

**SIMULAREA UNOR PROCESSE PE BAZA  
MODELĂRII INSTALAȚIEI CUPTORULUI TRIFAZAT  
CU ARC ELECTRIC ȘI ACȚIUNE DIRECTĂ**

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

**TEZĂ DE DOCTORAT**

**Conducător științific:  
Prof. dr. ing. Șora Ioan**

629 806  
36 B A

**Autor:  
Ing. Pănoiu Manuela**

**2001**



# CUPRINS

<b>INTRODUCERE.....</b>	<b>3</b>
<b>1.CUPTOARE TRIFAZATE CU ARC ELECTRIC ȘI ACȚIUNE DIRECTĂ...</b>	<b>5</b>
1.1.Elemente constructive ale cuptoarelor cu arc electric cu acțiune directă.....	5
1.2.Echipamentul electric al cuptorului cu arc electric și acțiune directă.....	6
<b>2.CUPTORUL TRIFAZAT CU ARC ELECTRIC CA GENERATOR DE ARMONICI ȘI SARCINĂ TRIFAZATĂ NEECHILIBRATĂ.....</b>	<b>9</b>
2.1.Regimul periodic nesinusoidal în sistemele electroenergetice.....	9
2.1.1.Generalități.....	9
2.1.2.Caracteristici ale mărimilor periodice nesinusoidale.....	9
2.1.3.Puterile absorbite în regim deformant de un dipol.....	11
2.1.4. Definierea puterilor în rețelele de distribuție trifazate care funcționează în regimuri nesimetrice și nesinusoidale.....	13
2.1.5. Criterii pentru definirea factorului de putere în regim deformant și dezechilibrat.....	14
2.2. Arcul electric alimentat la tensiune alternativă element neliniar de circuit al cuptoarelor electrice trifazate.....	17
2.2.1. Caracteristici ale arcului electric alimentat la tensiune alternativă.....	17
2.2.2. Modelarea arcului electric.....	19
2.2.3. Modele existente ale arcului electric.....	21
2.2.4. Modelul bazat pe variația rezistenței arcului electric.....	22
2.2.5. Modelul bazat pe variația amplitudinii tensiunii arcului electric.....	23
2.2.6. Modelul bazat pe utilizarea caracteristicii curent – tensiune a arcului electric.....	24
2.2.7. Modelul bazat pe utilizarea unui generator de armonici pentru obținerea tensiunii arcului electric.....	26
2.3. Modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc.....	27
2.3.1. Modelarea funcționării cuptorului cu arc electric utilizând caracteristica dinamică cu lungimea constantă a arcului electric.....	28
2.3.2. Modelarea funcționării cuptorului cu arc utilizând caracteristica dinamică cu lungimea variabilă a arcului electric.....	37

2.3.3. Reglarea puterii arcului electric utilizând modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc .....	52
2.3.4. Modelarea funcționării cuptorului cu arc electric ca sarcină trifazată neechilibrată .....	54
2.4. Concluzii.....	55
<b>3. MĂSURAREA UNOR MĂRIMI ELECTRICE ÎN INSTALAȚIILE CUPTORULUI TRIFAZAT CU ARC ELECTRIC.....</b>	<b>57</b>
3.1. Schemele de măsurare a mărimilor electrice la cuptorul electric cu arc electric.....	57
3.1.1. Schema de măsurare a mărimilor electrice pe linia de joasă tensiune...	57
3.1.2. Măsurarea mărimilor electrice pe linia de medie tensiune.....	59
3.2. Blocul de adaptare al curenților și tensiunilor de valori mari.....	59
3.2.1. Caracteristici generale ale blocului de adaptare.....	59
3.2.2. Schema de măsurare a tensiunii pe un canal.....	60
3.2.3. Schema de măsurare a curentului pe un canal.....	62
3.2.4. Alimentarea blocului de adaptare a curenților și tensiunilor mari.....	64
3.2.5. Placa de achiziție de date ADA 3100.....	64
3.3. Măsurarea unor mărimi electrice la instalația cuptorului trifazat cu arc electric .....	65
3.3.1. Prezentarea rezultatelor măsurărilor efectuate pe linia de joasă tensiune.....	66
3.3.2. Prezentarea rezultatelor măsurărilor efectuate pe linia de medie tensiune.....	75
3.4. Măsurarea impedanței instalației electrice de alimentare.....	85
3.4.1. Schema electrică echivalentă a rețelei de alimentare.....	85
3.4.2. Calculul parametrilor rețelei scurte.....	86
3.4.3. Măsurarea parametrilor cuptoarelor cu arc electric.....	89
3.4.4. Rezultatele măsurărilor efectuate.....	93
3.5. Analiza erorilor de măsurare a curenților și tensiunilor.....	96
3.5.1. Funcționarea transformatoarelor de curent în regim deformant.....	97
3.5.2. Corecția măsurărilor efectuate cu transformatoarele de curent .....	98
3.5.3. Funcționarea transformatoarelor de tensiune în regim deformant.....	100
3.5.4. Corecția măsurărilor efectuate cu transformatoarele de tensiune .....	101
3.5.5. Aparatura de măsură utilizată.....	101
3.5.6. Influența introducerii corecțiilor asupra rezultatelor măsurărilor.....	103
3.6. Concluzii.....	104
<b>4. CALCULUL INSTALAȚIILOR DE ÎMBUNĂTĂȚIRE A INDICATORILOR CALITATIVI DE UTILIZARE A ENERGIEI ELECTRICE.....</b>	<b>107</b>
4.1. Calculul instalației de compensare dinamică directă a puterii reactive.....	107
4.2. Calculul filtrelor de absorbție pe armonicile 5, 7, 11, 13.....	112
4.3. Calculul instalației de echilibrare a rețelei electrice de distribuție.....	120
4.4. Concluzii.....	124



<b>5. EFECTELE UTILIZĂRII INSTALAȚIEI COMPLEXE DE COMPENSARE LA FUNCȚIONAREA CUPTORULUI CU ARC ELECTRIC.....</b>	<b>126</b>
5.1. Alegerea parametrilor care intervin în implementarea modelului.....	127
5.1.1. Alegerea valorilor parametrilor componentelor schemei electrice.....	127
5.1.2. Alegerea valorilor parametrilor modelului.....	128
5.2. Rezultatele simulării funcționării instalației reale.....	128
5.2.1. Simularea funcționării instalației reale utilizând valori inegale ale impedanțelor rețelei scurte.....	129
5.2.2. Simularea funcționării instalației reale utilizând valori inegale ale lungimii arcului electric.....	131
5.3. Rezultatele simulării utilizând instalația de compensare a puterii reactive și filtrele pe armonicile 5,7,11,13.....	136
5.4. Interdependența acțiunilor de compensare a puterii reactive, echilibrare a sarcinii și filtrare a curenților armonici.....	141
5.4.1. Prezentarea situației în care nu se intervine pentru ameliorarea regimului de funcționare.....	141
5.4.2. Prezentarea situației în care se intervine pentru compensarea puterii reactive.....	143
5.4.3. Prezentarea situației în care se intervine pentru echilibrarea sarcinii... ..	146
5.4.4. Prezentarea situației în care se intervine pentru filtrarea curenților armonici.....	149
5.4.5. Prezentarea situației în care se acționează pentru compensarea puterii reactive, a echilibrării sarcinii și filtrării curenților armonici.....	151
5.4.6. Prezentarea sintetică a rezultatelor obținute privitor la interdependența acțiunilor de îmbunătățire a calității energiei.....	153
5.5. Sistem inteligent utilizat la acțiunea de compensare – echilibrare – filtrare ...	154
5.5.1. Schema sistemului inteligent de compensare – echilibrare – filtrare.....	156
5.5.2. Simularea funcționării cuptorului cu arc electric la modificarea poziției electrozilor.....	156
5.5.3. Simularea funcționării sistemului de reglare a puterii active în urma compensării puterii reactive și filtrării curenților armonici.....	159
5.6. Concluzii.....	163
<b>6. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ALE AUTORULUI.....</b>	<b>167</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>171</b>
ANEXA I.1.....	179
ANEXA I.2.....	183
ANEXA I.3.....	189
ANEXA I.4.....	192
ANEXA I.5.....	196
ANEXA I.6.....	202
ANEXA II.1.....	207
ANEXA II.2.....	208
ANEXA II.3.....	209
ANEXA II.4.....	210

---

ANEXA II.5. ....	211
ANEXA II.6. ....	212
ANEXA II.7. ....	213
ANEXA II.8. ....	214
ANEXA II.9. ....	215
ANEXA II.10. ....	217
ANEXA II.11. ....	218
ANEXA II.12. ....	220
ANEXA III. ....	223
ANEXA IV.1. ....	224
ANEXA IV.2. ....	228
ANEXA V.1. ....	232
ANEXA V.2. ....	234
ANEXA V.3. ....	236
ANEXA V.4. ....	238
ANEXA V.5. ....	240

## INTRODUCERE

Una dintre problemele de mare actualitate pe plan mondial o constituie în prezent calitatea energiei electrice furnizată consumatorilor. În acest sens au fost elaborate standarde care specifică condițiile pe care trebuie să le îndeplinească consumatorii pentru ca funcționarea lor să nu se repercuteze negativ asupra calității energiei electrice utilizată de alți consumatori.

Cuptorul cu arc electric este unul dintre consumatorii care produc efecte negative în ceea ce privește circulația de putere reactivă, nesimetria sarcinii și armonicile injectate în rețea.

Lucrarea de față își propune să aducă o contribuție la soluțiile actuale pentru limitarea efectelor negative produse de instalația electrică a cuptorului cu arc.

Lucrarea conține 6 capitole, are un număr de 241 pagini, 129 figuri și 20 tabele. Au fost utilizate 122 de referințe bibliografice dintre care 10 sunt lucrări la elaborarea cărora a participat și autorul.

Capitolul 1 prezintă unele elemente privind instalațiile cuptoarelor electrice cu arc în general, și a instalației de la “Siderurgica” S.A. Hunedoara.

Capitolul 2 prezintă problemele generale care apar în funcționarea instalațiilor cuptoarelor electrice cu arc, de asemenea fiind analizate posibilitățile de simulare ale acestora utilizând diferite modele ale arcului electric. Studiul s-a axat pe analiza caracteristicilor de frecvență a undelor de curent și de tensiune pe fiecare dintre liniile de alimentare de joasă, medie și înaltă tensiune, caracteristici obținute pe baza datelor rezultate în urma simulărilor utilizând *programul PSCAD-EMTDC*. În urma determinării armonicilor din componența undelor de curent și de tensiune s-au calculat coeficienții de distorsiune totală și ponderată precum și puterile în regim nesinusoidal și factorii de putere pentru fiecare linie de alimentare. În urma acestui studiu autorul a selecționat modelul arcului electric care a stat la baza simulărilor din capitolele următoare.

Capitolul 3 prezintă sistemul de măsurare a indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice la cuptorul cu arc electric, sistem conceput și realizat de către autor, precum și rezultatele obținute în urma măsurărilor efectuate la Oțelăria OE2 a Combinatului Siderurgic Hunedoara la instalația electrică a cuptorului cu arc electric de 100 tone. De asemenea sunt prezentate rezultatele măsurărilor parametrilor instalației electrice, rezultate utile în proiectarea instalației de compensare a puterii reactive, filtrare a armonicilor și echilibrare a sarcinii consumatorului trifazat. În urma analizei rezultatelor măsurărilor s-au desprins concluzii importante privitoare la modul de manifestare al regimului deformant pe linia de alimentare de medie și de joasă tensiune, și de modul în care influențează faza procesului tehnologic regimul deformant.

În capitolul 4 este prezentat modul de calcul a instalației de compensare a puterii reactive, a filtrelor pe armonici precum și a instalației de echilibrare a sarcinii. Calculul este făcut pe baza rezultatelor obținute în urma măsurării mărimilor electrice de pe linia de alimentare de medie tensiune, rezultate prezentate în capitolul 3.

Capitolul 5 prezintă o analiză a efectelor obținute în urma utilizării instalației de compensare dinamică a puterii reactive, de filtrare a armonicilor și de echilibrare a sarcinii în ceea ce privește îmbunătățirea indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice la cuptorul cu arc electric. Pe baza concluziilor la care s-a ajuns în capitolul 2 analiza a fost efectuată utilizând un model performant al arcului electric studiat, modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc.

Lucrarea se încheie cu capitolul 6 în care sunt prezentate concluziile și contribuțiile autoarei la rezolvarea problemei abordate.

\*\*\*

În perioada de elaborare și finalizare a lucrării autoarea a beneficiat de îndrumarea competentă și plină de înțelegere a conducătorului științific, domnul profesor dr. ing. Șora Ioan, căruia îi mulțumește din suflet.

În prima perioadă a elaborării acestei lucrări, autoarea a beneficiat de sprijinul regretatului domn profesor dr. ing. Saimac Anton, căruia îi păstrează o adâncă recunoștință.

Autoarea îi mulțumește de asemenea pentru observațiile care au contribuit la îmbunătățirea conținutului lucrării, domnului profesor dr. ing. Buta Adrian.

Nu în ultimul rând, autoarea mulțumește în mod deosebit soțului pentru sprijinul moral și profesional acordat pe toată perioada elaborării lucrării și fără de care lucrarea nu s-ar fi putut finaliza.

## 1. CUPTOARE TRIFAZATE CU ARC ELECTRIC ȘI ACȚIUNE DIRECTĂ

În acest capitol sunt prezentate unele elemente constructive ale cuptoarelor cu arc electric, precum și schema electrică generală de alimentare a acestora. În particular este prezentată schema instalației electrice a cuptorului cu arc de *100 tone* de la *Oțelăria OE2 Siderurgica Hunedoara* și principalele sale caracteristici.

### 1.1. Elemente constructive ale cuptoarelor cu arc electric cu acțiune directă

În figura 1.1 sunt prezentate elementele constructive ale cuptorului cu arc electric cu acțiune directă utilizat pentru topirea oțelului [1],[29].

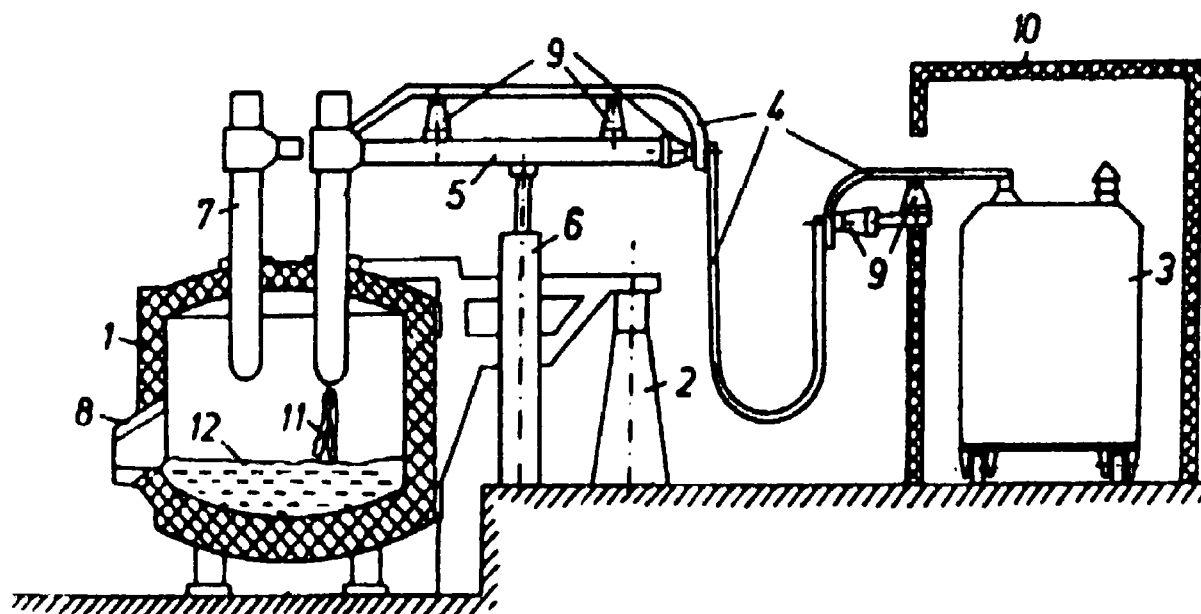


Fig. 1.1. Elementele constructive ale cuptorului cu arc electric cu acțiune directă utilizat pentru topirea oțelului.

Oțelul topit se obține în *cuva de topire 1*, prevăzută cu *jgheabul de golire 8*. Încălzirea și topirea maselor metalice se realizează prin încălzire directă de la *arcul electric 11* care apare între *electrozii 7* și *masa metalică 12*. Reglarea puterii disipate în masa metalică se face prin modificarea distanței dintre electrozi și masa metalică, deci a lungimii arcului electric. Electrozii fixați rigid pe *portelectrozii 5* sunt deplasați pe verticală cu ajutorul *dispozitivului de comandă hidraulică 6*. Golirea cuvei de topire (atât de zgură cât și de oțelul topit) este realizată cu ajutorul *coloanei de pivotare 2* care permite înclinarea corespunzătoare a cuvei de topire. Alimentarea cu energie electrică se face prin intermediul *transformatorului cuptorului 3* plasat într-o *încăpere specială 10*, separată de zona de lucru a cuptorului și a *rețelei scurte de alimentare 4*.

## 1.2. Echipamentul electric al cuptorului cu arc electric și acțiune directă

Echipamentul electric al cuptorului trebuie să asigure desfășurarea în condiții optime a unor complexe procese tehnologice, procese care au influențe importante asupra rețelei electrice de alimentare [29].

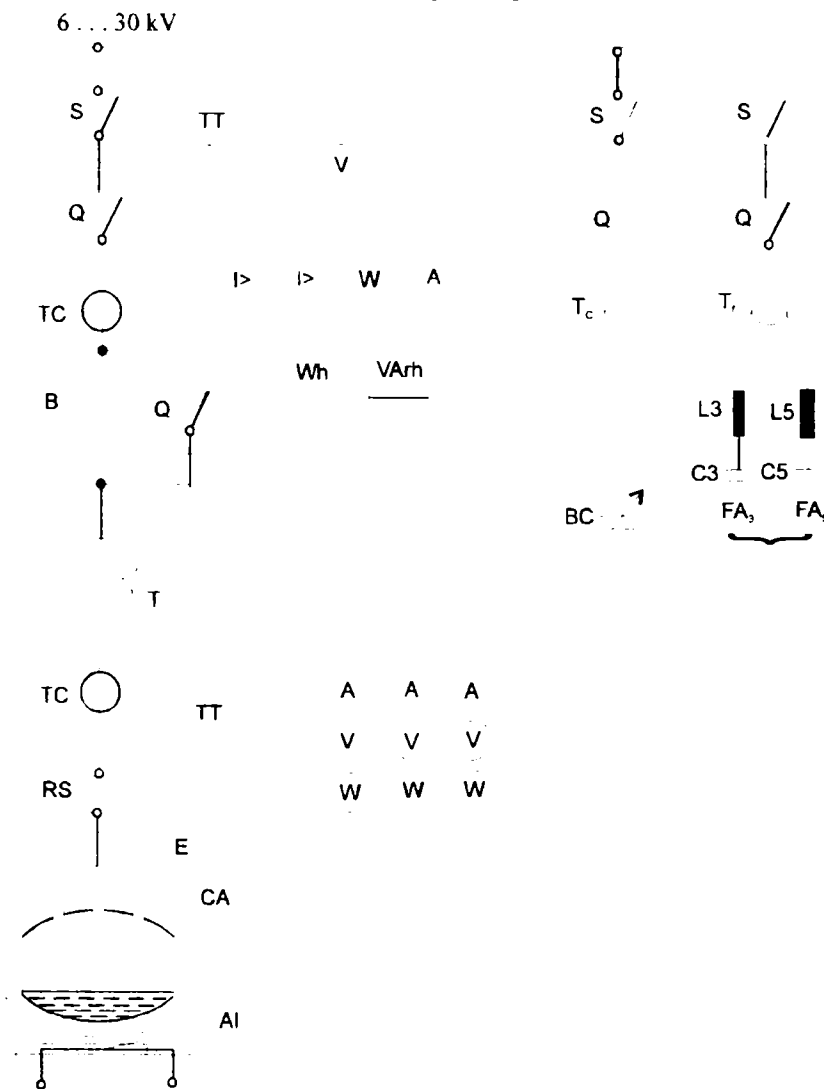


Fig. 1.2. Schema electrică de alimentare a unui cuptor cu arc electric.

Principalele probleme care trebuie avute în vedere la alegerea schemei de alimentare sunt:

- Variația în limite largi a puterii active absorbite pe durata procesului tehnologic;
  - Variația în limite largi a puterii reactive absorbite, cu apariția fenomenului de flicker, fapt care necesită utilizarea instalațiilor de urmărire în timp real a puterii reactive;
  - Necesitatea stabilizării arcului electric utilizând o bobină conectată în serie cu circuitul de alimentare în cazul cuptoarelor de mică și medie putere, în cazul cuptoarelor de putere mare inductivitatea proprie a circuitului de alimentare fiind suficientă;
  - Prezența unui important regim nesimetric determinat de inegalitatea reactanțelor pe cele trei faze ale cuptorului;
- Existența unei puternice distorsiuni a curentului, fapt care impune utilizarea filtrelor de armonice pe barele de alimentare;
  - Agitația redusă a băii cu metal lichid impune, la cuptoarele de capacitate mare, utilizarea de agitatoare inductive, *AI*.

În figura 1.2 este prezentată schema electrică monofilară a circuitului de alimentare a unui cuptor pentru topit oțel.

Cuptorul se conectează la barele uzinale ale întreprinderii, la tensiuni de **6...30 kV**. Stabilizarea funcționării arcului electric pe durata procesului de topire este realizată prin conectarea **bobinei B**, scurtcircuitată în celelalte faze ale preparării metalului (oxidare, reducere).

Alimentarea cuptorului se face utilizând **transformatorul de cuptor T** la al cărui secundar sunt conectați **electrozii E** prin intermediul **rețelei scurte RS**.

Informațiile necesare conducerii procesului ca și a protecției circuitelor la defecte se obțin prin intermediul **transformatoarelor de curent TC** și a **transformatoarelor de tensiune TT**. La barele de alimentare ale întreprinderii sunt conectate **circuitele de filtrare FA<sub>3</sub> și FA<sub>5</sub>** prin intermediul **transformatorului T<sub>f</sub>** cu rolul filtrării armonicilor de ordin 3 și 5, precum și **bateria de condensatoare BC** prin intermediul **transformatorului T<sub>c</sub>**, utilizată în cazul în care aportul capacitiv pe armonica fundamentală a filtrelor de armonici nu este suficient.

În capitolele următoare autorul și-a propus realizarea unui studiu privitor la îmbunătățirea calității utilizării energiei electrice la cuptorul cu arc electric de **100 tone** de la **Oțelăria OE2, a Siderurgica S.A. Hunedoara**. În figura 1.3 este prezentată schema instalației electrice a acestui cuptor [110].

Analizând această schemă se constată următoarele caracteristici importante ale acestuia:

- Alimentarea cuptorului se face prin stația de medie tensiune (**30 kV**) a întreprinderii.
- Capacitatea cuptorului fiind de **100 tone** stabilitatea arcului electric este asigurată de inductivitatea proprie a circuitului de alimentare, neexistând bobina B, prezentă în schema din figura 1.2.
- Transformatorul cuptorului are posibilitatea de conectare a primarului atât în conexiune **Y** cât și în conexiune **Δ**. Principalele caracteristici ale acestuia sunt:
  - puterea maximă: **60 MVA**, timp de **90 minute**;
  - curentul nominal: **962 A / 47290 A**;
  - **42** trepte de tensiune în secundar,
    - **610,5 V – 290,1 V**, pentru conexiunea **Δ** a primarului;
    - **352,5 V – 167,5 V**, pentru conexiunea **Y** a primarului.
  - în funcție de treapta de conexiune a primarului, caracteristicile acestuia sunt prezentate în **anexa III**.
- Măsurarea curentului arcului se face utilizând trei transformatoare de curent de tipul **70000 A / 70 A**, care au montate în secundare trei transformatoare de curent de tipul **70 A / 5 A**, a căror ieșiri comandă sistemul de reglare a poziției electrozilor.
- Măsurarea curentului în primarul transformatorului cuptorului se face utilizând trei transformatoare de curent de tipul **1500 A / 5 A**.
- Comanda sistemului de reglare a poziției electrozilor se face în funcție de curentul și tensiunea arcului electric utilizând trei transformatoare de curent de tipul **5 A / 0,5 A** și un transformator de tensiune în **V** de tipul **660 V / 110 V**.
- Instalația electrică a cuptorului cu arc nu are prevăzut în etapa actuală nici sistem de compensare a puterii reactive nici filtre pe armonicile 3 și 5, fapt care se reflectă negativ asupra indicatorilor de eficiență energetică a instalației.



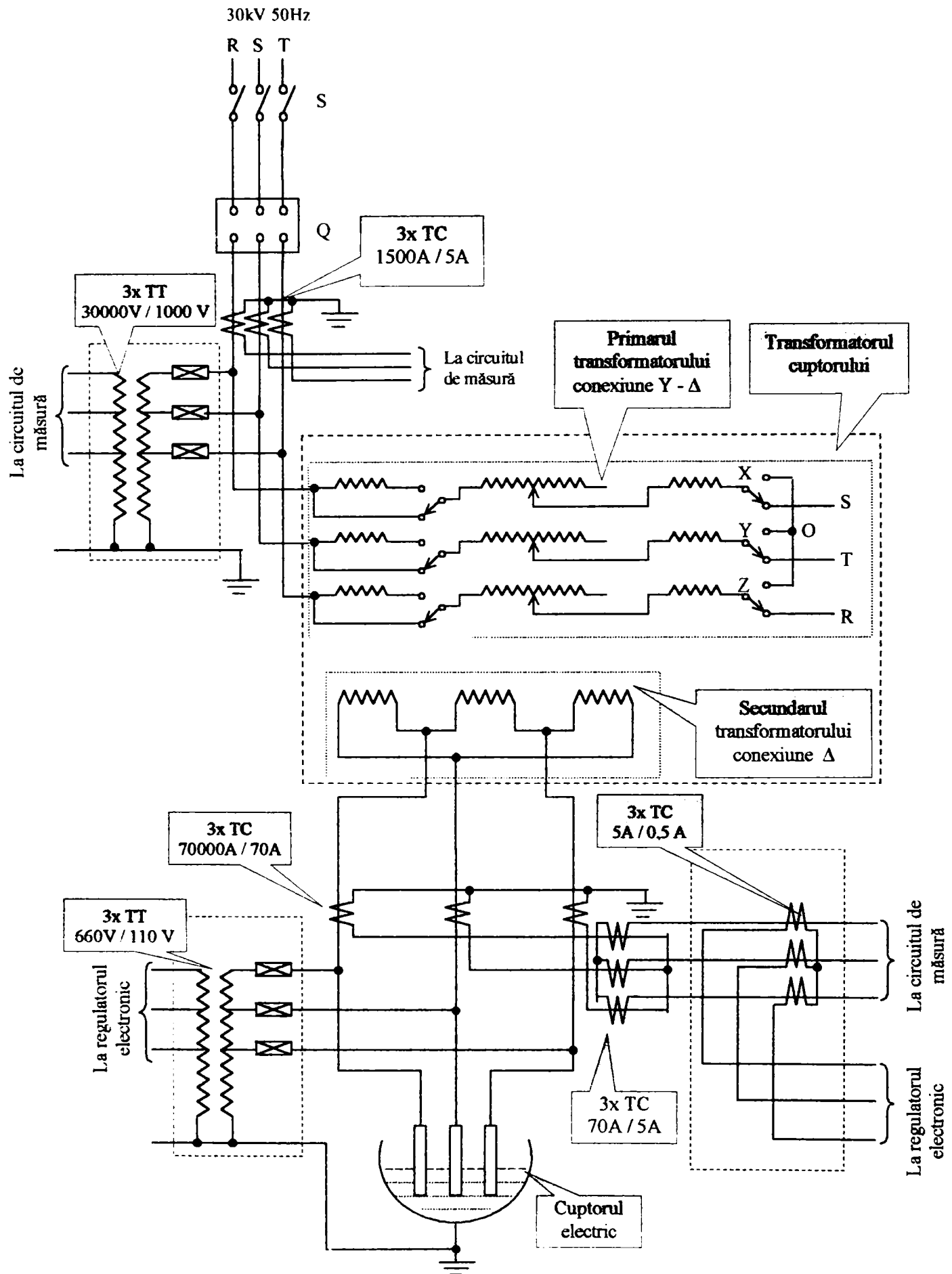


Fig. 1.3. Schema instalației electrice a cuptorului cu arc electric de 100 t de la oțelăria OE2, a Siderurgica S.A. Hunedoara.



## 2. CUPTORUL CU ARC ELECTRIC CA GENERATOR DE ARMONICI ȘI SARCINĂ TRIFAZATĂ NEECHILIBRATĂ

Capitolul de față își propune să analizeze cuptorul trifazat cu arc electric ca o sursă de regim periodic nesinusoidal și nesimetric. În acest scop sunt prezentate mai întâi mărimile caracteristice semnalelor periodice nesinusoidale, apoi pe baza acestora se definesc mărimile electrice specifice regimului deformant al cuptorului electric. În partea a doua a capitolului sunt analizate 5 posibilități de modelare a arcului electric fiind obținute concluzii importante privitor la performanțele obținute de fiecare.

### 2.1. Regimul periodic nesinusoidal în sistemele electroenergetice

#### 2.1.1. Generalități

Sursele de regim deformant pot fi clasificate în surse de tensiuni armonice și surse de curenți armonici [1].

