

METODE DE PRELUCRARE A DATELOR CULESE ÎN CADRUL MĂSURĂRII DIMENSIONALE A ELEMENTELOR DE MECANICĂ FINĂ PRIN FOLOSIREA ANALIZEI ARMONICE

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

Universitatea „Valahia” din Târgoviște,
Școala Doctorală Inginerie Mecanică, Târgoviște, România

REZUMAT. Analiza armonică este o metoda matematică ce realizează determinarea (aproximarea) unor funcții continue prin suma de sinusoidale ideale. Prin selectarea acestor sinusoidale într-un mod judicios, în cadrul definirii metodelor de măsurare inteligente a unei piese, se pot separa elementele geometrice ale unei piese în elemente geometrice de tip forma (circularitate, excentricitate, etc.) de elementele geometrice de tip corespunzătoare stării suprafețelor. Prezentul articol, folosind cercetările efectuate în cadrul tezei de doctorat "Studii, cercetări și experimentări complexe a angrenajelor de mecanică fină prin metode armonice de înaltă precizie" își propune în soluție originală să prezinte și să analizeze principalele metode de prelucrare a datelor culese în procesul de măsurare a pieselor realizate și folosite în echipamentele mecatronice prin folosirea analizei armonice.

Cuvinte cheie: angrenaj, măsurare, analiză armonică.

ABSTRACT. Harmonic analysis is a mathematical method that performs the determination (approximation) of continuous functions by the sum of ideal sinusoids. By selecting these sinusoids in a judicious way, in defining the methods of smart measurement of a part, it is possible to separate the geometrical elements of a part into geometric elements of the shape. (circularity, eccentricity, etc.) of the geometric elements corresponding to the state surfaces. This article, using the research carried out under the doctoral thesis "Complex studies, research and experimentation of precision mechanical gearing transmissions using high precision harmonics methods", aims to perform an original work and thus to present and analyze the main methods of processing the data gathered in the process measurement of the parts made and used in mechatronic equipment by resorting to harmonic analysis.

Keywords: gear, measurement, harmonic analysis.

INTRODUCERE

Analiza armonică, realizată în special cu ajutorul transformatei Fourier, este un instrument matematic ce arată că orice funcție continuă poate fi reprezentată de o sumă de funcții sinusoidale.

Transformata Fourier este definită de:

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

care mai este denumită Transformata Fourier Directă, și

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

cunoscută și ca Transformata Fourier Inversă.

În realitate, în procesul de măsurare, avem de-a face cu semnale care sunt eșantionate discret, de obicei la intervale constante, și de durată finită sau periodică. Pentru astfel de date, este necesar doar un număr finit de sinusoidale și este necesară Transformarea Fourier Discretă (DFT - Discret Fourier Transformation).

Pentru seturi de date discrete (cum sunt cele obținute în procesul de măsurare) transformata Fourier discretă de

N puncte de date eșantionate uniform x_j (unde $j = 0, \dots, N-1$) este definită prin formula:

$$X_k = \sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-2\pi ijk/N}$$

iar transformata inversă prin formula

$$x_j = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{2\pi ijk/N}$$

Rezultatul DFT al unei serii de timp de intrare în N puncte este un spectru de frecvență în N puncte, de frecvență k , cu k variind de la 0 la $(N/2 - 1)$, de la componenta 0 numită componenta continuă până la cea mai înaltă frecvență de valoare $N/2$. Fiecare valoare k reprezintă numărul de sinusoidale prezente în fiecare serie. Dacă amplitudinea și faza fiecărei componente este notată cu A_k (amplitudinea) și Φ_k , atunci fiecare dintre sinusoidalele componente pot fi descrise de ecuația:

$$X_k = A_k e^{i\Phi_k}$$

Pentru seturi de date achiziționate în procesul de măsurare, rezultata Transformatei Fourier Directe valoarea

reală a spectrului sunt componentele pare iar valoarea complexă este data de componente impare ale transformatei.

Transformata Fourier Directă este un algoritm matematic complex care necesita un mare volum de calcul (N^2 operații). Pentru a se mari viteza de execuție James W. Cooley și John W. Tukey ("An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series," Math. Comput. 19, 297–301-1965) au creat un algoritm, adaptat calculatorului electronic, care mărește viteza de prelucrare a datelor astfel încât este necesar doar un număr de operații egal cu $N \log_2(N)$ operații, algoritm denumit Transformata Fourier Rapida (FFT - Fast Fourier Transformation), singura cerință a algoritmului fiind ca numărul de puncte eșantionate să fie putere a lui 2 (2,4,8,...1024,...)

