

GEOMETRIA TOPOLOGICA A CONSTRUCTIILOR MECANICE

- Sinteza pe anul 2009 (01.01 – 30.10) –

Activitatea de cercetare în cadrul CONTRACTULUI ID 791/2009 în anul 2009, a avut două etape, cu următoarele obiective:

1. Dezvoltarea conceptului de geometrie topologică a construcțiilor mecanice.
2. Identificarea (modelarea) structurilor topologice.
3. Elaborarea unor principii de proiectare topologică a construcțiilor mecanice.

OBIECTIVUL I. DEZVOLTAREA CONCEPTULUI DE GEOMETRIE TOPOLOGICĂ A CONSTRUCTIILOR MECANICE

1.1. Modelarea topologică a suprafețelor

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.

Concluzia 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.

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 reperi din componența unui ansamblu. Prin acest mod de a privi suprafețele reperelor, se minimizează eroarea apărută la identificarea acestora.

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

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 cinematicii și a dinamicii reperului se realizează prin descrierea discretă a realității.

1.3. Modelarea topologică a geometriei construcțiilor mecanice

Forma geometrică efectivă a oricărei suprafețe prelucrate este întotdeauna diferită față de forma nominală. 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.

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;
- 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.

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.

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).

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, 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 parametrii p_1 , p_2 , p_3 și, respectiv, p_4 , p_5 și p_6 .

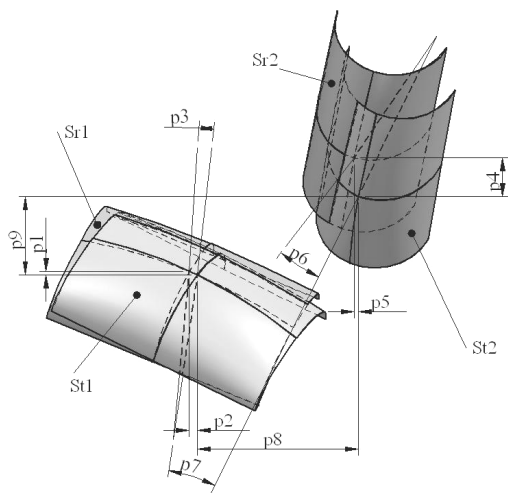


Fig. 1. Abaterile suprafețelor structurii topologice

Presupunând că în specificațiile tehnice au fost restricționate pozițiile relative între cele două suprafețe, prin parametrii 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 parametrii de conformitate ai structurii topologice.

1.5. Geometria topologică a construcțiilor tehnologice

În figura 2, este reprezentat un exemplu de structură topologică tehnologică.

Să presupunem că, în cadrul operației respective se prelucerează 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.

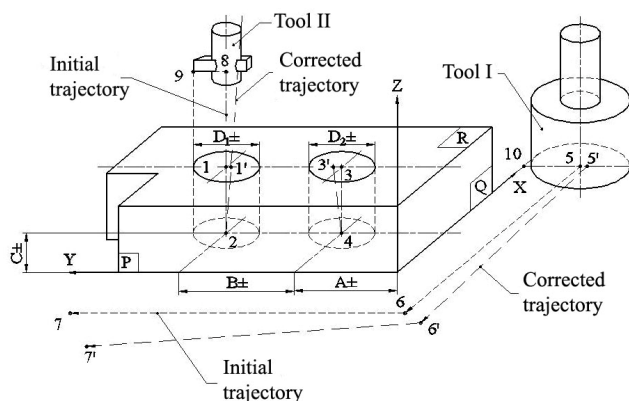


Fig. 2. Structura topologică tehnologică

presupune, în mod evident, modificarea traiectoriilor programate ale sculelor cu care se realizează prelucrarea.