Analiza spectrală a undei de curent și de tensiune relevă frecvențe multiple ale fundamentalei de **50 Hz**, denumite armonice. Domeniile de frecvență care corespund acestor armonice sunt, în general cuprinse între **100 Hz** și **2000 Hz**, respectiv armonicile de rang  $k = 2$  și a celor de rang  $k = 40$ . Este posibil însă să existe în tensiunea rețelei electrice și “*interarmonici*”, acestea fiind componente a căror frecvență este situată între armonicile frecvenței rețelei.

#### 2.1.2. Caracteristici ale mărimilor periodice nesinusoidale

Deoarece metodele de analiză analogică a caracteristicilor mărimilor periodice nesinusoidale au fost înlocuite tot mai mult cu metodele numerice se va prezenta modul de utilizare a *transformatei Fourier* în analiza semnalelor periodice [55].

Această metodă prezintă avantajul determinării fazelor armonicilor în raport cu trecerea prin zero. Se definește funcția periodică de perioadă  $T$  funcția care îndeplinește relația

$$f(t) = f(t + T), \quad (2.1)$$

$T$  fiind perioada iar  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , pulsația.

Funcția periodică  $f(t)$  poate fi reprezentată de *seria Fourier*

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (2.2)$$

unde

$$c_k = b_k + ja_k = c_k \cdot e^{j\varphi_k} \quad (2.2.a)$$

și

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{a_k}{b_k}. \quad (2.2.b)$$

Coefficienții care intervin în relațiile anterioare se pot deduce potrivit relațiilor

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot dt, \quad (2.2.a)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin k\omega t \cdot dt, \quad (2.2.b)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos k\omega t \cdot dt. \quad (2.2.c)$$

Amplitudinea armonicii de ordinul  $k$  se poate determina cunoscând coeficienții  $a_k$  și  $b_k$  potrivit relației

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}. \quad (2.4)$$

Valoarea medie a produsului a două armonici

$$f_j = F_j \sqrt{2} \cdot \sin(j\omega t + \varphi_j)$$

și

$$f_k = F_k \sqrt{2} \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k)$$

este dată de relația

$$\frac{1}{T} \int_0^T f_j \cdot f_k \cdot dt = \begin{cases} 0 & j \neq k \\ F_j \cdot F_k \cdot \cos(\varphi_j - \varphi_k) & j = k \end{cases} \quad (2.5)$$

Valoarea efectivă a unei mărimi periodice nesinusoidale este dată de

$$F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}, \quad (2.6)$$

relație care poate fi rescrisă sub forma

$$F = \sqrt{F_0^2 + F_1^2 + \dots + F_n^2}. \quad (2.7)$$

Pentru mărimi periodice alternative simetrice de forma

$$f(t) = -f\left(t + \frac{T}{2}\right) \quad (2.8)$$

se definește *factorul de vârf* sau *de creastă* ca raportul între valoarea maximă și valoarea efectivă

$$K_V = \frac{F_{\max}}{F}, \quad (2.9)$$

și *factorul de formă* ca raportul între valoarea efectivă și valoarea medie a alternanței pozitive

$$K_F = \frac{F}{2 \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt}, \quad (2.10)$$

unde  $t_0$  este momentul în care semnalul trece prin zero cu valori crescătoare.

Criteriile de analiză cantitativă a componenței de armonici în structura unui semnal sunt [1],[55]:

a) **Nivelul armonicilor** – reprezintă raportul exprimat în procente dintre valoarea efectivă a armonicei considerate ( $F_k$ ) și valoarea efectivă a fundamentalei  $F_1$

$$\gamma_k = \frac{F_k}{F_1} \cdot 100 [\%]. \quad (2.11)$$

b) **Reziduul deformant** reprezintă unda care se obține din unda dată suprimându-se armonica fundamentală

$$F_d = \sqrt{F^2 - F_1^2}. \quad (2.12)$$

c) **Coeficientul global de distorsiune** (nesinusoidalitate) se definește ca raportul exprimat în procente dintre valoarea efectivă a reziduuului deformant și cea a fundamentalei

$$d = \frac{F_d}{\sqrt{F^2 - F_0^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} F_k^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} F_k^2}} \cong \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} F_k^2}}{F_1} \cdot 100 [\%]. \quad (2.13)$$

d) **Distorsiunea armonică totală**, se definește în mod similar coeficientului global de distorsiune cu deosebirea că se iau în considerare primele 40 de armonice

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} \left( \frac{F_k}{F_1} \right)^2} \cdot 100 [\%]. \quad (2.14)$$

e) **Distorsiunea armonică parțial ponderată**, introdus pentru a se asigura că odată cu creșterea rangului, armonicile descresc este definit de relația

$$THD_p = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} k \cdot \left( \frac{F_k}{F_1} \right)^2} \cdot 100 [\%] \quad (2.15)$$

f) **Coeficientul de deformare** al unei periodice nesinusoidale,  $\Delta F$ , are expresia

$$\Delta F = \frac{|a-b|}{c} \cdot 100 [\%]. \quad (2.16)$$

unde

- $a$  reprezintă ordonata curbei reprezentative a unei periodice date;
- $b$  reprezintă ordonata curbei reprezentative a armonicii fundamentale a unei date, corespunzând la aceeași abscisă ca și pentru „ $a$ ”;
- $c$  reprezintă amplitudinea curbei reprezentative a armonicii fundamentale,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  fiind reprezentați în figura 2.1.

### 2.1.3. Puterile absorbite în regim deformant de un dipol

Potrivit teoriei puterilor în regim deformant dezvoltată de *prof. C. Budeanu* în continuare se vor prezenta relațiile de definire a puterilor absorbite de un dipol în regim nesinusoidal [10]:

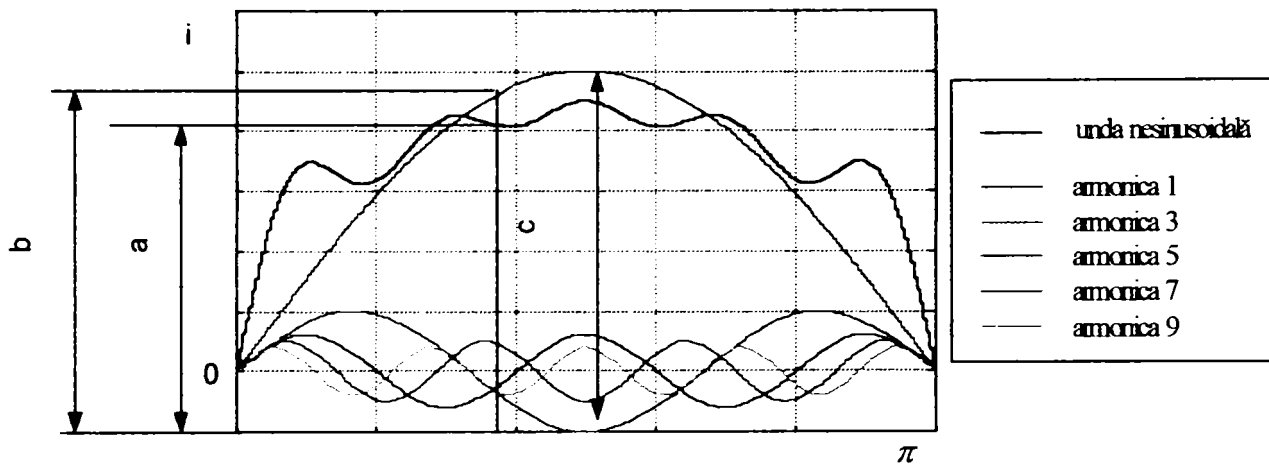


Fig. 2.1. Coeficientul de deformare a unei periodice nesinusoidale.

a) **Puterea aparentă** absorbită de un receptor în regim nesinusoidal se poate defini în același mod ca în regim sinusoidal, prin produsul valorilor efective ale tensiunii și curentului

$$S = U \cdot I. \quad (2.17)$$

Calculul valorilor efective ale curentului și tensiunii se face potrivit relațiilor

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2}, \quad (2.18 \text{ a})$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}. \quad (2.18 \text{ b})$$

b) **Puterea activă** absorbită de un dipol receptor alimentat cu energie electrică, astfel încât tensiunea la borne și curentul să fie nesinusoidal, este media pe o perioadă a puterii instantanee absorbite de el

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt. \quad (2.19)$$

Se poate demonstra [95], [96] că puterea activă este egală cu suma dintre produsul termenilor constanți (puterea de curent continuu) și suma puterilor active corespunzătoare armonicilor potrivit relației

$$P = U_0 \cdot I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k. \quad (2.20)$$

c) **Puterea reactivă** absorbită de un dipol în regim nesinusoidal este egală cu suma puterilor reactive corespunzătoare armonicilor

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k \quad (2.21)$$

d) **Puterea deformantă**, specifică regimului periodic nesinusoidal este definită de relația:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (2.22)$$

și are expresia

$$D = \sqrt{\sum_{j>k=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} [U_j^2 \cdot I_k^2 + U_k^2 \cdot I_j^2 - 2U_j U_k I_j I_k \cdot \cos(\varphi_j - \varphi_k)]} \quad (2.23)$$

Pe baza puterilor definite astfel în regim nesinusoidal se definesc:

a) **Factorul de putere în regim nesinusoidal** ca raportul dintre puterea activă și cea aparentă

$$K_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (2.24)$$

b) Factorul reactiv

$$\rho = \frac{Q}{P} = \operatorname{tg}\varphi \quad (2.25)$$

c) Factorul deformant

$$\sigma = \frac{D}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \operatorname{tg}\xi \quad (2.26)$$

#### 2.1.4. Definirea puterilor în rețelele de distribuție trifazate care funcționează în regimuri nesimetrice și nesinusoidale

Având în vedere că instalația electrică a cuptorului cu arc poate fi asimilată unui consumator de putere mare dezzechilibrat, regimul de funcționare al rețelei va fi unul nesimetric și nesinusoidal. Din acest motiv este utilă definirea puterilor și a factorilor de putere în regim trifazat nesimetric și nesinusoidal [4].

Conform *IEEE Working Group on nesinusoidal situation* [111], în sistemele trifazate sunt definite următoarele:

- Puterea aparentă echivalentă  $S_e$

$$S_e = 3 \cdot U_e \cdot I_e, \quad (2.27)$$

unde

$$U_e = \sqrt{\frac{U_R^2 + U_S^2 + U_T^2}{3}}, \quad (2.28 \text{ a})$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2}{3}} \quad (2.28 \text{ b})$$

pentru rețelele cu patru conductoare și

$$U_e = \sqrt{\frac{U_{RS}^2 + U_{ST}^2 + U_{TR}^2}{9}} \quad (2.29)$$

în cele cu trei conductoare.

- Tensiunea  $U_e$  și curentul  $I_e$ , ca valori efective, prezintă câte două componente - una corespunzătoare fundamentalei și alta nefundamentalei:

$$U_e^2 = U_{e1}^2 + U_{ek}^2, \quad (2.30 \text{ a})$$

$$I_e^2 = I_{e1}^2 + I_{ek}^2, \quad (2.30 \text{ b})$$

unde

$$U_{e1}^2 = \frac{U_{R1}^2 + U_{S1}^2 + U_{T1}^2}{3}, \quad (2.31 \text{ a})$$

$$I_{e1}^2 = \frac{I_{R1}^2 + I_{S1}^2 + I_{T1}^2}{3}, \quad (2.31 \text{ b})$$

$$U_{ek}^2 = \sum_{k=1} \left[ \frac{U_{Rk}^2 + U_{Sk}^2 + U_{Tk}^2}{3} \right], \quad (2.32 \text{ a})$$

$$I_{ek}^2 = \sum_{k=1} \left[ \frac{I_{Rk}^2 + I_{Sk}^2 + I_{Tk}^2}{3} \right]. \quad (2.32 \text{ b})$$

Ca urmare și puterea aparentă are două componente, una fundamentală  $S_{e1}$  și alta nefundamentală  $S_{eN}$ , adică

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2. \quad (2.33)$$

Se definește distorsiunea armonică totală echivalentă (de fapt reziduul deformant - Total Harmonic Distorsion) pentru tensiune respectiv curent ca fiind

$$THD_{U_e} = \frac{U_{\Delta}}{U_{e1}} \text{ și} \quad (2.34.a)$$

$$THD_{I_e} = \frac{I_{\Delta}}{I_{e1}} \quad (2.34.b)$$

și corespunzător puterea aparentă nefundamentală normalizată

$$\left(\frac{S_{eN}}{S_{e1}}\right)^2 = (THD_{U_e})^2 + (THD_{I_e})^2 + (THD_{U_e} \cdot THD_{I_e})^2. \quad (2.35)$$

Puterea aparentă fundamentală  $S_{e1}$  poate fi divizată în doi termeni unul corespunzător secvenței directe fundamentale  $S_1^+$  și altul corespunzător puterii aparente dezechilibrate fundamentale (puterii aparente de nesimetrie pe fundamentală)  $S_{n1}$  adică:

$$S_{e1}^2 = (S_1^+)^2 + S_{n1}^2. \quad (2.36)$$

Puterea aparentă fundamentală se poate descompune de asemenea în componentele activă respectiv reactivă.

Gradul de poluare armonică se apreciază după mărimea raportului

$$\frac{S_{eN}}{S_{e1}}. \quad (2.37)$$

Gradul de poluare nesimetrică se apreciază prin raportul

$$\frac{S_{n1}}{S_{e1}}. \quad (2.38)$$

În aceste condiții se definește factorul de putere fundamental  $KF_1$ , prin relația

$$KF_1 = \frac{Re(S_{e1})}{S_{e1}} = \frac{P_{e1}}{S_{e1}} = \frac{P_1^+ + P_1^- + P_1^0}{S_{e1}} \quad (2.39)$$

și factorul de putere total

$$KF = \frac{Re(S_e)}{S_e} = \frac{P}{S_e} = \frac{P_1^+ + P_1^- + P_1^0 + P_d}{S_e}, \quad (2.40)$$

relații în care  $P_{e1}$  reprezintă puterea activă echivalentă pe fundamentală,  $P_d$  puterea activă disipată pe armonici iar  $P_1^+$ ,  $P_1^-$  și  $P_1^0$  componentele directă, inversă respectiv homopolară a puterii active pe fundamentală.

### 2.1.5. Criterii pentru definirea factorului de putere în regim deformant și dezechilibrat

În literatura de specialitate sunt evidențiate câteva criterii care trebuie să stea la baza definiției unui factor de putere în regim armonic [98]. Cum acest regim în sistemele trifazate apare însoțit și de cel nesimetric [95], [96],[4], se poate vorbi de un factor de putere definit în regim deformant și dezechilibrat. Astfel criteriile sunt:

- Factorul de putere trebuie să permită aprecierea gradului de utilizare a puterii active disponibile pentru un receptor alimentat de la rețea. De regulă prin putere disponibilă activă maximă se înțelege puterea pe care receptorul o poate primi de la generatoarele ce debiteză în rețea fără a determina pierderi suplimentare în rețea, față de pierderile pe care le determină alimentarea sa reală;

- Factorul de putere trebuie să dea informații despre așa numitul consum tehnologic din rețea determinat de alimentarea unui receptor deformant cu o anumită putere activă;

- Factorul de putere, prin definiția lui, trebuie să conțină indicații privind căile de aducere a valorii sale la valoarea optimală;

- În regim permanent (sinusoidal, simetric), definiția trebuie să se reducă la definiția clasică, cunoscută;

- Factorul de putere trebuie să poată fi măsurat cât mai simplu, cu mijloacele de măsură deja existente fără a reclama mijloace suplimentare. De asemenea urmărirea lui trebuie să se realizeze prin normativele deja existente.

Aceste criterii trebuie privite într-un tot unitar. La definirea factorului de putere, în literatură se pornește de obicei de la unul dintre aceste criterii și se verifică apoi cum sunt îndeplinite celelalte. Deși se părea că factorul de putere este o mărime proprie consumatorului, prin criteriile impuse rezultă că valoarea lui depinde de interacțiunea consumatorului cu rețeaua.

Definiția factorului de putere trebuie să conțină informații referitoare la caracteristicile regimului nesimetric și nesinusoidal. Acestea sunt reflectate de obicei prin coeficienții de nesimetrie și nivelul armonicelor.

Dacă se are în vedere gradul de utilizare al puterii active disponibile și, legat de aceasta, circulația puterilor de secvență și a celor armonice în rețea [96],[97],[99], factorul de putere poate fi definit ca fiind:

$$k_p = \frac{P}{P_{max}} = \frac{P}{S_1^+} = \frac{P_1 + P_d}{3 \cdot U_1^+ \cdot I_1^+} = \frac{P_1^+ + P_1^- + P_1^0 + P_d}{S_1^+}, \quad (2.41)$$

sau

$$k_p = \frac{3U_1^+ I_1^+ \cos \varphi_1^+ + 3U_1^- I_1^- \cos \varphi_1^- + 3U_1^0 I_1^0 \cos \varphi_1^0 + \sum_{f=R;S;T} \sum_{k \neq 1} (U_{kf} I_{kf} \cos \varphi_{kf})}{3U_1^+ I_1^+}. \quad (2.42)$$

Dacă se introduc mărimile caracteristice regimului dezechilibrat și nesinusoidal, expresia lui  $k_p$  devine:

$$\begin{aligned} k_p &= \cos \varphi_1^+ + k_{nu1} \cdot k_{ni1} \cdot \cos \varphi_1^- + k_{nau1} \cdot k_{nai1} \cdot \cos \varphi_1^0 + \\ &+ \sum_{f=R;S;T} \sum_{k \neq 1} (\gamma_{Ukf} \cdot \gamma_{Ikf} \cos \varphi_{kf}) = \\ &= \cos \varphi_1^+ + \gamma_S^- \cdot \cos \varphi_1^- + \gamma_S^0 \cdot \cos \varphi_1^0 + \sum_{f=R;S;T} \sum_{k \neq 1} (\gamma_{Skf} \cos \varphi_{kf}) \end{aligned} \quad (2.43)$$

unde  $k_{nu1}$ ,  $k_{ni1}$ ,  $k_{nau1}$ ,  $k_{nai1}$  sunt coeficienții de disimetrie respectiv de asimetrie pe fundamentală, pentru tensiuni și curenți, adică:

$$k_{nu1} = \frac{U_1^-}{U_1^+}; \quad k_{ni1} = \frac{I_1^-}{I_1^+}; \quad k_{nau1} = \frac{U_1^0}{U_1^+}; \quad k_{nai1} = \frac{I_1^0}{I_1^+}, \quad (2.44)$$

$\gamma_{Ukf}$ ,  $\gamma_{Ikf}$  - nivelul armonicii  $k$  de tensiune și curent, pe faza  $f$ :

$$\gamma_{Ukf} = \frac{U_{kf}}{U_{1f}^+}; \quad \gamma_{Ikf} = \frac{I_{kf}}{I_{1f}^+}, \quad (2.45)$$

$\gamma_s^-, \gamma_s^0, \gamma_{skf}$  - ponderile relative ale puterilor aparente inversă, homopolară și armonice față de puterea aparentă directă pe fundamentală

$$\gamma_s^- = \frac{S_1^-}{S_1^+}; \quad \gamma_s^0 = \frac{S_1^0}{S_1^+}; \quad \gamma_{skf} = \frac{S_{kf}}{S_{1f}^+}. \quad (2.46)$$

Se definește:

- factorul de putere fundamental sau de simetrie, care ține cont de consumul de putere reactivă pe secvența directă a armonicii fundamentale,

$$k_p^s = \cos \varphi_1^+ \quad (2.47)$$

- factorul de putere nesimetric care ține seama de nesimetria regimului fundamentalei,

$$k_p^n = \gamma_s^- \cdot \cos \varphi_1^- + \gamma_s^0 \cdot \cos \varphi_1^0 \quad (2.48)$$

- factorul de putere deformant, care ține seama de circulația puterilor active armonice pe toate cele trei faze.

$$k_p^d = \sum_{f=R;S;T} \sum_{k \neq 1} (\gamma_{skf} \cos \varphi_{kf}) \quad (2.49)$$

Se poate scrie deci:

$$k_p = k_p^s + k_p^n + k_p^d \quad (2.50)$$

De regulă  $k_p^n < 0$  și  $k_p^d < 0$ , astfel încât în regimuri reale, necompensate  $k_p < \cos \varphi_1^+$ .

Valoarea factorului de putere  $k_p$  rămâne  $k_p^s$  în condițiile în care  $k_p^n = 0$  și  $k_p^d = 0$ .

Valoarea  $k_p = k_p^s = 1$  se realizează prin adoptarea simultană acelor trei măsuri: **compensarea puterii reactive, echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor**. Cele trei măsuri nu sunt independente, ele depinzând de structura internă a consumatorului. În unele cazuri factorul de putere poate deveni supraunitar, fapt care indică absorbția de putere activă nesimetrică și de putere activă reziduală de la alte receptoare dezechilibrate și deformante.

Într-o situație mai simplă când sistemul de tensiuni este mai puțin dezechilibrat iar curbele tensiunilor de fază sunt puțin distorsionate se poate defini un factor de putere avându-se în vedere pierderile de putere determinate de curenții nesimetriți și nesinusoidalii în rețeaua de alimentare, astfel:

$$k_p = \sqrt{\frac{\Delta P_{min}}{\Delta P}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{c,e,f}}{\Delta P}}, \quad (2.51)$$

unde  $\Delta P_{c,e,f}$ , sunt pierderile de putere pe linia de alimentare (elementul de rețea din amonte) în situația compensării puterii reactive, echilibrării și filtrării, adică:

$$\Delta P_{c,e,f} = 3(I_1^+)^2 \cdot (\cos \varphi_1^+)^2 \cdot R_1, \quad (2.52)$$

$R_1$  fiind rezistența fundamentală a liniei.

În ceea ce privește pierderile  $\Delta P$ , în rețelele cu patru conductoare, acestea au expresia:

$$\Delta P = 3 \sum_{k=1} \left( (I_k^+)^2 + (I_k^-)^2 + (I_k^0)^2 \right) \cdot R_k + 9 \sum_{k=1} (I_k^0)^2 \cdot R_{Nk}, \quad (2.53)$$

$R_{Nk}$  fiind rezistența conductorului neutru în planul armonicii  $k$ .

Înlocuind pe  $\Delta P$  dat de relația (2.53) în expresia lui  $k_p$  dată de relația (2.51) se obține:

$$k_p = \frac{\cos \varphi_1^+}{\sqrt{1 + \sum_{k>1} (\gamma_{1k}^+)^2 + k_{n1}^2 \cdot \left[ 1 + \sum_{k>1} (\gamma_{1k}^-)^2 \right] + k_{n0}^2 \cdot \left[ 1 + \sum_{k>1} (\gamma_{1k}^0)^2 \right] + 3k_{n0}^2 \sum_{k>1} (\gamma_{1k}^0)^2 \cdot \frac{R_{Nk}}{R_1}}}, \quad (2.54)$$

unde  $\gamma_{1k}^+, \gamma_{1k}^-, \gamma_{1k}^0$  sunt nivelurile armonicilor de curent de secvență directă, inversă și homopolară în planul armonicii  $k$ , adică:



$$\gamma_{lk}^+ = \frac{I_k^+}{I_1^+}; \quad \gamma_{lk}^- = \frac{I_k^-}{I_1^-}; \quad \gamma_{lk}^0 = \frac{I_k^0}{I_1^0}. \quad (2.55)$$

Dacă linia de alimentare este fără conductor neutru, curentul homopolar este nul, și toate relațiile de mai sus vor căpăta forme mai simple.

Deși simplistă, întrucât nu consideră nesimetria și deformarea tensiunilor, relația (2.54) rămâne sugestivă din punct de vedere calitativ prin aceea că oferă o dependență directă a factorului de putere cu gradul de nesimetrie și de nivelul armonicilor curenților.

## 2.2. Arcul electric alimentat la tensiune alternativă element neliniar de circuit al cuptoarelor electrice trifazate

### 2.2.1. Caracteristici ale arcului electric alimentat la tensiune alternativă

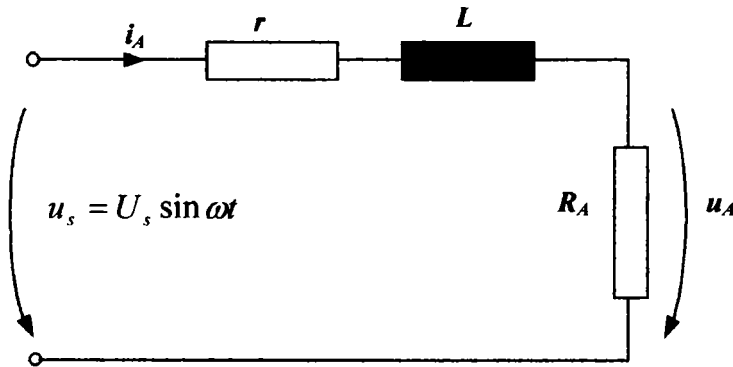


Fig. 2.2. Schema echivalentă a circuitului de alimentare a arcului electric alimentat cu tensiune alternativă.

Așa cum s-a prezentat în [1],[29],[80], se poate considera că pe durata arderii arcului electric alimentat cu tensiune alternativă, schema echivalentă a circuitului de alimentare poate fi reprezentată sub forma indicată în figura 2.2.

În această schemă  $r$  și  $L$  reprezintă rezistența respectiv inductivitatea echivalentă a circuitului de alimentare iar  $R_A$  și  $u_A$  rezistența arcului electric, respectiv tensiunea la bornele arcului.

Forma de variație a mărimilor electrice din schema echivalentă a circuitului de alimentare este prezentată în figura 2.3. Analizând forma de variație a mărimilor electrice se pot trage următoarele concluzii:

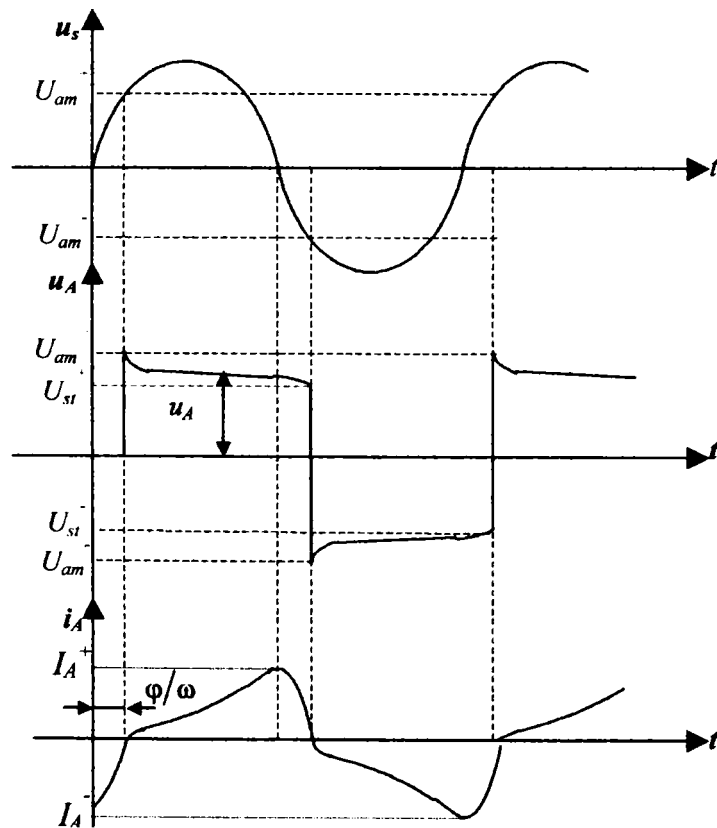


Fig. 2.3. Forma de variație a mărimilor electrice în circuitul arcului electric.

arcului electric cu o frecvență dublă față de cea a tensiunii aplicate,

- pe durata arderii arcului electric tensiunea  $u_A$  la bornele acestuia este practic constantă și deoarece curentul este variabil rezultă că arcul electric reprezintă un receptor neliniar,

- tensiunea  $u_A$  la bornele arcului electric și curentul  $i$  din circuit sunt în fază rezultând că arcul electric are caracter rezistiv,

- curentul electric din circuit trece de două ori prin zero în fiecare perioadă a tensiunii alternative aplicate, ceea ce determină stingerea și reaprinderea

629-806  
369 A

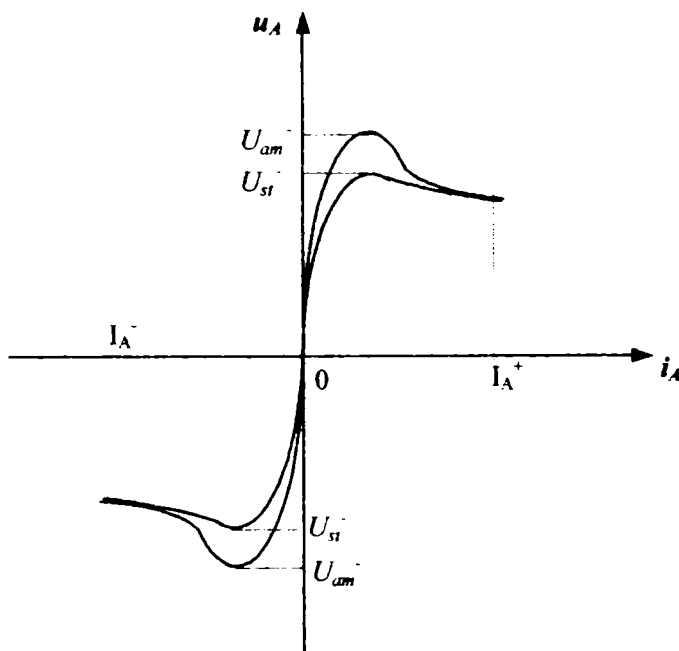


Fig. 2.4. Caracteristica dinamică a arcului electric alimentat cu tensiune alternativă.

