poziția inițială (mărire x4); b). abaterile după aproximarea prin metoda celor mai mici pătrate (mărire x200); c). abaterile după aproximare prin metoda zonei minime (mărire x200) [12]

Algoritmii propuși pot fi utilizați într-o multitudine de situații pentru cazul suprafețelor sculpturale precum și a suprafețelor cu un plan de simetrie.

De altfel, în [12] este prezentat un exemplu al evoluției abaterii maxime de la circularitate pentru un număr de 40 de iterații succesive ale unui algoritm similar (*iterative reweighted last squares—IRLS*).

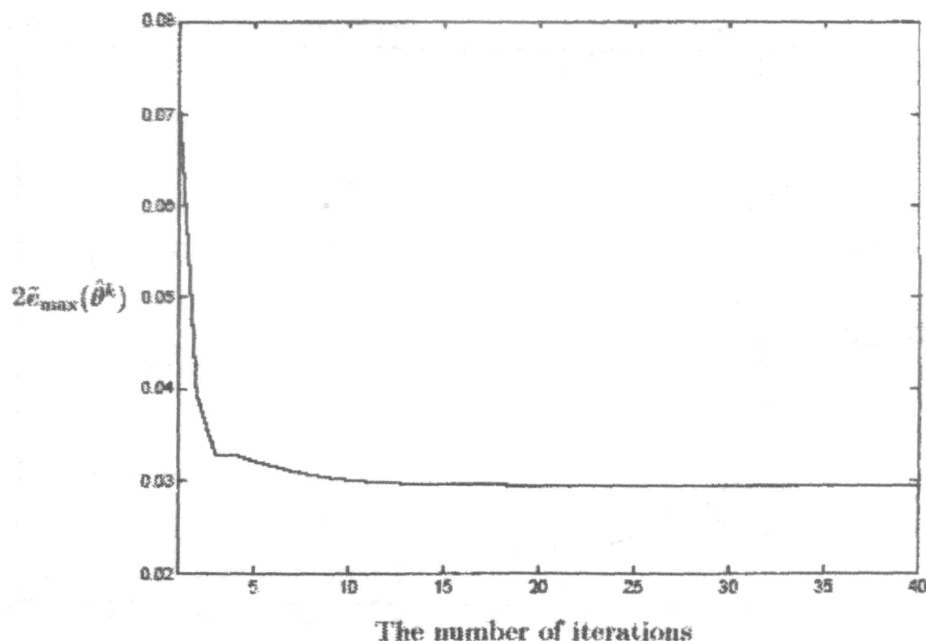


Fig. 1.17. Evoluția erorii maxime în evaluarea abaterii de la circularitate [12]

1.2. Metodologia de abordare a problematicei privind modelarea suprafețelor prin *algoritmi genetici, rețele neuronale și prin metoda circulației parametrilor*

În abordarea problematicei privind modelarea topologică a suprafețelor trebuie avut în vedere faptul că pe sistemele de manufacturare moderne se realizează simultan fabricarea pieselor, monitorizarea procesului, identificarea geometrică, cinematică și dinamică a procesului, corecția și compensarea erorilor geometrice și de proces.

Pentru modelarea topologică a suprafețelor se pornește de la stabilirea modelului matematic al suprafeței elementului ce trebuie modelat și al erorilor acestuia. Acest model poate fi extins la ansambluri de suprafețe ce intră în componența reperului. Pasul următor al modelării îl constituie modelarea matematică a ansamblurilor de elemente și a erorilor acestor ansambluri, modele care vor constitui construcția mecanică modelată.

Modelarea geometriei, a cinematiei și a dinamicii reperului se realizează prin descrierea discretă a realității.

Dintre tendințele existente în domeniul modelării matematice a geometriei topologice, se pot distinge următoarele tehnici [22].

1. Tehnica celor mai apropiați vecini

Are la bază stabilirea unei baze de date obținută prin experiențe fizice și completată cu parametrii ce descriu modelul pentru fiecare etapă a procesului. Apoi, pentru fiecare caz real se caută cea mai apropiată combinație de parametri, pentru acest caz, din baza de date. Respectivul set de parametri vor stabili modelul optim al cazului real.

2. Tehnica raționamentului bazat pe cazuri

Această tehnică se bazează pe căutarea în istoricul bazei de date, obținută prin experiențe fizice, a unui model identic cu cel apărut la prelucrarea curentă. Dacă nu se

găsește un astfel de model, se caută, în baza de date, o stare de tranziție de la starea $n-1$ la starea n , similară cu tranziția de la starea anterioară stării curente la starea curentă. Odată găsit un caz similar, se poate prezice starea unui parametru pe baza evoluției celorlalți parametri.

3. Optimizarea limitelor tridimensionale ale unui element utilizând abordarea bazată pe algoritmi genetici și modelarea suprafețelor

Problemele de optimizare a formei constau în găsirea unui profil optim al unui sistem structural care îi îmbunătățește comportarea mecanică și minimizează unele dintre proprietățile sale, spre exemplu minimizarea greutății corpului și micșorarea concentratorilor de tensiune.

Inițial, mulți autori printre care Zienkiewicz și Campbell, Ramakrishnann și Francavilla au definit coordonatele nodale ale modelului de elemente finite, ca variabile de proiectare.

Această alegere a dus la procese susceptibile de erori în aplicațiile reale, datorită faptului că necesitau un număr mare de variabile de proiectare, tinzând să producă forme cu margini colțuroase și o rețea de elemente finite dificil de menținut pe parcursul procesului de optimizare.

Alte metode au fost utilizate pentru a depăși aceste neajunsuri. Cele mai de succes metode par a fi cele definite de: Chang și Choi (*parametrizarea rețelei*); Belegundu și Rajan (*metoda variabilelor naturale de proiectare*) și Kodiyalam (*modelarea solidă*).

Următoarele aspecte sunt luate în considerare pentru a obține un instrument de optimizare a formei, eficace și demn de încredere: un sistem de reprezentare a geometriei capabil de a rezolva geometria modificabilă a modelului pe parcursul procesului de optimizare; o tehnică de analiză adecvată pentru modificările limitelor, care să permită, cu ușurință, o nouă discretizare, deplasarea limitelor și determinarea încărcărilor; o tehnică de optimizare robustă, care să filtreze soluțiile optime.

Câteva lucrări se focalizează pe soluțiile problemelor de optimizare a formelor utilizând „metoda elementelor de graniță” (*Boundary Element Method — BEM*). Sunt analizate aplicațiile programării matematice și a tehnicilor de deplasare normală în optimizarea modelelor 2D [43].

Alte lucrări din acest domeniu, bazate pe *optimizarea evolutivă*, utilizează o rețea inițială a modelului, definită prin tehnica deformării suprafețelor ne-analitice. În această abordare, se utilizează o structură de puncte de control, urmată de optimizarea genetică, până la atingerea formei optime. Rezultatele obținute sunt încurajatoare, deși utilizatorul nu poate defini cu ușurință o rețea inițială reală. Au fost dezvoltate implementări mai evolute ale algoritmilor evolutivi, capabile a rezolva diverse probleme bidimensionale.

În alte lucrări [45], au fost combinate tehnici bazate pe algoritmi genetici, reprezentare cu elemente finite și modelare prin *b-spline*, lucru care a furnizat un instrument puternic pentru optimizarea modelelor bidimensionale.

• Abordarea proiectării pe baza granițelor elementelor

În această abordare, structura este împărțită în *regiuni de graniță*. Aceste regiuni, considerate ca elemente de proiectare sunt descrise de un set de noduri cheie (denumite *noduri principale*), care definesc geometria entităților rețelei, de exemplu: liniile, suprafețele și volumele, care „controlează” forma. Entitățile rețelei sunt „pliate” pe elementele rețelei finale. Astfel, variabilele de proiectare ale formei reprezintă setul de parametri utilizat pentru definirea pozițiilor nodurilor cheie și ale dimensiunilor parametrice ale modelului solid. Modelul solid creat este compus din suprafețe și granițe. Suprafețele respective sunt clasificate în *fixe*, *laterale* și *mobile*.

Suprafețele *fixe* sunt acele suprafețe în care restricțiile sunt impuse, astfel încât, nu pot altera forma pe parcursul procesului de optimizare. Pe de altă parte, suprafețele *laterale* sunt acele suprafețe care au o muchie comună cu suprafețele mobile. Suprafețele *mobile* pot fi mișcate în scopul optimizării formei modelului analizat și sunt descrise și discretizate prin intermediul tehnicilor *spline*.

Această metodă îmbunătățește rezultatul final al optimizării prin faptul că limitele modelului pot fi definite și modificate prin mijloace simple și eficiente ca modelarea suprafețelor utilizând metoda b-spline.

Deoarece sunt utilizate un număr mic de variabile de proiectare, timpul de calcul pentru rezolvarea problemei de optimizare este redus.

- **Studiul comparativ a modelării pe baza a două abordări utilizând rețele neuronale**

Modelarea neuronală a *stării* și modelarea *câmpurilor locale* [44] furnizează două abordări fundamentale ale modelării pe baza rețelelor neuronale. În conformitate cu acestea, un sistem neuronal poate fi considerat ca un model static al stării sau ca un model neuronal al câmpurilor locale. Aceste două modele sunt comparate din punct de vedere al corespondenței proprietăților de echilibru, al convergenței globale și al stabilității. Comparațiile făcute arată o importantă stabilitate a proprietăților celor două modele, în sensul că stabilitatea modelului static este echivalentă cu cea a subsistemului dedus din modelul câmpurilor locale restricționate într-o manieră specifică.

4. Tehnica vecinătăților virtuale

Se bazează pe *deplasarea virtuală* a modelului și determinarea bazei de date utilizate pentru identificarea sistemului. După această etapă, se alege din baza de date modelul cel mai apropiat față de realitate. Parametrii acestui model vor fi parametrii care modelează în mod optim realitatea.

Controlul bazat pe vecinătăți se bazează pe un model numeric, general și temporar. Valorile parametrilor modelului cazuistic sunt determinate prin metoda "*K-nearest neighbor*", prin analizarea unei baze de date obținute prin *experiențe numerice*.

Identificarea, executată "*on-machine*" ține seama de fenomenele *termo-mecanice*, acoperind aspectele statice ale identificării.

Variabilele, de tip *determinist*, sunt de forma n , *variabile de intrare* / n , *variabile de ieșire*.

Performanțele modelului sunt evaluate prin nivelul maxim al erorii, comanda implementată fiind de tip preventiv.

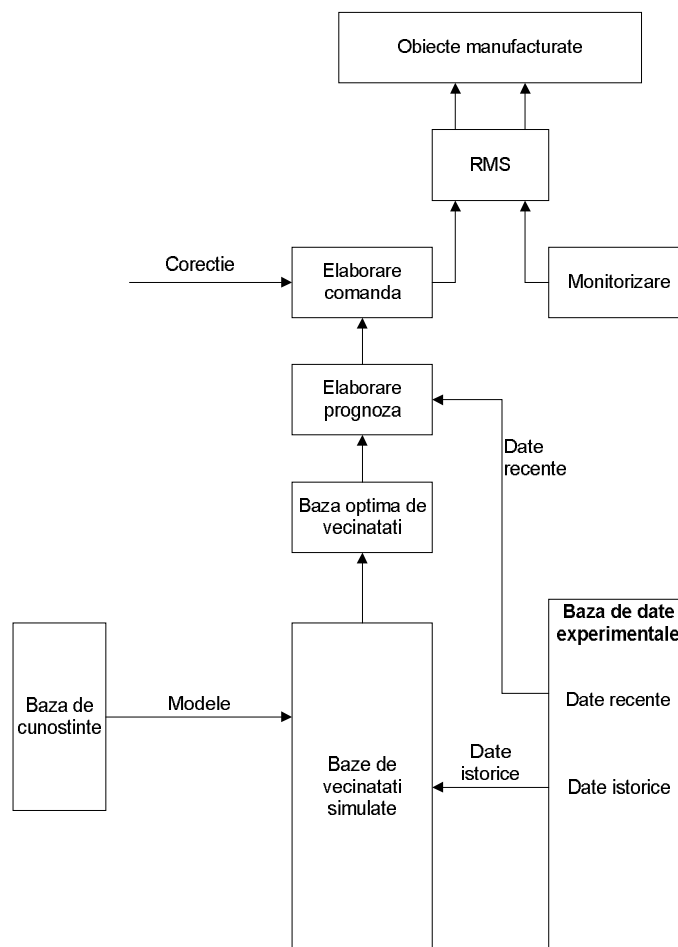


Fig. 1.18. Schema controlului inteligent-bazat pe vecinătăți

5. Tehnica circulației parametrilor

Tehnica de identificare bazată pe circulația parametrilor constă în căutarea exhaustivă a valorilor parametrilor modelului matematic într-un spațiu restrâns, în jurul unui set de valori cunoscut aprioric, valori care determină similitudinea optimă între modelul și elementul real.

Premisa de bază a acestei tehnici este *singularitatea extremelor* în spațiul de căutare. Putem afirma că această premisă este reală, datorită spațiului restrâns în care se face căutarea, ceea ce face ca metoda să fie convergentă.

În aplicarea acestei tehnici se pornește de la faptul că la generarea unei suprafețe vor apare abateri atât ca poziție cât și ca formă față de suprafața teoretică. Aceste abateri sunt dificil de stabilit cu mijloace obișnuite.

La aplicarea acestei tehnici este necesară culegerea unui „nor de puncte” cu ajutorul sistemului de fabricație reconfigurabil, care va fi utilizat în acest caz ca mașină de măsurat, după care se caută poziția și forma suprafeței teoretice care va aproxima în mod optim suprafața reală.

6. Tehnica gradientului

Reprezintă o variantă îmbunătățită a tehnicii bazate pe circulația parametrilor, în sensul că, în acest caz, căutarea nu este exhaustivă, ci se execută prin modificarea parametrului cu cel mai mare gradient la un moment dat. Acest lucru permite o convergență mai rapidă a soluțiilor spre soluția optimă.

7. Tehnica modelării armonice

Această tehnică pornește de la premisa că deplasarea săniilor mașinilor-unelte are loc cu anumite erori, ce pot fi determinate. Deși mișcarea motorului de deplasare al săniei este uniformă, datorită erorilor din lanțul cinematic de deplasare, sania se va mișca neuniform, rezultând erori de poziționare.

După determinarea erorilor în diferite puncte, acestea pot fi modelate prin dezvoltare în serii Fourier, fiind astfel posibilă calcularea mărimii erorii în orice punct al deplasării. Mai mult, având în vedere că în timpul funcționării mașinii acesta este supusă unui gradient termic, ce va determina evoluția în timp a erorilor de poziție, a fost imaginată o metodă de modelare a coeficienților seriei Fourier (pe care am denumit-o modelare de ordinul doi). Astfel este posibilă modelarea erorilor cu un număr mai redus de coeficienți.

Pentru verificare, a fost simulată determinarea erorii în 101 de puncte, în lungul cursei uneia dintre săniile mașinii-unelte. Pentru aproximarea în serii Fourier este nevoie de calculul a 102 coeficienți. Prin modelarea de ordinul doi, această aproximare poate fi realizată cu numai 9 coeficienți, în cazul unei variații liniare a erorii și, respectiv, cu 25 coeficienți, în cazul în care eroarea are și o componentă sinusoidală.

În figura 1.19, este prezentat modelul erorii liniare (y), al erorii aproximată prin modelare armonică în serie Fourier, utilizând 9 coeficienți ($f2$) și al erorii aproximată prin modelare armonică de ordinul doi, utilizând 9 coeficienți (fm).

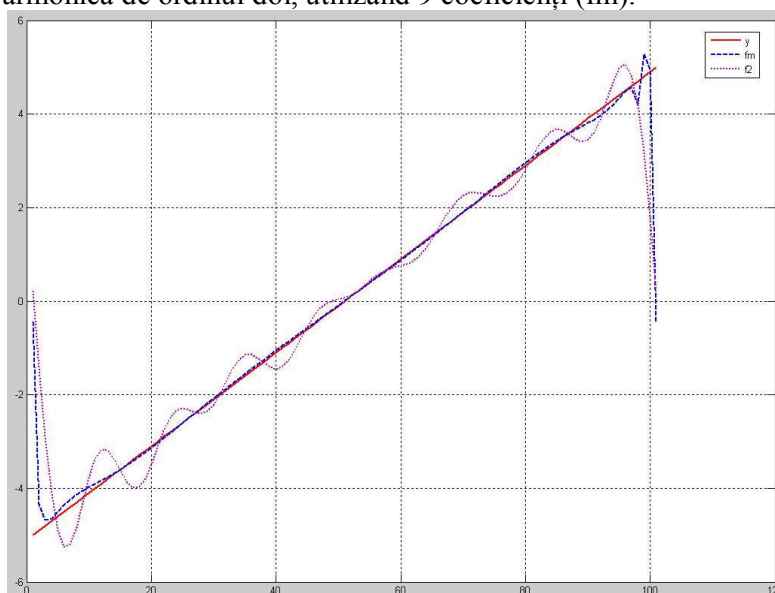


Fig. 1.19. Modele ale erorii: liniară (y); aproximată prin modelare armonică în serie Fourier ($f2$); aproximată prin modelare armonică de ordinul doi (fm)

În figura 1.20, sunt prezentate modele ale erorii: cu componentă liniară și sinusoidală (y); aproximată prin modelare armonică în serie Fourier, utilizând 9 coeficienți ($f1$); aproximată prin modelare armonică de ordinul doi, utilizând 9 coeficienți (fm).

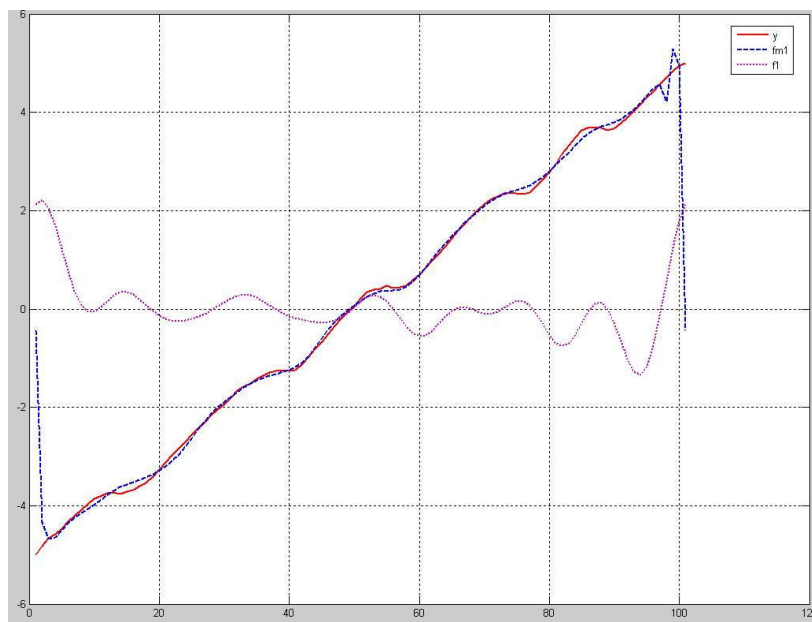


Fig. 1.20. Modelul erorii cu componentă liniară și sinusoidală (y), al erorii aproximată prin modelare armonică în serie Fourier ($f1$) și al erorii aproximată prin modelare armonică de ordinul doi (fm)

Este evident faptul că, modelul obținut prin modelare armonică de ordinul doi este mult mai exact decât cel obținut prin modelare Fourier cu un număr redus de coeficienți.

8. Tehnica modelării spline-cubice

Se bazează pe modelarea procesului prin determinarea polinomului de ordinul trei care aproximează realitatea, parametrii modelului fiind în acest caz coeficienți și puncte.

9. Tehnica modelării neuronale

Această tehnică de identificare presupune utilizarea instrumentelor specifice, rețelele neuronale, antrenate pentru a găsi relațiile care apar între valorile erorilor obținute în diferite puncte.

Datorită faptului că măsurarea erorilor în zona de prelucrare este dificilă, presupunând oprirea procesului de prelucrare, a apărut ideea că este convenabil să facem identificarea sistemului prin măsurare doar la începutul procesului, măsurând erorile apărute, atât în zona de prelucrare, cât și într-o serie de „puncte martor”, situate în afara zonei de prelucrare. După această etapă de identificare inițială, este antrenată o rețea neuronală pentru a descoperi relațiile ce se pot stabili între valorile erorilor în punctele din zona de prelucrare și valorile erorilor în punctele martor.

În continuare, pe parcursul prelucrării, este suficient a se determina erorile din punctele martor, pentru a putea estima ce erori vor apare la prelucrare și a lua măsuri pentru compensarea acestora.

10. Tehnici de căutare genetică

Pentru cazurile în care suprafețele analizate trebuie considerate în ansamblul lor, cum este cazul suprafețelor ce formează ajustaje, sau care trebuie să îndeplinească anumite condiții de formă și poziție pentru a se putea realiza asamblarea, nu este suficientă identificarea separată a formei și poziției fiecărei suprafețe, ci este nevoie ca acestea să fie privite ca un set de suprafețe.

Tehnica de identificare genetică, dezvoltată în cadrul acestei cercetări, permite analizarea unui model complex, format din seturi de suprafețe care, pe lângă condițiile de formă și dimensiuni, trebuie să respecte și restricții referitoare la pozițiile relative ale

suprafețelor respective. În acest caz, funcția obiectiv este dată de ansamblul ecuațiilor suprafețelor și a ecuațiilor care modelează relațiile reciproce dintre acestea.

A fost analizat cazul unui triedru, ale cărui plane nu sunt reciproc perpendiculare. Acest triedru poate fi privit ca fiind format din planurile unui sistem de referință, obținut cu o anumită eroare la prelucrare. Au fost generate seturi de puncte în fiecare plan, inducându-se, prin simulare, abateri de la perpendicularitatea reciprocă a planurilor.

Norul de puncte obținut a fost identificat utilizând tehnica algoritmilor genetici, în mediul de calcul MATLAB, fiind imaginat și aplicat un model de calcul pentru determinarea parametrilor ecuațiilor ce descriu aceste planuri, ca fețe ale unui triedru.

Ca funcție obiectiv, a fost utilizată valoarea sumei pătratului distanțelor punctelor față de planurile sistemului de referință. Prin algoritmul genetic utilizat, s-a urmărit minimizarea funcției obiectiv, rezultând valorile parametrilor modelului matematic, ce realizează aproximarea optimă a suprafețelor reale.

11. Identificare bazată pe „rough set theory”

Această tehnică de identificare presupune utilizarea *seturilor de date obținute experimental*, în etapa de măsurare, pentru determinarea relațiilor ce pot apărea între valorile parametrilor ce caracterizează sistemul (deformații, gradient termic etc.) și, respectiv, între valorile erorilor în diferite puncte, sau mărimile erorilor pe care intenționăm să le determinăm.

Valorile determinate sunt incluse într-o bază de date, care poate fi apoi analizată cu un program specializat, pentru determinarea arborilor decizionali (tip ROSETTA), obținându-se relațiile existente între câmpurile bazei de date.

Acest lucru permite estimarea erorilor ce vor apare în anumite condiții și luarea măsurilor pentru compensarea acestor erori.

The screenshot shows the ROSETTA software interface. The title bar reads "ROSETTA A Rough Set Toolkit for Analysis of Data". The main window displays a decision tree on the left and a table of rules on the right. The table has columns for Rule, Support, and Probability. The rules are listed as follows:

Rule	Support	Probability
1. Stars(1, 0) AND Hues(1, 3) == Type(C)	2	1.0
2. Stars(1, 23) AND Bars(1, 0) AND Icon(1) == Type(U)	3	1.0
3. Stars(1, 23) AND Bars(1, 0) AND Icon(1) == Type(C) OR Type(U) 1, 2	0.533333	0.666667
4. Hues(1, 5) AND Hues(1, 6) == Type(U)	3	1.0
5. Stars(1, 0) AND Hues(1, 0) == Type(U)	4	1.0
6. Bars(1, 0) AND Hues(1, 0) == Type(U)	4	1.0
7. Bars(1, 1) AND Hues(1, 0) == Type(C)	2	1.0

Fig. 1.21. Identificarea bazată pe „rough set theory”

1.3. Modelarea topologică a geometriei construcțiilor mecanice

Forma geometrică efectivă a oricărei suprafețe prelucrate este întotdeauna diferită față de forma nominală. Pentru a asigura interschimbabilitatea și a îndeplini cerințele funcționale, tolerarea geometrică este stabilită pentru anumite suprafețe. Pentru a determina calitatea suprafețelor prelucrate, se realizează o inspecție a suprafeței, în urma căreia se aleg punctele care urmează a fi procesate, conform unui anumit algoritm, care să permită verificarea condițiilor stabilite de proiectant.

