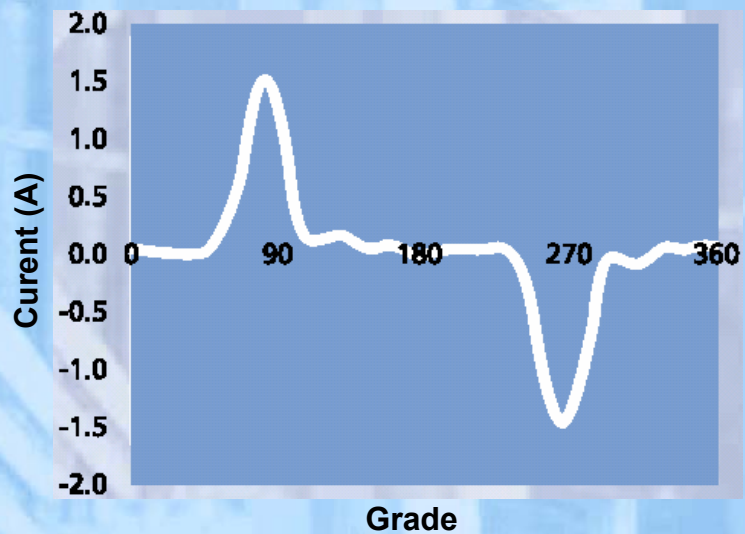
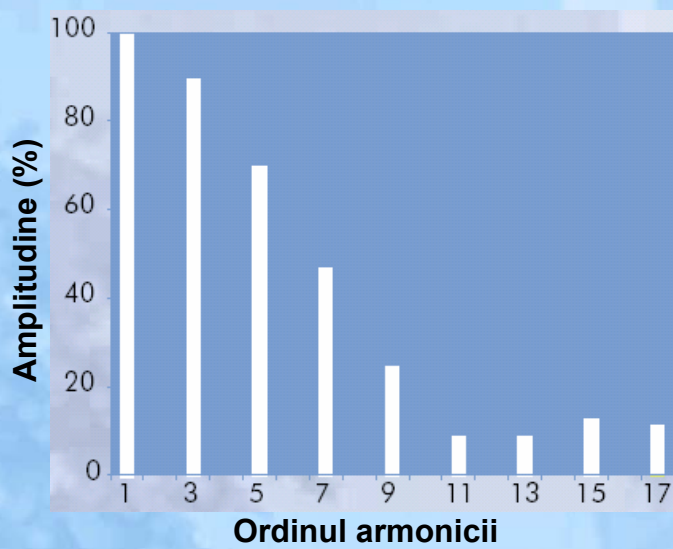


# Ghid de Aplicare - Calitatea Energiei Electrice



## Armonici Cauze și efecte

3.1



# Armonici

## Cauze și efecte

David Chapman  
Copper Development Association  
Martie 2001

(Versiunea 0b Noiembrie 2001)

### European Copper Institute (ECI)

European Copper Institute este un joint venture între ICA (International Copper Association) și membrii IWCC (International Wrought Copper Council). 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 zece Copper Development Association („CDAs”) în Benelux, Franța, Germania, Grecia, Ungaria, Italia, Polonia, Scandinavia, Spania și Regatul Unit. ECI continuă eforturile întreprinse inițial de către Copper Products Development Association, apărută în 1959 și INCRA (International Copper Research Association), apărută în 1961.

### 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.

### Mulțumiri

Acest proiect a fost realizat cu suportul Comunității Europene și al International Copper Association, Ltd.

### 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 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 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)

## Cauze și efecte

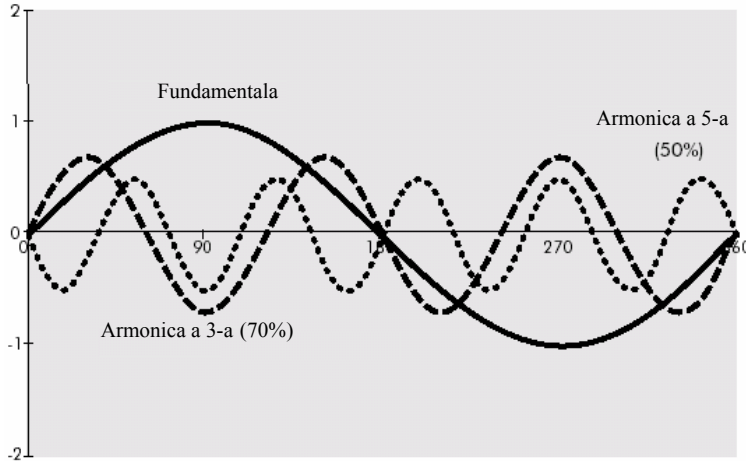


Fig. 1 – Fundamentala cu armonicile de rang trei și de rang cinci

În figura 2 este reprezentată fundamentala peste care sunt suprapuse o armonică de rang trei cu amplitudinea de 70% din fundamentală și o armonică de rang 5 cu amplitudinea de 50 % din fundamentală. De notat că, în practică, curba deformată de curent va fi cu mult mai complexă decât cea din exemplu, cuprinzând mult mai multe armonici și cu defazaje diferite.

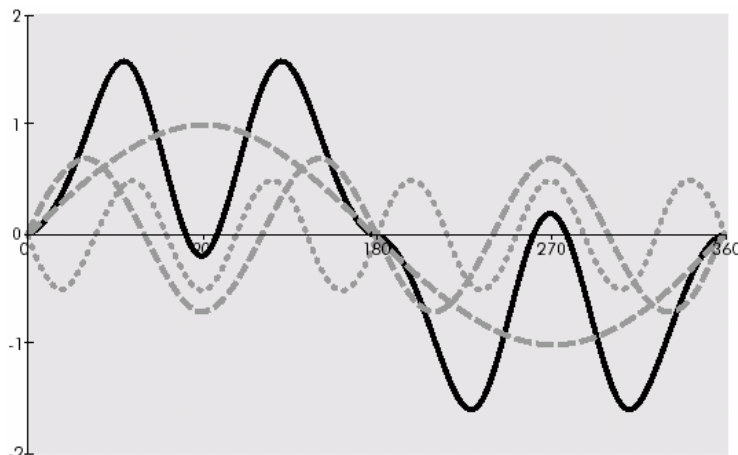


Fig. 2 – Curbă deformată de curent

Această secțiune a Ghidului tratează originea curenților armonici și efectul pe care aceștia îl au în sistemele energetice. În secțiunile „Soluții pentru armonici” sunt prezentate metodele de limitare.

Frecvențele armonicilor sunt multipli întregi ai frecvenței fundamentale de alimentare, de exemplu, pentru o frecvență de 50 Hz armonică de rang trei va avea frecvența de 150 Hz, iar armonică de rang 5 va avea frecvența de 250 Hz. În figura 1 sunt reprezentate sinusoida fundamentală și armonicile de rang trei și de rang cinci.

Curba rezultată evident nu va fi sinusoidală și aceasta înseamnă că echipamentul normal de măsurare, ca un multimetru calibrat pentru a măsura valoarea efectivă pe baza valorii medii, va da indicații incorecte. De observat, de asemenea, că sunt șase puncte de trecere prin zero pe o perioadă în loc de două, astfel că orice echipament care utilizează trecerile prin zero ca referință va funcționa incorect. Curba conține frecvențe diferite de fundamentală și trebuie tratată corespunzător.

Când se vorbește despre armonici în instalațiile electrice ne referim în principal la curenți deoarece armonicile rezultă datorită curenților și cea mai mare

parte a efectelor nocive este datorată acestor curenți. Nu se pot trage concluzii utile fără a cunoaște spectrul armonicilor de curenți, dar este uzual să se determine numai factorul total de distorsiune (*Total harmonic distortion - THD*). Când armonicile se propagă prin sistemul de distribuție, în laturile rețelei care nu sunt străbătute de curenți armonici, acestea se regăesc ca tensiuni. Este foarte important ca să fie măsurate atât valorile tensiunilor armonice, cât și ale curenților și ca valorile determinate să fie specificate explicit ca valori ale tensiunii și curentului. Convențional, factorul de distorsiune al curentului cuprinde ca sufix I, de exemplu, 35 % THDI, respectiv distorsiunea de tensiune cuprinde sufixul U, de exemplu, 4 % THDU.