- tensiunea de amorsare  $U_{am}$  a arcului electric este mai mare decât valoarea de funcționare  $U_A$ ,

- curentul electric din circuit este periodic, dar nesinusoidal.

- arcul electric alimentat cu tensiune electrică alternativă prezintă caracter redresant [1]. Aceasta constă în faptul că dacă descărcarea se produce între un electrod (în mod uzual de grafit) și metalul care urmează a fi încălzit, datorită proprietăților termofizice diferite ale celor două materiale (temperatura electrodului de grafit este mai mare ca cea a metalului de procesat), tensiunea de amorsare a arcului electric în semiperioada care metalul de încălzit este catod este

mai mare decât tensiunea de amorsare în semiperioada în care electrodul de grafit este catod, adică  $U_{am}^+ > |U_{am}^-|$ . În mod asemănător, pentru tensiunea de stingere în cele două semiperioade este valabilă relația  $U_{st}^+ > |U_{st}^-|$ . Din acest motiv amplitudinea curentului electric în cele două semiperioade este diferită și anume este mai mare în semiperioada în care electrodul din grafit este catod.

În figura 2.4 este reprezentată caracteristica dinamică a arcului electric alimentat cu tensiune alternativă, caracteristică obținută pe baza curbelor de variație a mărimilor electrice  $u_A(t)$  și  $i_A(t)$  prezentate în figura 2.3. Caracterul redresant al arcului electric este pus în evidență prin faptul că valoarea tensiunii de amorsare și de stingere este diferită în cele două semialternanțe.

Din punct de vedere al curentului arcului electric arderea arcului electric poate avea loc în regim de *curent întrerupt* sau *curent neîntrerupt*. Arderea arcului electric în regim de curent întrerupt determină o funcționare instabilă a acestuia iar curba curentului este puternic deformată [1]. Din acest motiv este necesar ca arcul electric să ardă fără pauze. În [1] a fost determinată condiția de ardere a arcului electric fără pauze în ipotezele simplificatoare că  $U_{am}^+ \cong |U_{am}^-| \cong U_{st}^+ \cong |U_{st}^-| \cong U_A$  și tensiunea de alimentare este sinusoidală  $u_s(t) = U_s \cdot \sin \omega t$ .

Această condiție este dată de

$$U_s \cdot \sin \varphi \geq U_A \quad (2.56)$$

care conduce la

$$\frac{U_A}{U_s} \leq \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\pi^2}{4}}} = 0,54, \quad (2.57)$$

rezultând că pentru a avea curent neîntrerupt este necesar ca instalația să funcționeze cu un factor de putere natural

$$\cos \varphi \leq 0,85. \quad (2.58)$$

### 2.2.2. Modelarea arcului electric

Analiza funcționării schemelor electrice care au în componență arcul electric alimentat cu tensiune alternativă necesită utilizarea unor tehnici de modelare ale arcului electric care să reflecte cât mai fidel comportarea arcului electric real. Pentru aceasta se pot folosi programe generale pentru circuite neliniare sau programe specifice unui domeniu restrâns. În lucrarea de față modelarea funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc electric s-a realizat cu ajutorul programului **PSCAD-EMTDC**.

#### Programul de simulare PSCAD-EMTDC

**PSCAD-EMTDC** este un mediu integrat de simulare a sistemelor electrice de putere de curent continuu și de curent alternativ [120]. Este compus din două programe:

-**EMTDC** – „Electro-Magnetic Transients in DC Systems”,

-**PSCAD** – Power System Computer Aided Design.

**EMTDC** este un program al cărui scop este simularea și controlul funcționării sistemelor de putere în domeniul timp.

Versiunea originală a **EMTDC** a fost dezvoltată în 1976 la *Manitoba Hydro*, Canada și a continuat să evolueze la „*Manitoba HVDC Research Centre*”. Inițial programul a fost dezvoltat pentru studierea sistemelor **HVDC** (High Voltage DC). Între timp au fost adăugate multe modele și facilități programului. În prezent **EMTDC** este utilizat la scară largă de către inginerii din industrie și universități din toată lumea.

Sistemele electrice de putere sunt complexe și expresiile matematice prin care sunt ele definite sunt tot mai complicate. **EMTDC** este un simulator al rețelelor electrice cu posibilitatea modelării complexe a sistemelor de electronică de putere precum și de a realiza controlul rețelelor electrice neliniare. Când este rulat sub interfața grafică **PSCAD** combinația **PSCAD-EMTDC** devine un mijloc puternic de a vizualiza enorma complexitate a porțiunilor din sistemele electrice de putere. Primele versiuni ale lui **EMTDC** au fost rulate la *Manitoba Hydro* pe calculatoare de tip „*mainframe*”.

Succesul programului a fost imens în ceea ce privește simulările sistemelor electronice de putere și controlului acestora. **PSCAD** a devenit de asemenea interfața grafică pentru **RTDS**, primul simulator numeric în timp real și care este relativ cunoscut.

Cercetătorii de la *Manitoba HVDC* au dezvoltat o nouă versiune a programului cunoscută sub denumirea „**PSCAD-EMTDC Version 3**”. Această are trei variante: **varianta profesională**, **varianta educativă** disponibilă pentru universități la un preț de cost mai scăzut și **varianta personală**, disponibilă pe *Internet*.

Varianta educativă și cea personală au limitări în ceea ce privește numărul de noduri. Varianta profesională nu are limitări din acest punct de vedere.

În lucrarea de față a fost utilizată **varianta personală** „**PSCAD/EMTDC Version 3**”.

#### Facilități oferite de programul de simulare PSCAD/EMTDC

Una dintre modalitățile de a înțelege comportamentul sistemelor complicate este de a studia răspunsul lor când sunt supuse la perturbații sau la variații ale parametrilor. În sistemele de putere aceste răspunsuri pot fi studiate prin observarea fie a valorilor instantanee în timp, fie a valorilor efective **RMS** (Root Mean Squares) sau componența în frecvență a răspunsului.

**EMTDC** este cel mai convenabil pentru simularea în domeniul timp a răspunsurilor instantanee, cunoscute sub denumirea „*electromagnetic transients*” a sistemelor electrice.

**EMTDC** studiază următoarele componente:

- Rezistoare (**R**), inductivități (**L**) și capacități (**C**);
- Transformatoare;

- Linii de transmisie și cabluri;
- Surse de curent și de tensiune;
- Comutatoare, întreruptoare;
- Diode, tiristoare, tiristoare tip *GTO*;
- Funcții de control analog și digital;
- Modele de mașini electrice, stabilizatoare;
- Aparate de măsură;
- *HVDC, SVC* (Static Var Compensator) și alte dispozitive *FACTS* (Flexible AC Transmission System).

Puterea simulatorului **EMTDC** este mărită foarte mult de către interfața grafică **PSCAD**. Acesta permite utilizatorului să asambleze un circuit, să efectueze simularea funcționării, să analizeze rezultatele și să manipuleze datele. Împreună **PSCAD-EMTDC** formează un foarte bun mediu pentru simularea sistemelor electrice de putere în regim permanent și tranzitoriu.

**EMTDC** este utilizat de către inginerii din industrie, producători, cercetători și în instituțiile academice de asemenea. Printre studiile tipice de caz se pot aminti :

- Studii ale unor evenimente neprevăzute a rețelelor de curent alternativ constând în rotația mașinilor, turbine, linii de transmisie, cabluri, sarcini;
- Izolarea transformatoarelor, întreruptoarelor;
- Testarea transformatoarelor la impulsuri;
- Studiul rezonanței sincrone a rețelelor electrice cu mașini, linii de transmisie, *HVDC*;

- Proiectarea filtrelor și analiză armonică;
- Proiectarea sistemului de control și coordonare a *FACTS* și *HVDC*.

Principalele elemente caracteristice interfeței grafice **PSCAD** sunt:

***Este total integrat*** – Graficele realizate se pot amplasa fie pe aceeași pagină cu circuitul, fie pe pagini separate. Graficele, circuitul și comentariile descriptive se pot tipări împreună.

***Este modular*** – Sistemele electrice simulate pot fi împărțite în module sau pagini diferite fără a fi necesară conectarea lor prin linii de transmisie. Controlul sistemului poate fi modelat în blocuri (module) separate.

***Este un mediu ierarhic*** – Circuitele asamblate din blocuri de bază pot conține module (blocuri) incluse, care la rândul lor conțin alte submodule.

***Oferă informații ajutătoare on – line*** – Orice componentă din biblioteca de componente disponibilă în **PSCAD** este însoțită de o informație utilă despre ea într-un context concis.

***Help HTML*** – Toate informațiile ajutătoare sunt scrise în format *HTML*. Utilizatorul își poate scrie aceste pagini de „*help*” pentru propriile componente.

***Facilități de proiectare grafică*** – Utilizatorul își poate crea propriile sale componente într-un mediu complet grafic numit „*Component Workshop*” .

***Utilizatorul își poate crea propriile sale biblioteci de componente*** pe care le poate utiliza în mai multe studii de caz.

Elemente caracteristice ale **EMTDC** sunt:

- Oferă soluții rapide ale simulărilor și permite utilizarea foarte eficientă a memoriei sistemului de calcul;
- Oferă posibilitatea modelării surselor de tensiune de valoare infinită, ampermetrelor ideale și a rezistențelor zero. Nu există restricții asupra modului de conectare al lor;
- Oferă interfață cu programul de simulare binecunoscut **MATLAB**. Se pot simula total sau parțial blocuri din studiul de caz în **MATLAB** și apoi se pot interfața cu restul sistemului în **PSCAD-EMTDC**.

### 2.2.3. Modele existente ale arcului electric

**Modelele arcului electric** alimentat cu tensiune alternativă prezentate în literatura de specialitate se pot grupa în mai multe categorii [40],[70],[76],[89],[102].

Aceste categorii de modele cuprind:

- Modele bazate pe relații empirice între diametrul sau lungimea arcului, tensiunea respectiv curentul prin arc [70],[89].
- Modele care utilizează caracteristica curent-tensiune a arcului electric [102];
- Modele care utilizează surse de tensiune care să înlocuiască tensiunea arcului electric [40];
- Modele care utilizează rezistențe neliniare și variabile în timp [76];
- Modele care utilizează procese stochastice [70], [76],[102],[89].

În vederea reprezentării cât mai fidele a fenomenelor care apar în funcționarea circuitelor electrice care utilizează arcul electric ca element de circuit multe dintre modelele prezentate în continuare utilizează elemente comune mai multor categorii dintre cele prezentate, fiind de fapt modele mixte.

Autorul a analizat principalele modele ale arcului electric prezentate în literatură, obținând concluzii importante privitoare la validitatea fiecărui model, modul de implementare și rezultate ale simulării pe calculator a funcționării cuptoarelor cu arc. **Pentru a se putea obține concluzii comparative în ceea ce privește performanțele modelelor studiate toate modelele au fost implementate pe aceeași instalație electrică, prezentată cel mai des în literatură [70], [76] și care este considerată „tipică”.**

Instalația „tipică” analizată este alimentată de la barele de înaltă tensiune *IT* printr-un transformator trifazat *220/21 KV* cu puterea de *95 MVA*, iar de la barele de medie tensiune *MT* printr-un transformator trifazat *21/0,4-0,9 KV* cu puterea de *60 MVA*. Rezistența electrică pe fiecare fază a rețelei scurte este *0,3 mΩ*, iar reactanța electrică pe fiecare fază a rețelei scurte este *3 mΩ*.

Pentru a se putea face o comparație între modelele analizate în toate simulările realizate **puterea arcului electric** s-a ales de *25,4 MW*, formată din **puterea cedată băii metalice** și din **pierderile de putere pe arcul electric**, proporționale cu aria curbei de histereză a caracteristicii curent-tensiune. Valoarea medie uzuală a amplitudinii tensiunii arcului electric este potrivit [70],[76] de *200 V*. Considerând că tensiunea arcului electric are o formă dreptunghiulară ( figura 2.3), valoarea efectivă va fi egală cu amplitudinea potrivit relației

$$U_{Aef} = U_A = 200 V . \quad (2.59)$$

Pentru această valoare, din relația (2.58) rezultă că valoarea minimă a amplitudinii tensiunii de fază pentru care se obține curent neîntrerupt este  $U_s \geq 370,37 V$ , valoare care corespunde unei tensiuni de linie minime în secundarul transformatorului de medie tensiune de

$$U_{linie,min} = 453,6 V , \quad (2.60)$$

care se găsește în domeniul de valori furnizate de secundarul transformatorului de *MT*.

În aceste condiții, valoarea medie a rezistenței arcului electric pe o fază este

$$R_A = R_{med} = \frac{3U_A^2}{P} = 4,72 m\Omega . \quad (2.61)$$

O problemă importantă pe care trebuie să o asigure un model o constituie posibilitatea reglării puterii arcului electric. **O rezolvare general valabilă**, indiferent de modelul utilizat pentru arcul electric, **o constituie modificarea valorii efective a tensiunii furnizate de secundarul transformatorului de medie tensiune.**

Relația (2.61) evidențiază două posibilități de reglare a puterii arcului electric, **modificarea amplitudinii tensiunii arcului electric și modificarea valorii medii a rezistenței echivalente a arcului electric.** Așa cum se va vedea și în continuare **acestea nu sunt singurele posibilități de reglare a puterii arcului electric.**



Schema instalației analizată este prezentată în figura 2.5.

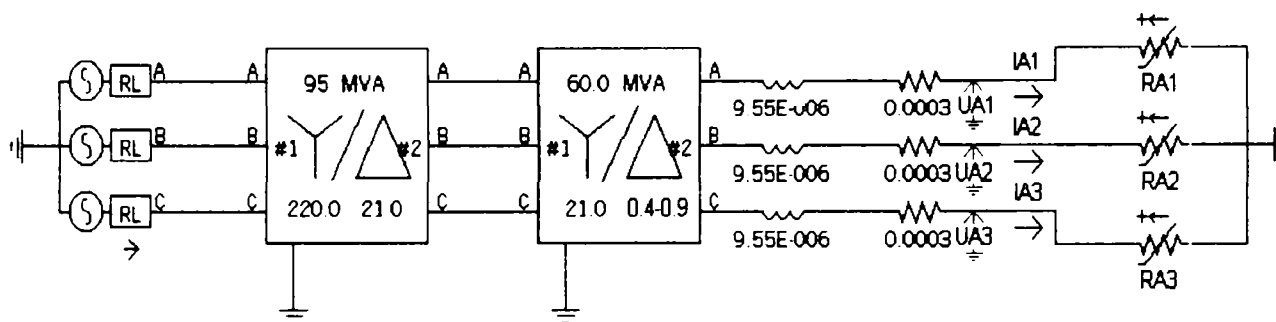


Fig. 2.5. Schema instalației electrice a cuptorului cu arc electric.

În acest fel o primă verificare a corectitudinii implementării modelelor de către autor s-a putut face prin compararea rezultatelor obținute în literatură cu cele obținute de către autor. **Toate simulările au fost efectuate utilizând programul de simulare PSCAD-EMTDC.**

#### 2.2.4. Modelul bazat pe variația rezistenței arcului electric

După cum se știe, operațiile de bază în cuptorul electric cu arc pot fi descrise de cele trei stări de bază care pot apărea pe parcursul funcționării, arcul întrerupt în care curentul este nul, regimul de scurtcircuit în care valoarea curentului este maximă datorită contactului electrodului cu baia metalică și regimul de funcționare normal în care între electrod și baia metalică se formează arcul electric. În timpul funcționării normale rezistența arcului se modifică, cauzând fluctuații de tensiune în punctul de cuplaj comun.

Modelul bazat pe variația rezistenței arcului electric se bazează pe ipoteza că această variație poate fi considerată ca având o distribuție de tip gaussian, valorile rezistenței arcului electric fiind concentrate în jurul valorii medii [76].

**Ideea de bază a acestui model constă în faptul că la fiecare trecere prin zero a curentului unei faze este generată o nouă valoare a rezistenței arcului electric a fazei respective.**

În vederea generării valorilor cu distribuție gaussiană pentru rezistența arcului electric utilizând valori generate cu distribuție uniformă în literatură sunt prezentate două metode.

a) O primă modalitate de variație a rezistenței arcului este prezentată în [76], rezistența arcului fiind dată de relația

$$R_A = R_{med} + \sigma_R \cdot \sqrt{-2 \ln(rand1)} \cdot \cos(2\pi \cdot rand2), \quad (2.62)$$

în care *rand1* și *rand2* reprezintă două numere cu distribuție uniformă în intervalul [0,1], generate automat la fiecare trecere prin zero a curentului arcului,  $R_{med}$  reprezintă valoarea medie a rezistenței arcului electric și  $\sigma_R$  dispersia valorilor ei.

În *anexa II.1* este prezentată schema instalației electrice a cuptorului cu arc electric și o modalitate de implementare a modelului bazată pe utilizarea relației (2.62). Simulările efectuate utilizând valorile prezentate anterior pentru parametrii instalației electrice au permis obținerea formelor de undă a curentului și tensiunii arcului electric pentru o fază precum și a rezistenței arcului electric.

b) O a doua modalitate de obținere a unui zgomot gaussian cu medie nulă a fost prezentată în [102] și utilizează **transformarea Box Mueller**. Potrivit acesteia rezistența arcului este dată de relația

$$R_A = R_{med} + \sigma_R \cdot \sqrt{-\ln(rand1)} (\cos(2\pi \cdot rand2) + \sin(2\pi \cdot rand2)), \quad (2.63)$$

în care *rand1*, *rand2*,  $R_{med}$  și  $\sigma_R$  au aceeași semnificație ca și la varianta precedentă.

Simulările efectuate utilizând schema instalației electrice prezentată în **anexa II.2** au condus la rezultate similare atât în ceea ce privește forma curentului și a tensiunii arcului electric, după cum rezultă prin compararea rezultatelor obținute în urma simulării, rezultate prezentate în **anexele II.1 și II.2**. De asemenea s-a constatat că atât caracteristicile curent-tensiune cât și caracteristicile spectrale a curentului și a tensiunii arcului electric obținute cu relațiile (2.62) și (2.63), dar neprezentate în lucrarea de față sunt practic identice.

În urma simulărilor efectuate rezultă că acest model prezintă **avantajul că este relativ ușor de implementat**, însă are ca **dezavantaje obținerea unei caracteristici curent-tensiune care nu reproduce caracteristica reală** precum și faptul că în **spectrul curentului și a tensiunii predomină armonica fundamentală**.

**În concluzie se poate afirma că utilizarea acestui model conferă un caracter rezistiv arcului electric iar reglarea puterii arcului electric se face prin modificarea valorii medii a rezistenței arcului electric.**

### 2.2.5. Modelul bazat pe variația amplitudinii tensiunii arcului electric

După cum se știe tensiunea arcului electric depinde în principal de lungimea arcului. După ce arcul electric a fost inițiat, sistemul de reglare a poziției electrozilor produce o deplasare a acestora, fapt care conduce la modificarea lungimii arcului electric. În acest mod se obține o lungime optimă a arcului electric, deci și a tensiunii arcului, fapt care conduce la obținerea unui arc stabil.

Deoarece puterea arcului electric depinde de amplitudinea tensiunii arcului, rezultă că reglarea puterii arcului electric se poate face prin reglarea poziției electrozilor. Datorită limitărilor în domeniul timp în ceea ce privește controlul poziției electrozilor în funcție de lungimea arcului electric rezultă o fluctuație a tensiunii arcului electric. Studiile statistice au arătat că distribuția amplitudinii tensiunii arcului electric în timp este de tip gaussian, presupunând că nu există rezonanță mecanică.

Modelul bazat pe variația amplitudinii tensiunii arcului electric prezentat în [76] consideră că această variație are o distribuție de tip gaussian, valorile amplitudinii tensiunii pe arcul electric fiind de asemenea concentrate în jurul valorii medii.

**Ideea de bază a acestui model constă în faptul că la fiecare trecere prin valoarea zero a tensiunii arcului electric este generată o nouă valoare a amplitudinii tensiunii arcului electric pentru faza respectivă.**

Ca și la modelul precedent, generarea valorilor cu distribuție gaussiană utilizând valori generate cu distribuție uniformă se poate face prin două metode prezentate în continuare.

a) Prima modalitate de variație a amplitudinii tensiunii arcului electric, prezentată în [76], presupune generarea unei noi valori a amplitudinii tensiunii arcului electric potrivit relației

$$U_A = U_{med} + \sigma_U \cdot \sqrt{-2 \ln(rand1)} \cdot \cos(2\pi \cdot rand2), \quad (2.64)$$

unde **rand1, rand2** reprezintă două numere cu distribuție uniformă în intervalul [0,1],  $U_{med}$  reprezintă valoarea medie a amplitudinii tensiunii arcului electric și  $\sigma_U$  dispersia valorilor ei.

În **anexa II.3** este prezentată schema instalației electrice a cuptorului cu arc electric și o modalitate de implementare a modelului bazată pe utilizarea relației (2.64).

b) A doua modalitate de obținere a unui zgomot gaussian cu medie nulă prezentată în [102] utilizează **transformarea Box Mueller**. Potrivit acesteia amplitudinea tensiunii arcului este dată de relația

$$U_A = U_{med} + \sigma_U \cdot \sqrt{-\ln(rand1)} \cdot (\cos(2\pi \cdot rand2) + \sin(2\pi \cdot rand2)), \quad (2.65)$$

în care **rand1, rand2,  $U_{med}$**  și  $\sigma_U$  au aceeași semnificație ca și la varianta precedentă.

Simulările efectuate utilizând schema instalației electrice prezentată în *anexa II.4* au condus la rezultate similare atât în ceea ce privește forma curentului și a tensiunii arcului electric, a caracteristicii curent-tensiune precum și a caracteristicii spectrale a curentului și a tensiunii arcului electric. În urma simulărilor efectuate rezultă că și acest model prezintă *avantajul că este relativ ușor de implementat, reglarea puterii arcului electric realizându-se prin modificarea valorii medii a amplitudinii tensiunii arcului electric* însă are ca *dezavantaje obținerea unei caracteristici curent-tensiune care nu reproduce caracteristica reală* precum și faptul că în *spectrul curentului și a tensiunii predomină armonica fundamentală, aceasta având amplitudinea mult mai mare decât celelalte armonici*.

### 2.2.6. Modelul bazat pe utilizarea caracteristicii curent-tensiune a arcului electric

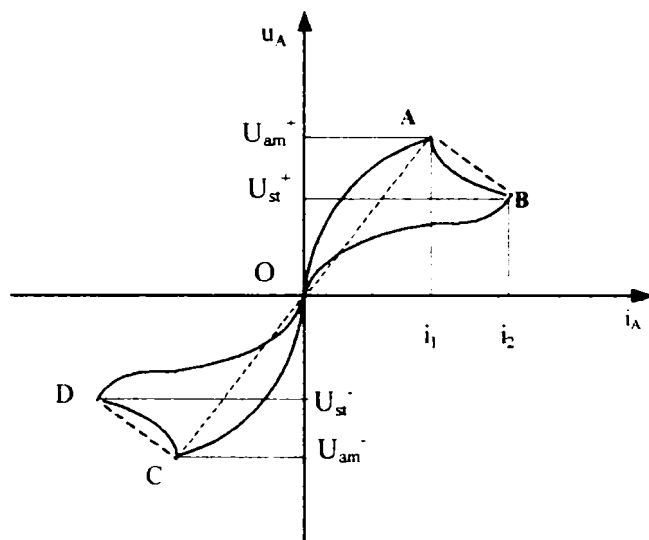


Fig. 2.6. Caracteristica reală și liniarizată a arcului electric.

Acest model actual al arcului electric alimentat cu tensiune alternativă, prezentat în [102], se bazează pe liniarizarea caracteristicii reale curent-tensiune tipice a arcului electric. De asemenea, noutatea acestei tehnici de simulare constă în faptul că parametrii modelului de ind de puterea furnizată sarcinii, făcând astfel ca parametrii modelului să depindă de condițiile de lucru.

Deoarece modelul folosește puterea consumată de către cuptorul cu arc electric ca și mărime de intrare rezultă că modelul permite modificarea caracteristicii curent-tensiune astfel încât puterea

consumată să fie cea dorită a fi consumată în circuitul de sarcină.

Principiul prin care modelul prezentat ține seamă de puterea activă consumată în circuit se bazează pe faptul că aria caracteristicii curent-tensiune reprezintă puterea activă consumată.

În figura 2.6 este reprezentată *caracteristica dinamică tipică și cea liniarizată* curent-tensiune a arcului electric alimentat la tensiune alternativă. Aproximarea liniarizată a caracteristicii curent-tensiune poate fi definită în primul cadran de ecuația

$$u = \begin{cases} i \cdot R_1 & 0 \leq i \leq i_1 \\ i \cdot R_2 + U_{am} \cdot \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) & i_1 < i \leq i_2 \end{cases}, \quad (2.66)$$

unde 
$$i_1 = \frac{U_{am}}{R_1}, \quad (2.67.a)$$

$$i_2 = \frac{U_{st}}{R_2} - U_{am} \cdot \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right). \quad (2.67.b)$$

Valorile  $i_1$  respectiv  $i_2$  corespund tensiunii de aprindere (sau de amorsare),  $U_{am}$ , respectiv tensiunii de stingere,  $U_{st}$ , a arcului electric iar  $R_1$  și  $R_2$  reprezintă pantele segmentelor OA respectiv AB.



În vederea utilizării ecuației (2.66) și pentru semiperioada negativă a tensiunii de alimentare aceasta se poate rescrie având în vedere că valorile curenților  $i_1$  respectiv  $i_2$  sunt negative. Deoarece puterea consumată de arcul electric este egală cu aria cuprinsă sub caracteristica curent-tensiune, rezistența arcului pe porțiunea OA poate fi calculată potrivit relației

$$R_1 = \frac{U_{am}^2}{\left( P + \frac{U_{am}^2}{R_2} - \frac{U_{st}^2}{R_2} \right)} \quad (2.68)$$

unde  $P$  reprezintă puterea disipată în arcul electric.

Simularea caracterului redresant al arcului electric utilizând acest model se poate face prin alegerea de valori diferite pentru valorile tensiunii de amorsare, respectiv de stingere pe cele două semiperioade. În aceste condiții, pentru ca puterea disipată pe arcul electric să fie aceeași pe cele două semiperioade rezultă necesitatea ca parametrul  $R_1$  să fie calculat pentru fiecare semiperioadă.

În simulările realizate utilizând acest model s-au utilizat pentru tensiunea de amorsare, respectiv de stingere valori egale pentru cele două semiperioade,  $U_{am}^+ = |U_{am}^-| = 240V$  și  $U_{st}^+ = |U_{st}^-| = 200V$ . Valoarea parametrului  $R_2$  a fost aleasă pe baza datelor din literatură  $R_2 = -0,0007272$ , fiind negativă datorită faptului că segmentul  $AB$  are pantă negativă [102]. Valoarea parametrului  $R_1$  se calculează pe baza relației (2.68), puterea disipată în arcul electric fiind  $P = 25,4 MW$ .

Schema de simulare a funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc electric utilizând acest model este prezentată în anexa II.5. În urma simulărilor efectuate autorul a ajuns la concluzia că acest model al arcului electric bazat pe liniarizarea caracteristicii arcului electric se caracterizează prin:

- **Obținerea unei caracteristici curent-tensiune a cărei formă reproduce forma prezentată în figura 2.4.**
- **Caracteristica arcului electric, prin parametrii  $R_1$  și  $R_2$  depinde de puterea dorită a fi disipată în arcul electric.** Rezultă că **acest model permite simularea funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc electric într-o gamă largă de puteri disipate, reglarea puterii arcului electric realizându-se pe baza relației (2.68).**
- **În spectrul curentului se distinge prezența armonicilor de ordin 5,7,11 și 13, fapt care corespunde cu realitatea [1], [2], [26].**

În ceea ce privește distorsiunile curbelor de curent și de tensiune, calculate cu relațiile (2.14) și (2.15) autorul a constatat următoarele:

- Curba de tensiune este cel mai puternic distorsionată pe linia de joasă tensiune și cea mai puțin distorsionată este pe linia de înaltă tensiune;
- Distorsiunea curentului este mai mică decât a tensiunii pe linia de joasă tensiune atât din punct de vedere al distorsiunii totale cât și al distorsiunii ponderate;
- Pe liniile de medie și de înaltă tensiune curba de tensiune este mai puțin distorsionată decât curba curentului.

Din punct de vedere al puterilor și factorilor de putere în regim nesinusoidal pe fiecare dintre cele trei linii de alimentare obținute utilizând acest model al arcului electric cu relațiile (2.17) – (2.22) și (2.24) – (2.26) autorul a constatat că:

- Puterea activă obținută pe cele trei linii de alimentare are aproximativ aceleași valori, valoarea cea mai mare fiind atinsă pe linia de înaltă tensiune și cea mai mică pe linia de joasă tensiune;
- Valoarea mică a puterii reactive pe arcul electric comparativ cu cea activă obținută pe linia de joasă tensiune sugerează faptul că acest model permite simularea unui caracter puternic rezistiv arcului electric. Această diferență se explică prin faptul că valoarea reactanței de pe fiecare fază a liniei de joasă tensiune ( $3\text{ m}\Omega$ ) este comparabilă cu valoarea rezistenței totale de pe fiecare fază ( $5,02\text{ m}\Omega$ ). Pe liniile de medie și de înaltă tensiune se obțin pentru puterea reactivă valori mai mari, datorate transformatorului cuptorului, fapt care arată necesitatea utilizării unui sistem de compensare a puterii reactive;
- Efectul deformant se manifestă cel mai puternic pe linia de joasă tensiune, fapt demonstrat prin valoarea mult superioară a factorului deformant.