Aceste condiții tehnice impun restricții privind anumiți parametri ai modelului. Nu vor fi restricționate toate abaterile ci numai acelea considerate importante pentru îndeplinirea rolului funcțional al reperului.

În industrie, tolerarea se realizează pe suprafețele semifabricatului, care urmează a veni în contact cu un alt grup de suprafețe, ale unei alte piese ale aceluiași ansamblu, constituind o pereche de tip formă-contraformă.

Tolerarea are scopul de a asigura suprapunerea suficient de exactă între formă și contraformă (vezi figura 1.22).

Să luăm în considerare cazul unui capac de rulment prezentat în figura 1.22.

Suprafețele funcționale ale acestuia sunt A , B și C , suprafețe care vin în contact cu suprafețele A' și B' de pe carcasă și respectiv C' de pe rulment.

Prin urmare, este rațional să realizăm inspectarea ansamblului de suprafețe ABC , procesând simultan trei nori de puncte pentru a obține modelele suprafețelor A , B și C .

Tolerarea ansamblului de suprafețe se va face prin limitarea câtorva dintre deviațiile ansamblului de suprafețe.

În exemplul prezentat, va fi tolerată distanța $A-C$, diametrul suprafeței B , perpendicularitatea suprafeței A față de B și paralelismul dintre A și C .

Aceștia sunt parametrii abaterii de formă a suprafeței.

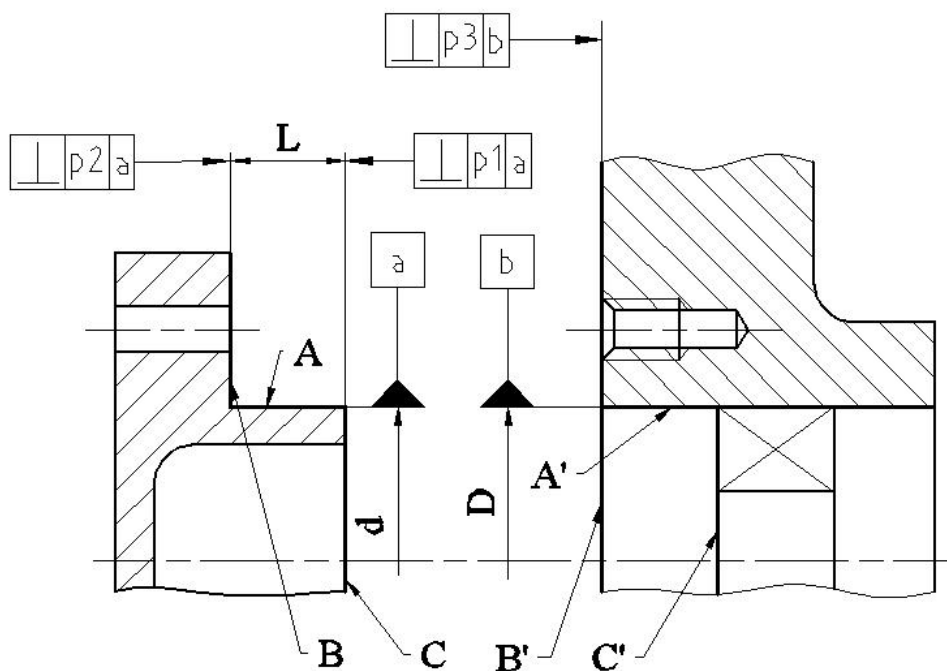


Fig. 1.22. Suprafețe de tip formă-contraformă

Abordarea topologică a ansamblului de suprafețe formă-contraformă va furniza rezultate mai precise decât studiul individual al fiecăreia dintre suprafețe. Rezultatele obținute pe baza abordării topologice reprezintă o mai bună interpretare a corespondenței dintre suprafețele ansamblului, care formau „ajustaje” (A, B, C cu A', B', C').

1.4. Geometria topologică a construcțiilor funcționale

Putem afirma că prin modelarea topologică a unei structuri se realizează modelarea acesteia privită ca un unic element geometric complex. Acest mod de a privi un reper mecanic se bazează pe trei motivații principale:

- piesa este caracterizată de existența unei interfețe cu restul construcției mecanice. La rândul său, această interfață este compusă dintr-o serie de suprafețe care, din punct de vedere geometric, se comportă și lucrează ca o unică suprafață complexă, aflată în relație de tip formă-contraformă cu o altă suprafață complexă aparținând structurii mecanice. Din acest punct de vedere, structura topologică

reprezintă un ansamblu de suprafețe intercon condiționate, astfel încât să alcătuiască aceeași interfață;

- toleranțele din specificațiile tehnice, de obicei, se referă la mai mult de o singură suprafață, unele dintre aceste suprafețe fiind suprafețe tolerate și altele suprafețe de referință. În cazurile reale și aceste suprafețe de referință au, inevitabil, erori care vor afecta suprafețele modelate. Drept urmare, modelarea individuală are dezavantajul de a nu putea fi cunoscute în mod exact suprafețele de referință. Însăși aceste suprafețe de referință se modifică de la un piesă la alta, chiar în cazul unei fabricații de serie;
- unele dintre abaterile geometrice pot fi definite numai prin modelarea simultană a mai multe suprafețe. Să considerăm, de exemplu, tolerarea grosimii unei plăci. Niciodată nu se precizează care este suprafața de referință și care este suprafața tolerată. Pentru a modela acest caz, este necesară modelarea unei structuri alcătuite din două plane, paralele la nivel nominal, urmând ca numai după aceea să putem modela distanța dintre aceste plane. În mod similar, pentru cazul a două suprafețe cilindrice este necesară modelarea a doi cilindri cu axele paralele la nivel nominal. Deci, dimensiunile ansamblurilor de suprafețe vor avea inițial dimensiunile nominale ale modelului.

Așa cum am arătat anterior, pentru a determina calitatea suprafeței prelucrate este necesară măsurarea coordonatelor unui nor de puncte și, după acesta procesarea coordonatelor prin diverse metode.

Algoritmul propus pentru determinarea geometriei topologice funcționale presupune parcurgerea a trei etape:

1. gruparea acelor suprafețe ale reperului care vor fi în contact cu un alt grup de suprafețe aparținând construcției mecanice în care se assemblează piesa, formând un ansamblu de suprafețe de tip formă-contraformă. Acest grup de suprafețe va reprezenta structura topologică;
2. culegerea unui nor ordonat de puncte pe fiecare dintre suprafețele care formează structura topologică;
3. procesarea acestor date pentru a se calcula valorile abaterilor, care sunt tolerate în prescripțiile tehnice, pentru a se putea determina corespondența piesei cu modelul CAD.

Pentru procesarea datelor pot fi utilizate oricare dintre metodele prezentate în paragraful 1.2.

Exemplele numerice prezentate în **Capitolul II** utilizează trei metode de prelucrare a datelor: metoda bazată pe algoritmi genetici, metoda bazată pe antrenarea și interogarea rețelelor neuronale și metoda dezvoltată pe baza circulației parametrilor. Aceste trei metode au în comun faptul că permit, cu mare precizie și efort de calcul redus, verificarea dimensională chiar în timpul ciclului de prelucrare.

Structura topologică se stabilește pe baza criteriilor legate de restricțiile privind forma, dimensiunile și pozițiile suprafețelor elementare componente. Trebuie remarcat faptul că, structura topologică nu este limitată numai la acele suprafețe prelucrate în operația curentă.

Fiecare dintre suprafețele structurii topologice este caracterizată de model și de **parametrii de conformitate**, care descriu similitudinea dintre suprafața piesei reale și model (parametrii $p_1, p_2, \dots, p_n$, vezi figura 1.23).

Un parametru de conformitate reprezintă o restricție de formă, poziție sau dimensiune, legată de una dintre suprafețele componente ale structurii topologice.

Fiecare dintre parametrii p_i dintre cei prevăzuți în prescripțiile tehnice au semnificația unei toleranțe, reprezentând limitele de variație ale dimensiunii respective.

În figura 1.23, este reprezentată o structură topologică, selectată pe baza acestui criteriu și compusă din două suprafețe teoretice S_{t1} și S_{t2} . Se consideră că, datorită erorilor de prelucrare, se obțin suprafețele reale S_{r1} și S_{r2} , poziția acestor suprafețe fiind determinată de parametri p_1, p_2, p_3 și, respectiv, p_4, p_5 și p_6 .

Presupunând că în specificațiile tehnice au fost restricționate pozițiile relative între cele două suprafețe, prin parametri p_7, p_8 și p_9 , prezintă interes dacă valorile acestor parametri se află sau nu în interiorul câmpurilor de toleranță. Fiecare dintre restricțiile de formă, poziție și dimensiune, stabilite în etapa de proiectare, va fi unul dintre parametri de conformitate ai structurii topologice.

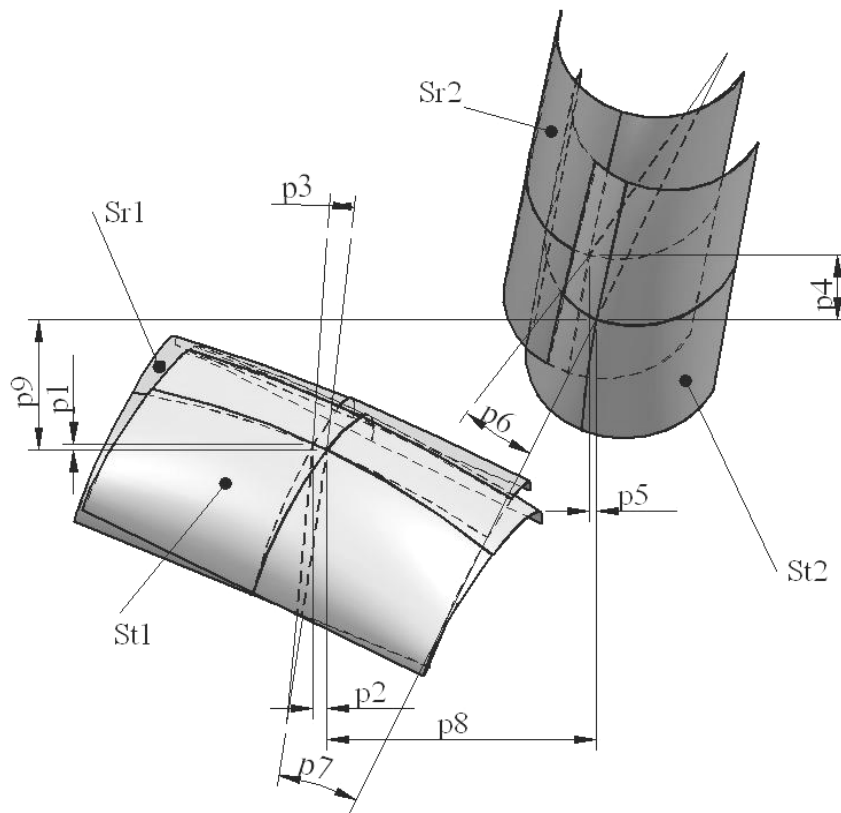


Fig. 1.23. Abaterile suprafețelor structurii topologice

1.5. Geometria topologică a construcțiilor tehnologice

Pentru determinarea geometriei topologice a construcțiilor tehnologice este necesar să se țină seama de modul de generare a suprafețelor tehnologice ale reperului.

La executarea unui lot de piese, după realizarea fiecărei piese din lot, aceasta este inspectată și, pe baza informațiilor obținute se pot aplica eventualele corecții necesare pentru ca la prelucrarea următoarei piese să fie reduse erorile induse de sistemul tehnologic format din mașina-unelte—sculă—piesă.

În figura 1.24, este reprezentat un exemplu de structură topologică tehnologică.

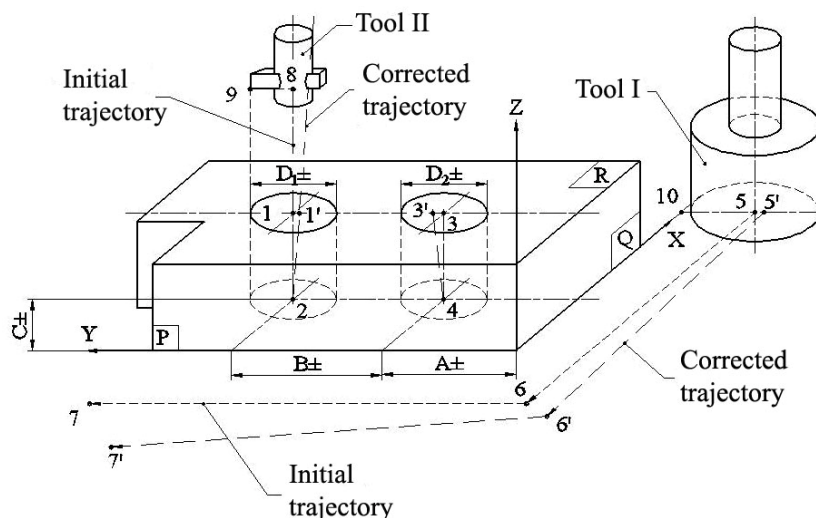


Fig. 1.24. Structura topologică tehnologică

Să presupunem că, în cadrul operației respective se prelucrează suprafețele plane P și Q și alezajele cilindrice cu diametrele D_1 și respectiv D_2 .

În urma procesului de prelucrare este posibil să se observe că, abaterile de la pozițiile relative între cele două suprafețe plane, cele între pozițiile alezajelor precum și cele referitoare la înclinarea axelor alezajelor, tind să se apropie de limitele de toleranțe impuse de proiectant.

Din punct de vedere topologic, conformitatea modelului teoretic cu modelul obținut prin măsurarea unui exemplar de piesă este dată de **funcția obiectiv** — abaterea minimă pătratică a distanțelor punctelor măsurate față de modelul teoretic.

Tendința de ieșire din limitele de toleranță echivalează cu creșterea **valorii funcției obiectiv**, care tinde spre valoarea limită admisibilă, definită de proiectant.

Readucerea acestei funcții obiectiv la o valoare cât mai apropiată de zero presupune, în mod evident, modificarea traiectoriilor programate ale sculelor cu care se realizează prelucrarea.

În mod intuitiv, apare întrebarea care dintre traiectoriile respective trebuie modificate, și în ce sens, astfel încât efectul obținut să optim. Trebuie avut în vedere faptul că modificarea empirică a tuturor traiectoriilor sculelor implicate poate avea alt efect decât cel optim, fie prin scăderea insuficientă a valorii funcției obiectiv, fie, în cazul cel mai defavorabil, chiar prin creșterea valorii funcției respective.

Presupunând că în specificațiile tehnice au fost prevăzute restricții între pozițiile suprafețelor teoretice, restricții de tipul celor prezentate în paragraful 1.4 (parametrii de conformitate $p_1, \dots, p_9$), ne interesează dacă în urma erorilor de prelucrare, acestea se încadrează în domeniul prescris.

De asemenea, pentru fiecare structură topologică se stabilesc mișcările de corecție de care dispune mașina-unelte, mișcări ce permit modificarea *on-line* a valorilor parametrului p_i , fie $q_1, q_2, \dots, q_n$ acești parametri de corecție.

O metodă propusă pentru a stabili care traiectorii trebuie corectate și modulul în care trebuie aplicate aceste corecții presupune utilizarea metodei rețelelor neuronale.

Metoda presupune două etape distincte:

- verificarea corespondenței exemplarului obținut cu modelul numeric dorit;
- determinarea corecțiilor necesare prin interogarea unei rețele neuronale antrenate pe baza rezultatelor obținute prin simularea rezultatelor obținute prin diferite modalități de corectare a traiectoriilor sculelor.

În cadrul etapei de verificare a corespondenței reperului cu modelul numeric are loc generarea prin simulare a unei baze de date formată din coordonate ale unor puncte care aparțin suprafețelor care formează structura topologică respectivă.

Fiecare înregistrare a primei baze de date corespunde unei anumite configurații a setului de parametri de conformitate $p_1, p_2, \dots, p_n$ (vezi paragraful 1.4).

Pentru etapa de determinare a corecțiilor optime este necesară generarea prin simulare a unei a doua baze de date, obținută în mod similar cu prima bază de date, având înregistrările corespunzătoare diverselor configurații posibile pentru setul de parametri de corecție $q_1, q_2, \dots, q_n$.

Acestor baze de date li se aplică o pre-procesare a datelor, fiind calculate valorile funcției

$$f(x, y, z, p_1, \dots, p_n) = d, \quad (1.12)$$

în fiecare dintre punctele generate.

Fiecare structură topologică este apoi modelată neuronal, modelele rezultate având ca date de intrare valorile d date de ecuațiile (1.12), iar ca date de ieșire valorile parametrilor de conformitate p_i și ale parametrilor de corecție q_i .

1.6. Geometria topologică a construcțiilor metrologice

Proiectarea structurilor topologice se realizează pe baza prezumției că toate elementele structurii impun restricții în ceea ce privește forma, dimensiunile și poziționarea relativă.

La prelucrarea pieselor prin așchiere apar erori datorate atât procesului de așchiere în sine, cât și cinematicii mașinii-unelte pe care se face prelucrarea. Astfel, se pot defini două tipuri de suprafețe, suprafața efectiv generată și o suprafață de referință, în raport cu care se face prinderea semifabricatului pe mașina de prelucrat.

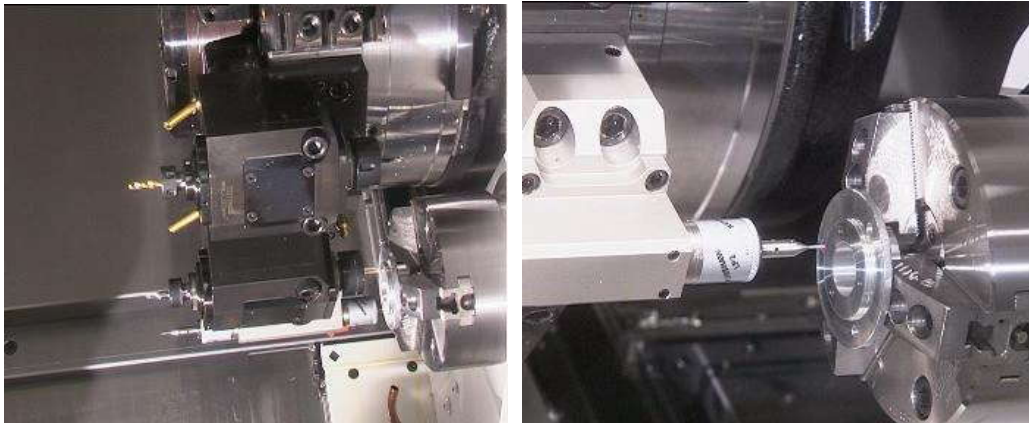
În plus, în cazul real al prelucrării pieselor, între diversele suprafețe care le compun, se precizează restricții specifice în ceea ce privește forma, dimensiunile sau poziția lor relativă.

Interesează identificarea suprafețelor reale generate, atât prin determinarea dimensiunilor și formelor acestora, cât și prin poziția în raport cu suprafața lor de referință.

Este propusă o metodă constând în identificarea ambelor suprafețe, cea generată și cea de referință, în raport cu sistemul de referință propriu al mașinii-unelte și, apoi, transformarea coordonatelor din sistemului de referință global al mașinii, în coordonatele sistemului de referință propriu piesei. În acest mod, se obține modelul matematic al suprafeței reale, în raport cu suprafața de referință.

Este cunoscut faptul că, mașinile-unelte cu comandă numerică pot fi utilizate ca mașini de măsurat în coordonate, dacă se înlocuiește scula cu un dispozitiv de palpate adecvat.

Identificarea suprafeței generate se face prin introducerea în programul mașinii cu comandă numerică a unei secvențe de măsurare, în cadrul căreia se realizează explorarea suprafeței prelucrate după o traiectorie stabilită. Această explorare se efectuează cu ajutorul unui dispozitiv de măsurare fixat pe mașina-unelte (vezi fig. 1.25).



a).
b).
Fig. 1.25. Secvența de prelucrare (a) și secvența de măsurare (b)

Scopul acestei metode de identificare este reprezentat de verificarea încadrării în câmpul de toleranță a caracteristicilor geometrice ale suprafeței prelucrate și de determinarea acțiunilor de corectare pentru a readuce abaterile în câmpul de toleranță prevăzut de proiectant.

Datele obținute de dispozitivul de măsurare sunt citite de un sistem de achiziție, cu o frecvență stabilită, astfel încât se obține un nor ordonat de puncte.

Pentru identificarea geometrică, se adoptă o familie de suprafețe descrisă parametric de funcția $f(x, y, z, p_1, \dots, p_n)$, în care $p_1, \dots, p_n$ sunt parametrii de conformitate, ce descriu forma generală a suprafeței analizate, după care se determină un set de valori $(p_1, p_2, \dots, p_n)$, care dau un reprezentant al acestei familii pentru care f să aibă valoarea minimă.

Notă: *Reprezentantului matematic al acestei familii îi corespunde în realitatea obiectivă un exemplar al reperului respectiv.*

Rezolvarea acestei probleme poate fi făcută prin regresie, bazată pe metoda celor mai mici pătrate. Această metodă analitică este eficientă pentru elemente geometrice de formă simplă (punct, linie, plan, sferă).

Pentru suprafețe cilindrice, conice etc. metoda prezintă dificultăți majore datorită faptului că sistemul de ecuații rezultat este neliniar. Pentru rezolvarea acestuia, se cere o soluție de start și un procedeu de căutare, problema fiind o problemă de optimizare.

Au fost dezvoltate o serie de metode pentru identificarea acestor tipuri de suprafețe, metode dintre care amintim: metoda gradientului, metoda algoritmilor genetici, metoda regenerării virtuale etc.

Spre deosebire de aceste metode, metoda nou propusă în proiect presupune *modelarea optimului* pe baza rezultatelor obținute în cadrul unui program de simulare. Noutatea metodei constă în faptul că se folosește *modelarea optimului* prin determinarea setului de parametri care aproximează cel mai bine modelul real.

Ca tehnică de modelare se folosește o rețea neuronală antrenată pe baza unor date obținute prin simulare și interogată cu date obținute prin explorarea suprafeței efectiv obținute.

Antrenarea rețelei constă în simularea explorării unei anumite suprafețe ale familiei de suprafețe, pentru care parametrii $p_1, p_2, \dots, p_n$ au valori aflate în interiorul câmpului de toleranță sau într-o vecinătate restrânsă din afara acestui câmp.

Se alege din familia de suprafețe un număr de suprafețe care îndeplinesc condiția că toți parametrii lor sunt în câmpul de toleranță sau într-o vecinătate a acestuia. Pentru fiecare suprafață se simulează faza de măsurare, în urma căreia se obțin coordonatele

punctelor aparținând norului ordonat de puncte. Coordonatele respective sunt pre-procesate, determinându-se distanțele de la punctele norului de puncte la suprafața teoretică, iar cu rezultatele obținute se completează baza de date. Rețeaua neuronală modelează **legătura** între distanțele respective și parametrii suprafeței.

1.6.1. Modelarea optimului

Considerăm că avem de prelucrat un lot de piese, pe o mașină-unelte cu comandă numerică.

Ne propunem ca la elaborarea programului piesă să includem faze de măsurare *on-machine*. Datele obținute în urma măsurărilor urmează a fi procesate astfel încât să se obțină abaterile de poziție, formă și dimensiuni ale suprafețelor prelucrate și ale suprafețelor de referință în raport cu modelele acestor suprafețe, în scopul de a fi comparate cu specificațiile tehnice și de a lua o decizie privind admisibilitatea exemplarului respectiv.

De asemenea, ne propunem controlul dimensional al procesului, astfel încât abaterile constatate să fie permanent menținute în limitele câmpului de toleranță.

