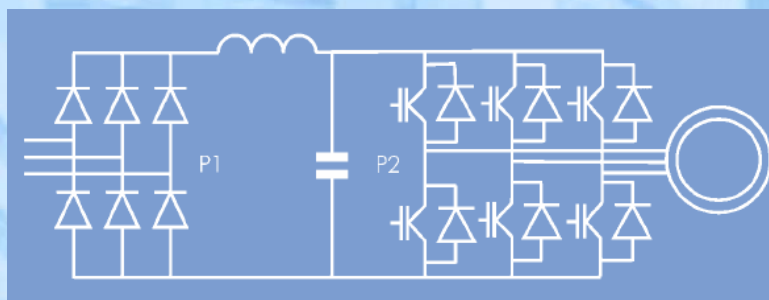
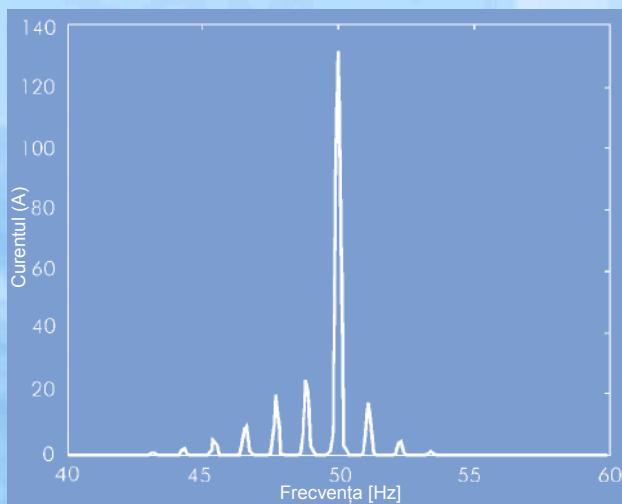


# Ghid de Aplicare - Calitatea Energiei Electrice



## Armonici Interarmonici

3.1.1



Armonici

# Armonici

## Interarmonici

Zbigniew Hanzelka & Andrzej Bien  
AGH University of Science and Technology  
Iulie 2004



Acest ghid este realizat ca parte a Inițiativei Leonardo pentru Calitatea Energiei Electrice, un program european de educație și învățare, sub egida și cu suportul Comunității Europene (în programul Leonardo da Vinci) și International Copper Association. Pentru alte informații privind acest program a se vedea [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org).

### European Copper Institute (ECI)

European Copper Institute este un joint venture între ICA (International Copper Association) și industria europeană de fabricate. Prin membrii săi, ECI acționează în numele celor mai mari producători de cupru din lume și a principalilor prelucrători din Europa, pentru promovarea cuprului în Europa. Apărută în ianuarie 1996, ECI are suportul unei rețele de unsprezece Copper Development Association („CDAs”) în Benelux, Franța, Germania, Grecia, Ungaria, Italia, Polonia, Rusia, Scandinavia, Spania și Regatul Unit.

### Societatea Inginerilor Energeticieni din România

Societatea Inginerilor Energeticieni din România - SIER, constituită în 1990, este o asociație profesională, autonomă, cu personalitate juridică, neguvernamentală, apolitică, fără scop patrimonial. Scopul Societății este de a contribui activ atât la creșterea rolului și eficienței activității inginerilor energeticieni, cât și la stabilirea orientărilor, promovarea progresului tehnic și îmbunătățirea legislației în domeniul energetic. SIER promovează un schimb larg de informații, cunoștințe și experiență între specialiștii din domeniul energetic prin cooperarea cu organizații similare naționale și internaționale. În anul 2004 SIER a semnat un acord de parteneriat cu European Copper Institute pentru extinderea și în România a programului LPQI (Leonardo Power Quality Initiative), program educațional în domeniul calității energiei electrice, realizat cu suportul Comisiei Europene. În calitate de partener al ECI, SIER se va implica în desfășurarea unei ample activități de informare și de consultanță a consumatorilor de energie electrică din România.

Versiunea în limba română a prezentei broșuri a fost realizată exclusiv de către membrii SIER: traducerea a fost efectuată de **Prof. dr. ing. Petru Postolache**, iar verificarea de către **Prof. dr. ing. Nicolae Golovanov**, **Dr. ing. Fănică Vatră** și **Drd. ing. Ana Poida**.

### Atenționare

Conținutul acestui proiect nu reflectă în mod necesar poziția Comunității Europene și nu implică nici o responsabilitate din partea Comunității Europene.

European Copper Institute, AGH University of Science and Technology și Societatea Inginerilor Energeticieni din România își declină răspunderea pentru orice daune directe, indirecte, subsidiare sau incidentale care ar putea să rezulte în urma utilizării informațiilor sau a inabilității de a utiliza informațiile și datele cuprinse în această publicație.

Copyright© European Copper Institute, AGH University of Science și Societatea Inginerilor Energeticieni din România.

Reproducerea prezentului document este permisă numai sub forma sa integrală și cu menționarea sursei.



Membră a  
EUREL

Societatea Inginerilor Energeticieni din România  
No. 1, Lacul Tei Avenue, PO/BOX 30-33  
020371 Bucharest  
Romania

Tel: 4 0722 36 19 54  
Fax: (4 021) 610 52 83  
Email: [office@sier.ro](mailto:office@sier.ro)  
Websites: [www.sier.ro](http://www.sier.ro)



European Copper Institute  
168 Avenue de Tervueren  
B-1150 Brussels  
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70  
Fax: 00 32 2 777 70 79  
Email: [eci@eurocopper.org](mailto:eci@eurocopper.org)  
Website: [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org)

# Armonici

## Interarmonici

### Introducere

Armonicile sunt tensiuni sau curenți sinusoidali a căror frecvență este un multiplu întreg al frecvenței fundamentale a sursei. Spre deosebire de acestea, interarmonicile de tensiune sau de curent au o variație sinusoidală cu o frecvență care nu este un multiplu întreg al frecvenței sursei. Cunoștințele despre perturbațiile electromagnetice asociate interarmonicilor sunt încă în dezvoltare și, în prezent, se constată o creștere continuă a interesului pentru studiul acestui fenomen. Deși au fost prezente întotdeauna în sistemele electroenergetice, interesul pentru interarmonici a devenit mai mare odată cu creșterea amplitudinii lor ca urmare a largii răspândiri a electronicii de putere în instalațiile electrice.

### Definiții

Armonicile și interarmonicile unei curbe de tensiune sau de curent analizate se definesc în funcție de componentele spectrale corespunzătoare funcționării în regim staționar quasi-staționar. În tabelul 1 sunt prezentate formulările matematice corespunzătoare.

Armonică	$f = nf_1$ unde $n$ este un întreg mai mare decât zero
Componenta continuă	$f = nf_1$ pentru $n = 0$
Interarmonică	$f \neq nf_1$ unde $n$ este un întreg mai mare decât zero
Subarmonică	$f > 0$ Hz și $f < f_1$
$f_1 =$ frecvența fundamentală a tensiunii (armonica de bază)	

Tabel 1 – Componentele spectrele ale curbei (de frecvența  $f$ )

Termenul de “subarmonică” care nu are, în mod oficial, o definiție - desemnează cazul particular al unei interarmonici care are frecvența mai mică decât cea a fundamentalei. Totuși termenul apare în numeroase lucrări și este, în general, folosit de specialiști.

Standardul CEI 61000-2-1 definește interarmonicile astfel:

*Intre armonicile frecvenței fundamentale de tensiune și de curent pot fi observate și alte frecvențe care nu sunt multipli întregi ai fundamentalei. Acestea pot să apară ca frecvențe discrete sau ca un spectru larg de frecvențe.*

Pentru considerațiile care urmează sunt adoptate următoarele definiții detaliate:

#### Frecvența interarmonică

Orice frecvență care nu este un multiplu întreg al frecvenței fundamentale. Prin analogie cu rangul armonicii se definește rangul interarmonicii ca fiind raportul dintre frecvența interarmonicii și frecvența fundamentalei. Dacă valoarea acestuia este subunitară, frecvența respectivă poate fi numită frecvența subarmonică. În conformitate cu recomandarea CEI, rangul interarmonicii este desemnat prin litera “m” (conform CEI 61000-2-1).

#### Interarmonica de tensiune (similar pentru curent)

O tensiune sinusoidală având o frecvență situată între armonici, adică o frecvență care nu este un multiplu întreg al componentei fundamentale.

### Surse

Se consideră că există două mecanisme de bază prin care se generează interarmonici:

Prima este generarea unor componente în benzile laterale ale frecvenței fundamentale a tensiunii de alimentare și ale armonicilor ca rezultat al variației amplitudinii și/sau fazei lor. Acestea sunt determinate de variațiile rapide ale curentului absorbit de echipamente și instalații, care pot fi, de asemenea, surse de fluctuații de tensiune. Perturbațiile sunt produse de sarcinile electrice în regimuri tranzitorii, de lungă sau de scurtă durată, sau, în multe cazuri, atunci când apar modulații în amplitudine ale curenților și tensiunilor. Aceste perturbații au, în mare măsură, un caracter aleatoriu, depinzând de variația inerentă a sarcinii electrice în timpul diferitelor procese tehnologice.

# Interarmonici

Cel de al doilea mecanism este comutația asincronă (nesincronizată cu frecvența tensiunii de alimentare) a elementelor semiconductoare din convertoarele statice. Un exemplu tipic îl oferă convertoarele cu modulația în lățime a pulsurilor (*pulse width modulation* - PWM). Interarmonicile generate de acestea pot fi localizate oriunde în spectrul analizat în raport cu armonicile tensiunii de alimentare.

În multe cazuri de echipamente ambele mecanisme pot să apară în același timp.

Interarmonicile pot fi generate la orice nivel de tensiune și pot fi transferate la alt nivel de tensiune, de exemplu, interarmonicile generate în rețelele de înaltă (ÎT) și medie tensiune (MT) pot fi injectate în rețelele de joasă tensiune și invers. Amplitudinea lor depășește rar nivelul de 0,5% din amplitudinea fundamentalei, dar – în condiții de rezonanță - pot să atingă valori mai mari.

Sursele principale de interarmonici sunt:

- ◆ sarcinile cu arc electric
- ◆ motoarele electrice cu sarcină variabilă
- ◆ convertoarele statice, în particular convertoarele de frecvență directe sau indirecte
- ◆ sistemele de telecomandă (“*ripple controls*”).

Interarmonicile mai pot să fie generate de oscilațiile care apar, de exemplu, în sistemele ce conțin condensatoare montate în serie sau în paralel sau în cazul transformatoarelor funcționând în regim de saturație și în timpul proceselor de comutație.

Tensiunea rețelei electrice conține, în mod permanent, un *zgomot de fond* cu distribuție gaussiană, având un spectru continuu. Nivelele tipice pentru această perturbație se află în domeniul (CEI 1000-2-1):

- ◆ 40-50 mV (cca 0,02%  $U_N$ ) atunci când sunt măsurate cu un filtru cu bandă de trecere de 10 Hz;
- ◆ 20-25 mV (cca 0,01%  $U_N$ ) atunci când sunt măsurate cu un filtru cu bandă de trecere de 3 Hz, unde  $U_N$  este tensiunea nominală (230 V).

## Sarcini cu arc electric

Acest grup include cuptoarele cu arc electric și instalațiile de sudare. În mod normal, cuptoarele cu arc electric nu produc interarmonici semnificative, cu excepția situațiilor în care apar amplificări datorită rezonanței. Procesele tranzitorii, care se desfășoară intens în faza inițială de topire, pot să fie sursă de interarmonici (figura 1).

Instalațiile de sudare generează un spectru continuu asociat cu un proces particular. Durata operațiilor individuale de sudare este de la o secundă până la zeci de secunde, în funcție de tipul instalației .

