

MASURAREA FRF PENTRU ANALIZA MODALA EXPERIMENTALA FOLOSIND LABVIEW

Iulian LUPEA

Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca, i_lupea@yahoo.com

ABSTRACT

The paper presents a LABVIEW virtual instrument, which in association with the acquisition card and proper IEPE sensors, are able to perform a frequency response function and coherence function measurement. The impulsive structure excitation and the response measurements are carried out by using a PCB impact hammer and a PCB accelerometer. The presented application is a reliable instrument used to measure the FRF in the frame of the experimental modal analysis in order to find out resonances, deflection shapes and damping of products as well as to validate finite element models or to detect early failures in products.

1. INTRODUCERE

Analiza modala experimentală este adesea folosită pentru identificarea comportamentului dinamic, liniar al sistemelor mecanice prin măsurarea frecvențelor de rezonanță, a formelor proprii de vibrație și a amortizărilor modale. Marimile menționate sunt necesare la înțelegerea și prevenirea distrugerii unor componente ale sistemelor mecanice prin fisuri sau oboseală și de asemenea la validarea modelelor cu elemente finite.

Instrumentația virtuală este astăzi alături de aparatura dedicată în efortul de măsurare și control. Astfel produsul Labview dezvoltat de National Instruments Inc., oferă un mediu avansat de programare grafică, având o poziție privilegiată în dezvoltarea instrumentației virtuale. Componenta hardware asociată aplicației Labview este o placă performantă de achiziție, produsă de asemenea de National Instruments, având canale analogice de intrare cu frecvența de esanționare de peste 200 KHz și esanționare simultană pe canale.

În lucrare se prezintă un instrument virtual folosit la măsurarea funcției de răspuns în frecvență (FRF) și a validării acesteia prin funcția de coerență (COH). FRF se măsoară între două puncte, unul de excitație și celălalt de răspuns, aparținând ambele unei structuri mecanice supuse identificării prin metoda analizei modale experimentale.

2. FUNCTII APELATE PENTRU PRELUCRARE IN DOMENIUL FRECVENTA

Multimea funcțiilor predefinite și a celor disponibile în pachete de programe dedicate oferă o puternică bază de pornire în programarea de aplicații în domeniul analizei în frecvență a semnalelor. Următoarele funcții sau instrumente virtuale au fost folosite pentru realizarea achiziției de date în cadrul aplicației curente: AI Config.vi, AI Start.vi, AI Read.vi, AI Clear.vi. Funcțiunile de declanșare a achiziției de date au fost implementate folosind intrările dedicate ale instrumentelor virtuale AI Start.vi și AI Read.vi.

Funcțiile predefinite, de baza, utilizate la analiza în frecvență sunt Real FFT.vi, Power Spectrum.vi și Cross Power.vi din paleta Analyze/ Signal Processing/ Frequency Domain a mediului Labview.

Funcția Real FFT.vi primește de pe un canal de achiziție un tablou x de n esanțioane de valori reale (semnal considerat periodic) și returnează tabloul X de n coeficienți complecși ai transformatei Fourier rapide (n fiind o putere a lui 2) sau discrete bilaterale, calculați după relația (1) [3],[4].

$$X_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{-j2\pi k i/n}, \text{ pentru } k = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (1)$$

unde X_0 este componenta continuă a semnalului (numai parte reală), X_1 prima armonică (parte reală și imaginară), X_2 a doua armonică, ..., $X_{n/2-1}$ a $n/2-1$ armonică, $X_{n/2}$ armonică Nyquist de frecvență egală cu jumătate din frecvența de esanționare a semnalului real din domeniul timp (valoarea de simetrie), apoi simetric față de armonică Nyquist, componentele de frecvențe negative: $X_{n/2+1}$ a $n/2+1$ armonică, ..., X_{n-1} prima armonică. Spatierea între coeficienții sau liniile spectrale este:

$$\Delta f = f_1 = \frac{1}{T} = \frac{1}{n \cdot t} = \frac{f_{es}}{n} \quad (2)$$

unde f_{es} este frecvența [Hz] de esanționare, n numărul de valori pe perioada T și t este timpul între două valori măsurate sau perioada de esanționare.

