

CONSUMATORI ELECTRICI, SURSE DE PERTURBAȚII ELECTROMAGNETICE

1. Introducere

Modernizarea industriei, prin introducerea de noi tehnologii, precum și apariția noilor generații de aparate și echipamente din sectoarele casnic și terțiar, au determinat importante modificări în natura sarcinilor conectate la sistemele electroenergetice.

În marea lor majoritate, echipamentele moderne se bazează pe utilizarea semiconductoarelor. Acestea prezintă caracteristici tensiune-curent neliniare, constituind astfel surse perturbatoare generatoare de armonici în rețeaua electrică, degradând produsul energie electrică și putând afecta ceilalți consumatori.

Din punct de vedere al influenței exercitată asupra rețelelor de alimentare cu energie electrică, consumatorii pot fi grupați astfel:

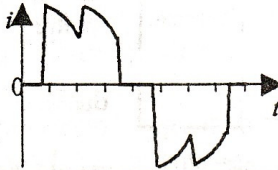
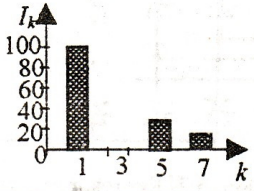
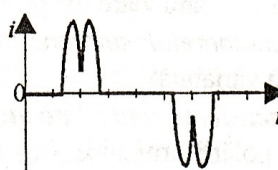
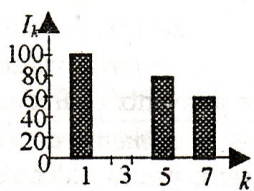
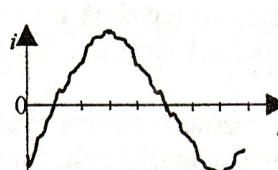
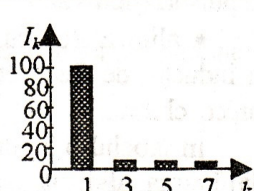
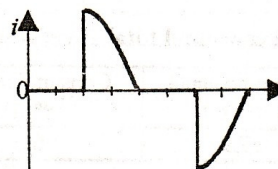
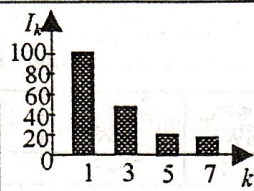
- **categoria I:** consumatori cu sarcină aproximativ constantă (pompe, ventilatoare, iluminat), la care calitatea tensiunii este afectată doar de abateri ale tensiunii față de valoarea nominală,
- **categoria a II-a:** consumatori care funcționează cu șocuri de sarcină (laminoare, motoare cu porniri repetate), care produc fluctuații ale tensiunii,
- **categoria a III-a:** consumatori cu racordare nesimetrică la rețeaua trifazată (echipamente de tracțiune, de sudură),
- **categoria a IV-a:** consumatori deformanți (redresoare, cuptoare electrice cu arc).

2. Sarcini neliniare

Utilizarea pe scară largă a receptoarelor cu caracteristici neliniare determină circulația unor curenți armonici intensi în rețeaua electrică, cu efecte perturbatoare asupra instalațiilor electrice. Deformarea curbelor de tensiune și curent va caracteriza întregul sistem, cu preponderență însă în punctele de conectare a condensatoarelor pentru compensarea puterii reactive.

Sarcinile neliniare conectate în rețelele electrice pot fi clasificate :

- *Receptoare de putere unitară mică, de largă răspândire* – aparate electrocasnice moderne, utilitățile profesionale;
- *Sarcini de putere unitară medie, cu răspândire frecventă* – echipamentele pentru comanda vitezei variabile la motoare, instalațiile de aer condiționat de putere medie, instalațiile de încălzire industriale ;
- *Sarcini de putere unitară mare, cu răspândire redusă* - echipamentele industriale de putere.

Sursa poluantă	Echipamentul	Curentul emis	Spectru armonic curent
Redresoare trifazate cu tiristoare (60% surse poluante)	- motor c.c. cu viteză variabilă - motor sincron cu viteză variabilă - electrolizor - cuptor de inducție		
Redresoare cu filtru capacitiv (15% surse poluante)	- mașini asincrone cu viteză variabilă		
Cuptoare cu arc (15% surse poluante)	- cuptor cu arc electric - sudare cu arc electric		
Variatoare (10% surse poluante)	- pornirea motoarelor asincrone - reglarea cuptoarelor cu rezistență - reglajul boilerelor cu electrozi		

Principalele sarcini poluante din sectorul industrial – caracteristici

Pentru aprecierea nivelului de poluare armonică a unui consumator neliniar poate fi adoptat indicatorul factorul de poluare a puterii instalate.

$$k_p = \frac{P_{MCC} + 2P_{MAS} + 0.2P_{cuptor_arc} + 0.5P_{electrolizor} + 0.2P_{variator}}{P_{total_instalata}} \quad (1)$$

P_{MCC} – puterea instalată în ansamblul mașinilor de tensiune continuă cu viteză variabilă;

P_{MAS} – puterea instalată în MA cu viteză variabilă;

P_{cuptor_arc} – puterea instalată în cuptoarele cu arc electric;

$P_{electrolizor}$ – puterea instalată în echipamentele cu punți redresoare;

$P_{total_instalata}$ – puterea totală a echipamentelor instalate.

Analiza poluării armonice a RE (determinări experimentale) a pus în evidență următoarele:

- ponderea cea mai mare o are armonica de rang 5 – prezența TRAFU Dy între rețelele de m.t. și j.t. determină limitarea armonicii de rang 3;
- cei mai poluanți sunt consumatorii alimentați în m.t.; apar depășiri frecvente ale valorilor admise pentru curenții armonici de rang 5, 7, 11, 13;
- consumatorii conectați direct la tensiune înaltă (cca 5 % ca număr) determină poluarea armonică a rețelei și depășiri ale nivelurilor admise (întreprinderi siderurgice, industria de mase plastice, industria cimentului, chimia organică de bază, tehnologii electronice);

- nivelurile de curenți armonici sunt diferite în funcție de sectoarele de activitate; consumatorii de î.t. sunt mai puțin poluanți armonic decât cei alimentați la m.t.:
 - un consumator alimentat la î.t. este frecvent confruntat cu problemele de calitate a tensiunii, este mai sensibil la problemele ridicate de poluarea armonică și acordă o atenție mai ridicată limitării perturbațiilor emise);
 - consumatorii alimentați la m.t. acordă o atenție mai redusă poluării armonice, au posibilități mai reduse de a urmări emisiile produse și de a adopta măsuri de limitare.