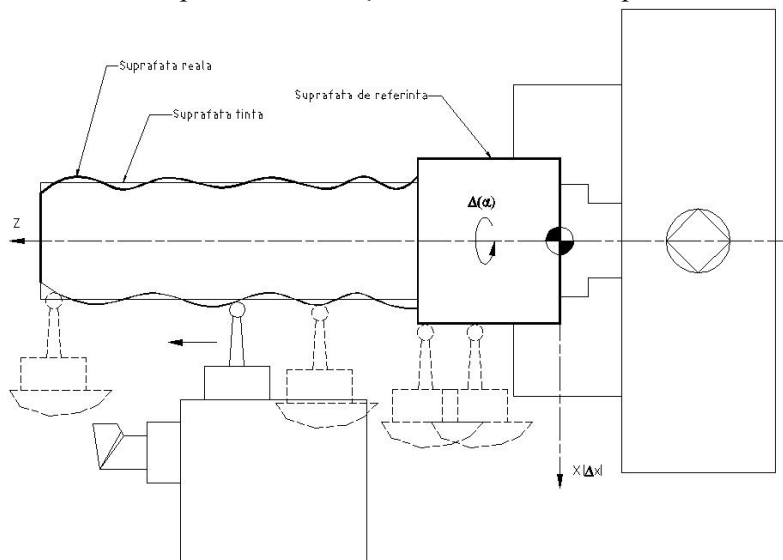


Fig. 1.26. Explorarea *on-machine* a suprafeței generate și a suprafeței de referință

1.6.2. Etapele de aplicare a metodei

Metoda modelării on-line a geometriei mașinilor-unelte bazate pe abordarea topologică a metrologiei suprafețelor presupune parcurgerea a trei etape importante:

- constituirea structurilor topologice;
- modelarea neuronală a structurilor;
- controlul (conducerea) dimensional al procesului (vezi figura 1.27).

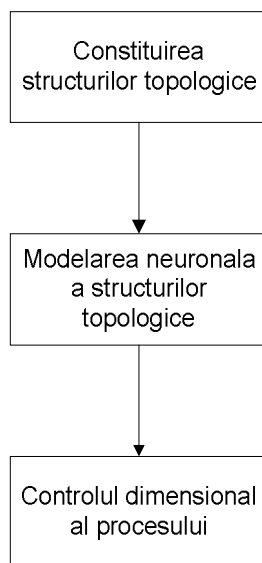


Fig. 1.27. Etapele identificării *on-line* pe baza topologiei suprafețelor

1.6.3. Constituirea structurilor topologice

Constituirea structurilor topologice se face pe baza criteriului conform căruia, toate elementele unei structuri au restricții privind forma, dimensiunile sau poziția lor relativă. Trebuie subliniat faptul că o structură topologică nu este limitată numai la suprafețele prelucrate în operația respectivă.

Fiecare dintre suprafețele structurii topologice este caracterizată de modelele elementelor ce o compun și de parametrii de conformitate a suprafeței reale a piesei cu modelul, $p_1, p_2, \dots, p_n$, care definesc restricțiile impuse elementelor structurii (vezi figura 1.28). Pentru fiecare parametru p_i , în specificația tehnică se indică o toleranță, reprezentând domeniul de variație (valoarea minimă și cea maximă) a acestuia.

În figura 1.28, este prezentată o structură topologică, obținută pe baza acestui criteriu, formată din suprafețele teoretice S_{tl} și respectiv reală S_{rl} . Suprafața teoretică are poziția determinată de parametrii p_1, p_2, p_3, p_4 . Ca urmare a erorilor de generare, se poate considera că, la prelucrare, a fost obținută suprafața S_{rl} , care diferă de cea teoretică, având poziția determinată de parametrii p_5, p_6, p_7 și, respectiv, p_8 .

Un exemplu concret în ceea ce privește modul de constituire al unei structuri topologice este prezentat în figura 1.29. Este prezentată o structură topologică a unui capac de rulment, obținută pe baza acestui criteriu, formată din suprafețele teoretice A, B, C și respectiv A', B', C' . Ca urmare a erorilor de generare, se poate considera că, la prelucrare, au fost obținute suprafețele A_r, B_r, C_r , respectiv A'_r, B'_r, C'_r (vezi fig. 1.29), care diferă de cele teoretice, având poziția determinată de parametrii p_1, p_2, p_3, p_4 și respectiv p_5, p_6, p_7, p_8 .

Fiecare dintre restricțiile de formă, poziție și dimensiune, prevăzute în etapa de proiectare se va constitui într-un parametru de conformitate al structurii topologice respective.

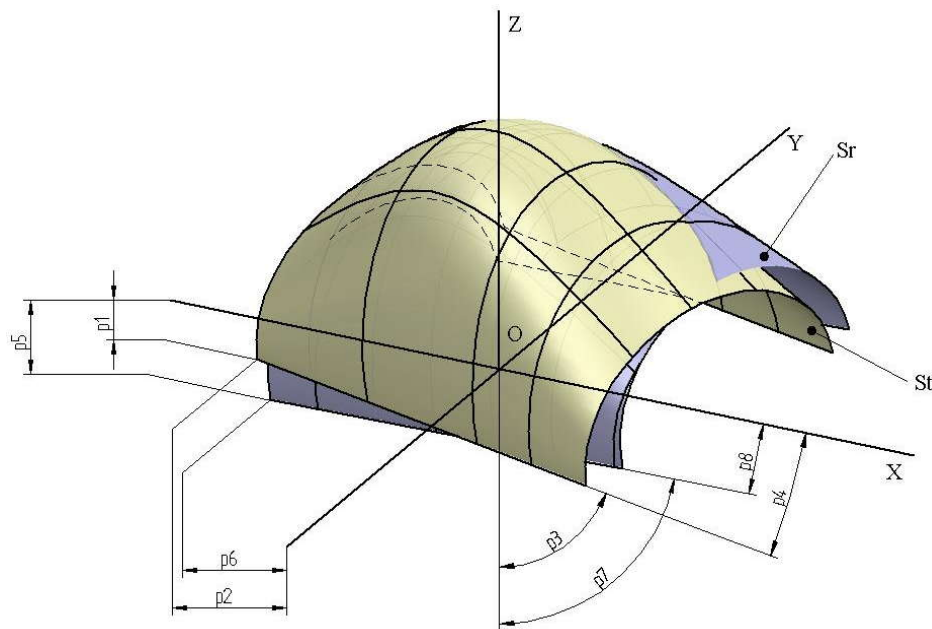


Fig. 1.28. Structura topologică reală și teoretică

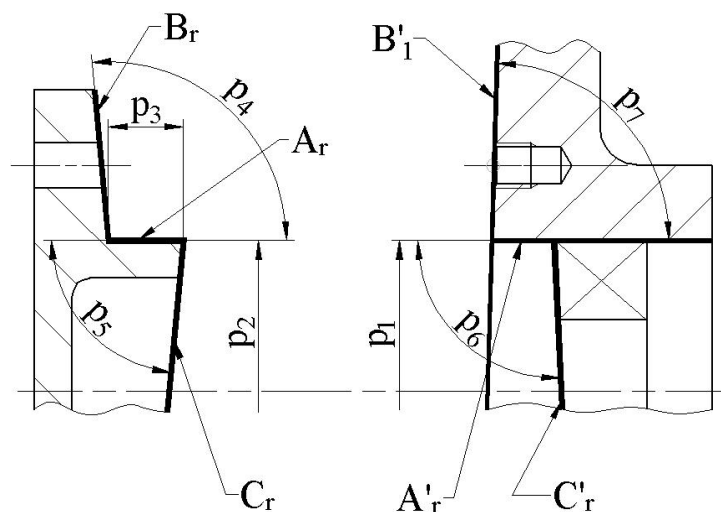


Fig. 1.29. Structura topologică a unui capac de rulment

Parametrii structurii topologice pot fi clasificați în **parametri constanți** și **parametri variabili**.

Parametrii constanți nu influențează hotărâtor comportarea în exploatare a structurii topologice.

Parametrii variabili sunt acei parametri ale căror abateri sunt importante pentru comportarea în exploatare și sunt restricționați prin specificațiile tehnice. Aceștia se măsoară și devin variabilele modelului.

Definirea suprafețelor generate și a parametrilor de conformitate

Pentru stabilirea structurilor topologice este necesar ca, pentru fiecare operație realizată pe mașina-unelte, să se grupeze suprafețele între care se impun restricții speciale privind poziția lor relativă. Aceste restricții pot avea ca suprafață de referință o *suprafață prelucrată în cadrul operației respective* sau o *suprafață prelucrată anterior*.

Fiecare dintre restricțiile de formă, poziție și dimensiune, prevăzute în etapa de proiectare, se va constitui într-un parametru de conformitate al structurii topologice respective.

Stabilirea traiectoriilor de explorare a suprafețelor

În secvența de măsurare implementată în programul piesă se stabilește în mod convenabil o traiectorie a palpatorului aparatului de măsurare în cursul extragerii norului de puncte.

Se pot defini:

- **structura topologică țintă**, ca fiind structura topologică ce se urmărește a fi realizată;

- **structura topologică programată**, structura topologică ce se definește prin programul piesă și care include corecțiile efectuate pentru a se ajunge la structura topologică țintă;

- **structura topologică reală**, care se obține efectiv în urma prelucrării.

Tuturor acestor structuri topologice le corespund modele matematice obținute în urma aplicării uneia dintre metodele propuse (metoda algoritmilor genetici, metoda circulației parametrilor, metoda bazată pe rețele neuronale etc.).

Se pornește de la modelul structurii topologice țintă, care este un model bine determinat din faza de proiectare. În faza inițială, se poate considera că aceasta este identică cu structura topologică programată.

Pentru a se obține familia de modele ale piesei se modifică valorile parametrilor structurii topologice țintă și se efectuează o etapă de măsurare inserată în programul piesă. În acest fel, se obțin coordonate ale punctelor măsurate în raport cu modificările parametrilor structurii topologice țintă.

Notă: Precizăm ca parametrii care se modifică sunt de două tipuri: **programabili** și **neprogramabili**.

Parametrii programabili sunt acei parametri care se pot modifica prin programul piesă și asupra cărora se poate interveni direct în procesul de corecție.

Parametrii neprogramabili sunt acei parametri variabili care nu pot fi programați și care apar ca urmare a proceselor de prelucrare (de exemplu deformațiile termice, uzura sculelor etc.).

Având în vedere faptul că palpatorul dispozitivului de măsurare este prevăzut cu o suprafață de palpare sferică, trebuie ca traiectoria centrului acestei suprafețe să fie o echidistantă la suprafața teoretică ce va fi explorată (vezi figura 1.30).

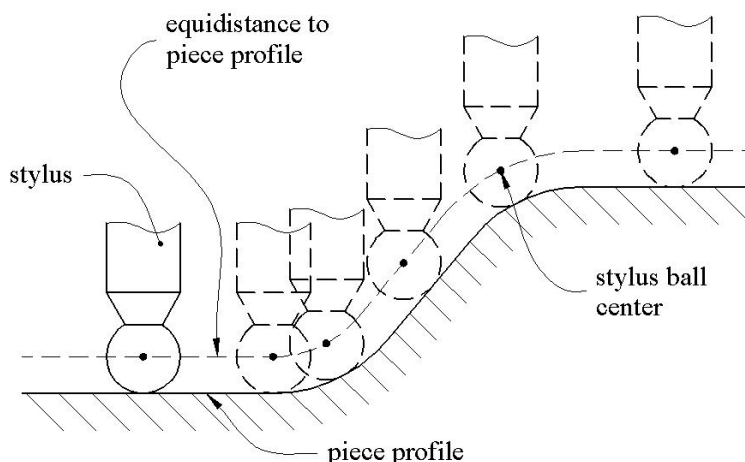


Fig. 1.30. Traiectoria de explorare a suprafeței

Fig. 1.31. Explorarea unei piese complexe

Fiecare dintre suprafețele structurii topologice este descrisă de modelul reperului și de parametrii de conformitate cu suprafața reală.

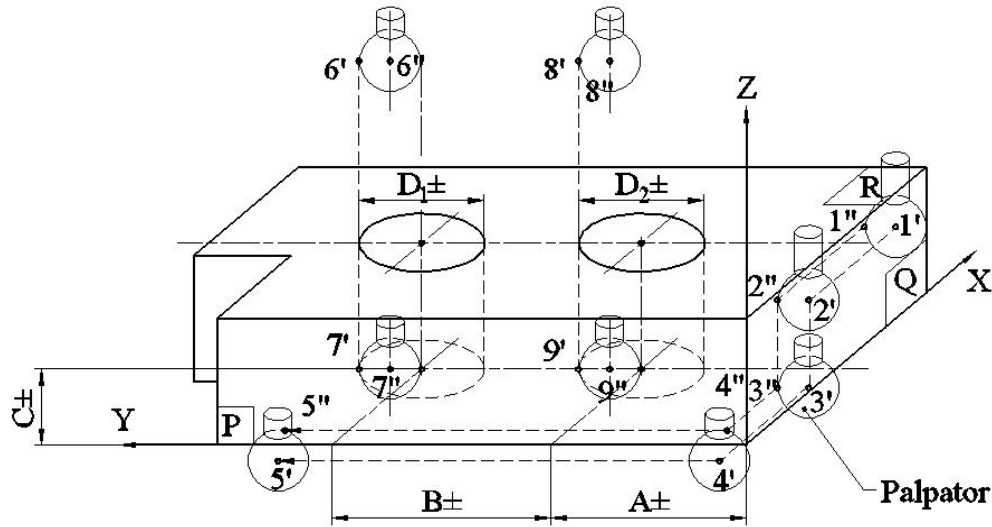


Fig. 1.32. Structură topologică metrologică

În figura 1.32, este prezentată o structură topologică compusă din două alezaje de diametre D_1 și D_2 și din suprafețele plane P , Q și R . Parametrii de conformitate sunt parametrii modelului structurii topologice adică:

- diametrele alezajelor D_1 și D_2 ;
- distanța dintre centrul găurii D_1 și planul Q (distanța A);
- distanța dintre centrele găurilor (distanța B);
- unghiul dintre axele găurilor;
- distanța dintre planul P și centrele găurilor (distanța C).

Programul piesă pentru generarea suprafețelor respective conține traiectoria sculei pentru prelucrarea acestora.

Măsurarea piesei este realizată pe un sistem de măsurare în mod similar cu procesul de generare, prin înlocuirea sculei cu un sistem de palpare. În secvența de măsurare, în programul piesă, se imprimă palpatorului traiectoria necesară culegerii coordonatelor punctelor $1''$, $2''$, ... $9''$, (vezi figura 1.32), adică, ținând cont de corecția necesară compensării diametrului capului sferic al palpatorului, traiectorie care este dată de punctele $1'$, $2'$, ... $9'$.

După ce au fost culese coordonatele punctelor care formează norul de puncte destinat descrierii topologiei metrologice a reperului, urmează ca aceste date să fie procesate printr-una dintre metodele propuse, obținându-se topologia metrologică a reperului respectiv.

1.6.4. Concluzii

În prezent, metodologia de proiectare este bazată pe proiectarea individuală a suprafețelor care descriu un element mecanic, utilizând lanțuri de dimensiuni care să asigure îndeplinirea rolului funcțional în construcțiile mecanice. Se propune înlocuirea modului în care se face astăzi proiectarea printr-un concept original, bazat pe structuri

topologice, în conformitate cu care toate suprafețele sunt considerate un tot unitar. Acest lucru a determinat înlocuirea lanțurilor de dimensiuni cu lanțuri de structuri topologice.

O astfel de abordare ușurează etapele următoare de identificare și modelare pe baza conceptelor topologice ale structurilor mecanice.

Definirea structurilor topologice este realizată pe criteriul conform căruia toate elementele au restricții referitoare la formă, dimensiuni și poziționare relativă.

Subliniem faptul că structura topologică tehnologică nu este limitată la suprafețele generate în operația curentă.

În scopul de a identifica structurile topologice este necesar să grupăm suprafețele pentru care apar restricții privitoare la poziționarea relativă a suprafețelor. Aceste restricții pot avea ca referință o suprafață prelucrată în cadrul operației curente sau al unei operații anterioare. Fiecare dintre restricțiile prevăzute în faza de proiectare în ceea ce privește forma, poziția sau dimensiunile, reprezintă un parametru al structurii topologice.

În raport, au fost prezentate câteva dintre metodele utilizate pentru identificarea modelului reperului, pe baza unor produse soft specializate dezvoltate de către autori în mediul de programare MatLab.

Obiectivul II. Identificarea (modelarea) structurilor topologice

2.1. Descrierea topologică a geometriei construcțiilor mecanice

În ceea ce urmează, se vor prezenta două exemple numerice aplicate pentru identificarea bazată pe abordarea topologică a structurilor mecanice.

Exemplele numerice sunt bazate pe softuri specializate dezvoltate de către autori pe baza programului MatLab, versiunea 7.

2.1.1. Modelarea unei structuri topologice de tip cilindru-cilindru, utilizând metoda algoritmilor genetici

A fost aplicată tehnica de identificare bazată pe algoritmi genetici, pentru identificarea unui ansamblu de suprafețe compus din două alezaje cu raza $R=10$ mm și distanța între axe $d=50$ mm (vezi figura 2.1).

Pentru a simula inspectarea suprafeței reale a fost utilizat un soft care poate genera doi nori de puncte (unul pe fiecare suprafață) cu câte 7 puncte pe fiecare suprafață.

Pentru generarea suprafețelor cilindrice au fost utilizate ecuațiile:

$$X_1 = \begin{Bmatrix} R \cdot \cos(\alpha) \\ R \cdot \sin(\alpha) \\ p \cdot \alpha \end{Bmatrix}; X_2 = \begin{Bmatrix} R \cdot \cos(\alpha) + d \\ R \cdot \sin(\alpha) \\ p \cdot \alpha \end{Bmatrix}. \quad (2.1)$$

Să presupunem că axele suprafețelor au abaterile unghiulare φ_1 și φ_2 față de poziția teoretică. În acest mod coordonatele punctelor sunt:

$$x_i = \omega_2^T(\varphi_i) \cdot X_i, \quad i = \{1, 2\}, \quad (2.2)$$

unde

$$\omega_2(\varphi_i) = \begin{Bmatrix} \cos(\varphi_i) & 0 & -\sin(\varphi_i) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi_i) & 0 & \cos(\varphi_i) \end{Bmatrix}, \quad i = \{1, 2\}. \quad (2.3)$$

Pentru a defini funcția obiectiv a fost aplicată metoda celor mai mici pătrate.

Astfel **funcția obiectiv** devine

$$d = \sum_{i=1}^7 (X_i^2 + Y_i^2 - R^2)^2 + \sum_{j=8}^{14} [(X_j - d)^2 + Y_j^2 - R^2]^2. \quad (2.4)$$

Ca program de rezolvare a fost utilizat Genetic Algorithms Toolbox din programul MatLab versiunea 7.

În tabelul 2.1, sunt prezentate rezultatele obținute pentru diferite valori ale unghiurilor φ_1 și φ_2 .

Opțiunile Genetic Algorithm Toolbox au fost stabilite la: Population Size=20; Elite Count=2; Crossover Fraction=0.8; Migration Interval=20; Migration Fraction=0.2.

Tabelul 2.1. Rezultate numerice

φ_1 actual [°]	φ_1 calc [°]	φ_2 actual [°]	φ_2 calc [°]	$\Delta\varphi_1$ [°]	$\Delta\varphi_2$ [°]
1	1.00238	-2	-2.00038	0.00238	0.00038
2	2.0021	-1	-0.99045	0.0021	0.00955
-0.5	-0.4971	-1	-1.00215	0.0029	0.00215
-1	-0.9954	0	-0.00553	0.0046	0.00553
-1.5	-1.495	0.5	0.50494	0.005	0.00494

2.1.2. Modelarea unei structuri topologice complexe, utilizând metoda rețelelor neuronale

A fost aleasă o piesă cu suprafețe plane și cilindrice și au fost stabilite abaterile dimensionale și de poziție care apar între suprafețele funcționale vezi figura 2.1).

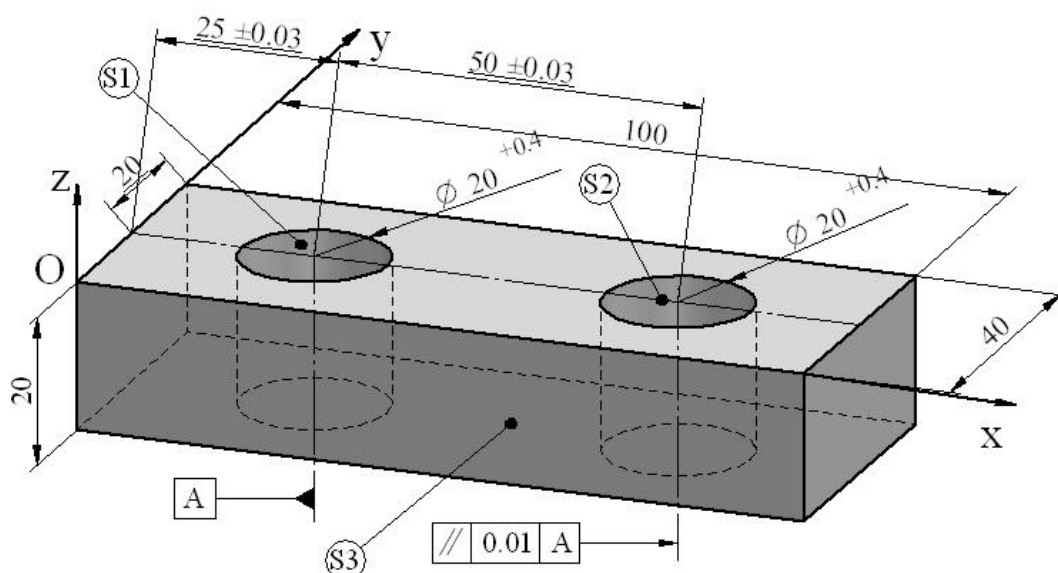


Fig. 2.1. Reper cu ansamblu de dimensiuni

Ca suprafețe funcționale au fost considerate alezajele cu diametrele de 20 mm (S_1 și S_2) și suprafața plană S_0 .

Au fost considerate ca importante:

- diametrele alezajelor S_1 și S_2 ;
- poziția acestor alezaje față de suprafața plană S_0 ;
- poziția față de planul yOz al sistemului de referință;
- distanța între axele alezajelor.

Pentru simplificarea utilizării rețelei neuronale considerăm că setul de parametri este format din

$$\{\varphi_1, x_{02}, y_{02}, \varphi_2\}, \quad (2.5)$$

unde:

φ_1 — rotația în jurul axei Ox a găurii S_1 ;

x_{02} — deplasarea centrului alezajului S_2 față de centrul alezajului S_1 , pe axa Ox ;

y_{02} — deplasarea centrului alezajului S_2 față de centrul alezajului S_1 , pe axa Oy ;

φ_2 — unghiul între axele alezajelor S_2 și S_1 în planul yOz ;

La antrenarea rețelei neuronale, fiecărui punct i i-a fost aplicată transformarea de coordonate într-un sistem de referință modificat cu parametri de conformitate calculându-se valoarea funcției f , ca deviație a poziției punctelor față de suprafața cilindrică:

$$f = (x + X_0)^2 + (y + Y_0)^2 - R_0^2, \quad (2.6)$$

în care X_0 și Y_0 sunt coordonatele teoretice ale centrului suprafețe cilindrice și R_0 raza teoretică a acestui cilindru.

Parametrii x_{02} , y_{02} , au abateri în domeniul ± 0.4 iar parametri unghiulari φ_1 și φ_2 au abateri în domeniul $\pm 0.03^\circ$.

A fost obținută o bază de date cu

$$M = \prod_{i=1}^4 v_i = 5^4 = 625, \quad (2.7)$$

înregistrări, fiecare înregistrare având 38 de câmpuri (34 de valori pentru funcția f și 4 valori pentru setul de parametri).

În tabelul 2.2, este prezentată precizia cu care rețeaua neuronală răspunde interogării. Parametrii de interogare sunt în domeniul de antrenare.

Tabelul 2.2. Precizia rețelei neuronale

Parametrul	Real	Calculat	Eroarea
$\varphi_1 [^\circ]$	-0.02	-0.0202	0.0002
$x_{02} [\text{mm}]$	0.1	0.10442	0.00442
$y_{02} [\text{mm}]$	-0.3	-0.3045	0.0045
$\varphi_2 [^\circ]$	0.01	0.0093	0.0007

2.1.3. Modelarea unei suprafețe cilindrice prin metoda circulației parametrilor

Ca exemplu numeric pentru această tehnică de identificare a fost simulată prelucrarea unei suprafețe cilindrice având abateri de formă, poziție și dimensiuni față de suprafața teoretică dorită.

