

Aplicația II.5

INSTRUMENTE VIRTUALE PENTRU PRELUCRAREA ȘI ANALIZA ÎN FRECVENȚĂ A SEMNALELOR

5.1. Considerații generale privind prelucrarea și analiza semnalelor

Semnalele provenind de la diverse tipuri de senzori și traductoare, sau uneori chiar de la sisteme de comunicații telefonice, radio, video, sub forma lor brută nu pot reprezenta corect informația utilă și necesită operații de prelucrare și analiză. Prin intermediul acestor operații se urmărește să se îndepărteze efectele factorilor perturbatori, să se efectueze corecții ale unor performanțe limitate ale echipamentelor de achiziție și transmisie, precum și să se realizeze unele transformări care să asigure obținerea de informații sub o formă accesibilă pentru interpretarea adecvată unui anumit tip de analiză de semnal.

Semnalele pot fi analogice, reprezentând corespunzător mărimi cu variații continue sau numerice, în care caz reprezintă valori discrete ale mărimilor respective. Prelucrarea semnalelor numerice cu ajutorul tehnicii digitale de calcul prezintă numeroase avantaje, astfel încât semnalele analogice sunt convertite sub formă numerică (folosind convertoare analog-numeric). Pentru conversia numerică, din semnalele analogice se preiau eșantioane la intervale discrete de timp. Eșantionarea semnalelor analogice, ca și conversia analog-numerică, constituie operații esențiale de prelucrare a semnalelor, care împreună alcătuiesc ceea ce se numește achiziția datelor și care trebuie să satisfacă anumite cerințe pentru a nu se pierde din informația utilă.

Analiza semnalelor operează cu valori numerice, respectiv cu datele rezultate din prelucrările menționate mai sus, și constă din efectuarea de operații matematice menite să permită deducerea unor descriptori prin care să se poată caracteriza, clasifica și compara în mod eficient semnalele analizate.

Semnalele, indiferent de forma lor de reprezentare, descriu evoluția în timp a unor fenomene. Ca urmare, unele operații de analiză se bazează pe prelucrări mai simple sau mai complexe ale valorilor semnalelor din domeniul timp, cum sunt: media aritmetică, extragerea radicalului din media pătratică, auto și intercorelația, dispersia etc. Unele dintre acestea au fost tratate în lucrările anterioare și nu vor fi reluate în prezenta lucrare.

Pornind de la teoria emisă de Fourier că orice semnal din domeniul timpului poate fi reprezentat printr-o sumă ponderată de unde sinusoidale și cosinusoidale cu frecvențe crescătoare corespunzător multiplicării cu numerele naturale, s-a dezvoltat metoda de analiză a semnalelor din domeniul frecvențelor, denumită pe scurt analiza în frecvență. Datorită unor avantaje importante față de analiza din domeniul timp, în

ceea ce privește descrierea și caracterizarea semnalelor, analiza în frecvență a căpătat o largă utilizare și, ca urmare, a fost luată în considerare și de creatorii limbajului de programare **LabVIEW**.

Mediul de programare grafică **LabVIEW** oferă posibilități multiple pentru crearea de **VI**-uri apte de a efectua analiza în frecvență, atât a semnalelor achiziționate din lumea reală, cât și a celor simulate. Aceste **VI**-uri permit efectuarea operațiilor de trecere din domeniul timpului în domeniul frecvențelor prin intermediul transformării Fourier și aplicarea de proceduri de analiză bazate pe determinarea spectrului de frecvențe, măsurarea amplitudinii și fazei, precum și - eventual - a puterii pe fiecare frecvență, evidențierea distorsiunilor față de unele semnale de referință, caracterizarea răspunsului în frecvență pentru unele componente și sisteme care transmit sau prelucrează semnale etc.

VI-urile care pot fi create pentru analiza în frecvență se bazează, în esență, pe efectuarea operației denumite **Transformarea Fourier Rapidă**, notată prescurtat **FFT**, de la denumirea în limba engleză **Fast Fourier Transform**. În pachetul de bază, **LabVIEW** dispune de o serie de module pentru **FFT** sub diverse forme: transformări directe sau inverse, reale sau complexe. De asemenea, plecând de la această funcție de bază, sunt prevăzute și alte module, cu ajutorul cărora, fără eforturi majore de programare, se pot realiza și alte funcții necesare pentru aplicarea și a celorlalte proceduri specifice analizei în frecvență, menționate anterior.

Scopul principal al acestei lucrări este de a prezenta cele mai importante module specializate pentru acest domeniu pe care le conține **LabVIEW**, precum și modalitățile prin care ele pot fi utilizate la crearea de **VI**-uri pentru prelucrarea și analiza semnalelor. Pentru a evidenția modul de operare și performanțele care se pot obține, se vor utiliza semnale simulate cu **VI**-urile tratate în **aplicația II.4**.

5.2. Bazele Transformării Fourier Rapidă (FFT)

FFT este o variantă rapidă de obținere a **Transformării Fourier Discretă (DFT)**, care transformă semnale digitizate din domeniul timpului în corespondente ale acestora din domeniul frecvenței. Relația care definește **DFT** este următoarea:

$$X_k = \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j2\pi ik/N} = \sum_{i=0}^{N-1} x_i \left[\cos\left(\frac{2\pi ik}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi ik}{N}\right) \right] \quad (5.1)$$

unde:

x_i sunt eșantioane ale semnalului $x(t)$ cu perioada de eșantionare $\Delta t = \frac{1}{f_s}$,

pentru $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$, f_s fiind frecvența de eșantionare;

X_k sunt rezultatele transformării în domeniul frecvenței, discretizate cu

intervalul $\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{N\Delta t}$, denumit și rezoluția în frecvență.

Numărul de valori X_k din domeniul frecvenței este același cu numărul N de eșantioane x_i din domeniul timpului.

După cum se vede din (5.1) transformatele X_k sunt numere complexe, care pot fi reprezentate prin partea reală și cea imaginară, sau prin modul și fază. Deși X_k este, de regulă, un număr complex, în anumite cazuri partea imaginară poate fi zero, de exemplu pentru $k=0$ (componenta continuă). Pentru semnale reale $x(t)$ există proprietăți de simetrie atât pentru modulul cât și pentru faza transformatelor, adică pentru orice k

$$|X[k]| = |X[N-k]| \quad (5.2)$$

și

$$\text{faza}(X[k]) = -\text{faza}(X[N-k]) \quad (5.3)$$

După cum în domeniul timpului eșantioanele sunt separate prin intervale de timp proporționale cu perioada de eșantionare Δt , deci x_i se află la $i\Delta t$ de x_0 , în mod asemănător transformatele X_k sunt distanțate la intervale proporționale cu rezoluția în frecvență Δf , respectiv X_k se află la $k\Delta f$ de X_0 .

Ținând cont de reprezentarea complexă a componentelor X_k și de relațiile (5.2) și (5.3) se pot deduce următoarele:

- pentru un număr par de termeni $N=2p$, termenul central al șirului este cel de rang p având frecvența $p \cdot \Delta f$ denumită frecvența Nyquist $f_{N/2}$. Primii termeni în ordine crescătoare $0 \leq i \leq \frac{N}{2} - 1$ corespund frecvențelor pozitive $i \cdot \Delta f$ inferioare frecvenței Nyquist, iar cei de ranguri superioare frecvenței Nyquist, $\frac{N}{2} + 1 \leq i \leq N$, reprezintă frecvențe negative;

- în cazul unui număr impar de termeni, $N=2p-1$, nu există frecvența Nyquist și termenii de rang $0 \leq i \leq \frac{N-1}{2}$ corespund frecvențelor pozitive, iar cei de rang $\frac{N+1}{2} \leq i \leq N$ celor negative.