Comparație între consumatorii alimentați în î.t. și m.t.

Tensiunea de alimentare	î.t.	m.t.
Consum (TWh/an)	48,7	54,4
Timpul de lucru	3,8 (80% dintre consumatori, cu excepția industriei aeronautice și automobilelor)	3,9 (60% dintre consumatori) 2,8 (30% dintre consumatori)
Emisia armonică de rang 5	10% dintre consumatori depășesc limitele admise de norme	59% dintre consumatori depășesc limitele admise de norme
Emisia armonică de rang 7	Nicio depășire	65% dintre consumatori depășesc limitele admise de norme
Emisia armonică de rang 11	Nicio depășire	50% dintre consumatori depășesc limitele admise de norme
Emisia armonică de rang 13	Nicio depășire	9% dintre consumatori depășesc limitele admise de norme
Condensatoare pentru compensarea Q	19% dintre consumatori nu au instalații de compensare; 48% dintre consumatori au instalații de compensare, conectate permanent	29% dintre consumatori nu au instalații de compensare; 47% dintre consumatori au instalații de compensare, conectate permanent
Filtre pasive	Frecvent conectate pentru armonici de rang 5 și 7	Fără filtre sau cu puține

3. Convertoarele statice de putere

Convertorul este un ansamblu funcțional care asigură o conversie electronică de putere, cuprinzând dispozitive semiconductoare, transformatoare, aparataj principal și auxiliar. Acesta se folosește tot mai mult în instalațiile electrice, în scopul realizării:

- conversiei energiei de c.a. în energie de c.c. (redresor),
- conversiei energiei de c.c. în energie de c.a. (invertor),
- conversiei energiei de c.c. în energie de c.c. (convertor direct sau indirect de c.c.),

- conversiei energiei de c.a. în energie de c.a. (convertizor direct sau indirect de c.a.),
- de decuplări periodice sau nu.

În general, convertoarele de putere cu tiristoare (folosite în electronica de putere pentru modificarea/reglajul frecvenței, schimbarea tensiunii și a numărului de faze, modificarea fluxului de putere reactivă) sunt *sarcini neliniare*, care produc diferite perturbații în rețeaua electrică de alimentare, cum ar fi:

- fluctuații de tensiune, definite ca diferența valorilor efective între două regimuri staționare consecutive,
- armonici de curent, definiți prin rang, amplitudine și fază,
- deformări periodice și tranzitorii ale unde de tensiune a rețelei de alimentare,
- creștături de comutație, definite prin lărgime, profunzime și suprafață,
- oscilații repetitive de comutație, asociate creștăturilor de comutație, definite prin energie, amplitudine, pantă,
- supratensiuni,
- componente interarmonice, provocate de convertizoarele de frecvență.

Conform recomandărilor CEI 146-1-2, variația de tensiune datorată convertoarelor (pentru tensiunea fundamentală) poate fi estimată cu relația:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{S_{1L}}{S_{sc}} \cos[1/\operatorname{tg}(X_{sc}/R_{sc}) - \varphi_1], \quad (2)$$

unde: S_{1L} reprezintă puterea aparentă a convertorului pe partea rețelei de alimentare și corespunde valorii efective a fundamentalei curentului garantat (nominal) I_{1LN} pe partea de curent alternativ a convertorului sau a transformatorului (dacă există), φ_1 - unghiul de defazaj al fundamentalei curentului pe partea de curent alternativ al convertorului sau a transformatorului, dacă acesta există, S_{sc} - puterea aparentă de scurtcircuit a rețelei în punctul comun de racord, R_{sc} , X_{sc} - rezistența, respectiv reactanța rețelei de alimentare.

Deoarece curentul pe partea rețelei de alimentare a convertorului conține armonici, trebuie făcută distincție între factorul de putere global și cel corespunzător defazajului componentei fundamentale a curentului.

Teoretic, pentru un convertor cu p pulsuri, apar armonici de rang

$$k = p \cdot m \pm 1, \text{ cu } m=1, 2, 3\dots \quad (3)$$

Exemplu: pentru un redresor 6 pulsuri, în rețea apar armonici caracteristici de rang 5, 7, 11, 13.

3.1. Redresoarele trifazate

Redresoarele sunt mutatoare cu comutație naturală și îndeplinesc funcția de conversie a energiei electrice de la tensiune alternativă la tensiune continuă.

Pot fi întâlnite trei tipuri de redresoare trifazate în punte:

- necomandată;
- comandată;
- semicomandată.