Ecuția suprafeței cilindrice în sistemul de referință propriu este:

$$S: x^2 + y^2 - R^2 = 0. \quad (2.8)$$

Dacă admitem că suprafața este rotită în jurul axei Ox cu unghiul φ , în jurul axei Oy cu unghiul ψ , și centrul cercului director este deplasat cu valorile Δx , Δy , față de poziția nominală a acestuia, iar raza cilindrului are abaterea ΔR de la valoarea R nominală a razei, atunci ecuația suprafeței cilindrice în sistemul de referință al mașinii-unealtă este:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Astfel, **funcția obiectiv** devine:

$$f = \sum_{i=1}^m \left(X_i^2 + Y_i^2 - (R + \Delta R)^2 \right)^2 \quad (2.10)$$

unde m este numărul de puncte recoltate iar X_i , Y_i , Z_i sunt date de ecuațiile (2.9).

Parametrii modelului sunt coordonatele centrului cercului director, unghiurile de rotație în jurul axelor Ox și Oy și abaterea de la valoarea nominală a razei cercului.

Dacă acești parametri sunt determinați, putem afirma că am identificat suprafața cilindrică din punct de vedere al poziției, formelor și dimensiunilor.

Pentru exemplul numeric prezentat mai jos identificarea s-a făcut utilizând un soft original dezvoltat în programul Matlab.

Schema logică a programului este prezentată în figura 2.2.

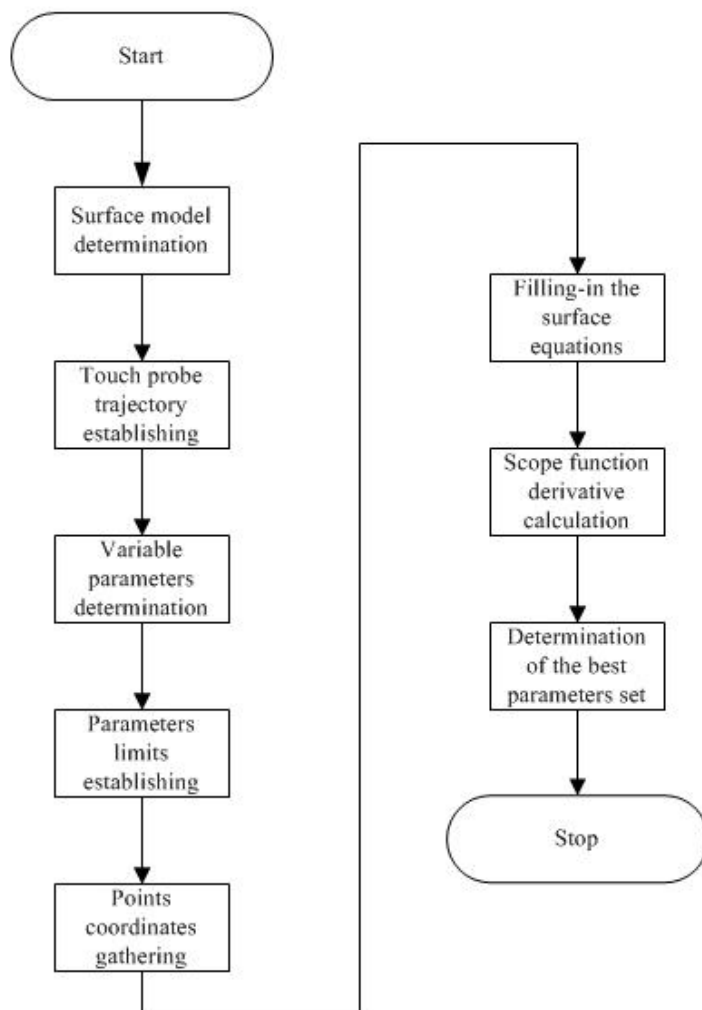


Fig. 2.2. Schema logică a algoritmului

În tabelul 2.3, sunt prezentate valorile parametrilor reali, ale parametrilor calculați și nivelul erorii pentru diferite moduri ale comutării parametrilor (vezi ecuațiile (2.9) și (2.10)).

- în cazul 1, ordinea de comutare a fost $\Delta x, \Delta y, \varphi, \psi, \Delta R$;
- în cazul 2, ordinea de comutare a fost $\varphi, \psi, \Delta x, \Delta y, \Delta R$;
- în cazul 3, ordinea de comutare a fost $\Delta R, \Delta x, \Delta y, \varphi, \psi$;
- în cazul 4, ordinea de comutare a fost $\Delta R, \Delta x, \Delta y, \varphi, \psi$.

Este evidentă influența scăzută a ordinii de comutare a parametrilor asupra nivelului erorii.

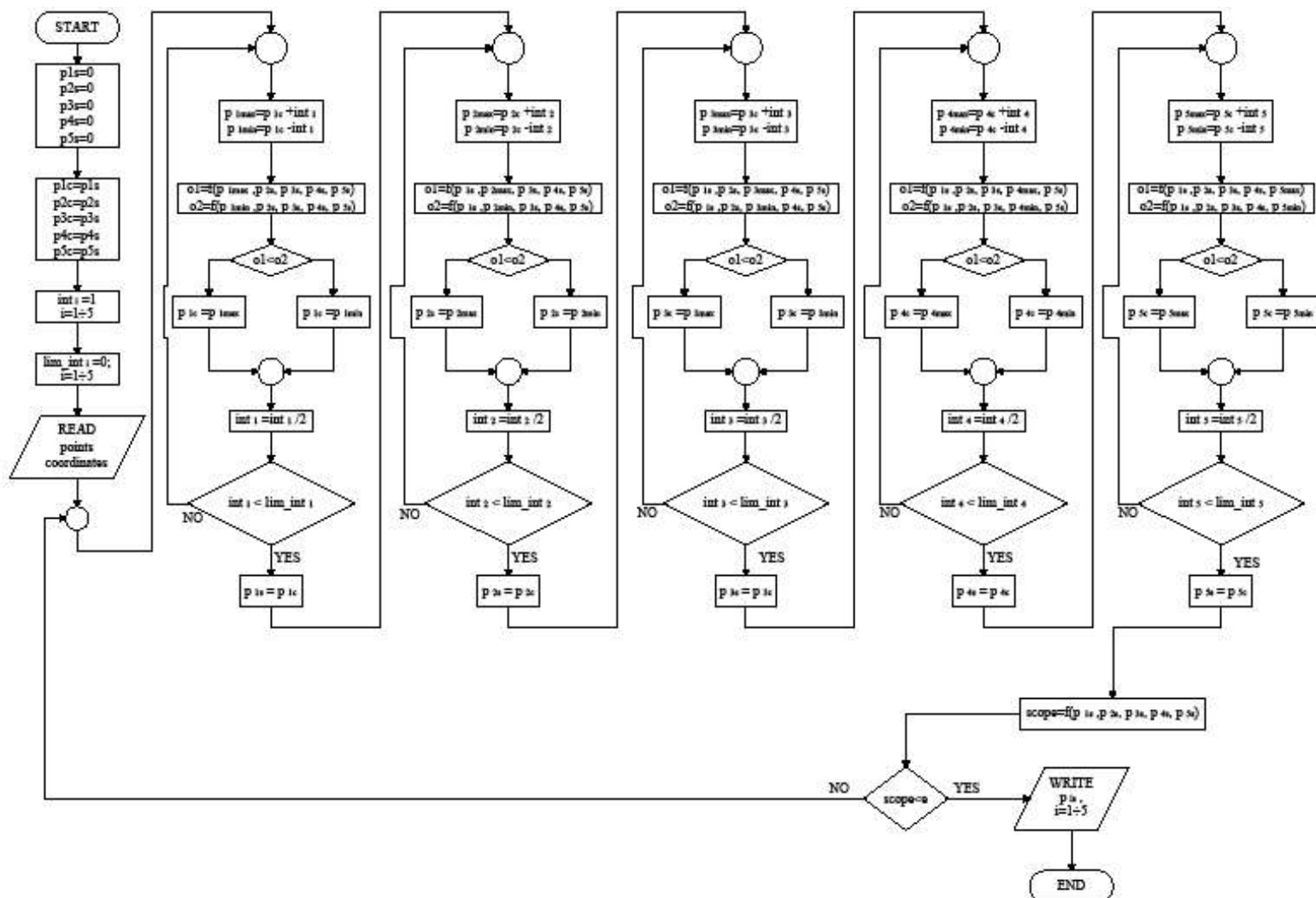


Fig. 2.3. Schema logică a programului

Tabelul 2.3. Parametrii suprafeței cilindrice

	Real	Cazul 1	Cazul 2	Cazul 3	Cazul 4	Eroare 1	Eroare 2	Eroare 3	Eroare 4
Δx [mm]	0.8	0.80011	0.79991	0.79989	0.79992	-0.00011	9E-05	0.00011	8E-05
Δy [mm]	-0.5	-0.5012	-0.49884	-0.49881	-0.49887	0.0012	-0.00116	-0.00119	-0.00113
φ [°]	-1.5	-1.498	-1.502	-1.502	-1.502	-0.002	0.002	0.002	0.002
ψ [°]	0.5	0.50009	0.49993	0.49991	0.49994	-9E-05	7E-05	9E-05	6E-05
ΔR [mm]	0.25	0.24972	0.25026	0.25031	0.25031	0.00028	-0.00026	-0.00031	-0.00031
Funcție obiectiv	1.76E-09	0.00099	0.00097	0.00099	0.000972	-0.001	-0.00097	-0.001	-0.00097

În tabelul 2.4, sunt prezentate valorile reale, valorile calculate și nivelul erorii parametrilor pentru diferite cazuri ale ordinii comutării parametrilor, obținute la rularea programului cu 1000 de cicluri.

În figura 2.4, este prezentată eroarea pentru fiecare parametru în funcție de ordinea de comutare a parametrului.

În tabelul 2.5, este arătată influența erorii admisibile a funcției obiectiv asupra numărului de cicluri de rulare a programului.

În figura 2.5, se prezintă numărul total de cicluri ale programului iar în figura 2.6, este arătat numărul de cicluri pentru fiecare parametru.

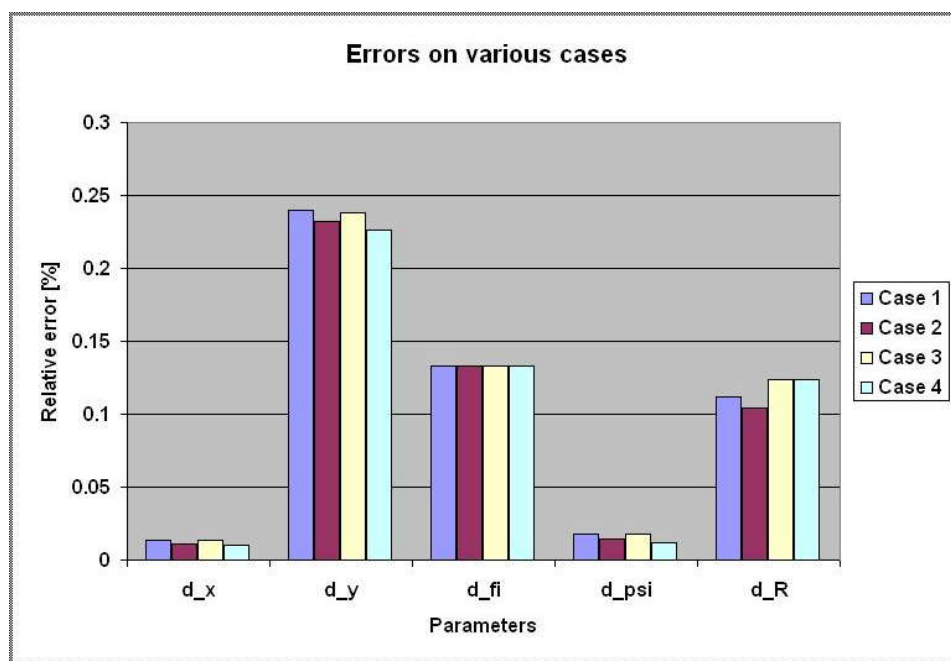


Fig. 2.4. Eroarea relativă în funcție de ordinea de comutare a parametrilor

Tabelul 2.4.

	Real	Cazul 1	Cazul 2	Cazul 3	Cazul 4	Eroare 1	Eroare 2	Eroare 3	Eroare 4
Δx [mm]	0.8	0.80082	0.79973	0.80082	0.79971	-0.00082	0.00027	-0.00082	0.00029
Δy [mm]	-0.5	-0.5087	-0.49651	-0.50853	-0.49624	0.00864	-0.00349	0.00853	-0.00376
φ [°]	-1.5	-1.4858	-1.5063	-1.486	-1.5068	-0.0142	0.0063	-0.014	0.0068
ψ [°]	0.5	0.50068	0.49978	0.50068	0.49976	-0.00068	0.00022	-0.00068	0.00024
ΔR [mm]	0.25	0.24795	0.25092	0.24778	0.25109	0.00205	-0.00092	0.00222	-0.00109
Funcția obiectiv	1.76E-09	0.05133	0.009288	0.050653	0.010931	-0.05133	-0.00929	-0.05065	-0.01093

Tabelul 2.5.

Eroare admisibilă ε	Valoarea funcției obiectiv	Numărul total de cicluri	Cicluri pentru x	Cicluri pentru y	Cicluri pentru φ	Cicluri pentru ψ	Cicluri pentru R
100	82.131	1052	210	212	210	210	210
10	9.4413	2207	441	443	441	441	441
1	0.92085	3467	693	695	693	693	693
0.1	0.091066	4727	945	947	945	945	945
0.01	0.009148	5987	1197	1199	1197	1197	1197
0.001	0.000917	7247	1449	1451	1449	1449	1449

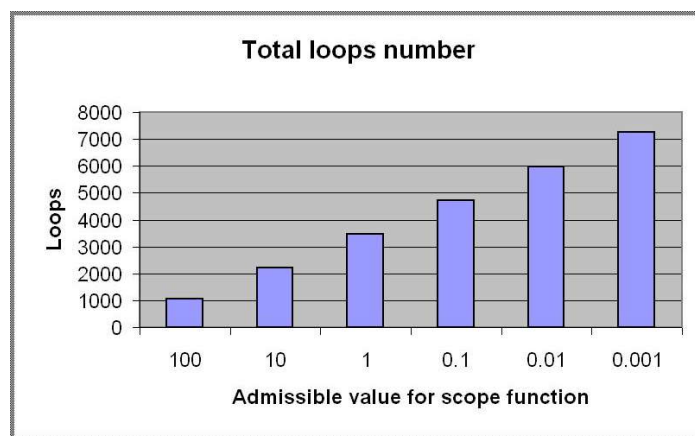


Fig. 2.5. Numărul total de cicluri

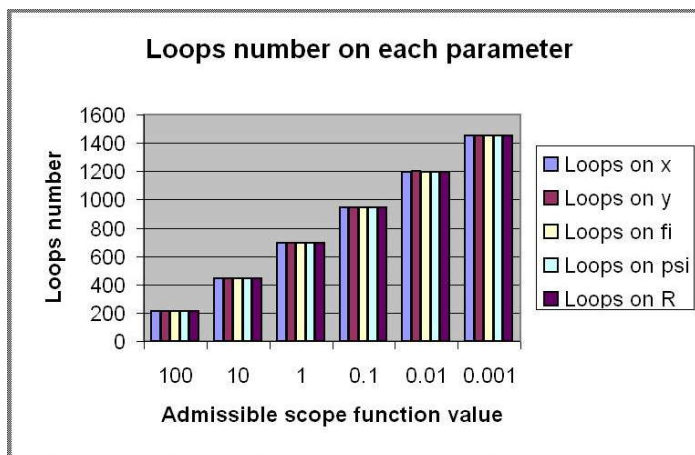


Fig. 2.6. Numărul de cicluri pentru fiecare parametru

2.1.4. Produse soft dedicate identificării structurilor topologice

Metoda circulației parametrilor

```
masurat=load('D:\puncte.txt');
contor=[0 0 0 0]; epsilon=0.0001;
nr_pcte=length(masurat);
R=20; p=10;
continua=1;
f_obiectiv=10^6;
lim_interv_x=10^(-6); lim_interv_y=10^(-6);
lim_interv_csi=10^(-6)*pi/180; lim_interv_psi=10^(-6)*pi/180;
lim_interv_R=10^(-6);
interv_x=1; interv_y=1; interv_csi=1*pi/180; interv_psi=1*pi/180; interv_R=1;
dx_s=0; dy_s=0; csi_s=0; psi_s=0; dR_s=0;

while continua;
continua_x=1; continua_y=1; continua_csi=1; continua_psi=1; continua_R=1;
interv_x=1; interv_y=1;
interv_csi=1*pi/180; interv_psi=1*pi/180; interv_R=1;
f_ob_x=10^6; f_ob_y=10^6; f_ob_csi=10^6; f_ob_psi=10^6; f_ob_R=10^6;

%Inceput param x

dx_c=dx_s; dx_max=dx_c+interv_x; dx_min=dx_c-interv_x;
csi=csi_s; psi=psi_s;
dR=dR_s;
o1=[[1 0 0];
    [0 cos(csi) sin(csi)];
    [0 -sin(csi) cos(csi)]];
o2=[[cos(psi) 0 -sin(psi)];
    [0 1 0];
    [sin(psi) 0 cos(psi)]];

while continua_x;
dx=[dx_max; dy_s; 0];
dxp=[1; 0; 0];
s_max=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(l,1); x(2,1)=masurat(l,2); x(3,1)=masurat(l,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    Xp=o1*o2*dxp;
    s_max=s_max+2*(X(1)^2+X(2)^2-R+dR)^2*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
end;

dx=[dx_min; dy_s; 0];
s_min=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(l,1); x(2,1)=masurat(l,2); x(3,1)=masurat(l,3);
```

```

        X=o1*o2*(x+dx);
        Xp=o1*o2*dxp;
        s_min=s_min+2*(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
    end;

    dx=[dx_c; dy_s; 0];
    s_c=0;
    for l=1:1:nr_pcte;
        x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
        X=o1*o2*(x+dx);
        Xp=o1*o2*dxp;
        s_c=s_c+2*(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
    end;

    if s_max*s_min>0;
        interv_x=interv_x*2;
        dx_max=dx_c+interv_x; dx_min=dx_c-interv_x;
    else
        if s_max*s_c<0;
            dx_min=dx_c; dx_c=(dx_max+dx_min)/2;
        else
            dx_max=dx_c; dx_c=(dx_max+dx_min)/2;
        end;
        interv_x=abs(dx_max-dx_min);
    end;

    s_x=0;
    for l=1:1:nr_pcte;
        x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
        X=o1*o2*(x+dx);
        s_x=s_x+(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)^2;
    end;
    if s_x<f_ob_x
        f_ob_x=s_x;
        dx_s=dx_c;
    end;
    contor(1)=contor(1)+1;
    continua_x=interv_x>=lim_interv_x;
    end;

    %Sfarsit param x

    %Inceput param y

    dy_c=dy_s; dy_max=dy_c+interv_y; dy_min=dy_c-interv_y;
    csi=csi_s; psi=psi_s;
    dR=dR_s;
    o1=[[1 0 0];
        [0 cos(csi) sin(csi)]];

```

```

    [0 -sin(csi) cos(csi)];
o2=[[cos(psi) 0 -sin(psi)];
    [0 1 0];
    [sin(psi) 0 cos(psi)]];

while continua_y;
dx=[dx_s; dy_max; 0];
dxdp=[0; 1; 0];
s_max=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    Xp=o1*o2*dxdp;
    s_max=s_max+2*(X(1)^2+X(2)^2-R+dR)^2*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
end;

dx=[dx_s; dy_min; 0];
s_min=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    Xp=o1*o2*dxdp;
    s_min=s_min+2*(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
end;

dx=[dx_s; dy_c; 0];
s_c=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    Xp=o1*o2*dxdp;
    s_c=s_c+2*(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
end;

if s_max*s_min>0;
    interv_y=interv_y*2;
    dy_max=dy_c+interv_y; dy_min=dy_c-interv_y;
else
    if s_max*s_c<0;
        dy_min=dy_c; dy_c=(dy_max+dy_min)/2;
    else
        dy_max=dy_c; dy_c=(dy_max+dy_min)/2;
    end;
    interv_y=abs(dy_max-dy_min);
end;

s_y=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);

```

```

        s_y=s_y+(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)^2;
    end;
    if s_y<f_ob_y
        f_ob_y=s_y;
        dy_s=dy_c;
    end;
    contor(2)=contor(2)+1;
    continua_y=interv_y>=lim_interv_y;
    end;

%Sfarsit param y

%Inceput param csi

csi_c=csi_s; csi_max=csi_c+interv_csi; csi_min=csi_c-interv_csi;
psi=psi_s;
dR=dR_s;
o2=[[cos(psi) 0 -sin(psi)];
    [0 1 0];
    [sin(psi) 0 cos(psi)]];
dx=[dx_s; dy_s; 0];

while continua_csi;
o1=[[1 0 0];
    [0 cos(csi_max) sin(csi_max)];
    [0 -sin(csi_max) cos(csi_max)]];
o1p=[[0 0 0];
    [0 -sin(csi_max) cos(csi_max)];
    [0 -cos(csi_max) -sin(csi_max)]];
s_max=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    Xp=o1p*o2*(x+dx);
    s_max=s_max+2*(X(1)^2+X(2)^2-R+dR)^2*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
end;

o1=[[1 0 0];
    [0 cos(csi_min) sin(csi_min)];
    [0 -sin(csi_min) cos(csi_min)]];
o1p=[[0 0 0];
    [0 -sin(csi_min) cos(csi_min)];
    [0 -cos(csi_min) -sin(csi_min)]];
s_min=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    Xp=o1p*o2*(x+dx);
    s_min=s_min+2*(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
end;

```

```

end;

o1=[[1 0 0];
    [0 cos(csi_c) sin(csi_c)];
    [0 -sin(csi_c) cos(csi_c)]];
o1p=[[0 0 0];
    [0 -sin(csi_c) cos(csi_c)];
    [0 -cos(csi_c) -sin(csi_c)]];
s_c=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    Xp=o1p*o2*(x+dx);
    s_c=s_c+2*(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
end;

if s_max*s_min>0;
    interv_csi=interv_csi*2;
    csi_max=csi_c+interv_csi; csi_min=csi_c-interv_csi;
else
    if s_max*s_c<0;
        csi_min=csi_c; csi_c=(csi_max+csi_min)/2;
    else
        csi_max=csi_c; csi_c=(csi_max+csi_min)/2;
    end;
    interv_csi=abs(csi_max-csi_min);
end;

s_csi=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    s_csi=s_csi+(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)^2;
end;

if s_csi<f_ob_csi
    f_ob_csi=s_csi;
    csi_s=csi_c;
end;
contor(3)=contor(3)+1;
continua_csi=interv_csi>=lim_interv_csi;
end;

%Sfarsit param csi

%Inceput param psi

psi_c=psi_s; psi_max=psi_c+interv_psi; psi_min=psi_c-interv_psi;
csi=csi_s;

```

```

dR=dR_s;
o1=[[1 0 0];
    [0 cos(csi) sin(csi)];
    [0 -sin(csi) cos(csi)]];
dx=[dx_s; dy_s; 0];

while continua_psi;
o2=[[cos(psi_max) 0 -sin(psi_max)];
    [0 1 0];
    [sin(psi_max) 0 cos(psi_max)]];
o2p=[[-sin(psi_max) 0 -cos(psi_max)];
    [0 0 0];
    [cos(psi_max) 0 -sin(psi_max)]];
s_max=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    Xp=o1*o2p*(x+dx);
    s_max=s_max+2*(X(1)^2+X(2)^2-R+dR)^2*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
end;

o2=[[cos(psi_min) 0 -sin(psi_min)];
    [0 1 0];
    [sin(psi_min) 0 cos(psi_min)]];
o2p=[[-sin(psi_min) 0 -cos(psi_min)];
    [0 0 0];
    [cos(psi_min) 0 -sin(psi_min)]];
s_min=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    Xp=o1*o2p*(x+dx);
    s_min=s_min+2*(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
end;

o2=[[cos(psi_c) 0 -sin(psi_c)];
    [0 1 0];
    [sin(psi_c) 0 cos(psi_c)]];
o2p=[[-sin(psi_c) 0 -cos(psi_c)];
    [0 0 0];
    [cos(psi_c) 0 -sin(psi_c)]];
s_c=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    Xp=o1*o2p*(x+dx);
    s_c=s_c+2*(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)*(2*X(1)*Xp(1)+2*X(2)*Xp(2));
end;

if s_max*s_min>0;