Datorită apariției atât a componentelor cu frecvențe pozitive cât și a celor cu frecvențe negative, dispuse simetric, transformarea se numește **DFT bilaterală**.

Calculul **DFT** din N eșantioane necesită aproximativ N^2 operații complexe, ceea ce implică un consum de timp mare. Dacă însă numărul de eșantioane este o putere a lui 2, adică

$$N = 2^m, \quad \text{cu } m = 1, 2, 3, \dots \quad (5.4)$$

atunci calculul **DFT** se poate efectua mult mai rapid, cu numai $N \log_2(N)$ operații, ceea ce a condus la denumirea de **FFT**. Deci **FFT** nu este altceva decât o procedură pentru calculul mai rapid al **DFT** și care, se poate demonstra, necesită o memorie mai redusă. O metodă de a face ca secvența de eșantioane să fie un număr par este aceea de a adăuga zerouri, după cele N eșantioane efectiv achiziționate, până la puterea lui 2 corespunzătoare numărului imediat superior. Este de menționat că adăugarea de zerouri nu afectează valorile spectrului și, în plus, face să crească rezoluția în frecvență.

Un parametru important, care poate influența considerabil corectitudinea **FFT**, este frecvența de eșantionare f_s . O frecvență de eșantionare mai mare permite achiziționarea, în același interval de timp, a unui număr mai mare de eșantioane, deci o reprezentare numerică mai bună a semnalului analogic. Pe de altă parte, o eșantionare cu o frecvență redusă are ca efect faptul că semnalul apare ca având alt conținut de frecvențe decât cel real, fenomen cunoscut sub denumirea din limba engleză *aliasing* și care se poate traduce ca reprezentare falsă. Pentru a evita acest fenomen trebuie respectată teorema lui Shannon potrivit căreia $f_s \geq 2f_{\max}$, unde prin f_{\max} s-a notat frecvența maximă din spectrul semnalului achiziționat. Pentru o frecvență de eșantionare dată, componenta cu frecvența maximă care poate fi redată corect este aceea având frecvența Nyquist. Componentele cu frecvențe mai mari decât f_N generează frecvențe *alias* (false) situate în intervalul $0 \dots f_N$. În practică, pentru siguranță că nu apar frecvențe *alias*, trebuie să se aleagă $f_s \geq 10f_{\max}$ pentru o frecvență maximă estimată, sau f_{\max} să fie limitată prin filtrare (filtre anti-aliasing).

5.3. Instrument virtual pentru calculul FFT

5.3.1. Calculul FFT bilaterală

Crearea unui **VI**, care să realizeze calculul **FFT** și să permită obținerea spectrului de frecvență al unui semnal digitizat din domeniul timpului, conform relației (5.1), este facilitată în **LabVIEW** de posibilitatea de a utiliza o serie de module speciale pentru diverse tipuri de asemenea transformări funcționale. Astfel, din paleta **Functions** se poate selecta subpaleta **Analysis** și, executând click în continuare pe iconul **Digital Signal Processing**, se va afișa tabelul cu diverse astfel de module, redat în fig.5.1. Pe prima linie din acest tabel se află modulele corespunzătoare **FFT** directă și inversă pentru semnale reale și complexe. Al treilea icon, de la stânga la dreapta, este cel care efectuează transformarea directă pentru semnale reale și va fi utilizat în structura **VI**-ului.

Pentru a ilustra mai ușor funcționarea **VI**-ului pentru calculul **FFT**, se va considera, mai întâi cazul unui semnal sinusoidal digitizat. În scopul afișării simultane, atât a secvenței în domeniul timpului, cât și a spectrului de frecvență corespunzător (numai modulul), se impune ca în panoul frontal să se situeze două dispozitive de afișare **Waveform Graph**, iar pentru a putea varia parametrii care caracterizează

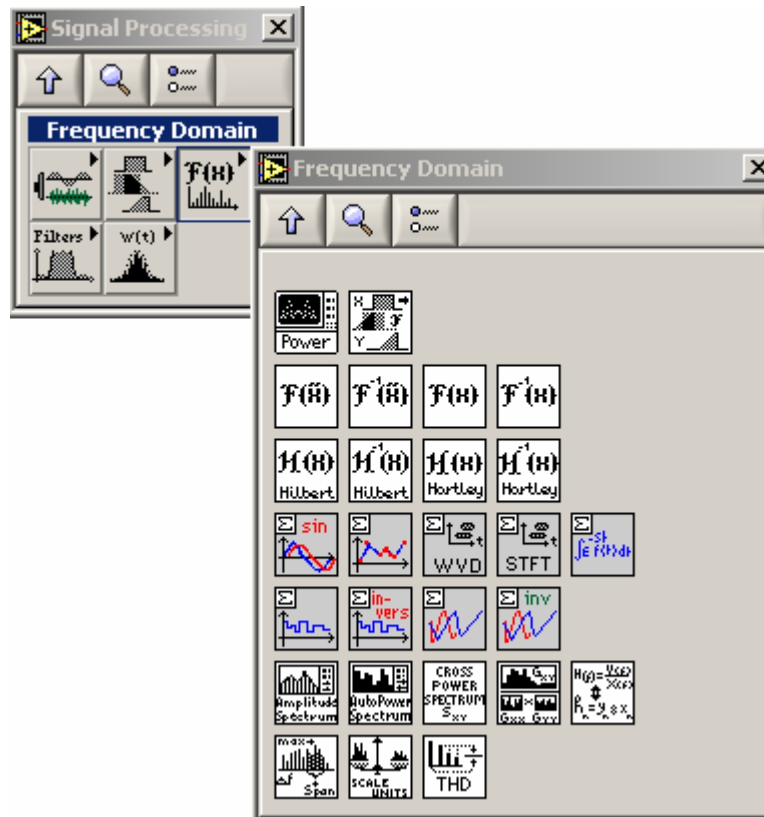





Fig.5.1. Module pentru prelucrarea digitală a semnalelor din paleta **Functions**

semnalul este necesar să se prevadă controalele: frecvența semnalului, frecvența de eșantionare, numărul de eșantioane și amplitudinea. Panoul frontal, care include componentele menționate, este reprezentat în fig.5.2.

Diagrama bloc a VI-ului, concepută în concordanță cu premisele privind destinația VI-ului, este redată în fig.5.3.

Din examinarea fig.5.3 se pot observa terminalele corespunzătoare controalelor și indicatoarelor din panoul frontal, la care au fost adăugate o serie de blocuri pentru generarea, prelucrarea datelor și gruparea acestora potrivit scopului propus și ale căror semnificații sunt explicate mai jos:

-  - modulul specializat pentru calculul **FFT** directă, pentru semnale reale, și care se “trage” în diagramă din subpaleta **Frequency Domain** redată în fig.5.1;
-  - modulul pentru generarea semnalului sinusoidal **Sine Wave**, care se extrage din paleta **Functions** >> **Analyze** >> **Signal Generation**;
-  - modulul **Complex to Polar**, care calculează amplitudinea și faza componentelor complexe X_k din părțile reală și imaginară; se găsește în **Functions** >> **Numeric** >> **Complex**.