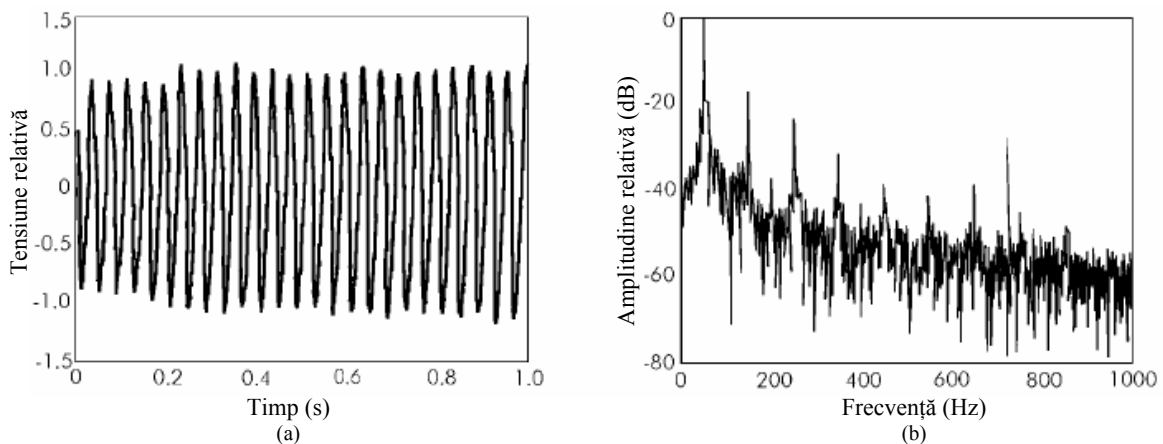


Figura 1 – Fluctuațiile de tensiune specifice cuptoarelor cu arc electric măsurate în secundarul transformatorului de alimentare  
a) fluctuația de tensiune;  
b) spectrul care pune în evidență armonicile (vârfuri) și interarmonicile [1]

# Interarmonici

## Motoare electrice

Motoarele asincrone pot fi surse de interarmonici din cauza creștăturilor din circuitele magnetice ale statorului și rotorului, în particular, în asociație cu saturația circuitului magnetic (așa numitele “armonici de creștătură”). La viteza de funcționare staționară a motorului, frecvențele componentelor perturbatoare se află în domeniul 50 Hz – 2000 Hz, dar – în timpul pornirii- domeniul , se poate extinde semnificativ. Asimetria naturală a motorului (centrarea defectuoasă a rotorului etc.) poate fi o sursă de interarmonici - a se vedea figura 2.

Motoarele cu cuplu de sarcină variabil, adică motoare pentru forje, ciocane de forjare, mașini de ștanțat, mașini de tăiat, compresoare, pompe cu piston etc. pot fi, de asemenea, surse de interarmonici. Efectul sarcinii variabile este, de asemenea, produs de motoarele cu viteză variabilă alimentate cu convertoare statice.

În instalațiile eoliene, variația cuplului motor al turbinei, care apare, de exemplu, din “efectul de umbră” al stâlpului, poate produce modularea componentei fundamentale a tensiunii, devenind astfel o sursă nedorită de componente de joasă frecvență.

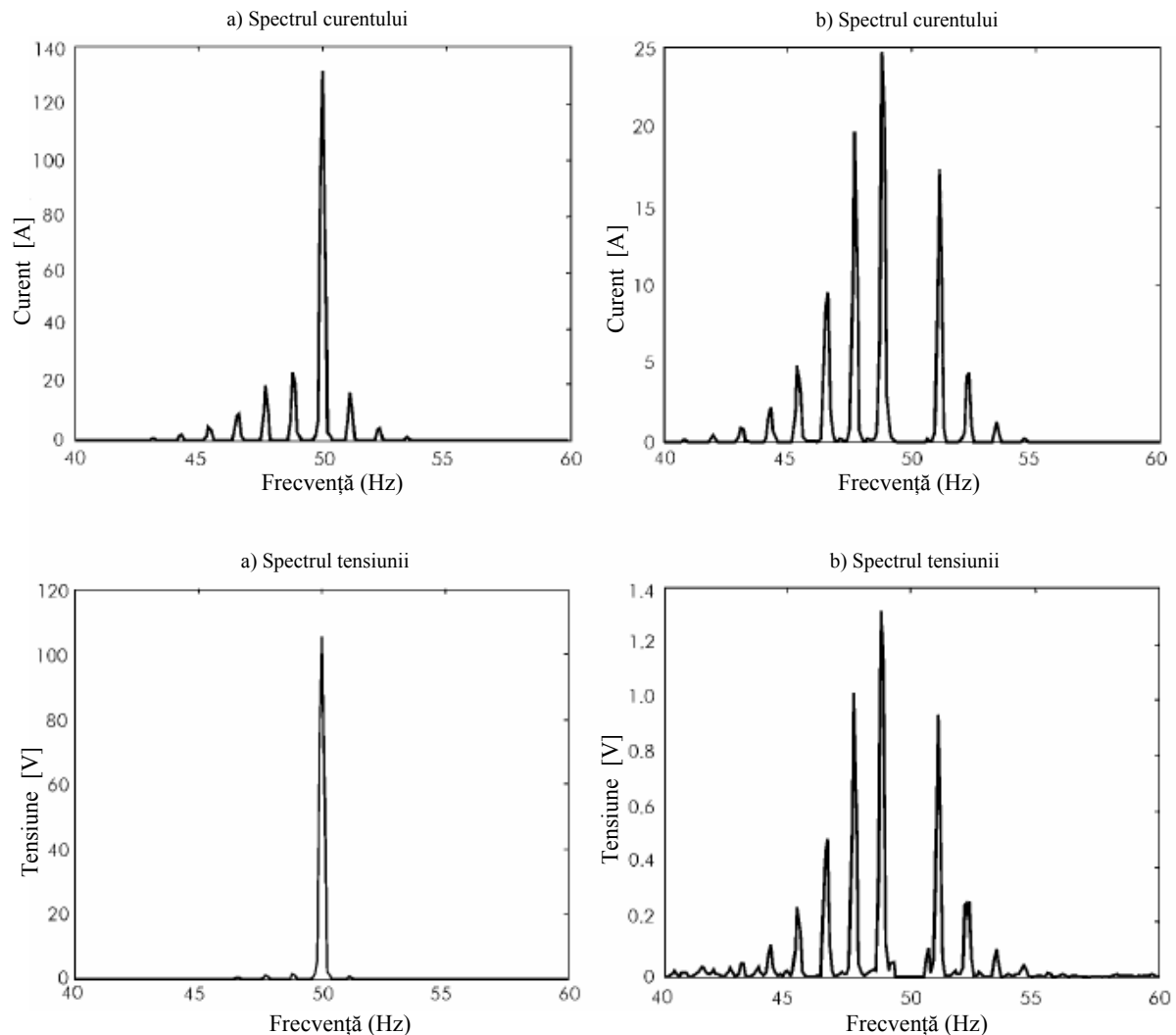


Figura 2 - Rezultatele analizei spectrale a curentului de fază și tensiunii la bornele motorului

a), c) – spectrul complet al semnalelor

b), d) – spectrul cu componenta fundamentală eliminată

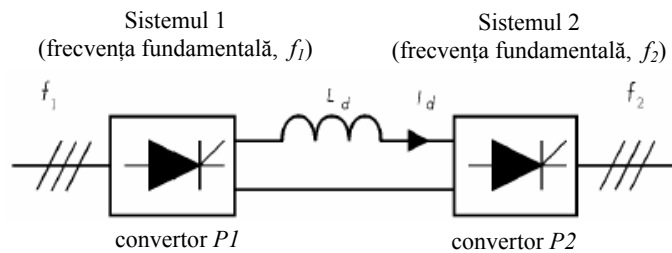
## Convertoare statice de frecvență

### Convertoare de frecvență indirecte

Convertoarele de frecvență indirecte conțin o legătură intermediară în tensiune continuă între ieșirea unui convertor pe partea de alimentare cu intrarea unui convertor (care funcționează, de regulă, ca inverter) pe partea sarcinii. Atât în configurația cu circuit intermediar de curent continuu de curent, cât și cea circuit intermediar de tensiune continuă, legătura intermediară conține un filtru care decuplează curentul sau tensiunea rețelei de alimentare de rețeaua sarcinii. Din această cauză cele două frecvențe fundamentale (cea a sursei și cea dinspre sarcină) sunt mutual decuplate. Dar un filtru ideal nu există, astfel încât există întotdeauna un anumit grad de cuplare. Drept consecință, componente de curent, asociate sarcinii, sunt prezente în circuitul intermediar și componente ale acestora sunt prezente și pe partea de alimentare. Aceste componente sunt subarmonice și interarmonice în raport cu frecvența sistemului de alimentare.

### Invertor comandat de curentul de sarcină

Având în vedere tehnica de comutare a semiconductoarelor, aceste convertoare sunt clasificate ca fiind cu comutare indirectă în frecvență. Un convertor de frecvență este alcătuit din două punți trifazate  $P1$  și  $P2$  și o legătură intermediară în curent continuu, cu bobină (de inductanță  $L_d$  – figura 3). Una dintre punți lucrează în regim de redresor, iar cealaltă în regim de inverter, funcțiile lor fiind interschimbabile.



*Figura 3 - Convertor de frecvență indirect cu invertor comandat de sarcină*

Prezența celor două punți redresoare alimentate de la două sisteme cu frecvențe diferite duce la apariția, în legătura de curent continuu a unui curent modulat de cele două frecvențe  $-f_1$  și  $f_2$ . Fiecare dintre convertoare va crea, pe legătura de curent continuu, componente necaracteristice care vor duce la apariția unor armonici necaracteristice în zona tensiunii alternative, atât pe partea sarcinii, cât și în rețeaua de alimentare.

Componentele pe legătura de curent continuu:

$$\begin{aligned} \text{pentru sistemul 1:} & \quad f_{d1} = p_1 k f_1 & \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ \text{pentru sistemul 2:} & \quad f_{d2} = p_2 n f_2 & \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

unde:

$$\begin{aligned} p_1, p_2 &= \text{numărul pulsurilor convertorului } P1, \text{ respectiv } P2 \\ f_1 &= \text{frecvența fundamentală a sistemului 1 (rețeaua de alimentare) [Hz]} \\ f_2 &= \text{frecvența fundamentală a sistemului 2 (sarcina) [Hz]} \end{aligned}$$

Funcționarea convertorului  $P1$  va determina armonici caracteristice de curent în rețeaua de alimentare care au următoarele frecvențe:

$$f_{hh, char} = (p_1 k \pm 1) f_1 \quad k = 1, 2, \dots$$

În plus, vor apărea componente asociate cu componentele produse de  $P2$  și în legătura de curent continuu.

Un set complet al frecvențelor componentelor curentului din rețeaua electrică de alimentare poate fi scris astfel :

$$\text{frecvențele curentului din rețeaua de alimentare (sistem 1) = } (k p_1 \pm 1) f_1 \pm p_2 n f_2$$

unde:

$$k = 0, 1, 2, \dots \text{ și } n = 0, 1, 2, \dots$$

# Interarmonici

Considerând că  $n = 0$ , pentru  $k = 0, 1, 2, \dots$  vom obține rangul armonicilor pentru o configurație dată a convertorului  $P1$ . Componentele determinate pentru  $k = \text{const}$  și  $n \neq 0$  sunt benzile adiacente frecvențelor caracteristice ale inverterului. Fiecare armonică caracteristică, de exemplu pentru o punte cu șase pulsuri armonicile de rang  $n_1 = 1, 5, 7, \dots$  are propriile sale benzi laterale, așa cum este ilustrat, în figura 4, pentru armonica a 5-a.

Prima pereche de interarmonici, care apare în vecinătatea componentei fundamentale, adică cele cu frecvențele  $f_1 \pm p_2 f_2$ , are amplitudinea cea mai mare. Inductanța bobinei de pe legătura de curent continuu are o influență semnificativă asupra nivelului interarmonicilor. Un exemplu de sistem de acționare având o sursă inverter cu circuit intermediar de curent continuu este sistemul de recuperare statică a puterii de alunecare.