```

```

    interv_psi=interv_psi*2;
    psi_max=psi_c+interv_psi; psi_min=psi_c-interv_psi;
else
    if s_max*s_c<0;
        psi_min=psi_c; psi_c=(psi_max+psi_min)/2;
    else
        psi_max=psi_c; psi_c=(psi_max+psi_min)/2;
    end;
    interv_psi=abs(psi_max-psi_min);
end;

s_psi=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    s_psi=s_psi+(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)^2;
end;
if s_psi<f_ob_psi
    f_ob_psi=s_psi;
    psi_s=psi_c;
end;
contor(4)=contor(4)+1;
continua_psi=interv_psi>=lim_interv_psi;
end;

%Sfarsit param psi

%Inceput param R

dR_c=dR_s; dR_max=dR_c+interv_R; dR_min=dR_c-interv_R;
csi=csi_s; psi=psi_s;
o1=[[1 0 0];
    [0 cos(csi) sin(csi)];
    [0 -sin(csi) cos(csi)]];
o2=[[cos(psi) 0 -sin(psi)];
    [0 1 0];
    [sin(psi) 0 cos(psi)]];
dx=[dx_s; dy_s; 0];

while continua_R;
    s_max=0;
    for l=1:1:nr_pcte;
        x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
        X=o1*o2*(x+dx);
        s_max=s_max+2*(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR_max)^2)*(-2*(R+dR_max));
    end;

    s_min=0;
    for l=1:1:nr_pcte;

```

```

        x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
        X=o1*o2*(x+dx);
        s_min=s_min+2*(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR_min)^2)*(-2*(R+dR_min));
    end;

    s_c=0;
    for l=1:1:nr_pcte;
        x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
        X=o1*o2*(x+dx);
        s_c=s_c+2*(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR_c)^2)*(-2*(R+dR_c));
    end;

    if s_max*s_min>0;
        interv_R=interv_R*2;
        dR_max=dR_c+interv_R; dR_min=dR_c-interv_R;
    else
        if s_max*s_c<0;
            dR_min=dR_c; dR_c=(dR_max+dR_min)/2;
        else
            dR_max=dR_c; dR_c=(dR_max+dR_min)/2;
        end;
        interv_R=abs(dR_max-dR_min);
    end;

    s_R=0;
    for l=1:1:nr_pcte;
        x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
        X=o1*o2*(x+dx);
        s_R=s_R+(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR_c)^2)^2;
    end;
    if s_R<f_ob_x
        f_ob_R=s_R;
        dR_s=dR_c;
    end;
    contor(5)=contor(5)+1;
    continua_R=interv_R>=lim_interv_R;
end;

%Sfarsit param R

dx=[dx_s; dy_s; 0];
csi=csi_s; psi=psi_s;
dR=dR_s;
o1=[[1 0 0];
    [0 cos(csi) sin(csi)];
    [0 -sin(csi) cos(csi)]];
o2=[[cos(psi) 0 -sin(psi)];
    [0 1 0];
    [sin(psi) 0 cos(psi)]];

```

```

s=0;
for l=1:1:nr_pcte;
    x(1,1)=masurat(1,1); x(2,1)=masurat(1,2); x(3,1)=masurat(1,3);
    X=o1*o2*(x+dx);
    s=s+(X(1)^2+X(2)^2-(R+dR)^2)^2;
end;
if s<f_objectiv
    f_objectiv=s;
    solutie=[dx_s dy_s csi_s*180/pi psi_s*180/pi dR_s];
end;
max(contor)
continua=(f_objectiv>=epsilon & max(contor)<=100000);
end;

```

Metoda algoritmilor genetici

```

function [suma]=alg_gen (unghiuri);
format long;
syms unghi real;
coord=load('D:\coord5.txt');
fi1=unghiuri(1)*pi/180; fi2=unghiuri(2)*pi/180; R=10; d=50;
s1=0; s2=0;
o2=[[cos(unghi) 0 -sin(unghi)];
    [0 1 0];
    [sin(unghi) 0 cos(unghi)]];
nr_pcte=length(coord);
o2_fi1=subs(o2,unghi,fi1);
for l=1:1:nr_pcte/2;
    X=o2_fi1*[coord(l,1) coord(l,2) coord(l,3)]';
    s1=s1+(X(1)^2+X(2)^2-R^2)^2;
end;
o2_fi2=subs(o2,unghi,fi2);
for l=nr_pcte/2+1:1:nr_pcte;
    X=o2_fi2*[coord(l,1) coord(l,2) coord(l,3)]';
    s2=s2+((X(1)-d)^2+X(2)^2-R^2)^2;
end;
suma=s1+s2;

```

2.2. Structurarea topologică a construcțiilor mecanice

Așa cum am arătat la paragraful 1.5, pentru descrierea geometriei topologice a construcțiilor mecanice este necesar să se țină seama de modul în care sunt generate suprafețele tehnologice ale reperului.

La executarea unui lot de piese, după realizarea fiecărei piese, aceasta este inspectată și, pe baza informațiilor obținute se pot aplica eventualele corecții necesare pentru ca la prelucrarea următoarei piese să fie reduse erorile induse de sistemul tehnologic format din mașina-unealtă—sculă—piesă.

2.2.1. Stabilirea domeniului de variație a parametrilor

Pentru a genera prin simulare punctele aparținând suprafețelor componente ale structurii topologice, fiecărui parametru din setul parametrilor de conformitate și de corecție i se dă o variație între limite care trebuie să depășească limitele admisibile stabilite la proiectare. Domeniile de variație ale parametrilor p_i și q_i se vor discretiza în intervale neuniforme, cu scopul de a păstra un echilibru între precizia de modelare și dimensiunile bazei de date utilizate pentru antrenare.

Având în vedere faptul că precizia de modelare trebuie să fie maximă pentru zonele extreme și zona nominală a valorii parametrului respectiv, pentru aceste zone intervalele de variație vor fi mai mici, rezultând o discretizare mai fină, în timp ce pentru restul domeniului de variație este posibil să se considere intervale de variație mai mari (vezi figura 2.7).

Este recomandabil ca domeniul de variație al parametrilor să depășească limitele de toleranță stabilite la proiectare, pentru a permite modelarea neuronală a structurii topologice respective și în situația în care suprafețele rezultante nu sunt în conformitate cu specificațiile tehnice (permițând luarea deciziei de rebutare a piesei).

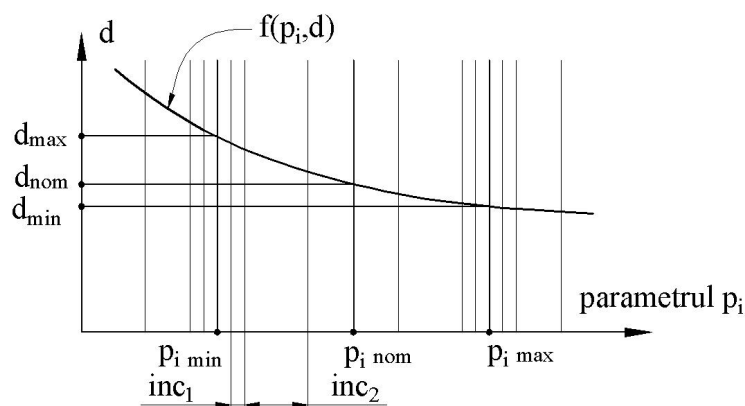


Fig. 2.7. Discretizarea neuniformă a domeniului de variație a parametrului p_i

Similar se procedează și pentru stabilirea și discretizarea domeniilor de variație a parametrilor de corecție q_i .

2.2.2. Generarea bazei de date

Pe fiecare dintre suprafețele componente ale structurii topologice se generează o serie de puncte corespunzătoare traiectoriilor de măsurare stabilite în secvența program. Aceste traiectorii de măsurare vor fi echidistante la profilul suprafeței teoretice, cu scopul de a simula pozițiile ocupate de centrul suprafeței de palpate a stylusului în timpul secvenței de măsurare.

Coordonatele punctelor generate suferă o transformare de coordonate din sistemul de referință propriu al suprafeței teoretice într-un sistem de referință deplasat cu setul de parametri $p_1, p_2, \dots, p_n$ (vezi figura 1.30).

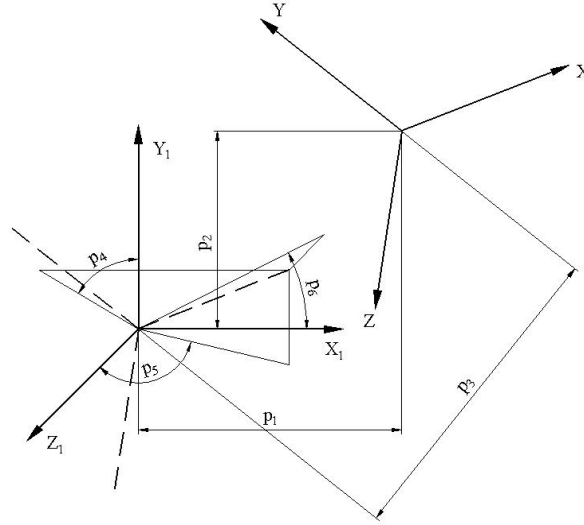


Fig. 2.8. Sisteme de referință

În figura 2.8, sunt prezentate elementele:
 $X_1Y_1Z_1$ este sistemul de referință propriu al suprafeței teoretice;
 XYZ — sistemul de referință deplasat;
 $(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6)$ — setul de parametri de conformitate.
 Transformarea de coordonate este dată de ecuația

$$X_1 = \omega \cdot X + T, \quad (2.11)$$

unde,

$$T = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}, \quad \omega = \omega_1^T(p_4) \cdot \omega_2^T(p_5) \cdot \omega_3^T(p_6), \quad (2.12)$$

sau, după dezvoltare:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos p_4 & -\sin p_4 \\ 0 & \sin p_4 & \cos p_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos p_5 & 0 & \sin p_5 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin p_5 & 0 & \cos p_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos p_6 & -\sin p_6 & 0 \\ \sin p_6 & \cos p_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

În cazul în care între suprafața respectivă și suprafața de referință există restricții, acestea vor genera un număr suplimentar de parametri de conformitate, fiind necesară o nouă transformare de coordonate de tipul (2.11) între sistemul de referință propriu al suprafeței și sistemul asociat suprafeței de referință.

Pentru fiecare dintre punctele generate se calculează valoarea funcției $f(X_1, Y_1, Z_1, p, \dots, p_n)$, obținută prin introducerea coordonatelor punctelor în ecuația generală a suprafeței teoretice.

În acest mod, se obține o bază de date cu M înregistrări și N câmpuri pe fiecare înregistrare, M și N fiind date de ecuațiile:

$$M = \prod_{i=1}^m v_i, \quad N = \sum_{i=1}^n k_i, \quad (2.14)$$

unde:

m este numărul de parametri din setul de conformitate corespunzător structurii topologice;

v_i — numărul de valori pe care le ia parametrul p_i (corespunzător discretizării alese);

n — numărul de suprafețe teoretice care compun structura topologică;

k_i — numărul punctelor generate pe fiecare suprafață teoretică S_{ii} .

Baza de date, astfel obținută, servește ca matrice de intrare pentru antrenarea rețelei neuronale, care va avea ca ieșire matricea formată din seturile de parametri de conformitate.

Similar, se generează o bază de date și se antrenează o rețea neuronală care va avea ca date de ieșire matricea formată din seturile de parametri de corecție.

2.2.3. Controlul dimensional al procesului

Explorând suprafețele generate cu ajutorul dispozitivului de măsurare fixat pe mașina-unealtă, în cadrul secvenței de măsurare, se recoltează coordonate ale punctelor de pe suprafețele reale ale fiecărui exemplar „ k ” din lotul de piese.

Aceste coordonate servesc pentru interogarea rețelelor neuronale, determinându-se atât valorile parametrilor p_i , cât ale parametrilor de corecție q_i .

Valorile parametrilor p_i servesc pentru a lua o decizie cu privire la conformitatea exemplarului „ k ” față de specificația tehnică, în timp ce valorile parametrilor q_i sunt utilizate pentru recalibrarea sistemului de prelucrare, înainte de a prelucra exemplarul „ $k+1$ ”.

2.2.4. Corelații între parametrii de corecție și cei de conformitate

Având cele rețele neuronale antrenate este posibilă găsirea valorilor parametrilor de corecție, care să determine o anumită valoare dorită pentru parametrii de conformitate.

Rețeaua neuronală, antrenată pe baza punctelor generate și a seturilor de parametri de ieșire, este interogată cu baza de date a punctelor obținute ca rezultat al modificării valorilor parametrilor de conformitate, obținându-se modelul legăturilor între setul parametrilor de conformitate și cel al parametrilor de corecție.

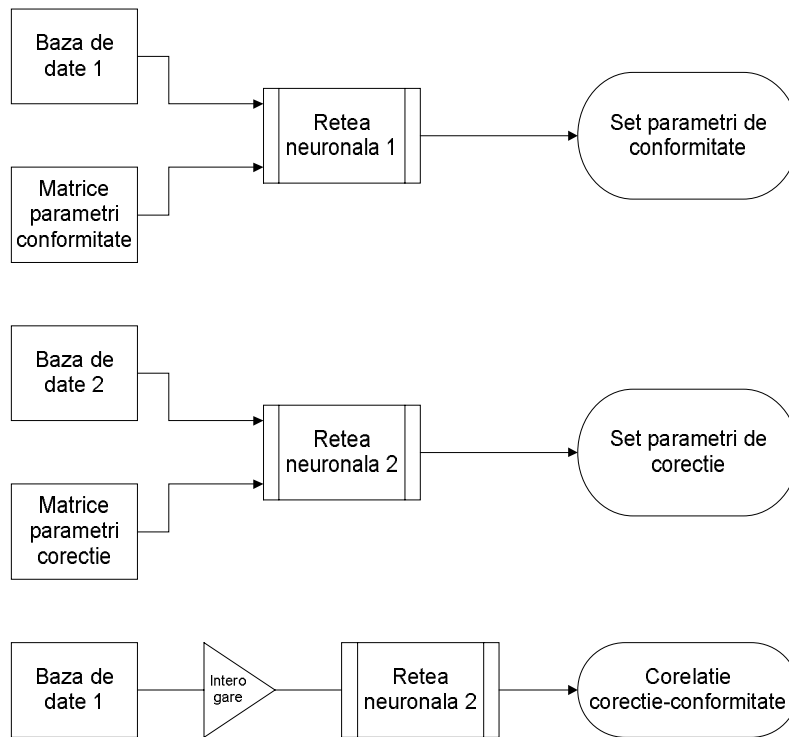


Fig. 2.8. Stabilirea corelațiilor corecție-conformitate

A fost realizată o aplicație pentru modelarea structurii topologice prezentate în figura 2.9.

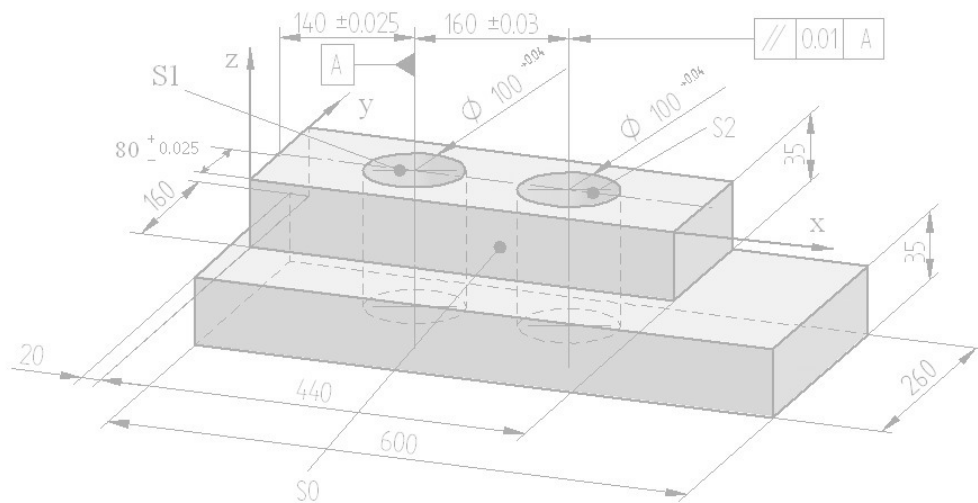


Fig. 2.9. Modelul CAD al piesei de prelucrat

Structura topologică analizată este formată din două suprafețe, reprezentate de cele două alezaje cilindrice cu diametrul de 100 mm.

Se poate considera că setul de parametri de conformitate este $\{y_{01}, \varphi_1, R_1, x_{02}, y_{02}, \varphi_2, R_2\}$, în care:

y_{01} este coordonata centrului alezajului S_1 pe direcția axei Oy ;

φ_1 — rotația în jurul axei Ox a axei alezajului S_1 ;

R_1 — raza reală a alezajului S_1 ;
 x_{02} — deplasarea centrului alezajului S_2 față de centrul alezajului S_1 pe direcția Ox ;
 y_{02} — deplasarea centrului alezajului S_2 față de centrul alezajului S_1 pe direcția Oy ;
 φ_2 — unghiul făcut de axa alezajului S_2 față de axa alezajului S_1 în planul yOz ;
 R_2 — raza reală a alezajului S_2 .

Pentru fiecare dintre suprafețele S_1 și S_2 au fost generate câte 25 de puncte în lungul unei elice cilindrice cu pasul constant.

Fiecărui punct i s-a aplicat o transformare de coordonate, într-un sistem de referință modificat cu parametrii de conformitate corespunzători și s-a calculat funcția f ca abatere a poziției punctului față de suprafața cilindrică respectivă:

$$f = (x + X_0)^2 + (y + Y_0)^2 - R_0^2, \quad (2.15)$$

în care X_0 și Y_0 sunt coordonatele teoretice ale centrului cercului director al suprafeței cilindrice și R_0 raza teoretică a acestui cerc.

Parametrilor y_{01} , y_{02} , x_{02} , R_1 și R_2 au avut variații în domeniul ± 0.04 mm, iar parametrilor unghiulari φ_1 și φ_2 au avut variații în domeniul $\pm 0.025^\circ$.

În acest fel, s-a obținut o bază de date cu $M = \prod_{i=1}^7 v_i = 3^7 = 2187$ înregistrări, fiecare înregistrare având 57 de câmpuri (50 valori ale funcției f și 7 parametri în fiecare set de conformitate).

Cu această bază de date, a fost antrenată o rețea neuronală având 100 de neuroni ascunși, antrenarea făcându-se pentru un număr maxim de 1000 de antrenări. Modelul a fost obținut utilizând programul „Neural Modeler NNModel” versiunea 1.4, luându-se ca metodă de antrenare „Standard Back-Error Propagation”.

Ca parametri de corecție ai structurii topologice au fost considerate posibilitățile de deplasare a portsculei în direcțiile Oy și Oz (parametrii q_1 și q_2) și cea de rotire a corpului portsculă în jurul axei Ox (parametrul q_3 , vezi și figura 2.8).

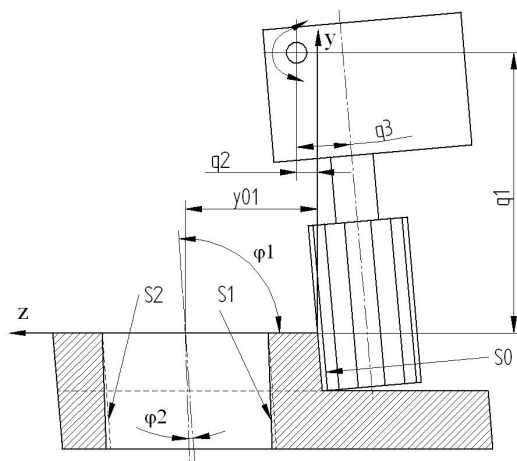


Fig. 2.10. Parametrii de corecție

Se poate remarca faptul că modificarea setului de parametri de corecție (q_1, q_2, q_3) va induce modificarea parametrilor de conformitate y_{01} , y_{02} , φ_1 și φ_2 .

În tabelul 2.6, este prezentată precizia cu care rețeaua neuronală antrenată regăsește la interogare coeficienții cu care s-a făcut antrenarea.

Tabel 2.6

Parametrul	Real	Calculat	Eroare relativă [%]
y_{01} [mm]	80.043	80.040	0.004
φ_1 [°]	-0.0004	-0.00042	10.232
R_1 [mm]	49.999	50.000	0.001
x_{02} [mm]	160.040	160.040	0.0
y_{02} [mm]	-0.0378	-0.040	5.904
φ_2 [°]	0.0004	0.00042	0.267
R_2 [mm]	49.962	49.960	0.004

În tabelul 2.7, este prezentată precizia cu care rețeaua neuronală obține la interogare coeficienți din domeniul de antrenare.

Tabel 2.7

Parametrul	Real	Calculat	Eroare relativă [%]
y_{01} [mm]	80.03	80.03	0.01
φ_1 [°]	-0.0003	-0.00025	16.667
R_1 [mm]	50.010	50.013	0.7
x_{02} [mm]	160.020	160.024	0.2
y_{02} [mm]	-0.030	-0.031	5.033
φ_2 [°]	0.00025	0.00027	8.000
R_2 [mm]	49.980	49.983	0.7

2.3. Tolerarea dimensională și de formă a structurilor topologice

2.3.1. Identificarea caracteristicilor geometrice a reperelor utilizând metoda algoritmilor genetici

Structură topologică de tip plan-plan

A fost aplicată metoda bazată pe algoritmi genetici pentru determinarea topologiei metrologice a unei structuri compuse din două suprafețe plane aflate la distanța nominală de 10 mm.

A fost cules câte un nor de puncte pe fiecare dintre cele două suprafețe plane (câte 25 de puncte în fiecare nor).

Pentru descrierea matematică a suprafețelor plane a fost utilizată ecuația

$$n_1 \cdot x + n_2 \cdot y + n_3 \cdot z + p_1 = 0. \quad (2.16)$$

Valorile coordonatelor punctelor culese se încadrează în domeniul (100 ... 100 mm) cu pasul de 50 mm. Pentru fiecare pereche (x,y) s-a calculat valoarea coordonatei z, cu ecuația

$$z = -\frac{n_1 \cdot x + n_2 \cdot y + p_1}{n_3}. \quad (2.17)$$

Ca **funcție obiectiv**, a fost considerată suma distantelor de la fiecare punct la suprafețele plane teoretice P_1 și P_2 ,

$$P_1 : z_1 = p_1; P_2 : z_2 = p_2. \quad (2.18)$$

Pentru minimizarea valorii funcției obiectiv a fost folosită metoda celor mai mici pătrate. Astfel, funcția obiectiv devine

$$d = \sum_{i=1}^{25} (n_1 x_i + n_2 y_i + n_3 z_i + p_1)^2 + \sum_{i=26}^{50} (n_4 x_i + n_5 y_i + n_6 z_i + p_2)^2. \quad (2.19)$$

Ca program de rezolvare a problemei a fost utilizat programul Matlab, versiunea 7, modulul Genetic Algorithm.

În tabelul 2.8, sunt prezentate rezultatele obținute prin aplicarea acestui algoritm la structura topologică menționată (două plane paralele), parametrii $n_1 \dots n_6$ și p_1, p_2 fiind cei din ecuația (2.17).

Tabelul 2.8. Rezultate numerice

Parametrul	Real	Calculat	Eroare relativă [%]
n_1	0.01	0.010208	2.08
n_2	0.015	0.015312	2.08
n_3	0.9	0.91881	2.09
p_1 [mm]	0.001	0.001022	2.18
n_4	0.012	0.012023	0.19167
n_5	0.014	0.014025	0.17857
n_6	1.1	1.102	0.18182
p_2 [mm]	10.001	10.019	0.17998

Opțiunile casetei *Genetic Algorithm* au fost selectate la: Population Size (mărimea populației)=20; Elite Count (elita)=2; Crossover Fraction (fracția de încrucișare)=0.8; Migration Interval (intervalul de migrare)=20; Migration Fraction (fracția de migrare)=0.2.

Structură topologică de tip triedru

Metoda mai sus prezentată a fost aplicată pentru un model de structură topologică de tip triedru, aplicându-se fiecărui plan al triedrului câte două rotații, în jurul axelor care determină planul respectiv.

Suprafețele plane respective sunt prezentate în figura 2.9.