### 2.2.7. Modelul bazat pe utilizarea unui generator de armonici pentru obținerea tensiunii arcului electric

Așa cum s-a prezentat anterior, tensiunea arcului electric are în componență pe lângă armonica fundamentală o serie de armonici de diferite amplitudini și având diferite faze. Rezultă că dacă s-ar cunoaște cu precizie amplitudinea și faza fiecărei armonici a tensiunii arcului electric, aceasta ar putea fi echivalată cu un generator de armonici.

În [27] a fost prezentat un model al arcului electric care consideră că tensiunea arcului este furnizată de un generator de tensiune care furnizează fundamentala a cărei amplitudine este modulată în timp precum și armonici de tensiune de amplitudine și fază cunoscute.

Relația care descrie tensiunea arcului este

$$u_A(t) = \sqrt{2}U_1(t)\sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{k=2}^{\infty} \sqrt{2}U_k \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (2.69)$$

unde  $U_k$  reprezintă valoarea efectivă a armonicii de ordin  $k$ , iar  $\varphi_k$  reprezintă faza armonicii respective.

În relația (2.69) s-a notat cu  $U_1(t)$  valoarea efectivă a fundamentalei ca fiind o funcție de timp pentru a putea studia influența modificării amplitudinii ei asupra funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc.

În studiul fenomenului de flicker de cele mai multe ori se consideră că tensiunea  $U_1(t)$  este o tensiune modulată sinusoidal potrivit relației (2.70)

$$U_1(t) = U_1(1 + m \cdot \sin 2\pi f_m t), \quad (2.70)$$

unde  $f_m$  reprezintă frecvența modulatorie, care poate fi aleasă în domeniul în care se manifestă fenomenul de flicker și  $U_1$  valoarea efectivă a fundamentalei.

În timp ce primul termen al relației (2.69) reprezintă armonica fundamentală modulată, termenul

$$\sum_{k=2}^{\infty} \sqrt{2}U_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (2.71)$$

reprezintă un termen de distorsiune.

Din cele prezentate rezultă că *acest model este utilizabil dacă se cunosc amplitudinile și fazele fundamentalei și armonicilor, cunoaștere care presupune existența unor măsurători anterioare a tensiunii arcului electric.*

*Dezavantajul acestui model îl reprezintă faptul că modelul este o reprezentare liniară a unui fenomen neliniar, nefiind în măsură să ia în considerație efectele arcului electric asupra schimbării configurației schemei electrice.*

### 2.3. Modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc

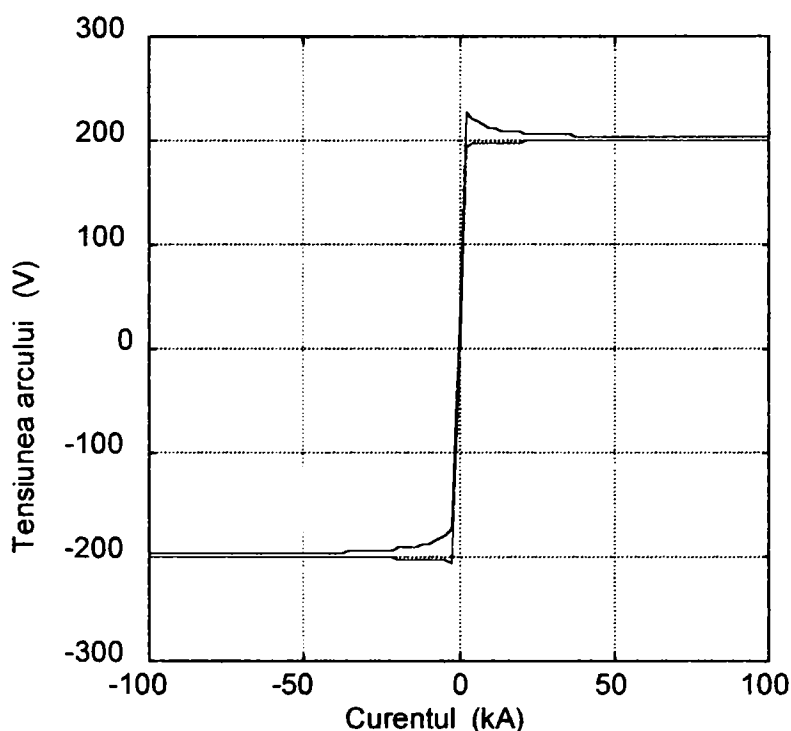


Fig. 2.7. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric.

este dată de relația

$$U_{am} = U_{st} + \frac{C}{D}. \quad (2.74)$$

În figura 2.7 este prezentată caracteristica curent-tensiune obținută cu ajutorul programului *MATLAB* pentru valorile tipice prezentate în [70] și [89]:  $U_{st} = 200$  V,  $C_a = 190000$  W,  $C_b = 39000$  W,  $D_a = D_b = 5000$  A.

Deoarece impedanța echivalentă a rețelei scurte este constantă este evident faptul că impunând în cadrul simulărilor o valoare fixă a tensiunii de stingere  $U_{st}$ , pentru o anumită valoare a tensiunii din secundarul transformatorului cuptorului puterea activă disipată în arcul electric va fi constantă, valoarea obținută depinzând de constantele din relația (2.73).

Din cele prezentate s-ar părea că utilizarea acestui model nu permite reglarea puterii active a arcului electric, însă autorul va demonstra că **reglarea puterii arcului electric se poate face în limite largi utilizând acest model prin modificarea tensiunii de stingere, fapt care corespunde în practică prin modificarea distanței dintre electrozi și baia de metal.**

Analiza rezultatelor obținute prin utilizarea acestui model al arcului electric se va face în două etape:

- Determinarea performanțelor modelului considerând constantă tensiunea de stingere  $U_{st} = 200$  V;
- Demonstrarea faptului că se poate regla puterea arcului electric prin modificarea valorii tensiunii de stingere.

În funcție de forma de variație în timp a lungimii arcului electric caracteristica dinamică curent-tensiune poate fi constantă sau variabilă în timp, fapt care se repercutează asupra modelului ales.

Acest model prezentat în [70] și în [89] consideră caracteristica curent-tensiune a arcului electric descrisă de relația

$$U_A = U_A(I_A), \quad (2.72)$$

relație ce poate fi scrisă sub forma

$$U_A = U_{st} + \frac{C}{D + I_A}. \quad (2.73)$$

În relația (2.72),  $U_A$  și  $I_A$  reprezintă tensiunea și curentul arcului electric,  $U_{st}$  este tensiunea de stingere spre care tinde tensiunea odată cu creșterea curentului. Constantele  $C$  și  $D$  determină diferența între părțile caracteristicii în care crește respectiv descrește curentul ( $C_a$  și  $D_a$ , respectiv  $C_b$  și  $D_b$ ).

Valoarea tensiunii de amorsare se obține pentru  $I_A = 0$  și

### 2.3.1. Modelarea funcționării cuptorului cu arc electric utilizând caracteristica dinamică cu lungimea constantă a arcului electric.

Schema de implementare a modelului pentru o fază conține modulul de generare a tensiunii de aprindere pe semialternanța pozitivă, pe cea negativă precum și de calcul a rezistenței arcului electric.

S-a notat cu  $u_{1p}$  tensiunea de amorsare corespunzătoare alternanței pozitive ( $U_{am}^+$  din figurile 2.3 și 2.4) și cu  $u_{1n}$  tensiunea de amorsare corespunzătoare alternanței negative ( $U_{am}^-$  din figurile 2.3 și 2.4). Pentru valorile constantelor  $C_a$  și  $C_b$ , respectiv  $D_a$  și  $D_b$  menționate anterior se obțin pentru tensiunea de amorsare pe cele două semialternanțe valorile  $u_{1p} = U_{am}^+ = 238V$ , respectiv  $u_{1n} = U_{am}^- = 207,8V$ .

Implementarea celor două tensiuni  $u_{1p}$  și  $u_{1n}$  este prezentată în figura 2.8.

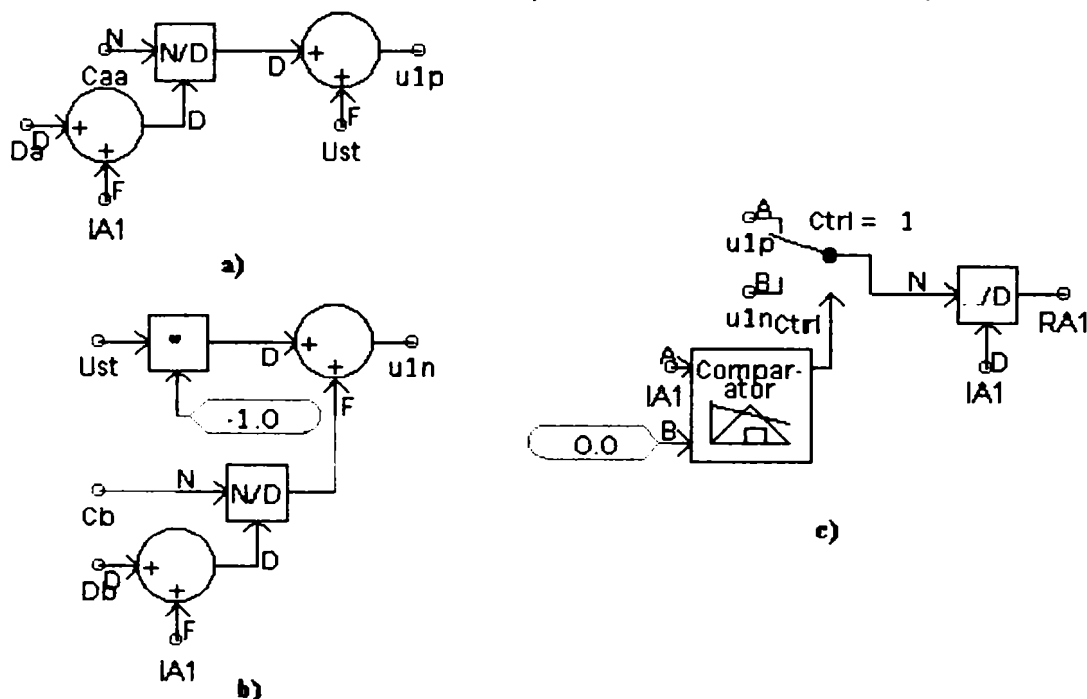


Fig. 2.8. Modul de implementare al tensiunii de amorsare  $u_{1p}$ ,  $u_{1n}$  și calculul rezistenței arcului electric  $r_{A1}$ .

Dacă lungimea arcului nu se modifică în timp ( $l = l_0$ ), caracteristica dinamică curent-tensiune rămâne constantă în raport cu timpul.

În *anexa II.6* este prezentată schema instalației electrice a cuptorului cu arc electric și o modalitate de implementare a modelului bazat pe caracteristica dinamică în care lungimea arcului electric este constantă utilizând *programul PSCAD-EMTDC*.

Pentru a se obține o valoare a puterii active a arcului electric egală cu cea utilizată la simulările efectuate cu celelalte modele ale arcului electric,  $P = 25,4 MW$ , în cazul acestui model s-a modificat valoarea tensiunii secundarului transformatorului cuptorului. Pe baza valorilor obținute pentru curentul și tensiunea de pe arcul electric, utilizând programul prezentat în *anexa I.1* s-a calculat puterea arcului electric, constatându-se că pentru valoarea tensiunii de linie de

$$U_{linie} = 520V \quad (2.75)$$

s-a obținut valoarea impusă,  $P = 25,4 MW$ .

Se observă că această valoare a tensiunii de linie este mai mare decât valoarea dată de relația (2.60), rezultând că se va obține curent neîntrerupt pentru arcul electric.

Valoarea tensiunii secundarului transformatorului cuptorului are influență asupra formei și amplitudinii curentului arcului electric, așa cum rezultă din figura 2.9. Astfel se observă că pentru o valoare a tensiunii secundarului mai mică decât cea dată de relația (2.60) se obține regimul de curent întrerupt, (figura 2.9.a), pentru valoarea dată de relația (2.60) se obține îndeplinirea la limită a condiției de regim neîntrerupt, (figura 2.9.b), în timp ce pentru valori mai mari curentul arcului este neîntrerupt, (figurile 2.9.c,d).

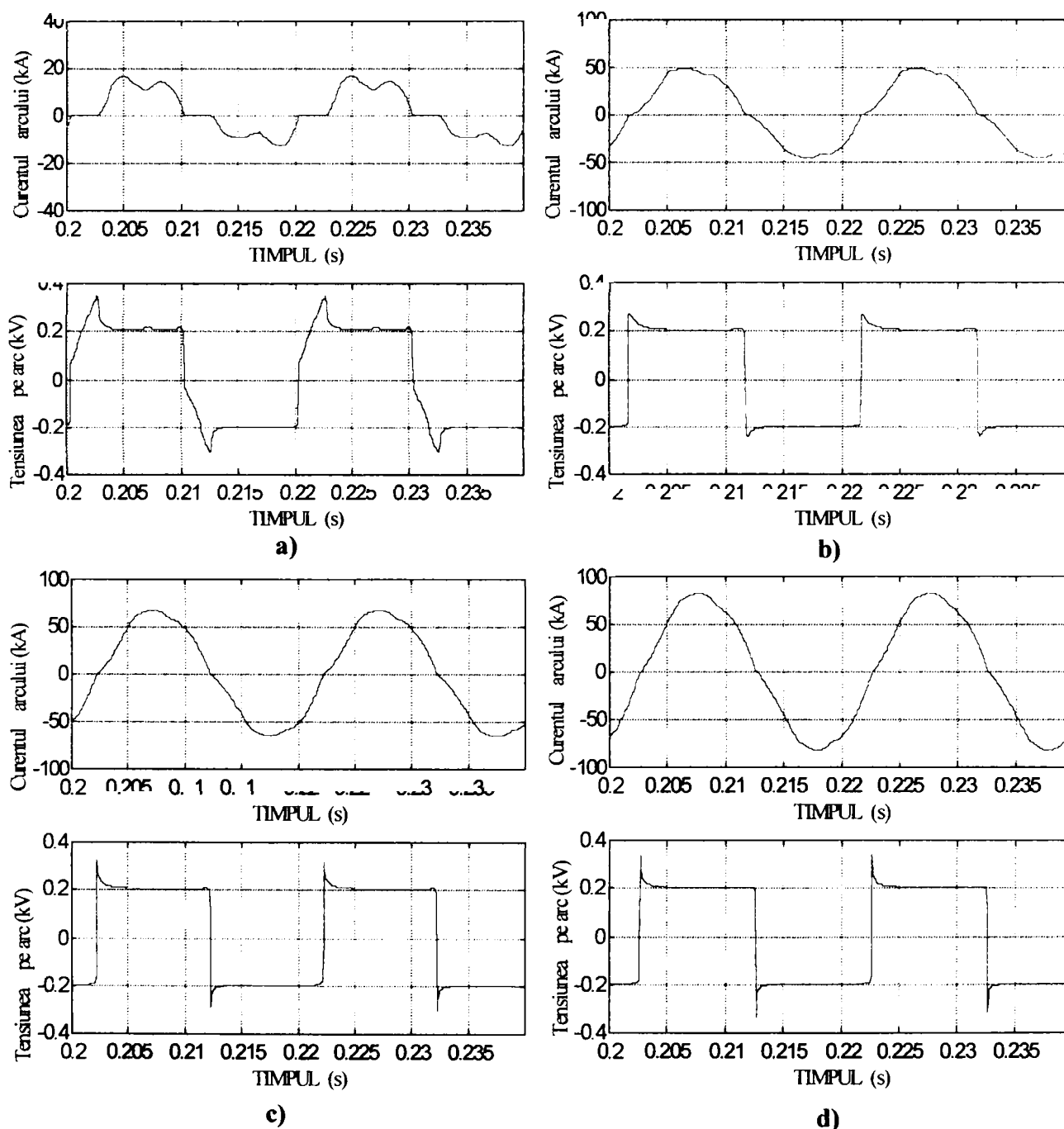


Fig. 2.9. Forma de variație a curentului arcului și a tensiunii pe arc pentru diferite valori ale tensiunii furnizate de secundarul transformatorului cuptorului  
a) 380V; b) 450 V; c) 520 V; d) 600V.

Pentru valoarea tensiunii de linie pentru care se obține puterea arcului electric de  $25,4 MW$ , dată de relația (2.75), simulările efectuate au permis obținerea formelor de undă ale curentului și tensiunii arcului electric al *fazei 1*, prezentate în figura 2.10. Forma obținută pentru tensiunea arcului electric reflectă foarte bine rezultatele prezentate în literatura de specialitate, atât pentru unda reală, [29], cât și pentru cea obținută prin simulare [70].

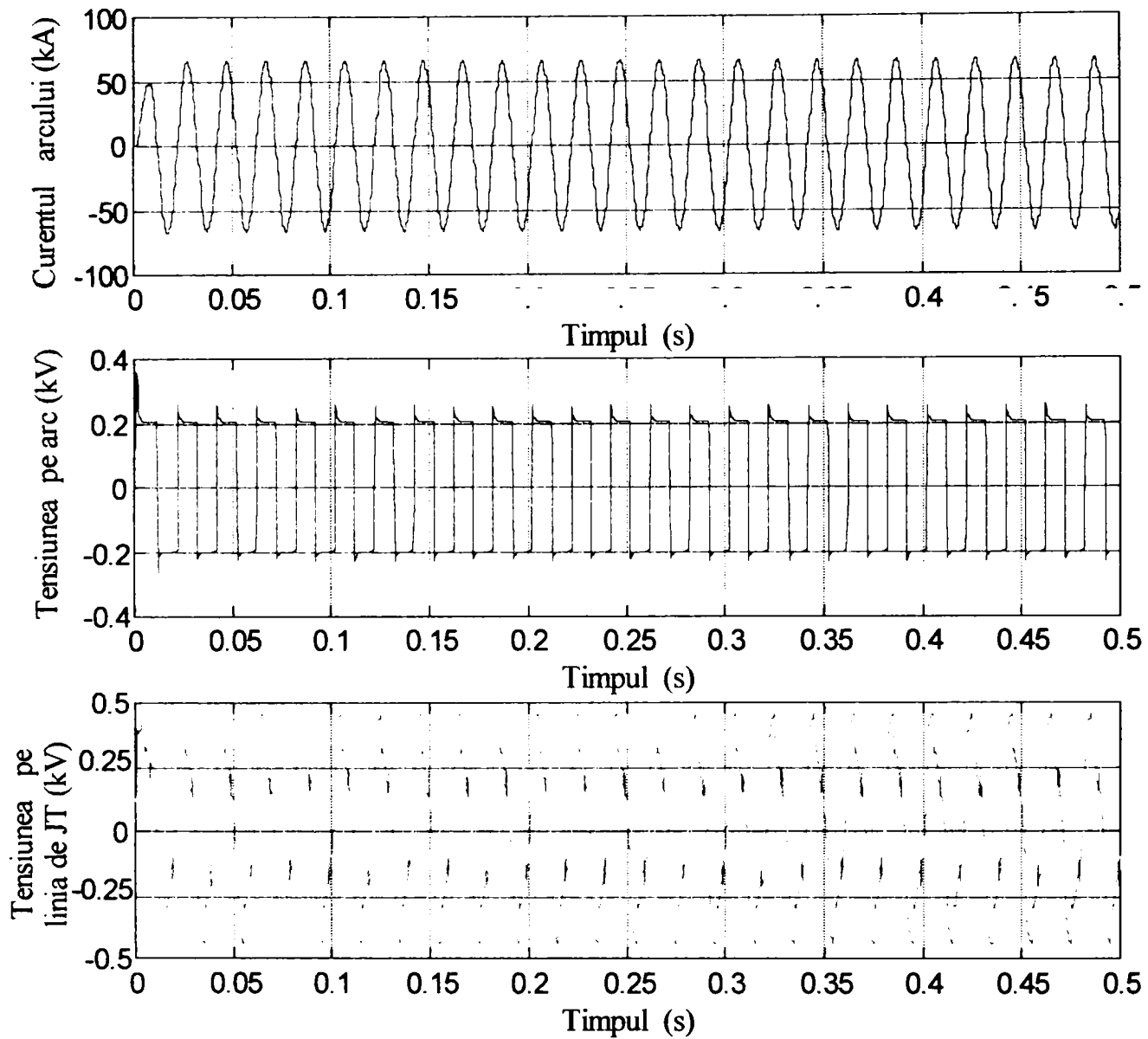


Fig. 2.10. Forma de variație a curentului arcului, tensiunii pe arc și pe linia de JT pe faza 1, pentru  $U_{\text{limite}}=520$  V.

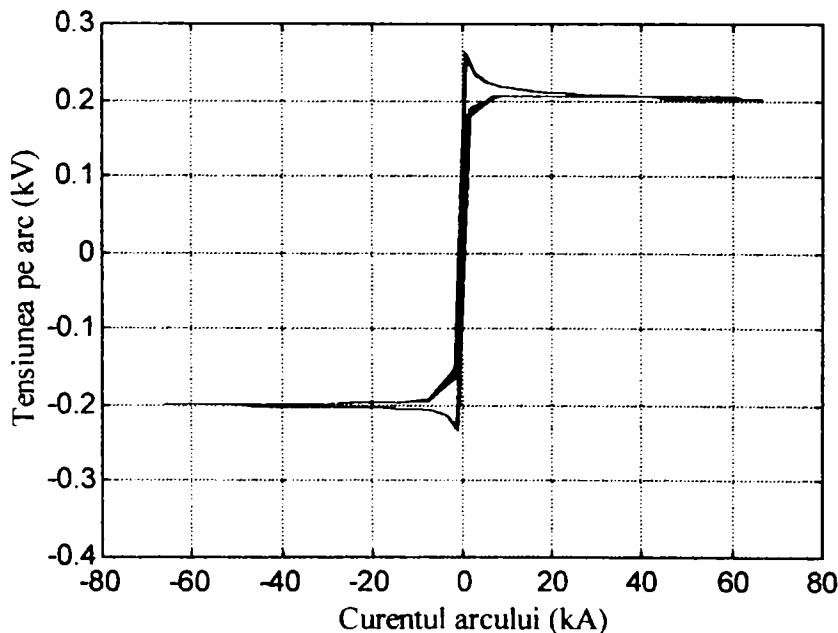


Fig. 2.11. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric pentru faza 1, obținută în urma simulării.

În urma simulării a fost realizată caracteristica curent-tensiune, prezentată în figura 2.11. Se observă că **această caracteristică prezintă fenomenul de histereză**, (redus) spre deosebire de caracteristica teoretică prezentată în figura 2.7, fapt care corespunde procesului real [29],[70]. **Deoarece aria curbei de histereză reprezintă o măsură a pierderilor de putere, rezultă că în urma simulărilor se pot trage concluzii în ceea ce privesc pierderile de putere pe arcul electric.**



De asemenea se observă că există o nesimetrie a caracteristicii obținute datorată valorilor diferite alese pentru constantele  $C_a$  și  $C_b$  din relația (2.73).

Datorită faptului că  $D_a$  a fost aleasă egală cu  $D_b$  pantele în regiunile crescătoare și descrescătoare au rezultat egale. **Rezultă că acest model prezintă avantajul că permite simularea caracterului redresant al arcului electric.**

Utilizând programul prezentat în *anexa I.1.* a fost realizată analiza spectrală a curentului și tensiunii arcului utilizând *transformata Fourier*, spectrul de frecvență studiat fiind în domeniul  $0 - 1000 \text{ Hz}$ , frecvența de eșantionare fiind de  $5 \text{ KHz}$ .

Deoarece *transformata Fourier* a fost calculată în  $2500$  de puncte rezultă că ecartul de frecvență în care a fost realizată analiza este de  $2 \text{ Hz}$ . Pentru a compara diferitele spectre analizate în lucrare acești parametri de analiză au fost păstrați aceeași în întreaga lucrare.

**Avantajele utilizării caracteristicilor spectrale** descrise anterior **constau în faptul că** pentru un semnal anumit **sunt determinate și amplitudinile componentelor de frecvență diferită de un multiplu al frecvenței fundamentale** deci sunt scoase în evidență **interarmonicile**. Acest fapt este deosebit de util deoarece în realitate arcul electric este un puternic generator atât de armonici cât și de interarmonici.

Deoarece o serie de indicatori calitativi ai energiei electrice se determină pe baza doar a armonicilor semnalelor de curent și de tensiune, [1],[55] se poate considera că pentru o fereastră temporală spectrele semnalelor de interes conțin numai armonicile fundamentale. În acest caz energia interarmonicilor este atribuită armonicilor celor mai învecinate, spectrul semnalelor conținând numai armonicile fundamentale.

Această reprezentare se obține calculând *transformata Fourier* într-un număr de  $100$  de puncte, ecartul de frecvență astfel obținut fiind de  $50 \text{ Hz}$ .

În figura 2.12 este prezentată caracteristica spectrală și amplitudinile armonicilor curentului și tensiunii arcului electric obținute în urma simulării. Se observă că **atât în spectrul curentului cât și în cel al tensiunii arcului electric predomină armonicile impare**. Aceasta se datorează faptului că în simulări au fost alese valori egale pe ambele semialternanțe pentru tensiunea de stingere,  $U_{st}^+ = U_{st}^- = 200 \text{ V}$ . Deoarece valorile tensiunii de amorsare pe cele două semialternanțe sunt diferite, atât în spectrul tensiunii cât și în cel al curentului se constată prezența armonicilor de ordin par ( în special armonica a doua și a patra însă de amplitudini mult mai mici). **În spectrul curentului se observă faptul că pe lângă fundamentală ponderea mai mare o au armonicile 5 și 7 și mai puțin armonicile 11 și 13.** De asemenea, raportat la amplitudinea fundamentalei armonicile tensiunii arcului electric au amplitudine mult mai mare decât cele ale curentului, fapt ce rezultă și din formele de undă prezentate în figura 2.10.

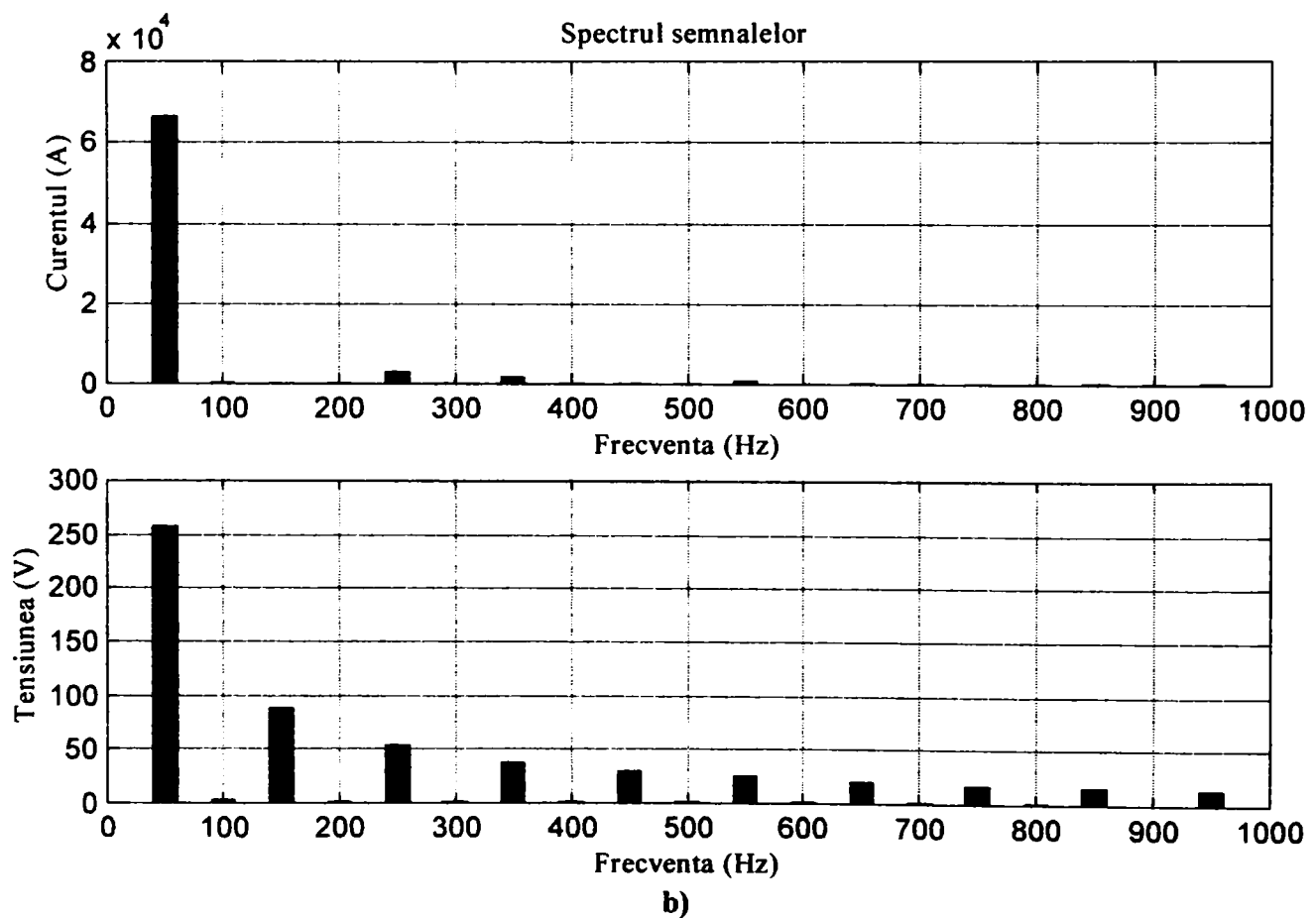
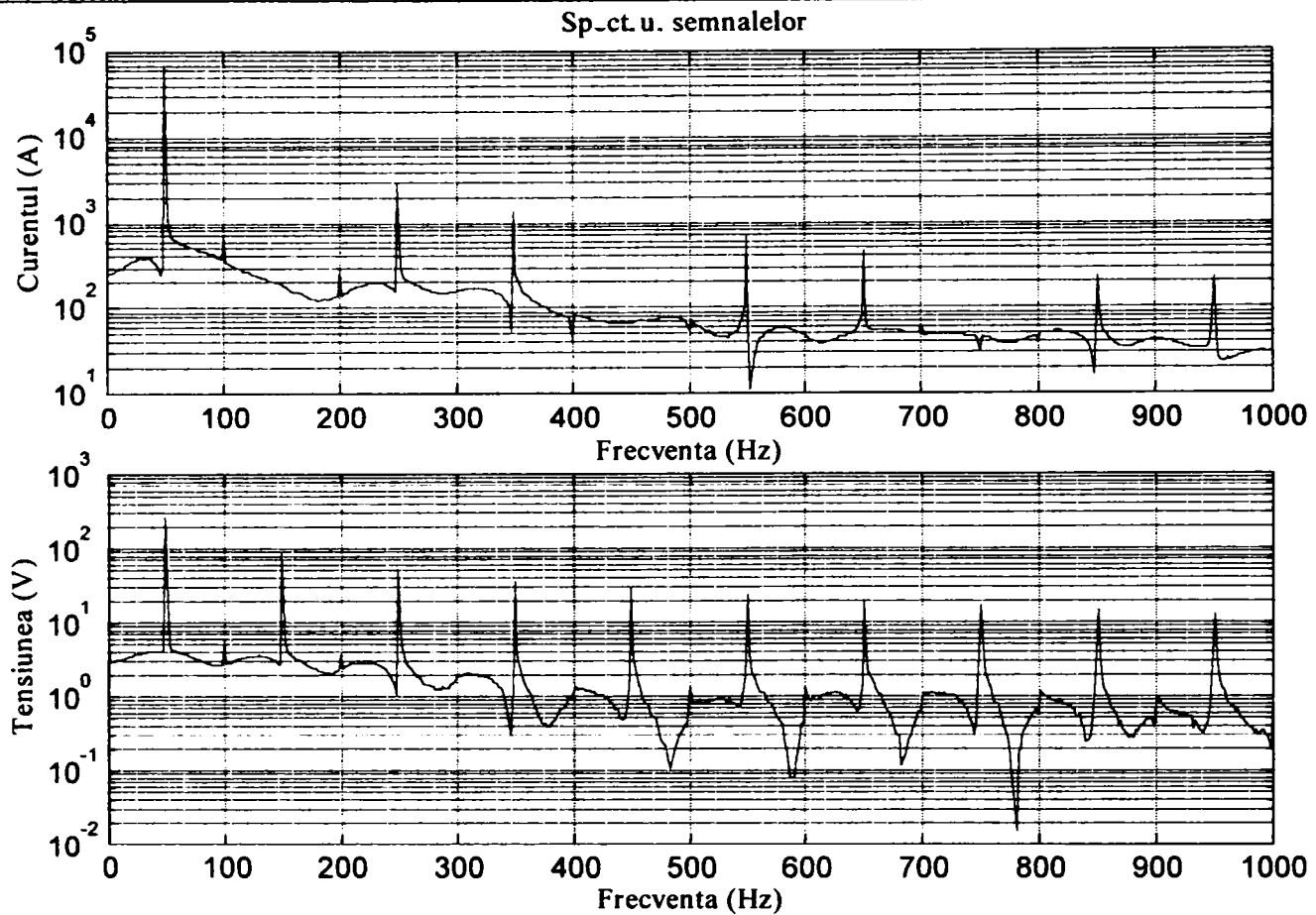
În figura 2.13 este prezentată caracteristica spectrală și amplitudinea armonicilor tensiunii în secundarul transformatorului cuptorului ( pe linia de joasă tensiune).

