

STABILIREA PARAMETRILOR SPECIFICI MĂSURĂRII ARMONICE A ELEMENTELOR GEOMETRICE ALE ANGRENAJELOR EVOLVENTICE PRIN SIMULARE NUMERICĂ

Drd. ing. Dănuț Iulian STANCIU, Dr. ing. prof. univ. Gh. GHEORGHE,
Dr. ing. Daniela CIOBOATA

Institutul Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării

REZUMAT. Măsurarea armonică a parametrilor geometrici a angrenajelor cu profil evolventic este o metodă mult mai rapidă decât metodele tradiționale de verificare, cu o precizie suficient de mare să poată fi aplicată cu succes în industria producătoare de roți dințate sau în cea care utilizează aceste roți. Pentru a putea decela influența diferitelor componente geometrice specifice angrenajelor evolventice este necesar a se efectua un număr mare de testări cu angrenaje cu abateri geometrice cunoscute și a se determina filtrele necesare. Pentru a elimina aceste testări, mari consumatoare de timp și de resurse materiale, s-a elaborat un software de simulare a angrenării dintre două roți dințate virtuale, roți dințate cu valori ale diverselor abateri geometrice cunoscute, software care realizează o angrenare virtuală din care se obține un set de valori ale variației distanței dintre axe, valori care vor fi utilizate pentru a determina seturile de filtre ce se vor aplica pentru a diferenția abaterile geometrice ale roților dințate.

Cuvinte cheie

ABSTRACT. The harmonic measurement of the geometric parameters of the gears with an involute profile is a much faster method than the traditional verification methods with a sufficiently high accuracy that can be successfully applied to the toothed wheel industry or to those using these wheels. In order to be able to detect the influence of the different geometrical components specific to the evolutionary gears, it is necessary to perform a large number of known geometrical gearing tests and to determine the necessary filters. In order to eliminate these time-consuming and resource-intensive tests, we have developed a simulation software for engaging between two virtual gears, gears with values of various known geometric deviations, software that performs virtual engagement from which a set of axial distance variation values that will be used to determine the sets of filters to be applied to differentiate geometric deviations of the gears.

Keywords

Pentru determinarea rapidă a calității angrenării se folosește metoda angrenării forțate cu dinte înfipt, în care două roți dințate cu același modul sunt angrenate astfel încât să dispară jocul dintre dinți (joc care în cazul angrenării normale este mai mare ca zero). Prin măsurarea distanței dintre axe a acestui angrenaj forțat se poate emite un verdict de calitate a angrenajului verificat.

Uzual această metodă era folosită pentru determinarea criteriului de angrenare lină dar prin aplicarea analizei armonice asupra valorilor de distanță dintre axe culese în cadrul unei rotații se pot obține informații referitoare la parametrii roților dințate utilizate în angrenare (joc de flanc, excentricitatea roții, abaterea de la profil a evolventei, existența loviturilor).

Analiza armonică se realizează cu ajutorul transformatei Fourier Directe care stipulează că orice

funcție periodică poate fi aproximată cu o sumă de sinusoidă perfecte. Prin transformata Fourier Inversă dintr-o de sinusoidă perfecte obținute cu ajutorul unei transformate Fourier Directe se obține curba originală. Aceste prelucrări sunt reprezentate de formulele:

Pentru transformata Fourier Directă:

$$F(s) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i s x} dx \quad (1)$$

și pentru Transformata Fourier Inversă cu formula:

$$f(x) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} F(s) e^{2\pi i s x} ds \quad (2)$$

unde: $f(x)$ – funcția asupra căreia se aplică transformata; $F(s)$ – transformata Fourier; i – reprezintă ordinul sinusoidă obținute ($i = 0 \dots \infty$).