## Invertoare alimentate cu tensiune

Pentru invertoarele alimentate cu tensiune (fig.5) sunt predominante, de asemenea, armonicile caracteristice ale convertorului  $P1$ . Benzile laterale, cu frecvențele determinate de numărul de pulsuri ale convertorului  $P2$ , apar în vecinătatea frecvențelor caracteristice ale lui  $P1$ , adică:

$$(k p_1 \pm 1) f_1 \pm n p_2 f_2$$

pentru  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  și  $n = 0, 1, 2, \dots$ . În majoritatea cazurilor, armonicile necaracteristice reprezintă componente foarte mici ale curentului de alimentare.

Determinarea numerică a armonicilor curentului de alimentare și a valorilor interarmonicilor cere o analiză precisă a frecvenței convertorului incluzând și sarcina sau informații de la producător.

Anumite convertoare conțin un circuit de intrare cu redresor controlat funcționând la o frecvență de comutare care nu este un întreg al frecvenței de alimentare. Această frecvență poate fi constantă sau variabilă, depinzând de modul în care a fost proiectat controlul convertorului.

Convertoarele cu circuit intermediar de tensiune continuă cu modulare PWM a redresorului de intrare produc componente de curent cu frecvența de comutare a elementelor cu semiconductoare și armonici, care nu sunt sincronizate cu frecvența de alimentare. În mod normal, ele sunt situate în gama de la câteva sute de Hz până la câteva zeci de kHz.

## Controlul integral al ciclului de funcționare cu comutare cu tiristoare (controlul gradului de umplere)

Acest tip de comandă controlează un ciclu complet al curentului folosind un comutator cu semiconductoare. În acest mod curentul nu este distorsionat ca rezultat al comenzii – el este fie sinusoidal (pentru o sarcină lineară), fie zero.

Figura 6 prezintă un exemplu de utilizare a comutatorului cu semiconductoare într-o configurație trifază.

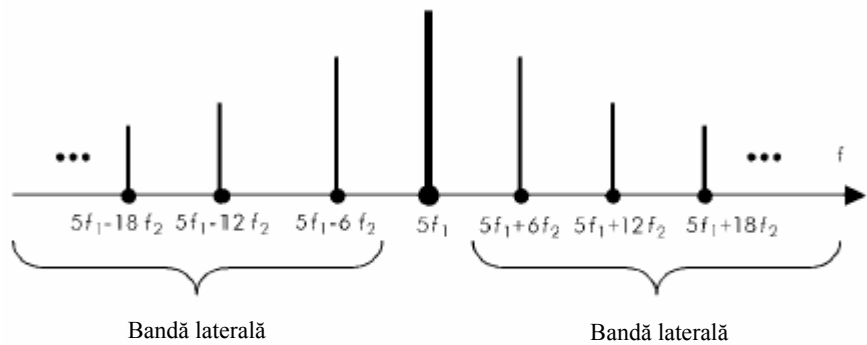


Figura 4 – Benzile laterale adiacente armonicii caracteristice 5 pentru convertoare cu 6 pulsuri  $P1$  și  $P2$

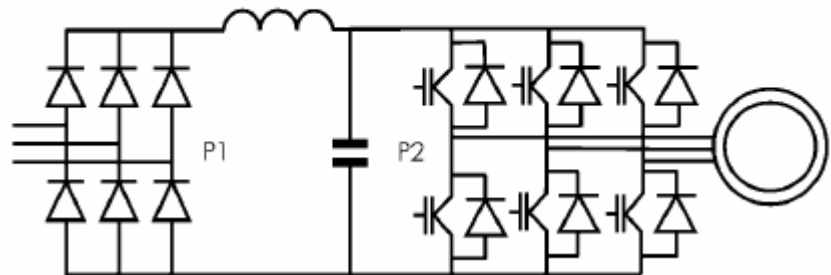


Figura 5 – Diagrama schematică a convertorului de frecvență cu circuit intermediar de tensiune continuă

## Interarmonici

Comutarea unei sarcini trifazate la trecerea prin zero a tensiunii de fază are ca efect circulația unui curent prin conductorul neutru într-un sistem cu patru conductoare. În cazul comutării simultane a fazelor și dacă sarcina este rezistivă, nu apare curent pe conductorul neutru (figura 6) dar, dacă sarcina este inductivă, apar regimuri tranzitorii asociate proceselor de comutație.

Analiza unei configurații ca cea din figura 7a (cu conductor neutru) poate fi restrânsă la un circuit echivalent monofazat (figura 7b). În continuare va fi considerată o sarcină rezistivă monofazată, ca în majoritatea aplicațiilor uzuale.

Un ciclu complet de lucru cuprinde  $N$  perioade  $T$  de conducție cuprinse în un număr întreg de perioade  $M$  (figura 8). Puterea medie transferată sarcinii este controlată prin intermediul raportului (grad de umplere)  $N/M$ . Ca bază pentru analiza Fourier, perioada de repetabilitate a formei curentului trebuie să fie  $Mf_i^{-1}$ , unde  $f_i$  este frecvența sursei de tensiune și  $M$  este numărul de perioade  $T$ .

Prima componentă este interarmonica de frecvență  $(1/M)f_i$  care este componenta cu frecvența cea mai mică a curentului. În exemplul din figura 8, unde  $N = 2$ ,  $M = 3$ , valoarea acestei subarmonici este o treime din frecvența tensiunii de alimentare. Celelalte componente au frecvențe multiplu al acesteia.

Acest mod de comandă este o sursă de subarmonici și de interarmonici, dar nu este o sursă de armonici de rang mai mare. Atunci când  $N = 2$ ,  $M = 3$ , ca în figura 8, amplitudinea armonicilor este zero pentru  $n = 6, 9, 12, \dots$ . Spectrul curentului pentru acest caz este dat în figura 9. Așa cum se constată din figură, componentele majore sunt armonica de frecvență fundamentală a tensiunii de alimentare și subarmonici de frecvență  $(2f)/3$ . Amplitudinile armonicilor sunt egale cu zero.

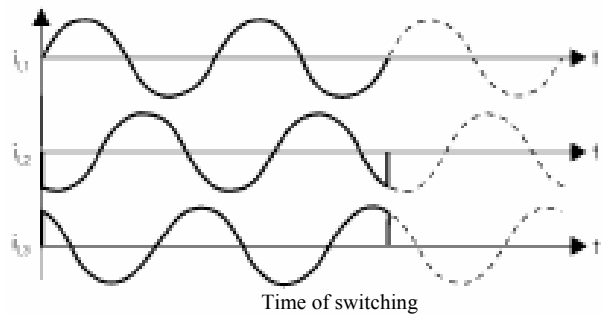


Figura 6 – Curbele curentilor într-o configurație trifazată cu conductor neutru pentru comanda gradului de umplere a unui ciclu complet.

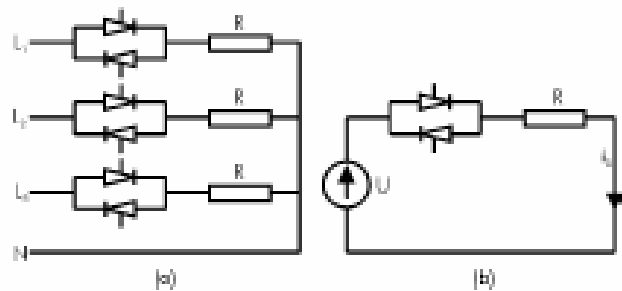


Figura 7 – Controler de tensiune alternativă în  
a) configurație trifazată și  
b) configurație monofazată

## Tensiune de semnalizare în rețelele electrice

Rețeaua electrică publică este destinată, în primul rând, pentru alimentarea cu energie electrică a consumatorilor. Adesea însă, operatorul de rețea o folosește pentru a transmite semnale de comandă, de exemplu pentru a comanda anumite categorii de sarcină (iluminatul stradal, schimbarea tarifului, comutarea de la distanță a sarcinilor etc) sau pentru transmisia de date.

Din punct de vedere tehnic aceste semnale reprezintă o sursă de interarmonici cu durata de 0,5 – 2 s (până la 7 s în sistemele mai vechi) repetate la intervale de 6 – 180 s. În majoritatea cazurilor durata pulsului este de 0,5 s și durata întregii secvențe este de cca 30 s. Tensiunea și frecvența semnalului este prestabilită, semnalul fiind transmis la anumite momente, specificate.

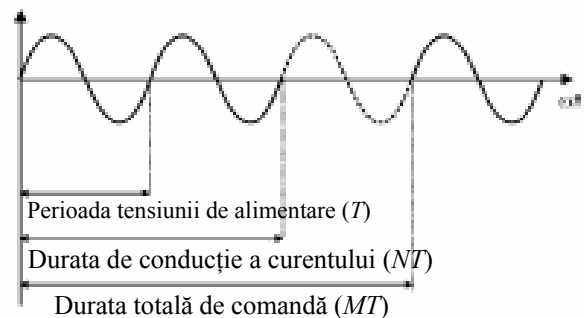


Figura 8 - Forma curentului de sarcină într-un ciclu integral al sistemului comandat:  
 $N=2, M=3$

# Interarmonici

Cele patru categorii de semnale folosite sunt specificate în Standardul IEC 61000-2-1:

♦ *Semnale de telecomandă centralizată* (Ripple control signals): Semnale sinusoidale în domeniul 110 – 2200 (3000) Hz, de preferință în domeniul 110 – 500 Hz pentru noile sisteme. Sunt utilizate, în principal, în sistemele publice (uneori și în cele industriale) la nivelurile JT, MT și IT. Amplitudinea tensiunii semnalelor sinusoidale este în domeniul 2 – 5 % din tensiunea nominală (depinzând de practicile locale). În condiții de rezonanță ea poate atinge 9 %.

♦ *Semnale purtătoare de medie frecvență pe linia electrică*: - Semnale sinusoidale în domeniul 3 – 20 kHz, de preferință 6 – 8 kHz. Sunt folosite, în special în sistemele publice de alimentare cu energie electrică. Amplitudinea semnalului este de până la 2 %  $U_N$ .

♦ *Semnale purtătoare de radio-frecvență pe linia electrică*: 20 – 150 (148,5) kHz (până la 500 kHz în anumite țări). Sunt folosite în sistemele publice, industriale și comunale de alimentare cu energie electrică, precum și pentru aplicațiile comerciale (comanda la distanță a echipamentelor etc).

- ♦ *Sisteme de marcare* – Semnale nesinusoidale cu tensiuni având forma de:
- impulsuri lungi (“crestături” cu durata de 1,5 – 2 ms, de preferință la trecerea prin zero a tensiunii)
  - impulsuri scurte, cu durata de 20 – 50  $\mu$ s
  - pulsuri cu frecvența de 50 Hz și durata egală cu o perioadă sau o jumătate de perioadă a tensiunii de alimentare.

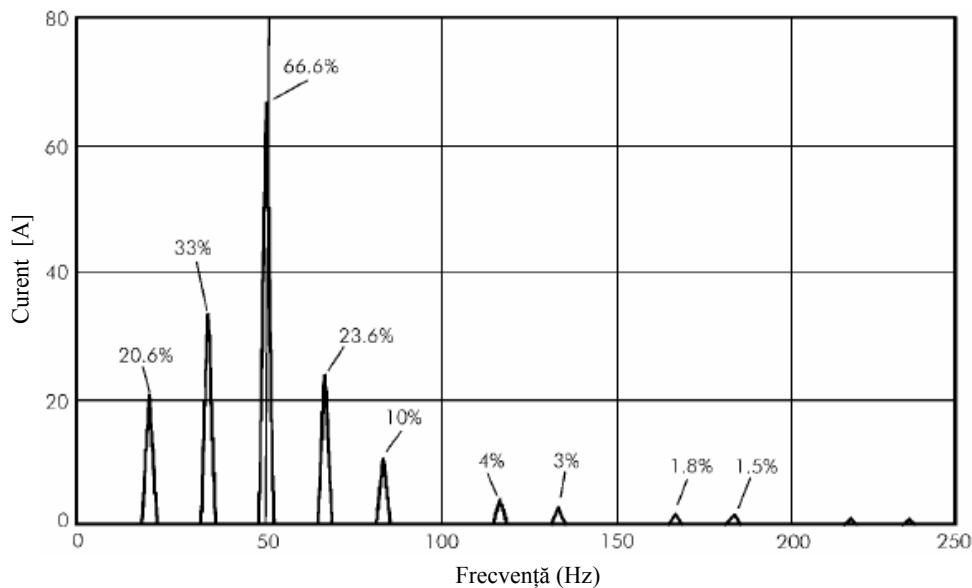


Figura 9 – Spectrul curentului pentru  $N = 2$ ,  $M = 3$

În figura 10 se prezintă un exemplu de spectru al tensiunii pentru un sistem care folosește transmisia de date la frecvența de 175 Hz ( $U_{ih} = 1,35$  %). În acest exemplu mai sunt și alte interarmonici generate de interacțiunea cu frecvențele armonice. Componentele superioare armonicii a doua sunt neimportante (ele nu vor perturba sarcina), în timp ce interarmonicile sub 200 Hz vor putea produce probleme.

