

# Armonici în sistemele electroenergetice

## 1. DEFINIȚII

**Armonică (de tensiune/de curent)** = tensiune/curent sinusoidal cu frecvența egală cu un multiplu întreg al frecvenței fundamentale a tensiunii de alimentare.

Într-un sistem de 50Hz pot să apară armonici de ordinul(rangul) 2 (100 Hz), 3 (150 Hz), 4 (200 Hz), etc. În mod normal, într-un sistem trifazat apar doar armonici de rang impar (3, 5, 7, 9). Apariția unor armonici de rang par duce cu gândul la existența unor convertoare cu deficiențe conectate în sistem.

*Regimurile nesinusoidale sau deformante de funcționare ale SEE reprezintă acele regimuri pentru care undele de tensiune și curent sunt periodice, dar cel puțin una dintre ele nu variază în timp după o lege de tip sinusoidal.*

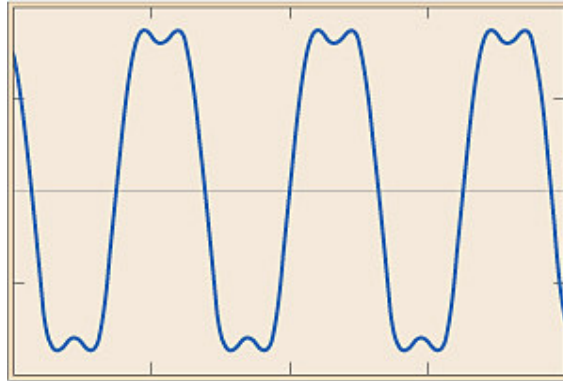
Deformarea unei curbei depinde de următorii factori:

- *natura armonicilor*, făcându-se referire la gradul de paritate sau imparitate al acestora. În funcție de ordinul (rangul) lor, armonicile se mai pot împărți în *armonici superioare* (rangul este un număr întreg) și *subarmonici* (rangul lor este un număr subunitar).
- *amplitudinea armonicilor* (se definește ca amplitudinea oricărei sinusoid). Se exprimă fie în procente din fundamentală, fie în unități absolute sau relative.
- *valoarea defazajelor dintre armonici diferite* (poziția relativă a armonicilor).

Exemple de curbe oscilografiate:

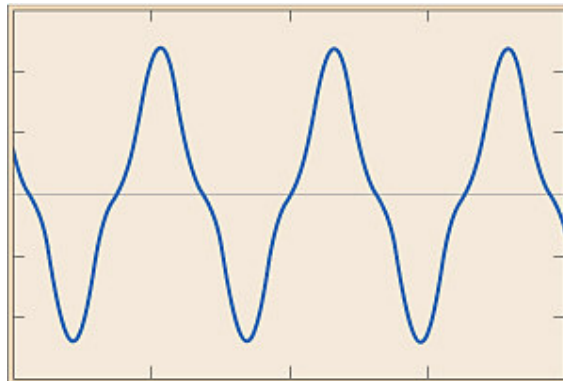
**Fig.1**

- sinusoidă turtită
- ecuație matematică  $y = \sin(x) + 0.25 \sin(3x)$
- $\Leftarrow$  sinusoidă de 50 Hz sinusoid (frecvența fundamentală) + sinusoidă cu frecvența triplă față de fundamentală (150 Hz)
- armonica de rang 3 - și amplitudinea  $\frac{1}{4}$  ( $0.25 \times$ ) față de a fundamentalei



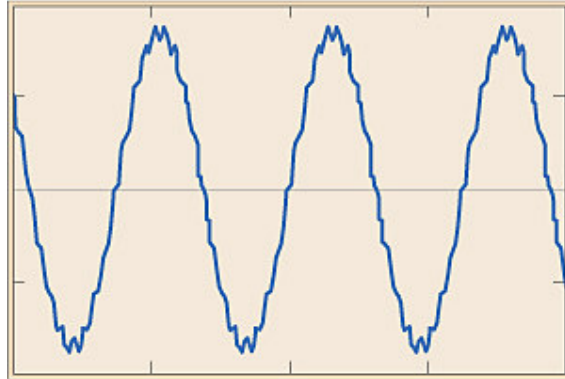
**Fig. 2**

- sinusoidă ascuțită
- ecuație matematică  $y = \sin(x) - 0.25 \sin(3x)$
- curbă cu aceeași compoziție de armonici ca și în cazul precedent, cu excepția faptului că armonica de rang 3 este în opoziție de fază cu fundamentală (sign -).  $\Rightarrow$  diferență semnificativă între



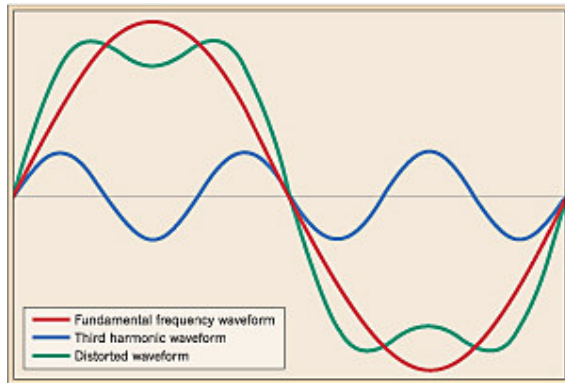
profilurile celor două curbe

**Fig. 3**



- curba conține și alte câteva armonici în plus față de cea de rang 3, unele în fază, altele defazate față de fundamentală
- pe măsură ce spectrul de armonici devine mai bogat, curba mărimii de stare are un profil mai complex, fiind mult mai deviată de la profilul unei sinusoide
- un spectru armonic bogat poate „acoperi” complet sinusoida fundamentală, nemaisemnând nici pe departe cu o sinusoidă.

**Fig.4**



**Analiza armonicilor.** Când sunt cunoscute amplitudinile și rangul armonicilor, este simplu de reconstituit curba de origine distorsionată (deformată).- prin însumarea punct cu punct a armonicilor componente. EX. curba din **Fig. 1** este sintetizată în **Fig. 4** (curba verde) prin însumarea amplitudinilor celor două componente armonice - fundamentala (curba roșie) și armonica de rang 3 (curba albastră).