STABILIREA PARAMETRILOR SPECIFICI MĂSURĂRII ARMONICE A ELEMENTELOR GEOMETRICE

Aceste formule sunt aplicabile funcțiilor continue cu o formulă cunoscută ($f(x)$). În cazul proceselor curente de măsurare se obțin o serie de valori măsurate, valori culese periodic la un interval stabilit (fenomenul poate fi considerat și el periodic). Pentru aceste tipuri de procese (processe numite și processe discrete) se folosesc formulele:

Pentru transformate Fourier Directă discretă:

$$X_k = \sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-2\pi i j k / N} \quad (3)$$

iar pentru Transformată Fourier discretă inversă:

$$x_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{2\pi i j k / N} \quad (4)$$

unde: x – valorile obținute în cadrul măsurării; X – valorile transformatei Fourier discrete (sunt de formă complexă)

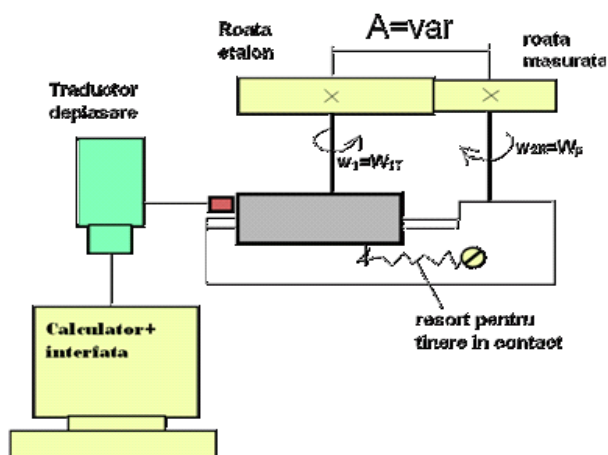


Fig. 1. Reprezentarea schematică a verificării prin angrenare forțată.

În urma prelucrării a unui set de eșantioane de N puncte se obține un spectru de frecvență de la 0 la $N/2$.

Ca o exemplificare de aplicare a unei transformate Fourier este reprezentată grafic o descompunere a unei curbe complexe într-o serie de sinusoid simple (fig. 2)

Prin metoda arătată de compunere și recompunere a unei serii Fourier s-au prelucrat rezultatele obținute în urma simulării angrenării.

Simularea angrenării. Pentru a putea simula o angrenare este necesar să putem descrie profilul dinților cu o funcție matematică cunoscută (de exemplu cu o funcție de tip spline) sau putem interpola profilul dinților cu ajutorul unei interpolări liniare. Deoarece interpolarea cu funcții spline nu a dat rezultate corespunzătoare pentru evolvente la care s-au introdus abateri de la profilul evolventei,

toate simulările s-au executat prin realizarea unei interpolări liniare a profilului dinților.

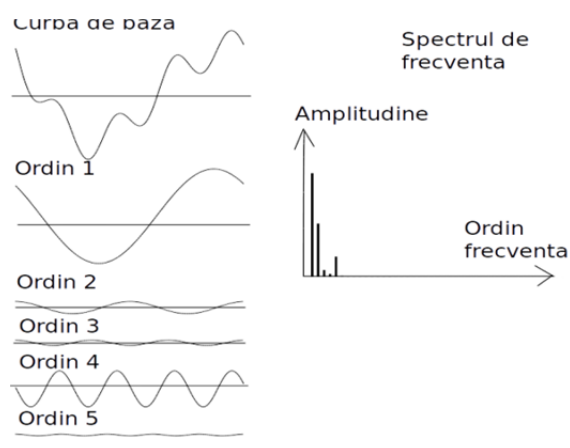


Fig. 2. Exemplu de descompunere a unei curbe complexe într-o serie de sinusoid simple.

Pentru a putea reprezenta în coordonate carteziene profilul dinților angajați în angrenare s-a pornit de la descrierea evolventei (fig. 3).