Modul de funcționare a algoritmului FFT este data în figurile următoare (Fig. 1, Fig. 2):

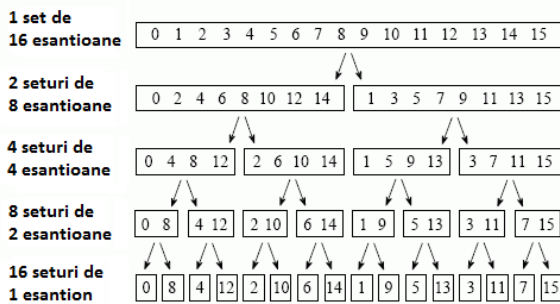


Fig. 1. Modul de descompunere a seturilor de puncte în cazul transformatei Fourier rapide. Un set de date de N eșantioane este descompus în N seturi de date de câte un eșantion. Fiecare etapă folosește o descompunere încrucișată prin care se separă componentele pare de cele impare.

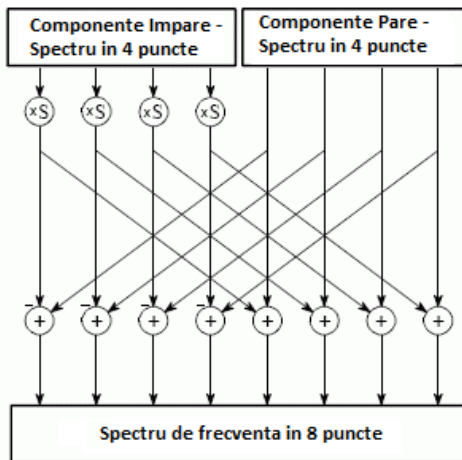


Fig. 2. Exemplu al modului de obținere a spectrului pentru un eșantion de 8 puncte.

Aceste metode arătate în figurile 1 și 2 ușurează realizarea de software performante prin implementarea de algoritmi care lucrează în paralel care mai departe pot exploata performanțele procesoarelor moderne prin folosirea simultană a tuturor nucleelor existente în procesor sau pentru putea folosi procesoarele existente în plăcile grafice (plăcile grafice pot conține până la 256 de procesoare care lucrează în paralel).

În cazul prelucrării seturilor de date rezultate în procesul de măsurare, variabila timp este înlocuită cu o variație a unui unghi sau a unei deplasări (de exemplu pentru piese de revoluție unitatea de timp este înlocuită cu o rotație). Pentru ușurința prezentării se păstrează termenul de frecvență, numai că este definit ca frecvență în lungul unei deplasări sau al unei rotații.

În esență prelucrările datelor utilizate în cazul măsurărilor dimensionale constau în achiziționarea datelor la distanțe egale și aplicarea asupra lor a transformatei Fourier. Pentru a putea aplica transformata Fourier rapidă (FFT - Fast Fourier Transformation) este necesar ca numărul de puncte de măsură achiziționate să fie puteri ale lui 2 (2, 4, 8, 16, 1024, 4096, etc.). În urma aplicării transformatei Fourier se obține spectrul de frecvențe.

O exemplificare a modului de compunere și descompunere a unei forme de undă oarecare este dată în Fig. 3, în care se observă că putem obține curba de bază ca sumă a sinusoidelor componente (frecvența, faza și amplitudinea sinusoidelor este obținută cu ajutorul Transformatei Fourier)

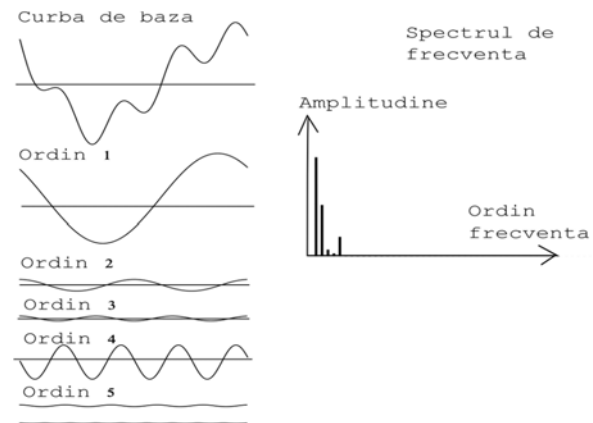


Fig. 3. Exemplu de descompunere și compunere a unei curbe reale folosind Transformata Fourier.

Pentru măsurarea unei piese de revoluție așezată excentric (Fig. 4), piesă care prezintă defecte de formă și defecte ale suprafeței, avem un spectru prezentat în Fig. 5.