Pe de altă parte, descompunerea curbei deformate în componente armonice este mult mai dificil de realizat. Acest proces necesită analiza Fourier, care implică un mare volum de calcul. Actualmente, acest lucru este facilitat de echipamentele electronice care pot realiza o analiză corectă în timp real. Analizoarele trifazate sunt capabile să înregistreze digital o curbă trifazată și să exercite funcții de analiză, inclusiv analiza Fourier, în scopul determinării conținutului de armonici. Provocarea legată de a aceste echipamente se referă la funcțiile de detectare și diagnoză a problemelor legate de armonici în majoritatea sistemelor electroenergetice.

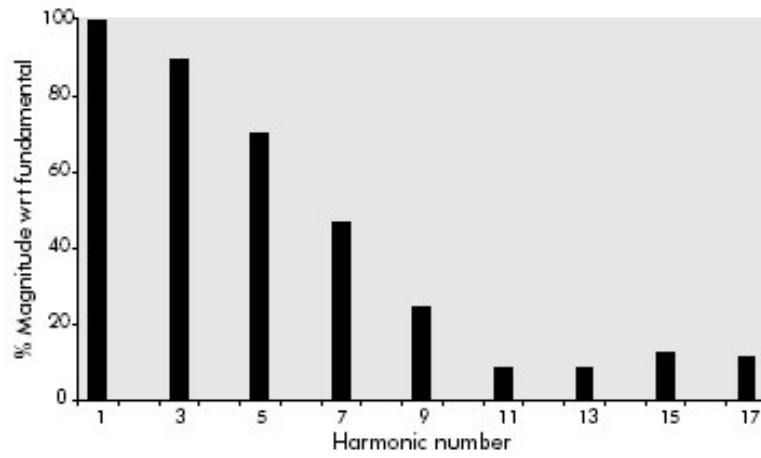
## 2. SURSE DE ARMONICI

- sursele de tensiune sau de curent* care alimentează sisteme ce conțin elemente liniare; într-un sistem electroenergetic aceste surse sunt generatoarele sincrone, pentru care chiar la mersul în gol tensiunile la borne nu sunt sinusoidale, precum și redresoarele de orice tip;
- elemente neliniare sau deformante*, reprezentate de bobine și transformatoare cu miez saturat, condensatoare neliniare, dispozitive redresoare, dispozitive semiconductoare comandate și necomandate;
- acțiunea simultană a elementelor de tipul celor a), b).

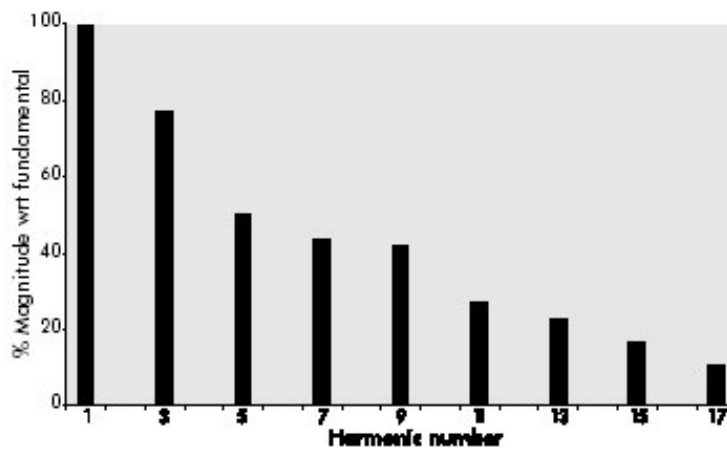
În accepțiunea Prof. Budeanu, elementele deformante se clasifică în două categorii:

- elemente deformante de categoria I* (elementele neliniare de mai sus);

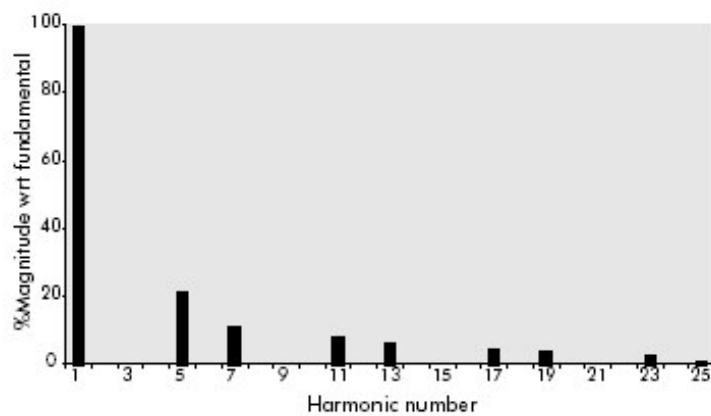
II) *elemente deformante de categoria a II-a* (reprezentate în cadrul circuitelor de curenți tari cu frecvențe industriale, de bobine și condensatoare).