Funcția Power Spectrum.vi prelucrează datele de pe un canal de achiziție conform

$$S_{xx} = \frac{1}{n^2} |F[x]|^2 \quad (3)$$

relației (3), unde x este tabloul celor n esanțioane ale semnalului considerat periodic, în domeniul timp, iar F exprimă transformata Fourier rapidă sau discretă. Este returnată puterea spectrală bilaterală (n valori) conținând atât frecvențele pozitive cât și cele negative.

Instrumentul Cross Power.vi calculează puterea interspectrală bilaterală complexă S_{xy} , dintre două semnale date prin valori reale discrete, plasate în cei doi vectori de intrare x și y , fiecare de câte n valori reale. Relația de calcul a puterii interspectrale bilaterale este:

$$S_{xy} = \frac{1}{n^2} F^*[x] F[y] \quad (4)$$

unde F exprimă transformata Fourier rapidă FFT sau discretă DFT.

Deoarece semnalul nu este periodic, pentru a se putea aplica transformata Fourier, se înmulteste, în domeniul timp, fiecare bloc de date cu ferestre de ponderare. Ferestrele de ponderare aplicate semnalelor, urmărind de asemenea reducerea zgomotului în vederea măsurării funcției de răspuns în frecvență prin excitație impulsivă, sunt fereastra de tip forță și fereastra exponențială.

Măsurătorile repetate și medierea lor sunt implementate în aplicație fiind necesare pentru diminuarea zgomotului. Este posibilă mediere RMS, mediere vectorială și lipsa medierii. Medierea RMS atenuează fluctuațiile zgomotului dar nu coboară nivelul de zgomot al semnalului în timp ce medierea vectorială acționează învers, reducând nivelul de zgomot fără a scădea fluctuațiile semnalului. Cele trei variante posibile sunt implementate prin instrucțiunea de control Case. La alegerea medierii se va specifica numărul de repetiții dorite. Numărul medierilor realizate la un moment dat se găsește afișat în panoul frontal.

3. FUNCTIA DE RASPUNS ÎN FRECVENTA SI FUNCTIA DE COERENTA

Masurarile spectrale pe doua canale de achizitie, specifice analizoarelor dinamice spectrale bicanal, urmaresc în special prelucrarea simultana a celor doua semnale. Astfel pe baza FFT mediate, a puterilor autospectrale si interspectrale se calculeaza functia de raspuns în frecventa (FRF) între doua puncte ale unui sistem si functia de coerenta (COH) asociata.

Amplitudinea FRF pentru fiecare frecventa, semnifica amplificarea (raportul de amplitudini) realizata de catre si prin sistem, între punctul de masura si punctul de excitatie. Faza FRF pentru fiecare frecventa este diferenta dintre faza semnalelor de raspuns (y) si de excitatie (x) a sistemului pentru aceeasi frecventa [2],[3].

Funcția de raspuns în frecventa notata de asemenea H(f) este complexa, bilaterala în formatul initial si se defineste prin relatia:

$$H(f) = \frac{FFT(x)}{FFT(y)} = \frac{X}{Y} \quad (5)$$

Pentru a elimina riscul împartirii cu zero relatia precedenta se înlocuieste cu una alternativa. Prin înmultire la numarator si numitor cu conjugata complexa a transformatei Fourier a excitatiei, se obtine relatia practica de calcul a functiei de raspuns în frecventa:

$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} = \frac{\text{Cross Power Spectrum}(x, y)}{\text{Power Spectrum}(x)} \quad (6)$$

unde x este semnalul de excitatie iar y este semnalul de raspuns. S-a indicat medierea RMS prin paranteze unghiulare. Pentru mediere vectoriala se mediaza independent $\langle x \rangle$ si $\langle y \rangle$.

În general se doreste cunoasterea amplitudinii si fazei pentru fiecare linie spectrala. Pentru aceasta dupa mediere se extrage modulul si faza pe fiecare componenta spectrala, pastrându-se numai componentele de frecvente pozitive.