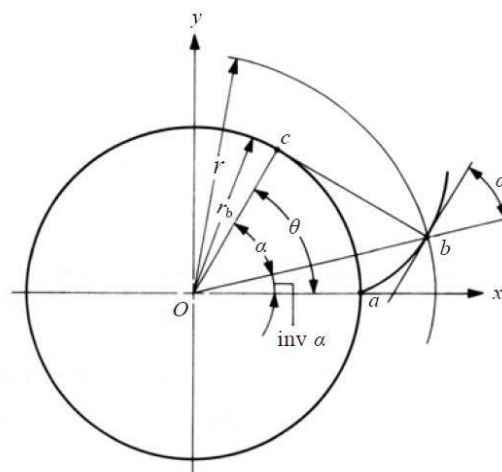


Fig. 3. Descrierea geometrică a evolventei.

Din figura 3 se obțin coordonatele carteziene al unui punct aflat la unghiul α

$$\alpha = \arccos\left(\frac{r_b}{r}\right) \quad (5)$$

$$x = r \cos(\alpha) \quad (6)$$

$$y = r \sin(\alpha) \quad (7)$$

unde: r_b – raza cercului de bază; r – raza curenta ($r_b \dots r_e$).

Folosind aceste formule și ținând seama de parametrii specifici ai roții dințate (diametrul de divizare, diametrul de fund, diametrul de capăt) se obține reprezentare numerică a unui flanc iar mai departe printr-o serie de transformări geometrice (rotiri, translații, etc.) se obține reprezentarea numerică a tuturor profilelor dinților roții dințate.

PROGRESUL TEHNOLOGIC, REZULTAT AL CERCETĂRII

Toate aceste calcule, plus cele necesare simulării angrenării sunt realizate automat de *software-ul de simulare și prelucrare armonică a angrenării*.

Software pentru simularea angrenării. Software-ul realizat pentru simularea angrenării preia de la utilizator parametrii specifici ai roților dințate, valorile abaterilor impuse și realizează simularea angrenării și prelucrarea valorilor rezultate în urma angrenării.

Parametrii geometrici ai roților dințate sunt preluate de ecranul de dialog arătat în figura 4.

Un ecran obținut în timpul funcționării este arătat în figura 5.

În figura 6 este arătată o prelucrare a valorilor simulării cu diverse valori ale filtrelor folosite în prelucrare.

Fig. 4. Definirea parametrilor geometrici ai roții de verificat.

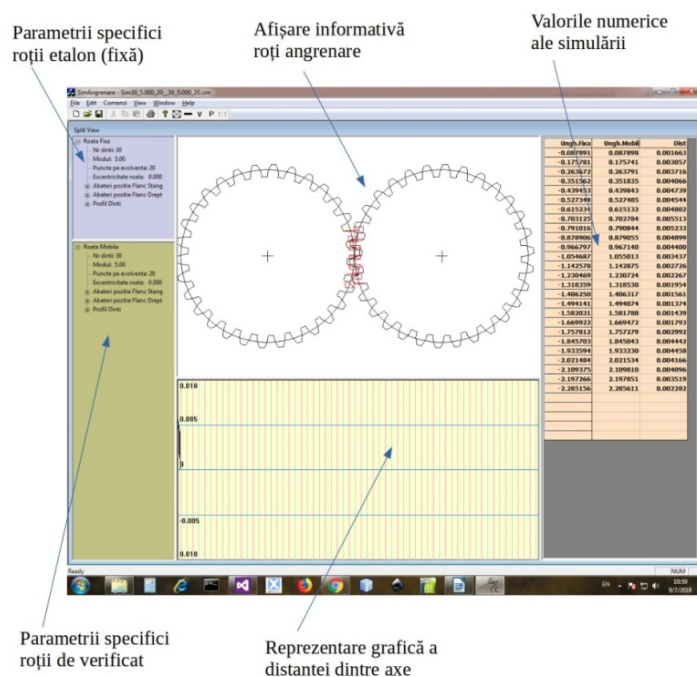


Fig. 5. Ecranul de simulare a angrenării.