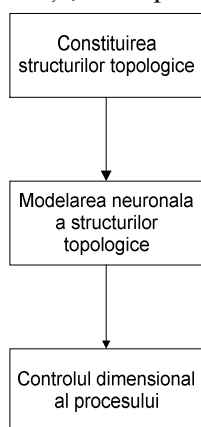
1.6. Geometria topologică a construcțiilor metrologice

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 sistemul 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.

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.

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 3).

Fig. 3. Etapele identificării on-line pe baza topologiei suprafețelor



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.

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.

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.).

Parametrii care se modifică sunt de două tipuri: **programabili** și **neprogramabili**.

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**.

Tendință 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

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.)

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.

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

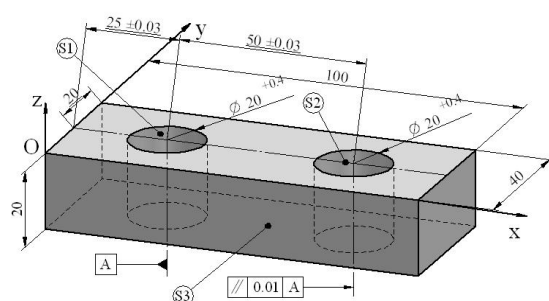


Fig. 4. Reper cu ansamblu de dimensiuni

În figura 4, 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

$$\{\varphi_1, x_{02}, y_{02}, \varphi_2\} \quad (1)$$

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 ;

Tabelul 1. Precizia rețelei neuronale

Parametrul	Real	Calculat	Eroarea
φ_1 [°]	-0.02	-0.0202	0.0002
x_{02} [mm]	0.1	0.10442	0.00442
y_{02} [mm]	-0.3	-0.3045	0.0045
φ_2 [°]	0.01	0.0093	0.0007

La antrenarea rețelei neuronale, fiecărui punct i i-a fost aplicată transformarea de coordonate într-un sistem de referință modificat cu parametrii de conformitate calculându-se

valoarea funcției f , ca deviație a poziției punctelor față de suprafața cilindrică: $f = (x + X_0)^2 + (y + Y_0)^2 - R_0^2$, în care X_0 și Y_0 sunt coordonatele teoretice ale centrului suprafeței cilindrice și R_0 raza teoretică a acestui cilindru. Parametrii x_{02} , y_{02} , au abateri în domeniul ± 0.4 iar parametrii unghiulari φ_1 și φ_2 au abateri în domeniul $\pm 0.03^\circ$. A fost obținută o bază de date cu 625 de înregistrări, fiecare înregistrare având 38 de câmpuri (34 de valori pentru funcția f și 4 valori pentru setul de parametri).

În tabelul 1, este prezentată precizia cu care rețeaua neuronală răspunde interogării. Parametrii de interogare sunt în domeniul de antrenare.

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. Ecuația suprafeței cilindrice în sistemul de referință propriu este: $S: x^2 + y^2 - R^2 = 0$. (2)

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-unelte este:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{Astfel, funcția obiectiv devine: } f = \sum_{i=1}^m \left(X_i^2 + Y_i^2 - (R + \Delta R)^2 \right)^2 \quad (4)$$

Tabelul 2. Parametrii suprafeței cilindrice

Parametrul	Real	Calculat	Eroare
Δx [mm]	0.8	0.80011	0.011
Δy [mm]	-0.5	-0.5012	0.12
φ [°]	-1.5	-1.498	0.2
ψ [°]	0.5	0.50009	9E-03
ΔR [mm]	0.25	0.24972	0.028
Funcție obiectiv	1.76E-09	0.00099	0.1

unde m este numărul de puncte recoltate iar X_i , Y_i , Z_i sunt date de ecuațiile (3).

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

În tabelul 2, sunt prezentate valorile parametrilor reali, ale parametrilor calculați și nivelul erorii pentru diferite moduri ale comutării parametrilor (vezi ecuațiile (3) și (4)).