**Fig.5. Spectrul de armonici al unui PC**



**Fig.6. Spectrul de armonici al unei lămpi fluorescente compacte**



**Fig.7. Spectrul de armonici al unui redresor 6 pulsuri**

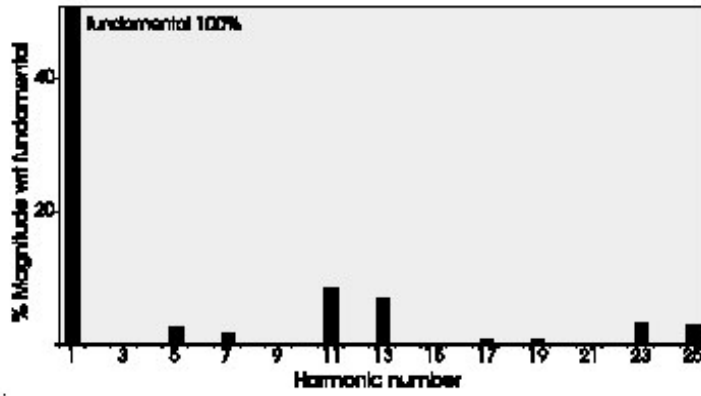


Fig.8. Spectrul de armonici al unui redresor 12 pulsuri

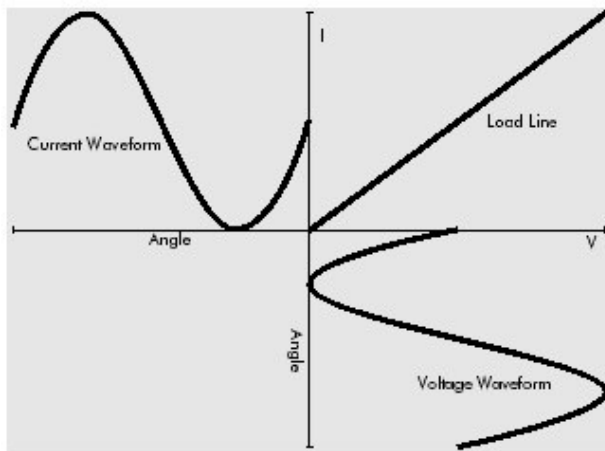


Fig.9. Curba de current pentru o sarcină liniară

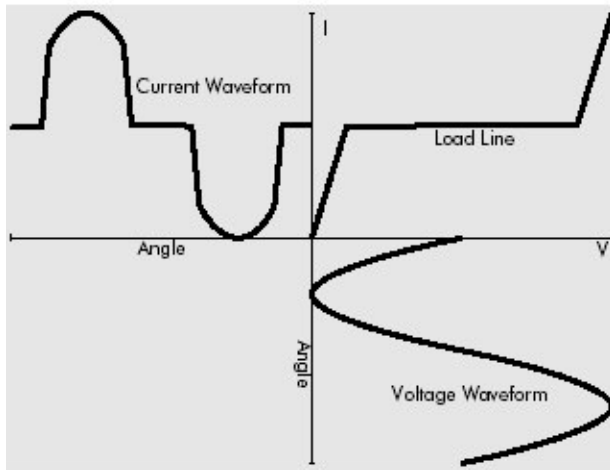


Fig.10. Curba de current pentru o sarcină neliniară

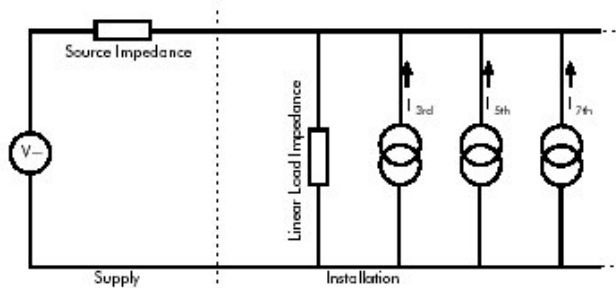


Fig.11. Circuitul electric echivalent al unei sarcini neliniare

### 3. EFECTE ALE POLUĂRII ARMONICE

Acestea se referă în principal la:

#### 3.1. Creșterea pierderilor de putere activă

Prezența armonicilor de curent și de tensiune implică apariția unor efecte termice majorate, determinate de apariția pierderilor suplimentare de putere activă:

- pierderi în materialul conductor  $P_{Cu}$ ;
- pierderi în materialele magnetice  $P_{Fe}$ ;
- pierderi în dielectric  $P_d$ .

Circulația unor curenți nesinusoidali în elementele rețelei determină *pierderi suplimentare în materialul conductor* prin efect Joule-Lenz datorită:

- creșterii valorii efective față de regimul pur sinusoidal;
- creșterii rezistenței electrice a conductoarelor, având în vedere dependența de frecvență a acesteia (efectul pelicular și de proximitate).

În ipoteza neglijării componentei continue, aceste pierderi pot fi calculate cu relația :

$$P_{Cu} = \frac{3}{2} \sum_{k=1}^{\infty} R_k I_{\max,k}^2 \quad (1.6)$$

$I_{\max,k}$  – amplitudinea armoniciei de rang  $k$  ;

$R_k$  – rezistența electrică a elementului, calculată pentru frecvența armoniciei de rang  $k$ .

Dacă se neglijează variația cu frecvența a rezistenței electrice (se consideră că  $R_k=R_1$ ), relația (1) poate fi pusă sub forma :

$$P_{Cu} = \frac{3}{2} R \sum_{k=1}^{\infty} I_{\max,k}^2 = \frac{3}{2} R I_{\max,k}^2 (1 + \delta_I^2) \quad (1.7)$$

unde  $\delta_I$  – factorul de distorsiune al curbei curentului electric.

Relația anterioară pune în evidență faptul că pierderile active în elementele conductoare pot crește mult în cazul funcționării sistemului în regim periodic nesinusoidal, comparativ cu cel sinusoidal.

*Pierderile suplimentare în materialele magnetice* apar datorită:

- fenomenului de histerezis ;
- existenței curenților turbionari.

Pentru echipamentele monofazate cu caracteristici magnetice liniare (lucrând pe porțiunea liniară a caracteristicii de magnetizare), prin însumarea pierderilor pe fiecare armonică se poate scrie :

$$P_{Fe} = c_1 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_{\max,k}^p}{k^{p-1}} + c_2 \sum_{k=1}^{\infty} U_{\max,k}^2 \quad (1.8)$$

unde :  $c_1 = a_H c^p f_1$  ;  $c_2 = a_T c^2 f_1$

$U_{\max,k}$  – amplitudinea armoniciei de rang  $k$  de tensiune ;

$a_H$ ,  $a_T$  – constante care depind de natura materialului ;

$p$  – constanta lui Steinmetz (exponent a cărui valoare 1,5...2,5 depinde de natura materialului) ;

Pentru echipamentele trifazate, pierderile determinate cu relația anterioară se vor multiplica cu 3.

În cazul echipamentelor care prezintă fenomene de histerezis și/sau lucrează pe porțiunea neliniară a caracteristicii de magnetizare, adunarea puterilor pe fiecare armonică este aproximativă, dar acceptabilă pentru situațiile din SEE.

Pierderile în materialele dielectrice sunt localizate în SEE în principal în :

- dielectricul condensatoarelor ;
- izolația liniilor electrice.

Pierderile sunt determinate de componenta activă a curentului electric prin izolație și de conductivitatea materialului dielectric. Valoarea componentei active a curentului este influențată de temperatura și umiditatea mediului înconjurător. Mărimea definitorie pentru pierderile active în dielectric este tangenta unghiului de pierderi, care pentru armonica de rang  $k$  are valoarea:

$$\tan \delta_k = \frac{Q_k}{P_k} \quad (1.9)$$

în care  $P_k$  – pierderile de putere activă corespunzătoare armonicii de rang  $k$ ;

$Q_k$  – puterea reactivă corespunzătoare aceleiași armonici.