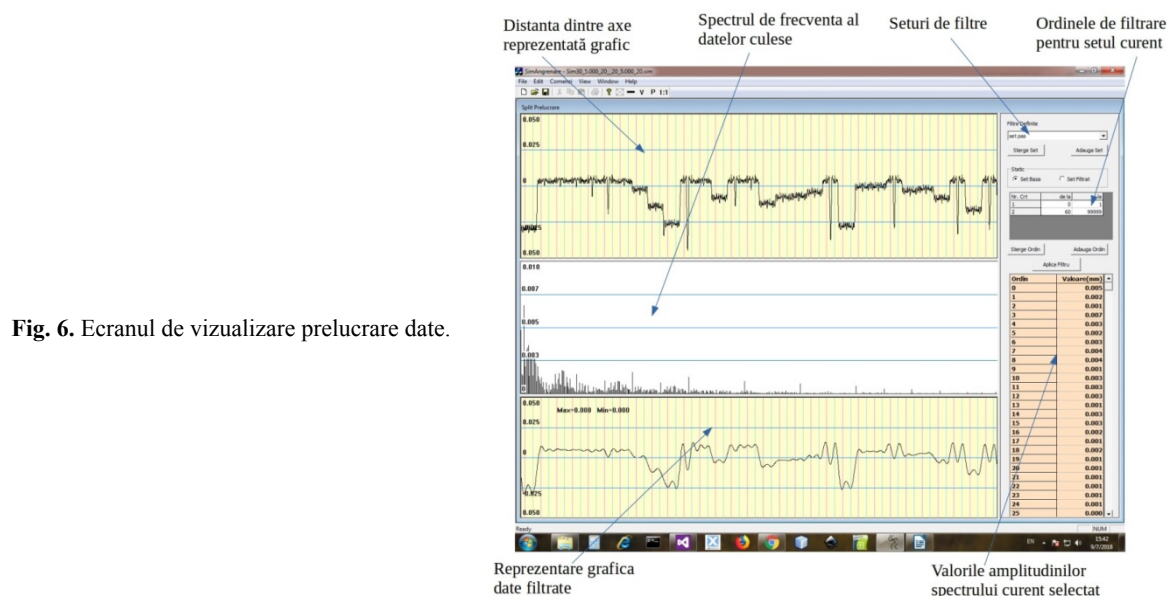


Fig. 6. Ecranul de vizualizare prelucrare date.

STABILIREA PARAMETRILOR SPECIFICI MĂSURĂRII ARMONICE A ELEMENTELOR GEOMETRICE

În continuare s-au efectuat simulările propriu-zise ale angrenării prin următoarele verificări

a) verificare gradului de precizie în efectuarea simulării angrenării forțate

b) simularea influenței jocului de flanc asupra angrenării forțate

c) testarea influenței excentricității asupra angrenării forțate

d) verificarea influenței abaterii de profil asupra valorilor distanței dintre axe

a) Gradul de precizie a realizării simulării.

Pentru a verifica precizia simulării s-au realizat o serie de simulări pentru două roți dințate perfecte dar care aveau profilul evolventic aproximat printr-o

interpolare liniară realizată cu un număr diferit de puncte. Rezultatele acestei simulări sunt prezentate în tabelul 1 cu reprezentare grafică în figura 7.

Din tabelul 1 și din figura 7 se vede că precizia de prelucrare este bună pornind de la un număr de 75 de puncte de aproximare a evolventei (se preferă un număr mai mic de puncte pentru a micșora timpul total de prelucrare).

b) Determinarea jocului de flanc asupra variației distanței dintre axe – se realizează prin simularea unui angrenaj perfect la care asupra unei roți i se introduc diverse valori ale jocului de flanc.

Valorile rezultate în urma simulării și prelucrării sunt prezentate în tabelul 2.