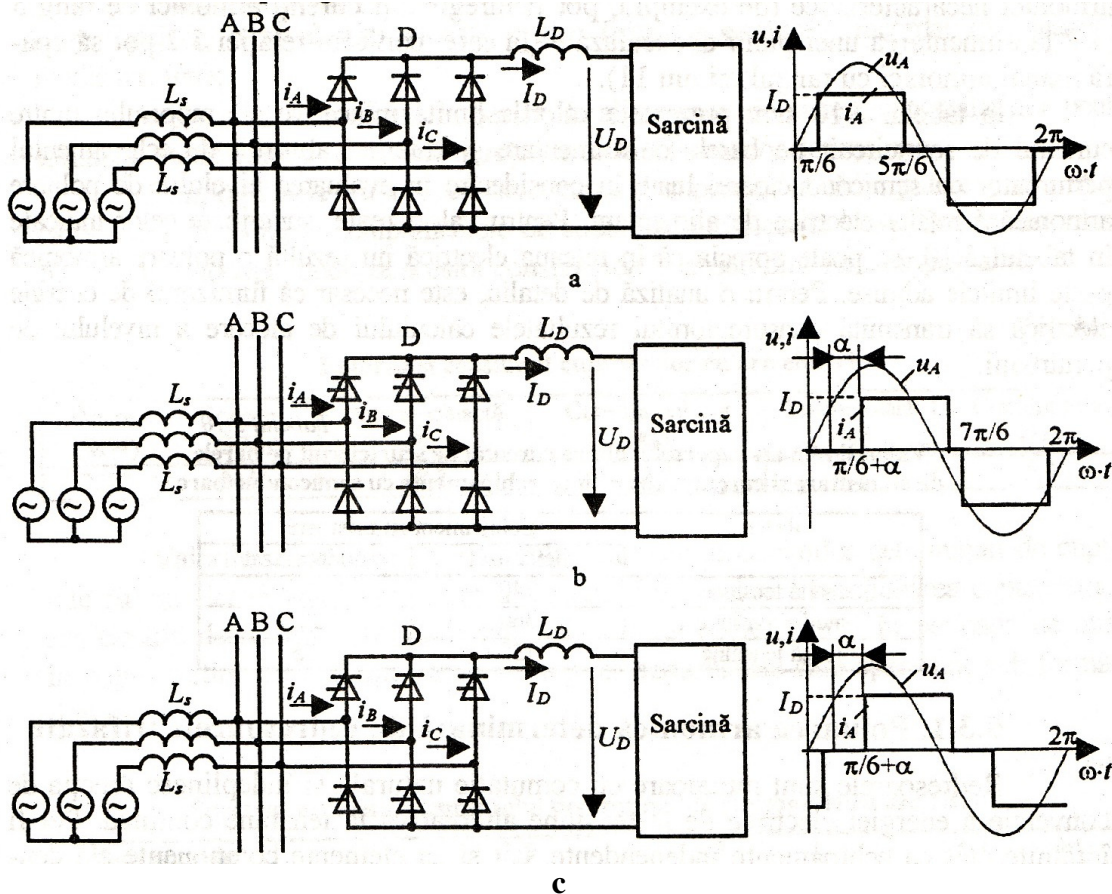


Fig.1. Schemele de principiu și formele curbelor de tensiune și curent pentru redresorul trifazat, dublă alternanță : a) necomandat ; b) semicomandat ; c) comandat

Redresorul ideal

Caracteristici :

- nu prezintă pierderi și comută instantaneu ;
- curentul la ieșirea redresorului este continuu, determinând un curent absorbit de formă dreptunghiulară.

Curentul absorbit prezintă doar armonici de rang 5, 7, 11, 13..., cu valoarea efectivă :

$$I_k = \frac{I_1}{k} \quad (4)$$

cu I_1 – valoarea efectivă a fundamentalei.

Rezultă:

- factorul de distorsiune de curent = 30%
- factorul de distorsiune de tensiune = 0% (alimentare de la o sursă de putere considerată infinită).

Defazajul armonicii de rang k față de trecerea prin 0 a tensiunii :

$$\varphi_k = \alpha k \quad (5)$$

cu α – unghiul de comandă a redresorului.

Cunoașterea amplitudinii și defazajelor armonicilor determinate de redresoarele unui consumator perturbator prezintă un interes practic deosebit având în vedere că

adunarea curenților deformați, la barele de alimentare a consumatorului, se face fazorial și se poate obține o reducere importantă a factorului total de distorsiune a curentului, în cazul unei utilizări raționale a redresoarelor.

Teoretic, pentru redresor ideal, nivelul armonicilor caracteristice rezultă conform ec. (3).

În realitate apar și armonici necaracteristice determinate de imprecizii în comanda semiconductoarelor, caracteristici diferite ale acestora, parametri diferiți ai fazelor circuitului de alimentare etc.

În cazurile practice, nivelul armonicilor determinate de funcționarea redresoarelor poate fi determinat:

$$I_k = \frac{I_1}{\left(k - \frac{5}{k}\right)^{1,2}} \quad (6)$$

Spectrul armonic al curentului absorbit de mutatoare cu 6 și 12 pulsuri

Rang	Nivelul armonicilor (%)					
	6 pulsuri			12 pulsuri		
	Teoretic ec. (4)	Teoretic ec. (6)	Măsurat	Teoretic ec. (4)	Teoretic ec. (6)	Măsurat
1	-		100	100		100
2	-	-	1	-	-	1
3	-	-	1	-	-	1
4	-	-	1	-	-	1
5	20	18,9	20	-	-	2
7	14,3	11	12	-	-	1,2
11	9,1	5,92	8	9,1	5,91	8
13	7	4,77	7,7	7,7	4,77	7
17	5,9	3,41	4,5	-	-	0,5
19	5,3	2,97	4	-	-	0,4
23	4,3	2,35	3	4,3	2,35	3
25	4	2,12	3	4	2,12	3

3.2. Variatoarele de tensiune

Sunt larg utilizate în sistemele de reglare, asigurând modificarea continuă a valorii efectiv a tensiunii la ieșire, respectiv a valorii efective a curentului electric prin elementul conectat în aval.

Aceste sisteme de reglare sunt utilizate pentru reglarea puterii disipată în cuptoarele electrice cu rezistoare, reglarea continuă a puterii reactive (Static Var Compensator), reglarea fluxului luminos al lămpilor cu incandescență, controlul curentului de pornire al MA, reglarea tensiunii de alimentare a instalațiilor de sudare de î.f. etc.