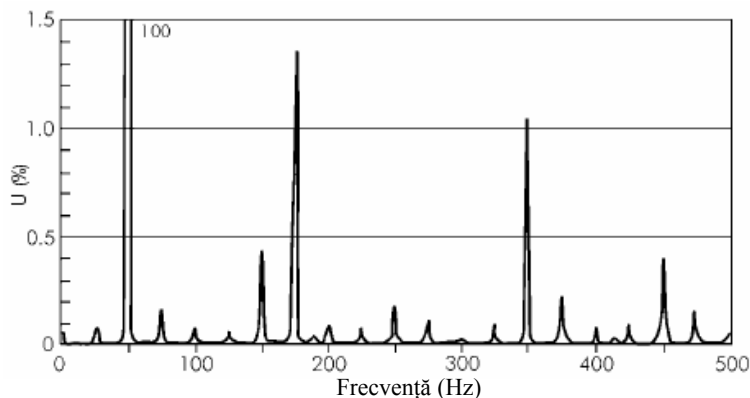
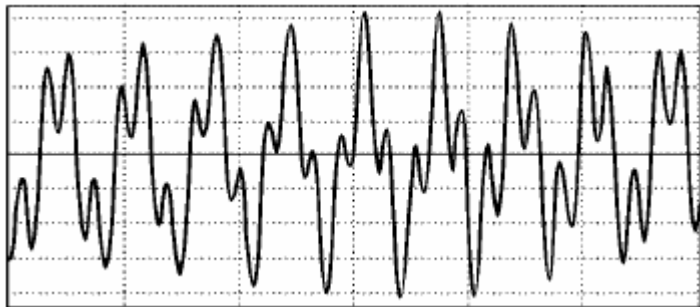


Figura 10 – Rezultatele analizei FFT a tensiunii în timpul emisiei semnalului de transmisie de date ( $U_{ih} = 1,35$  %,  $f(U_{ih}) = 175$  Hz)

## Efectele prezenței interarmonicilor

Interarmonicile de curent pot produce distorsiuni interarmonice ale tensiunii în funcție de amplitudinile componentelor de curent și de impedanța sistemului de alimentare, corespunzătoare acestor frecvențe. Cu cât rangul frecvenței componentelor de curent este mai mare cu atât crește riscul apariției unei rezonanțe nedorite care va produce creșterea distorsiunii și suprasarcinii sau perturbații în funcționarea echipamentelor și instalațiilor consumatorului. Printre cele mai importante efecte directe ale interarmonicilor se numără:

- ◆ efecte termice
- ◆ oscilații de joasă frecvență în sistemele mecanice
- ◆ perturbații în funcționarea lămpilor fluorescente și a dispozitivelor electronice. În practică, funcționarea oricărui echipament care este sincronizat cu trecerea prin zero sau prin maxim a tensiunii de alimentare poate fi perturbată (figura 11).
- ◆ interferențe cu semnalele de comandă și de protecție de pe liniile electrice. Acesta este, în prezent, efectul cel mai nociv al interarmonicilor
- ◆ supraîncărcarea filtrelor pasive paralele în cazul unor componente spectrale de rang înalt
- ◆ interferențe în telecomunicații;
- ◆ perturbații acustice
- ◆ saturarea transformatoarelor de curent.



*Figura 11 – Treceri multiple prin zero ale curbei de tensiune ca rezultat al distorsiunii*

Cele mai comune distorsiuni produse de interarmonici se reflectă în variații ale amplitudinii tensiunii (valorii efective a acesteia) care au ca efect apariția de flicker.

## Fluctuații de tensiune și flicker

Tensiunea de alimentare poate fi scrisă sub forma:

$$u(t) = U_1 \sin(\omega_1 t) [1 + m \sin(\omega_i t)] + \sum_h U_h \sin(\omega_h t) \quad (1)$$

$$u(t) = U_1 \sin(\omega_1 t) + \left[ \sum_h U_h \sin(\omega_h t) \right] [1 + m \sin(\omega_i t)] \quad (2)$$

unde  $\omega_1 = 2\pi f_1$  și  $m$  este factorul de modulație pentru semnalul cu pulsația  $\omega_i = 2\pi f_i$ .

Relațiile de mai sus pun în evidență posibilitatea apariției fluctuațiilor de tensiune prin modularea componentei fundamentale cu armonici întregi. Cel de al doilea caz are o importanță practică mai redusă.

Dacă se ia în considerație numai componenta fundamentală a tensiunii, relația devine:

$$u(t) = U_1 \sin(\omega_1 t) [1 + m \sin(\omega_i t)] = U_1 \sin \omega_1 t + \frac{mU_1}{2} [\cos(\omega_1 - \omega_i)t - \cos(\omega_1 + \omega_i)t] \quad (3)$$

În această relație, alături de componenta fundamentală, sunt puse în evidență două componente ale căror frecvențe sunt asociate cu cea a semnalului modulator, ele fiind situate simetric, de fiecare parte, față de frecvența fundamentală. Variațiile periodice ale tensiunii ar putea fi considerate ca variații ale valorii efective (sau valorii maxime) a acesteia sau ca rezultat al prezenței interarmonicilor laterale care modulează tensiune de alimentare.

De exemplu, pentru  $u(t) = \sin(2\pi f t) + m \sin(2\pi f_i t)$  (considerând că  $U_1 = 1$ ), variația maximă a amplitudinii tensiunii este egală cu amplitudinea interarmoniciei, în timp ce variația valorii efective a tensiunii depinde atât de amplitudinea cât și de frecvența interarmoniciei. În figura 12 se prezintă procentul maxim al variației valorii

# Interarmonici

efective a tensiunii, determinat pe durata mai multor perioade ale frecvenței fundamentale, produsă de interarmonici de diferite frecvențe, dar cu amplitudine constantă,  $m = 0,2\%$  din componenta fundamentală a tensiunii.

Din figura 12 se poate constata că influența interarmonicilor, având o frecvență mai mare decât dublul frecvenței fundamentale, este mică față de influența interarmonicilor cu frecvență sub această valoare (100 Hz). În cazul prezenței interarmonicilor există riscul apariției fluctuațiilor de tensiune care pot produce flicker dacă, pentru o anumită frecvență, se depășește o valoare limită. Astfel, dacă  $f_i \leq f_1$  și, în particular, pentru  $f_i$  în vecinătatea frecvenței fundamentale ( $f_i = f_1 \pm 15$  Hz), modularea componentei fundamentale produce variații ale valorii efective a tensiunii de alimentare, devenind o sursă de flicker. Acest fenomen poate fi observat atât la lămpile incandescente, cât și la cele fluorescente, chiar dacă fenomenul, domeniul de frecvențe și amplitudinile admise sunt complet diferite.

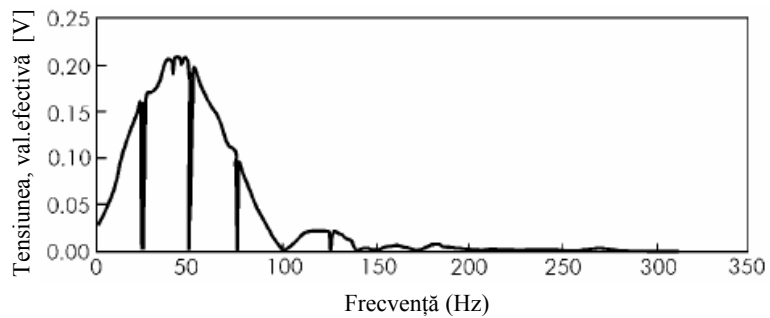


Figura 12 – Dependența maximului valorii efective a variației tensiunii în funcție de frecvența interarmonică de amplitudine constantă (0,2 % din amplitudine componentei fundamentale) [10]

O sursă particulară de flicker o reprezintă sistemul de semnale pe linii prezentat anterior. Deși au amplitudine mică, aceste semnale pot crea condiții de apariție a flickerului în cazul unor lămpi sensibile, așa cum sunt lămpile fluorescente economice compacte. Acest mod de perturbare apare rareori la lămpile cu balast electronic.

## Măsurare

Majoritatea aparatelor de măsurare în domeniul frecvenței lucrează corect atunci când în semnalul măsurat sunt prezente numai armonici. Aceste instrumente folosesc un circuit sincronizat pe fază pentru a sincroniza măsurătoarea cu componenta de frecvență fundamentală și pentru a eșantiona semnalul pe durata unei sau a mai multor perioade, în vederea aplicării analizei utilizând Transformare Fourier Rapidă (FFT – Fast Fourier Transformation). Datorită sincronizării pe fază, eșantioanele “unei perioade unice” pot să dea o reprezentare corectă a spectrului curbei, numai dacă aceasta nu conține interarmonici. Dacă sunt prezente și frecvențe nearmonice (în raport cu perioada de măsurare) și/sau curba eșantionată nu este periodică, în acest interval, pot să apară dificultăți de interpretare a rezultatelor.

Instrumentul fundamental de analiză este Transformarea Fourier (TF). În practică, semnalul este analizat pe un interval de timp limitat (fereastra de măsurare temporală  $T_w$ ) utilizând un număr limitat de eșantioane ( $M$ ) a semnalului real. Rezultatele Transformării Fourier Discretă (DFT - Discrete Fourier Transformation) depind de alegerea valorilor  $M$  și  $T_w$ . Inversul lui  $T_w$  este frecvența fundamentală Fourier  $f_F$ . DFT este aplicată semnalului real în intervalul ferestrei de timp; semnalul din exteriorul acestei ferestre nu este prelucrat, dar se presupune că el este identic cu cel din interiorul acesteia. Pe această cale, semnalul real este substituit cu unul virtual, periodic, având perioada egală cu lățimea ferestrei.

La analiza curbelor periodice un se ridică nici o problemă privind sincronizarea timpului de analiză cu perioada fundamentală a curbei (chiar dacă are armonici). Dacă curba conține interarmonici, analiza devine mult mai dificilă. Frecvențele componentelor interarmonice nu sunt multipli întregi ai frecvenței fundamentale și adesea ele variază în timp, ceea ce face ca măsurătorile să fie și mai dificile.

Din cauza prezenței, atât a componentelor armonice, cât și a celor interarmonice, frecvența Fourier, care este cel mai mare divizor comun al tuturor frecvențelor componente conținute în semnal, este diferită de frecvența fundamentală a tensiunii de alimentare fiind, de regulă, foarte mică. Apar două probleme:

- ♦ timpul minim de eșantionare trebuie să fie lung și numărul eșantioanelor să fie mare
- ♦ este dificil să fie evaluată frecvența fundamentală Fourier având în vedere faptul că nu toate frecvențele componentelor semnalului sunt cunoscute *a priori*.

# Interarmonici

Această situație poate fi ilustrată prin următoarele exemple:

Semnalul care trebuie să fie analizat este suma dintre componenta fundamentală (50 Hz), o interarmonică (71,2 Hz) și o armonică (2500 Hz). Frecvența fundamentală Fourier este 0,2 Hz, fiind mult mai mică decât frecvența componentei fundamentale. Perioada corespunzătoare este 5 s și, în consecință, durata minimă de eșantionare este, de asemenea, 5 s. Dacă frecvența de eșantionare este 10 kHz, care în practică, este valoare minimă aplicabilă ce rezultă din criteriul Nyquist (Anexa 2), numărul minim necesar de eșantioane  $M$  este 50 000. Dacă nu ar exista componenta interarmonică (71,2 Hz), atunci timpul minim de măsurare ar fi 20 ms și numărul de eșantioane ar fi 200.