■ *Condensatorul electric* – considerat ca element liniar, plasat într-o rețea afectată de regim periodic nesinusoidal, este caracterizat de pierderi dielectrice pe fază date de :

$$P_{dC} = \pi C f \sum_{k=1}^{\infty} k U_{\max,k}^2 \tan \delta_k \quad (1.10)$$

unde  $C$  este capacitatea condensatorului.

■ *Liniile electrice* – pierderile dielectrice pot fi calculate (temperatură și umiditate normale) :

$$P_{dLE} = 3\pi f L \sum_{k=1}^{\infty} k C_k U_{\max,k}^2 \tan \delta_k \quad (1.11)$$

cu  $C_k$  – capacitatea lineică pe fază corespunzătoare armonicii de rang  $k$  (pozitivă, negativă sau zero, conform  $k = 3m \pm 1$  sau  $k=3m$ ) ;

$L$  – lungimea liniei.

### 3.2. Supratensiuni în nodurile rețelei sau la bornele echipamentelor

Creșterea tensiunii în nodurile rețelei sau la bornele echipamentelor poate fi determinată de:

i) *Rezonanța pe armonici de tensiune*

Dacă într-o rețea electrică apare o latură formată din elemente  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , constante în timp și invariabile cu temperatura și frecvența, iar potențialul față de pământ al nodului de conectare al sarcinii  $N$ , este nesinusoidal:

$$u_N = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \alpha_k) \quad (1.12)$$

Curentul electric de armonică de rang  $k$  ce parcurge această latură poate fi determinat cu relația:

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{U}_k}{\underline{Z}_k} = \frac{U_k e^{j\alpha_k}}{R + j \left( k\omega_1 L - \frac{1}{k\omega_1 C} \right)} \quad (1.13)$$

Dacă în latura analizată, pentru armonica de rang  $k$ , elementele reactive satisfac relația:

$$k_r \omega_1 L = \frac{1}{k_r \omega_1 C} \quad (1.14)$$

atunci intensitatea  $\underline{I}_{kr}$  a curentului armonic de rang  $k$ , rezultă:

$$\underline{I}_{kr} = \frac{U_{kr}}{R} e^{j\alpha_{kr}} \quad (1.15)$$

Din relația (1.15) se observă că armonica de curent de rang  $k$  este în fază cu tensiunea armonică de același rang și are o valoare mare, fiind limitată numai de rezistența electrică a circuitului.

În același timp, la bornele elementelor reactive de pe aceeași latură cor apărea supratensiuni de valori mari:

$$\underline{U}_{Lkr} = -\underline{U}_{Ckr} = \frac{k_r \omega_1 L}{R} U_{kr} e^{j(\alpha_{kr} + \pi/2)} \quad (1.16)$$

Factorul de supratensiune la bornele bobinei sau condensatorului este egal cu  $k_r \omega_1 L/R$  și crește cu scăderea rezistenței  $R$ .

ii) *Creșterea potențialului punctului neutru pentru conexiuni în stea ale transformatoarelor sau ale altor receptoare*

Un receptor echilibrat sau un transformator coborât, trifazat, conectat într-o rețea electrică trifazată, echilibrată, cu tensiuni sinusoidale, la frecvență fundamentală, are potențialul punctului neutru egal cu zero în raport cu pământul, dacă prezintă o conexiune stea. Dacă rețeaua electrică este afectată de un regim periodic nesinusoidal, la bornele echipamentului se aplică tensiunile armonice:

$$\begin{aligned} u_A &= \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} U_k (\sin k\omega_1 t + \alpha_k) \\ u_B &= \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} U_k (\sin k\omega_1 t + \alpha_k - 2\pi/3) \\ u_C &= \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} U_k (\sin k\omega_1 t + \alpha_k + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (1.17)$$

Pentru armonicile de rang  $k = 3m$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ), în punctul neutru apare un potențial față de pământ a cărui valoare depinde de raportul dintre impedanțele armonice ale laturii conexiunii în stea (fazei active) și circuitul de nul.

Potențialul față de pământ al punctului neutru are valoarea:

$$\underline{U}_{3m}^0 = \underline{U}_{3m}^a \frac{1}{1 + \frac{\underline{Z}_{3m}^a}{3\underline{Z}_{3m}^0}} \quad (1.18)$$

unde:  $\underline{Z}_{3m}^a$  – impedanța armonică a fazei active;

$\underline{Z}_{3m}^0$  – impedanța armonică a circuitului de nul.

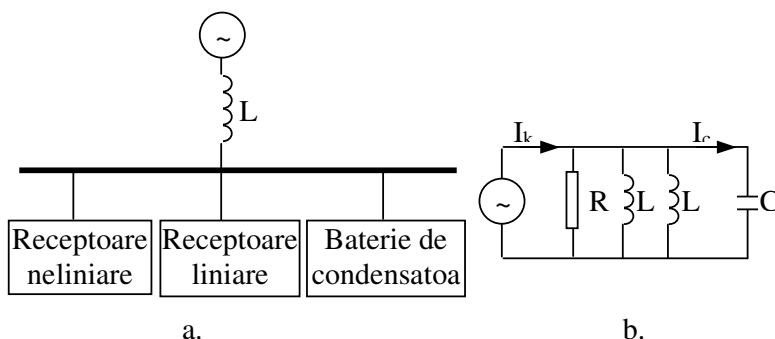
Pentru armonicile de rang  $k=3m+/-1$ , potențialul față de pământ al punctului neutru rămâne nul.

### 3.3. Supracurenți în rețelele electrice trifazate

i) *Rezonanța de curent în circuitele consumatorilor de energie electrică*

Pe barele de alimentare ale unui consumator industrial (fig.12) pot fi racordate:

- receptoare nesinusoidale (surse de curenți armonici);
- receptoare sinusoidale;
- baterii de condensatoare pentru compensarea puterii reactive.