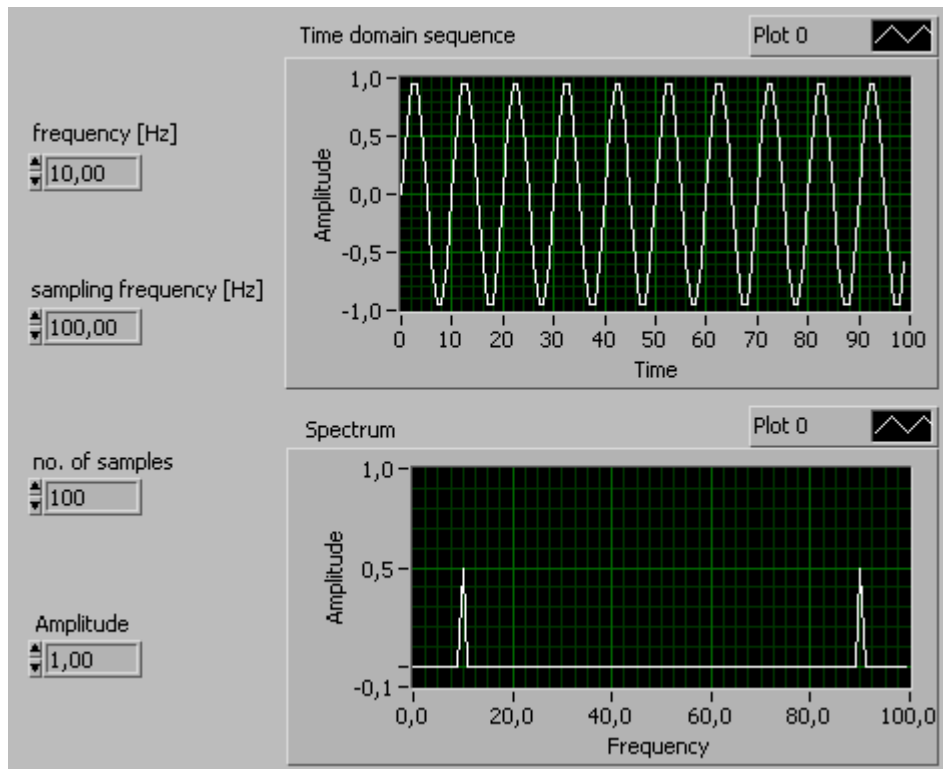


Fig. 5.2 Panoul frontal al VI-ului pentru FFT bilaterală

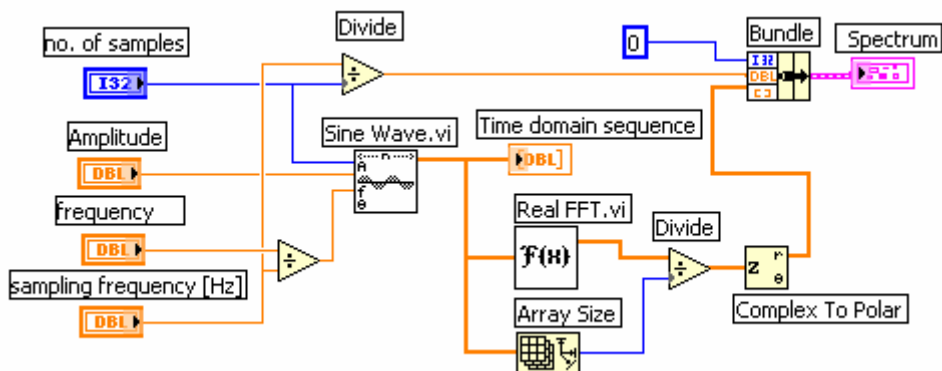


Fig.5.3. Diagrama bloc a VI-ului pentru FFT bilaterală

Intervalul de frecvență $\Delta f = \frac{f_s}{N}$ între diversele componente X_k , necesar

pentru gradarea axei absciselor graficului spectral, se stabilește folosind un bloc divizor, care împarte frecvența de eșantionare la numărul de eșantioane.

Pentru a stabili o legătură între frecvența semnalului generat și frecvența de eșantionare, la intrarea de frecvență a modulului FFT se aplică o valoare

“normalizată” $f^* = \frac{f}{f_s}$, unde f și f^* au valorile specificate prin controalele de pe panou. În acest scop este prevăzut un al doilea divizor, care face raportul celor două frecvențe.

Cel de-al treilea divizor servește pentru scalarea ieșirilor de la modulul FFT prin împărțire la numărul de eșantioane furnizat de blocul **Array Size**.

În vederea afișării grafice a amplitudinilor componentelor spectrului de frecvențe al semnalului analizat pe **Waveform Graph**, în diagramă s-a prevăzut un bloc de tip **Cluster**, care are pentru abscise valorile din domeniul discretizat de frecvență $k \cdot \Delta f$, iar pentru ordonate amplitudinile componentelor X_k obținute la ieșirea blocului **Complex to Polar**.

Rulând programul aplicației, se va observa existența atât a componentei de frecvență pozitivă (frecvența semnalului sinusoidal), cât și a componentei de frecvență “negativă” în sensul celor arătate în secțiunea 5.2, ceea ce denotă **FFT bilaterală**.

5.3.2. Calculul FFT unilaterială

FFT unilaterială are ca scop reținerea numai a componentelor corespunzătoare frecvențelor pozitive inferioare frecvenței Nyquist. Pentru cazul anterior, în care s-a