Aplicatia dezvoltata în Labview, masoara de asemenea functia de coerenta COH (adimensionala). Aceasta poate fi privita ca un indicator de calitate a functiei de raspuns în frecventa, luând valori cuprinse între 0 si 1. Coerenta mediata, se calculeaza dupa relatia (7):

$$COH(f) = \frac{|X^* Y|^2}{|X^* X| |Y^* Y|} = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f) S_{yy}(f)} \quad (7)$$

COH pune în evidenta eventualele neliniaritati ale sistemului. La extrem daca pentru o anumita linie de frecventa coerenta este 1, raspunsul sistemului este cauzat numai de semnalul de intrare, iar daca coerenta are valoarea 0, iesirea masurata nu are legatura cu excitatia sistemului. In sistemele cu intrari multiple coerenta furnizeaza contributia fiecărei intrari la iesirea masurata a sistemului.

4. DESCRIEREA SI EXPLOATAREA PANOULUI FRONTAL AL APLICATIEI

Operatorul va specifica în panoul frontal al aplicatiei (Fig.1), numarul de identificare a dispozitivului (placa de achizitie montata în calculator) care realizeaza achizitia, canalele folosite (de preferinta canale virtuale predefinite cu componenta soft Measurement & Automation Explorer - MAX), canalul de declansare a achizitiei (în cazul tratat canalul de masurare a fortei de impact), rata de esantionare si numarul de esantioane de achizitionat într-un bloc .

Pornirea achizitiei unui numar specificat de esantioane, simultan pe ambele canale ale analizorului spectral virtual, se realizeaza prin declansare analog hardware. Dupa preluare de la placa de achizitie, datele sunt pastrate într-o zona de memorie tampon de unde sunt transferate pe blocuri în vederea procesarii.

Achizitia de date poate începe la momentul în care conditiile de declansare sunt îndeplinite. De asemenea se poate considera o achizitie continua de date, acestea fiind partial neglijate pâna în momentul la care semnalul îndeplineste anumite conditii (nivel de tensiune si

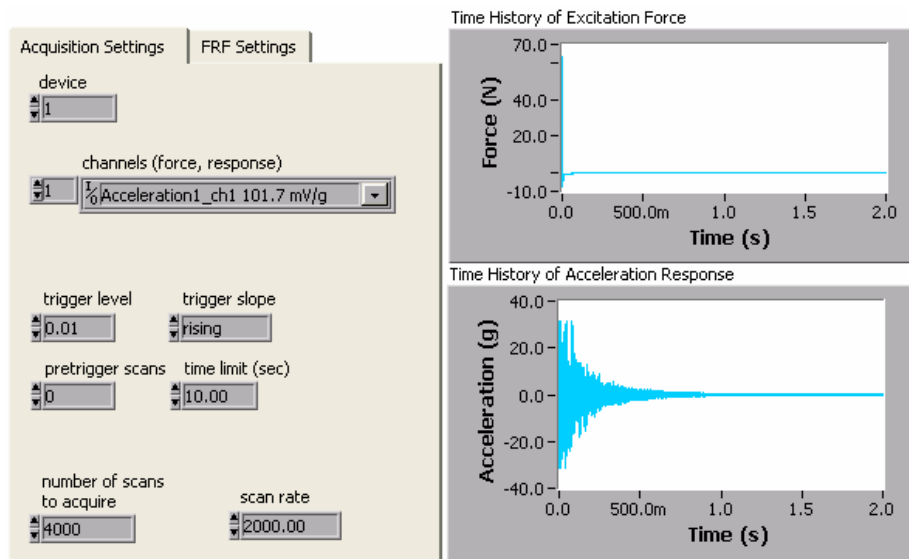


Figura 1

panta). În aceasta situatie se supun analizei si un numar de esantioane ce preced momentul declansarii (pretrigger scans). În graficul semnalului de forta în functie de timp (Fig. 1) pozitia unui cursor vertical indica momentul declansarii. Conditii de declansare sunt specificate prin controalele paletii Acquisition Settings.