**Fig.12** Schema echivalentă a unui consumator industrial: a - schema simplificată; b - schema echivalentă în planul armonicii de rang  $k$

Pentru un anumit regim de lucru, permanent și simetric, în planul armonicii de rang  $k$ , schema electrică echivalentă este reprezentată în fig.12.b., în care  $R$  este rezistența electrică echivalentă, care corespunde puterii active absorbită de consumator,  $\omega_1 L$  - reactanța inductivă care corespunde puterii reactive, pe frecvența fundamentală, absorbită de consumator,  $\omega_1 L_s$  - reactanța inductivă a sistemului de alimentare și care corespunde curentului de s.c. al sistemului pe barele de alimentare ale consumatorului;  $1/\omega_1 C$  - reactanța capacitivă a bateriei de condensatoare, pe frecvența fundamentală, care corespunde instalației de compensare a puterii reactive.

Curentul electric armonic  $I_{ck}$  care parcurge circuitul bateriei de condensatoare, în funcție de curentul  $I_k$  determinat de sursele de curenți armonici conectate la barele consumatorului, rezultă pe baza schemei echivalente din fig.12.b):

$$I_{ck} = I_k \frac{1}{\frac{k^2 \omega_1^2 C \lambda - 1}{k^2 \omega_1^2 C \lambda} - j \frac{1}{R k \omega_1^2 C}} \quad (1.19)$$

Dacă armonica de rang  $k$  satisface condiția:

$$k^2 \omega_1^2 C \alpha \lambda = 1 \quad (1.20)$$

unde:  $\lambda = \frac{L L_s}{L + L_s}$ , intensitatea curentului prin bateria de condensatoare va fi determinată de relația:

$$I_{ck} = j I_k R C k \omega_1 \quad (1.21)$$

Condiția (1.20) este îndeplinită pentru:

$$k^2 = \frac{1}{\omega_1 \lambda \omega_1 C} = \frac{S_{sc}}{Q} \cdot \frac{L + L_s}{L} \quad (1.22)$$

unde:  $S_{sc}$  - puterea de s.c. pe frecvența fundamentală, pe barele consumatorului;

$Q$  - puterea reactivă, pe frecvența fundamentală, a bateriei de condensatoare conectată la aceleași bare.

Pe baza relațiilor între mărimile implicate în relația de definiție, rezultă pentru curentul electric pe armonica de rang  $k$  ce parcurge bateria de condensatoare expresia:

$$I_{ck} = j I_k \frac{\sqrt{Q S_{sc}}}{P} \sqrt{1 + \frac{Q_{abs}}{S_{sc}}} = j I_k q \sqrt{1 + \frac{Q_{abs}}{S_{sc}}} \quad (1.23)$$

unde cu  $q$  s-a notat factorul de calitate al circuitului în absența puterii reactive absorbită de receptoarele liniare.

Din ec.(1.23) rezultă că *amplificarea de curent este cu atât mai mare, cu cât factorul de calitate  $q$  este mai mare, respectiv cu cât puterea de s.c.  $S_{sc}$  și capacitatea bateriei de condensatoare sunt mai mari, iar puterea absorbită  $P$  este mai mică.* Cazul limită apare la deconectarea receptoarelor liniare.



ii) *Supraîncărcarea circuitului de nul al rețelelor trifazate*

În cazul rețelelor trifazate cu patru conductoare, existența surselor de curenți armonici determină circulația prin firul neutru a unui curent armonic obținut prin însumarea armonicilor de rang 3m. Valoarea efectivă a curentului care parcurge conductorul de nul rezultă:

$$I^0 = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} I_{\max,3m}^2} \quad (1.24)$$

unde  $I_{\max,3m}$  – amplitudinea armonicilor de rang  $k=3m$ .

Curentul de armonică 3m se suprapune peste cel determinat de o eventuală nesimetrie a curenților sistemului și în consecință, poate apărea o supraîncălzire a conductorului, mai ales că aria secțiunii transversale a acestuia, în construcțiile uzuale, este inferioară celei corespunzătoare conductoarelor de pe fazele active.

Problema supraîncălzirii circuitului de nul apare în special în rețelele de distribuție de j.t., în care o pondere însemnată a consumatorilor o reprezintă sistemele de calcul și instalațiile de iluminat cu descărcări în gaze și vapori metalici. Acestea se caracterizează printr-o valoare ridicată a armonicilor de rang 3 ( $\gamma_{i3}$  poate atinge 80%), astfel că prin conductorul de nul vor circula curenți de intensitate ridicată. Având în vedere că acest conductor nu este prevăzut cu sisteme de protecție, riscul de supraîncălzire și generare de incendii poate fi important.

### **3.4. Efecte ale poluării armonice asupra echipamentelor din rețelele electrice**

Aceste efecte constau în pierderi suplimentare care duc la reducerea randamentului transformării energiei electrice, dar și la influențarea negativă a modului și regimurilor de funcționare (în special în cazul transformatoarelor de putere și al echipamentelor electronice).

*Efectele asupra transformatoarelor trifazate* constau în:

- ✓ Creșterea pierderilor de putere activă în materialul conductor (ec.1.6) datorită creșterii rezistenței electrice a înfășurărilor, odată cu rangul armonicilor de curent;
- ✓ Creșterea pierderilor în materialele magnetice (ec.1.8), în prezența armonicilor superioare datorită, în principal, creșterii pierderilor prin curenți turbionari;
- ✓ Creșterea solicitărilor electrice ale izolațiilor, determinată atât de valoarea maximă a tensiunii la borne, cât și de viteza de variație a acesteia;
- ✓ Solicitări mecanice suplimentare;
- ✓ Creșterea valorii factorului de distorsiune al curentului în cazul funcționării pe porțiunea neliniară a caracteristicii de magnetizare (datorită supraîncărcării, regim ce poate fi determinat tocmai de poluarea armonică; în acest caz, este posibil ca la un nivel redus al armonicilor de tensiune să apară un nivel ridicat al armonicilor de curent).

Principalul efect al funcționării unui transformator în regim nesinusoidal îl reprezintă *creșterea temperaturii datorită pierderilor suplimentare în înfășurări și în miez*. Pentru a evita depășirea temperaturii maxim admise de fabricant este necesară reducerea încărcării, respectiv aplicarea unui *factor de depreciere  $k_t$  a puterii nominale*:

$$S = k_t S_N \quad (1.25)$$

unde  $S$  – puterea aparentă în regim nesinusoidal;

$S_N$  – puterea nominală a transformatorului

și

$$k_t = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_k}{I_N}\right)^2 k^{1,6}}} \quad (1.26)$$

cu  $I_N$  – curentul nominal al transformatorului;  
 $I_k$  – valoarea efectivă a armonicilor de rang  $k$ .