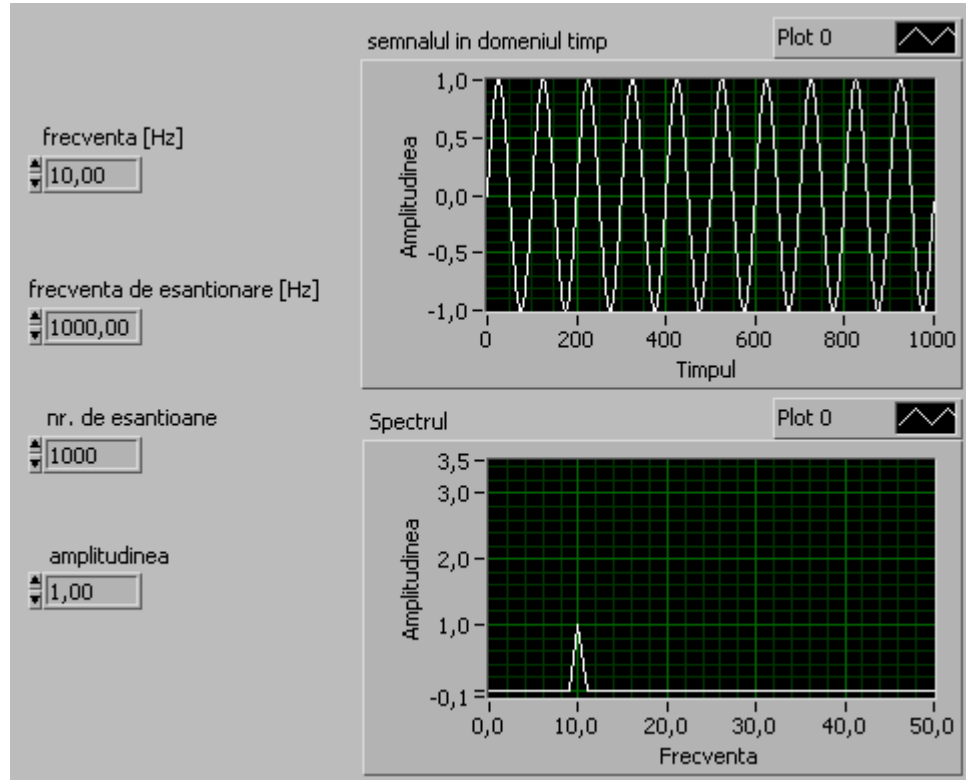


Fig.5.4. Panoul frontal pentru calculul FFT unilaterială

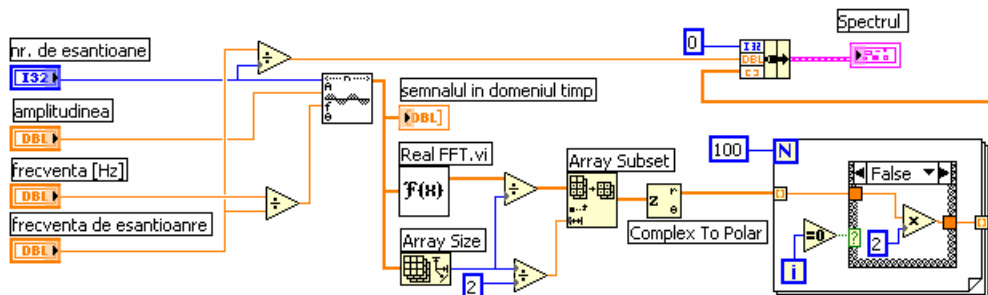


Fig.5.5. Diagrama bloc pentru calculul FFT unilaterală

considerat un semnal sinusoidal cu $f = 10$ Hz, $f_s = 100$ Hz și $N = 100$, spectrul va conține numai componenta poziționată la 10 Hz.

Pentru crearea VI-ului care să realizeze FFT unilaterală, întrucât se mențin aceleași controale și indicatoare, panoul frontal rămâne identic cu cel pentru FFT bilaterală din fig.5.2, ceea ce se schimbă va fi imaginea spectrului conform reprezentării din fig.5.4.

Diagrama bloc se va modifica astfel încât să se permită efectuarea transformării unilaterale și va fi conform celei din fig.5.5. În acest sens a fost introdus un divizor cu 2, la ieșirea blocului **Array Size**, menit să reducă domeniul de frecvențe la jumătatea corespunzătoare frecvențelor pozitive, adică până la frecvența Nyquist. Apoi a fost adăugat blocul **Array Subset** care, primind la intrarea **Length** numai prima jumătate a setului de frecvențe (cele pozitive), va transmite numai componente corespunzătoare primite de la blocul **FFT**. Deoarece divizorul de la ieșirea blocului **FFT** împarte cu N (se raportează la întreg setul de eșantioane), pentru obținerea valorii corecte a componentelor aferente frecvențelor pozitive este necesară multiplicarea cu 2. Pentru aceasta s-a prevăzut structura **Case**, care conține multiplicatorul cu 2. Această structură este introdusă într-o buclă **For**, care execută un număr de operații egal cu numărul de eșantioane N . Este de observat și prezența unui **Comparator cu 0** care, pentru indexul $i = 0$, corespunzător componentei continue, stopează multiplicarea cu 2. Comparând graficul spectrului din fig.5.5 cu cel din fig.5.3 se poate înțelege ușor justificarea denumirilor celor două tipuri de transformări.

Pentru comparație se vor efectua rulări cu valori ale frecvenței similare celor menționate la transformarea bilaterală.

5.4. Utilizarea ferestrelor de timp pentru netezire

În exemplificările precedente FFT s-a aplicat asupra unui eșantion de semnal constând dintr-un număr întreg de perioade, ceea ce, datorită repetiției, este echivalent cu a considera o înregistrare de durată infinită. În practică nu se pot obține decât achiziții de durată finită, care uneori pot trunchia o anumită formă de undă (de exemplu mai puțin de o perioadă sau un număr întreg de perioade) și, ca urmare, să rezulte caracteristici spectrale diferite față de semnalul original. Pentru a evita acest fenomen, denumit și “alterare spectrală”, se folosesc așa numitele **ferestre de timp**

pentru netezire care, având efecte asemănătoare unui filtru de bandă cu caracteristici predefinite, minimizează discontinuitățile provenite din trunchiere. Mai clar, această problemă se înțelege observând fig.5.6.

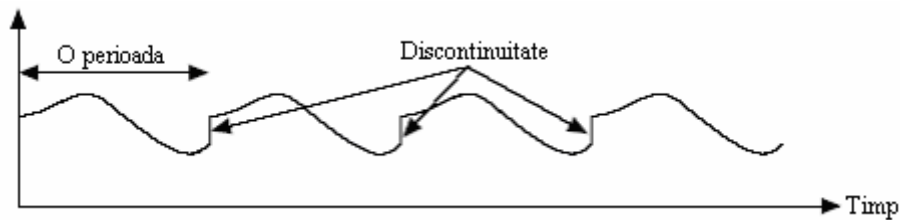


Fig.5.6. Prelungirea unui semnal trunchiat

În aplicarea FFT se admite, în mod implicit, că semnalul achiziționat reprezintă o perioadă a unei forme de undă care se repetă, așa cum sugerează fig.5.6. La joncțiunea dintre două perioade se remarcă discontinuități, variații bruște, care conduc la apariția unor componente de frecvențe înalte în spectru, mult mai mari decât frecvența semnalului continuu (frecvențe *alias*). Aceste discontinuități stau la baza fenomenului de alterare sau migrare spectrală (în engleză *spectral leakage*). Pentru a reduce acest fenomen se utilizează ferestrele temporale care micșorează amplitudinea discontinuităților. Aplicarea unei ferestre temporale asupra semnalului este de natura multiplicării acestuia cu funcția fereastră în domeniul timpului. Efectul de netezire se datorează faptului că amplitudinea ferestrei (pentru anumite tipuri) tinde către zero la capetele intervalului de definiție. Deoarece multiplicarea în domeniul timp este echivalentă cu convoluția în domeniul frecvență, spectrul rezultat se obține din convoluția spectrului semnalului cu spectrul ferestrei.

Principalele tipuri de ferestre temporale sunt: rectangulară, Hanning, Hamming, Kaiser-Bessel, triunghiulară, exponențială. Pentru aplicații FFT de analiză spectrală a unor eșantioane trunchiate, provenind din semnale continue, cele mai frecvent utilizate sunt ferestrele Hanning și Hamming descrise de următoarele ecuații:

$$\text{Fereastra Hanning: } w(n) = 0,5 - 0,5 \cos(2\pi n / N) \quad ; \text{ cu } n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

$$\text{Fereastra Hamming: } w(n) = 0,54 - 0,46 \cos(2\pi n / N) \quad ; \text{ cu } n = 0, 1, 2, \dots, N-1.$$

În biblioteca de programe **Analysis** din **LabVIEW** există **VI**-uri care implementează diferite tipuri de ferestre temporale (a se vedea în **Functions >> Analysis >> Windows**).

Pentru a evidenția utilitatea aplicării ferestrelor temporale s-a creat **VI**-ul având panoul frontal redat în fig. 5.7 și diagrama bloc din fig.5.8.

În panoul frontal sunt dispuse două display-uri de tip **Waveform Graph** pentru afișarea semnalului original și a celui rezultat după aplicarea ferestrei, și alte două display-uri de același tip, unul pentru spectrul semnalului original și celălalt pentru spectrul semnalului obținut la ieșirea ferestrei. S-au mai prevăzut două controale numerice, unul pentru amplitudinea semnalului și celălalt pentru numărul de perioade generat, alese astfel ca să se poată fixa și numere fracționare.