O primă verificare a rezultatelor obținute în urma simulărilor se poate face prin comparația acestora cu cele obținute în ipoteza în care unda de tensiune este considerată o undă dreptunghiulară periodică cu amplitudinea egală cu valoarea medie a tensiunii arcului electric  $U_{st} = 200 \text{ V}$  ca în figura 2.14. Amplitudinea armonicilor tensiunii dreptunghiulare din figura 2.14 se calculează utilizând *transformata Fourier* pe baza relațiilor (2.2) și (2.4) astfel:

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_A(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^T U_A \cdot dt + \int_2^T (-U_A) \cdot dt \right], \quad (2.76.a)$$

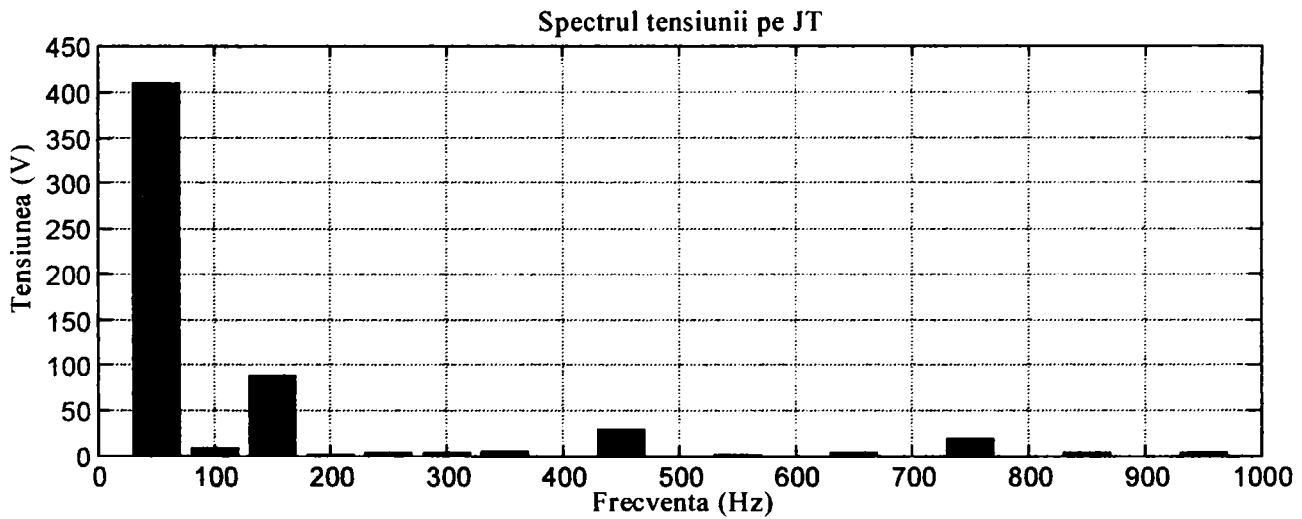
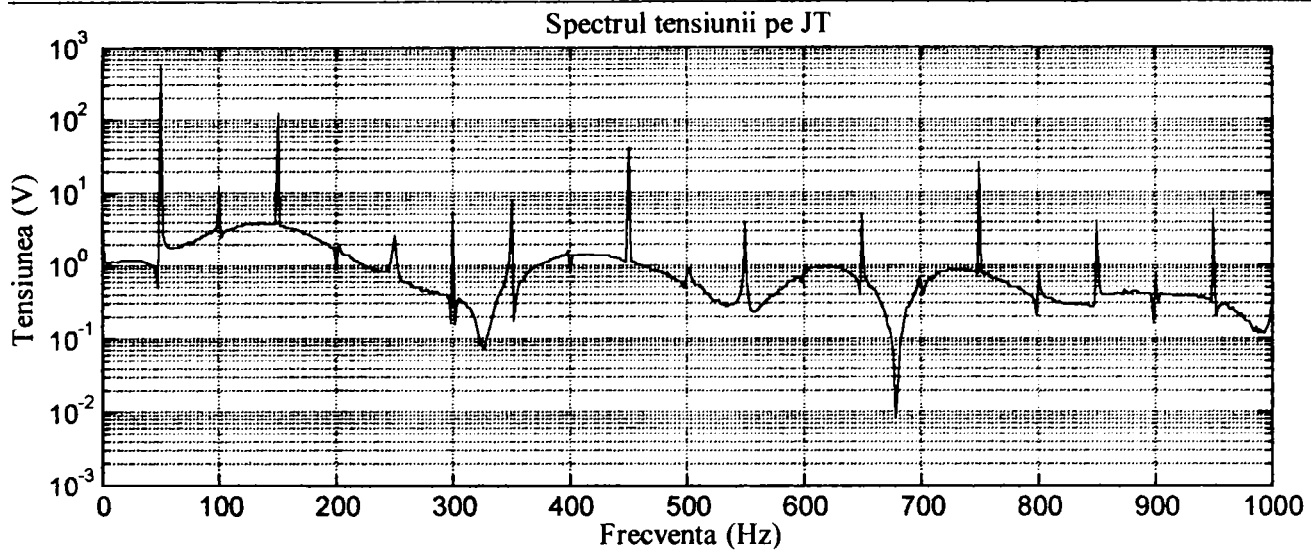
$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T u_A(t) \cdot \sin k\omega t \cdot dt = \frac{2}{T} \left[ \int_0^T U_A \cdot \sin k\omega t \cdot dt + \int_2^T (-U_A) \cdot \sin k\omega t \cdot dt \right], \quad (2.76.b)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T u_A(t) \cdot \cos k\omega t \cdot dt = \frac{2}{T} \left[ \int_0^T U_A \cdot \cos k\omega t \cdot dt + \int_2^T (-U_A) \cdot \cos k\omega t \cdot dt \right]. \quad (2.76.c)$$



**Fig. 2.12. a) Caracteristica spectrală a curentului și tensiunii arcului ; b) Amplitudinea armonicilor curentului și tensiunii arcului electric, utilizând caracteristica dinamică cu lungime constantă.**





b)

Fig. 2.13. a) Caracteristica spectrală a tensiunii pe linia de joasă tensiune (JT) ; b) Amplitudinea armonicilor tensiunii pe linia de joasă tensiune (JT).

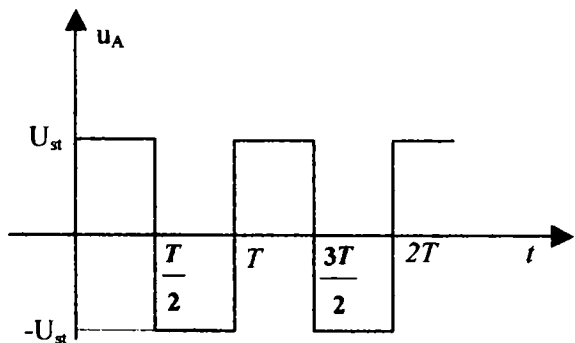


Fig. 2.14. Forma de variație simplificată a tensiunii arcului electric.

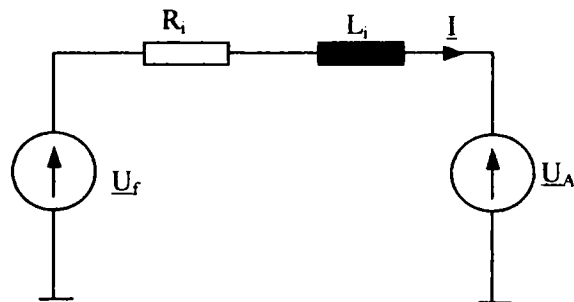


Fig. 2.15. Schema echivalentă monofază a circuitului de joasă tensiune.

Efectuând calculele se obțin valorile coeficienților  $c_0$ ,  $a_k$  și  $b_k$  date de:

$$c_0 = 0, \tag{2.77.a}$$

$$a_k = \begin{cases} \frac{4U_A}{(2p+1)\pi} & k = 2p+1, \quad p \in N, \\ 0 & k = 2p, \quad p \in N, \end{cases} \tag{2.77.b}$$

$$b_k = 0. \tag{2.77.c}$$

În acest fel expresia tensiunii arcului electric din figura 2.14 este dată de relația:

$$u_A(t) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{4U_m}{(2p+1)\pi} \cdot \sin(2p+1)\omega t, \quad (2.78.a)$$

rezultând că spectrul undei dreptunghiulare conține numai armonicile impare de fază nulă.

Rezultatele comparative sunt prezentate în *tabelul 2.1* în care pentru calculul erorii relative s-a ales ca mărime de referință semnalul dreptunghiular. Analizând aceste rezultate se constată o bună corelație între amplitudinea fundamentalei tensiunii din figura 2.12.b) și cea calculată pentru semnalul dreptunghiular de amplitudine  $U_m = 200V$ , dar și faptul că, odată cu creșterea rangului armonice, forma tensiunii arcului electric obținută în urma simulării se deosebește tot mai mult de forma dreptunghiulară.

**Tabelul 2.1.**

**Valorile amplitudinilor armonicilor tensiunii dreptunghiulare și a tensiunii arcului electric obținută în urma simulării.**

Ordin armonică	Amplitudinea armonicilor semnalului dreptunghiular	Amplitudinea armonicilor tensiunii arcului electric simulate	Eroarea relativă [%]
1.	254,64	257,73	1,21
3.	84,88	88,64	4,43
5.	50,93	54,98	7,95
7.	36,38	40,76	12,04
9.	28,29	33,08	16,93
11.	23,15	28,17	21,68
13.	19,59	24,88	27,00
15.	16,98	22,57	32,92
17.	14,99	20,78	38,62
19.	13,40	19,42	44,92

Pe baza rezultatelor din *tabelul 2.1* valoarea efectivă rezultată pe baza primelor 19 armonice pentru semnalul dreptunghiular este  $U_{ef,drept} = 197,96V$ , iar pentru armonicile rezultate în urma simulării este  $U_{ef,simulate} = 203,46V$ , eroarea relativă a valorii efective a tensiunii arcului obținută în urma simulării fiind de 2,78%.

Schema echivalentă pe linia de joasă tensiune este prezentată în figura 2.15 în care  $\underline{U}_f$  reprezintă tensiunea de fază,  $\underline{U}_A$  reprezintă forma complexă a tensiunii arcului electric dată de

$$\underline{U}_A = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2\sqrt{2} \cdot U_m}{(2p+1)\pi} \quad (2.78.b)$$

iar  $R_i$  și  $L_i$  rezistența, respectiv inductivitatea echivalentă a rețelei scurte a cuptorului cu arc electric. Valoarea curentului pe linia de joasă tensiune se poate deduce din relația:

$$\underline{I} \cdot (R_i + j\omega L_i) + \underline{U}_A = \underline{U}_f, \quad (2.79.a)$$

pentru componenta fundamentală și din relația:

$$\underline{I} \cdot (R_i + jk\omega L_i) + \underline{U}_A = 0 \quad (2.79.b)$$

pentru armonicile de rang  $k \neq 1$ .

Caracteristicile spectrale și amplitudinile armonicilor curentului și tensiunii pe liniile de *medie tensiune* și de *înalță tensiune* obținute în urma simulărilor bazate pe caracteristica dinamică cu lungime fixă a arcului electric sunt prezentate în figurile 2.16 și 2.17. Se observă că cele două caracteristici spectrale a undelor de curent și tensiune sunt similare atât pentru linia de alimentare de medie tensiune cât și pentru linia de înaltă tensiune. Deosebirea constă în faptul că unda de tensiune de pe linia de medie tensiune conține și armonicile de ordin 3, 9, 15, (însă având amplitudini mai reduse) în timp ce unda de tensiune de pe linia de înaltă tensiune nu conține aceste armonici.

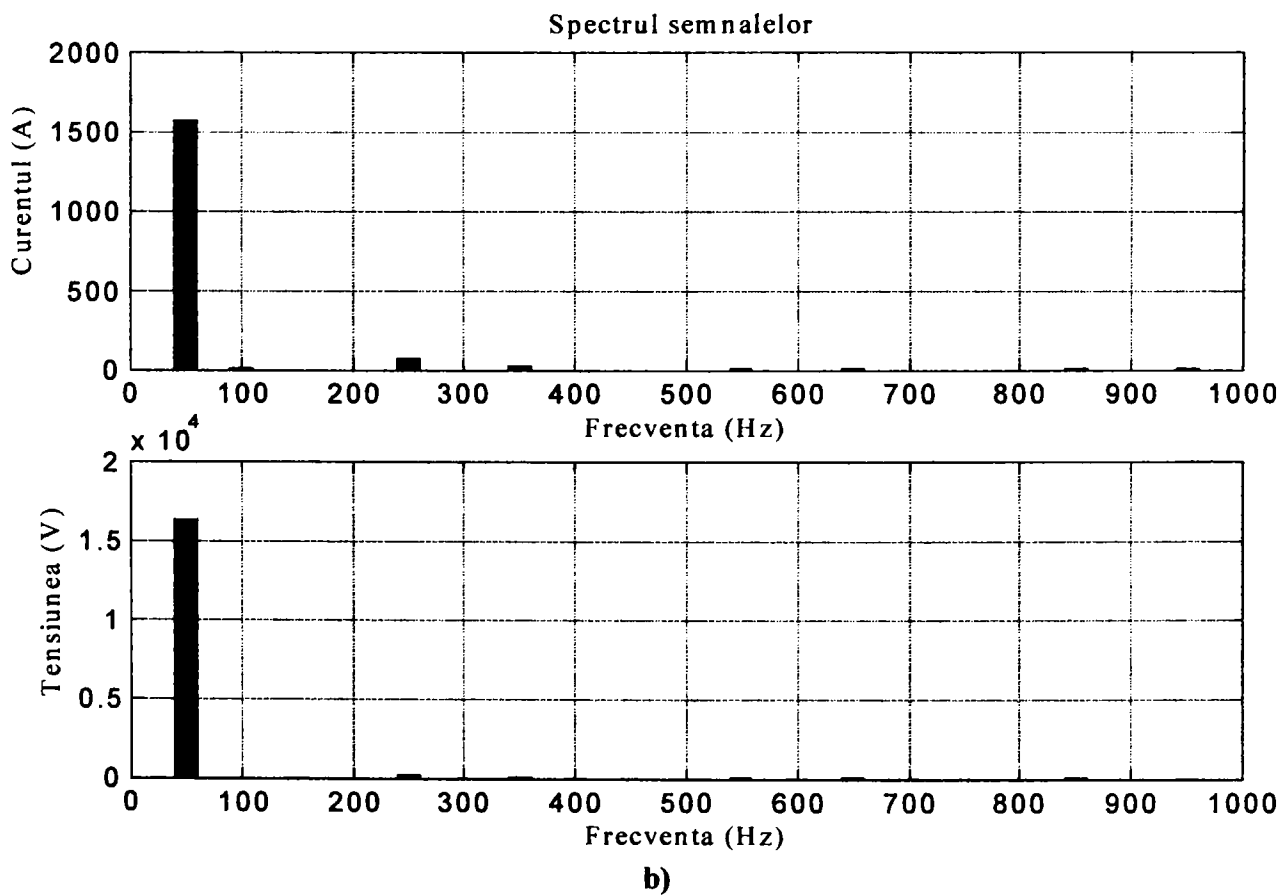
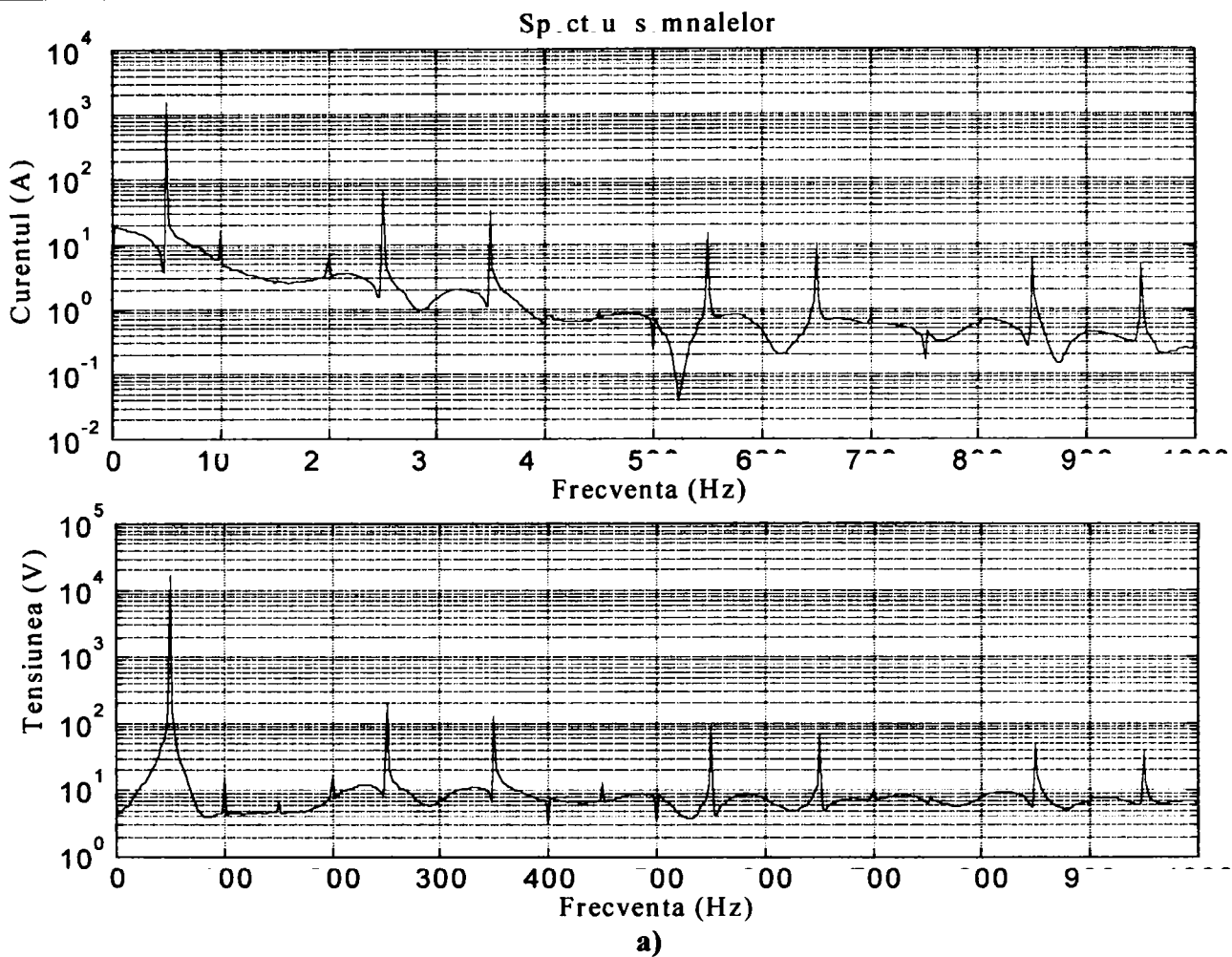
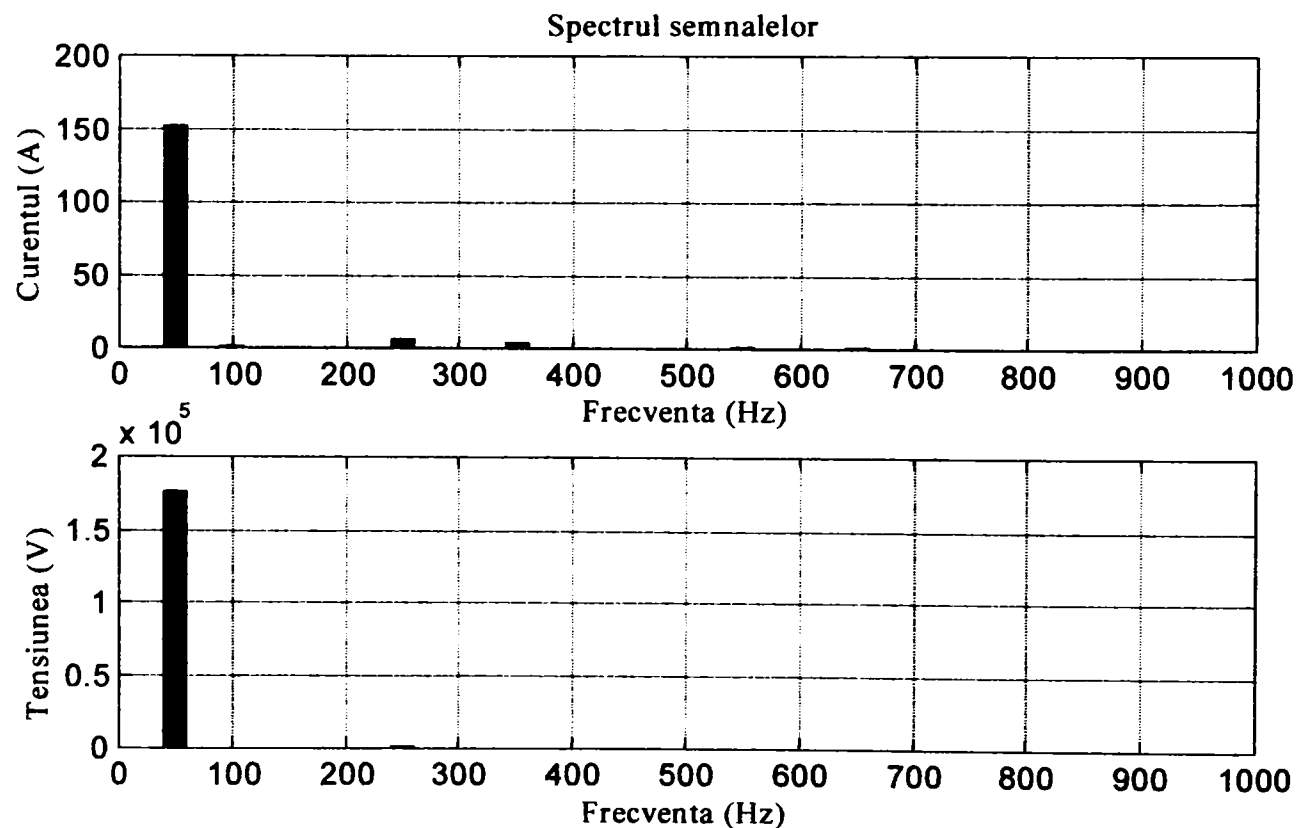
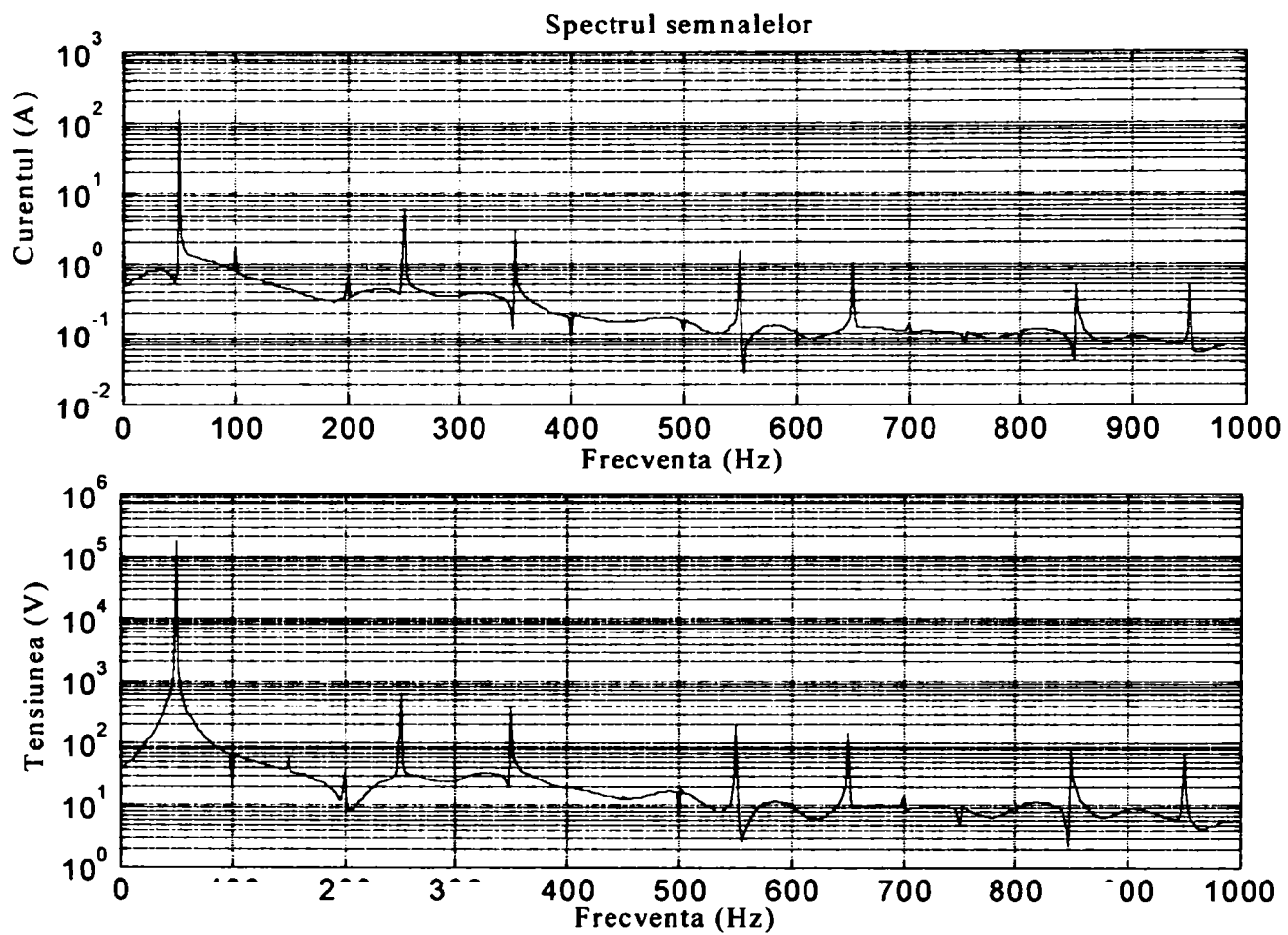


Fig. 2.16. a) Caracteristica spectrală; b) Amplitudinea armonicilor curentului și tensiunii pe linia de medie tensiune (MT), utilizând caracteristica dinamică cu lungime constantă a arcului electric.