A fost cules câte un nor de puncte pe fiecare dintre cele trei suprafețe plane (câte 9 puncte în fiecare nor).

Considerând că planele triedrului sunt rotite față de planele sistemului de referință după cum urmează:

— suprafața 1 rotită în jurul axei Ox cu unghiul φ_1 și în jurul axei Oy cu unghiul ψ_1 ;

— suprafața 2 rotită în jurul axei Oy cu unghiul ψ_2 și în jurul axei Oz cu unghiul χ_2 ;

— suprafața 3 rotită în jurul axei Oz cu unghiul χ_3 și în jurul axei Ox cu unghiul φ_3 ;

putem afirma că transformările de coordonate din sistemul de referință propriu celor trei suprafețe în sistemul de referință absolut sunt date de ecuațiile:

$$\begin{aligned} X_1 &= \omega_2^T (\psi_1) \cdot \omega_1^T (\varphi_1) \cdot x_1; \\ X_2 &= \omega_3^T (\chi_2) \cdot \omega_2^T (\psi_2) \cdot x_2; \\ X_3 &= \omega_1^T (\varphi_3) \cdot \omega_1^T (\chi_3) \cdot x_3; \end{aligned} \quad (2.20)$$

unde:

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}; \omega_2 = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix}; \omega_3 = \begin{bmatrix} \cos \chi & \sin \chi & 0 \\ -\sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

În acest fel, **funcția obiectiv**, calculată ca sumă a distanțelor de la fiecare punct la suprafețele plane reale devine:

$$d = \sum_{i=1}^9 \sqrt{(Z_i - Z_0)^2} + \sum_{j=1}^9 \sqrt{(X_j - X_0)^2} + \sum_{k=1}^9 \sqrt{(Y_k - Y_0)^2}, \quad (2.22)$$

în care X_0, Y_0, Z_0 , reprezintă coordonatele originii sistemului de referință al triedrului în sistemul de referință absolut.

Ca program de rezolvare a problemei a fost utilizat programul Matlab, versiunea 7, modulul Genetic Algorithm.

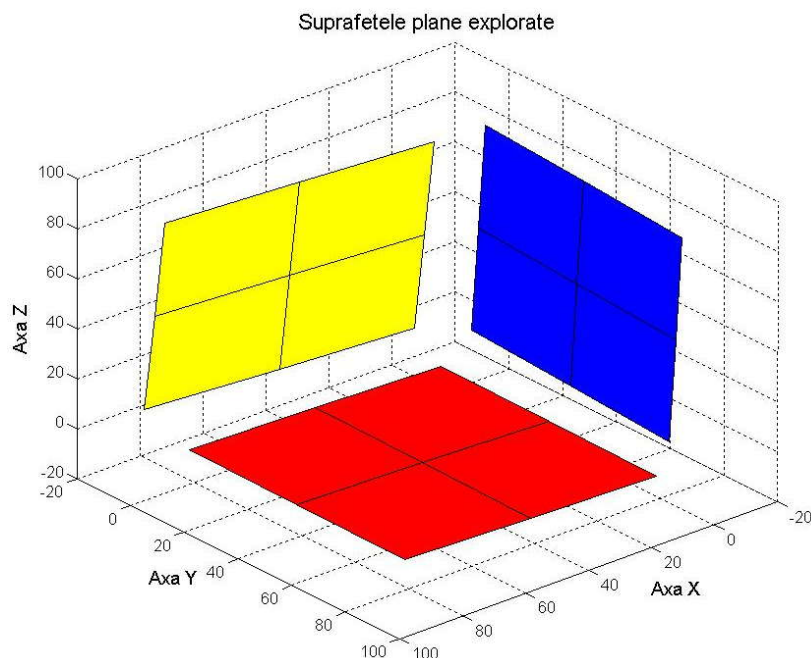


Fig. 2.11. Modelul structurii topologice (triedru) explorate

În tabelul 2.11, sunt prezentate rezultatele obținute prin aplicarea acestui algoritm la structura topologică menționată (două plane paralele), parametrii $n_1...n_6$ și p_1, p_2 fiind cei din ecuația (2.17).

Tabelul 2.9. Rezultate numerice

Parametrul	Real [°]	Calculat [°]	Eroare relativă [%]
φ_1	1	1.0001	0.01
ψ_1	2	2.0001	0.005
ψ_2	3	3.0008	0.027
χ_2	4	3.9999	0.002
χ_3	1	1	0
φ_3	2	2	0

Opțiunile casetei *Genetic Algorithm* au fost selectate la: Population Size (mărimea populației)=20; Elite Count (elita)=2; Crossover Fraction (fracția de încrucișare)=0.8; Migration Interval (intervalul de migrare)=20; Migration Fraction (fracția de migrare)=0.2.

Structură topologică de tip cilindru-plan

Metoda prezentată anterior a fost aplicată pentru un model de structură topologică formată dintr-un cilindru și un plan, aplicându-se fiecăreia dintre cele două suprafețe deviații după cum urmează:

- suprafața cilindrică a fost rotită în jurul axei Ox cu unghiul $\varphi_C = 5^\circ$, în jurul axei Oy cu unghiul $\psi_C = 10^\circ$, centrul cercului director al cilindrului a fost deplasat în lungul axei Ox cu distanța $x_0 = 2$ mm și în lungul axei Oy cu distanța $y_0 = 3$ mm. Raza cercului director a fost considerată $R = 10$ mm;
- suprafața plană a fost rotită în jurul axei Ox cu unghiul $\varphi_P = 5^\circ$ și în jurul axei Oy cu unghiul $\psi_P = 10^\circ$;

Suprafețele respective sunt prezentate în figura 2.10.

A fost cules câte un nor de puncte pe fiecare dintre cele două suprafețe (42 puncte pe suprafața cilindrică și 9 puncte pe suprafața plană).

Transformările de coordonate din sistemul de referință propriu celor două suprafețe în sistemul de referință absolut sunt date de ecuațiile:

$$\begin{aligned} X_1 &= \omega_2^T(\psi_C) \cdot \omega_1^T(\varphi_C) \cdot x_1 + x_0; \\ X_2 &= \omega_2^T(\psi_P) \cdot \omega_1^T(\varphi_P) \cdot x_2; \end{aligned} \quad (2.23)$$

și

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}; \quad \omega_2 = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix}. \quad (2.24)$$

În acest fel, **funcția obiectiv**, calculată ca sumă a distanțelor de la fiecare punct la suprafețele teoretice devine

$$d = \sum_{i=1}^{42} \left| \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} - R \right| + \sum_{j=1}^9 \sqrt{(Z_j - Z_{0P})^2}, \quad (2.25)$$

în care Z_{0P} , reprezintă cota suprafeței plane teoretice în sistemul de referință absolut.

Ca program de rezolvare a problemei a fost utilizat programul Matlab, versiunea 7, modulul Genetic Algorithm.

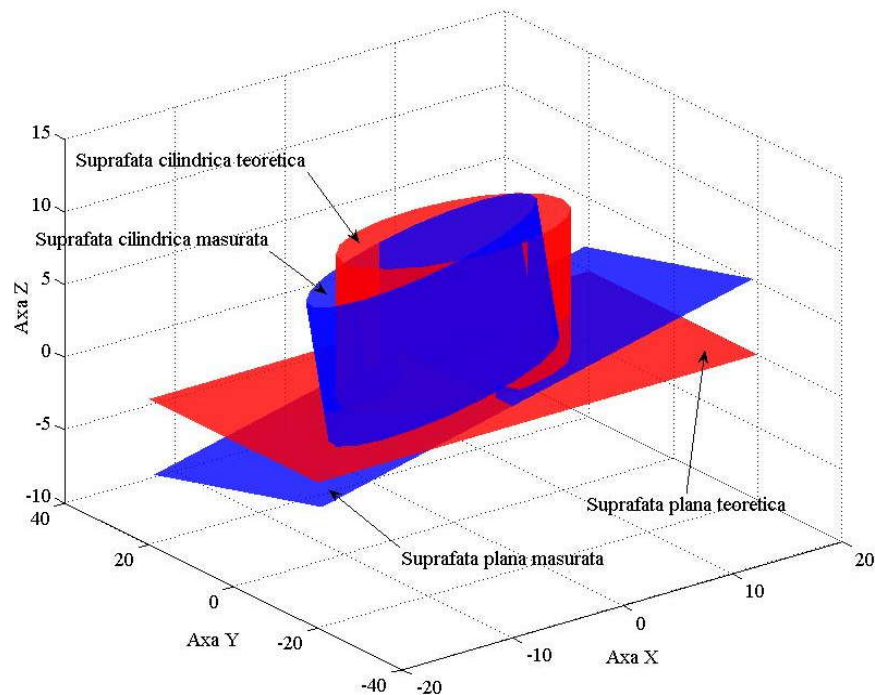


Fig. 2.12. Modelul structurii topologice explorate

În tabelul 2.10, sunt prezentate rezultatele obținute prin aplicarea acestui algoritm la structura topologică menționată (cilindru și plan).

Tabelul 2.10. Rezultate numerice

Parametrul	Real	Calculat	Eroare relativă [%]
$\varphi_C [^\circ]$	5.0046	5	0.092
$\psi_C [^\circ]$	10.01	10	0.0999
$x_0 [\text{mm}]$	1.9982	2	0.090
$y_0 [\text{mm}]$	3.0018	3	0.0599
$R [\text{mm}]$	9.9999	10	0.001
$\varphi_P [^\circ]$	5.0002	5	0.004
$\psi_P [^\circ]$	10.001	10	0.00999

Opțiunile casetei *Genetic Algorithm* au fost selectate la: Population Size (mărimea populației)=20; Elite Count (elita)=2; Crossover Fraction (fracția de încrucișare)=0.8; Migration Interval (intervalul de migrare)=20; Migration Fraction (fracția de migrare)=0.2.

2.3.2. Identificarea caracteristicilor dimensionale ale suprafețelor pe baza rețelelor neuronale

Ca aplicație a fost utilizată modelarea bazată pe rețele neuronale pentru a determina modelul topologic al unei structuri compuse din două suprafețe plane aflate la distanța nominală de 10 mm.

Pentru a simula explorarea unei suprafețe reale a fost scris un program care generează o rețea de câte 25 de puncte în fiecare dintre aceste plane.

Planele teoretice au fost deplasate prin transformarea de coordonate:

$$X_1 = \omega(\alpha_1) \cdot X, \quad (2.26)$$

pentru primul plan, și

$$X_2 = \omega(\alpha_1 + \alpha_2) \cdot X + T, \quad (2.27)$$

pentru cel de al doilea plan.

În ecuațiile (2.26) și (2.27) ω și T sunt:

$$\omega(\alpha_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}; \quad \omega(\alpha_1 + \alpha_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_1 + \alpha_2) & -\sin(\alpha_1 + \alpha_2) \\ 0 & \sin(\alpha_1 + \alpha_2) & \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \end{bmatrix}; \quad (2.28)$$

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix}^T.$$

Programul dă valori coordonatelor punctelor pe axele OX și OY în domeniul (-100 ... 100) mm, cu pasul de 50 mm. În acest mod se simulează culegerea a 50 de puncte, câte 25 de puncte pe fiecare dintre suprafețele plane luate în discuție.

Pentru modelarea neuronală a fost utilizat programul NNMODEL, versiunea 1.4.

În tabelul 2.11, sunt prezentate rezultatele obținute la interogarea rețelei, atunci când parametrii aparțin setului de valori de antrenare.

Tabelul 2.11. Rezultate numerice pentru parametrii aparținând setului de valori de antrenare

Parametrul	Real	Calculat	Eroare relativă [%]
α_1 [°]	-0.01047	-0.01036	1.069
α_2 [°]	-0.01047	-0.0104	0.687
Z_0 [mm]	9.4	9.402	0.021

În tabelul 2.12, sunt prezentate rezultatele obținute prin interogarea rețelei atunci când parametrii de interogare nu aparțin setului de valori cu care a fost antrenată rețeaua.

Tabelul 2.12. Rezultate numerice pentru parametrii aparținând setului de valori de antrenare

Parametrul	Real	Calculat	Eroare relativă [%]
α_1 [°]	-0.01396	-0.01388	0.594
α_2 [°]	-0.01396	-0.0139	0.451
Z_0 [mm]	9.8	9.80307	0.031

Opțiunile rețelei neuronale au fost stabilite pentru: Hidden Neurons=50 (numărul de neuroni ascunși); Maximum Training Count=10000 (numărul maxim de antrenări); Fixed number of Hidden Neurons=True (număr fix de neuroni ascunși); Training Method=Standard BEP (metoda de antrenare).

2.3.3. Produse soft dedicate determinării abaterilor dimensionale și de poziție a structurilor topologice

Aplicație pentru o structură topologică de tip plan-plan

```
function d=distanța1(a)
plan1=load('E:\plan1.txt');
```

```

plan2=load('E:\plan2.txt');
d=sum((plan1(:,1).*a(1)+plan1(:,2).*a(2)+plan1(:,3).*a(3)+a(4)).^2)+...
sum((plan2(:,1).*a(5)+plan2(:,2).*a(6)+plan2(:,3).*a(7)+a(8)).^2);

```

Aplicație pentru o structură topologică de tip triedru

```

function [distanța]=triedru(unghiuri);
fi1=unghiuri(1)*pi/180; psi1=unghiuri(2)*pi/180;
psi2=unghiuri(3)*pi/180; kapa2=unghiuri(4)*pi/180;
kapa3=unghiuri(5)*pi/180; fi3=unghiuri(6)*pi/180;

```

```

% fi1=unghiuri(1); psi1=unghiuri(2);
% psi2=unghiuri(3); kapa2=unghiuri(4);
% kapa3=unghiuri(5); fi3=unghiuri(6);
set1=[ [9.9939      10.005      0.17442];
        [49.97      10.029      1.5702];
        [89.945     10.053      2.966];

        [9.9939      49.998     -0.52368];
        [49.97      50.023      0.87209];
        [89.945     50.047      2.2679];
        [9.9939      89.992     -1.2218];
        [49.97      90.017      0.17399];
        [89.945     90.041      1.5698]];

set2=[ [0.17325     9.9756     10.023];
        [2.9597     49.878     10.169];
        [5.7461     89.781     10.315];
        [-1.9202     9.9756     49.968];
        [0.86625     49.878     50.114];
        [3.6527     89.781     50.26];
        [-4.0136     9.9756     89.913];
        [-1.2272     49.878     90.059];
        [1.5592     89.781     90.205]];

set3=[ [10.005      0.17442     9.9939];
        [10.029      1.5702     49.97];
        [10.053      2.966      89.945];
        [49.998     -0.52368     9.9939];
        [50.023      0.87209     49.97];
        [50.047      2.2679     89.945];
        [89.992     -1.2218     9.9939];
        [90.017      0.17399     49.97];
        [90.041      1.5698     89.945]];
distanța=0;

```

```

% setul 1, planul XOY

```

```

for l=1:1:length(set1);
    punct=[set1(l,1);set1(l,2);set1(l,3)];
    omega1_fi1=[[1 0 0];[0 cos(fi1) sin(fi1)];[0 -sin(fi1) cos(fi1)]];
    omega2_psi1=[[cos(psi1) 0 -sin(psi1)];[0 1 0];[sin(psi1) 0 cos(psi1)]];
    punct1=omega2_psi1'*omega1_fi1'*punct;
    X(l,1)=punct1(1); Y(l,1)=punct1(2); Z(l,1)=punct1(3);
    distanta=distanta+(Z(l,1)^2)^(1/2);
end;

% setul 2, planul YOZ

for l=1:1:length(set2);
    punct=[set2(l,1);set2(l,2);set2(l,3)];
    omega2_psi2=[[cos(psi2) 0 -sin(psi2)];[0 1 0];[sin(psi2) 0 cos(psi2)]];
    omega3_kapa2=[[cos(kapa2) sin(kapa2) 0];[-sin(kapa2) cos(kapa2) 0];[0 0 1]];
    punct1=omega3_kapa2'*omega2_psi2'*punct;

    X(l+length(set1),1)=punct1(1);
    Y(l+length(set1),1)=punct1(2);
    Z(l+length(set1),1)=punct1(3);
    distanta=distanta+(X(l+length(set1),1)^2)^(1/2);
end;

% setul 3, planul ZOX

for l=1:1:length(set3);
    punct=[set3(l,1);set3(l,2);set3(l,3)];
    omega3_kapa3=[[cos(kapa3) sin(kapa3) 0];[-sin(kapa3) cos(kapa3) 0];[0 0 1]];
    omega1_fi3=[[1 0 0];[0 cos(fi3) sin(fi3)];[0 -sin(fi3) cos(fi3)]];
    punct1=omega1_fi3'*omega3_kapa3'*punct;
    X(l+length(set1)+length(set2),1)=punct1(1);
    Y(l+length(set1)+length(set2),1)=punct1(2);
    Z(l+length(set1)+length(set2),1)=punct1(3);
    distanta=distanta+(Y(l+length(set1)+length(set2),1)^2)^(1/2);
end;

distanta;

```

Aplicație pentru o structură topologică de tip cilindru-plan

```

function [distanta]=cilindru_plan(parametri);
% determina unghiurile de rotatie in jurul axelor Ox si Oy,
% deplasarea centrului cercului director si marimea razei unui cilindru
fic=parametri(1)*pi/180; psic=parametri(2)*pi/180;
x0=parametri(3); y0=parametri(4);
R=parametri(5);
fip=parametri(6)*pi/180; psip=parametri(7)*pi/180;

```

```

omega1_fic=[[1 0 0];[0 cos(fic) sin(fic)];[0 -sin(fic) cos(fic)]];
omega2_psic=[[cos(psic) 0 -sin(psic)];[0 1 0];[sin(psic) 0 cos(psic)]];
omega1_fip=[[1 0 0];[0 cos(fip) sin(fip)];[0 -sin(fip) cos(fip)]];
omega2_psip=[[cos(psip) 0 -sin(psip)];[0 1 0];[sin(psip) 0 cos(psip)]];
distanta=0;
set1=[ [7.8481 -2.8487 1.7299];
        [7.3661 0.2223 1.3759];
        [5.9673 2.9779 0.8872];
        [3.7886 5.1483 0.3117];
        [1.0432 6.5211 -0.2943];
        [-2.0000 6.9619 -0.8716];
        [-5.0432 6.4276 -1.3635];
        [-7.7886 4.9704 -1.7219];
        [-9.9673 2.7330 -1.9118];
        [-11.3660 -0.0655 -1.9145];
        [-11.8480 -3.1513 -1.7299];

        [-11.3660 -6.2223 -1.3759];
        [-9.9673 -8.9779 -0.8872];
        [-7.7886 -11.1480 -0.3117];
        [-5.0432 -12.5210 0.2943];
        [-2.0000 -12.9620 0.8716];
        [1.0432 -12.4280 1.3635];
        [3.7886 -10.9700 1.7219];
        [5.9673 -8.7330 1.9118];
        [7.3661 -5.9345 1.9145];
        [7.8481 -2.8487 1.7299];
        [6.1116 -1.9903 11.5400];
        [5.6296 1.0807 11.1860];
        [4.2308 3.8362 10.6980];
        [2.0521 6.0067 10.1220];
        [-0.6933 7.3795 9.5163];
        [-3.7365 7.8203 8.9390];
        [-6.7797 7.2859 8.4471];
        [-9.5250 5.8287 8.0887];
        [-11.7040 3.5914 7.8988];
        [-13.1030 0.7928 7.8961];
        [-13.5850 -2.2930 8.0807];
        [-13.1030 -5.3640 8.4347];
        [-11.7040 -8.1196 8.9234];
        [-9.5250 -10.2900 9.4989];
        [-6.7797 -11.6630 10.1050];
        [-3.7365 -12.1040 10.6820];
        [-0.6933 -11.5690 11.1740];
        [2.0521 -10.1120 11.5330];
        [4.2308 -7.8747 11.7220];
        [5.6296 -5.0762 11.7250];
        [6.1116 -1.9903 11.5400]];
for l=1:length(set1);
    xa(:,l)=omega2_psic*omega1_fic*(set1(l,:)'+[x0;y0;0]);

```

```

distanta=distanta+abs((xa(1,l)^2+xa(2,l)^2)^(1/2)-R);
l=l+1;
end;
set2=[ [-19.6960 -20.2270 -1.7166];
[-19.6960 -0.3027 -3.4597];
[-19.6960 19.6210 -5.2029];
[0 -19.9240 1.7431];
[0 0 0];
[0 19.9240 -1.7431];
[19.6960 -19.6210 5.2029];
[19.6960 0.3027 3.4597];
[19.6960 20.2270 1.7166]];
% setul 1, planul XOY
for l=1:length(set2);
punct=[set2(l,1);set2(l,2);set2(l,3)];
punct1=omega2_psi*omega1_fi*punct;
X(l,1)=punct1(1); Y(l,1)=punct1(2); Z(l,1)=punct1(3);
distanta=distanta+(Z(l,1)^2)^(1/2);
end;

```

Opțiunile mediului de programare au fost setate după cum este prezentat în tabelul următor:

e	gaoptions.PopulationTyp	'doubleVector'
	gaoptions.PopInitRange	[0;1]
	gaoptions.PopulationSiz	20
e	gaoptions.EliteCount	2
	gaoptions.CrossoverFrac	0.8
	gaoptions.MigrationDire	'forward'
tion	gaoptions.MigrationInter	20
	gaoptions.MigrationFrac	0.2
	gaoptions.Generations	10000
tion	gaoptions.TimeLimit	Inf
	gaoptions.FitnessLimit	0.01
	gaoptions.StallGenLimit	Inf
t	gaoptions.StallTimeLimi	Inf
	gaoptions.InitialPopulati	[]
	gaoptions.InitialScores	[]
on	gaoptions.PlotInterval	1
	gaoptions.CreationFcn	@gacreationuniform
	gaoptions.FitnessScaling	@fitscalingrank
Fcn		

gaoptions.SelectionFcn	@selectionstochunif
gaoptions.CrossoverFcn	@crossoverScattered
gaoptions.MutationFcn	@mutationgaussian
gaoptions.HybridFcn	[]
gaoptions.Display	'off'
gaoptions.PlotFcns	[]
gaoptions.OutputFcns	[]
gaoptions.Vectorized	'off'

Obiectivul III. Elaborarea unor principii de proiectare topologică a construcțiilor mecanice

3.1. Principii de proiectare topologică

3.1.1. Proiectarea unor suprafețe active ale sculelor

Un aspect particular al modelului topologic al construcțiilor este cel referitor la forma suprafețelor (uneori complexe), care constituie suprafețele periferice ale sculelor.

Forma topologică funcțională a acestor construcții se referă la asigurarea capacității de generare de către sculă, într-o cinematică impusă a procesului, a unei suprafețe (ansamblu de suprafețe) aparținând unui semifabricat.

Astfel, ansamblul format din suprafața periferică a sculei (ca ansamblu de suprafețe ale acesteia) și suprafața complexă a semifabricatului de generat formează o construcție funcțională ce poate fi considerată sub aspect tehnologic.

Astfel, o problemă ce poate fi rezolvată în această accepțiune este formarea suprafețelor de așezare a burghiilor elicoidale.

În baza acestui principiu, al proiectării topologice, s-a dezvoltat o metodă de ascuțire a burghiilor elicoidale cu tășuri curbe.

Burghiele elicoidale ca scule pentru prelucrarea din plin a semifabricatelor au o geometrie specifică, datorată condițiilor dificile de formare și evacuare a așchiilor.

O multitudine de soluții au fost imaginate pentru ameliorarea sau acordarea calităților acestei scule la burghierea diverselor tipuri de materiale.

Realizarea unor noi tipuri de burghie cu tășuri curbe, a impus și sinteza sculelor pentru generarea acestora, precum și a unor procedee specifice de ascuțire.

Dezvoltarea analizei în scopul ameliorării tășului principal a condus la promovarea unui model de tăș spațial.

Totodată, s-a propus extinderea noii geometrii a tășurilor principale la burghiele multităș (3 sau 4 tășuri) care asigură, prin creșterea numărului de fațete de conducere, o mai bună centrare a burghiului în alezajul prelucrat și, ca urmare, creșterea preciziei de prelucrare.

Aceste noi geometrii impun sinteza unor noi procedee de ascuțire a suprafeței principale de așezare, cu asigurarea unei legi de variație crescătoare a mărimii unghiului de așezare de la periferie spre axa sculei, concomitent cu o diminuare continuă a unghiului de atac principal, de la vârful sculei spre periferia acestuia.