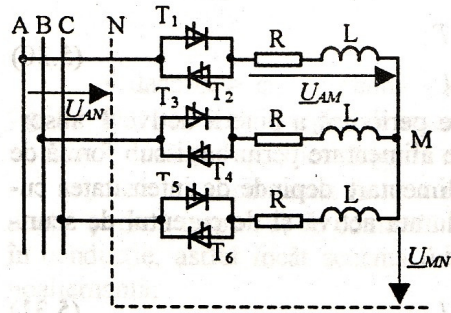


Fig.2. Schema de principiu a variatorului de tensiune alternativă trifazat

Regimul de lucru al schemei depinde de tipul sarcinii și de valoarea unghiului de comandă, fiind posibile 3 moduri de lucru, în funcție de circuitul de întoarcere al curentului:

- *modul 1* în care conduc 2 sau 3 variatoare de tensiune (începe imediat ce unghiul de comandă este mai mare decât unghiul de defazaj al sarcinii; este urmat de modul 2 sau 3);
- *modul 2* în care conduc 2 variatoare de tensiune;
- *modul 3* în care conduc fie 2 variatoare de tensiune, fie acestea sunt blocate.

Tensiunile la bornele sarcinii cuprind doar armonici de rang $k = 6m \pm 1$ datorită simetriei curbelor și inexistenței armonicilor de rang multiplu de 3.

Componența spectrală a curentului absorbit din rețeaua de alimentare poate fi stabilită conform relației :

$$I_k = \frac{U_{sk}}{\sqrt{R^2 + k^2 \omega_1^2 L^2}} \quad (7)$$

$$\varphi_k = \arctan \frac{k \omega_1 L}{R}$$

Variatoarele de tensiune pot fi utilizate și ca regulatoare cu întrerupere periodică a sarcinii, în cazul în care tiristoarele din schemă sunt comandate ca întreruptoare statice. Se asigură o modificare a valorii efective I_i a curentului cu întrerupere periodică prin modificarea raportului dintre durata activă t_a și durata t_c a ciclului de funcționare a variatorului:

$$I_i = I \sqrt{d} \quad (8)$$

unde I – valoarea efectivă a curentului pe durata conducerii variatorului de tensiune;

$d = t_a / t_c$ - durata activă relativă.

$$t_a = k_a T$$

$$t_c = k_c T$$

Deoarece durata ciclului t_c este mai mare decât perioada T a armonicii fundamentale a tensiunii pe barele de alimentare, descompunerea în serie Fourier a curbei curentului electric cu întrerupere periodică, cu perioada t_c , determină o armonică fundamentală, pentru această curbă, de frecvență f_{1i} , egală cu f_1/k_c , inferioară frecvenței $f_1 = 50$ Hz.

Armonica de rang k_c a curbei curentului cu întrerupere periodică are o frecvență f_{kci} egală cu frecvența fundamentală a tensiunii pe barele de alimentare și o valoare efectivă:

$$I_{kci} = dI \quad (9)$$

unde I – curentul absorbit de consumator pe durata activă.

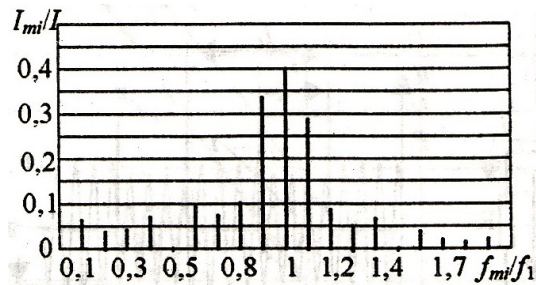


Fig.3. Spectrul armonic al curentului întrerupt periodic pentru $d=0.4$ și $k_c = 10$

4. Circuite cu arc electric

Cuptoarele cu arc sunt receptoare electrice care provoacă în timpul funcționării șocuri aleatorii de putere reactivă. Sunt considerate principalele receptoare care produc variații rapide de tensiune în rețea - *flicker*.

În elaborarea unei șarje de oțel cu durata de 3-8 ore, în funcție de caracteristicile cuptorului și ale procesului tehnologic, se disting următoarele perioade:

- perioada de topire,
- perioada de afânare,
- perioada de finisare.

Fluctuațiile de tensiune apar numai în perioada de topire (0,5-1,5 ore), sub acțiunea arcului electric, care se stabilește între electrozi și masă. Încărcătura este topită în mod progresiv, în jurul electrozilor apărând băi de metal lichid.

Fluctuațiile sarcinii se pot datora:

- surpărilor de material, care produc frecvente scurtcircuite monofazate, bifazate sau trifazate, care alternează cu întreruperi totale, având drept consecință variații aleatoare ale curentului, de ordinul $(0...2) I_N$;
- variațiilor continue ale lungimii arcului, care se amorsează pe diferite vârfuri ale încărcăturii; dispariția prin topire a acestor puncte de sprijin ale arcului, la intervale de 0,1-0,4 s, conduce la o continuă modificare a lungimii arcului, fluctuațiile curentului de sarcină sunt de ordinul $(0,4-0,5) I_N$;
- întreruperii voite a sarcinii, fie pentru completarea încărcăturii, fie pentru modificarea tensiunii arcului, care se realizează prin ridicarea electrozilor. Drept rezultat, curentul scade la zero în 1-2 s, iar coborârea electrozilor în cuvă duce la o creștere bruscă a curentului.

Cuptoarele cu arc electric pot fi exploatate în două moduri:

- **exploatare clasică**, când exploatarea cuptorului se face în regimul de putere maximă în arc, la un factor de putere de aproximativ 0,8 cu arcuri lungi și puteri specifice instalate de aproximativ 100 kW/mp de cuvă,
- **exploatare în UHP (Ultra High Power)**, când exploatarea cuptorului se face în regim de putere mărită, la un factor de putere de 0,7-0,75, cu arcuri scurte și puteri specifice instalate de aproximativ 150 kW/mp de cuvă.

În funcție de condițiile de funcționare a cuptorului și de caracteristicile încărcăturii, fluctuațiile de tensiune variază în limite largi.