Curenții armonici sunt prezenți în sistemul electric de alimentare de mai mulți ani. Inițial, ei erau determinați de redresoarele cu mercur utilizate pentru a asigura conversia tensiunii alternative în tensiune continuă pentru calea ferată și pentru acționări de tensiune continuă cu viteză variabilă din industrie. În ultimul timp clasa de tipuri și numărul de unități de echipament care produce armonici a crescut foarte mult și va continua să crească, astfel că proiectanții și birourile de studii trebuie acum să ia în considerație foarte atent armonicile și efectele datorate lor.

În această secțiune se descrie cum și de ce sunt generate armonicile, cum prezența armonicilor afectează sistemul energetic și echipamentul și cum să se minimalizeze aceste efecte.

## Tipuri de echipamente care generează armonici

Curenții armonici sunt generați de sarcini neliniare. Acestea includ:

Sarcini monofazate, de exemplu:

- ◆ surse de putere în comutație (*Switched mode power supplies – SMPS*);
- ◆ balasturi electronice pentru lămpile fluorescente;
- ◆ unități mici de alimentare neîntreruptibilă (*Uninterruptible power supplies – UPS*).

Sarcini trifazate, de exemplu:

- ◆ acționări cu viteză variabilă;
- ◆ unități mari UPS.

## Sarcini monofazate

### Sursă de putere în comutație (SMPS)

Majoritatea echipamentelor electronice moderne utilizează surse în comutație (SMPS). Acestea diferă de sursele mai vechi în care tradiționalul transformator coborât și redresorul sunt înlocuite cu o redresare directă comandată a alimentării pentru a încărca o baterie de condensatoare, din care curentul continuu pentru sarcină se obține, printr-o metodă adecvată, la bornele de ieșire, la tensiunea și valoarea cerută a curentului. Avantajul – pentru producătorul de echipamente – este că dimensiunile, costul și greutatea sunt semnificativ reduse și unitatea energetică poate fi realizată practic pentru orice factor de formă cerut. Dezavantajul – în plus față de

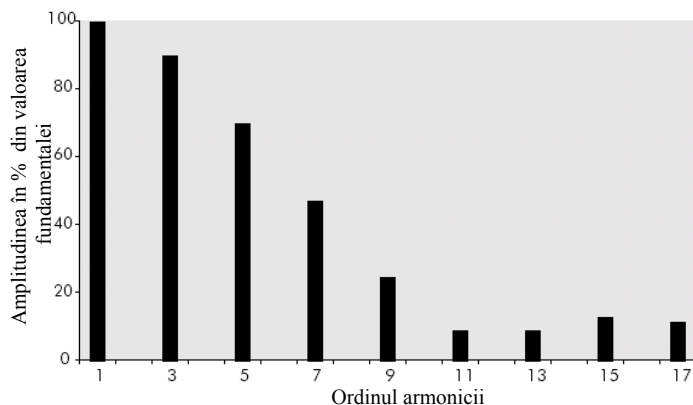


Fig. 3 – Spectrul armonic tipic al unui calculator personal

celaltele tipuri – este că în loc de curent continuu, sursa, absoarbe din rețeaua de alimentare un curent sub formă de pulsuri de curent care conțin o mare cantitate de armonici de rang trei și mai mari și componente de înaltă frecvență armonică (fig. 3). Se prevede un filtru la intrare pentru a conduce la pământ componentele de înaltă frecvență din curentul de fază și din conductorul neutru, însă acesta nu are efect asupra curenților armonici care se propagă înapoi spre alimentare. Problemele legate de curenții de scurgere la pământ sunt analizate în secțiunea 6 a acestui Ghid.

Unitățile UPS monofazate au caracteristici foarte asemănătoare cu echipamentele SMPS.

Pentru unitățile de mare putere a apărut în ultimul timp tendința realizării echipamentelor cu corecție de factor de putere (*Power factor corrector – PFC*). Acestea au rolul de a face ca sarcina de alimentat să apară ca o sarcină rezistivă astfel încât curentul absorbit să apară sinusoidal și în fază cu tensiunea aplicată. S-a reușit ca curentul absorbit să aibă o formă triunghiulară de frecvență ridicată care este apoi mediată cu ajutorul filtrului de intrare la o formă sinusoidală. Nivelul complex al echipamentului nu este încă aplicabil la unitățile cu preț redus care constituie majoritatea sarcinilor din instalațiile comerciale și industriale. Rămâne de văzut ce probleme vor fi evidențiate la aplicarea pe scară largă a acestor tehnologii.

### Balasturi electronice pentru lămpi fluorescente

Balasturile electronice pentru lămpi fluorescente au devenit populare în ultimii ani datorită necesității creșterii eficienței. În general ele sunt doar cu puțin mai eficiente decât cele mai bune balasturi magnetice și în fapt, câștigul cel mai mare rezultă la nivelul lămpii fluorescente care este mai eficientă când este alimentată la frecvență ridicată decât la nivelul balastului electronic însuși. Avantajul lor principal este că nivelul de iluminare poate fi menținut pe o durată de viață mai mare prin controlul curenților din lampă, practică ce conduce însă la o micșorare a randamentului global. Inconvenientul principal este că generează armonici în rețeaua de alimentare. Tipurile de lămpi denumite „cu corector de factor de putere” și care au un randament superior există, dar sunt mai scumpe. Lămpile de puteri mici nu sunt – de regulă – prevăzute cu circuite de corecție.

## Cauze și efecte

Lămpile fluorescente compacte sunt destinate să înlocuiască lămpile cu incandescență cu filament din wolfram. Un balast miniaturizat este plasat în soclul lămpii și controlează tubul fluorescent cu diametrul de 8 mm. Lămpile fluorescente cu o putere de 11 W sunt destinate să înlocuiască lămpile cu incandescență de 60 W și au o durată de viață de 8000 ore.