**Efectele asupra funcționării mașinilor rotative** constau în:

- ✓ Creșterea temperaturii bobinajelor și a miezului magnetic datorate pierderilor suplimentare în materialul conductor și în materialele magnetice;
- ✓ Modificări ale cuplului mașinii electrice, conducând la reducerea randamentului acesteia;
- ✓ Apariția de oscilații ale cuplului de torsiune pe arborele mașinii, contribuind la îmbătrânirea materialului și la vibrații suplimentare;
- ✓ Modificări ale inducției magnetice în întrefierul mașinii datorită armonicilor de rang superior;
- ✓ Interacțiuni între fluxul magnetic determinat de fundamentală și cel determinat de armonicile superioare.

**Au fost puse în evidență aspecte ca:**

- armonicile de rang  $k = 3m$  nu determină inducție în întrefier;
- armonicile de rang  $k = 3m \pm 1$  conduc la apariția în întrefier a unui fazor inducție magnetică, ce se rotește cu viteza  $\pm k\omega_1$  în sensul de rotație al rotorului, respectiv în sens contrar și are amplitudinea proporțională cu amplitudinea de rang  $k$  a curentului electric;
- armonicile determină creșterea pierderilor de putere activă și deci a temperaturii mașinii;
- armonicile de rang  $k = 3m \pm 1$  determină apariția unui cuplu în sensul de rotație, respectiv în sens contrar, având în vedere că viteza relativă de rotație a fazorului inducție magnetică în raport cu rotorul este:  $\pm (k \mp 1)\omega_1 = \pm 3m\omega_1$  la mașinile sincrone;  
 $\pm (k \mp 1 + s)\omega_1 = \pm (3m \pm s)\omega_1$  la mașinile asincrone ( $s$  – alunecarea mașinii).
- apar cupluri pulsatorii cu frecvența  $\pm 3mf_1$  la mașinile sincrone și  $\pm (3m \pm s)f_1$  la mașinile asincrone, care acționează asupra arborelui mașinii și pot conduce la rezonanțe mecanice în cazul unor frecvențe egale cu frecvența proprie de vibrație a arborelui, amplificând astfel zgomotele și solicitând suplimentar materialul.

În cazul motoarelor electrice conectate direct la rețeaua de distribuție, influența armonicilor superioare ale tensiunii de alimentare este, în general, mică (având în vedere valorile impuse factorului de distorsiune armonică). Norma CEI 34 –1 impune fabricanților de mașini ca motoarele de tensiune alternativă să poată funcționa fără probleme în rețelele având factorul armonic de distorsiune  $FA \leq 2\%$  ( $FA$  se calculează pentru  $k \leq 13$ ).

$$FA = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2 \frac{1}{k}} \quad (1.27)$$

Dacă rețeaua de alimentare este caracterizată de o distorsiune mai mare, poate apărea necesitatea reducerii încărcării mașinii (o depreciere a puterii motorului cu 5...10% poate fi impusă în cazuri foarte defavorabile).

O problemă specifică apare în cazul acționărilor cu viteză variabilă (AVV), unde motoarele sunt alimentate prin intermediul convertoarelor statice de frecvență. Acestea (mai puțin cele care conțin invertoare cu comandă PWM) realizează o tensiune puternic distorsionată, care poate conduce la solicitări termice și mecanice puternice ale motorului de acționare.

În aceste cazuri, este necesară analiza posibilităților practice de reducere a perturbațiilor și limitelor de solicitare ale motorului.

### ***Efecte asupra echipamentelor electronice***

Echipamentele electronice utilizate în sistemele de reglaj sunt alimentate, în general, cu tensiune sinusoidală, dar ele pot constitui surse poluante pentru rețeaua la care sunt racordate, datorită modului specific de modificare a mărimilor controlate (reglaj, de fază, reglaj de durată, etc.).

Aplicarea unei tensiuni nesinusoidale la bornele acestor echipamente duce la modificarea caracteristicilor lor tehnice, cu efecte negative asupra comenzilor și o funcționare necorespunzătoare a echipamentului.

Mecanismele prin care echipamentele electronice sunt afectate de poluarea armonică pot fi:

- Posibilitatea trecerilor multiple prin zero ale curbei de tensiune ca urmare a distorsiunii armonice prezintă o problemă deosebită, deoarece un număr mare de circuite electronice își bazează funcționarea pe sincronizarea cu trecerile prin zero ale tensiunii rețelei. Apariția mai multor astfel de puncte (decât cele considerate pentru fundamentală) afectează funcționarea echipamentului, care nu își va îndeplini corect funcțiunile. În multe circuite electronice, comutarea dispozitivelor semiconductoare se face la tensiune zero, pentru a reduce interferențele electromagnetice și șocurile de curent. Trecerile multiple prin zero ale curbei de tensiune pot afecta și în acest caz, funcționarea corectă a echipamentelor.
- Amplitudinea curbei de tensiune, respectiv valoarea factorului de vârf, trebuie avute în vedere deoarece unele surse electronice utilizează această informație pentru a asigura încărcarea condensatorului de filtrare. Prezența armonicilor poate determina însă creșterea sau reducerea amplitudinii (efectul de ascuțire sau aplatizare a curbei) tensiunii rețelei. Ca urmare, tensiunea furnizată de sursă se modifică, chiar dacă valoarea efectivă a tensiunii de intrare este egală cu valoarea nominală. Funcționarea echipamentelor alimentate de sursă este afectată, începând cu creșterea sensibilității la goluri de tensiune și ajungând la grave disfuncționalități. Pentru evitarea acestor efecte, unii fabricanți de calculatoare limitează valorile factorului de vârf la  $k_v = \sqrt{2} \pm 0,1$ , iar alții impun ca factorul de distorsiune să nu depășească 5%.
- Interarmonicile și subarmonicile pot afecta funcționarea monitoarelor și televizoarelor prin modularea în amplitudine a frecvenței fundamentale. Pentru niveluri de peste 0,5% ale acestor componente, pot să apară modificări periodice ale imaginii pe tuburile catodice.