În calcule practice, mărimea fluctuațiilor de tensiune, în procente din valoarea tensiunii nominale, se poate calcula cu relația:

$$\Delta U \% = 100 \Delta Q / S_{sc}, \quad (10)$$

unde ΔQ reprezintă șocul (fluctuația) de putere reactivă provocat de cuptor iar S_{sc} este puterea aparentă de scurtcircuit în punctul de racord al cuptorului la rețea.

Estimarea corectă a amplitudinii maxime a fluctuațiilor puterii reactive absorbite de cuptor are mare importanță pentru realizarea unei scheme de alimentare corespunzătoare sub aspectul compatibilității electromagnetice a cuptorului cu rețeaua electrică de alimentare.

Circuitele care alimentează instalații cu arc electric sunt parcurse de **curenți armonici** specifici determinați de caracterul nelinier al arcului electric. Analiza armonică a curentului determinat de arcul electric conduce la rezultate concludente doar în regimul de funcționare stabilă a acestuia.

Apariția de regimuri nesinusoidale determinate de arcul electric, pe durata regimului staționar, pot fi puse în evidență la:

- cuptoarele electrice cu arc;
- instalații de sudare;
- lămpi cu descărcări în gaze și vapori metalici.

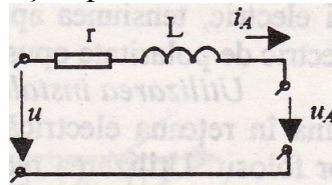


Fig.4. Scheme echivalente ale circuitului arcului electric

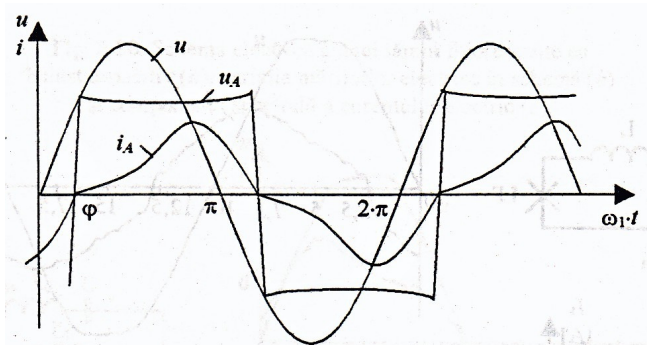


Fig.5. Variația mărimilor în circuitul arcului electric

Tensiunea de bornele arcului electric scade cu creșterea intensității curentului în circuit și are o formă trapezoidală .

Spectrul armonic al curentului în circuit este dat de:

$$I_k = \frac{S}{\sqrt{3} U_n k^2} \quad (11)$$

unde S – puterea aparentă trifazată a instalației cu arc electric ;
 U_n – tensiunea nominală de alimentare.

Instalațiile cu arc electric alimentate la tensiune continuă determină în rețeaua de alimentare armonici corespunzătoare tipului de redresor folosit. Redresoarele cu 12 pulsuri pentru alimentarea cuptoarelor cu arc electric conduce la apariția armonicilor de rang 11 și 13.

Lămpile electrice cu descărcări în vapori metalici sunt receptoare cu caracteristici neliniare și determină în circuitul de alimentare un curent a cărui formă depinde de tipul lămpii, al balastului și schema de montare.

Analiza componentei spectrale a curentilor absorbiți de instalațiile de iluminat fluorescent pune în evidență că acestea generează în special armonici de rang 3, care se propagă în rețeaua de alimentare și pot conduce la o supraîncărcare a conductorului de nul.

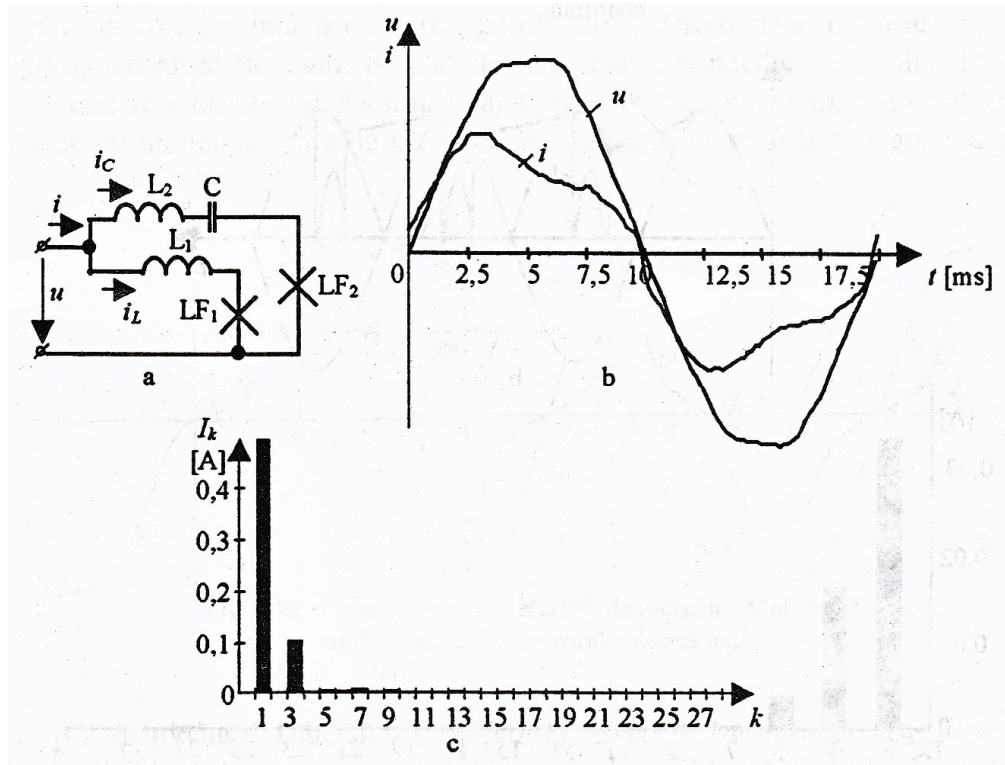


Fig.6. Montaj duo: a) schema electrică; b) variația mărimilor electrice; c) componenta spectrală a curentului $\Rightarrow \lambda_{cap} = 0.95, THD_1 = 21.76\%, I_3 = 20.7\%, I_5 = 1.6\%$