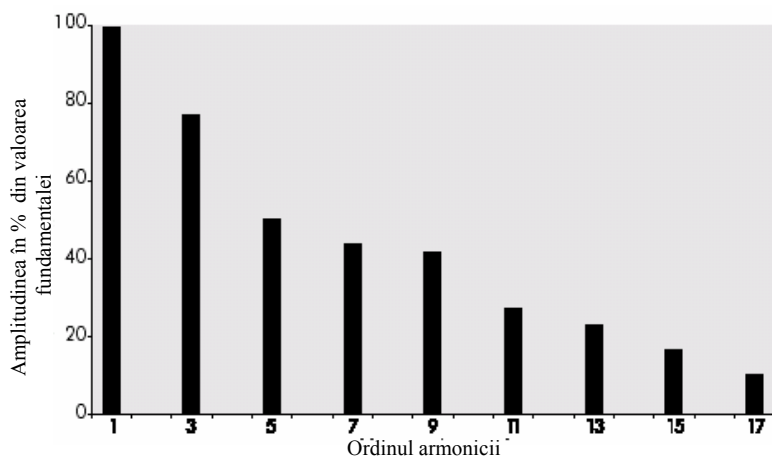


Fig. 4 – Spectrul armonic al unei lămpi fluorescente compacte tipice

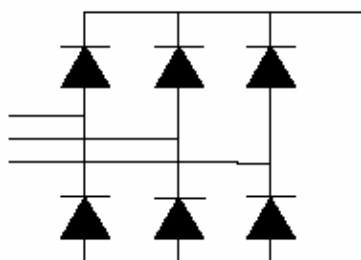


Fig. 5 – Punte trifazată, sau punte cu șase pulsuri

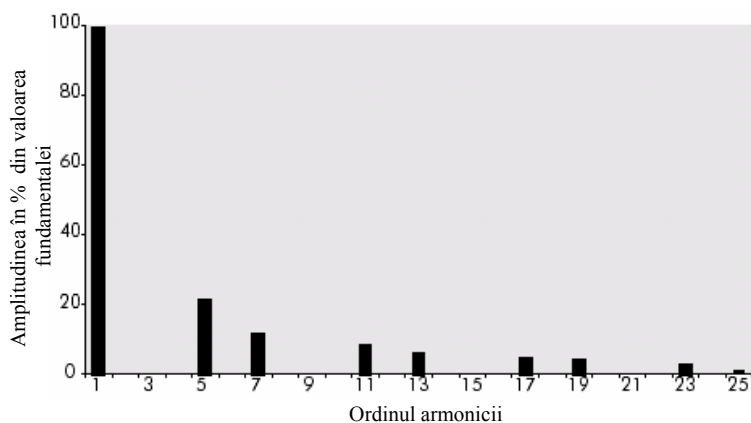


Fig. 6 – Spectrul de armonici determinat de o punte tipică cu 6 pulsuri

Spectrul curenților armonici generați de aceste lămpi este prezentat în figura 4. Aceste lămpi sunt utilizate din ce în ce mai mult înlocuind lămpile cu incandescență în sectorul casnic și în special în hoteluri în care – brusc – au apărut frecvent probleme serioase datorate armonicilor.

### Sarcini trifazate

Variatoarele de viteză, unitățile UPS și convertoare de tensiune continuă sunt de regulă alimentate printr-o punte trifazată (fig. 5), denumită și punte cu 6 pulsuri, deoarece sunt șase pulsuri pe perioadă (unul pe jumătate de perioadă și fază) în curentul continuu de ieșire.

O punte cu 6 pulsuri generează armonici de rang  $6 \cdot n \pm 1$ , adică cu unu în plus sau în minus față de orice multiplu de 6. În teorie, amplitudinea fiecărei armonici este invers proporțională cu rangul armonicii. De exemplu 20 % pentru armonica de rang 5 și 9 % pentru armonica de rang 11 etc.

În figura 6 se prezintă un spectru tipic de armonici.

Amplitudinea armonicilor este semnificativ redusă dacă se utilizează o punte cu 12 pulsuri. În fapt este vorba de două punți de 6 pulsuri, alimentate de la înfășurările secundare conectate în stea și în triunghi ale unui transformator (fig. 7), determinând defazaje de  $30^\circ$  între tensiunile aplicate.

Armonicile de rang  $6 \cdot n$  sunt teoretic suprimate dar în practică reducerea depinde de ajustarea convertorului și factorul tipic de reducere este între 20 și 50. Armonicile de rang  $12 \cdot n$  rămân neschimbate (fig.8). În acest caz curentul armonic total se reduce și totodată armonicile care rămân sunt de frecvență superioară și fac mai ușoară proiectarea unui filtru.

## Cauze și efecte

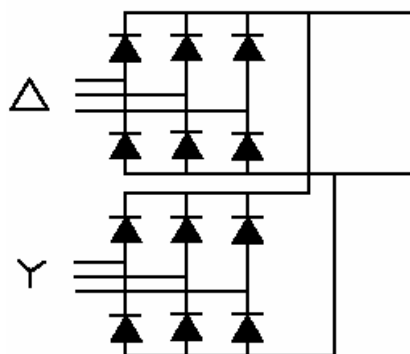


Fig. 7 – Punte cu 12 pulsuri

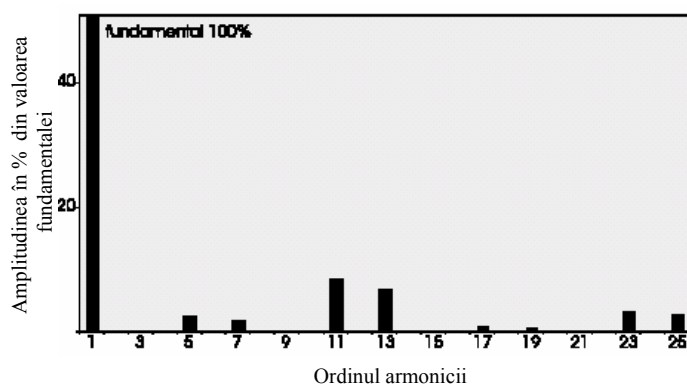


Fig. 8 – Spectrul armonic al unei punți tipice cu 12 pulsuri

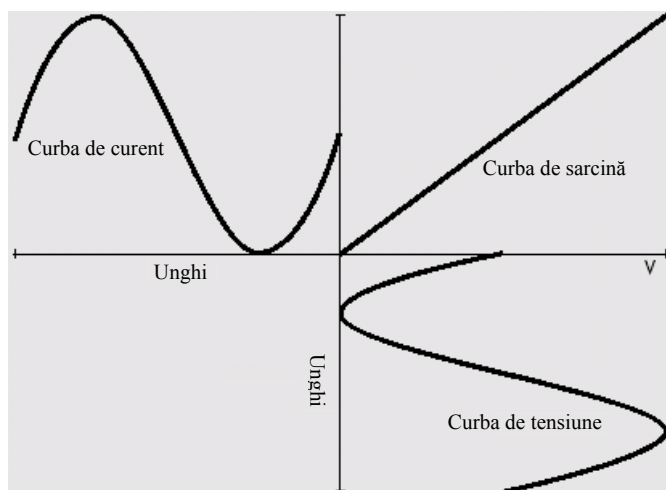


Fig. 9 – Forma curbei de curent electric într-o sarcină liniară

Adesea producătorii de echipamente își iau unele măsuri de reducere a amplitudinii curenților armonici ca de exemplu prin adăugarea unui filtru sau bobine în serie. În trecut aceasta a făcut ca unii producători să declare că echipamentele lor corespund cu normativul G5/3. Deoarece normativul G5/3 este un standard de planificare aplicabil unei instalații complete, este imposibil de spus dacă ea va fi respectată fără a cunoaște caracteristicile fiecărui echipament din instalația din locul respectiv.

O creștere în continuare a numărului de pulsuri la 24, obținută prin folosirea în paralel a două unități de 12 pulsuri cu o defazare de 15 grade, reduce curentul armonic total până la 4,5 % (din curentul de alimentare). Instalația ultra sofisticată crește costul, astfel că acest tip de echipament va fi utilizat numai când este absolut necesar pentru a se încadra în limitele impuse de furnizor.

### Aspecte teoretice – cum sunt generate armonicile

Într-un sistem energetic ideal – perfect curat – formele curbelor de tensiune și de curent electric sunt perfect sinusoidale. În practică *curenții* nesinusoidali apar dacă sarcina este neliniară în raport cu tensiunea aplicată. În cazul unui simplu circuit având numai sarcini liniare rezistive, inductive sau capacitive curentul care circulă este proporțional cu tensiunea aplicată (la o anumită frecvență) astfel că, dacă tensiunea aplicată este sinusoidală va circula un curent sinusoidal, așa cum este ilustrat în figura 9. Caracteristica de sarcină este dată de relația dintre tensiunea aplicată și curentul care rezultă în sarcină; cazul ilustrat în figura 9 corespunde unei sarcini liniare. De precizat că dacă în circuit există un element reactiv se va produce un defazaj între curba de tensiune și cea de curent; factorul de putere este redus, dar circuitul poate fi încă liniar.

În figura 10 se prezintă situația în care sarcina este constituită dintr-un redresor și un condensator, ca la intrarea unei surse în comutație (SMPS) tipice. În acest caz curentul circulă numai când tensiunea de alimentare va depăși tensiunea de la bornele condensatorului, de exemplu în apropierea punctului de maxim al curbei de tensiune, ceea ce se observă pe caracteristica de sarcină.