De asemenea, noile procedee trebuie să asigure o bună detalonare a suprafeței de așezare principale, dintr-o singură poziționare a burghiului pe dispozitivul de ascuțit. Se propune o nouă formă, după o schemă de ascuțire care să aibă o cinematică simplă (număr minim de mișcări) și care, pe această cale, să permită reproducerea riguroasă a procesului de ascuțire

Cinematica principială

Se prezintă, în figura 3.1, modelul suprafeței de ascuțire – suprafață cilindrică de revoluție – precum și poziția acesteia în raport cu burghiul ascuțit. Muchia de așchiere principală rezultă din intersecția canalului elicoidal al burghiului cu suprafața de ascuțire. Aceasta, în accepțiunea că axa cilindrului de ascuțire nu este perpendiculară pe axa burghiului ascuțit, este o conică, principial, un arc de elipsă.

Se definesc :

- unghiul de înclinare al generatoarelor suprafeței de ascuțire, în raport cu normala la planul muchiei de așchiere, β ;
- mărimile extreme ale unghiului de atac, în lungul tăișului principal, k_{varf} și k_{per} ;
- poziția axei burghiului ascuțit în raport cu axa cilindrului de ascuțire, e .

Cinematica generării pânzei cilindrice, - viitoarea suprafață de așezare – presupune o mișcare de oscilație a burghiului în jurul axei pânzei cilindrice – mișcarea 1.

De asemenea, este necesară o mișcare a burghiului în lungul axei proprii, mișcarea 2, în vederea realizării mișcării de avans; mișcarea de rotație a corpului abraziv; corp care materializează generatoarea suprafeței cilindrice, mișcarea 3.

Ansamblul suprafeței periferice primare a sculei (corpul abraziv, a cărui generatoare poate fi cunoscută în formă discretă) și suprafața generată (suprafața de așezare a burghiului) constituie un ansamblu tehnologic de suprafețe topologice.

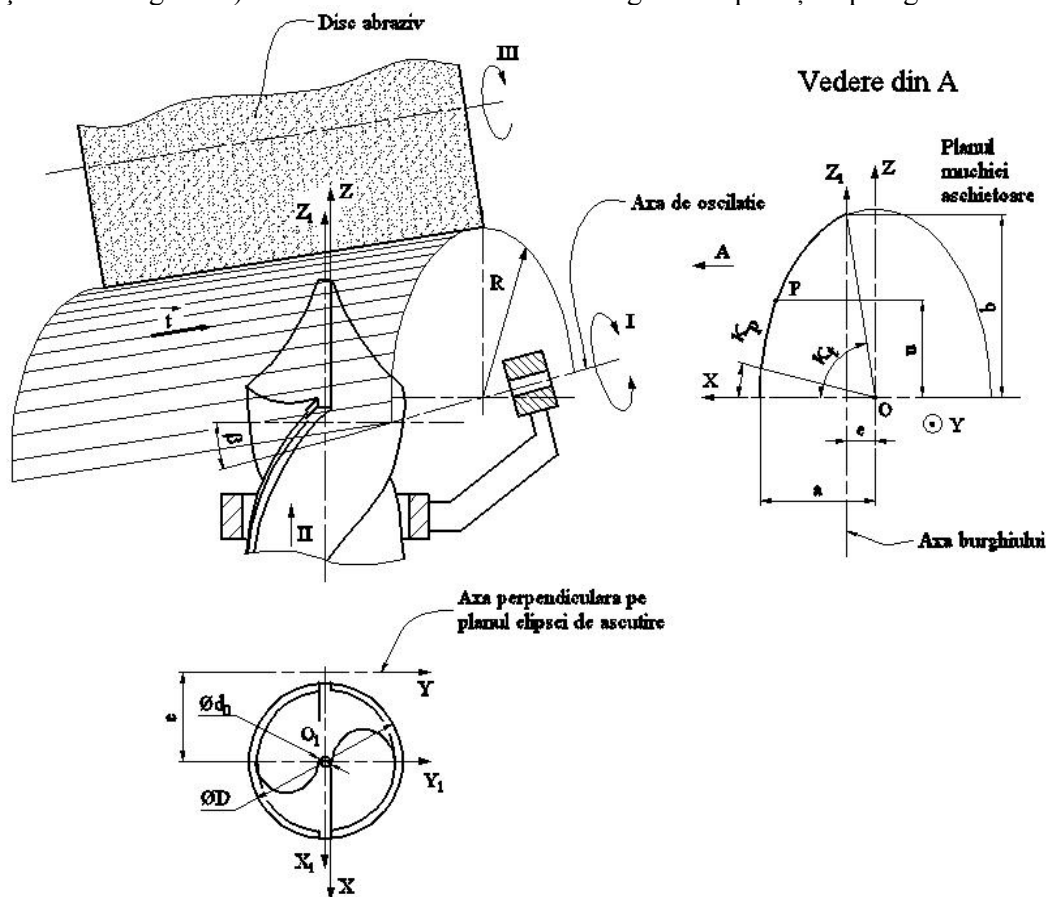


Fig. 3.1. Modelul pânzei cilindrice de ascuțire

Modelul suprafeței cilindrice – suprafața de așezare a tăișului principal al burghiului are ecuațiile :

$$\begin{cases} X = a \cos \varphi; \\ Y = t \cos \beta; \\ Z = b \sin \varphi + t \sin \beta; \end{cases} \quad (3.1)$$

$$a = R; b = R/\cos \beta.$$

Ecuatiile suprafeței pot fi substituite printr-un model topologic al suprafeței prin substituirea punctelor măsurate de pe generatoarea corpului abraziv cu o curbă de tip spline (sau Bezier).

Detalonarea suprafeței de așezare

Se impune a analiza, ca prima cerință impusă unui procedeu de ascuțire a burghiului elicoidal, asigurarea detalonării suprafeței de așezare, figura 3.2.

Astfel, principal, condiția de detalonare pentru punctele de pe curbă de detalonare este de forma:

$$\rho_1 < r_x \quad (3.2)$$

în care ρ_1 este distanța de la punctul curent al liniei de detalonare la axa Z_1 a burghiului, iar r_x se consideră ca fiind valoarea lui ρ în punctul de pe muchia de așchiere.

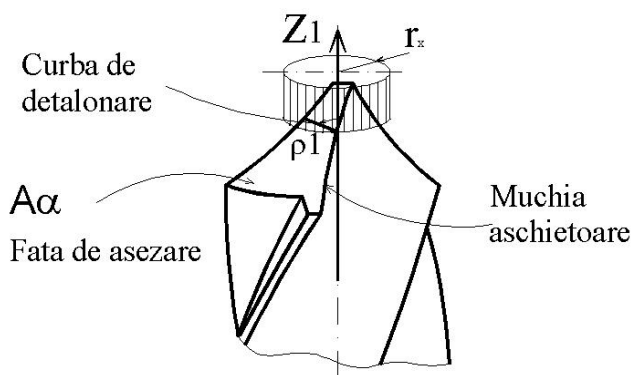


Fig. 3.2 Detalonarea suprafeței de așezare

Secțiunea transversală a feței de așezare

$$Z_1 = u, \quad (u - \text{variabilă arbitrar}), \quad (3.3)$$

conduce la forma curbei de detalonare:

$$C_s \begin{cases} X_1 = a \cos \varphi - e; \\ Y_1 = \frac{u - b \sin \varphi}{\sin \beta} \cdot \cos + \frac{d_o}{2}. \end{cases} \quad (3.4)$$

Din (3.4), se definește raza polară

$$\rho_1 = \sqrt{(a \cos \varphi - e)^2 + \left[\frac{u - b \sin \varphi}{\sin \beta} + \frac{d_o}{2} \right]^2}. \quad (3.5)$$

Astfel, raza r_x , vezi definiția (3.2), este dată de

$$r_x = \sqrt{(a \cos \varphi - e)^2 + \frac{d_o^2}{4}} \quad (3.6)$$

$$b \sin k_{per} \leq u \leq b \sin k_{varf}. \quad (3.7)$$

Se poate verifica, acum, numeric detalonarea suprafeței de așezare, $A_a(S)$, pentru toate punctele corespunzătoare muchiei de așchiere, având în vedere mărimile caracteristicilor ale modelului suprafeței de așezare: $R, e, k_{per}, k_{varf}, \beta$.

Mărimea unghiului de așezare

Se definesc: - planul de bază constructiv în punctul M_x de pe muchia de așchiere ca fiind planul axial ce conține punctul și este perpendicular pe direcția mișcării de așchiere;

- planul de măsurare, plan paralel cu axa burghiului și perpendicular, în punctul de măsurare pe planul de bază, figura 3.3.

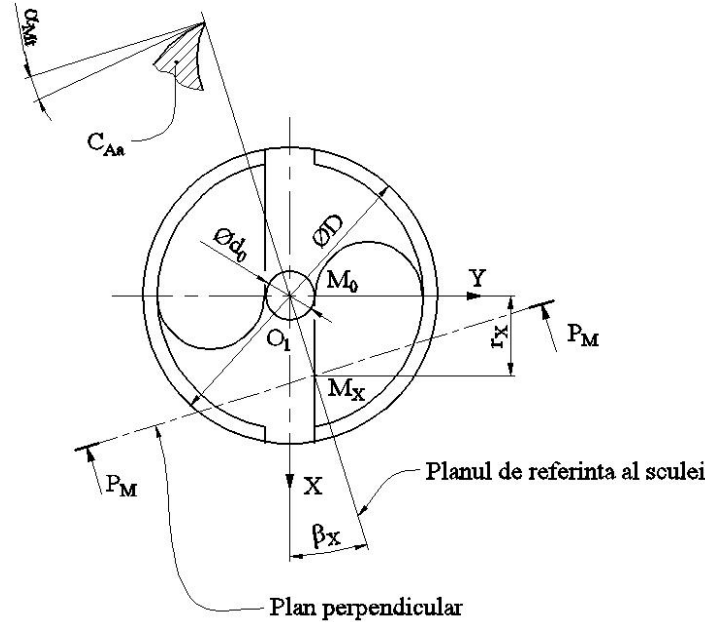


Fig. 3.3. Planul de măsurare

Se definește planul de măsurare P_M , în sistemul de referință al burghiului

$$[X_1 - X_{1Mx}] \cos \beta_x + [Y_1 - Y_{1Mx}] \sin \beta_x = 0; \quad (3.8)$$

$$\operatorname{tg} \beta_x = \frac{d_o}{2r_x}, \quad (3.9)$$

și, de asemenea, curba de intersecție a planului de măsurare cu suprafața de așezare,

$$C_{Aa} \begin{cases} X_1 = a \cos \varphi - e; \\ Y_1 = \frac{r_x + e - a \cos \varphi}{\cos \beta \cdot \operatorname{tg} \beta_x} + \frac{d_o}{2}; \\ Z_1 = b \sin \varphi + (r_x + e - a \cos \varphi) \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta_x}, \end{cases} \quad (3.10)$$

cu φ și r_x parametrii variabili.

Parametrii directori ai tangentei la curba C_{Aa} sunt

$$\frac{dX_1}{d\varphi} = -a \sin \varphi; \quad \frac{dY_1}{d\varphi} = \frac{a \sin \varphi}{\cos \varphi \cdot \operatorname{tg} \beta_x}; \quad \frac{dZ_1}{d\varphi} = b \cos \varphi + a \sin \varphi \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta_x}. \quad (3.11)$$

Se definește unghiul de așezare între tangenta la curba C_{Aa} și planul $Z_1 = \text{const}$,

$$\sin \alpha = \frac{b \cos \varphi + a \sin \varphi \cdot \operatorname{ctg} \beta_x \cdot \operatorname{tg} \beta}{\sqrt{a^2 \cdot \sin^2 \varphi + \frac{a^2 \cdot \sin^2 \varphi}{\cos^2 \beta \cdot \operatorname{tg}^2 \beta_x} + \left[b \cos \varphi + a \sin \varphi \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta_x} \right]^2}}. \quad (3.12)$$

Modelări numerice

Se prezintă, în cele ce urmează, modelarea numerică, în baza modelelor analitice ale detalonării suprafeței de așezare și a legii de variație a mărimii unghiului de așezare în lungul tăișului principal al burghiului.

În figura 3.4, sunt prezentate modele ale legii de variație a mărimii unghiului de așezare în lungul tăișului principal, pentru burghie având dimensiunile: $D = 16$ mm, $d_o = 5$ mm și mărimea parametrilor constructivi: β , e , D_o , d_o , R , k_{pers} , k_{varf} .

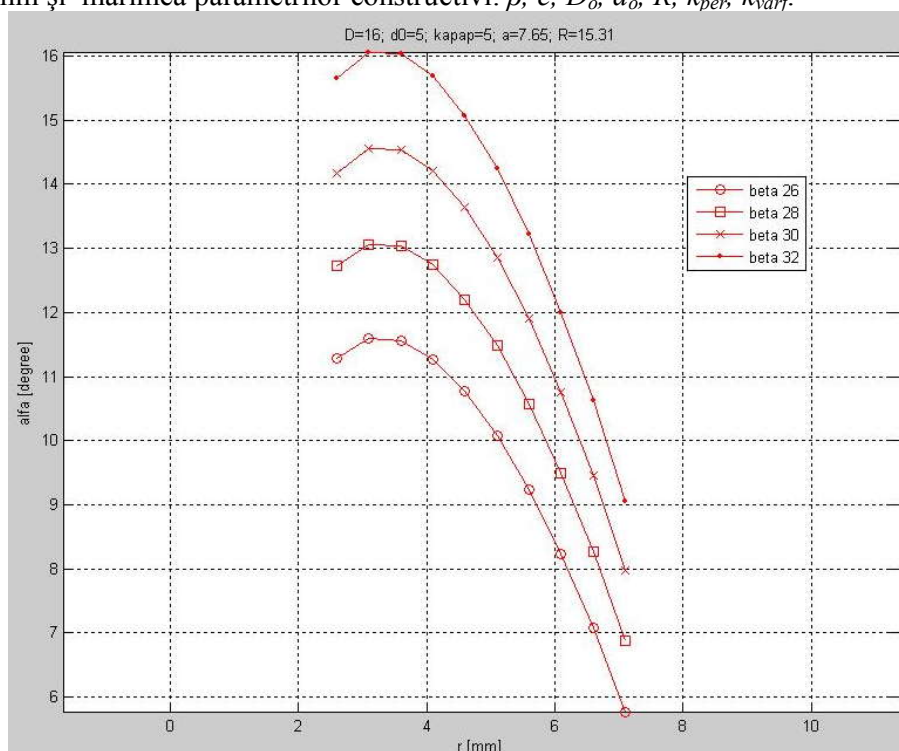


Fig. 3.4. Legea de variație a unghiului de așezare

De asemenea, pe un burghiu ascuțit s-au făcut măsurători ale curbelor de detalonare în condițiile prezentate în figura 3.5 și tabelul 3.1.

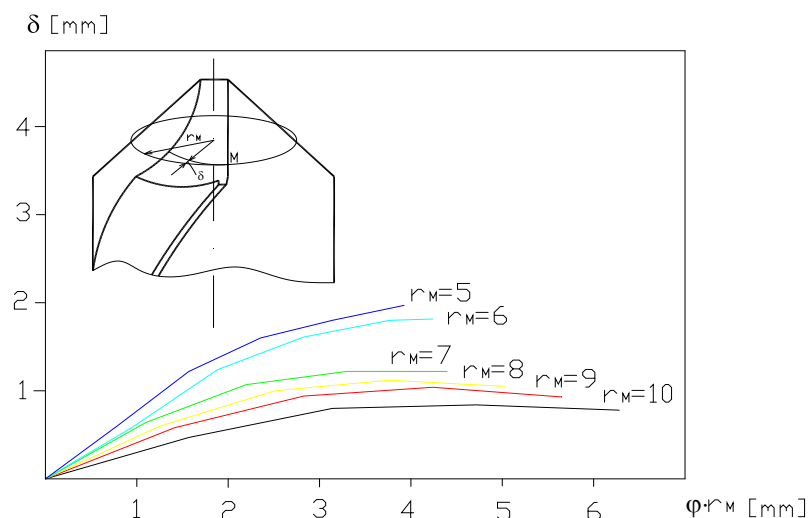


Fig. 3.5. Curbe de detalonare

Tabelul 3.1 . Mărima detalonării δ

r_M [mm]	δ [mm]	ε [°]	φr_M [mm]
5	0	0°	0
5	0.6	9°	0.785
5	1.97	45°	3.925
6	0	0°	0
6	0.58	9°	0.942
6	1.24	18°	1.884
6	1.83	45°	4.71
7	0	0°	0
7	0.64	9°	1.099
7	1.07	18°	2.198
8	0	0°	0
8	0.6	9°	1.256
8	1	18°	2.512
8	1.12	27°	3.768
8	1.05	36°	5.024
9	0	0°	0
9	0.58	9°	1.413
9	0.94	18°	2.826
9	1.04	27°	4.239
9	0.93	36°	5.652
10	0	0°	0
10	0.47	9°	1.57
10	0.8	18°	3.14
10	0.84	27°	4.71
10	0.78	36°	6.28

Metoda de ascuțire a burghiilor cu tășuri curbe reprezintă o nouă metodă pentru ascuțirea sculelor multităș cu muchie de așchiere plană.

Forma constructivă a muchiei de așchiere este eliptică, segmentul arcului de elipsă care constituie muchia de așchiere asigură o variație a unghiului de atac principal între limitele $k_{vârf} = 60^\circ$, $k_{per} = 5^\circ$.

S-au realizat modele analitice ale mărimii unghiului de așezare în punctele de pe tășul principal, dovedind că schema de ascuțire propusă îndeplinește cerința de bază

pentru astfel de scule – variația crescătoare a mărimii unghiului de așezare de la periferie spre vârf.

De asemenea, s-a studiat detalonarea suprafeței de așezare, dovedind, prin modele numerice, că detalonarea spatelui dintelui burghiului se realizează integral la o singură poziționare a tășului în raport cu suprafața de ascuțire.

Metoda de ascuțire are o cinematică simplă, cu un număr minim de mișcări, comparabil cu al celorlalte procedee cunoscute pentru procedeele de ascuțire ale burghiilor cu tășuri rectilinii.

Problematica poate fi dezvoltată prin abordarea ca modele topologice ale suprafețelor de ascuțire precum și prin tratarea mai riguroasă a problematicii generării suprafeței de ascuțire ca înfășurătoare a suprafeței corpului abraziv prin metodele teoriei înfășurării suprafețelor.

3.1.2. Proiectarea suprafețelor periferice primare a sculelor melc

O altă aplicație a acestui principiu, al tratării ansamblului format din suprafața periferică a sculei (ca ansamblu de suprafețe ale acesteia) și suprafața complexă a semifabricatului de generat, ca o construcție topologică funcțională, o constituie și problema profilării sculelor melc reciproc înfășurătoare cu vârtejuri de suprafețe cunoscute în formă topologică.

În figura 3.6, este prezentat sistemul de axoide în rulare: axoidele vârtejurii de suprafețe de generat, axoidele cremalierii reciproc înfășurătoare, poziția axei suprafeței periferice primare a sculei-melc, precum și mișcările absolute ale sistemelor de referință asociate acestor axoide.

Se definesc sistemele:

- xyz este sistemul fix cu axa z , axa de rotație a axoidei asociată vârtejurii de suprafețe de generat;
- $x_0y_0z_0$ - sistemul fix, cu axa y_0 suprapusă axei suprafeței periferice primare a sculei melc;
- XYZ - sistemul mobil solidar axoidei vârtejurii de suprafețe de generat, $A1$;
- $\xi\eta\zeta$ - sistemul mobil solidar axei cremalierii (suprafața plană suprapusă planului $\eta\zeta$), $A2$;
- $X_1Y_1Z_1$ - sistemul mobil asociat suprafeței periferice primare a sculei-melc.

Este cunoscuta cinematica de principiu a procesului de generare

$$n = \omega_3^T (\varphi_1) X; \quad (3.13)$$

- rotația axoidei $A1$ (cilindru de revoluție de rază R_{rp}), solidară cu sistemul XYZ , cu parametrul φ -parametrul unghiular de mișcare;

$$x = \xi + a, a = \begin{pmatrix} -R_{rp} \\ -\lambda \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

- translația axoidei $A2$ (plan paralel cu planul $\eta\zeta$), solidară cu sistemul $\xi\eta\zeta$ și λ parametrul de mișcare;

$$x_0 = \omega_2^T (\varphi_2) X_1; \quad (3.15)$$

- rotația sistemului $X_1Y_1Z_1$ în jurul axei y_0 , cu φ_2 parametrul unghiular de mișcare.

De asemenea, sunt cunoscute condițiile:

$$\lambda = R_{rp} \cdot \varphi_1, \quad (3.16)$$

condiția de rulare a axoizelor $A1$ și $A2$;

$$\lambda = p \cdot \varphi_2 \cdot \cos \omega,$$

dependența dată de forma suprafeței periferice primare a sculei-melc (melc cilindric de pas cunoscut cu p – parametrul elicoidal) și transformarea între sistemele de referință fixe

$$x_0 = k(x - A), \quad k = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \kappa & -\sin \kappa \\ 0 & \sin \kappa & \cos \kappa \end{pmatrix}, \quad (3.17)$$

cu A_{12} distanța dintre axa axoidei A_1 și axa suprafeței elicoidale $\vec{V}$.

Algoritm pentru profilarea suprafeței periferice primare a sculei-melc

Cunoscută fiind suprafața flancului cremalierii (în forma aproximată sub forma unui polinom Bezier) se propune determinarea caracteristicii (curba de contact) la contactul acesteia cu viitoarea suprafață periferică primară a sculei melc, prin utilizarea metodei descompunerii mișcării elicoidale [2], vezi figura 3.7.

Se acceptă că mișcarea elicoidală generatoare a suprafeței periferice primare a sculei-melc, $(\vec{V}, p)$ se descompune într-o sumă de mișcări echivalente: mișcare de translație, după direcția $\vec{t}$ a versorului generatoarelor suprafețelor cilindrice – flancul cremalierii – și o mișcare de rotație de axă $\vec{A}$, paralelă cu $\vec{V}$ și aflată la distanța:

$$a = p \cdot \tan(\theta) \quad (3.18)$$

de axa suprafeței elicoidale $\vec{V}$, vezi și figura 3.7.

Astfel, caracteristica suprafeței S , în mișcarea compusă: translație în lungul generatoarei $\vec{t}$ și rotație în jurul axei $\vec{A}$, nu depinde de acea componentă a mișcării în decursul căreia suprafața se autogenează, fiind îndeplinită identitatea:

$$\vec{N}_S \cdot \vec{t} \equiv 0, \quad (3.19)$$

(normala la suprafața S , suprafața cilindrică, este întotdeauna perpendiculară pe generatoarea proprie), și, deci, condiția pentru determinarea caracteristicii în mișcarea elicoidală $\vec{V}, p$ va depinde numai de mișcarea de rotație în jurul axei $\vec{A}$.

Mărimea parametrului ω se determina din condiția ca elicea aparținând elicoidului $\vec{V}, p$ aflată pe cilindrul de rază R_s să fie paralelă cu $\vec{t}$ versorul generatoarei flancului cilindric al cremalierii,

$$\tan \omega = \frac{2\pi \cdot p}{2\pi \cdot R_s} = \frac{p}{R_s} \quad (3.20)$$

cu p - parametrul elicoidal al suprafeței periferice primare a sculei melc.

Astfel, condiția pentru determinarea caracteristicii devine:

$$(\vec{A}, \vec{N}_S, \vec{r}_1) = 0 \quad (3.21)$$

Ansamblul format de suprafața S și condiția de înfășurare reprezintă un loc geometric pe suprafața S , vezi și figura 3.7, semnificând caracteristica suprafeței S în mișcarea elicoidală de axă $\vec{V}$ și parametru elicoidal “ p ” – axa și parametrul elicoidului căreia îi aparține suprafața periferică primară a sculei-melc, reciproc înfășurătoare suprafeței Σ , suprafața de generat.

3.2. Exemple numerice

3.2.1. Profil compozit, rotor de compresor elicoidal

Se analizează profilarea sculei melc pentru un profil compozit reprezentând secțiunea transversală a unui melc cilindric de pas constant, melc aparținând unui rotor de compresor elicoidal. Profilul axial al melcului are următoarele porțiuni de profil.