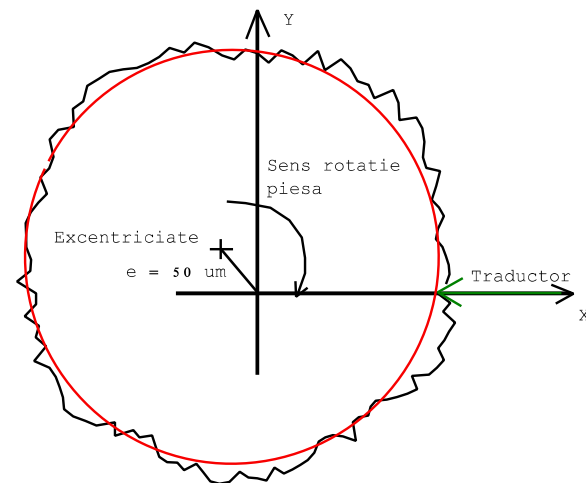


Fig. 4. Diagrama polară a măsurării unei piese de revoluție.

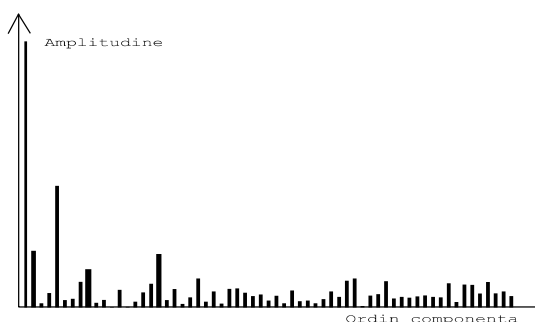


Fig. 5. Spectrul de frecvență obținut prin Transformata Fourier Rapidă.

În cazul unei piese de revoluție frecvențele reprezintă, de fapt, numărul de ondulații prezente la suprafața piesei; astfel componenta de ordinul 1 reprezintă excentricitatea, componenta de ordinul 2 reprezintă ovalitatea, șamd.

În cazul piesei prezentate în Fig. 4 prezentarea liniară a datelor culese de traductorul din figura arată astfel (Fig. 6):

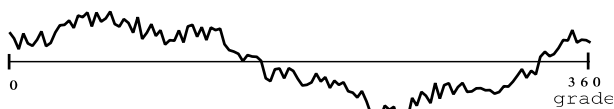


Fig. 6. Reprezentarea liniară a valorilor culese pe piesa de revoluție.

Pentru a obține excentricitatea piesei din spectrul de frecvență eliminăm toate componentele în afara componentei de ordinul 1 și apoi se aplică transformata Fourier inversă. Rezultatele acestei prelucrări sunt arătate în Fig. 7, iar valoarea găsită a excentricității este de 49.964 μm foarte apropiată de cea teoretică 50 μm.

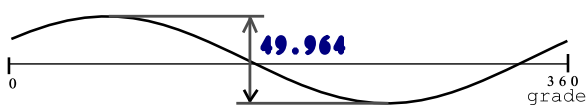


Fig. 7. Excentricitatea piesei obținută prin prelucrare armonică

Pentru a obține componentele de formă ale piesei (excentricitatea presupunem că este rezultată ca urmare a montării piesei, deci este o abatere de poziție reciprocă) se elimină componentele de ordin 0 (valoare continuă sau valoarea medie), ordinul 1 (excentricitatea) și ordinele cu valoare mai mare de valoarea 18 (această valoare limită se determină experimental și este foarte mult influențată de tipul de piesă și modul de prelucrare). Prin aplicarea transformatei Fourier inversă se obține diagrama abaterilor de formă ale piesei (Fig. 8). Pe acest set de date se obține maximum și minimum și abaterea maximă totală.



Fig. 8. Abaterea de formă a piesei prezentate în Fig. 4.

Pentru a obține informațiile de ordin superior, care reprezintă rugozitatea suprafeței se elimină toate componentele de ordin mai mic sau egal cu 18 și apoi se aplică

transformata Fourier inversă; se va obține diagrama stării suprafeței pe baza căreia se pot obține parametrii specifici rugozității (de exemplu) (Fig. 9)

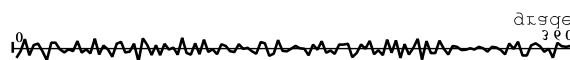


Fig. 9. Diagrama rugozității obținută în urma prelucrării prin analiză armonică

La INCDMTM - București s-a realizat o instalație de măsurat abateri de formă ale pieselor de revoluție, instalație la care s-au aplicat și metodele de prelucrare ce folosesc transformata Fourier prezentate mai sus.