## Cauze și efecte

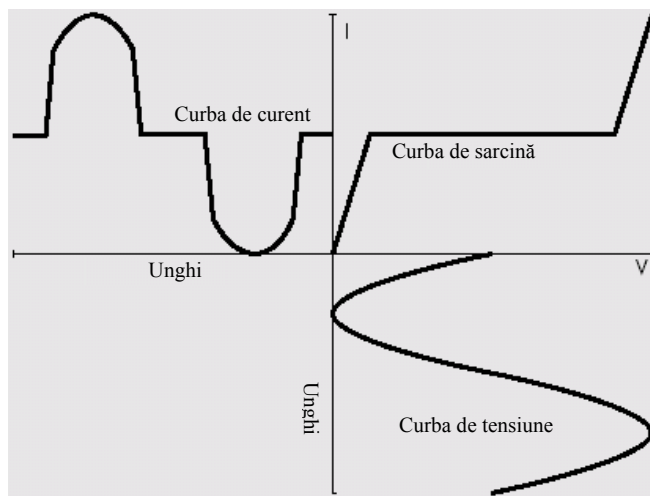


Fig. 10 – Forma curbei curentului electric într-o sarcină neliniară

În practică, caracteristica de sarcină (precum și forma curbei de curent) vor fi mult mai complexe decât cele prezentate; pot fi asimetrice și histeresis, punctele de inflexiune și pantele se vor modifica odată cu încărcarea.

Toate curbele periodice pot fi descompuse în curbe sinusoidale de frecvență fundamentală plus un număr de curbe sinusoidale de frecvențe armonice. Curba deformată de curent din figura 10 poate fi reprezentată prin fundamentală plus un aport de armonică de rang doi, un aport de armonică de rang trei și așa mai departe, posibil până la armonici de rang 13. Pentru curbe simetrice – semiperioadele pozitivă și negativă având aceeași mărime și aceeași formă – armonicile de rang par sunt nule. Armonicile de rang par sunt acum relativ rare, ele apăreau în mod obișnuit când se utilizau vechile redresoare.

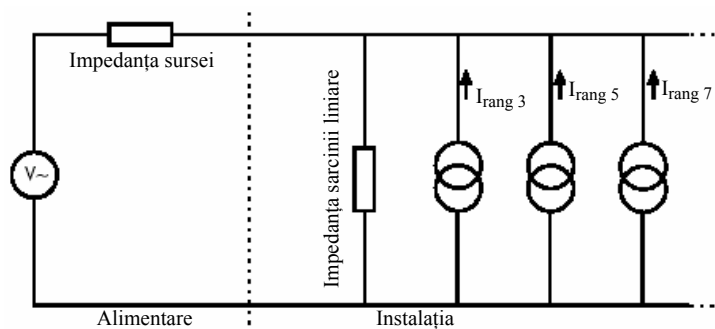


Fig. 11 – Circuitul echivalent al unei sarcini neliniare

În figura 11 este prezentat circuitul echivalent al unei sarcini neliniare. Ea poate fi modelată ca o sarcină liniară în paralel cu un număr de surse de curent, câte o sursă pentru fiecare curent armonic de o anumită frecvență.

Curenții armonici generați de sarcină – sau mai exact conversia de către sarcină din curentul fundamental a curenților armonici – vor circula în circuit prin impedanța sursei și toate celelalte ramuri în paralel. În consecință vor apărea tensiuni armonice pe impedanța sursei de alimentare și acestea vor fi prezente peste tot în instalație. Sursele de armonici sunt uneori reprezentate ca

generatoare de tensiune. Dacă acest lucru ar fi adevărat, impedanța sursei nu ar avea nici o influență asupra amplitudinii tensiunii armonice a sursei. În realitate amplitudinea acestei tensiuni este proporțională – până la o anumită limită – cu impedanța sursei, ceea ce indică faptul că sursa de armonici se comportă mai curând ca o sursă de curent.

Impedanțele interne ale surselor (fig. 11) sunt foarte reduse astfel că distorsiunea armonică a tensiunii rezultată din curentul armonic este foarte mică și adesea mult sub fondul rezidual (*background*). Aceasta poate însă conduce la erori deoarece dă impresia că nu ar fi probleme de armonici când de fapt există curenți armonici importanți. Este un caz similar cu acela în care se încearcă măsurarea curentului la pământ cu ajutorul unui voltmetru. De câte ori se bănuiește prezența armonicilor sau când se încearcă verificarea absenței acestora, trebuie măsurat curentul.

### Probleme determinate de armonici

Curenții armonici determină probleme atât la nivelul distribuției cât și la nivelul instalațiilor. Efectele și soluțiile sunt foarte diverse și vor fi tratate separat; măsurile adecvate pentru ca efectele să fie controlate la nivelul instalațiilor, nu asigură în mod necesar și reducerea distorsiunilor determinate de rețeaua de alimentare și invers.

# Cauze și efecte

## Probleme la nivelul instalațiilor

Există mai multe probleme generale determinate de armonici:

- ◆ Probleme determinate de curenții armonici:
  - supraîncărcarea conductorului de nul de lucru;
  - supraîncălzirea transformatoarelor;
  - acționarea intempestivă a întreruptoarelor;
  - suprasolicitarea condensatoarelor pentru corecția factorului de putere;
  - efect pelicular în conductoare.
- ◆ Probleme determinate de tensiunile armonice:
  - deformarea curbei tensiunii;
  - motoarele de inducție;
  - perturbații la trecerea prin zero a curbelor.
- ◆ Probleme determinate de curenții armonici la nivelul surselor de alimentare.

Fiecare dintre aceste probleme sunt analizate pe scurt în paragrafele următoare.

## Probleme determinate de curenții armonici

### Supraîncărcarea conductorului de nul de lucru

Într-un sistem trifazat, curbele de tensiune ale fiecărei faze în raport cu punctul neutru al conexiunii în stea sunt defazate cu  $120^\circ$ , astfel încât dacă fiecare fază este egal încărcată, curentul rezultat pe neutru este zero. Dacă sarcinile nu sunt echilibrate, pe neutru se transmite numai rezultanta sumei curenților de întoarcere. În trecut, instalatorii (cu aprobarea autorităților de standardizare) au folosit acest fapt și au instalat conductoare de nul de lucru cu o secțiune jumătate față de cea de fază. Totuși dacă curenții de fază, fundamentali, se anulează, pentru curenții armonici nu rezultă aceasta, ci din contră curenții armonici cu rang multiplu de trei se adună în conductorul neutru. Acest efect este ilustrat în figura 12. În această diagramă curenții pe fază, prezentați în partea de sus, sunt defazați la  $120^\circ$ .