**Fig. 2.17. a) Caracteristica spectrală; b) Amplitudinea armonicilor curentului și tensiunii pe linia de înaltă tensiune (IT), utilizând caracteristica dinamică cu lungime constantă a arcului electric.**

Se observă că raportul amplitudinilor curenților de pe liniile de joasă și de medie tensiune obținuți în urma simulărilor este egal cu raportul de transformare al transformatorului cuptorului,

$$K_1 = \frac{21 \text{ kV}}{0,6 \text{ kV}} = 35. \quad (2.80)$$

De asemenea, comparând rezultatele obținute pe liniile de medie și de înaltă tensiune se observă că raportul amplitudinilor curenților este egal cu inversul raportului amplitudinilor tensiunilor, fiind egal cu raportul de transformare al transformatorului de înaltă tensiune,

$$K_2 = \frac{220 \text{ kV}}{21 \text{ kV}} = 10,47. \quad (2.81)$$

În ceea ce privește amplitudinile tensiunii obținute în urma simulărilor se observă o corespondență cu cele teoretice,  $21 \cdot \sqrt{2/3} = 17,15 \text{ kV}$  pentru linia de medie tensiune, din figura 2.16, respectiv  $220 \cdot \sqrt{2/3} = 179,63 \text{ kV}$  pentru linia de înaltă tensiune, din figura 2.17.

Utilizând relația (2.14) a fost calculată distorsiunea armonică totală a undei de curent și de tensiune, rezultatele fiind prezentate în **tabelul 2.2**. În urma analizei rezultatelor obținute se observă că:

- Distorsiunea armonică totală a undei curentului pe linia de joasă tensiune este mai mică decât a undei de tensiune;
- Pe liniile de medie tensiune și de înaltă tensiune unda de tensiune este mai puțin distorsionată decât unda curentului;
- Unda curentului este aproximativ la fel distorsionată pe toate liniile de alimentare;
- Cea mai mare distorsiune a undei de tensiune este pe linia de joasă tensiune în timp ce pe liniile de medie tensiune și înaltă tensiune distorsiunea scade semnificativ.

### 2.3.2. Modelarea funcționării cuptorului cu arc utilizând caracteristica dinamică a arcului electric cu lungime variabilă.

Pentru ca parametrii modelului să depindă de fluctuațiile de tensiune, caracteristica dinamică curent – tensiune trebuie să prezinte o dependență în timp de lungimea arcului dată de relația

$$U_A = k \cdot U_{A0}(I_A), \quad (2.82)$$

unde  $U_{A0}$  este tensiunea arcului corespunzător unei lungimi de referință a arcului  $l_0$ . Parametrul  $k$  reprezintă raportul între tensiunea de prag corespunzătoare lungimii  $l$ ,  $U_{st}(l)$  și cea corespunzătoare lungimii  $l_0$ ,  $U_{st}(l_0)$ .

Obținerea modelului dinamic al arcului electric pornește de la faptul că relația dintre lungimea arcului și cea a tensiunii de prag poate fi scrisă sub forma

$$U_{st} = A + Bl, \quad (2.83)$$

unde  $A$  reprezintă o constantă cu valoarea egală cu suma căderilor de tensiune anodică și catodică ( $A \cong 40 \text{ V}$ ), iar  $B$  reprezintă căderea de tensiune pe unitatea de lungime a arcului, având valori uzuale de  $10 \text{ V/cm}$  [70]. Din relațiile (2.72),(2.73) și (2.82),(2.83) se obține expresia constantei  $k$  în funcție de lungimea arcului electric

$$k(l) = \frac{A + B \cdot l}{A + B \cdot l_0}. \quad (2.84)$$

Variațiile rapide ale curentului absorbit de către arcul cuptorului electric în timpul procesului de topire depind strâns de variațiile lungimii arcului, cauzate de modificările de poziție ale deșeurilor de metal și variației poziției electrozilor.

Natura complexă a acestor fenomene nu favorizează o abordare ușoară în ceea ce privește studiul variației lungimii arcului electric. În prezent s-au dezvoltat două direcții de abordare în ceea ce privește forma de variație a lungimii arcului, prima presupunând o abordare deterministă iar cea de-a doua o abordare statistică.



## a) Variația sinusoidală a lungimii arcului electric.

În abordarea deterministă se consideră că lungimea arcului electric are o formă de variație în timp descrisă de o lege sinusoidală.

Dependența tensiunii anodice în funcție de timp se poate obține considerând că lungimea arcului are o variație dată de relația

$$l(t) = l_0 - \frac{L}{2}(1 + \sin \omega t), \quad (2.85)$$

unde  $L$  reprezintă variația maximă a lungimii arcului (cursa electrodului) iar  $l_0$  este lungimea maximă a arcului electric (distanța maximă dintre electrod și baia metalică).

Utilizând relațiile (2.82) - (2.85) se obține variația în timp a dependenței  $U_A(I_A)$

$$U_A(I_A) = k(t) \cdot U_{A0}(I_A), \quad (2.86)$$

unde

$$U_A(I_A) = \frac{A + B \cdot l}{A + B \cdot l_0} \cdot U_{A0}(I_A) = \left[ 1 - \frac{B \cdot L \cdot (1 + \sin \omega t)}{A + B \cdot l_0} \right] \cdot U_{A0}(I_A). \quad (2.87)$$

Notând cu

$$m = \frac{L}{2l_0 - L}, \quad (2.88)$$

se observă că pentru  $L = 0$  se obține  $m = 0$ , iar pentru  $L = l_0$  se obține  $m = 1$ , parametrul  $m$  reprezentând *indicele de modulație* a lungimii arcului electric.

Schema de implementare a modelului pentru o fază conține modulul de generare a tensiunii de aprindere pe semialternața pozitivă, pe cea negativă precum și de determinare a rezistenței arcului electric. Pentru determinarea rezistenței arcului electric s-au utilizat următoarele blocuri suplimentare:

- blocul de calcul a lungimii arcului electric cu variație sinusoidală (figura 2.18.a);
- blocul de calcul a constantei de proporționalitate  $k$  (figura 2.18.b);
- blocurile de calcul a valorii rezistenței arcului electric (figura 2.18 c.d).

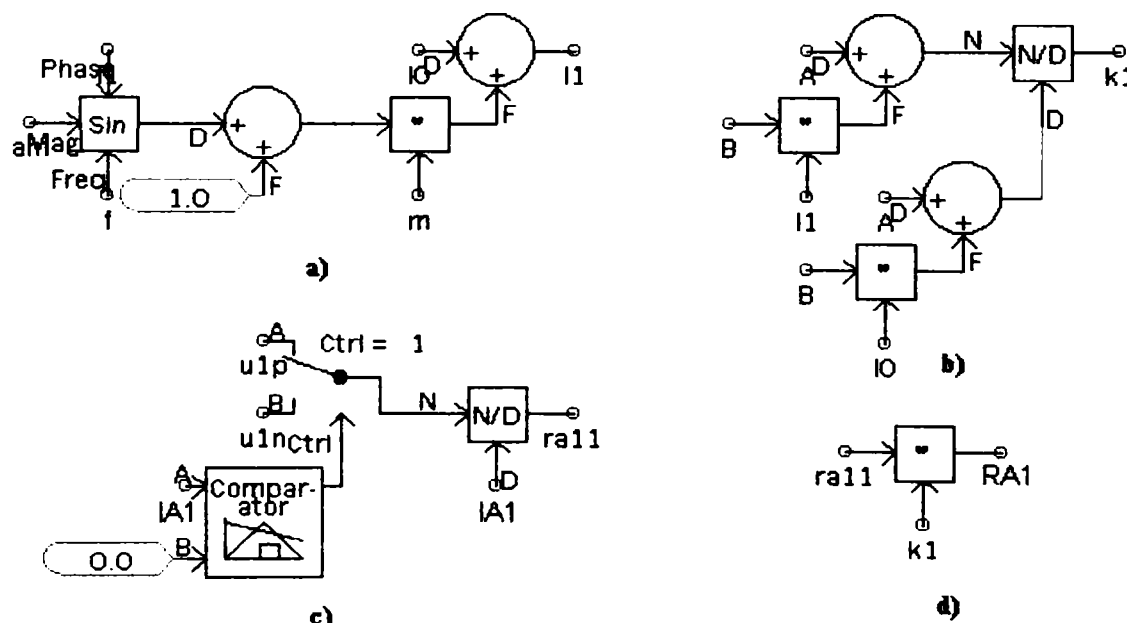


Fig. 2.18. Schema de calcul a valorii rezistenței arcului electric pe faza 1; a) calculul lungimii arcului electric; b) calculul constantei  $k$ ; c), d) calculul rezistenței arcului electric.



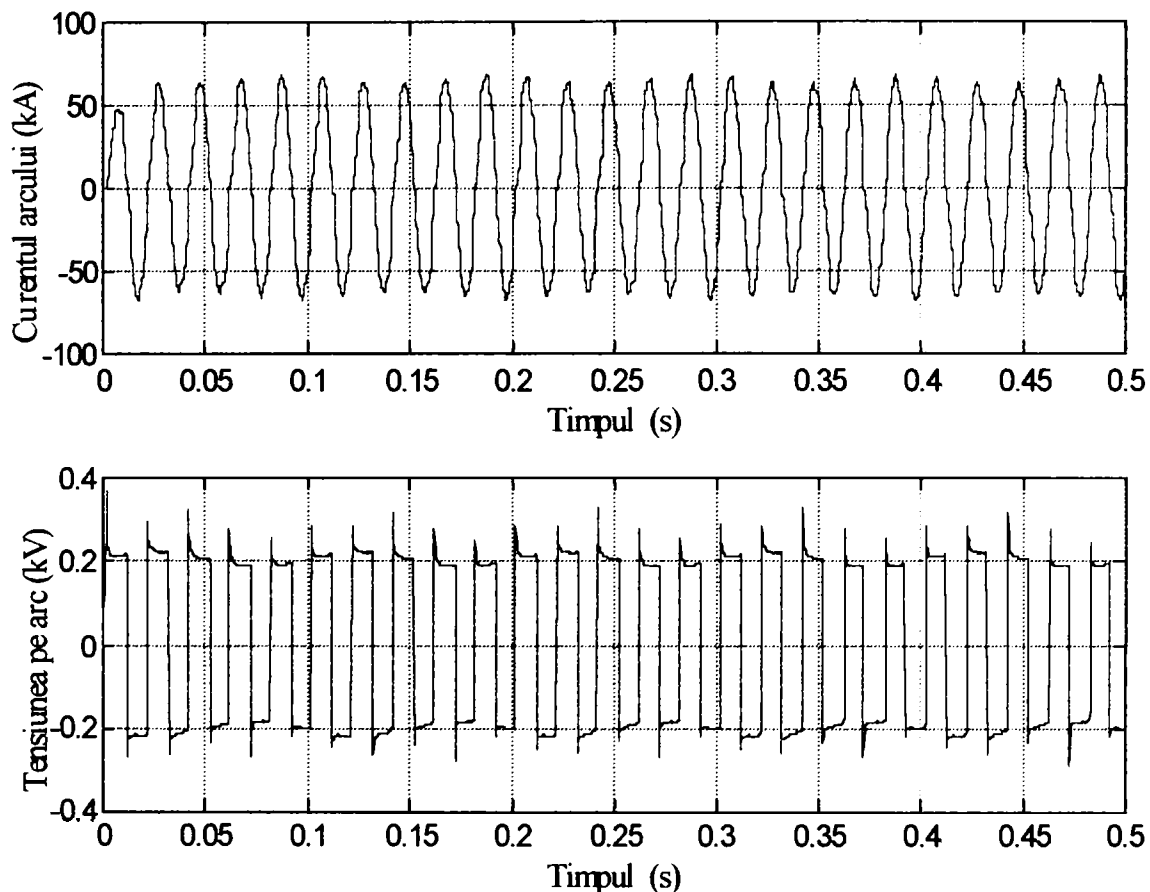


Fig. 2.19. Forma de variație a curentului arcului și tensiunii pe arc pentru faza 1 utilizând caracteristica dinamică cu variație sinusoidală a lungimii arcului electric.

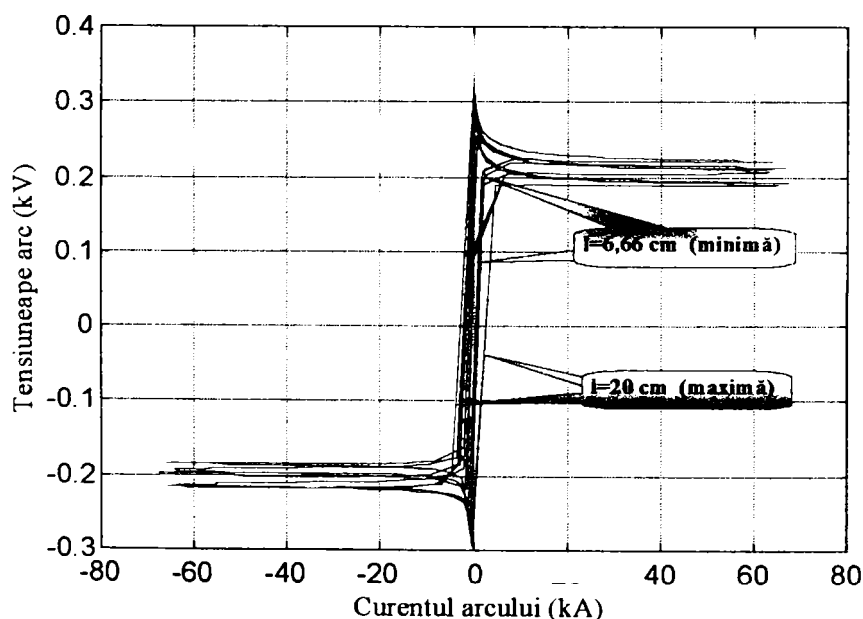


Fig. 2.20. Caracteristica curent-tensiune a arcului pentru faza 1, obținută în urma simulării pe baza caracteristicii dinamice cu variație sinusoidală a lungimii arcului.

observă că atunci când anvelopa curentului atinge valoarea maximă, amplitudinea tensiunii atinge valoarea minimă fapt care rezultă și din relația (2.73).

Utilizând schema instalației electrice a cuptorului cu arc electric prezentată în *anexa II.7*, simulările efectuate au permis obținerea formelor de undă ale curentului și tensiunii arcului electric al *fazei 1*, prezentate în figura 2.19. În aceste simulări *frecvența modulatorie a fost aleasă 10 Hz*, domeniu în care se manifestă cel mai pregnant fenomen de flicker [65],[66],[70], iar *indicele de modulație  $m = 0.2$* .

În figura 2.19 se

Pe baza rezultatelor obținute în urma simulării, în figura 2.20 este reprezentată caracteristica curent-tensiune în care se observă faptul că valoarea de prag a tensiunii arcului este variabilă, depinzând de lungimea arcului electric. De asemenea, lungimea arcului electric influențează panta caracteristicii care nu mai este constantă.

Analizând spectrul curentului și tensiunii arcului electric prezentate în figura 2.21 comparativ cu cele din figura 2.12 se constată următoarele:

- caracteristica spectrală a curentului prezintă aceleași armonici în ambele situații însă **în cazul modulării sinusoidale a lungimii arcului electric în spectrul curentului apar componente a căror frecvență diferă față de cea a armonicii cu multiplii ai frecvenței modulatorie (interarmonici)**. Astfel, se observă prezența componentelor cu frecvența de **60 Hz** și a celor cu frecvențe de **140 și 160 Hz** (figura 2.21).

- același fenomen se constată și în cazul în care se analizează caracteristica spectrală a tensiunii, remarcându-se în special prezența componentelor de **40 Hz și 60 Hz** (figura 2.21).

- la frecvențe mari, se observă că în spectrul curentului devin predominante interarmonicile, în timp ce în spectrul tensiunii prezența interarmonicilor este mult atenuată.

În figura 2.22 este reprezentată amplitudinea armonicilor de ordin **5,7,11 și 13** precum și a interarmonicilor învecinate. Deoarece, așa cum s-a arătat anterior, ecartul de frecvență obținut utilizând **transformata Fourier** este de **2 Hz**, în această figură sunt mai bine puse în evidență amplitudinile interarmonicilor a căror frecvență diferă cu multiplii frecvenței modulatorie.

**În concluzie se poate afirma că frecvența modulatorie are influență în cazul curentului asupra armonicilor de frecvență ridicată iar în cazul tensiunii asupra armonicilor de frecvență joasă.**

**Influența valorii indicelui de modulație asupra caracteristicii spectrale** poate fi analizată pe baza figurii 2.23 în care a fost reprezentată atât forma de variație în timp a tensiunii arcului electric cât și caracteristica spectrală a tensiunii arcului pentru două valori diferite ale indicelui de modulație,  $m = 0,2$  (roșu) și  $m = 0,6$  (albastru).

Se observă că **în cazul modulării cu indice de modulație mare** (curbele reprezentate cu albastru) atât **amplitudinea armonicilor joase cât și a interarmonicilor este mai mare**, însă **odată cu creșterea ordinului armonicilor amplitudinea acestora scade** în timp ce **caracteristica de frecvență din jurul ei se aplatizează**. În acest fel rezultă că odată cu creșterea valorii indicelui de modulație puterea spectrală se redistribuie ocupând o bandă de frecvență mai largă, simultan cu reducerea amplitudinii.

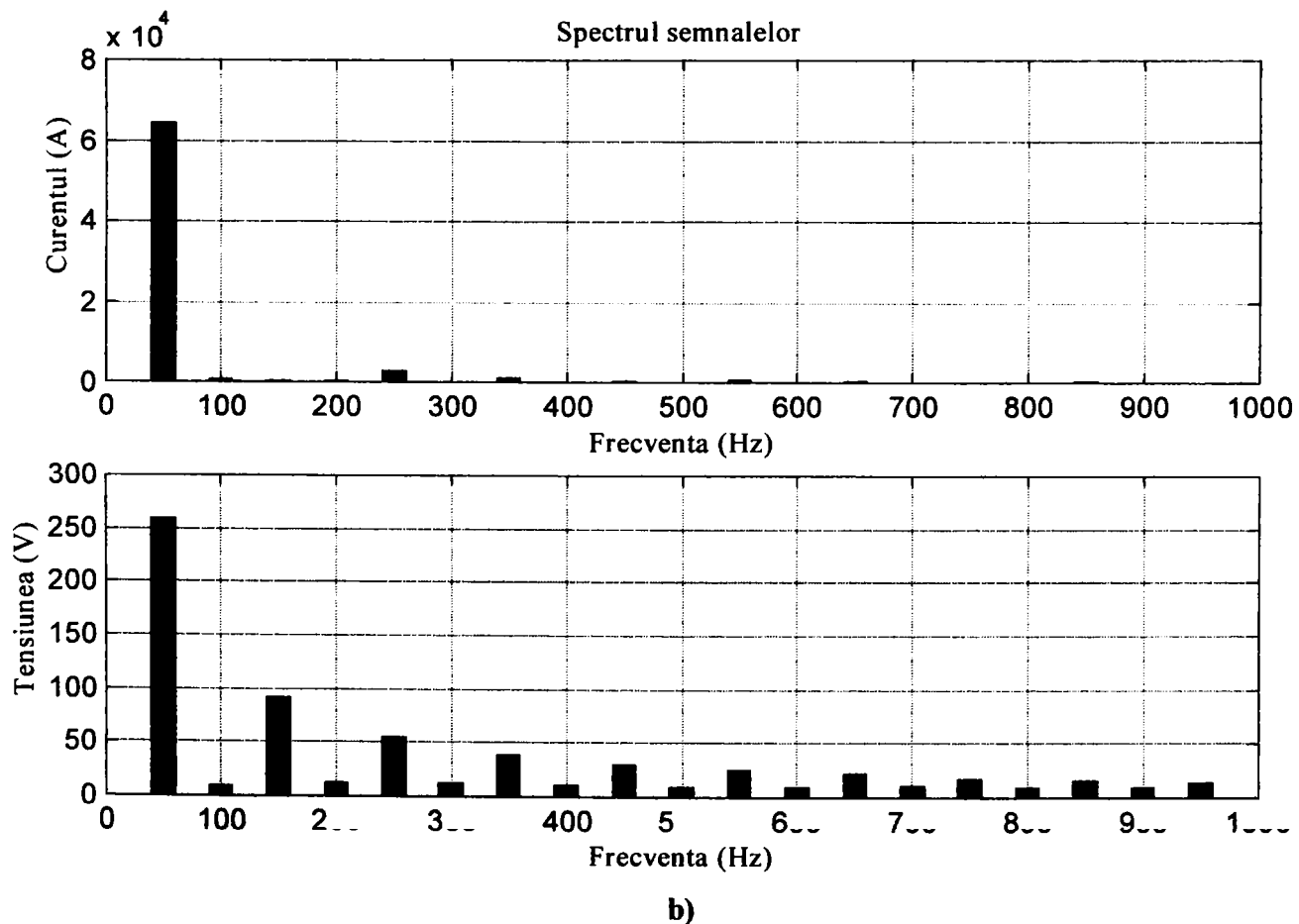
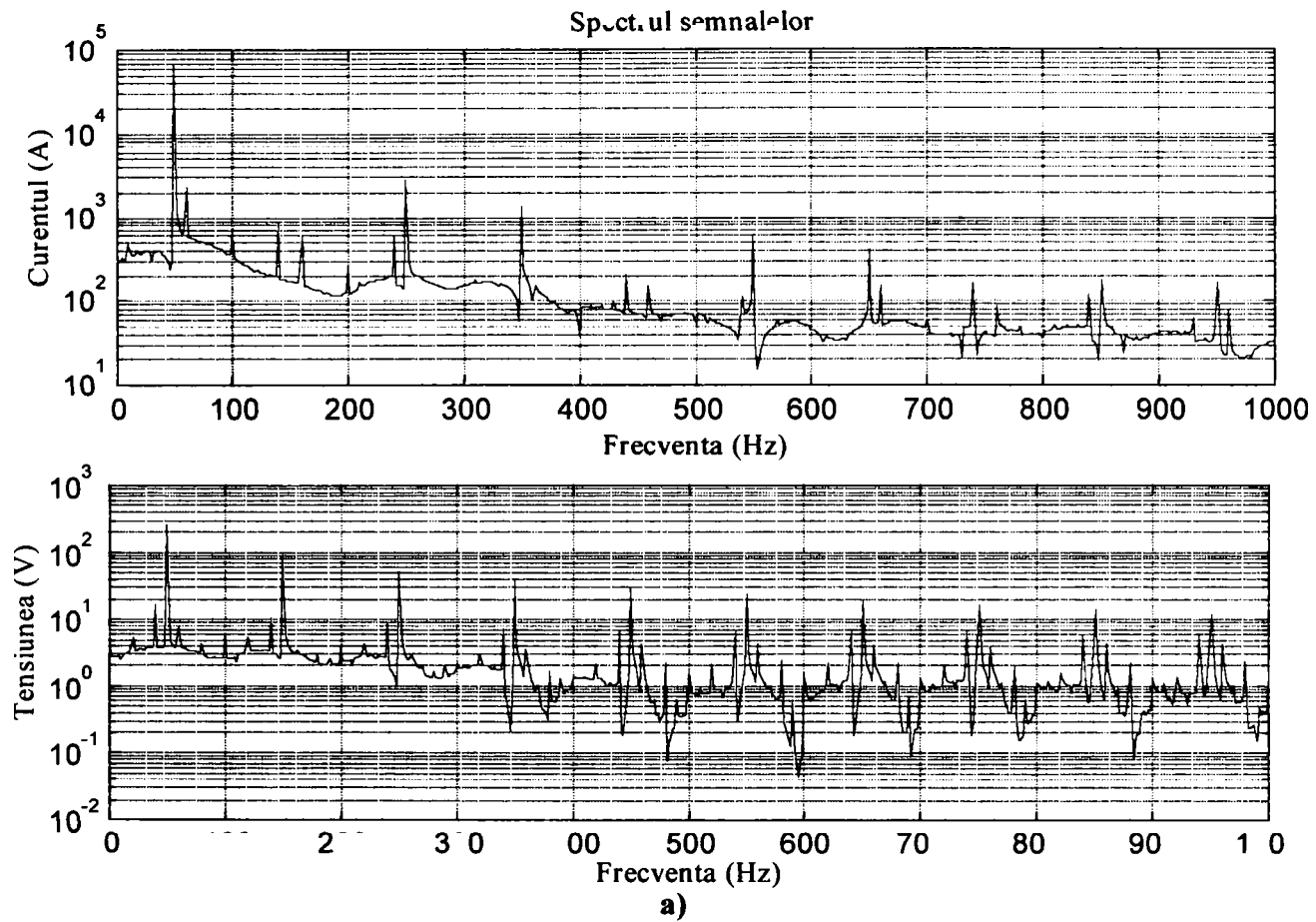
Valoarea frecvenței modulatorie se reflectă în distanța interarmonicilor față de armonica respectivă, distanță care crește odată cu creșterea valorii frecvenței modulatorie.

În figura 2.24 este prezentată caracteristica spectrală a curenților și tensiunilor de pe linia de alimentare de **medie tensiune**, utilizând variația sinusoidală a lungimii arcului electric.

Se observă faptul că ambele caracteristici spectrale, ale curentului și tensiunii conțin aceleași armonici de ordin **5,7,11 și 13**, pe linia de alimentare de medie tensiune transmițându-se și interarmonicile. Pentru a se putea mai bine evidenția interarmonicile s-a reprezentat în figura 2.25 atât armonicile de ordin **5,7,11 și 13** cât și interarmonicile apropiate, constatându-se că și componentele a căror frecvență diferă cu o valoare egală cu frecvența modulatorie se transmit pe linia de medie tensiune.

În figura 2.26. sunt reprezentate caracteristicile spectrale ale curentului și tensiunii de pe linia de alimentare de **înantă tensiune**, constatându-se că armonicile de ordin **5,7,11 și 13** se transmit și pe această linie de alimentare.

Se observă absența armonicilor de ordin **3,9 și 15**, în spectru fiind totuși prezente interarmonicile apropiate acestora. Aceasta se explică prin faptul că armonicile de rang multiplu de trei ale curentului electric formează sisteme de secvență zero (homopolare), propagarea lor fiind blocată în cazul conexiunilor stea fără conductor neutru.