Tabelul 1 – Precizia de prelucrare raportată la numărul de puncte de aproximare a evolventei

Nr. puncte\Modul	2	3	5	10	20
20	0.005723	0.005723	0.005723	0.005723	0.005723
50	0.000746	0.000746	0.000746	0.000746	0.000746
75	0.000416	0.000416	0.000416	0.000416	0.000416
100		0.000265	0.000265	0.000265	0.000265
200				0.000065	0.000065

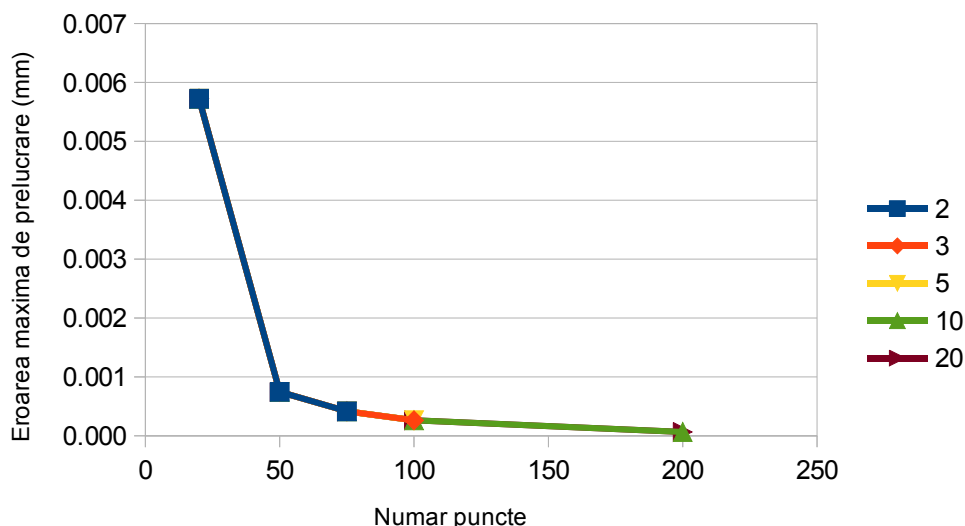


Fig. 7. Graficul preciziei de prelucrare raportat la numărul de puncte de aproximare evolventă.

Tabelul 2 – Rezultate simulare pentru diferite valori de joc de flanc introduse

Valoare joc de flanc	Valoare componentă ordin 0 din spectru	Valoare corectată cu (datorată efectului de pana = $\tan(\text{unghi angrenare})$)	Abaterea prelucrării (mm)
0.1000	0.2798	0.1018	0.0018
0.1500	0.4198	0.1528	0.0028
0.3500	0.9795	0.3565	0.0065

Din tabelul 2 se observă că jocul de flanc se poate obține ușor din componenta de ordin 0 a spectrului.

c) Determinarea influenței excentricității asupra distanței dintre axe.

Pentru a verifica influența excentricității asupra distanței dintre axe se va realiza o simulare a unei angrenări dintre o roată geometrică perfectă și o roată

conjugată care are toate valorile geometrice perfecte exceptând excentricitate.

Rezultatele pentru diverse valori ale excentricității introduse în simulare sunt arătate în tabelul 3.

d) Verificarea influenței abaterii de profil asupra valorilor distanței dintre axe – se realizează prin introducerea unei abateri de profil

PROGRESUL TEHNOLOGIC, REZULTAT AL CERCETĂRII

asupra unei roți din cadrul simulării angrenării, abateri cu valoare aleatoare cu o valoare maximă impusă. Pentru a obține valoarea influenței abaterii de profil se filtrează componentele de ordin 0 – 15. Rezultatele simulării sunt prezentate în tabelul 4.