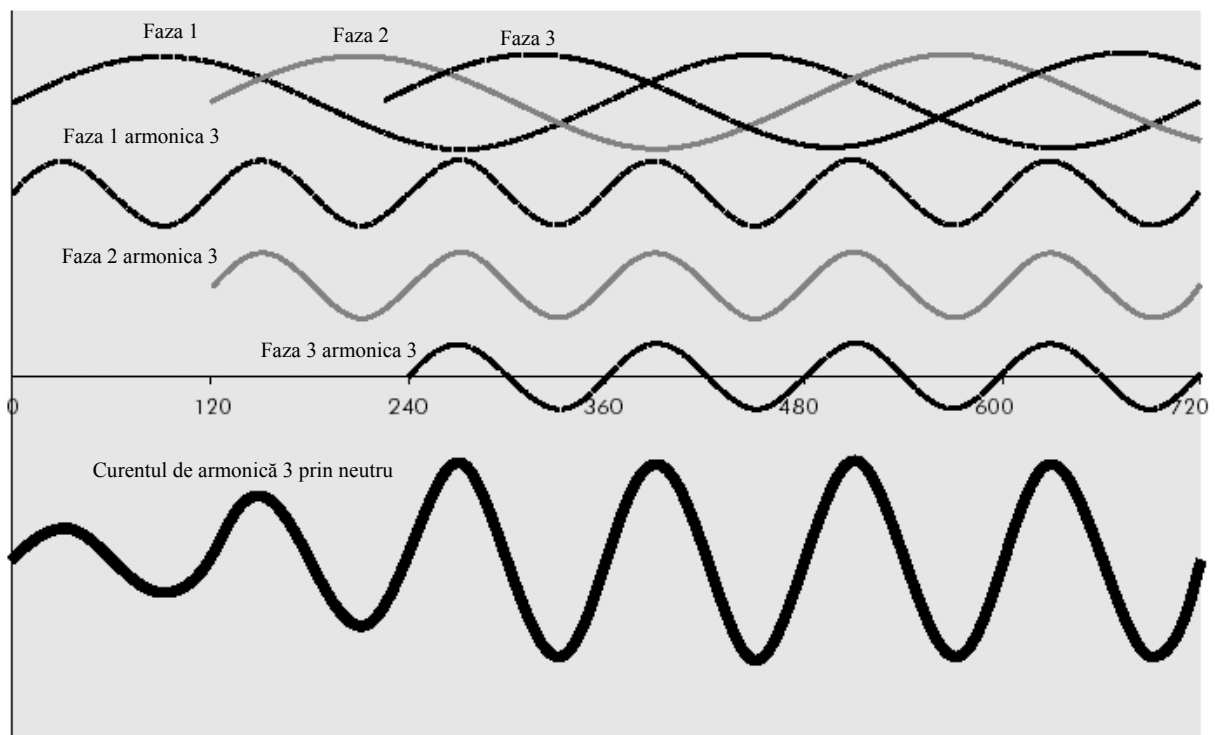


Fig. 12 – Curenții armonici cu rang multiplu de trei se adună în conductorul neutru

## Cauze și efecte

Armonica trei a fiecărei faze este identică, cu o frecvență triplă și are deci o perioadă de trei ori mai mică față de fundamentală. Curentul datorat armonicilor trei în neutru este reprezentat în partea de jos a diagramei. În acest caz curentul armonic pe fază reprezentând 70 % din curentul pe fază va determina, la nivelul conductorului neutru, un curent armonic de 210 % din curentul pe fază.

Măsurători efectuate în imobilele comerciale dau valori de ordinul 150 până la 210 % din curentul pe fază în conductoarele neutru, de multe ori cu secțiuni pe jumătate față de conductorul activ.

Sunt unele confuzii cum să rezolve proiectanții această problemă. Soluția simplă, acolo unde sunt utilizate cabluri monoconductoare, este să se realizeze dublarea secțiunii neutrului fie ca două conductoare separate, fie ca un singur conductor cu secțiune mai mare. Nu este simplă situația în care se utilizează cabluri multiconductoare. Dimensionarea cablurilor multiconductoare (de exemplu, indicată în recomandările CEI 60364-5-523 Tabel 52 și BS7671 Anexa 4) presupune că sarcina este echilibrată și prin conductorul de neutru nu circulă curent, cu alte cuvinte, numai prin trei din patru sau cinci conductoare circulă curent și se încălzesc. Cum capacitatea maximă a cablului este definită numai prin cantitatea de căldură pe care o poate disipa la temperatura maximă admisibilă, rezultă că pentru cablurile prin care circulă curenții armonici de rang multiplu de trei sarcina admisibilă trebuie redusă. În exemplul prezentat anterior, prin cablu circulă cinci unități de curent – trei în faze și două în neutru – deși el a fost dimensionat pentru trei unități. Sarcina lui admisibilă trebuie redusă cu aproximativ 60 % din valoarea normal admisibilă.

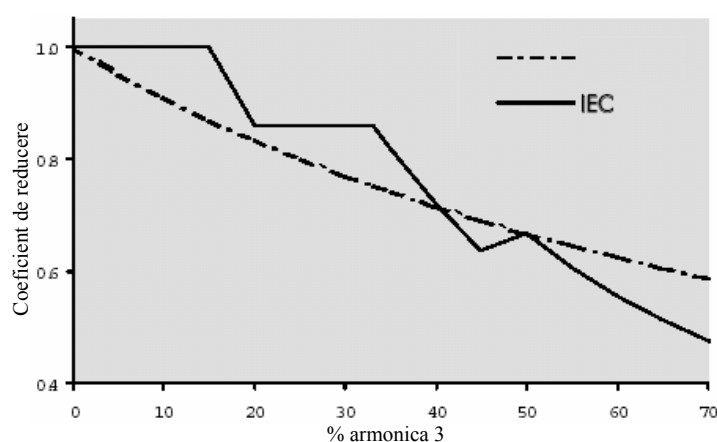


Fig. 13 – Reducerea capacității de încărcare a cablului în funcție de armonicile de rang multiplu de trei

Recomandările CEI 60364-5-523, anexa C (informativă) sugerează o serie de factori de reducere a sarcinii în funcție de curentul armonic de rang multiplu de trei existent în instalație. În figura 13 este indicat factorul de reducere în funcție de conținutul de armonici de rang multiplu de trei, conform recomandărilor CEI 60364-5-523, anexa C și conform metodei termice folosită anterior.

Recomandările CEI 60364-5-523, anexa C (informativă) sugerează o serie de factori de reducere a sarcinii în funcție de curentul armonic de rang multiplu de trei existent în instalație. În figura 13 este indicat factorul de reducere în funcție de conținutul de armonici de rang multiplu de trei, conform recomandărilor CEI 60364-5-523, anexa C și conform metodei termice folosită anterior.

În prezent reglementările sunt în discuție și este posibil ca noi reglementări și noi ghiduri de aplicație să fie introduse în viitorul apropiat în normativele naționale referitoare la dimensionarea conductoarelor.

### Efecte în transformatoare

Transformatoarele sunt afectate de armonici pe două căi. În primul rând, pierderile prin curenți Foucault, reprezentând în mod normal aproximativ 10 % din pierderile la sarcină nominală, cresc cu pătratul rangului armonicii. În practică, pentru un transformator funcționând la puterea nominală și care alimentează o sarcină cuprinzând echipamente informatice (IT), pierderile totale vor fi de două ori mai mari decât în cazul alimentării unei sarcini lineare. Rezultatul este o temperatură mult mai ridicată care conduce la o reducere corespunzătoare a duratei de viață. În fapt, în aceste circumstanțe durata de viață se reduce de la aproximativ 40 ani la circa 40 de zile! Din fericire sunt puține transformatoare încărcate la plină sarcină, dar efectul trebuie luat în considerare când se selectează instalația.

Cel de al doilea efect se referă la armonicile cu rang multiplu de trei. Ele se regăsesc în toate fazele înfășurării unui transformator cu conexiune triunghi, acestea având un traseu circular în înfășurări. Curenții armonici cu rang multiplu de trei sunt efectiv absorbiți de înfășurare și nu se propagă spre alimentare, astfel că transformatoarele cu înfășurare triunghi sunt utile ca transformatoare de izolare. De precizat că celelalte armonici, care nu au rang multiplu de trei, trec prin înfășurare. Curentul de circulație, care se închide între înfășurări, trebuie luat în considerare la dimensionarea transformatorului.

Problema dimensionării transformatoarelor luând în considerare armonicile este prezentată în detaliu într-o altă secțiune a Ghidului.