Fig. 10. Instalație de măsurat abaterile de formă ale pieselor circulare care folosește și transformata Fourier pentru prelucrarea datelor.

Această instalație folosește un lagăr gazostatic pe care se montează un universal care la rândul lui prinde piesa. Deoarece piesa nu se poate prinde perfect centrat cu centrul de rotație se folosește transformata Fourier pentru a se elimina excentricitatea prinderii, după care datele culese sunt prelucrate prin metodele obișnuite (cele mai mici pătrate, maxim, minim, abaterea).

Aplicații ale transformatei Fourier la analiza geometrică a roților dințate. Pentru analiza angrenajelor, folosind metoda de testare prin angrenare pe ambele flancuri, și folosind prelucrarea prin analiza Fourier se pot obține rapid o serie de parametri ai roților dințate.

Schema acestei instalații este prezentată în figura 11.

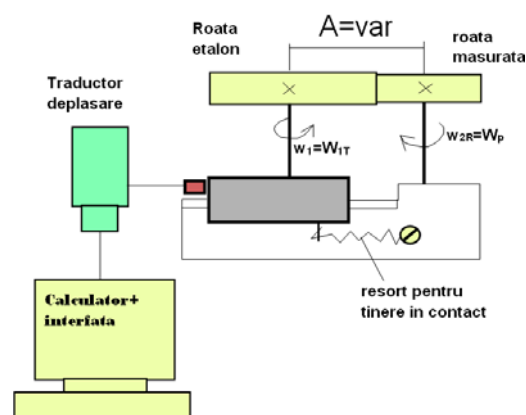


Fig. 11. Schema de verificare a roților dințate prin angrenare pe ambele flancuri.

METODE DE PRELUCRARE A DATELOR CULESE ÎN CADRUL MĂSURĂRII DIMENSIONALE

În urma culegerii datelor se obține o diagramă a datelor de forma:

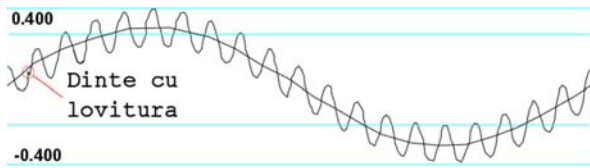


Fig. 12. Diagrama datelor culese la angrenarea cu dinte înfipt

Prin extragerea componentei de ordin 1 se obține variația de distanță între axe

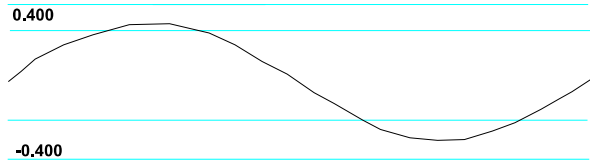


Fig. 13. Diagrama variație distanței dintre axe.

Prin extragerea componentelor din domeniul 2 - 50 se obține diagrama de angrenare a dinților, nealterată de variația distanței dintre axe (fig. 14).

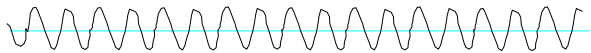


Fig. 14. Diagrama de angrenare pe ambele flancuri nealterată de către variația distanței dintre axe.

Pe această diagramă se pot executa prelucrări ulterioare din care se poate extrage abaterea de forma abaterii de pas, abaterea de la profilul dinților etc.

CONCLUZIE

Prelucrarea prin aplicarea transformatei Fourier la măsurările complexe, digitale, efectuate cu ajutorul mijloacelor computerizate este o metodă rapidă, fiabilă și precisă care permite creșterea productivității proceselor de măsurare și control, duce la creșterea preciziei de măsurare fără o creștere exagerată a preciziei de execuție mecanică și ajută la creșterea automatizării proceselor de măsurare.

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/astr534/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 Tehnică 1984 România
- [6] Duca Z. – *Teoria sculelor așchietoare*- Editura Tehnică 1982 România
- [7] Sauer ș.a. – *Angrenaje vol.1 și 2*- Editura Tehnică .

Despre autori

Drd. ing. **Dănuț STANCIU**

Universitatea „Valahia” din Târgoviște, Școala Doctorală Inginerie Mecanică, Târgoviște, 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.

Prof. D.H.C. EurIng. dr. ing. **Gheorghe Ion GHEORGHE**

Universitatea „Valahia” din Târgoviște, Școala Doctorală Inginerie Mecanică, Târgoviște, România

Este cercetător științific principal gradul I, având o experiență în cercetare și management de peste 47 de ani în domeniile Mecanică 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 D.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).

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 masinilor - 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