**Fig. 2.21. a) Caracteristica spectrală a curentului și tensiunii arcului ; b) Amplitudinea armonicilor curentului și tensiunii arcului, utilizând caracteristica dinamică a arcului electric, în care lungimea arcului are o variație sinusoidală, pentru  $m=0,2$ .**

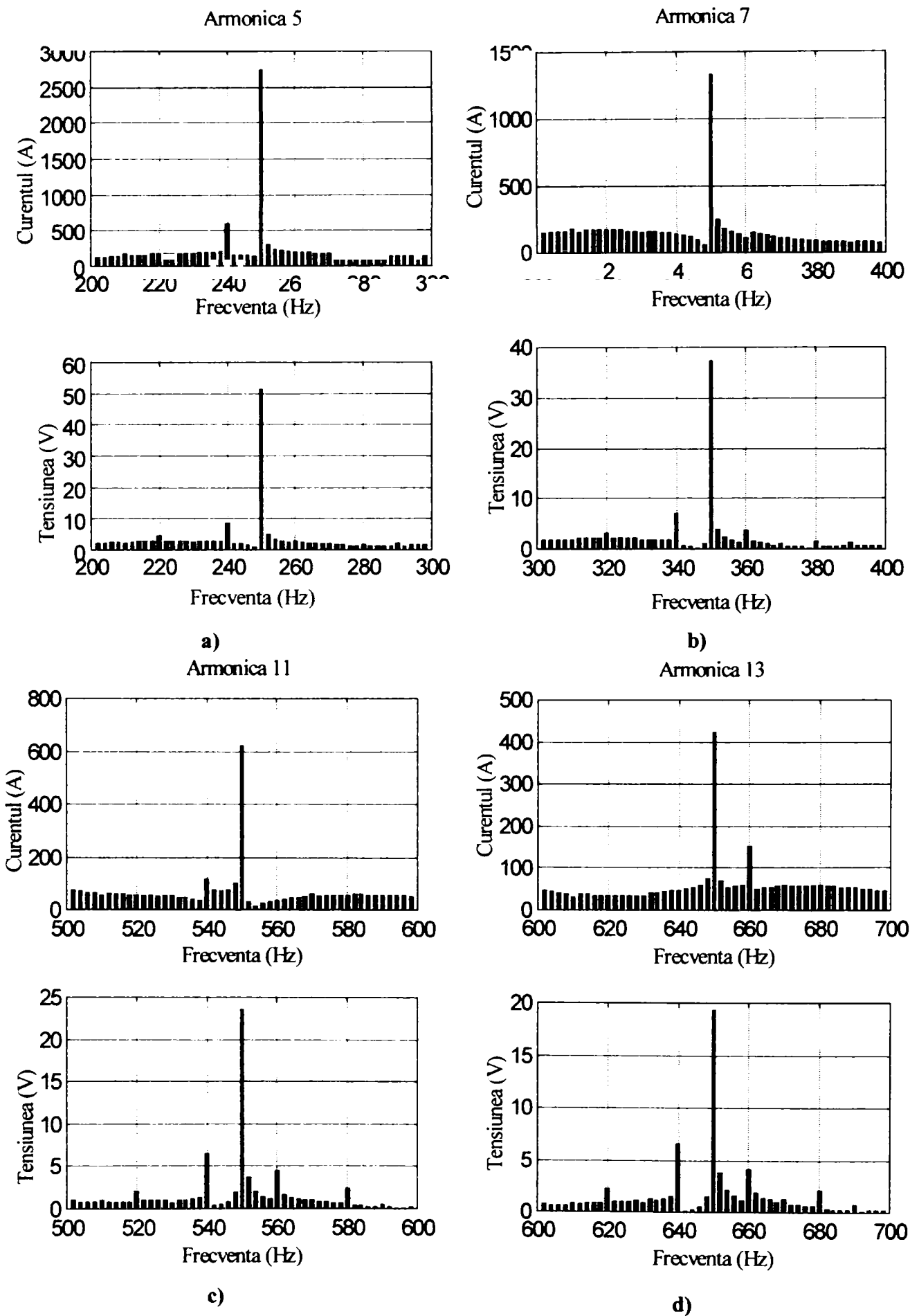
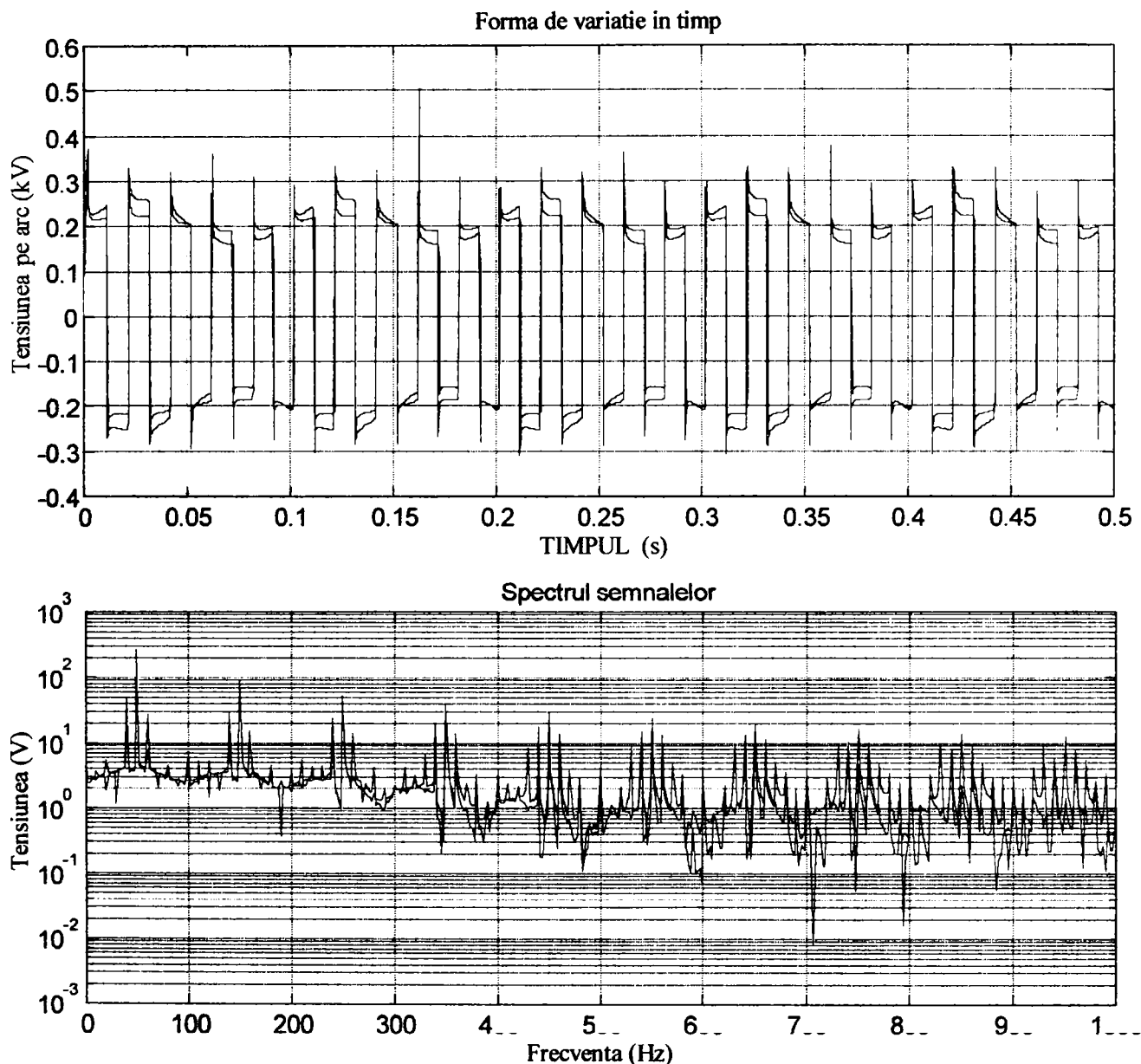


Fig. 2.22. Reprezentarea amplitudinilor armonicilor de ordin 5,7,11,13 și a interarmonicilor curentului și tensiunii arcului electric pe linia de joasă tensiune pentru  $m=0,2$ .



**Fig. 2.23. Forma de variație a tensiunii arcului electric pentru faza 1 și spectrul de frecvență, utilizând caracteristica dinamică cu variație sinusoidală a lungimii arcului.**

### **b) Forma de variație aleatoare a lungimii arcului electric.**

În abordarea statistică se consideră că variația lungimii arcului electric este un fenomen aleator. Experimental s-a constatat în urma măsurătorilor de putere activă, reactivă, a curenților și tensiunilor la cuptoarele cu arc electric că variațiile care se obțin sunt similare unor procese a căror variație este descrisă de o lege de tip zgomot alb de bandă limitată și a cărei amplitudine variază în timp. Din această cauză s-a considerat că se poate atribui și variației lungimii arcului o formă de variație de același tip [70],[76],[89],[102].

Dacă lungimea arcului electric are o variație după o lege de tip zgomot-alb, forma de variație a lungimii arcului este dată de relația

$$l(t) = l_0 - r(t), \quad (2.89)$$

unde  $l_0$  reprezintă lungimea maximă a arcului pentru care se asigură conducția continuă iar  $r(t)$  reprezintă variația lungimii arcului în funcție de timp. Semnalul  $r(t)$  este de tip zgomot alb de bandă limitată. În mod uzual banda de frecvență a semnalului  $r(t)$  se găsește în domeniul în care fluctuațiile de tensiune produc efect de flicker.



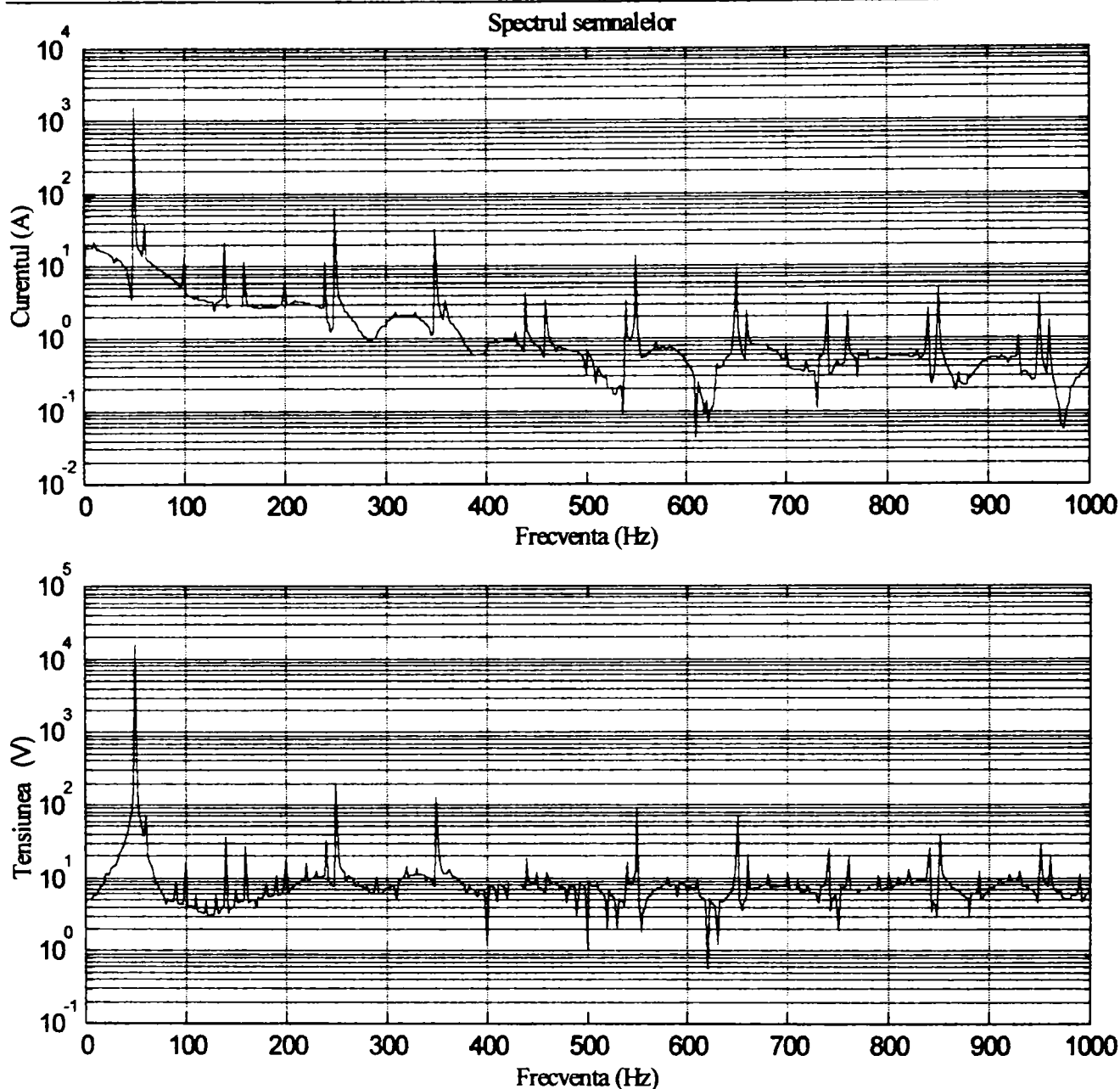


Fig. 2.24. Caracteristica spectrală a curentului și tensiunii pe linia de medie tensiune (MT), utilizând variația sinusoidală a lungimii arcului electric pentru  $m=0,2$ .

În aceste condiții expresia coeficientului  $k(t)$  este

$$k(t) = \frac{A + B \cdot I}{A + B \cdot I_0} = 1 - \frac{B \cdot r(t)}{A + B \cdot I_0} \quad (2.90)$$

Schema de implementare a modelului pentru faza 1 este prezentată în figura 2.27. Blocurile care o compun îndeplinesc aceleași funcțiuni ca în cazul variației sinusoidale a lungimii arcului electric, deosebirea constând în structura diferită a blocului care generează lungimea aleatoare a arcului.

Simularea funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc electric utilizând caracteristica dinamică a arcului bazată pe variația aleatoare a lungimii arcului a permis obținerea formelor de variație a curentului și a tensiunii pe arc prezentată în figura 2.28.

Schema pe baza căreia s-a realizat simularea este prezentată în *anexa II.8*.

Formele de undă au fost obținute utilizând aceeași valoare a indicelui de modulație,  $m = 0,2$ , acesta fiind definit în paragraful precedent, utilizând relația (2.88).



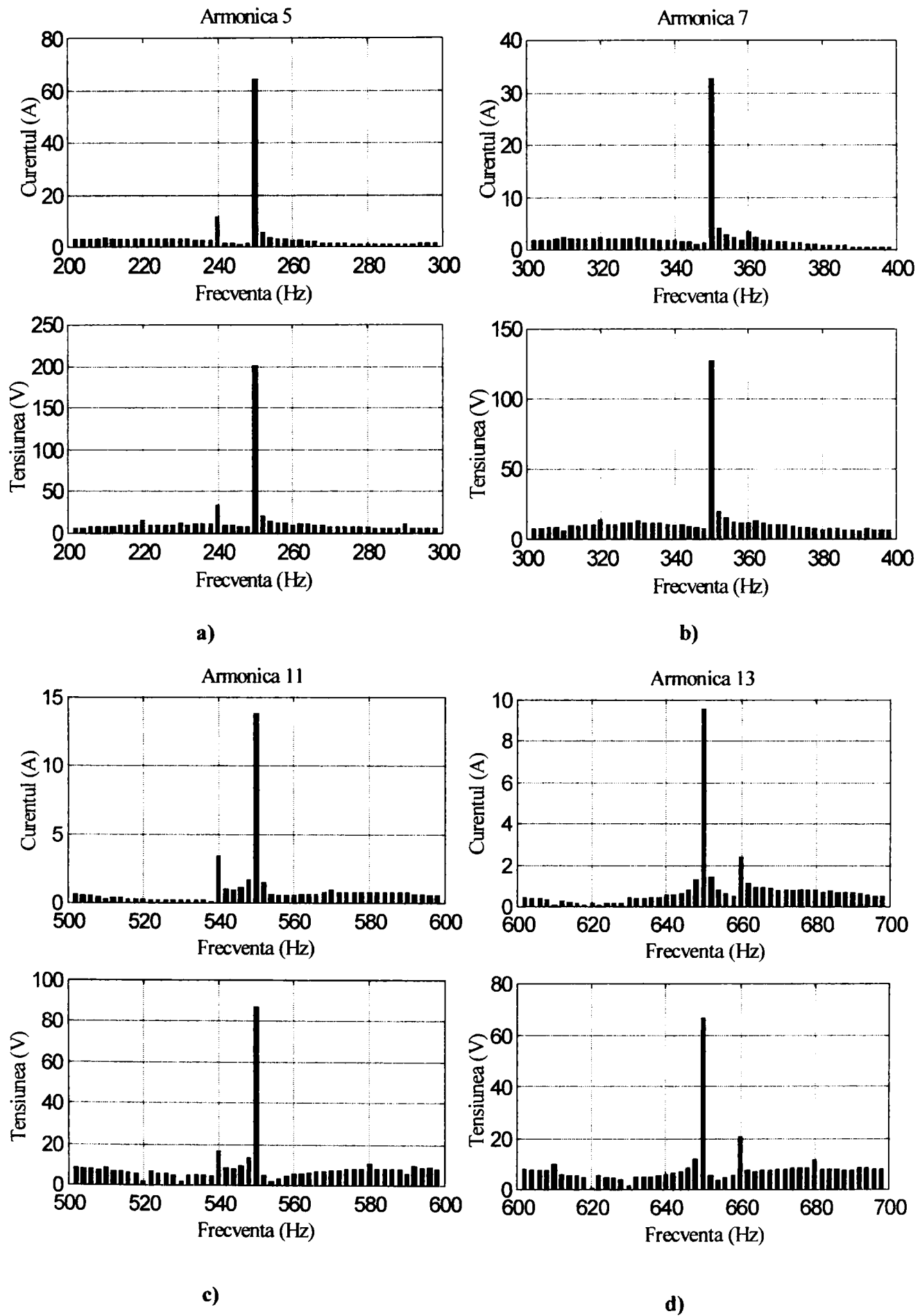


Fig. 2.25. Reprezentarea amplitudinilor armonicilor de ordin 5,7,11 și 13 și a interarmonicilor curentului și tensiunii pe linia de medie tensiune (MT) pentru  $m=0,2$ .

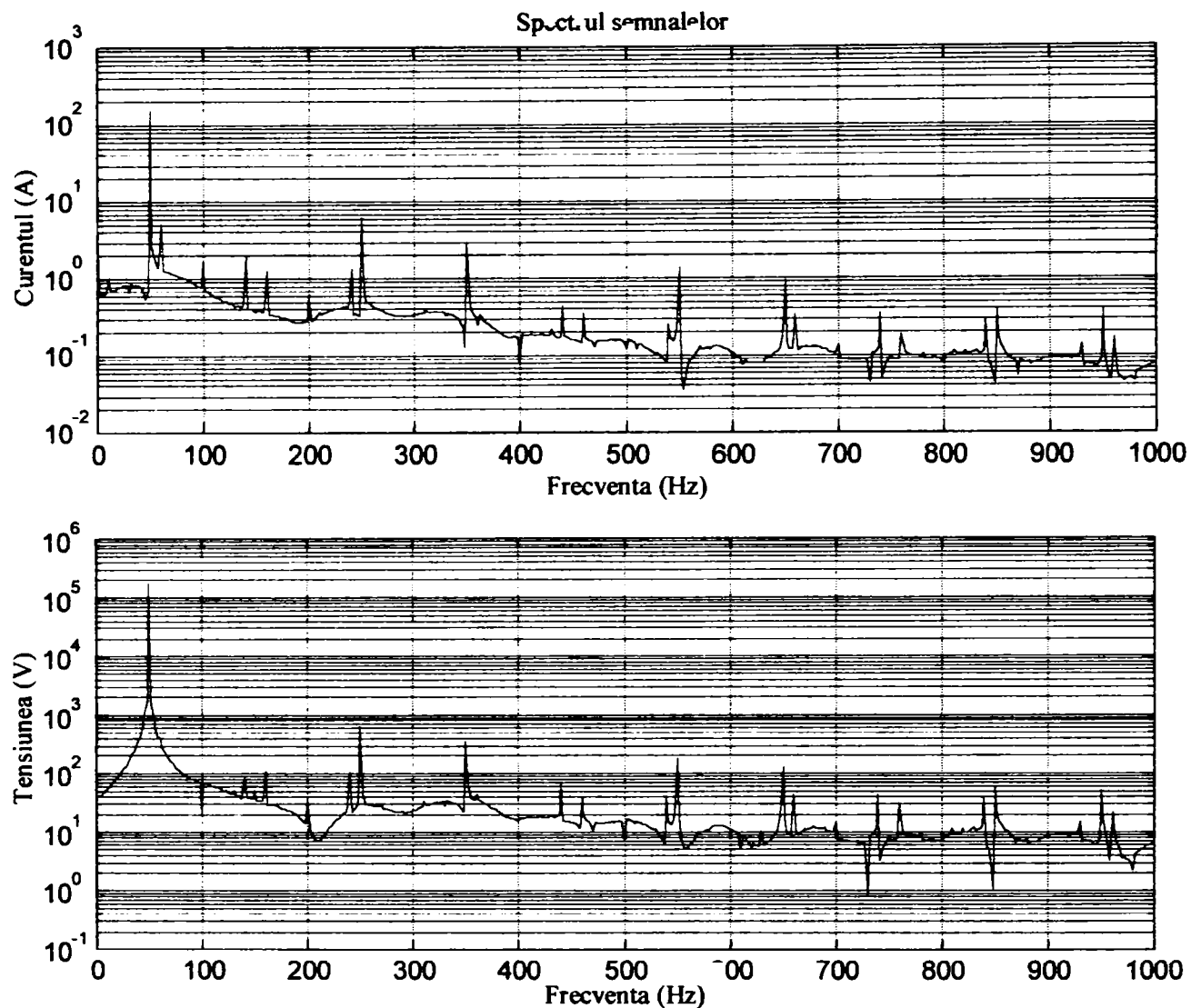


Fig. 2.26. Caracteristica spectrală a curentului și tensiunii pe linia de înaltă tensiune (IT), utilizând variația sinusoidală a lungimii arcului electric pentru  $m=0,2$ .

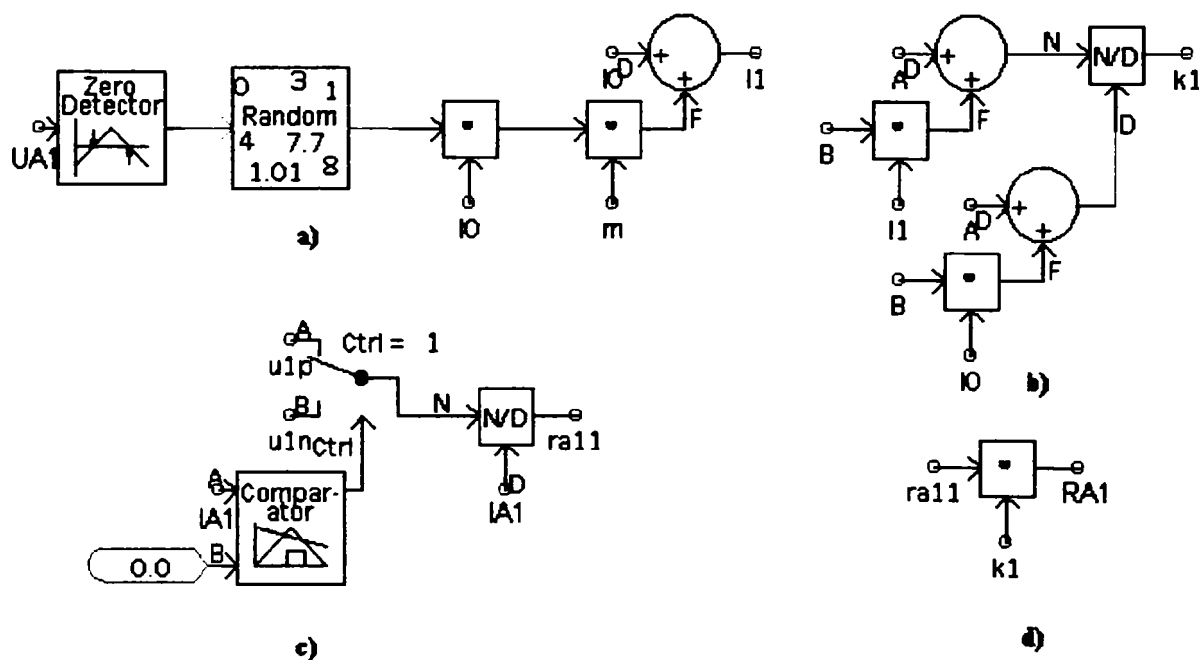


Fig. 2.27. Schema de calcul a valorii rezistenței arcului electric pe faza 1; a) calculul lungimii arcului electric; b) calculul constantei  $k$ ; c), d) calculul rezistenței arcului electric.

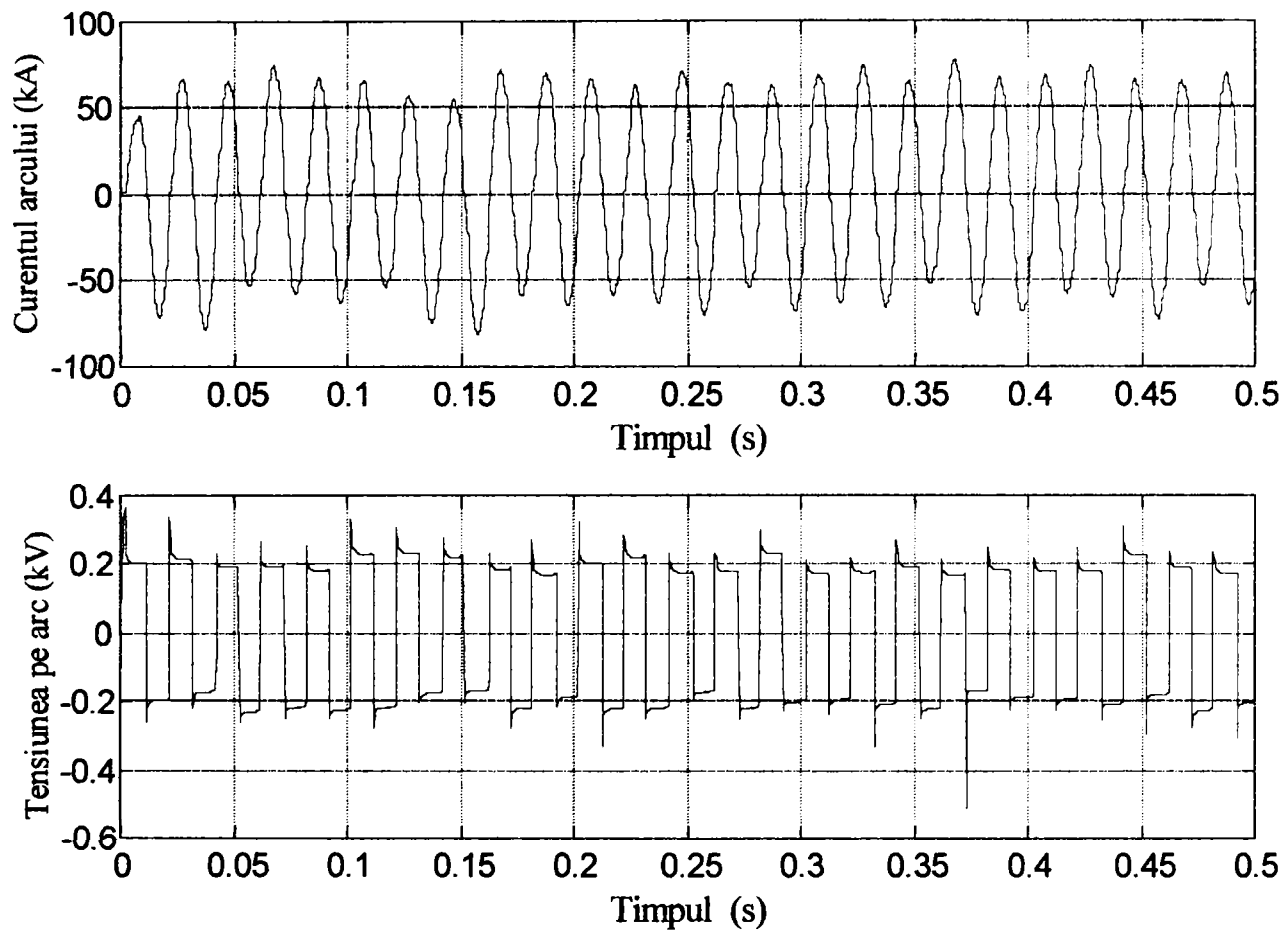


Fig. 2.28. Forma de variație a curentului și a tensiunii arcului electric pentru faza 1 utilizând caracteristica dinamică cu variație aleatoare a lungimii arcului pentru  $m=0,2$ .