### Acționarea intempestivă a întreruptoarelor

Întreruptoarele pentru curentul diferențial rezidual (*Residual Current Circuit Breaker* – RCCB) acționează pe baza însumării curentului de fază și de neutru și, dacă diferența nu este sub limita fixată, deconectează sarcina. Declanșarea intempestivă poate să apară în prezența armonicilor din două cauze. În primul rând, întreruptorul, fiind un dispozitiv electromecanic, poate să nu adune corect componentele de înaltă frecvență și ca urmare să

## Cauze și efecte

declanșeze greșit. În al doilea rând, tipul de echipament care generează armonici produce și un zgomot datorat comutației care trebuie filtrat înainte de conectarea la alimentare. Filtrele utilizate în acest scop au, în mod normal, câte un condensator între fază și pământ și între conductorul neutru și pământ și deci va exista o mică scurgere de curent spre pământ. Acest curent este limitat prin standarde la sub 3,5 mA și este de obicei mult mai mic, dar când toate echipamentele sunt conectate în același circuit, curentul de scurgere spre pământ poate fi

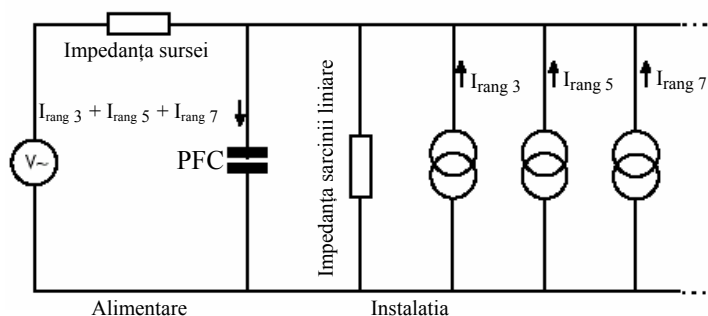


Fig. 14 – Schema echivalentă a circuitului cu o sarcină neliniară și un condensator pentru corectarea factorului de putere

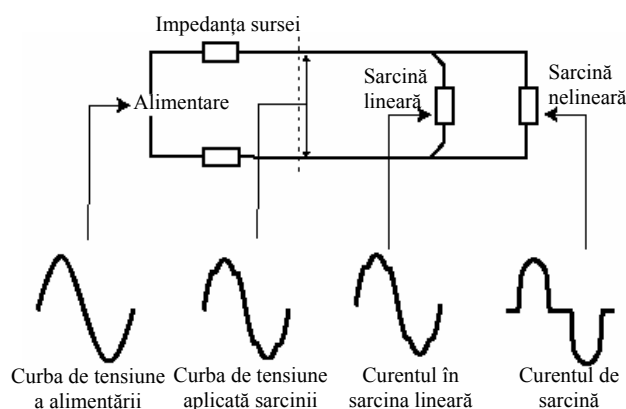


Fig. 15 – Deformarea curbei de tensiune cauzată de o sarcină neliniară

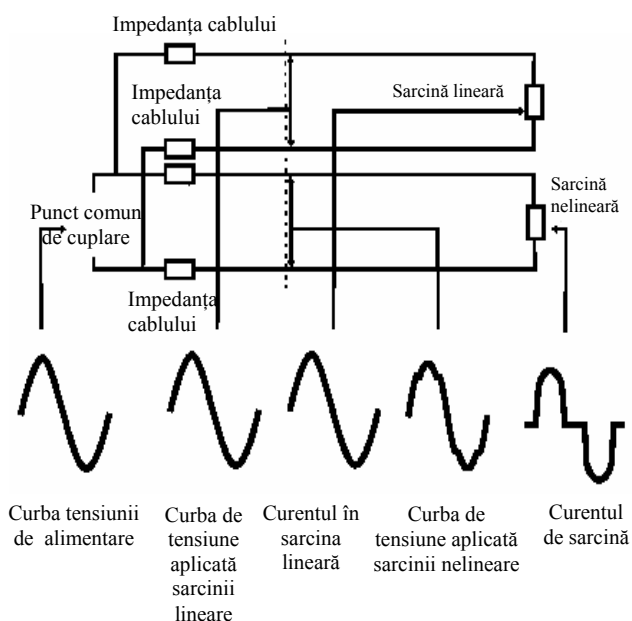


Fig. 16 – Separarea sarcinilor liniare și neliniare

suficient pentru acționarea întreruptorului. Situația poate fi ușor remediată prin prevederea mai multor circuite, fiecare dintre acestea alimentând un număr mai mic de sarcini. O altă secțiune a Ghidului tratează în detaliu problema curenților mari de scurgere la pământ.

Declanșarea intempestivă a întreruptoarelor miniaturizate (MCB) este cauzată de obicei de curenți în circuit care sunt mai mari decât cei calculați sau măsurați, datorită prezenței curenților armonici. Cele mai multe instrumente portabile nu măsoară valoarea efectivă adevărată și pot subestima curenții nesinusoidali cu 40 %. Secțiunea 3.2.2 a Ghidului prezintă problemele legate de măsurarea valorii efective adevărate.

### Suprasolicitarea condensatoarelor pentru corecția factorului de putere

Condensatoarele pentru corecția factorului de putere sunt prevăzute să genereze un curent defazat înaintea tensiunii pentru a compensa un curent defazat în urma tensiunii, datorat unei sarcini inductive, ca de exemplu un motor asincron. În figura 14 este reprezentat circuitul echivalent în cazul prezenței unui condensator pentru corecția factorului de putere și a unei sarcini neliniare. Impedanța condensatorului scade odată cu creșterea frecvenței, în timp ce impedanța sursei, care este în general inductivă crește cu frecvența. Este deci probabil ca prin condensator să treacă curenți armonici foarte mari și pot să apară deteriorări, dacă el nu a fost conceput ca să-i suporte.

O problemă potențial mai serioasă care poate să apară, pentru o frecvență armonică sau aproape de aceasta, este rezonanța între condensator și reactanța de scăpări a sistemului de alimentare (ceea ce se poate produce, evident, la frecvențe cu interval de 100 Hz). Când aceasta are loc, pot fi generate tensiuni și curenți foarte mari, adesea conducând la avarii catastrofale ale condensatorului.

Rezonanța poate fi evitată prin introducerea unei bobine în serie cu condensatorul astfel încât combinația rămâne inductivă, cel puțin pentru armonica semnificativă cu rangul cel mai

## Cauze și efecte

mic. Această soluție limitează totodată curentul armonic care poate circula în condensator. Inductivitatea bobinei poate fi o problemă, în special când sunt prezente armonici de rang mic.

### Efectul pelicular în conductoare

Curentul alternativ are tendința de a circula la suprafața conductorului. Acest fenomen este cunoscut sub denumirea de efect pelicular și este mai pronunțat la frecvențe înalte. Efectul pelicular este în mod normal ignorat deoarece are un efect foarte mic la frecvența nominală de alimentare, dar la peste 350 Hz, adică de la armonică 7, efectul pelicular devine important, provocând pierderi suplimentare și încălzire. Acolo unde există curenți armonici, proiectanții trebuie să țină seama de efectul pelicular și să descarce cablurile în concordanță cu acesta. Utilizarea cablurilor multifilare sau a barelor laminate contribuie la rezolvarea acestei probleme. De notat faptul că, asamblarea și montarea barelor laminate trebuie astfel concepută încât să evite rezonanța mecanică la frecvențele armonice. Ghidul de proiectare „Copper for Busbars – Publicația CDA22” oferă soluții pentru aceste situații.

### Probleme cauzate de tensiunile armonice

Deoarece alimentarea are impedanță internă, curenții armonici de sarcină determină o distorsiune armonică a curbei tensiunii (aceasta este originea formei fluctuante a tensiunii de alimentare, cunoscută sub numele de efect „flat topping”). Sunt două componente ale impedanței: cea a legăturii interne de la punctul comun de cuplare (PCC) și cea proprie a alimentării în PCC, de exemplu determinată de transformatorul local de alimentare. În figura 15 este reprezentată curba deformată.

Curentul de sarcină deformat, generat de sarcina neliniară, determină o cădere de tensiune deformată pe impedanța cablurilor. Tensiunea deformată rezultată se aplică tuturor sarcinilor conectate la același circuit, producând curenți armonici care circulă prin acestea – chiar dacă ele sunt sarcini liniare.

Soluția de separare a circuitelor care alimentează sarcini care generează armonici, de cele care alimentează sarcini sensibile la armonici este prezentată în figura 16. În acest caz, circuite separate alimentează sarcinile liniare și cele neliniare din punctul comun de cuplare, astfel încât distorsiunea de tensiune datorată sarcinii neliniare să nu afecteze sarcina liniară.