### ***Efecte asupra funcționării întreruptoarelor și siguranțelor fuzibile***

Distorsiunea curentului electric afectează funcționarea:

#### **■ *întreruptoarelor*, prin:**

- creșterea pierderilor de putere activă care determină creșterea temperaturii elementelor sensibile ale declanșatoarelor termice și ale altor elemente componente;
- valorile ridicate ale parametrului  $di/dt$  afectează eficiența dispozitivelor de stingere a arcului electric;
- valorile mari ale factorului de vârf determină funcționarea incorectă a întreruptoarelor cu declanșatoare electronice, care se bazează pe detectarea maximului curbei de curent.

■ *siguranțelor fuzibile*, care sunt sensibile la încălzirile suplimentare determinate de armonicile superioare. Apare deci o translație a caracteristicii de funcționare, iar în cazurile foarte severe, o acțiune intempestivă.

### Efecte asupra bateriilor de condensatoare

În rețelele electrice trifazate, în care apar armonici superioare, bateriile de condensatoare din compunerea filtrelor sau a instalațiilor pentru compensarea puterii reactive sunt supuse unor solicitări suplimentare de tipul:

- încălziri suplimentare datorate pierderilor dielectrice;
- supraîncălziri de durată ca urmare a amplificării nivelului de poluare;
- fenomene de rezonanță (de tensiune sau curent) cu efect de amplificare a armonicilor existente în sistem; în cazul rezonanței serie, crește valoarea curentului pe armonica respectivă și tensiunile pe elementele componente ale circuitului rezonant, iar în cazul rezonanței paralele, apar supratensiuni de valori ridicate în sistem și curenți mari în condensatoare.

Principalul efect al tensiunilor nesinusoidale asupra condensatoarelor electrice îl reprezintă majorarea pierderilor de putere. Pierderile suplimentare pot fi determinate cu relația:

$$P_{supl} = C \sum_{k=2}^{\infty} \omega_k \tan \delta_k U_k^2 = 2\pi f_1 C \sum_{k=2}^{\infty} k \tan \delta_k U_k^2 \quad (1.28)$$

unde. C – capacitatea bateriei de condensatoare;

$f_1$  – frecvența fundamentală a tensiunii de alimentare;

$\delta_k$  – unghiul de pierderi pentru armonica de rang k.

Dacă se are în vedere comportarea receptoarelor neliniare și se consideră  $\tan \delta = ct$  (ipoteza valabilă până la armonica de rang 13), se poate scrie:

$$P_{supl} \cong 2\pi f_1 \tan \delta \cdot C \sum_{k=2}^{13} k U_k^2 \quad (1.29)$$

Pentru a se limita suprasolicitarea datorată pierderilor suplimentare în regim periodic nesinusoidal, normativele în vigoare impun dimensionarea condensatoarelor pentru următoarele încărcări de durată:

i) în curent

$$I_{max} = 1,3I_N - \text{corespunzând unui factor de distorsiune de curent } \delta_I = 83\%;$$

ii) în tensiune

$U_{max} = 1,1I_N$  - ceea ce permite condensatoarelor să suporte supratensiunile la borne determinate de regimul deformant.

iii) putere reactivă

$$Q_{max} = U_{max} I_{max} = 1,43Q_N$$

Puterea reactivă maximă furnizată de baterie corespunde încărcărilor suplimentare admise pentru tensiune și curent.

Utilizarea bateriilor de condensatoare în instalațiile de joasă tensiune ale consumatorilor industriali poate determina apariția de fenomene de rezonanță paralel între bateria de condensatoare (C) și impedanța sistemului văzută din punctul de racordare ( $L_s$ ).

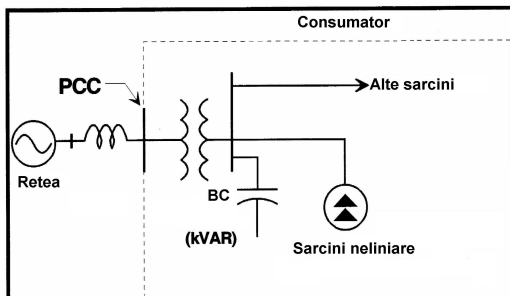


Fig. 13. Schema echivalentă pentru studiul circuitelor rezonante în regim deformant

Frecvența de rezonanță se determină:

i) în cazul existenței unei surse de curenți armonici:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} = f_1 \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}} \quad (1.30)$$

ii) în cazul existenței unei surse de tensiuni armonice:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_s + L_0}{CL_s L_0}} \quad (1.31)$$

Inductivitatea sistemului de alimentare (în punctul de racord al bateriei) se calculează în funcție de puterea de s.c. în PCC:

$$L_s = \frac{U^2}{2\pi f_1 S_{sc}} \quad (1.32)$$

Capacitatea bateriei de condensatoare rezultă în funcție de puterea sa reactivă:

$$C = \frac{Q_{BC}}{2\pi f_1 U^2} \quad (1.33)$$

Pentru amplasarea BC, la marea majoritate a consumatorilor industriali, trebuie avute în vedere următoarele reguli:

- dacă puterea aparentă a receptorului deformant  $S_{nel}$  este mai mică decât 10% din cea a transformatorului la care este racordat  $S_T$ , bateria poate fi montată fără a apărea probleme de rezonanță;
- dacă  $S_{nel} > 0,3 S_T$  și  $Q_{BC} < 0,2 S_T$ , de asemenea în mod normal, nu apar rezonanțe;
- dacă  $S_{nel} > 0,3 S_T$ , bateria de condensatoare nu poate fi montată direct la bare și trebuie să fie element component al unui filtru.