Un bloc de date achizitionat, în urma observarii celor doua ferestre în domeniul timp, poate fi anulat daca se considera ca nu s-au îndeplinit conditii optime de excitatie sau masurare.

În panoul frontal al aplicatiei este vizualizat de asemenea modulul [g/N] si faza FRF (Fig. 2). În cazul structurilor slab amortizate, în general modurile de vibratie sunt considerate decuplate, facând astfel posibila identificarea independenta a fiecarui mod de vibratie.

Se evalueaza în prima faza frecventele de rezonanta si rapoartele de amortizare pentru fiecare mod de vibratie, pe baza FRF masurate. În faza a doua se masoara formele proprii de vibratie, folosind marimile de la prima etapa, amplitudinile la rezonanta si fazele la rezonanta. Pentru un sistem real (masa continua) primele n forme proprii se pot determina pe baza a n functii de raspuns în frecventa FRF masurate cu analizorul spectral bicanal virtual.

Frecventele de rezonanta ω_r , $r=1, \dots, n$, sunt aproximativ abscisele vârfulor de amplitudine ale functiilor de raspuns în frecventa. Pentru aflarea vârfului de amplitudine este necesara o interpolare prin punctele FRF din zona vârfului.

Raportul de amortizare ζ_r , $r=1, \dots, n$, poate fi estimat prin metoda vârfului de rezonanta [3].

$$\Delta f_r = \frac{\Delta f}{2\Delta f_r} \quad (8)$$

unde Δf_r este latimea de banda dintre punctele de semiputere. Se folosesc trei cursori (Fig. 2) pentru identificarea frecventelor de semiputere.

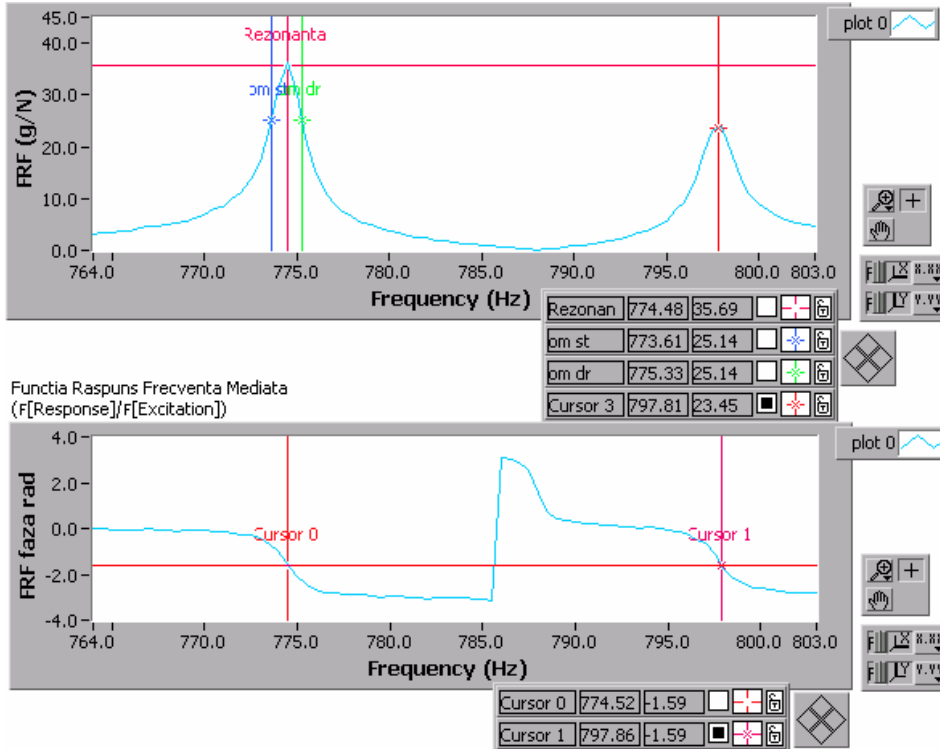


Figura 2

Precizia de calcul a raportului de amortizare depinde de rezoluția în frecvență a FRF în jurul vârfului de rezonanță. O rezoluție mare asigură o bună estimare a vârfului de amplitudine. O rezoluție mică în frecvență, în jurul rezonanței în general micșorează valoarea FRF la rezonanță. Uneori este necesară o nouă măsurare folosind zoom în jurul fiecărei frecvențe de rezonanță.