Semnalul care trebuie să fie analizat este suma dintre componenta fundamentală (50 Hz) și o armonică (2500 Hz), amplitudinile acestora variind cu frecvențele 0,1 Hz, respectiv 5 Hz. Efectul acestor modulații este apariția a patru interarmonici cu frecvențele 49.9 Hz, 50,1 Hz, 2495 Hz și 2505 Hz. Frecvența fundamentală Fourier este 0,1 Hz și timpul de eșantionare minim este de 10 s iar  $M = 100\ 000$ .

În aplicațiile practice, datorită limitărilor echipamentului și a software, numărul eșantioanelor  $M$  nu poate depăși o anumită valoare și, în consecință, timpul de măsurare este limitat. Utilizarea unui timp de măsurare diferit de perioada fundamentală Fourier determină o discontinuitate în semnal la începutul și sfârșitul ferestrei de măsurare. Aceasta conduce la erori în identificarea componentelor, fiind cunoscute sub numele de dispersie a spectrului. O posibilă soluție a acestei probleme este folosirea unei ferestre de timp "ponderate" aplicată semnalului care variază în timp, înainte analizei FFT. În practică se folosesc două ferestre de măsurare: fereastra dreptunghiulară și fereastra Hanning (Anexa 1).

## Standardizare

### Factori standardizați

În tabelul 2 sunt indicați câțiva factori numerici privind conținutul de interarmonici, folosiți în diferite documente de standardizare.

Factor	Definiție
Amplitudinea interarmonicii în raport cu componenta fundamentală (curent sau tensiune)	$Q_i/Q_1$
Reziduul deformant (conținutul total de armonici)	$TDC = \sqrt{Q^2 - Q_1^2}$
Factorul total de distorsiune	$TDR = \frac{TDC}{Q_1} = \frac{\sqrt{Q^2 - Q_1^2}}{Q_1}$
Factorul total de distorsiune interarmonică	$THID = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n Q_i^2}}{Q_1}$
Factorul total de distorsiune subarmonică	$TSHD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^S Q_i^2}}{Q_1}$
$Q$ = valoarea efectivă totală a curentului sau tensiunii	
$Q_1$ = valoarea efectivă a componentei fundamentale	
$Q_i$ = valoarea efectivă a interarmonicii	
$i$ = numărul curent al interarmonicii	
$n$ = numărul total al interarmonicilor considerat	
$S$ = numărul total al subarmonicilor considerate	

Tabelul 2 - Factori de distorsiune armonică folosiți în standarde

# Interarmonici

## Metodă standardizată de măsurare

Măsurarea interarmonicilor este dificilă și cu un rezultat care depinde de numeroși factori, ceea ce explică încercarea de a dezvolta o metodă de “măsurare” care să simplifice procesul de măsurare și să producă rezultate reproductibile. Standardul [6] sugerează o metodă de măsurare a interarmonicilor bazată pe conceptul de “grupare”. Baza lui este analiza Fourier realizată pe o fereastră de timp având durată egală cu 10 perioade ale fundamentalei (50 Hz), adică aproximativ 200 ms. Eșantionarea este sincronizată cu frecvența tensiunii de alimentare cu ajutorul circuitului de sincronizare pe fază. Rezultatul este un spectru cu rezoluția de 5 Hz. Standardul definește metoda de prelucrare a liniilor spectrale individuale de 5 Hz cu scopul de a determina grupurile de armonici sau de interarmonici, la care se referă recomandările standardului și rapoartele tehnice.

Grupurile de armonici și de interarmonici sunt calculate cu relațiile din figura 13.

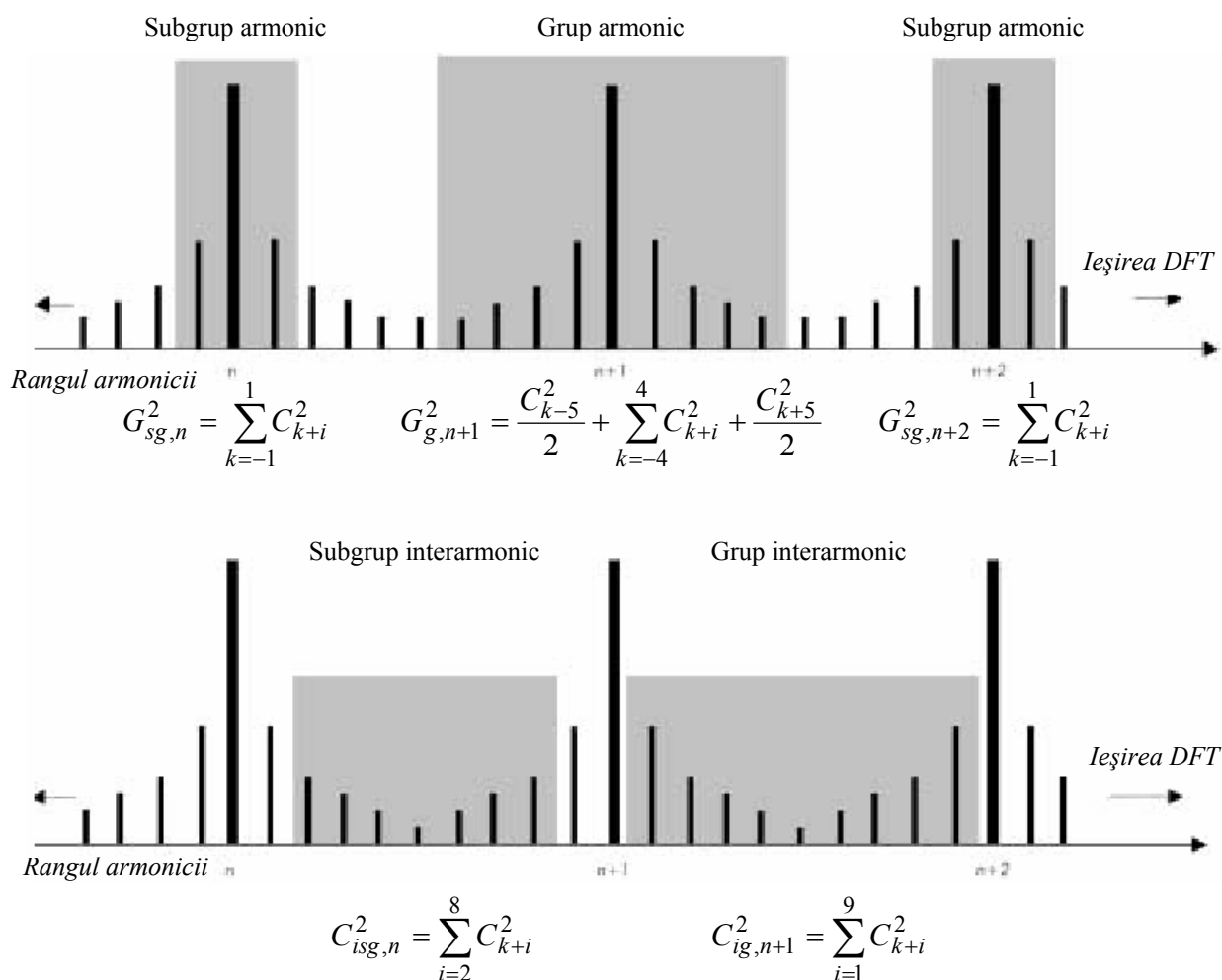


Figura 13 - Ilustrarea principiului grupării armonice și interarmonice

## Definiții referitoare la conceptul de grupare

### Valoarea efectivă a grupului armonic

Rădăcina pătrată din suma pătratelor amplitudinilor unei armonici și a componentelor spectrale adiacente acesteia din interiorul ferestrei de observare, însumând astfel conținutul energetic al liniilor vecine cu acela propriu al armonicii.

# Interarmonici

## Valoarea efectivă a subgrupului armonic

Rădăcina pătrată din suma pătratelor amplitudinilor unei armonici și a celor două componente spectrale imediat adiacente acesteia, cu scopul de a include efectul fluctuației de tensiune pe durata măsurării. Un subgrup al componentelor de ieșire a DFT este obținut prin însumarea conținutului energetic al componentelor de frecvență direct adiacent armonicii cu acela propriu al armonicii.

## Valoarea efectivă a grupului interarmonic

Valoare efectivă a tuturor componentelor în intervalul dintre două frecvențe armonice consecutive (a se vedea figura 13)

## Valoarea efectivă a unui grup interarmonic centrat

Valoare efectivă a tuturor componentelor în intervalul dintre două frecvențe armonice consecutive excluzând frecvența componentelor adiacente frecvențelor armonice (a se vedea figura 13).

Informații mai detaliate referitoare la acest concept de măsurare pot fi găsite în standardul [6]. Pe baza acestor definiții, măsurătorile pot fi făcute pentru orice grup interarmonic, ca și pentru factorul total de distorsiune armonică raportate la componenta fundamentală, la valoarea efectivă sau la orice altă valoare de referință. Aceste valori stau la baza pentru determinarea valorilor limită.

Această metodă este atractivă pentru monitorizare în cazul unor reclamații sau pentru încercări/măsurători de compatibilitate, deoarece nivelurile limită pot fi definite pe baza distorsiunii totale și acestea nu trebuie să se refere la măsurarea unor frecvențe particulare. Această metodă nu este adecvată pentru scopuri de diagnosticare.

## Limite de compatibilitate

Procesul de standardizare este încă într-o fază inițială, fiind în perioada de acumulare de informații și de date.

Nivelul limită de 0,2 % pentru interarmonica de tensiune este larg aplicat în lipsa unor propuneri mai bune. El a fost introdus, mai ales, din cauza sensibilității sarcinii din sisteme principale de semnalizare, dar aplicarea lui la alte cazuri, fără a se ține seama de efectele fizice posibile, poate conduce la soluții neeconomice, de exemplu filtre pasive scumpe. Câteva din prevederile unor documente sunt prezentate mai jos, punându-se în evidență aspecte inconsistente și diferențe semnificative.

## Prevederile Comisiei Electrotehnice Internaționale (IEC)

În conformitate cu recomandările CEI, interarmonicile de tensiune sunt limitate la 0,2 % pentru o gamă de frecvență a componentelor până la 2 kHz.

Standardul [7] indică nivelul de test de imunitate pentru interarmonici situate în diferite game de frecvențe. În funcție de clasa echipamentului nivelurile de tensiune sunt de până la 1,5 %  $U_1$  (1000 - 2000 Hz). Nivelurile de test pentru interarmonicile mai mari de 100 Hz sunt de 2 - 9 %.

În documentul [5] nivelurile de compatibilitate sunt formulate numai pentru cazul interarmonicilor de tensiune ale căror frecvențe sunt în vecinătatea componentei fundamentale, având ca efect modularea tensiunii de alimentare și flicker. În figura 14 se prezintă nivelul de compatibilitate pentru o singură tensiune interarmonică, exprimat în procente din amplitudinea componentei

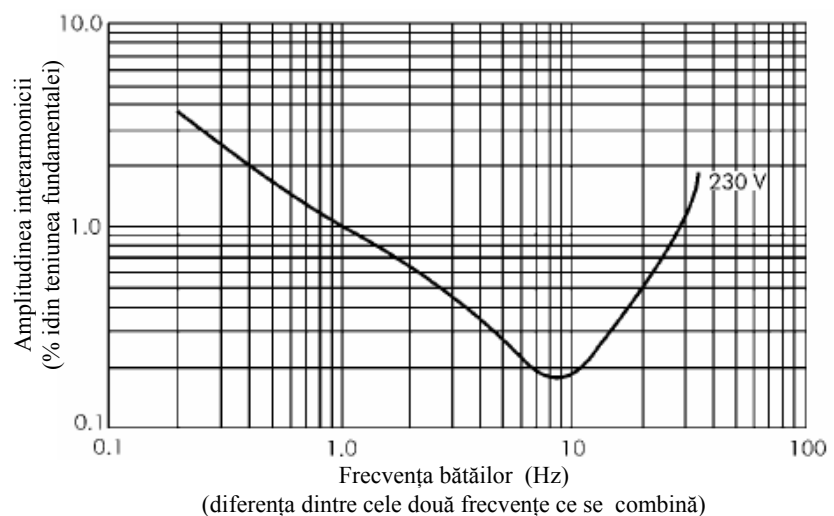


Figura 14 – Niveluri de compatibilitate pentru interarmonici în raportat cu efectul de flicker (efectul de bătaie) [5].