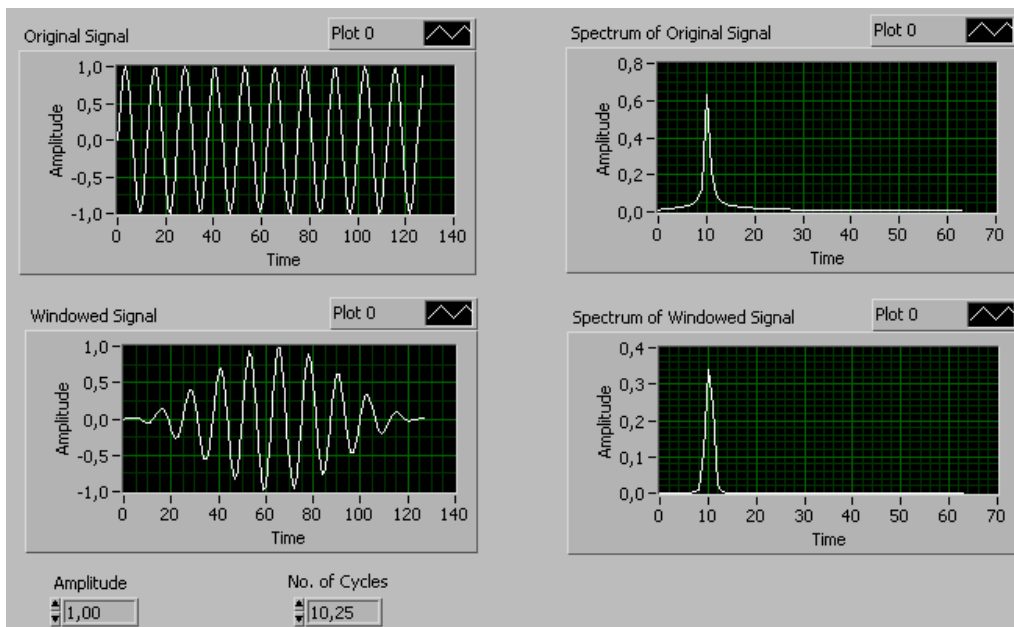


Fig.5.7. Panoul frontal al VI-ului care ilustrează aplicarea ferestrei temporale

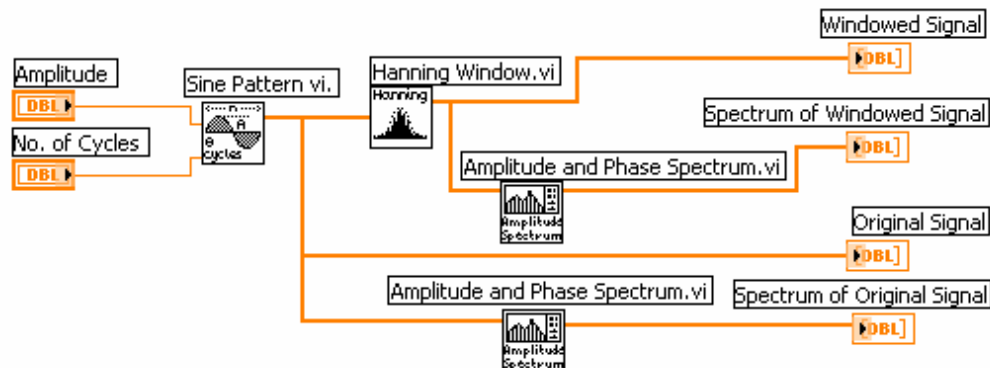


Fig.5.8. Diagrama bloc a VI-ului care ilustrează utilizarea ferestrei temporale

În ceea ce privește diagrama bloc se poate remarca introducerea următoarelor module:



- **Sine Pattern VI**, care se găsește executând **Functions** >> **Analysis** >> **Windows** și care poate genera un semnal sinusoidal având amplitudinea și numărul de perioade specificat de controalele din panoul frontal;



- **Hanning Window VI** este modulul care implementează fereastra ce va fi aplicată și se extrage din paleta **Functions** >> **Analysis** >> **Windows**;



- **Amplitude and Phase Spectrum VI** este modulul care determină amplitudinea și faza spectrală (în acest caz faza nu interesează); se găsește în paleta **Functions** >> **Analysis** >> **Measurement** și sunt necesare două

asemenea module, atât pentru semnalul original, cât și pentru cel rezultat la ieșirea ferestrei Hamming.

Pentru a vizualiza detalii privind funcționarea și terminalele acestor blocuri, din meniul **Help** se selectează opțiunea **Show Context Help** și se poziționează cursorul mouse-ului pe blocul care interesează. Se precizează că anumite terminale pot fi neconectate și în aceste cazuri rezultă că se acceptă mărimile sau stările predefinite ale terminalelor.

Imaginile afișate pe display-urile din fig.5.7 corespund unui eșantion de semnal sinusoidal cu amplitudinea 1 alcătuit din 10,25 perioade (semnalul original), celui netezit cu o fereastră Hamming, precum și spectrelor aferente. Vizualizând imaginile afișate se pot observa efectele netezirii asupra formei liniilor spectrale.

5.5. Instrument virtual pentru calculul modulului și fazei componentelor spectrale folosind blocuri specializate

În cadrul acestei secțiuni se va prezenta crearea unui **VI** care va include câteva blocuri existente în paleta de funcții **LabVIEW**, care înglobează unele dintre operațiile de calcul **FFT**, și de utilizare a ferestrelor de netezire, completate cu blocuri specializate, care permit facilități sporite de obținere simultană atât a modulelor cât și a fazelor componentelor spectrale ale semnalelor analizate. Acestea oferă și posibilități variate de reprezentare grafică în formatele și în raport de unitățile adecvate cerințelor utilizatorului.

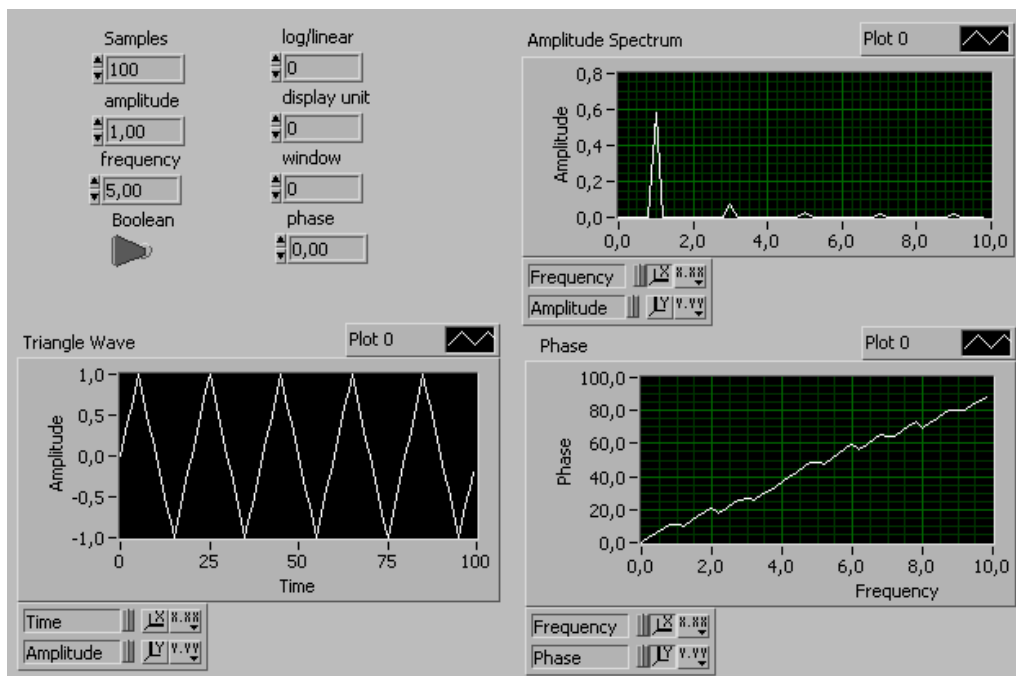


Fig.5.9. Panoul frontal al **VI**-ului pentru determinarea simultană a modulului și fazei componentelor spectrale

Pentru exemplificare s-a recurs la cazul unui semnal periodic triunghiular care, spre deosebire de cel sinusoidal, este caracterizat de mai multe componente spectrale. Panoul frontal al VI-ului denumit **Spectrum Amplitude-Phase.vi** este redat în fig.5.9.