2.2. Structurarea topologică a construcțiilor mecanice

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

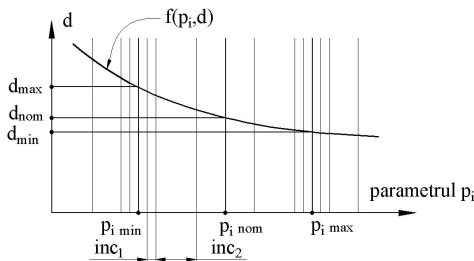


Fig. 5. Discretizarea neuniformă a domeniului de variație a parametrului p_i

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 5).

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 palpăre 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 $p_1, p_2, \dots, p_n$.

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 $M = \prod_{i=1}^m v_i$, $N = \sum_{i=1}^n k_i$, 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-unelte, 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 „ $k+1$ ”.

2.3. Tolerarea dimensională și de formă a structurilor topologice

2.3.1. Identificarea caracteristicilor geometrice a reperelor utilizând metoda algoritmilor genetici

Structură topologică de tip cilindru-plan

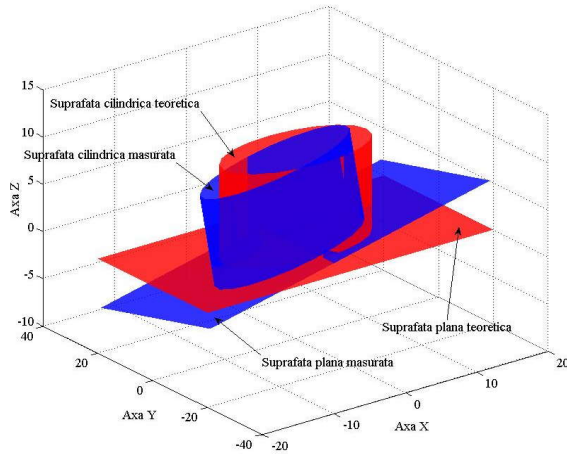


Fig. 6. Suprafețele structurii topologice explorate

Metoda prezentată anterior a fost aplicată pentru o 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 6.

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:

$$\begin{aligned} X_1 &= \omega_2^T(\psi_C) \cdot \omega_1^T(\varphi_C) \cdot x_1 + x_0; \\ X_2 &= \omega_2^T(\psi_P) \cdot \omega_1^T(\varphi_P) \cdot x_2; \end{aligned} \quad (5)$$

În acest fel, **funcția obiectiv**, calculată ca sumă a distanțelor de la fiecare punct la suprafețele teoretice devine $d = \sum_{i=1}^{42} \left| \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} - R \right| + \sum_{j=1}^9 \sqrt{(Z_j - Z_{0P})^2}$, în care Z_{0P} , reprezintă cota suprafeței plane teoretice în sistemul de referință absolut.

În tabelul 3, sunt prezentate rezultatele obținute prin aplicarea acestui algoritm la structura topologică menționată (cilindru și plan).

Tabelul 3. Rezultate numerice

Parametrul	Real [°]	Calculat [°]	Eroare relativă [%]
φ_C	5.0046	5	0.091915
ψ_C	10.01	10	0.0999
x_0	1.9982	2	-0.09008
y_0	3.0018	3	0.059964
R	9.9999	10	-0.001
φ_P	5.0002	5	0.004
ψ_P	10.001	10	0.009999

OBIECTIVUL III. ELABORAREA UNOR PRINCIPII DE PROIECTARE TOPOLOGICĂ A CONSTRUCȚIILOR MECANICE

3.1. Principii de proiectare topologică

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.

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.

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 burghiile 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.

BIBLIOGRAFIE

1. Bernard C. Jiang, Sheng Dian Chiu, Form Tolerance Based Mesurement Points Determination With CMM, Journal of Itelligent Manufacturing, nr. 13, pag. 101-108, 2002;
2. 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;
3. 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;
4. 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;
5. 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;
6. 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;
7. 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;
8. 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;
9. 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;
10. 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;