Observație – valoarea abaterii de flanc rezultată în urma prelucrării se referă la o valoare globală la nivelul asupra întregii roți dințate (nu se poate specifica la care dinte se afla valoarea maximă obținută)

Tabelul 3 – Rezultate prelucrare pentru diverse excentricități impuse

Excentricitate introdusă (mm)	Valoarea amplitudine componentei de ordin 1 din spectrul de frecvență (mm)
0.05	0.05
0.1	0.1
0.2	0.2
0.3	0.3

Tabelul 4 – Influența abaterii de profil asupra variației distanței dintre axe a angrenării simulate

Valoare maximă a abaterii de profil (mm)	Valoare obținută în urma prelucrării (mm)	Abaterea (mm)
0.022	0.020	0.002
0.048	0.049	0.001
0.061	0.049	0.012

CONCLUZII

Din analiza rezultatelor simulării efectuate asupra unor angrenaje virtuale cu valori ale jocului de flanc, excentricității, și abaterii de profil rezultă că metoda de analiză armonică se poate folosi cu succes la determinarea globală a acestor valori în cadrul unei testări cu dinte înfipt. Precizia acestei prelucrări este suficient de bună (dar nu la nivelul unei măsurări de laborator), principalul avantaj al acestei metode fiind dat de timpul mic de prelucrare, de ordinul secundelor raportată la un timp de ordinul orelor în cadrul folosirii mijloacelor convenționale de măsurare a roților dințate.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Introduction to the Fourier transform - pagina web - <http://www.thefouriertransform.com/#introduction>
- [2] Fourier Transforms - pagina web - <http://www.cv.nrao.edu/course/ast534/FourierTransforms.html>
- [3] Fourier Transform - pagina web - https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_transform
- [4] Minciu Constantin – Precizia și controlul angrenajelor- Editura tehnică 1984 România
- [5] Botez E., Minciu C. – Mecanismul fictiv și precizia dinamică a lanțului cinematic de rulare Editura Tehnica 1984 România
- [6] Duca Z. – Teoria sculelor așchietoare- Editura Tehnică 1982 România
- [7] 7. Sauer ș.a. – Angrenaje vol.1 și 2- Editura Tehnică

Despre autori

Drd. ing. **Dănuț STANCIU**

Institutului Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării, București, România

Stanciu Dănuț este inginer mecanic având o experiență în cercetare de peste 25 de ani în domeniile măsurării dimensionale asistată de calculator la stabilirea metodelor de măsurare și realizarea de algoritmi complecși de prelucrare. Este angajat al Institutului Național de Cercetare - Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării (INCDMTM)- București, România cu funcția de Cercetător Științific gr. II.

Conducător științific prof. univ. Dr. H.C. EurIng. dr. ing. **Gheorghe Ion GHEORGHE**

Institutului Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării, București, România

Gheorghe Ion Gheorghe este cercetător științific principal gradul I, având o experiență în cercetare și management de peste 47 de ani în domeniile Mecanica Fină, Tehnica Măsurării Inteligente, Robotică, Mecatronică, Integronică, Adaptronică și Cyber-Mix Mecatronică. Este angajat al Institutului Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării - INCDMTM din București, România. Este Director General la Institutului Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării, din anul 2006 și până în prezent; Este Profesor Universitar Dr. H.C. EurIng Dr. Ing. și are activitate universitară la U.P.B , U.T.M și U.V.T. Este Membru corespondent al Academiei de Științe Tehnice din România (ASTR).

STABILIREA PARAMETRILOR SPECIFICI MĂSURĂRII ARMONICE A ELEMENTELOR GEOMETRICE

Dr. Ing. **Daniela Doina CIOBOATĂ**

Institutului Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării, București, România

Daniela Doina CIOBOATĂ are o experiență de peste 30 de ani în domeniile tehnici și tehnologii de control dimensional, echipamente de măsurare și monitorizare on-line și off-line pentru diferite domenii industriale (industria automobilelor, industria rulmenților, material rulant, construcții de mașini); analiza, monitorizarea și diagnosticarea vibro-acustică a mașinilor - unelte, motoare, pompe; controlul proceselor dinamice în timp real. Este angajat al Institutului Național de Cercetare - Dezvoltare pentru Mecatronică și Tehnica Măsurării (INCDMTM)- București, România cu funcția de cercetător științific principal gradul I