Dacă modulul FRF este în scara liniară, frecvențele de semiputere au ordonată la $1/\sqrt{2} \approx 0.707$ din amplitudinea vârfului de rezonanță iar dacă reprezentarea este în scara logaritmică frecvențele de semiputere au ordonată diminuată cu 3 dB față de vârful de rezonanță.

Fereastra de pondere exponențială, folosită pe canalul de răspuns la stimul prin impact, înmulțește semnalul în timp, crescând artificial amortizarea în sistem. Prin urmare se introduc corecții calculate cu relația (9) [5]:

$$\Delta f_{r\text{cor}} = \Delta f_r \Delta f_{fer} \Delta f_r \frac{1}{\Delta f_r \Delta f_{fer}} \quad (9)$$

unde Δf_{fer} este amortizarea cauzată de fereastra de pondere exponențială, Δf_{fer} este lungimea sau constanta de timp a ferestrei exponențiale iar Δf_r pulsația naturală a modului r.

Pentru deducerea primelor n forme de vibrație ω_{mr} $r=1, \dots, n$ se aleg corespunzător n puncte de excitație / măsurare pe suprafața structurii [2],[3]. Se obțin experimental n funcții de răspuns în frecvență măsurate fiecare între două puncte ale structurii, i de măsurare și k de stimul. În paralel se cunoaște [3] forma analitică a FRF, fiind o componentă a matricei FRF, măsurată între două puncte ale structurii:

$$H_{ik}(\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{[\omega_{mr} \omega_{mr}^T]_{ik}}{\omega_r^2 + j2\omega_r \omega - \omega_r^2} \quad (10)$$

unde $j = \sqrt{-1}$. Semnul de însumare indică participarea celor n moduri de vibrație la răspuns. În relația (10) se cunosc marimile ω_r $r=1, \dots, n$, ω_r $r=1, \dots, n$, și funcția de răspuns în frecvență măsurată. Necunoscutele sunt componentele vectorilor ω_{mr} .

Se evaluează FRF pentru frecvența de rezonanță ω_r considerând ca răspunsul se datorează numai unui mod de vibrație pentru cazul cuplării slabe între moduri și se extrage din relația elementul ik (reziduu) al matricei necunoscute $[\omega_r \omega_r^T]$:

$$|[\omega_r \omega_r^T]_{ik}| = |H_{ik}(\omega_r)| / |2j\omega_r| \quad (11)$$

Pe baza fazei FRF și a raționamentului detaliat în sursele [1] și [3] se deduc vectorii modali.

5. CONCLUZII

Instrumentul virtual dezvoltat în mediul de programare Labview împreună cu senzorii, modulul de condiționare a semnalelor și placa de achiziție dedicată poate fi folosit la măsurarea funcțiilor de răspuns în frecvență a sistemelor cu masă continuă. FRF măsurate vor servi la identificarea rapidă a parametrilor modali ai sistemelor cu moduri ușor cuplate. În cazul sistemelor cu moduri cuplate, FRF măsurate sunt de asemenea esențiale pentru identificare, cu observația că se va face apel la programe comerciale complexe de identificare a parametrilor modali.

6. BIBLIOGRAFIE

1. Bishop, R., Learning with Labview 6i, Prentice Hall, 2001.
 2. Heylen, W., Lammens, S., Sas, P., Modal Analysis Theory and Testing, K.U. Leuven, 1995.
 3. Lupea, I., Roboti și vibrații, Editura Dacia, 1996.
 4. Lupea, I., Lupea, M., Limbajul C, teorie și aplicații, Ed. Casa Cartii de Știință, Cluj-N. 1998.
 5. B&K Technical Revue, 1994.
- ** LabVIEW for Windows, User Manual, National Instruments.
 ** LabVIEW for Windows, Measurements Manual, National Instruments.
 ** LabVIEW Analysis VI Reference Manual, National Instruments.