După cum se poate observa în panou au fost introduse o serie de controale care asigură stabilirea parametrilor semnalului triunghiular, precum: frecvența, amplitudinea, numărul de eșantioane și faza inițială. În plus, au mai fost prevăzute următoarele controale de tip enumerativ extrase din **Controls >> Ring >> Enum**:

- **log/linear** specifică modul de reprezentare grafică pentru componentele spectrale: **0 - Linear, 1- dB**;
- **display unit** permite să se aleagă unitatea de măsură pentru componentele spectrale: **0 - Vrms** (volți valoare eficace pentru modul), **1 - Vpk** (volți valoare de vârf pentru modul), **2 - Vrms^2** (volți valoare eficace la pătrat pentru spectrul de putere), **3 - Vpk^2** (volți valoare de vârf la pătrat pentru spectrul de amplitudine) etc;
- **window** folosește pentru selectarea ferestrei de netezire (secțiunea 5.4): **0 - Uniform, 1 - Hanning, 2 - Hamming, 3 - Blackman-Harris** etc.

S-a mai introdus în panoul frontal controlul **Boolean** care servește la resetarea fazei semnalului la valoarea zero (valoarea predefinită este **False**). Se mai pot remarca și trei indicatoare, două de tipul **Waveform Graph** pentru modulul, respectiv pentru faza componentelor spectrale și al treilea de tipul **Waveform Chart** pentru vizualizarea semnalului, în cazul de față triunghiular.

Diagrama bloc a VI-ului este redată în fig.5.10.

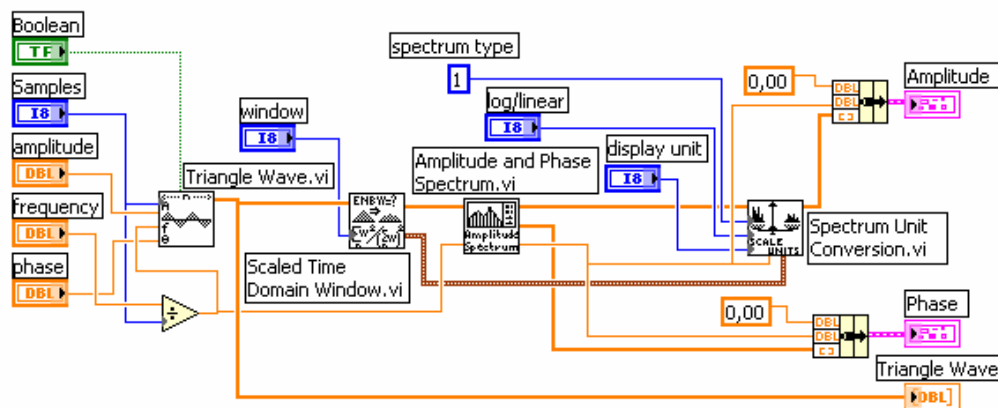


Fig.5.10. Diagrama bloc a VI-ului pentru determinarea simultană a modulului și fazei componentelor spectrale

În diagrama bloc, pe lângă blocurile funcționale cunoscute din exemplele anterioare (**Triangle Wave** și **Amplitude Spectrum**), există două blocuri specifice, care vor fi descrise în cele ce urmează:

- **Scaled Time Domain Window** servește pentru aplicarea ferestrei de netezire selectate în panou cu controlul **window** și asigură același nivel al semnalului la ieșirea **Windowed Waveform** pentru oricare dintre ferestrele folosite, prin



Fig.5.11. Funcția **Scaled Time Domain Window**

intermediul transmiterii corecțiilor prin ieșirea **windows constants** către blocul **Spectrum Unit Conversion**. Acest bloc, având simbolul din fig.5.11, se introduce în diagramă

accesând paleta **Functions >> Signal Processing >> Windows**;

- **Spectrum Unit Conversion** asigură, în funcție de comenzile selectate de la controalele dispuse în panoul frontal, **log/linear**, **display unit** și **window** (prin intermediul corecțiilor **window constants**) reprezentarea corectă a componentelor spectrale în formatul dorit și în raport de unitățile convenabile tipului de spectru. Tipul de spectru se selectează introducând la intrarea **spectrum type** o constantă numerică după cum urmează: **0** - pentru spectrul de putere, **1** - pentru spectrul de amplitudine. La intrarea **df** se aplică rezoluția în frecvență furnizată de blocul **Amplitude Spectrum**. Intrarea **signal unit** se poate lăsa neconectată, unitatea prestabilită fiind **V [volți]**. Simbolul blocului și terminalele se pot vedea pe fig.5.12.

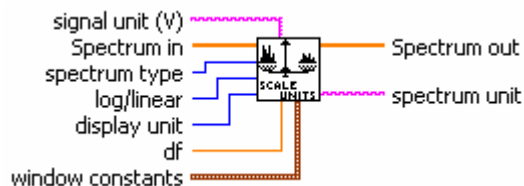


Fig.5.12. Funcția **Spectrum Unit Conversion**

Accesarea blocului se face executând **Functions >> Signal Processing >> Frequency Domain**.

Pe display-urile indicatoare din fig.5.9 se pot observa amplitudinea și faza componentelor spectrale al semnalului triunghiular având amplitudinea de 5V și frecvența de 5Hz.

Se remarcă faptul că, spre deosebire de spectrul semnalului sinusoidal reprezentat în fig.5.4, în acest caz spectrul de amplitudine are mai multe componente poziționate la valori de frecvență multipli impari ai fundamentalei și ale căror amplitudini scad cu creșterea frecvenței. Este de notat că axa absciselor este gradată în valori normalizate, prin raportare la frecvența fundamentalei (la 1 corespunde 5Hz, la 3 – 15Hz ș.a.m.d.). Trebuie subliniat că blocul **Amplitude Spectrum** efectuează determinarea componentelor tot pe baza **FFT unilaterală**.

5.6. Instrument virtual pentru calculul funcției de transfer a unui filtru și trasarea graficelor răspunsului la frecvență și a diagramei Nyquist

Pentru a ilustra și alte posibilități ale **FFT** și a altor module disponibile din paleta de **Function**, în această secțiune a lucrării se vor prezenta proceduri de determinare a funcției de transfer a unui sistem liniar și pentru trasarea graficelor răspunsului la frecvență al acestuia constând din: caracteristicile amplitudine-frecvență, fază-frecvență și diagrama Nyquist. Simularea sistemului s-a realizat folosind modulul unui filtru și ca semnal de intrare modulul de tip impuls (Dirac), ambele existente în aceeași paletă.