La analiza nivelului de distorsiune a tensiunii armonice, trebuie să reamintim că, atunci când sarcina este transferată la un UPS sau un generator de rezervă, în timpul unei întreruperi, impedanța sursei și distorsiunea de tensiune rezultată sunt mult mai mari.

Dacă sunt instalate transformatoare locale, ele trebuie alese cu o impedanță internă suficient de mică și cu o capacitate suficientă de evacuare a căldurii suplimentare, cu alte cuvinte, să se aleagă un transformator supradimensionat corespunzător. De precizat că alegerea unui transformator a cărui mărime de capacitate se asigură prin ventilare forțată nu se recomandă deoarece temperaturile ridicate vor persista în interiorul echipamentului, micșorând durata lui de viață. Răcirea forțată este indicată numai pentru sistemele de rezervă (de intervenție) și nu vor fi folosite niciodată pentru funcționare în regim normal.

### Motoarele de inducție

Tensiunile armonice produc în motoarele de inducție o creștere a pierderilor prin curenți Foucault, în același mod ca și în cazul transformatoarelor. În plus, apar pierderi suplimentare datorate generării de câmpuri armonice în stator, fiecare dintre acestea având tendința de a roti motorul cu o altă viteză, într-un sens sau altul. Curenții de frecvență înaltă induși în rotor conduc la creșterea suplimentară a pierderilor.

Acolo unde sunt tensiuni armonice, motoarele trebuie descărcate pentru a ține seama de pierderile adiționale.

### Perturbații la trecerea prin zero a curbelor

Multe aparate electronice detectează punctul în care tensiunea de alimentare trece prin zero, pentru a determina momentul de cuplare a sarcinii. Aceasta se face deoarece cuplarea unei sarcini reactive la tensiunea zero nu generează fenomene tranzitorii, reducând interferența electromagnetică ca și solicitările la nivelul întrerupătoarelor statice. Dacă există armonici sau fenomene tranzitorii la nivelul alimentării, numărul de treceri prin zero crește, ceea ce conduce la disfuncționalități. În fapt pot fi câteva treceri prin zero într-o semiperioadă.

### Probleme determinate de curenții armonici la nivelul surselor de alimentare

Când un curent armonic este absorbit de la sursa de alimentare, acesta determină o cădere de tensiune armonică proporțională cu impedanța sursei în punctul comun de cuplare (PCC) și cu valoarea curentului. Deoarece rețeaua de alimentare este de regulă inductivă, impedanța ei va fi mai mare la frecvențe mai mari. Evident, tensiunea în PCC este deformată de curenții armonici produși de alți consumatori și de distorsiunea inerentă transformatoarelor și fiecare consumator își aduce contribuția sa suplimentară.

## Cauze și efecte

În mod clar, consumatorilor nu li se poate permite să adauge poluare în sistem în detrimentul altor utilizatori, astfel că în majoritatea țărilor industria energiei electrice a introdus reglementări care limitează valoarea curentului armonic ce poate fi emis. Multe dintre aceste norme au la bază recomandările *UK Electricity Association's G5/3* din 1975, înlocuite de curând cu *G 5/4* (2001). Acest standard este analizat în detaliu într-un alt modul al acestui Ghid.

### Măsurile privind limitarea armonicilor

Măsurile privind controlul curenților armonici emiși sunt analizate în detaliu într-un alt modul al acestui Ghid. Acest modul cuprinde o scurtă prezentare a diferitelor opțiuni. Metodele de limitare pot fi împărțite în trei grupe: filtre pasive, transformatoare de izolare și reducere a armonicilor și filtre active. Fiecare opțiune prezintă avantajele și dezavantajele sale, încât nu există o soluție ideală. Este foarte ușor să se cheltuiască foarte mulți bani pentru o soluție improprie și ineficientă. Concluzia este că sunt necesare în prealabil studii aprofundate, iar mijloacele necesare în acest scop sunt analizate în alt modul al acestui Ghid.

#### Filtre pasive

Filtrele pasive sunt folosite pentru a realiza o cale de impedanță redusă pentru curenții armonici astfel ca ei să circule în filtre și nu în sistemul de alimentare (fig.17). Filtul poate fi proiectat pentru o singură armonică sau pentru o serie de armonici, în funcție de cerințe.

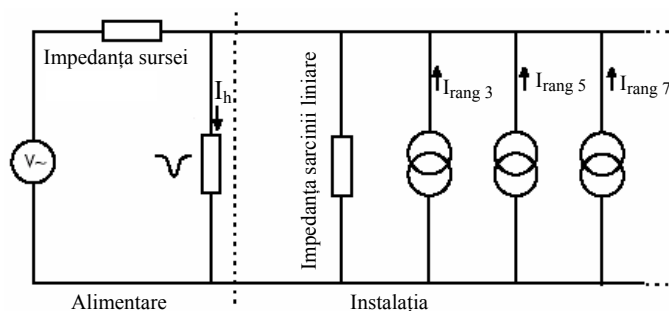


Fig. 17 – Filtru de armonici pasiv tip paralel

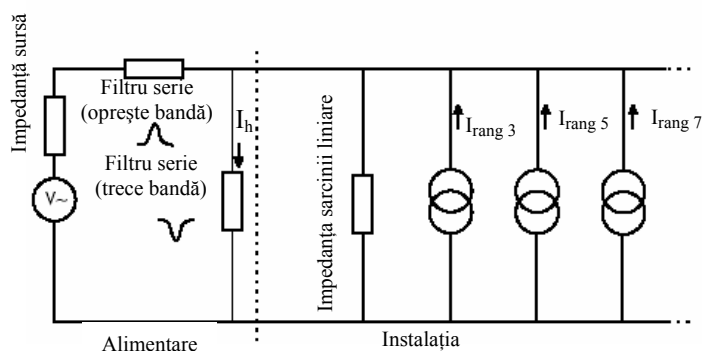


Fig. 18 – Filtre pasive serie și paralel

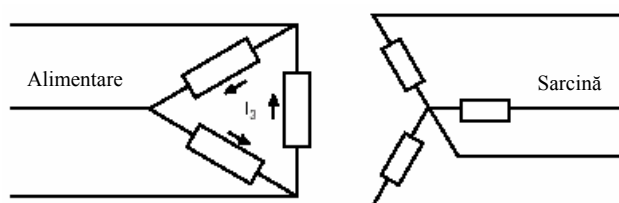


Fig. 19 – Transformator de izolare triunghi-stea

Uneori este necesar să fie proiectat un filtru complex pentru a crește impedanțele serie la frecvențe armonice și astfel să se reducă ponderea curentului care circulă înapoi spre sursa de alimentare, așa cum este prezentat în figura 18.

Filtre simple refulante (oprește bandă) conectate în serie pot fi conectate pe fază sau pe conductorul neutru. Ele sunt destinate în special pentru a bloca curentul și nu pentru a controla circuitul acestuia, astfel încât la nivelul filtrului apare o cădere de tensiune armonică importantă. Această tensiune armonică apare astfel la alimentarea întregii zone a consumatorului. Deoarece tensiunea de alimentare este puternic deformată ea nu se va încadra în normele pentru care echipamentele sunt concepute și garantate. Unele echipamente sunt relativ insensibile la această distorsiune, dar altele sunt foarte sensibile. Filtrele refulante serie pot fi utile în anumite situații, dar trebuie adoptate cu atenție deoarece ele nu pot fi recomandate ca soluție generală.

#### Transformatoare de izolare

Așa cum s-a menționat mai sus, curenții de rang multiplu de trei au un traseu circular în înfășurările triunghi ale transformatoarelor. Deși aceasta este o problemă a fabricanților de transformatoare și a utilizatorului – sarcina suplimentară trebuie luată în considerare – ea constituie un avantaj pentru proiectantul de sistem deoarece armonicile de rang multiplu de trei sunt izolate față de alimentare (fig. 19).