Utilizarea balasturilor electronice, generalizată la LFC utilizate pentru reducerea consumului de energie în instalațiile de iluminat, conduce la modificarea spectrului armonicilor determinate de aceste instalații. Caracteristic acestor lămpi este existența pe intrarea schemei a unui redresor cu filtrare capacitivă care determină un curent caracterizat de: $\lambda_{ind} = 0.66, THD_1 = 51.28\%, I_3 = 44.26\%, I_5 = 10.61\%$

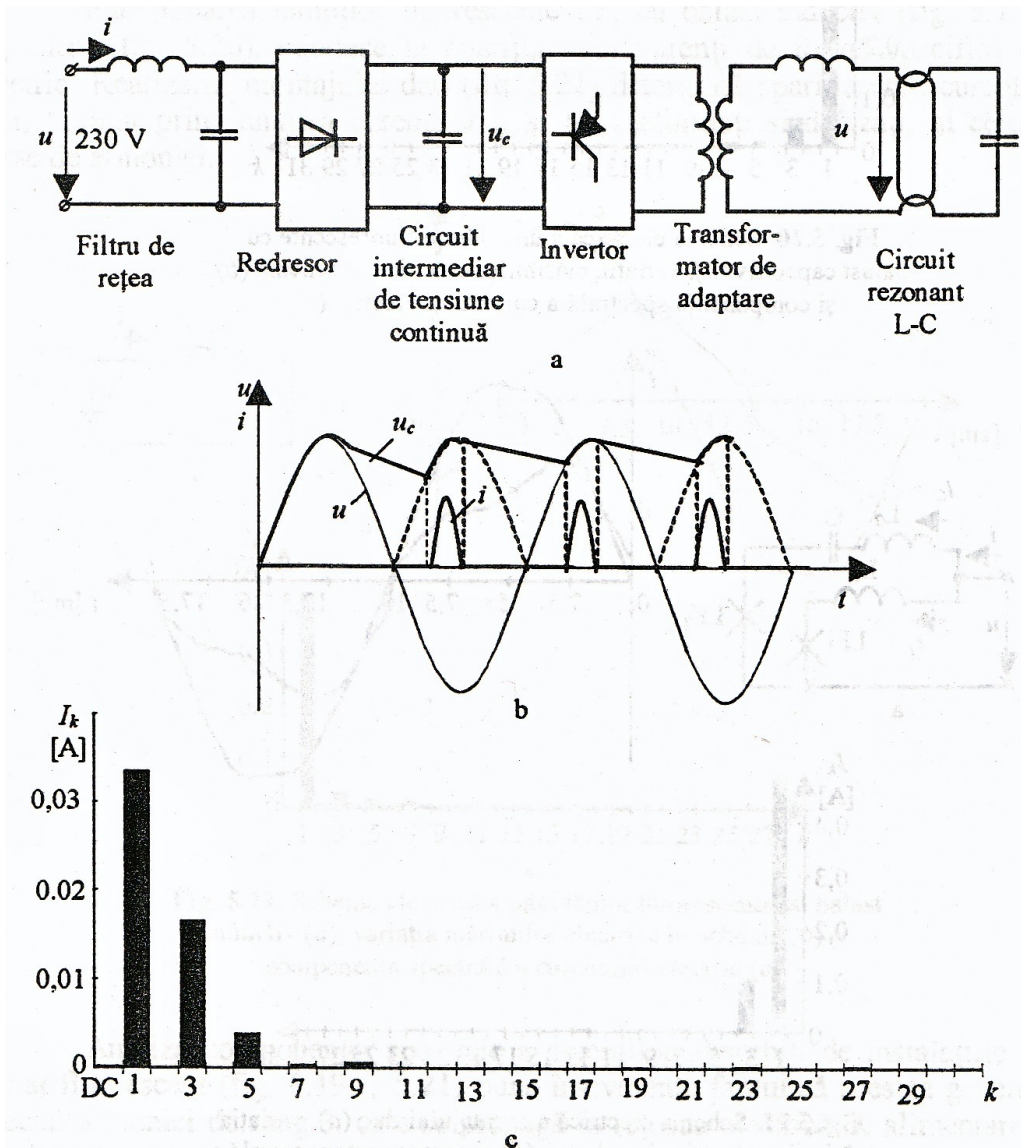


Fig.7. Lampă fluorescentă cu balast electronic: a) schema electrică; b) variația mărimilor electrice; c) componenta spectrală a curentului

5. Circuite cu bobine cu miez de fier

Bobinele cu miez de fier, funcționând în zona neliniară a caracteristicii magnetice, la aplicarea unei tensiuni sinusoidale la borne, conduc la distorsiuni ale curentului absorbit.

În această categorie intră transformatoarele, bobinele de compensare transversală, motoarele etc. Aceste echipamente sunt proiectate să funcționeze în zona liniară a caracteristicii magnetice, dar la creșterea tensiunii de alimentare punctul de funcționare poate ajunge în zona neliniară determinând curenți nesinusoidali.