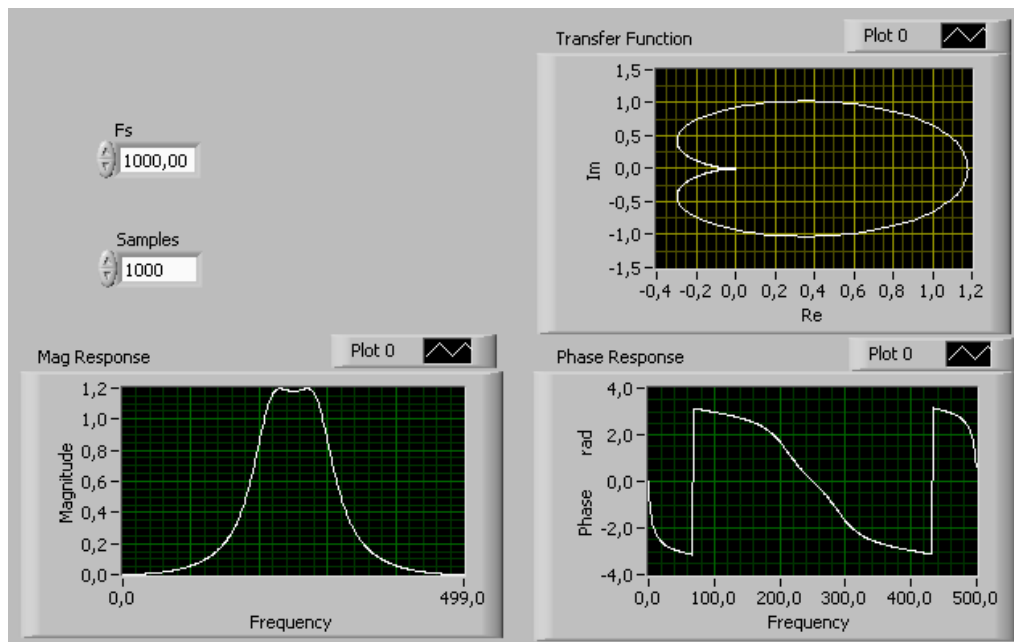


Fig.5.13. Panoul frontal pentru trasarea graficelor răspunsului la frecvență și a locului Nyquist

Panoul frontal al VI-ului este reprezentat în fig.5.13 și cuprinde două indicatoare grafice de tip **Waveform Graph** pentru afișarea celor două componente ale răspunsului la frecvență denumite **Magnitude Response** și **Phase Response**, un indicator grafic **XY** pentru diagrama Nyquist numit **Transfer Function** și două controale numerice necesare pentru fixarea numărului de eșantioane **Samples** și a frecvenței de eșantionare **Fs** ale semnalului de intrare.

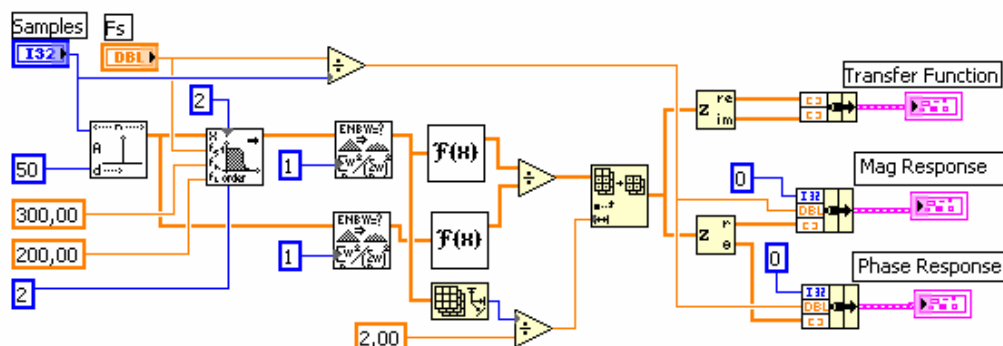


Fig.5.14. Diagrama bloc a VI-ului pentru trasarea graficelor raspunsului la frecventa si a locului Nyquist

În fig.5.14 este reprezentată diagrama cu blocuri funcționale, corespunzătoare acestui instrument virtual. Din examinarea acestei figuri se poate constata că, pe lângă o serie de blocuri cunoscute din aplicațiile anterioare, au fost introduse blocuri noi

impuse de specificul operațiilor care vor fi executate de acest **VI**, precum și blocuri pentru aplicarea unor constante numerice.

Blocurile specifice, care nu au mai fost întâlnite în aplicațiile anterioare, sunt:



- modulul **Impulse Pattern**, care se găsește în paleta **Functions >> Analyze >> Signal Processing >> Signal Generation**, cu simbolul reprezentat în stânga, care generează un șir corespunzător funcției impuls conform relației:

$$x_i = \begin{cases} A & \text{daca } i=d, \text{ pentru } i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \\ 0 & \text{in rest} \end{cases}$$

unde A este amplitudinea, d este întârzierea și n numărul de eșantioane; valorile pentru A , d și n se aplică la terminalele de intrare al modulului, iar secvența x_i se obține la terminalul de ieșire situat pe partea opusă celor de intrare (valoare prestabilită $A = 1$);



- modulul **Butterworth Filter**, care se poate extrage executând **Functions >> Analyze >> Signal Processing >> Filters**, având simbolul redat în stânga, simulează un filtru digital, fiind introdus ca element de test pentru ridicarea graficelor preconizate; terminalele acestui modul au următoarele semnificații:

X – intrarea la care se aplică secvența;

T – terminalul la care se specifică tipul filtrului conform numerotării: 0 - trece jos, 1 - trece sus, 2 – trece bandă, 3 – oprește bandă;

fs – frecvența de eșantionare;

fh – frecvența de tăiere înaltă; această valoare este ignorată în cazul filtrelor de tip 0 sau 1;

fl – frecvența de tăiere joasă, care trebuie să respecte condițiile $0 \leq fl \leq fs$, altfel filtrul nu funcționează și anunță eroare (valoarea prestabilită este $fl = 0,125 fs$);

order – terminalul la care se specifică ordinul filtrului cu cifre (asemănător ca la tipul filtrului) de 0 la 6 (valoarea prestabilită este 2);

sageata – terminalul de ieșire la care se obține răspunsul filtrului.

Modulul **Array Subset** este necesar pentru a reține din șirul de termeni care reprezintă valorile funcției de transfer numai pe cei corespunzători frecvențelor pozitive, utilizați pentru trasarea locului Nyquist.

Semnalul generat de modulul **Impulse Pattern** a fost ales pentru aplicarea la intrarea filtrului, plecând de la ideea că funcția impuls unitate (cazul continuu) are – teoretic - un spectru de frecvență uniform în întreg domeniul $(-\infty, +\infty)$, ceea ce permite ca și semnalele de acest tip să acopere o bandă largă de frecvențe, necesară pentru scopul acestei secțiuni a lucrării. După cum s-a arătat anterior, semnalul respectiv este constituit dintr-o secvență de n eșantioane, în cadrul căreia termenul corespunzător “impulsului” este generat cu o întârziere față de origine egală cu dT_s , unde T_s este perioada de eșantionare.

Din diagrama bloc se vede că funcția de transfer se determină, conform definiției, făcând raportul dintre transformatele Fourier ale semnalelor de la ieșirea și de la intrarea filtrului. Apoi, ținând cont că valorile funcției de transfer sunt exprimate sub formă complexă Z , s-au folosit două module de conversie: unul pentru redarea separată a părților reală și imaginară necesare pentru trasarea locului Nyquist și al

doilea care determină modulul și faza necesare pentru graficele răspunsului la frecvență.