## Cauze și efecte

Același efect se poate obține utilizând transformatoare cu conexiune „zig-zag”. Transformatoarele zig-zag sunt autotransformatoare cu conexiune stea, având înfășurările conectate în paralel cu rețeaua de alimentare cu o defazare particulară a tensiunilor rezultate (de fapt o combinație de conexiuni în stea și în triunghi).

### Filtre active

Soluțiile prezentate până aici sunt destinate numai pentru anumite armonici: transformatorul de izolare numai pentru armonicile de rang multiplu de trei și filtrele pasive numai pentru frecvența armonică pentru care au fost proiectate. În unele instalații spectrul curentului armonic este greu de precizat. Pentru multe instalații alimentând sisteme informatice, echipamentele pot fi diferit configurate și pot fi mutate astfel încât conținutul armonic se va modifica continuu. O soluție convenabilă este un filtru activ sau un condiționar activ.

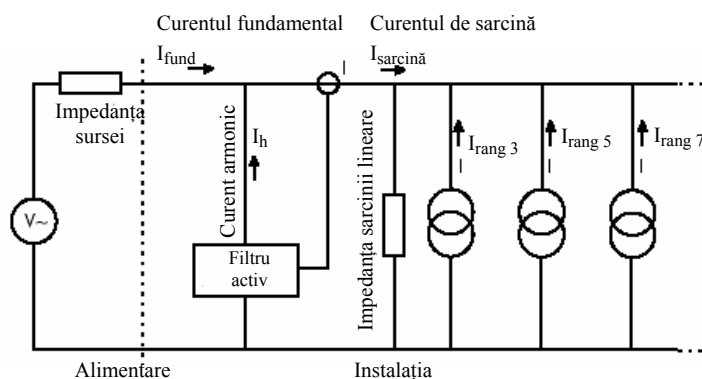


Fig. 20 –Filtru de armonici activ

După cum se arată în figura 20, filtrul activ este un echipament de tip sursă. Un transformator de curent măsoară conținutul armonic al curentului de sarcină și comandă o sursă de curent să genereze o copie exactă a curentului care va fi injectat în perioada următoare. Curentul armonic este generat de filtrul activ și numai curentul fundamental este absorbit din rețeaua de alimentare. În practică, amplitudinile curenților armonici sunt reduse cu 90 % și, deoarece impedanța sursei de alimentare la frecvențele armonice este redusă, distorsiunea tensiunii este redusă.

## Concluzii

Practic, toate echipamentele electrice și electronice moderne au surse în comutație sau controlează într-un fel sau altul puterea absorbită și astfel rezultă ca sarcini nelineare. Sarcinile liniare sunt relativ rare, lămpile incandescente necontrolate și sistemele necontrolate de încălzire ar fi singurele exemple.

Standardele pentru viitoarele echipamente sunt prezentate într-o altă secțiune a acestui Ghid. Acestea însă nu sunt suficient de severe pentru a se obține un efect notabil la nivelul poluării armonice cauzată de echipamentele electronice cum sunt calculatoarele personale. Această clasă de echipamente determină cea mai mare parte a problemelor cauzate de armonici, întâlnite în industrie și în comerț, pe de o parte datorită numărului mare instalat și pe de altă parte datorită tipului de armonici pe care îl produc – cu rang multiplu de trei.

Ca urmare a creșterii numărului de echipamente și fără aplicarea unor norme severe, care să fie urmate de măsuri drastice, este probabil că poluarea armonică va crește. Este un risc pentru întreprinderile care au investit, pe baza unei practici corecte de proiectare, în echipamente corect alese și într-o bună mentenanță.

## Parteneri

### Copper Benelux

168 Avenue de Tervueren  
B-1150 Brussels  
Belgium

Tel: 00 32 2 777 7090  
Fax: 00 32 2 777 7099  
Email: [mail@copperbenelux.org](mailto:mail@copperbenelux.org)  
Web: [www.copperbenelux.org](http://www.copperbenelux.org)

Contact: Mr B Dôme

### Copper Development Association

Verulam Industrial Estate  
224 London Road  
St Albans AL1 1AQ  
United Kingdom

Tel: 00 44 1727 731205  
Fax: 00 44 1727 731216  
Email: [copperdev@compuserve.com](mailto:copperdev@compuserve.com)  
Webs: [www.cda.org.uk](http://www.cda.org.uk) & [www.brass.org](http://www.brass.org)

Contact: Mrs A Vessey

### Deutsches Kupferinstitut e.V

Am Bonneshof 5  
D-40474 Duesseldorf  
Germany

Tel: 00 49 211 4796 323  
Fax: 00 49 211 4796 310  
Email: [sfassbinder@kupferinstitut.de](mailto:sfassbinder@kupferinstitut.de)  
Web: [www.kupferinstitut.de](http://www.kupferinstitut.de)

Contact: Mr S Fassbinder

### ECD Services

Via Cardinal Maffi 21  
I-27100 Pavia  
Italy

Tel: 00 39 0382 538934  
Fax: 00 39 0382 308028  
Email: [info@ecd.it](mailto:info@ecd.it)  
Web [www.ecd.it](http://www.ecd.it)

Contact: Dr A Baggini

### 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)  
Web: [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org)

Contact: Mr H De Keulenaer

### Hevrox

Schoebroekstraat 62  
B-3583 Beringen  
Belgium

Tel: 00 32 11 454 420  
Fax: 00 32 11 454 423  
Email: [info@hevrox.be](mailto:info@hevrox.be)

Contact: Mr I Hendrixx

### HTW

Goebenstrasse 40  
D-66117 Saarbruecken  
Germany

Tel: 00 49 681 5867 279  
Fax: 00 49 681 5867 302  
Email: [wlang@htw-saarland.de](mailto:wlang@htw-saarland.de)

Contact: Prof Dr W Langguth

### Istituto Italiano del Rame

Via Corradino d'Ascanio 4  
I-20142 Milano  
Italy

Tel: 00 39 02 89301330  
Fax: 00 39 02 89301513  
Email: [ist-rame@wirednet.it](mailto:ist-rame@wirednet.it)  
Web: [www.iir.it](http://www.iir.it)

Contact: Mr V Loconsolo

### KU Leuven

Kasteelpark Arenberg 10  
B-3001 Leuven-Heverlee

Belgium  
Tel: 00 32 16 32 10 20  
Fax: 00 32 16 32 19 85  
Email: [ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be](mailto:ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be)

Contact: Prof Dr R Belmans

### Polish Copper Promotion Centre SA

Pl.1 Maja 1-2  
PL-50-136 Wroclaw  
Poland

Tel: 00 48 71 78 12 502  
Fax: 00 48 71 78 12 504  
Email: [copperpl@wroclaw.top.pl](mailto:copperpl@wroclaw.top.pl)

Contact: Mr P Jurasz

### TU Bergamo

Viale G Marconi 5  
I-24044 Dalmine (BG)  
Italy

Tel: 00 39 035 27 73 07  
Fax: 00 39 035 56 27 79  
Email: [graziana@unibg.it](mailto:graziana@unibg.it)

Contact: Prof R Colombi

### TU Wroclaw

Wybrzeze Wyspianskiego 27  
PL-50-370 Wroclaw  
Poland

Tel: 00 48 71 32 80 192  
Fax: 00 48 71 32 03 596  
Email: [i8@elektryk.ie.pwr.wroc.pl](mailto:i8@elektryk.ie.pwr.wroc.pl)

Contact: Prof Dr H Markiewicz





*David Chapman*

 **Copper Development Association**

Copper Development Association  
Verulam Industrial Estate  
224 London Road  
St Albans AL1 1AQ  
United Kingdom

Tel: 00 44 1727 731200  
Fax: 00 44 1727 731216  
Email: [copperdev@compuserve.com](mailto:copperdev@compuserve.com)  
Websites: [www.cda.org.uk](http://www.cda.org.uk)  
[www.brass.org](http://www.brass.org)



Membră a  
**EUROEL**

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)

europa  
**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)