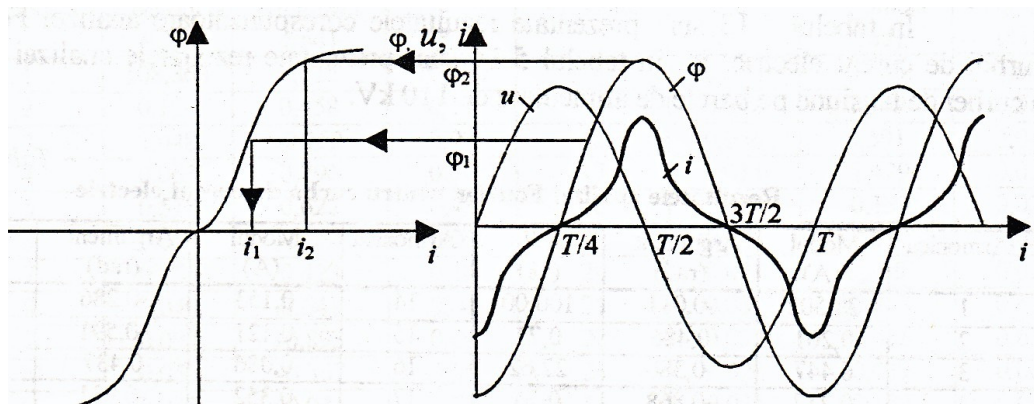


Fig.8. Curentul de mers în gol al unei bobine cu miez magnetic cu caracteristică neliniară

$\Rightarrow U_{alimentare} \nearrow \rightarrow$ fluxul magnetic $\nearrow \rightarrow$ depășește zona liniară a caracteristicii de magnetizare \rightarrow curentul în circuit $\nearrow \nearrow \rightarrow$ formă specifică, alungită

O distorsiune ridicată a curentului în circuite este specifică rețelelor slab încărcate, rezultând o tensiune ridicată la barele stațiilor de transformare și o pondere ridicată a curentului electric de magnetizare în curentul total din circuit.

Curba de curent poate fi aproximată:

$$i(t) = I_1 \sin \omega t - I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t - \dots \quad (12)$$

În analiza formei curentului din circuitul de magnetizare al transformatorului este necesară uneori considerarea prezenței fenomenului de histerezis, care poate conduce la apariția de *armonici pare și componentă continuă a curentului*.

6. Tracțiunea electrică

Tracțiunea electrică, interurbană și suburbană, utilizând MA ca motor de antrenare în instalațiile moderne, reprezintă o sursă de poluare armonică.

Instalațiile prezintă o caracteristică neliniară, datorită redresării tensiunii alternative de la rețeaua de alimentare.

Curba curentului absorbit prezintă trei faze caracteristice:

- *mersul în gol* (curent nul);
- *regimul tranzitoriu* (curent în creștere);
- *regim de mers în sarcină* (trenul circulă între stații).

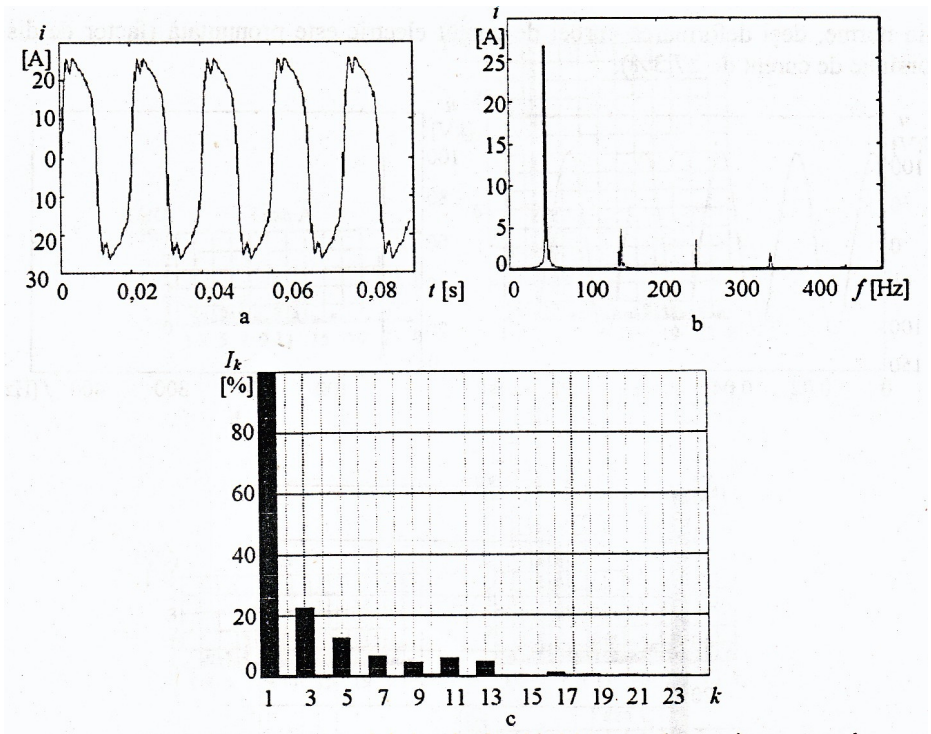


Fig.9. Curentul absorbit de consumatorul TE: a) curba de curent; b), c) spectrul armonic