În ceea ce privește elementul de testare, s-a ales modulul care simulează filtrul Butterworth, deoarece acesta asigură un răspuns neted la toate frecvențele, are o caracteristică plată de valoare unitară în banda de trecere și o descreștere monotonă în jurul frecvențelor de tăiere cu o pantă mai abruptă cu cât ordinul filtrului este mai ridicat.

Imaginile afișate pe indicatoarele grafice din panoul frontal se referă la un filtru Butterworth trece-bandă, de ordinul 2, cu frecvențe de tăiere 200Hz și 300Hz. Pe graficul modulului se poate recunoaște caracteristica de filtru Butterworth trece-bandă, iar pe graficul fazei și pe hodograf faptul că este un filtru de ordinul 2.

5.7. Chestiuni de studiat

1. Se vor studia și se vor însuși fundamentele matematice ale **Transformării Fourier Rapide**, relațiile, parametrii și proprietățile expuse în secțiunea 5.2.

2. Se va crea un instrument virtual pentru calculul FFT având panoul frontal și diagrama bloc din fig.5.2, respectiv din fig.5.3, și se vor efectua rulări ale aplicației pentru un semnal sinusoidal, la care se va varia frecvența conform indicațiilor afișate din secțiunea 5.3.1. Se vor varia, de asemenea, frecvența de eșantionare și numărul de eșantioane. Se va analiza și se va explica forma graficului afișat (număr de componente, forma și poziționarea acestora) din care rezultă că este reprezentată o transformată Fourier bilaterală.

3. Se va modifica diagrama bloc de la punctual precedent conform celei reprezentate în fig.5.5 din secțiunea 5.3.2 și se vor repeta experimentările. Se vor observa graficele rezultate și se vor preciza diferențele față de cele anterioare. Se vor analiza modificările introduse în diagrama bloc și modul în care acestea determină obținerea transformării Fourier unilaterale.

4. Ținând cont de explicațiile din secțiunea 5.4 cu privire la rolul ferestrelor de timp pentru netezire în prelucrarea semnalelor achiziționate pe o durată finită, se va crea instrumentul virtual având panoul frontal și diagrama bloc din fig.5.7, respectiv din fig.5.8. Pe diagramele afișate se va constata diferența dintre cazul fără fereastră de netezire și cel în care s-a aplicat o asemenea fereastră, și se va preciza care este avantajul. Se va deschide subpaleta **Windows**, executând **Functions >> Analyze >> Signal Processing >> Windows**, se vor observa modulele de ferestre de netezire pe care le conține **LabVIEW** și care sunt deosebirile dintre acestea. Se va înlocui fereastra Hamming folosită în diagrama bloc din fig.5.8 cu un alt tip de fereastră (de exemplu cea triunghiulară) și se va comenta efectul.

5. Se va studia aplicarea FFT pentru determinarea componentelor spectrale ale unor semnale mai complexe decât cel sinusoidal, realizând VI-ul din secțiunea 5.5 implementat cu blocurile specializate de care dispune **LabVIEW**, ca în fig.5.9 și fig.5.10. Pe lângă rularea acestei aplicații în cazul unui semnal triunghiular pentru care sunt determinate și afișate graficele cu modulele și fazele componentelor de diverse frecvențe, se vor face rulări similare pentru cazurile unor semnale de tip dinți de

fierăstrău și zgomot alb uniform, pentru care există module de generare în subpaleta **Waveform Generation**, care poate fi accesată cu **Functions >> Waveform >> Waveform Generation**. Se vor testa și alte modalități de reprezentare a componentelor spectrale.

6. În scopul analizării posibilităților pe care le oferă **FFT** și modulele specializate din **LabVIEW** pentru alte aplicații de prelucrare a semnalelor, se va crea un **VI** pentru determinarea funcției de transfer a unui sistem liniar, se va trasa răspunsul la frecvență precum și locul Nyquist. Panoul frontal și diagrama bloc pentru acest **VI** sunt cele din secțiunea 5.6, fig.5.11 și fig.5.12. Se va rula aplicația având ca element de test al **VI**-ului (sistemul liniar) un filtru trece-bandă de tip Butterworth. Se vor face experimentări și pentru alte variante de filtre, de exemplu trece-jos sau trece-sus. Modulele reprezentând diverse tipuri de filtre se găsesc executând **Functions >> Analyze >> Signal Processing >> Filters**. Se vor observa și comenta modificările care apar în funcție de tipul filtrului și, pentru același tip, influențele determinate de variația numărului de eșantioane și a frecvenței de eșantionare.

5.8. Modul de lucru și prezentarea rezultatelor

La punctul 2 din **Chestiuni de studiat**, pentru o ușoară interpretare a rezultatelor, se va face o primă rulare a acestei aplicații cu următoarele valori prescise pe controalele corespunzătoare de pe panou: frecvența $f = 10\text{Hz}$, frecvența de eșantionare $f_s = 100\text{Hz}$, numărul de eșantioane $N = 100$ și amplitudinea semnalului $A = 1$. După aceasta, se vor efectua rulări luând pentru frecvență valorile 5 Hz, 20 Hz și 52 Hz. Pentru toate cazurile se vor examina și explica imaginile afișate pe cele două ecrane din panoul frontal.

În mod asemănător se va proceda și pentru punctul 3.

Referitor la punctul 4, se vor analiza și interpreta diferențele care apar în cazurile utilizării ferestrelor de netezire și se vor efectua rulări pentru alte valori ale numărului de cicluri, de exemplu 1,4 perioade, 5,5 perioade, 10 perioade etc. Se va explica de ce amplitudinea spectrului semnalului netezit este mai redusă decât aceea a spectrului semnalului original.

La punctul 5, pentru a aprofunda funcționarea **VI**-ului prezentat în secțiunea 5.5, se vor face rulări modificând frecvența și numărul de eșantioane ale semnalului triunghiular și se va schimba tipul de semnal utilizând, de exemplu, modulele **Sawtooth Wave** (unda având forma de dinți de fierăstrău) și **Uniform White Noise** (semnal aleator denumit zgomot alb uniform). De asemenea, se pot testa mai multe variante de ferestre de netezire și de modalități de reprezentare grafică ale spectrului de amplitudine.

Cu privire la cele cerute la punctul 6, pentru a observa diferite tipuri de răspunsuri la frecvență și de locuri Nyquist, se vor face experimente cu toate cele 4 variante de filtre Butterworth pe care le permite modulul, și, pentru fiecare tip, se vor observa modificările care apar în raport de schimbarea ordinului filtrului și a frecvențelor de tăiere. De asemenea, se vor modifica: numărul de eșantioane **Samples**,

frecvența de eșantionare F_s și întârzierea d și se va observa influența asupra graficelor, inclusiv în cazul nerespectării restricțiilor impuse.

În ceea ce privește prezentarea rezultatelor, fiecare student, în fișierul cu numele său (deschis anterior), urmărind punctele de la chestiunile de studiat, va înscrie răspunsurile, rezultatele și comentariile. Pentru **VI**-urile descrise în lucrare sunt suficiente rezultatele din experimentări cu explicațiile aferente. Pentru **VI**-urile nou create, prevăzute în tematicile specificate la **Chestiuni de studiat**, se vor prezenta și panourile frontale și diagramele bloc respective, însoțite de imagini cu grafice, eventuale explicații și observații.