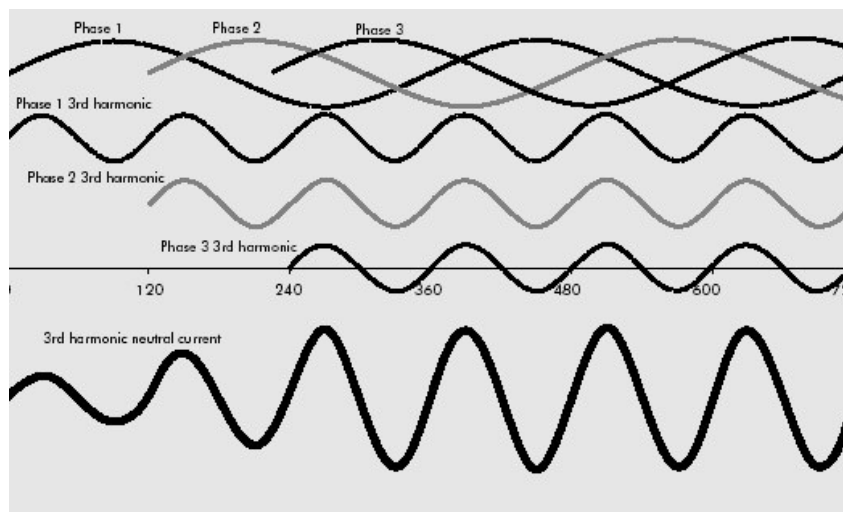
### 3.6. Alte efecte ale regimului periodic nesinusoidal

i) **Perturbații electromagnetice în schemele de distribuție TNC**

În schema de distribuție TNC, cu conductor de nul de lucru și nulul de protecție comune în întreaga rețea, curenții armonici de rang  $k = 3m$  care se însumează în conductorul neutru al sistemelor de distribuție cu 4 conductoare, cor parcurge aceste circuite (inclusiv toate legăturile la masă și structurile metalice ale clădirilor), determinând căderi de tensiune importante. Acest fenomen poate genera efecte negative cum ar fi:

- coroziunea pieselor metalice;
- încărcarea anormală a unei legături de telecomunicații care conectează masele a două receptoare (ex. imprimanta și calculatorul);
- radiații electromagnetice care perturbă funcționarea corectă a sistemelor de calcul.

**Ca urmare, se recomandă evitarea utilizării schemei TNC în sisteme care conțin surse importante de armonici 3m.**



**Curentul prin conductorul neutru**

**ii) Influența asupra releelor de protecție**

Cercetările efectuate au pus în evidența dificultatea prevederii comportamentului diferitelor rele de protecție în regim nesinusoidal. S-au constatat comportări diferite pentru același tip de releu, produs de fabricanți diferiți sau chiar pentru relee de același tip și model ale aceluiași fabricant. Răspunsul depinde de amplitudinea și faza armonicilor. În cazul releelor de protecție de tensiune, unii producători recomandă respectarea condiției:

$$\frac{1}{k} \frac{U_k}{U_1} < (1,5...2)\% \quad (1.34)$$

pentru k impar.

**iii) Influențe asupra aparatelor de măsurare**

Influențele sunt diferite la aparatele analogice și la cele numerice, acestea având o comportare diferită, în funcție de tipul lor.

✓ Funcționarea *aparatelor analogice* de măsurare în rețele poluate armonic este însoțită de erori relativ mari (în sens pozitiv și negativ), dependente de tipul aparatului.

Cel mai utilizat aparat pentru măsurarea energiei, contorul de inducție, este puternic afectat de distorsiunea curbelor de curent și tensiune. Testele au evidențiat :

- erori de până la -20% în cazul unor deformări semnificative ale curbelor de tensiune și curent;
- erori de până la 5% pentru tensiune sinusoidală și curent deformat;
- posibile rezonanțe mecanice în domeniul (400...1000) Hz.

✓ **Ampermetrele și voltmetrele numerice** sunt imune la distorsiunea curbei doar dacă sunt prevăzute cu convertor de tensiune continuă – valoare efectivă a tensiunii alternative.

✓ Pentru *wattmetrele și contoarele de energie activă electronice*, erorile constatate în cazul conectării la sisteme poluate armonic au fost sub 0,1%. Ele sunt determinate de caracteristicile de frecvență ale canalelor de intrare (curent / tensiune) și de anumite neliniarități.

#### 4. INDICATORI DE REGIM DEFORMANT

Tensiunea armonică poate fi evaluată:

- individual cu nivelul armonicii = raportul dintre valoarea efectivă a armonicii  $h$  considerate și valoarea efectivă a armonicii fundamentale:  $\gamma_{h_u} = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100$

- global, de exemplu cu ajutorul factorului total de distorsiune armonică THD:

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} (u_h)^2}$$

NOTE: Armonicile tensiunii de alimentare sunt determinate în principal de sarcinile neliniare conectate în sistem.

Circulația armonicilor de curent prin impedanțele sistemului determină creșterea armonicilor de tensiune. Armonicile de curent și impedanțele sistemului variază în timp, ducând la modificarea amplitudinii tensiunilor.

Raportul dintre valoarea efectivă a armonicilor (în acest context curenții armonici  $I_h$  de rang  $h$ ) și valoarea efectivă a fundamentalei (CEI-1000-3-4) :

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \text{ (notat uzual în literatura tehnică din România } \delta_I)$$

Întrucât aparatele de măsurare (distorsiometru) indică valoarea factorului de distorsiune cu raportare la valoarea efectivă a curentului de sarcină este necesară atenție atunci când se compară limitele de planificare cu valorile măsurate.

Factor de distorsiune armonică parțial ponderată: CEI-1000-3-4 :  $THD_{IP} = \sqrt{\sum_{h=14}^{40} h \cdot \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}$  (notat

uzual în literatura tehnică din România  $\delta_{IP}$ )

Distorsiunea armonică parțial ponderată a fost introdusă pentru a lua în considerare că odată cu creșterea rangului, armonicile descresc

Putere perturbatoare ponderată :

$$S_{DWi} = \sum_j S_{Dj} \cdot W_j$$

în care:  $W_j$  - factor de ponderare;

$S_{Dj}$  - puterea echipamentului deformatant  $j$  al instalației  $i$ .

Impedanța armonică ( $Z_h$ ): Impedanța pe fază într-un sistem de succesiune pozitivă (directă) de armonică de rang  $h$ .

Nivelul armonicilor de tensiune (EN 50160)

Armonici impare				Armonici pare	
Nemultiplu de 3		Multiplu de 3			
Ordin n	Amplitudine [%]	Ordin n	Amplitudine[%]	Ordin n	Amplitudine [%]
5	6	3	5,0	2	2,0
7	5	9	1.5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3.0	21	0,5		
17	2.0				
19	1,5				
23	1.5				
25	1.5				

NOTA: Nu au fost indicate valorile corespunzătoare armonicilor de ordin mai mare de 25, de valori în general reduse, dar cu efect imprevizibil la rezonanță. THD < 8% (j.t. și m.t.)