# Interarmonici

fundamentale ca funcție de frecvența bătailor celor două componente a căror interacțiune produce interarmonică. Caracteristica se referă la nivelul de flicker  $P_{st} = 1$  pentru o lampă cu incandescență de 230 V.

Recomandări mai detaliate privind valorile limită ale tensiunilor de semnalizare din sistemele electrice sunt date mai jos:

- ◆ *Semnale de telecomandă centralizată* (Ripple control signals): Nivelul acestor semnale nu trebuie să depășească valorile armonicilor impare care nu sunt multiplu de 3 din aceeași bandă de frecvențe [5] (tabelul 3). În cazurile practice, aceste valori sunt cuprinse în domeniul 2 - 5 %  $U_N$ .
- ◆ *Semnale purtătoare de medie frecvență pe linia electrică*: Semnale a căror valoare este de până la 2 %  $U_N$ .
- ◆ *Semnale purtătoare de radio-frecvență pe linia electrică*: Nivel de compatibilitate în studiu; nu trebuie să depășească 0,3 %.
- ◆ *Sistemele de marcare*: Producătorii de echipamente trebuie să garanteze compatibilitatea cu mediul de lucru.

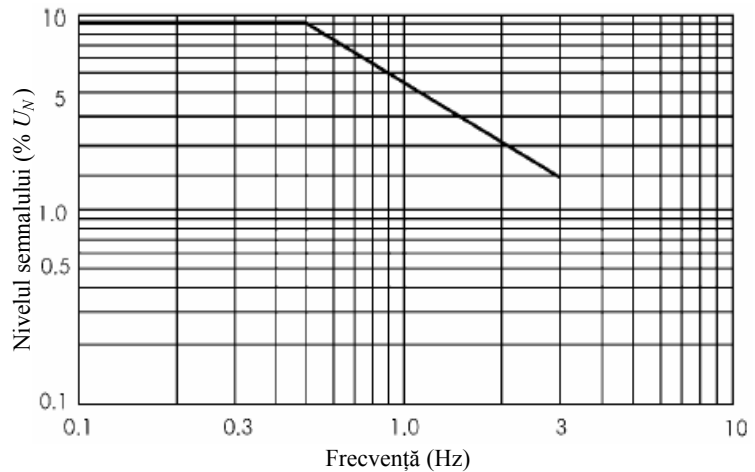


Figura 15 – Curba Meister pentru sistemele de semnale de telecomandă centralizată din rețele publice (100 Hz la 3000 Hz) [5]

În unele țări este oficial utilizată, așa numita *curbă a lui Meister* prezentată în figura 15.

Ordinul armonicii	5	7	11	13	$17 \leq h \leq 49$
Valoarea efectivă (% din componenta fundamentală)	6	5	3,5	3	$2,27 * (17/h) - 0,27$

Tabelul 3 – Valorile armonicilor folosite ca bază pentru determinarea nivelurilor de compatibilitate interarmonică [5]

## CENELEC (Standard EN 50160)

Peste 99 % din zi, valorile medii pe durata a trei secunde ale tensiunii de semnal trebuie să fie mai mici sau egale cu cele date în figura 16.

### Limitele emisiei subarmonice și interarmonice [13]

În Marea Britanie, de exemplu, se presupune că sistemul de telecomandă centralizată nu este folosit și că astfel sarcina consumatorului poate fi conectată fără evaluarea faptului dacă emisia interarmonicilor individuale este mai mică decât valorile din tabelul 4. Limitele pentru interarmonicile particulare cu frecvențele între 80 și 90 Hz pot fi interpolate linear din limitele prezentate în tabelul 4.

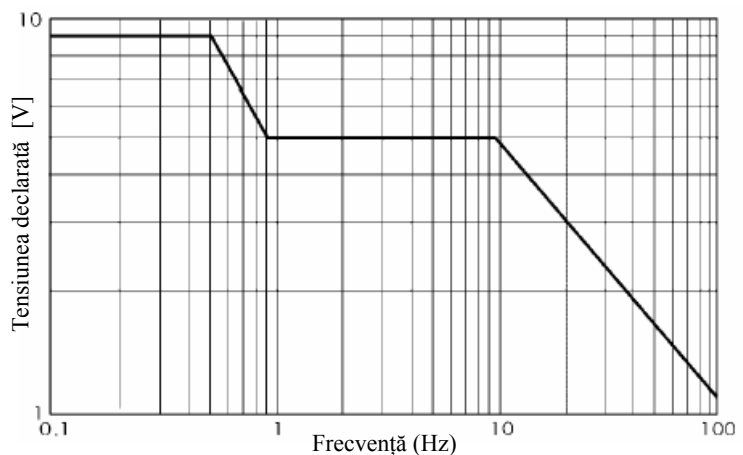


Figura 16 – Nivelurile tensiunii semnalelor utilizate în rețelele publice de MT [11]

# Interarmonici

Frecvența armonicilor sau a interarmonicilor	< 80	80	90	> 90 și < 500
Distorsiune de tensiune în procente din fundamentală	0,2	0,2	0,5	0,5

Tablul 4 Limitele de emisie ale subarmonicilor și interarmonicilor

## Metode de limitare a interarmonicilor și de reducere a efectelor acestora

Metodele de eliminare a efectelor interarmonicilor includ:

- ♦ reducerea nivelului de emisie
- ♦ reducerea sensibilității sarcinii
- ♦ reducerea cuplajului dintre echipamentul de producere și sarcină.

Metodele utilizate sunt aceleași ca pentru armonici.

Factori suplimentari trebuie să fie luați în considerare la proiectarea filtrelor pasive. De exemplu, rezonanța între circuitele filtrului și interarmonicile din rețeaua electrică poate fi amplificată și să determine importante distorsiuni și fluctuații ale tensiunii. Circuitele filtrului trebuie să fie proiectate astfel încât să aibă un factor de amortizare mare.

În figura 17 se prezintă un exemplu privind caracteristicile de impedanță ale unui filtru pasiv (armonicile 3, 5, 7 și 12) văzute de la bornele de intrare ale convertorului care alimentează o instalație amplă a unui cuptor cu arc electric. Linia punctată corespunde filtrului neamortizat. Apare un risc real de rezonanță pe interarmonicile adiacente 120 și 170 Hz. Dacă se utilizează amortizarea pentru armonicile de rang 3 și 7, se reduce pericolul apariției rezonanței. La proiectarea unui filtru se impune realizarea unui compromis între acuratețea acordării și pierderile de putere, care se ia în considerare la alegerea factorului de calitate al filtrului.

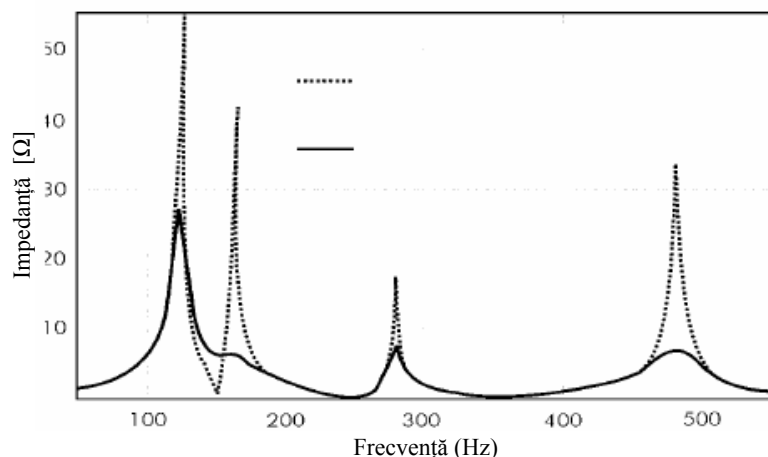


Figura 17 – Exemplu de impedanță văzută de la bornele de ieșire ale convertorului [10].

Proiectarea unui filtru trece bandă, cu bandă îngustă, pune câteva probleme. Abaterea frecvenței normale a rețelei de alimentare poate fi importantă, în special atunci când se combină cu modificări în frecvența de acord, determinate de toleranțele componentelor, de îmbătrânire, de variația temperaturii și de modificările ale impedanței rețelei de alimentare.

Variațiile rezultate privind frecvența de rezonanță a filtrului, considerând o bandă foarte îngustă a filtrului trece bandă, poate să reducă în mod semnificativ eficiența filtrării, chiar dacă modificarea este mică. Dacă se impune alegerea unui factor de calitate redus, care conduce la lărgirea benzii filtrului, rezultă un avantaj din punct de vedere a filtrării interarmonicilor.

Perturbațiile produse de sistemele de semnalizare pot fi eliminate prin folosirea filtrelor serie acordate pe frecvențele dorite și plasate, în mod corespunzător, în rețeaua electrică. Alte soluții implică creșterea nivelului de imunitate al echipamentului în funcțiune sau utilizarea filtrelor active.

## Concluzii

Prezentarea de mai sus privind existența interarmonicilor, sursele principale de generare a acestora și forma caracteristicilor în spectrul continuu și discret, permit formularea unor concluzii cu aspect general.

În primul rând, în marea majoritate a cazurilor valorile și frecvențele interarmonicilor de curent și de tensiune reprezintă mărimi stohastice care depind de numeroși parametri complecși ai proceselor tranzitorii.

În al doilea rând, evaluarea valorii și frecvenței interarmonicilor este posibilă pentru un proces particular, luat în considerare.

În al treilea, încă nu există reguli standardizate privind interarmonicile, deși există necesitatea practică pentru acestea.

## Referințe și bibliografie

- [1] *Arrillaga J, Watson N R, Chen S: Power system quality assessment, Wiley, 2000*
- [2] *Gunther E W: Interharmonics in power systems, UIEPQ-9727*
- [3] *Interharmonic Task Force Working Document – IH0101 20001, IEEE*
- [4] *IEC 61000-2-1: 1990 - Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment – Section 1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems*
- [5] *IEC 61000-2-2: 2002 - Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment – Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. (also materials used in preparation of the standard, obtained from the authors)*
- [6] *IEC 61000-4-7: 2002 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4: Testing and measurement techniques Section 7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto*
- [7] *IEC 61000-4-13: 2002 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4: Testing and measurement techniques Section 13: Harmonics and interharmonics including mains signalling at ac power port, low frequency immunity tests (also materials used in preparation of the standard, obtained from the authors)*
- [8] *Kloss A: Oberschwingungen, vde Verlag, ISBN 3-8007-1541-4*
- [9] *Materials used in preparation of standard IEC 61000-2-4 (obtained from the authors)*
- [10] *Mattaveli P, Fellin L, Bordignon P, Perna M: Analysis of interharmonics in dc arc furnace installations, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, October 14-16, 1998*
- [11] *EN 50160: 1999 - Voltage characteristics of electricity supplied in public distribution systems*
- [12] *Staudt V: Effects of window functions explained by signals typical to power electronics, 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, October 14-16, 1998*
- [13] *Engineering Recommendation G5/4, Electricity Association, Feb. 2001.*

## Anexa 1

Transformata Fourier reprezintă cea mai obișnuită metodă de analiză a semnalelor. Teoria fundamentală a analizei spectrale consideră că analiza este efectuată pe un interval temporal cuprins între  $-\infty$  și  $+\infty$ . Transformata Fourier Discretă (DFT) sau varianta Transformata Fourier Rapidă (FFT) pot să introducă componente spectrale suplimentare pentru semnalul analizat. Acest efect apare din cauza faptului că DFT și FFT lucrează cu un număr finit de eșantioane, adică un segment finit al semnalului real. Spectrul rezultat și cel real vor fi identice numai dacă semnalul este periodic și dacă intervalul temporal analizat va avea un număr întreg de perioade. Această condiție se realizează foarte greu în practică.