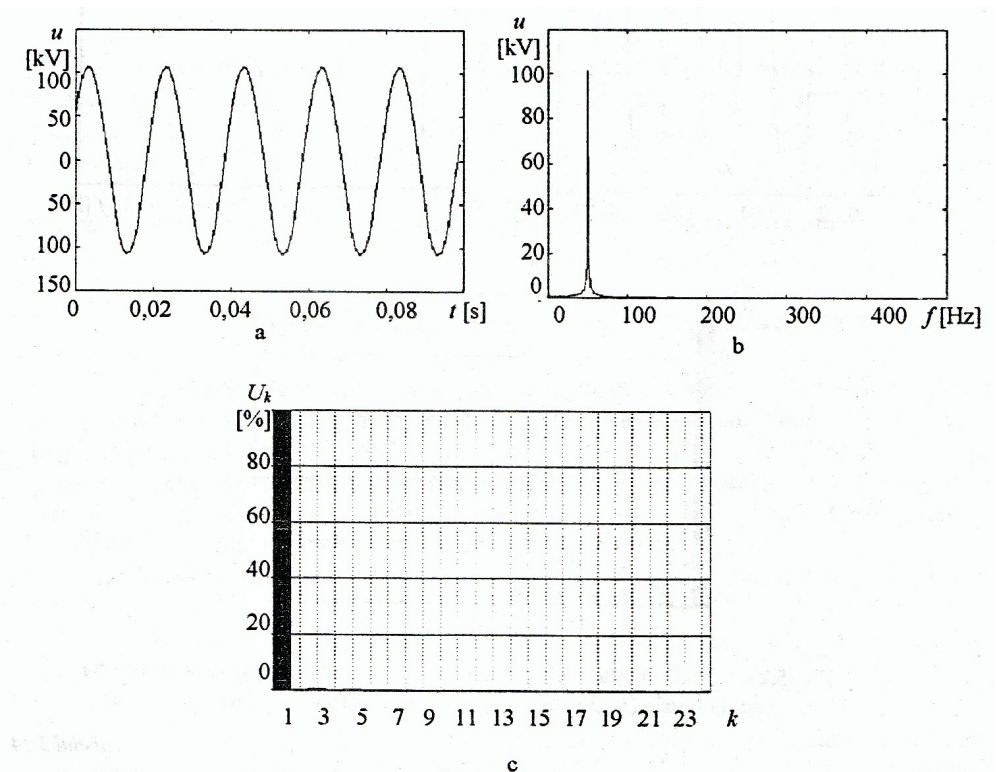


Fig.10. Tensiunea pe barele de alimentare ale consumatorului TE: a) curba de tensiune; b), c) spectrul armonic

Cele două curbe, care descriu variația tensiunii și curentului, sunt defazate, implicând și analiza problemelor legate de compensarea Q.

Curba de tensiune înregistrează o deformare redusă, datorită valorii ridicate a curentului de s.c. în punctul de racord al stației TE (cca 23,5 kA).

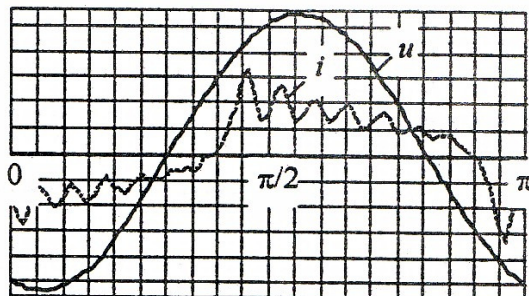


Fig.11. Curba de tensiune și curent pe bara de 110 kV a consumatorului TE feroviară

Datorită modului de racordare între două faze ale rețelei de alimentare, consumatorul TE constituie de asemenea o sursă importantă de **nesimetrie a tensiunii**, prin repartizarea inegală a sarcinii sae echivalente pe fazele sistemului.

7. Consumul urban

Reprezintă o sursă importantă de **perturbații armonice**, datorită echipamentelor moderne, cu caracteristici neliniare utilizate la consumatorii casnici, la micii consumatori din zona serviciilor și la micii consumatori industriali.

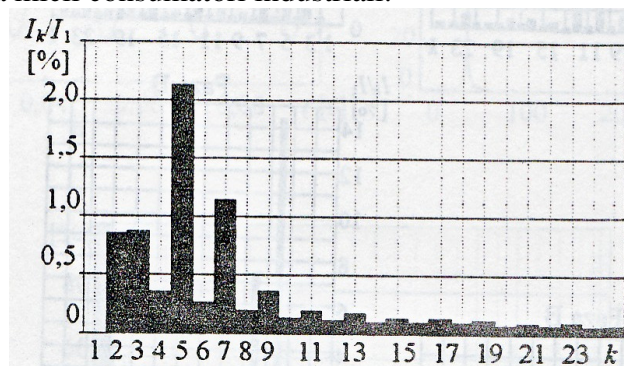


Fig.12. Spectrul armonic al curbei tensiunii pe barele unui post de transformare urban 20/0,4 kV (valorile 95% ale curbei de probabilitate cumulată)

Conform PE 143, apare o depășire inadmisibilă pe armonica de rang 2, 5, 7, 9 și a factorului total de distorsiune THD.

Este de aceea necesară asigurarea de mijloace simple și eficiente la consumatorii pentru urmărirea nivelului de poluare armonică și încadrarea în limitele impuse.

Urmărirea emisiei armonice pe curba de curent reprezintă o metodă cu sensibilitate mai ridicată, ceea ce recomandă stabilirea de criterii de apreciere a consumatorului pe baza analizei curbei de curent.

Trebuie de asemenea menționat faptul că sarcinile de joasă tensiune sunt de obicei monofazate (calculatoarele numerice sau sistemele de iluminat) și de aceea este greu de garantat o încărcare echilibrată a fazelor.

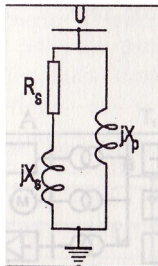
În planul de pozare a conductoarelor sistemului electric care alimentează sarcinile, acestea sunt distribuite de-a lungul celor trei faze ale sistemului, de exemplu câte o fază pentru fiecare nivel al unui apartament sau a unei clădiri administrative sau alternativ în șirul de case. În plus, *dezechilibrul sarcinii echivalente* la transformatorul de alimentare variază, datorită dispersiei statistice a graficelor de utilizare ale diferitelor sarcini individuale.

Realizarea unui model general care să cuprindă consumatorul complex nu a fost încă posibilă.

În literatură se conturează două direcții:

- una analitică ce sintetizează modelul corespunzător sarcinilor statice și modelul corespunzător sarcinilor rotative;
- una experimentală, care identifică parametrii schemelor în funcție de particularitățile consumatorului: P, Q; U; frecvențe de interes; valori medii parametrii MA; ponderea puterii MA în puterea totală absorbită.

Exemplu utilizat pe m.t și j.t., cu rezultate foarte bune pentru armonici = 5...20



$$R_s = \frac{U_1^2}{P_1}$$

$$X_s = 0.073kR_s$$

$$X_p = \frac{kR_s}{6.7 \left[\frac{Q_1}{P_1} - 0.74 \right]}$$