AB – arc de cerc de rază R_0 ;

BC – segment de dreaptă;

CD – arc de cerc de rază r_0 ;

AH – curbă polinomială Bezier;

HG – curbă polinomială Bezier;

GF – segment de dreaptă;

FE – arc de cerc de rază R_0 ;

Profilurile elementare consecutive sunt tangente în punctele lor de contact, vezi figura 3.6.

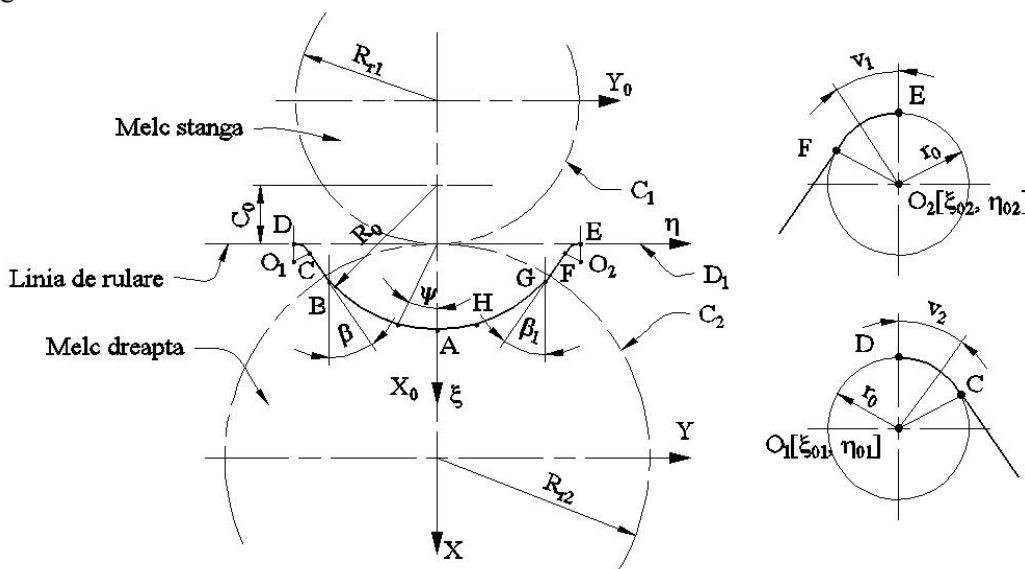


Fig. 3.6. Profilul transversal al melcului

Se definesc ecuațiile parametrice ale profilurilor elementare ale cremalierii reciproc înfășurătoare melcului considerat:

- suprafața cilindrică corespunzătoare arcului AB ,

$$S_{AB} \begin{cases} \xi = R_0 \cos \psi - C_0; \\ \eta = -R_0 \sin \psi + t \sin \beta_d; \\ \zeta = t \cos \beta_d, \end{cases} \quad (3.22)$$

C_0 este constantă, t și ψ parametri variabili;

$$0 \leq \psi \leq \psi_{\max}; \psi_{\max} = \frac{\pi}{2} - \beta; \quad (3.23)$$

- suprafață plană BC ,

$$S_{BC} \begin{cases} \xi = \xi_B - u \cos \beta; \\ \eta = \eta_B + u \sin \beta + t \sin \beta_d; \\ \zeta = t \cos \beta_d, \end{cases} \quad (3.24)$$

t, u - parametri variabili, $\beta = \frac{\pi}{2} - \psi_{\max}$; ξ_B, η_B - sunt determinați din ecuația (3.22) când

$\Psi = \Psi_{\max}$;

- suprafață cilindrică corespunzătoare arcului CD ,

$$S_{CD} \begin{cases} \xi = \xi_{O_1} - r_0 \cos v; \\ \eta = \eta_{O_1} + r_0 \sin v + t \sin \beta_d; \\ \zeta = t \cos \beta_d, \end{cases} \quad (3.25)$$

t și v parametri variabili; ξ_{O_1}, η_{O_1} - coordonatele centrului cercului fiind valori constructive,

$$0 \leq v \leq \frac{\pi}{2} - \beta; \quad (3.26)$$

- suprafețe cilindrice corespunzătoare arcelor AH și HG (pentru AH se consideră un polinom Bezier de gradul 2),

$$S_{AH} \begin{cases} \xi = P_{\xi_{AH}} = \lambda_1^2 A_\xi + 2(1-\lambda_1)\lambda_1 B_\xi + (1-\lambda_1)^2 C_\xi; \\ \eta = P_{\eta_{AH}} = \lambda_1^2 A_\eta + 2(1-\lambda_1)\lambda_1 B_\eta + (1-\lambda_1)^2 C_\eta + t \sin \beta_d; \\ \zeta = t \cos \beta_d, \end{cases} \quad (3.27)$$

cu $0 \leq \lambda_1 \leq 1$, și similar pentru HG ,

$$S_{HG} \begin{cases} \xi = P_{\xi_{HG}} = \lambda_2^2 D_\xi + 2(1-\lambda_2)\lambda_2 E_\xi + (1-\lambda_2)^2 F_\xi; \\ \eta = P_{\eta_{HG}} = \lambda_2^2 D_\eta + 2(1-\lambda_2)\lambda_2 E_\eta + (1-\lambda_2)^2 F_\eta + t \sin \beta_d; \\ \zeta = t \cos \beta_d, \end{cases} \quad (3.28)$$

cu $0 \leq \lambda_2 \leq 1$.

Coefficienții polinoamelor din ecuațiile (3.27) și (3.28) se deduc din condițiile:

- punct comun în - A , și condiții de tangentă între S_{AB} și S_{AH} ;
- punct comun în - G , și condiții de tangentă între S_{FG} și S_{HG} ;
- punct comun în - H , și condiții de tangentă între S_{AH} și S_{HG} ;

- suprafața plană pe porțiunea EF ,

$$S_{EF} \begin{cases} \xi(u_1) = \xi_F + u_1 \cos \beta_1; \\ \eta(u_1) = \eta_F - u_1 \sin \beta_1 + t \sin \beta_d; \\ \zeta = t \cdot \cos \beta_d, \end{cases} \quad (3.29)$$

cu $0 \leq u_1 \leq u_{1\max}$, și β_1 parametri constructivi;

- suprafață cilindrică pe porțiunea CD ,

$$S_{CD} \begin{cases} \xi = \xi_{O_2} - r_0 \cos v_1; \\ \eta = [L_P - \eta_{O_2}] + r_0 \sin v_1 + t \sin \beta_d; \\ \zeta = t \cos \beta_d, \end{cases} \quad (3.30)$$

cu ξ_{O_2}, η_{O_2} - coordonatele centrului cercului și L_P lungimea profilului cremalierii în direcția axei de translație.

În figura 3.7, se prezintă sistemele de referință solidare cu cremaliera reciproc înfășurătoare melcului de compresor, precum și poziția axei viitoare scule melc, vezi și figura 3.6.

Tabelul 3.2. Vectorii normală la suprafață

Zona	Vectorul normală
S_{AB}	$\vec{N}_{S_{AB}} = (-\cos\psi \vec{i} + \sin\psi \vec{j}) \cos\beta_d - \sin\psi \sin\beta_d \vec{k}$
S_{BC}	$\vec{N}_{S_{BC}} = (\sin\beta \vec{i} + \cos\beta \vec{j}) \cos\beta_d - \cos\beta \sin\beta_d \vec{k}$
S_{CD}	$\vec{N}_{S_{CD}} = (\cos v \vec{i} - \sin v \vec{j}) \cos\beta_d + \sin v \sin\beta_d \vec{k}$
S_{AH}	$\vec{N}_{S_{AH}} = \left(\frac{\partial\eta}{\partial\lambda_1} \vec{i} - \frac{\partial\xi}{\partial\lambda_1} \vec{j}\right) \cos\beta_d + \frac{\partial\xi}{\partial\lambda_1} \sin\beta_d \vec{k}$
S_{HG}	$\vec{N}_{S_{HG}} = \left(\frac{\partial\eta}{\partial\lambda_2} \vec{i} - \frac{\partial\xi}{\partial\lambda_2} \vec{j}\right) \cos\beta_d + \frac{\partial\xi}{\partial\lambda_2} \sin\beta_d \vec{k}$
S_{FG}	$\vec{N}_{S_{FG}} = (-\sin\beta_1 \vec{i} - \cos\beta_1 \vec{j}) \cos\beta_d + \cos\beta_1 \sin\beta_d \vec{k}$
S_{EF}	$\vec{N}_{S_{EF}} = (\cos v_1 \vec{i} - \sin v_1 \vec{j}) \cos\beta_d + \sin v_1 \sin\beta_d \vec{k}$

Se poate scrie acum, pentru fiecare porțiune, condiția de înfășurare, de tipul

$$\begin{vmatrix} N_{X_0} & N_{Y_0} & N_{Z_0} \\ X_0 - a & Y_0 & Z_0 \\ 0 & -\cos\omega & \sin\omega \end{vmatrix} = 0 \quad (3.32)$$

cu X_0, Y_0, Z_0 ecuațiile flancului profilului, vezi ecuațiile (3.22)...(3.30).

• Rezultate numerice

Pentru un melc având caracteristicile: $A_{12} = 80mm$; $r_0 = 1.1mm$; $R_0 = 22mm$ și punctele de control D [-25.267; -52.000]; C [-24.282; -51.357]; B [-19.671; -42.149]; A [6.938; -30.000]; G [20.671; -45.957]; E [24.057; -51.444]; F [24.998; -52.000], se definesc, în conformitate cu algoritmul anterior prezentat, coordonatele profilului axial al sculei melc, vezi tabelul 3.3.

Table 3.3. Secțiunea axială a suprafeței periferice primare a sculei melc

Nr. crt.	X[mm]	Y[mm]
1	46.000	-25.590
2	46.001	-25.587
3	46.001	-25.583
4	46.002	-25.579
5	46.002	-25.570
6	46.003	-25.562
7	46.003	-25.554
8	46.004	-25.551
9	46.004	-25.548
10	46.005	-25.542
11	46.006	-25.533
12	46.006	-25.524
13	46.007	-25.519
14	46.008	-25.515
15	46.008	-25.512

16	46.009	-25.505
17	46.010	-25.497
18	46.010	-25.489
19	46.011	-25.484
...	...	...
350	66.817	9.018
351	66.761	9.184
352	66.704	9.349
353	66.648	9.514
354	66.586	9.678
355	66.525	9.841
356	66.460	10.004
357	66.395	10.166
358	66.327	10.327
359	66.259	10.488
360	66.187	10.647
361	66.115	10.806
362	66.040	10.962
363	65.962	11.118
364	65.884	11.274
365	65.803	11.429
366	65.721	11.583
367	65.637	11.735
368	65.549	11.885
369	65.461	12.036
370	65.370	12.185
...	...	...
681	46.027	25.113
682	46.025	25.121
683	46.022	25.138
684	46.019	25.155
685	46.016	25.172
686	46.015	25.182
687	46.014	25.189
688	46.013	25.196
689	46.013	25.202
690	46.012	25.204
691	46.011	25.208
692	46.009	25.225
693	46.007	25.243
694	46.005	25.260
695	46.003	25.277
696	46.002	25.291
697	46.002	25.298
698	46.001	25.306
699	46.001	25.312
700	46.000	25.315
701	46.000	25.318

În figura 3.9, se prezintă applet-ul, realizat în limbajul Java, dedicat prezentului exemplu.

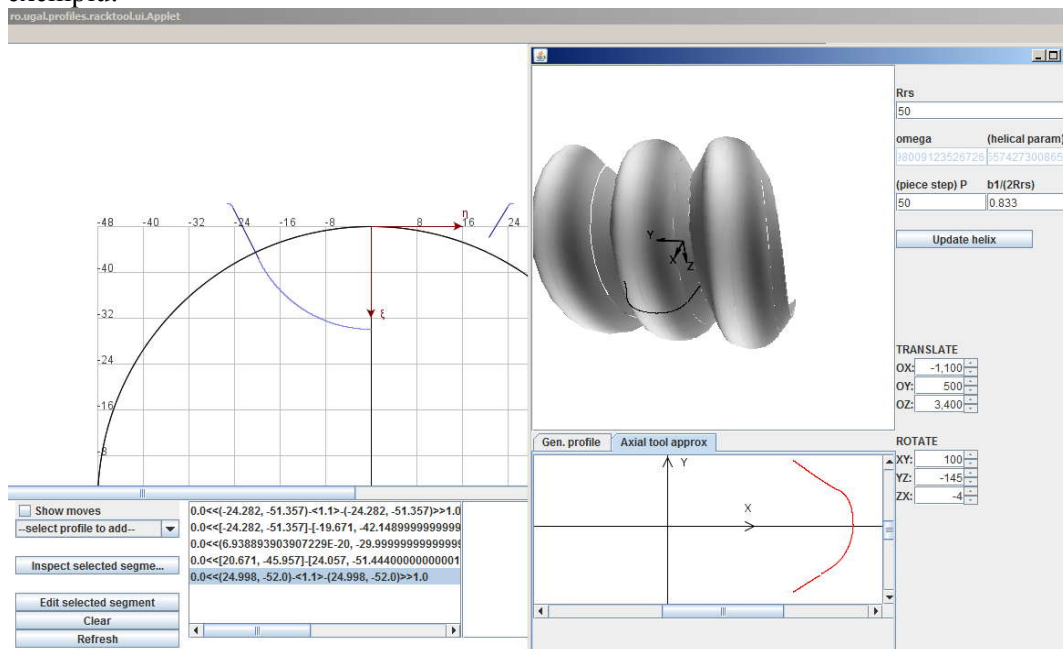


Fig. 3.9. Applet - secțiunea axială a suprafeței periferice primare a sculei melc

Bibliografie

1. Bernard C. Jiang, Sheng Dian Chiu, Form Tolerance Based Measurement Points Determination With CMM, *Journal of Intelligent Manufacturing*, nr. 13, pag. 101-108, 2002;
2. Mark T. Traband, D. J. Medeiros, M. Jeya Chandra, A Statistical Approach to Tolerance Evaluation for Circles and Cylinders, *IEE Transactions*, nr. 36, pag. 777-785, 2004;
3. H. Bai, C. K. Kwong, Y. C. Tsim, Process Modelling and Optimisations Using Artificial Neural Networks and Gradient Search Method, *International Journal Adv. Manuf. Technol.*, nr. 31, pag. 790-796, 2007;
4. C. Carolina Barcenas, Paul M. Griffin, Geometric Tolerance Verification Using Superquadrics, *IIE Transactions*, nr. 33, pag. 11109-11120, 2001;
5. Sampath Damodarasamy, Sam Anand, Evaluation of Minimum Zone for Flatness by Normal Plane Method and Simplex Search, *IIE Transactions*, nr. 31, pag. 617-626, 1999;
6. Alluru Gopala Krishna, K. Mallicarjuna Rao, Simultaneous Optimal Selection of Design and Manufacturing Tolerances with Different Stack-up Conditions using Scatter Search, *International Journal Advanced Manufacturing Technologies*, nr. 30, pag. 328-333, 2006;
7. Liu Z. Q., Methodology of Parametric Programming for Error Compensation on CNC Centres, *International Journal Advanced Manufacturing Technologies*, nr. 17, pag. 570-574, 2001;
8. Abhijit Gosavi, Shantanu Phatakwal, A Finite-Differences Derivative-Descent Approach for Estimating Form Error in Precision Manufactured Parts, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 128, pag. 335-39, 2006;
9. Romano Daniele, Vicario Grazia, Inspecting Geometric Tolerances: Uncertainty Analysis in Position Tolerances Control on Coordinate Measuring Machines, *Statistical Methods and Applications*, nr. 11, pag. 83-94, 2002;
10. Tucker Thomas, Kurfess Thomas, Newton Methods for Parametric Surfaces Registration, Part I. Theory, *Computer Aided Design*, nr. 35, pag. 107-114, 2003;
11. Tucker Thomas, Kurfess Thomas, Newton Methods for Parametric Surfaces Registration, Part II. Experimental validation, *Computer Aided Design*, nr. 35, pag. 115-120, 2003;
12. Li Min Zhu, Zhen Hua Xiong, Han Ding, You Lun Xiong, A Distance Function Based Approach for Localization and Profile Error Evaluation of Complex Surfaces, *Transaction of ASME*, vol. 126, pag. 542-554, 2004;
13. Xiangyang Zhu, Han Ding, Michael Wang, Form Error Evaluation: An Iterative Reweighted Least Squares Algorithm, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, pag. 535-541, 2004;
14. Ahn, K. G., Min, B. K., Pasek, Z. J., Modeling and compensation of geometric errors in simultaneous cutting using a multi-spindle machine tool, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, DOI 10.1007/s00170-005-2615-z;
15. Anselmetti, B., Louati, H., Generation of manufacturing tolerancing with ISO standards, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, pag. 1124-1131, DOI 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.001;
16. Anselmetti, B., Generation of functional tolerancing based on positioning features, *Computer Aided Design* 38, 2006, pag. 902-929, DOI 10.1016/j.cad.2006.05.005;

17. Ballu, A., Falarone, H., Chevassus, N., Mathieu, L., A new Design Method based on Functions and Tolerance Specifications for Product Modelling, *Annals of the CIRP*, Vol. 55/1/2006, 2006;
18. Cheraghi, S. H., Jiang, G., Ahmad, J. S., Evaluating the geometric characteristics of cylindrical features, *Precision Engineering* 27, 2003, pag. 195-204, PII S0141-6359(02)00221-0;
19. Dong, C., Zhang, C., Wang, B., Zhang, G., Prediction and Compensation of Dynamic Errors for Coordinate Measuring Machines, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, vol. 124, pag. 509-514, DOI 10.1115/1.1465435;
20. Epureanu A., Teodor V., Oancea N., Banu M., Marinescu V., Method for On-Line Identification of Reconfigurable Machine-Tool Geometry Based on a Topological Neural Approach, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* (trimisă spre publicare);
21. Hunter, R., Perez, J., Marquez, J., Hernandez, J. C., Modeling the integration between technological product specifications and inspection process, *Journal of Materials Processing Technology*, 191, 2007, pag. 34-38, DOI 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.056;
22. Teodor V., Epureanu A., Cuzmin C., Method for Identification of Geometric Feature Family Based on Genetic Algorithm and Neural Approach *Proceedings of WSEAS EUROPEAN COMPUTING CONFERENCE*, Athens, Greece, September 25-27, 2007;
23. Ybao, C., Huang, M., Yao, J., Zhong, Y., Optimal concurrent tolerance based on the grey optimal approach, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22, 2003, pag. 112-117, DOI 10.1007/s00170-002-1448-2;
24. El-Mounayri, H., Elbestawi, M. A., Spence, A. D., Bedi, S., General Geometric Modeling Approach for Machining Process Simulation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13, 1997, pag. 237-247;
25. Srinivasan, V., Standardizing the specification, verification and exchange of product geometry: Research, status and trends, *Computer-Aided Design*, 2007, DOI 10.1016/j.cad2007.06.006;
26. Prieto, F., Redarce, T., Lepage, R., Boulanger, P., An Automated Inspection System, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, 2002, pag. 917-925;
27. Mejbri, H., Anselmetti, B., Mawussi, K., Functional tolerancing of complex mechanisms: Identification and specification of key parts, *Computers & Industrial Engineering*, 49, 2005, pag. 241-265, DOI 10.1016/j.cie.2005.04.002;
28. van Luttervelt, C. A., Peng, J., Symbiosis of Modelling and Sensing to Improve the Accuracy of Workpieces in Small Batch Machining Operations, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15, 1999, pag. 699-710;
29. Huang, M. C., Tai, C. C., The Pre-Processing of Data Points for Curve Fitting in Reverse Engineering, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 2000, pag. 635-642;
30. Jung, J., Mayor, R., Ni, J., Development of Freeform Grinding Methods for Complex Drill Flank Surfaces and Cutting Edge Contours, *International Journal of Machine Tool & Manufacturing*, 45, 2005, pag. 93-103;
31. Ren, K., Ni, J., Analyses of Drill Flute and Cutting Angles, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15, 1999, pag. 546-553;

32. Lee, J. H., Liu, Y., Yang, S. H., Accuracy Improvement Of Miniaturizing Machine Tool: Geometric Error Modeling And Compensation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46, 2006, pag.1508-1516;
33. Shi, M., Zhang, Y. F., Loh, H. T., Bradley, C., Wong, Y. S., Triangular Mesh Generation Employing A Boundary Expansion Technique, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, 2006, pag. 54-60;
34. Jian, L., Hongxing, L., Modeling System Error In Batch Machining Based On Genetic Algorithms, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 2003, pag. 599-604;
35. Cho, M. W., Kim, G. H., Seo, T. I., Hong, Y. C., Cheng, H. H., Integrated Machining Error Compensation Method Using OMM Data And Modified PNN Algorithm, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 2006, pag. 1417-1427;
36. Ratchev, S., Liu, S., Huang, W., Becker, A. A., An Advanced FEA Based Force Induced Error Compensation Strategy in Milling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46, 2006, pag. 542-551;
37. Ratchev, S., Liu, S., Huang, W., Becker, A. A., Error Compensation Strategy In Milling Flexible Thin-Wall Parts, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, pag. 673-681;
38. Sabri, T. E., Can, C., A Cutting Force Induced Error Elimination Method For Turning Operations, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 170, 2005, pag. 192-203;
39. Ratchev, S., Liu, S., Huang, W., Becker, A. A., Milling Error Prediction And Compensation In Machining Of Low-Rigidity Parts, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44, 2004, pag. 1629-1641;
40. Takahashi, S., Variational design of curves and surfaces using multiresolution constraints, *The Visual Computer*, 14, 1988, pag. 208-227;
41. Mu, Y. H., Hung, N. P., Ngoi, K. A., Monitoring A Sub-Newton Cutting Force For Ultra-Precision Machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 2000, pag. 229-232;
42. Fulin, W., Chuanyun, Y., Tao, W., Yang, S., Zhao, G., A Generating Method For Digital Gear Tooth Surfaces, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28, 2006, pag. 474-485;
43. Annicchiarico, W., Cerrolaza, M., A 3D Boundary Element Optimization Approach Based on Genetic Algorithms and Surface Modeling, www.elsevier.com/locate/neunet, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, DOI: 10.1016/j.enganabound.2004.05.004;
44. Xu, Z.B., Qiao, H., Peng, J., Zhang, B., A Comparative Study of Two Modeling Approaches in Neural Network, www.elsevier.com/locate/neunet, *Neural Network*, DOI: 10.1016/S0893-6080(03)00192-8;
45. Annicchiarico, W., Cerrolaza, M., Optimization on Finite Element Bidimensional Models: An Approach Based on Genetic Algorithms, *J Finite Elem. Anal. Des.* 1998, 29 (3-4):231-57;

Anexe

Lista lucrărilor publicate în cadrul grantului ID_791/2009

1. Epureanu, Al. Teodor, V., Oancea, N., *Topological Modelling of the Part Geometry in Manufacturing*, In Proceedings of the 5th International Conference on Dynamical Systems and Control, Control 09, 2009, ISBN 978-960-474-094-9, ISSN 1790-2769, pag. 75-80;
2. Oancea, N., Teodor, V., Popa, I., Dura, G., *The Gear Hub Profiling for Machining Surfaces with Discreetly Expressed Surfaces*, In Proceedings of the 5th International Conference on Dynamical Systems and Control, Control 09, 2009, ISBN 978-960-474-094-9, ISSN 1790-2769, pag. 81-86;
3. Epureanu, A., Nicolae, O., Teodor, V., Petruș, V., Marin, F.B., *A New Approach of the Mechanical Structures Topological Geometry – Curves Types Identification*, In: The Annals Of “Dunărea De Jos” University Of Galați, Fascicle V, Technologies In Machine Building, ISSN 1221- 4566, 2009 New Tech 2009, Galați, pag. 47-50;
4. Oancea Nicolae, Teodor Virgil, Dumitrascu Nicolae and Fetecau Catalin, *Multi-Flute Helical Drill With Eliptical Cutting Edges*, In proceedings of the International Conference on Manufacturing Systems, ICMS 2009, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, tomul LV (LIX), fascicula 4, ISSN 1011-2855, pag. 173-179.

Topological Modelling of the Part Geometry in Manufacturing

The Gear Hub Profiling for Machining Surfaces with Discreetly Expressed Surfaces

**A New Approach of the Mechanical Structures Topological Geometry
– Curves Types Identification**

Multi-Flute Helical Drill With Elliptical Cutting Edges