Rezultatele prezentate în figurile A.1.1 și A.1.2 indică modul în care poate să arate, de fapt, spectrul. Pentru același semnal au fost obținute diferite spectre însă, în cazul fig. A.1.2, s-a folosit un interval temporal cu 2,5 % mai mare. În bibliografie acest efect se numește dispersie spectrală. S-ar putea spune că o parte a energiei componentei spectrale principale a fost transferată componentelor laterale. A fost propusă următoare interpretare a fenomenului. Eșantionarea în vederea analizei DFT poate fi comparată cu multiplicarea unei fereastre dreptunghiulare, care corespunde duratei analizei, cu semnalul real, de durată infinită, fig.A.1.3.

Pentru a limita dispersia spectrală este necesar ca valorile semnalului analizat să nu varieze rapid la extremitățile intervalului de eșantionare.

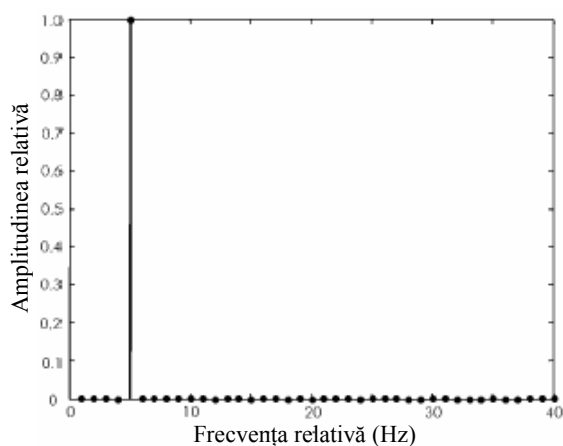


Fig. A.1.1 - Modulul spectrului semnalului, pentru analiză au fost utilizate exact 4 perioade.

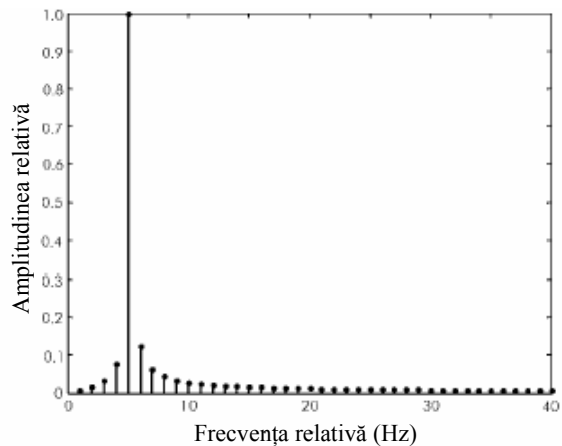
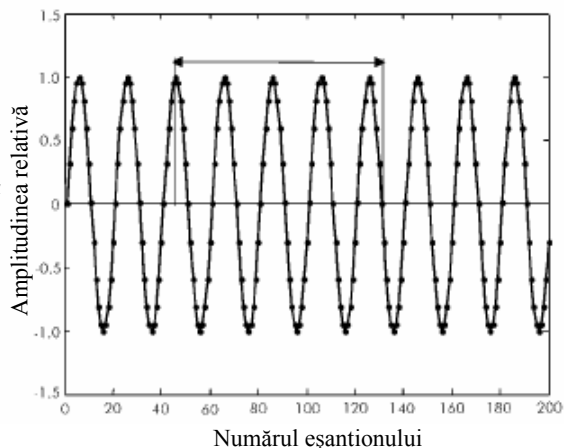


Fig. A.1.2 - Modulul spectrului semnalului, pentru analiză au fost utilizate 4,1 perioade.

Fig. A.1.3 - Achiziția eșantioanelor pentru analiza DFT



# Interarmonici

În figurile A.1.4 se prezintă modul în care trebuie utilizată fereastra pentru analiza semnalelor.

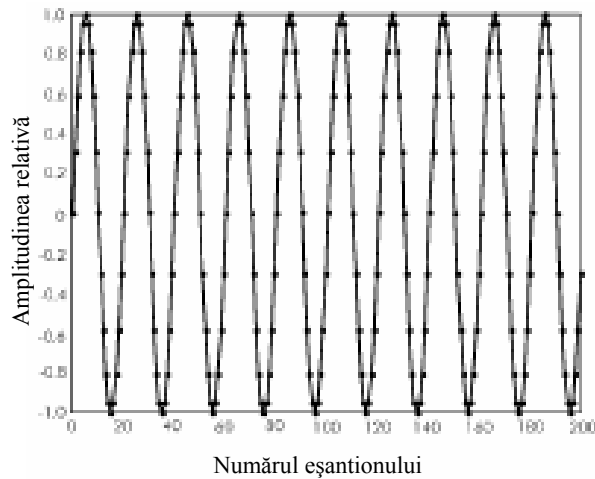


Fig. A.1.4a – Extragerea eșantioanelor pentru analiză

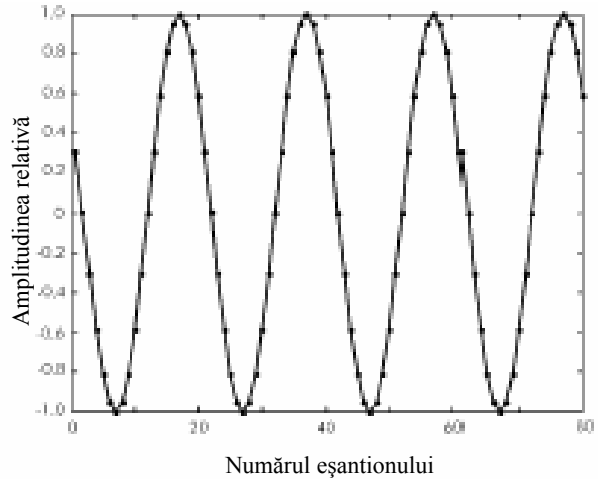


Fig. A.1.4b – Efectul ferestrei de timp dacă se impune  $y_i = w_i * x_i$   
unde  $y_i$  = semnal cu fereastra impusă,  
 $x_i$  = eșantioane măsurate,  
 $w_i$  = funcția ferestră cu indicele  $i$  variind de la 1 la  $N$  (numărul eșantionului)

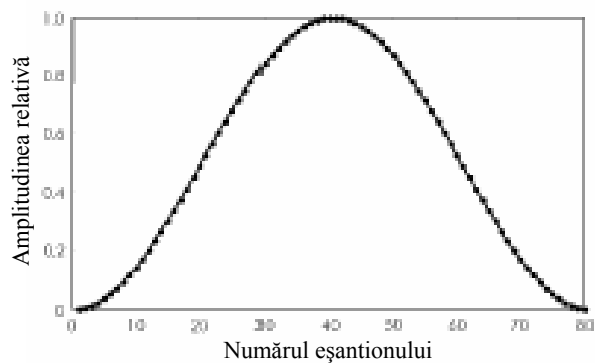


Fig. A.1.4c – Analiza spectrală cu DFT

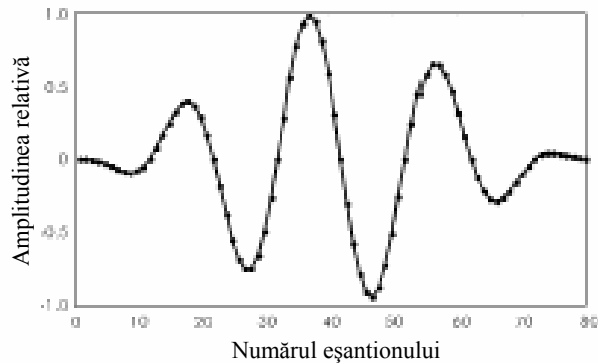


Fig. A.1.4d – Analiza spectrală cu FFT

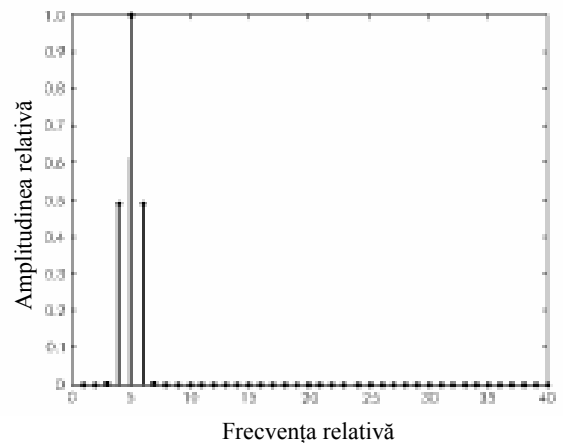


Fig. A.1.4e – Spectrul de amplitudine în urma analizei spectrale

## Interarmonici

În figura A.1.5 se prezintă modul în care metodele indicate au influențat asupra spectrului din exemplu din fig. A.1.2. A fost folosită fereastra Hanning pentru scopul acestui exemplu. Efectul constă în reducerea numărului liniilor spectrale rezultate, iar spectrul se apropie de cel corect, așa cum este prezentat în fig. A.1.1

În bibliografia curentă se dau mai multe tipuri de ferestre pentru analiza DFT. Cele mai obișnuite sunt (figura A.1.6):

- ◆ fereastra triunghiulară similară ferestrei Bartlett
- ◆ fereastra Hanning
- ◆ fereastra de tip cosinus sau Hann sau fereastra Hamming

Acste ferestre sunt cele mai utilizate în instrumentația de măsurare. Utilizarea lor nu elimină problemele de dispersie spectrală, însă limitează semnificativ efectele duratei limitate de observare. Acest fapt este, în particular, evident în îmbunătățirea rezoluției spectrale.

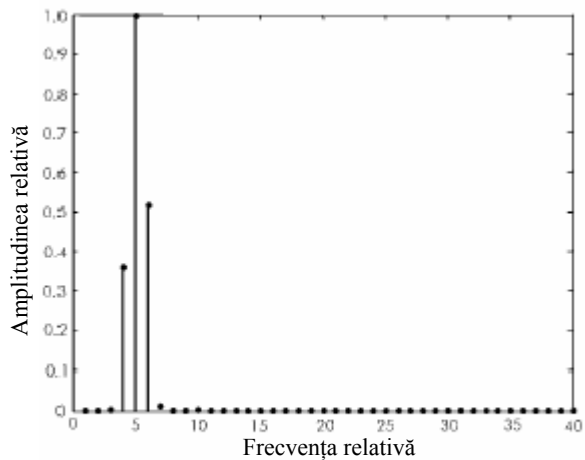


Fig. A.1.5 – Un exemplu de aplicare a ferestrei Hanning la analiza DFT

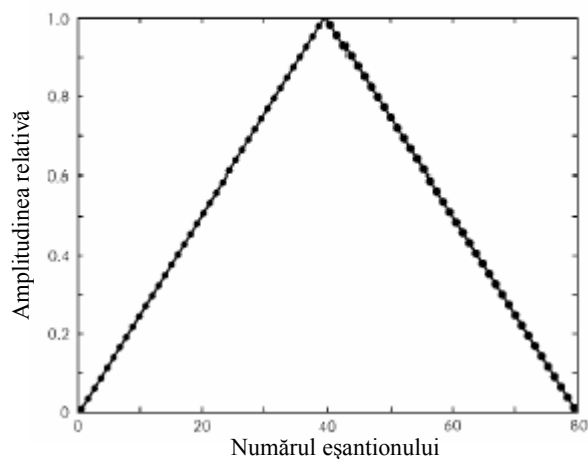


Fig. A.1.6a – Fereastră triunghiulară

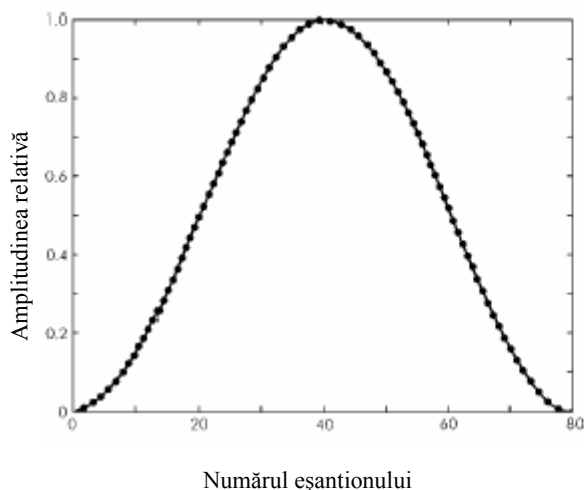


Fig. A.1.6b – Fereastră Hanning

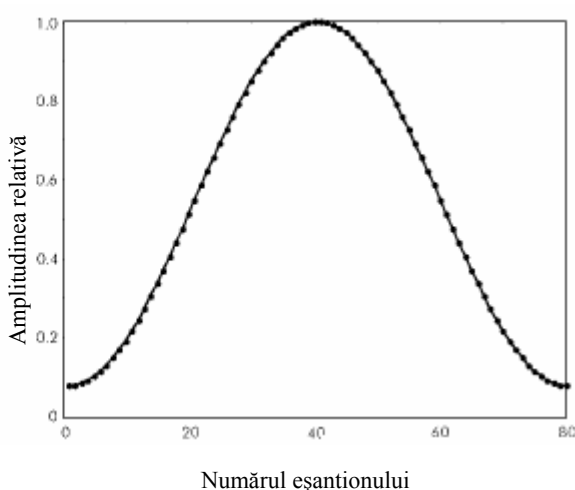


Fig. A.1.6c – Fereastră Hamming

## Anexa 2

Cea mai dificilă problemă asociată cu eșantionarea unui semnal continuu este problema ambiguității. Esența acesteia este ilustrată în figura A.2.1. Din această figură rezultă că același set de eșantioane poate descrie câteva curbe diferite, pe care echipamentul de măsurare nu le identifică.

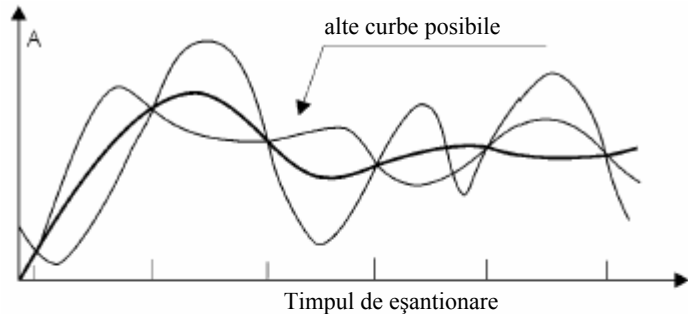


Fig. A.2.1 – Ambiguitate

Principiul analizei de frecvență constă în reprezentarea unei curbe oarecare printr-o sumă de semnale sinusoidale. O astfel de prezentare permite analiza cantitativă a problemei ambiguității. În acest scop să considerăm curba din figura A.2.2

Un semnalul  $x(t)$  este eșantionat la intervale de timp egale  $h$ , determinând momentele de eșantionare pentru care valorile măsurate sunt indicate pe figură. Presupunem că funcția  $x(t)$  este sinusoidală cu frecvența  $f_0$ . Aceleași puncte ar putea să reprezinte sinusoide având frecvențele  $f_1$  sau  $f_2$ , care sunt multipli (nu în mod necesar multipli întregi) ai frecvenței  $f_0$ . Aceleași diferite frecvențe sunt, în mod evident, asociate cu perioada de eșantionare. Frecvența  $f_0$  este considerată frecvența fundamentală.

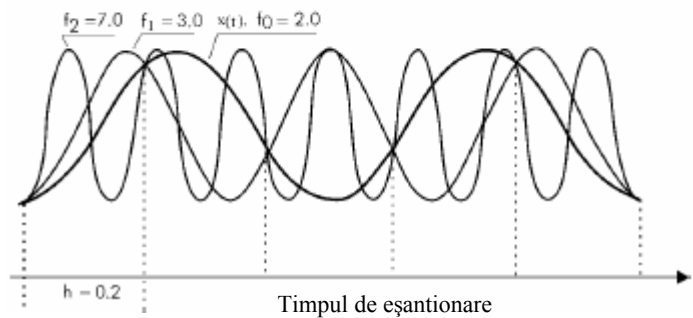


Fig. A.2.2. – Analiza ambiguității

Se poate afirma, fără a se prezenta demonstrația matematică, că domeniul frecvențelor pentru care efectul ambiguității nu apare se extinde de la  $f_0 = 0$  până la  $f_0 = f_N$ , unde  $f_N$  este frecvența maximă, numită frecvența Nyquist. Aceasta determină limita de frecvență privind valorile de eșantionare, așa numita limita Shannon, dincolo de care reconstituirea unică a semnalului continuu nu mai este posibilă. Atunci când semnalul de analizat nu conține componente cu frecvența mai mare decât  $f_N$ , frecvența de eșantionare minimă necesară care asigură ca semnalul eșantionat să reprezinte semnalul real este dată de:

$$f_s \geq 2f_N \quad \text{sau, deoarece } f_s \geq \frac{1}{h}, \quad \text{atunci } f_N \geq \frac{1}{2h}$$

Aceasta este așa numita teoremă de eșantionare. Consecința sa arată că, pentru un spectru de frecvențe dat, componentele situate între  $f_0 = 0$  și  $f_0 = f_N$  pot fi considerate separate. Dacă semnalul conține frecvențe  $f > f_N$  aceste componente un se disting.

Din acest motiv, este necesar să se limiteze banda semnalului de măsurat pentru a reduce consecințele directe ale ambiguității la eșantionarea lui. Aceasta implică necesitatea filtrării semnalului de măsurat cu ajutorul unui filtru trece-jos înaintea eșantionării (filtru antirepliere) în vederea eliminării frecvențelor mai mari decât  $f_N$ .

## *Note*

---

## Parteneri de Referință & Fondatori\*

European Copper Institute* (ECI) <a href="http://www.eurocopper.org">www.eurocopper.org</a>	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid <a href="http://www.etsii.upm.es">www.etsii.upm.es</a>	LEM Instruments <a href="http://www.lem.com">www.lem.com</a>
Akademia Gorniczo-Hutnicza (AGH) <a href="http://www.agh.edu.pl">www.agh.edu.pl</a>	Fluke Europe <a href="http://www.fluke.com">www.fluke.com</a>	MGE UPS Systems <a href="http://www.mgeups.com">www.mgeups.com</a>
Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA) <a href="http://www.citcea.upc.es">www.citcea.upc.es</a>	Hochschule für Technik und Wirtschaft* (HTW) <a href="http://www.htw-saarland.de">www.htw-saarland.de</a>	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg <a href="http://www.uni-magdeburg.de">www.uni-magdeburg.de</a>
Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) <a href="http://www.ceiuni.it">www.ceiuni.it</a>	Hogeschool West-Vlaanderen Departement PIH <a href="http://www.pih.be">www.pih.be</a>	Polish Copper Promotion Centre* (PCPC) <a href="http://www.miedz.org.pl">www.miedz.org.pl</a>
Copper Benelux* <a href="http://www.copperbenelux.org">www.copperbenelux.org</a>	International Union for Electricity Applications (UIE) <a href="http://www.uei.org">www.uei.org</a>	Università di Bergamo* <a href="http://www.unibg.it">www.unibg.it</a>
Copper Development Association* (CDA UK) <a href="http://www.cda.org.uk">www.cda.org.uk</a>	ISR - Universidade de Coimbra <a href="http://www.isr.uc.pt">www.isr.uc.pt</a>	University of Bath <a href="http://www.bath.ac.uk">www.bath.ac.uk</a>
Deutsches Kupferinstitut* (DKI) <a href="http://www.kupferinstitut.de">www.kupferinstitut.de</a>	Istituto Italiano del Rame* (IIR) <a href="http://www.iir.it">www.iir.it</a>	University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST) <a href="http://www.umist.ac.uk">www.umist.ac.uk</a>
Engineering Consulting & Design* (ECD) <a href="http://www.ecd.it">www.ecd.it</a>	Katholieke Universiteit Leuven* (KU Leuven) <a href="http://www.kuleuven.ac.be">www.kuleuven.ac.be</a>	Wroclaw University of Technology* <a href="http://www.pwr.wroc.pl">www.pwr.wroc.pl</a>
EPRI PEAC Corporation <a href="http://www.epri-peac.com">www.epri-peac.com</a>	Laborelec <a href="http://www.laborelec.com">www.laborelec.com</a>	

## Consiliul de redacție

David Chapman (Chief Editor)	CDA UK	david.chapman@copperdev.co.uk
Prof Angelo Baggini	Università di Bergamo	angelo.baggini@unibg.it
Dr Araceli Hernández Bayo	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid	ahernandez@etsii.upm.es
Prof Ronnie Belmans	UIE	ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be
Dr Franco Bua	ECD	franco.bua@ecd.it
Jean-Francois Christin	MGE UPS Systems	jean-francois.christin@mgeups.com
Prof Anibal de Almeida	ISR - Universidade de Coimbra	adealmeida@isr.uc.pt
Hans De Keulenaer	ECI	hdk@eurocopper.org
Prof Jan Desmet	Hogeschool West-Vlaanderen	jan.desmet@howest.be
Dr ir Marcel Didden	Laborelec	marcel.didden@laborelec.com
Dr Johan Driesen	KU Leuven	johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be
Stefan Fassbinder	DKI	sfassbinder@kupferinstitut.de
Prof Zbigniew Hanzelka	Akademia Gorniczo-Hutnicza	hanzel@uci.agh.edu.pl
Stephanie Horton	LEM Instruments	sho@lem.com
Dr Antoni Klajn	Wroclaw University of Technology	antoni.klajn@pwr.wroc.pl
Prof Wolfgang Langguth	HTW	wlang@htw-saarland.de
Jonathan Manson	Gorham & Partners Ltd	jonathanm@gorham.org
Prof Henryk Markiewicz	Wroclaw University of Technology	henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
Carlo Masetti	CEI	masetti@ceiuni.it
Mark McGranaghan	EPRI PEAC Corporation	mmcgranaghan@epri-peac.com
Dr Jovica Milanovic	UMIST	jovica.milanovic@umist.ac.uk
Dr Miles Redfern	University of Bath	eesmar@bath.ac.uk
Dr ir Tom Sels	KU Leuven	tom.sels@esat.kuleuven.ac.be
Prof Dr-Ing Zbigniew Styczynski	Universität Magdeburg	Sty@E-Technik.Uni-Magdeburg.de
Andreas Sumper	CITCEA	sumper@citcea.upc.es
Roman Targosz	PCPC	cem@miedz.org.pl
Hans van den Brink	Fluke Europe	<a href="mailto:hans.van.den.brink@fluke.nl">hans.van.den.brink@fluke.nl</a>



*Prof Zbigniew Hanzelka*



AGH-UST  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków  
Poland

Tel: (012) 617 28 78  
Fax: (012) 633 22 84  
Email: [hanzel@uci.agh.edu.pl](mailto:hanzel@uci.agh.edu.pl)  
Web: [www.agh.edu.pl](http://www.agh.edu.pl)



*Dr. eng. Andrzej Bien*



AGH-UST  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków  
Poland

Tel: (012) 617 28 73  
Fax: (012) 633 22 84  
Email: [abien@uci.agh.edu.pl](mailto:abien@uci.agh.edu.pl)  
Web: [www.agh.edu.pl](http://www.agh.edu.pl)



Membră a  
**EUREL**

Societatea Inginerilor Energeticieni din România  
No. 1, Lacul Tei Avenue, PO/BOX 30-33  
020371 Bucharest  
Romania

Tel: 4 0722 36 19 54  
Fax: (4 021) 610 52 83  
Email: [office@sier.ro](mailto:office@sier.ro)  
Websites: [www.sier.ro](http://www.sier.ro)

europaean  
**COPPER**  
institute

European Copper Institute  
168 Avenue de Tervueren  
B-1150 Brussels  
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70  
Fax: 00 32 2 777 70 79  
Email: [eci@eurocopper.org](mailto:eci@eurocopper.org)  
Website: [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org)