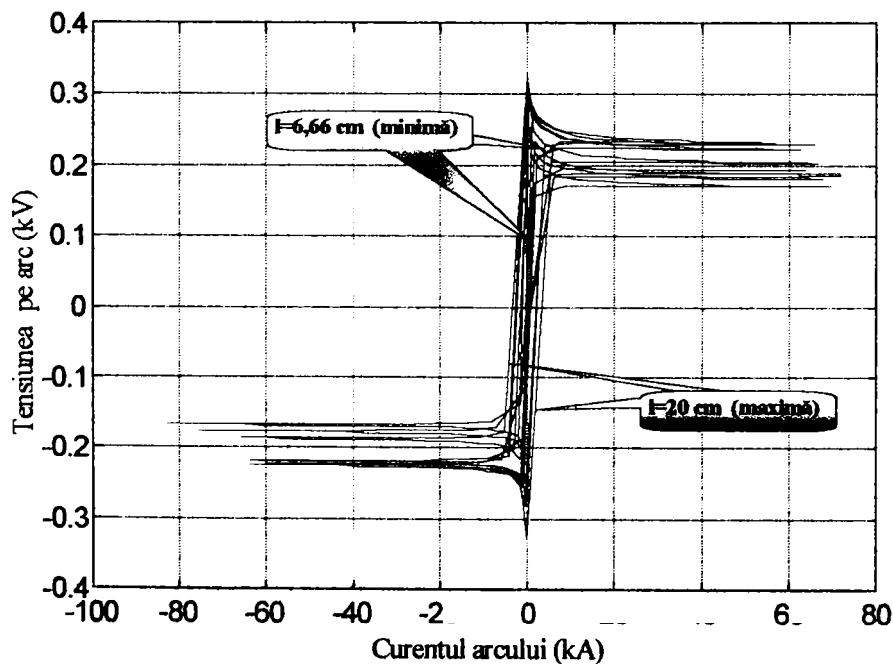


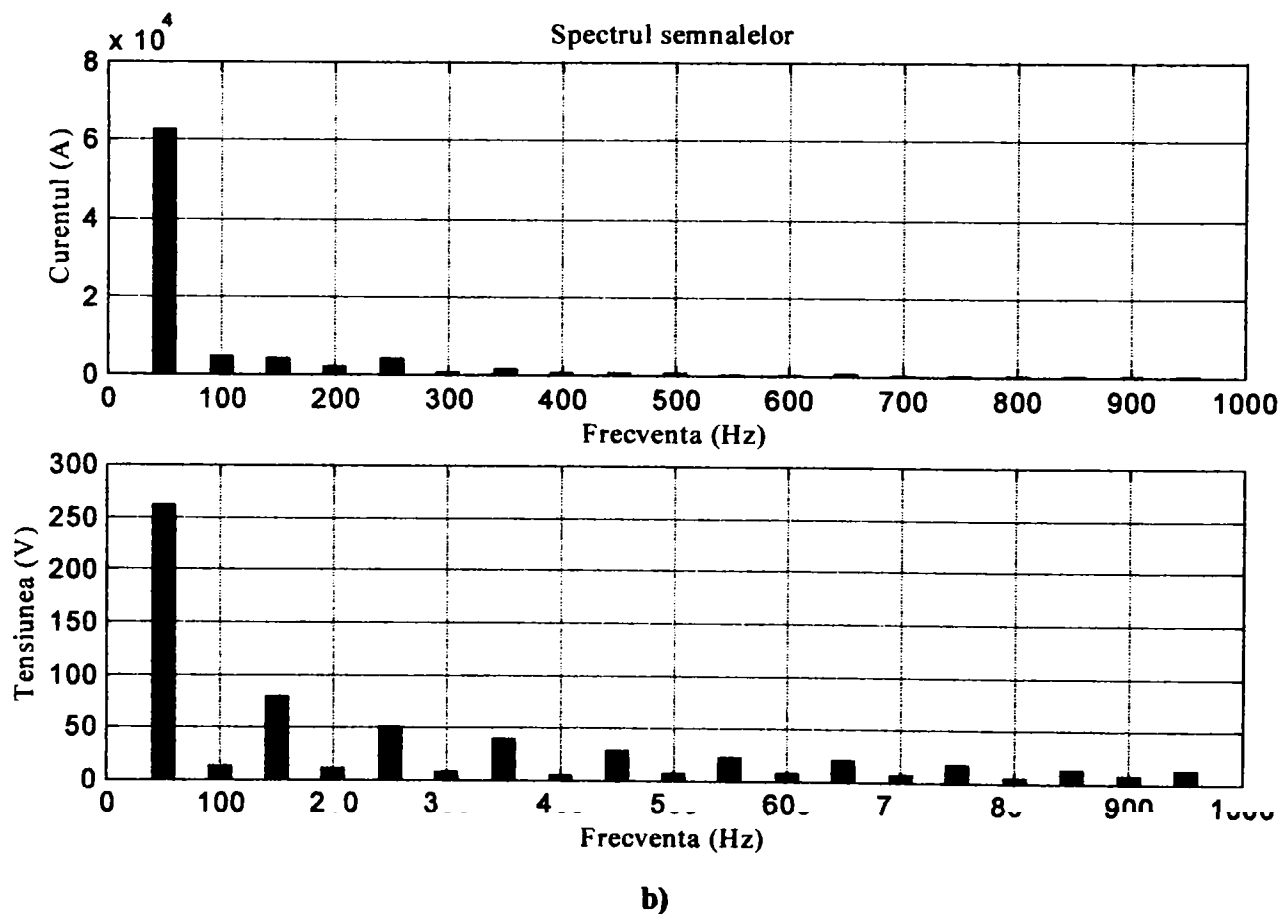
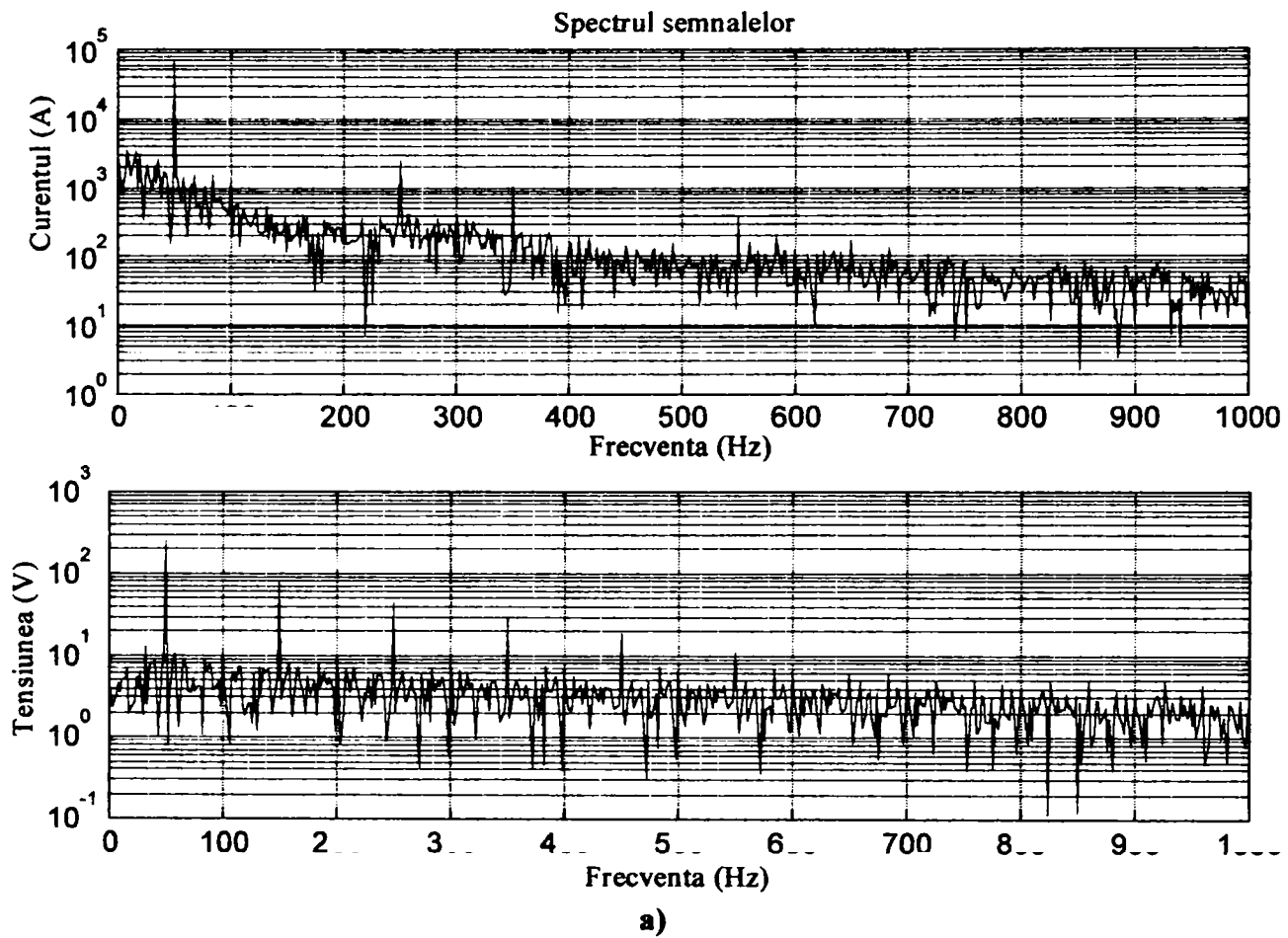
Fig. 2.29. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric pentru faza 1, obținută utilizând caracteristica dinamică cu variație aleatoare a lungimii arcului.

are valori care sunt cuprinse într-un interval care depinde de indicele de modulație, și anume este cu atât mai mare cu cât indicele de modulație este mai mare.

Se observă că tensiunea de stingere are o variație aleatoare în jurul valorii de 200 V, momentele în care valoarea curentului este maximă corespunzând celor în care valoarea amplitudinii tensiunii de stingere este minimă.

Pe baza rezultatelor obținute în urma simulării a fost reprezentată în figura 2.29 caracteristica dinamică curent-tensiune în care lungimea arcului electric are o variație aleatoare.

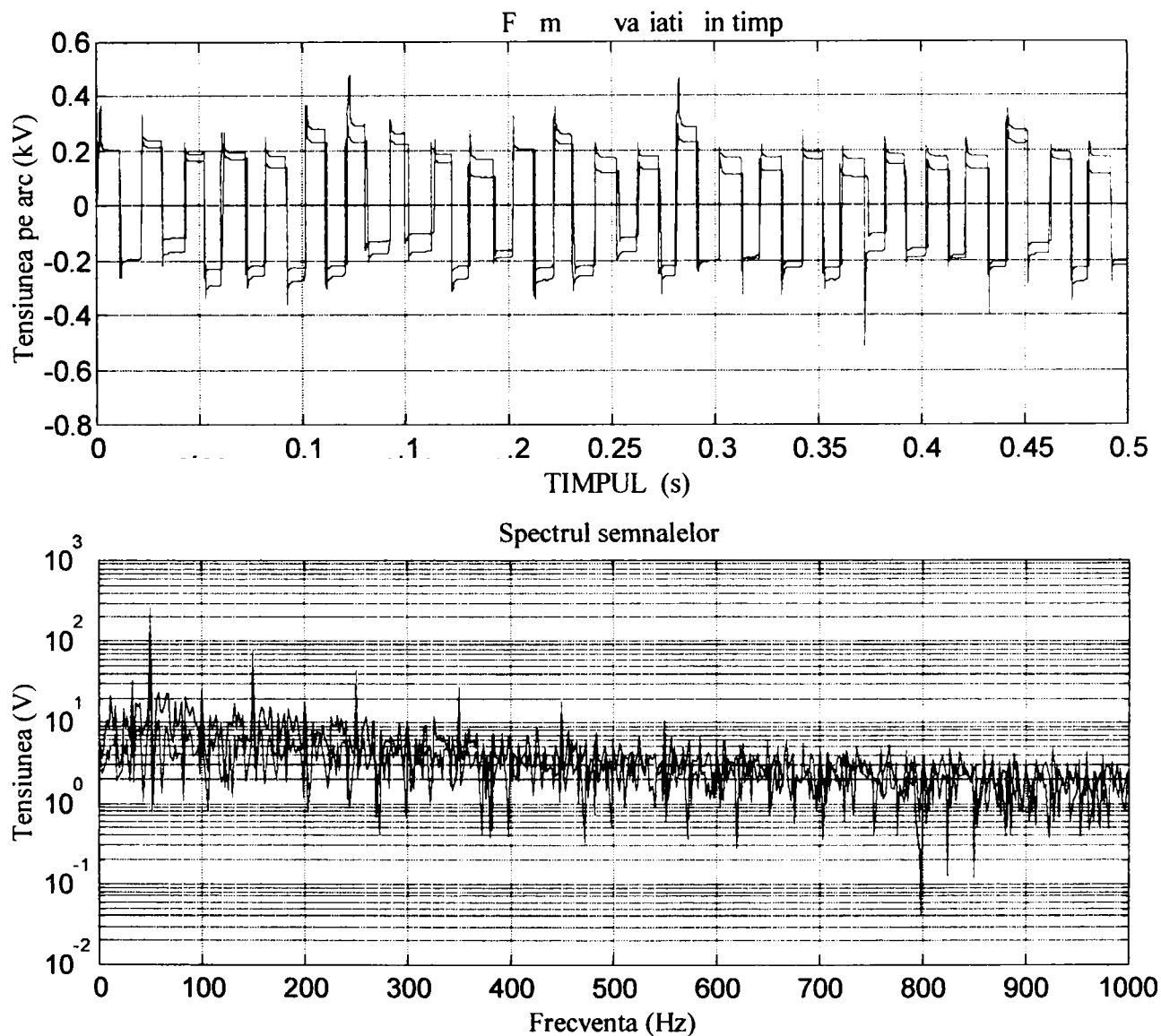
Datorită variației aleatoare a lungimii arcului, tensiunea de prag



**Fig. 2.30. a) Caracteristica spectrală a curentului și tensiunii arcului ; b) Amplitudinea armonicilor curentului și tensiunii arcului, utilizând caracteristica dinamică a arcului electric, în care lungimea arcului are o variație aleatoare, pentru  $m=0,2$ .**

În ceea ce privește caracteristica de frecvență a curentului și a tensiunii arcului prezentată în figura 2.30 se observă o reducere a amplitudinii armonicilor, atât a curentului cât și a tensiunii, precum și o anumită aplatizare, odată cu creșterea frecvenței.

**Influența valorii indicelui de modulație asupra caracteristicii spectrale** poate fi analizată pe baza figurii 2.31 în care a fost reprezentată atât forma de variație în timp a tensiunii arcului electric cât și caracteristica spectrală a tensiunii arcului pentru două valori diferite ale indicelui de modulație,  $m = 0,2$  (roșu) și  $m = 0,6$  (albastru). Se observă că odată cu creșterea valorii indicelui de modulație amplitudinea armonicilor, în special a celor de ordin superior, este mult diminuată.



**Fig. 2.31. Forma de variație a tensiunii arcului electric pentru faza 1 și spectrul de frecvență, utilizând caracteristica dinamică cu variație aleatoare a lungimii arcului.**

În figurile 2.32 și 2.33 sunt reprezentate caracteristicile spectrale ale curentului și tensiunii pe liniile de *medie* și *înaltă* tensiune.

Se constată absența armonicilor de orice ordin precum și faptul că, exceptând fundamentală, energia semnalelor este aproximativ uniform distribuită în banda de frecvență analizată. Aceasta reprezintă un dezavantaj al utilizării acestei forme de variație a lungimii arcului electric în special pe durata arderii stabile a arcului electric. Pe durata topirii, în special în faza inițială poate fi însă utilizată această formă de variație a lungimii arcului datorită caracterului puternic aleator al procesului de topire.

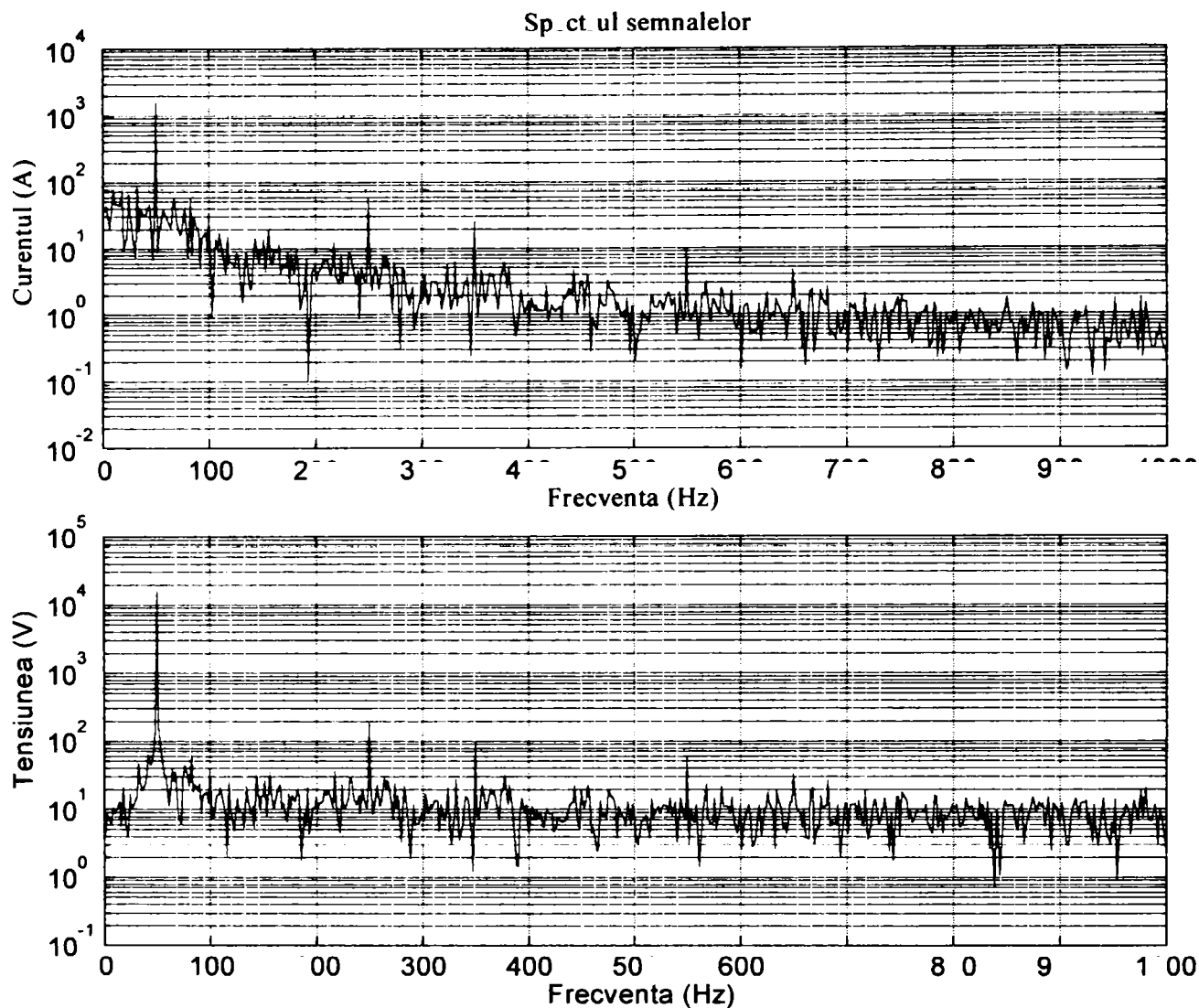


Fig. 2.32. Caracteristica spectrală a curentului și tensiunii pe linia de medie tensiune (MT), utilizând variația aleatoare a lungimii arcului electric pentru  $m=0,2$ .

Pe baza relațiilor (2.14) au fost calculate valorile coeficienților de distorsiune totali pentru undele de curent și de tensiune pe *arcul electric*, la ieșirea transformatorului cuptorului (pe linia de joasă tensiune) și pe liniile de alimentare de medie și de înaltă tensiune. Simulările au fost realizate utilizând caracteristica dinamică a arcului electric păstrând constantă lungimea arcului electric, respectiv considerând că lungimea arcului variază după o lege sinusoidală sau aleatoare cu aceeași valoare a indicelui de modulație ( $m=0,2$ ). Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 2.2.

Analizând rezultatele obținute se constată că:

- utilizând cele două forme de variație a lungimii arcului se obține o creștere a valorii coeficienților de distorsiune față de situația în care lungimea arcului este constantă;
- valorile coeficienților de distorsiune sunt aproximativ egale pentru unda de curent indiferent de linia de alimentare în situația în care se utilizează o anumită caracteristică dinamică;
- unda de tensiune este mai puternic distorsionată pe linia de joasă tensiune, distorsiunile scăzând odată cu trecerea pe un nivel superior al tensiunii de alimentare.

Utilizând valorile tensiunilor și curenților obținute în urma simulărilor s-au calculat: puterea aparentă (2.17), puterea activă (2.20), puterea reactivă (2.21), puterea deformantă (2.22) precum și factorii de putere în regim deformant (2.24),(2.25),(2.26), rezultatele obținute fiind prezentate în tabelul 2.2.



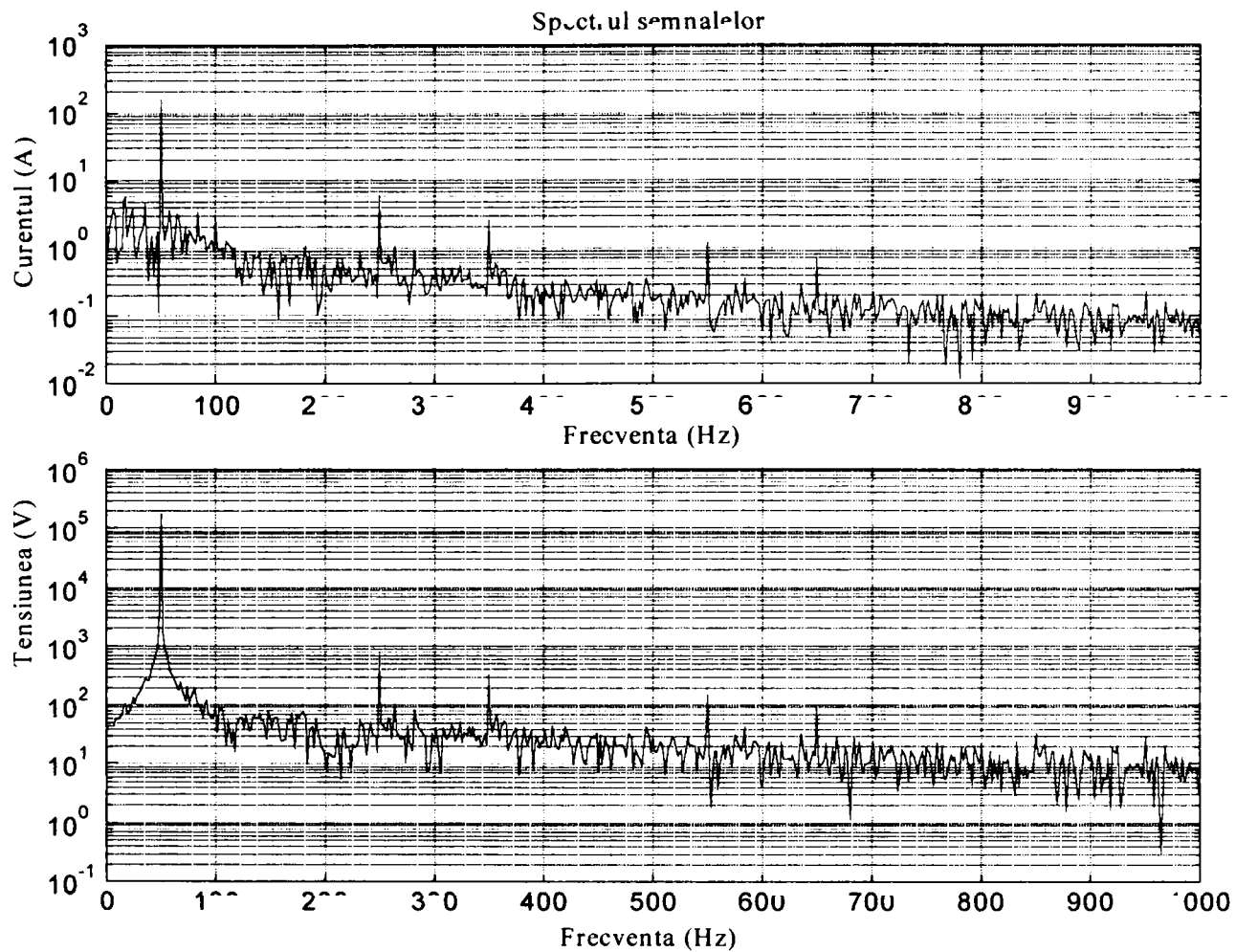


Fig. 2.33. Caracteristica spectrală a curentului și tensiunii pe linia de înaltă tensiune (ÎT), utilizând variația aleatoare a lungimii arcului electric pentru  $m=0,2$ .

Tabelul 2.2.

Puterile, factorii de putere și coeficienții de distorsiune totali în regim nesinusoidal utilizând modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc.

	Simulare utilizând lungimea arcului constantă				Simulare utilizând variația sinusoidală a lungimii arcului $m=0,2$				Simulare utilizând variația aleatoare a lungimii arcului $m=0,2$			
	Arc	JT	MT	ÎT	Arc	JT	MT	ÎT	Arc	JT	MT	ÎT
$S$ (MVA)	28,63	37,17	38,21	40,09	28,74	37,03	37,79	39,59	29,13	37,67	38,68	40,03
$P$ (MW)	25,34	27,25	27,40	27,65	25,18	27,20	27,20	27,42	25,65	27,46	27,55	27,72
$Q$ (MVAR)	2,80	22,90	26,39	28,83	3,27	22,76	25,95	28,33	3,33	23,36	26,64	28,44
$D$ (MVAD)	13,01	10,51	3,65	3,39	13,45	10,63	3,84	3,55	13,40	10,95	5,26	5,03
$K_p$	0,88	0,73	0,72	0,68	0,87	0,73	0,71	0,69	0,88	0,73	0,71	0,69
$\delta$	0,11	0,84	0,96	1,04	0,13	0,83	0,95	1,03	0,13	0,85	0,97	1,03
$\sigma$	0,51	0,29	0,10	0,09	0,52	0,29	0,10	0,09	0,51	0,30	0,14	0,12
Thdi (%)	5,45	5,42	5,12	5,32	5,83	5,74	5,48	5,62	8,53	5,44	7,32	7,12
Thdu (%)	42,82	27,47	1,93	0,42	49,87	27,65	2,13	0,46	47,84	26,73	2,43	0,59

În urma analizei acestora se constată că:

- Puterea activă obținută pe cele trei linii de alimentare are aproximativ aceleași valori indiferent de modelarea utilizată, valoarea cea mai mare fiind atinsă pe linia de înaltă tensiune și cea mai mică pe linia de joasă tensiune;
- Cea mai mică valoare a puterii reactive se obține pe arcul electric, rezultând că modelul permite obținerea unui caracter puternic rezistiv arcului electric. Pe liniile de medie și de înaltă tensiune se obțin pentru puterea reactivă valori mult mai mari, fapt care arată necesitatea utilizării unui sistem de compensare a puterii reactive;
- Efectul deformant se manifestă cel mai puternic pe linia de joasă tensiune. În cazul utilizării variației aleatoare a lungimii arcului electric puterea deformantă are cele mai mari valori pe toate liniile de alimentare, fapt care se reflectă în valorile mari pe care le are factorul deformant.

Pe baza concluziilor prezentate în acest paragraf, rezultate în urma analizei efectuate prin simularea funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc electric rezultă faptul că ***acest model este bun datorită posibilității reproducerii situației reale atât din punct de vedere al formelor de undă, al formei caracteristicii curent – tensiune și al caracteristicii de frecvență dar și din cel al puterilor disipate pe liniile de alimentare.***

### **2.3.3. Reglarea puterii arcului electric utilizând modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc**

Una din cerințele importante pe care trebuie să o îndeplinească un model o constituie posibilitatea reglării mărimii de interes prin modificarea unui sau mai multor parametrii [70],[89].

În cazul modelării arcului electric, modelul trebuie ca, pe lângă îndeplinirea altor cerințe privitoare la caracteristica curent-tensiune, formele de undă și spectrul de armonici ale curenților și tensiunilor, să ofere și posibilitatea ***reglării puterii arcului electric.***

În cazul modelului bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc, analizând relațiile (2.73), (2.78) și (2.79) se constată că pentru valori mari ale tensiunii de stingere se obțin valori mici ale curentului arcului și reciproc. Aceasta sugerează faptul că există o valoare intermediară a tensiunii de stingere pentru care puterea arcului electric este maximă. Este evident că ***această formă de variație a puterii arcului electric este asemănătoare indiferent de valoarea tensiunii de alimentare din secundarul transformatorului cuptorului.*** Valoarea tensiunii din secundarul transformatorului cuptorului influențează valoarea maximă a puterii arcului electric.

Pentru a demonstra prin simulare aceasta, s-au calculat puterile în regim deformant obținute în urma simulării funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc electric considerând că tensiunea de stingere variază în domeniul  $U_{st} \in (0V - 300V)$ , treptele de modificare a tensiunii de stingere fiind de  $10V$ , pentru valori ale tensiunii din secundarul transformatorului cuptorului din domeniul  $U_{linie} \in (470V - 610V)$ , treptele de modificare fiind, de asemenea, de  $10V$ . Simulările au fost realizate utilizând schema din ***anexa II.6***, în care lungimea arcului electric este constantă. Pe baza rezultatelor simulării s-au obținut formele de variație a puterilor în regim deformant prezentate în figura 2.34.

Analizând rezultatele obținute se constată următoarele:

- Valoarea maximă a puterii active a arcului electric variază liniar cu tensiunea din secundarul transformatorului cuptorului;
- Pentru valori mici ale tensiunii din secundarul transformatorului cuptorului, la valori mari ale tensiunii de stingere a arcului electric se constată că acesta nu se mai amorsează, puterile în regim deformant fiind nule;

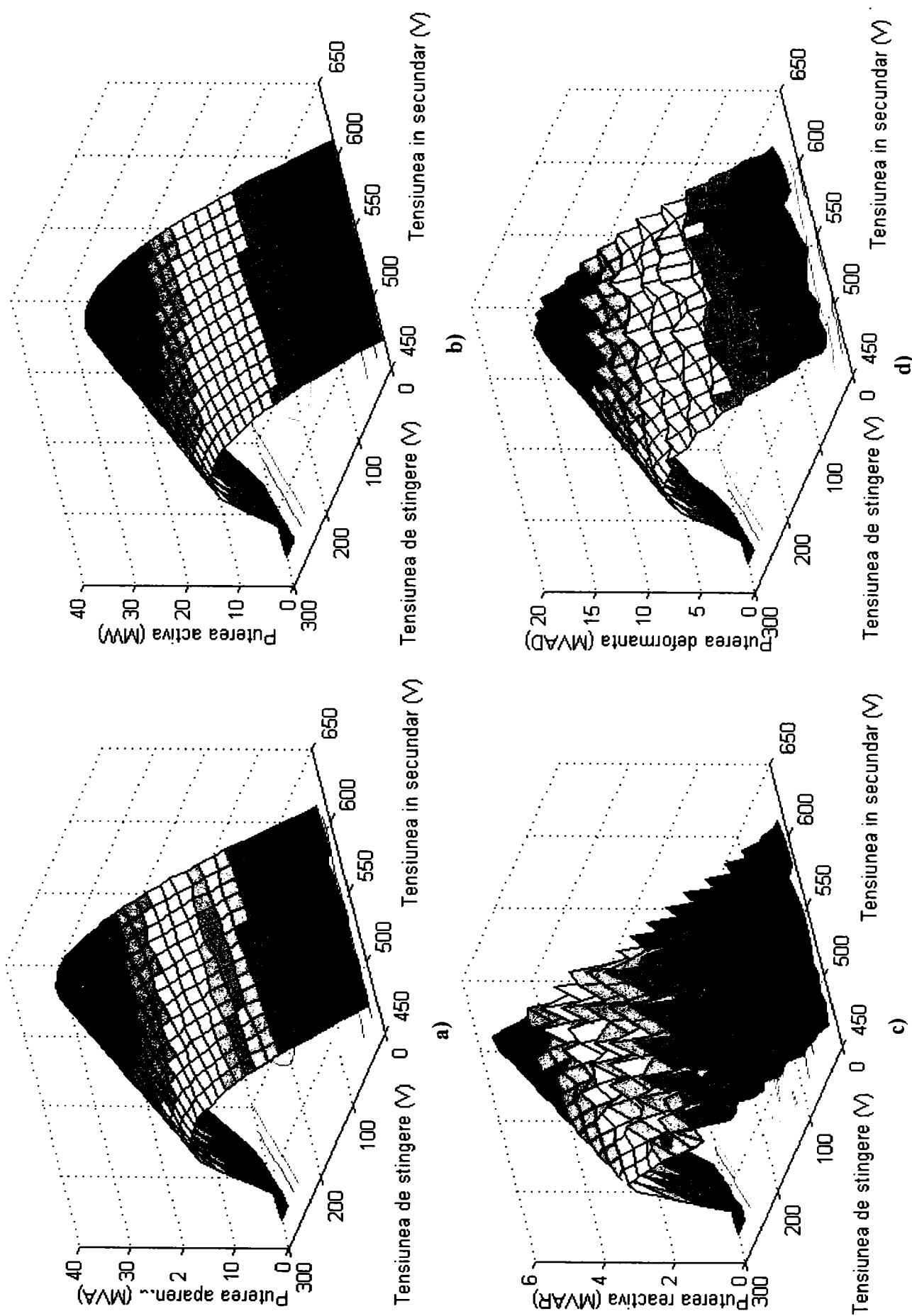


Fig. 2.34 Variația puterilor aparentă, activă, reactivă și deformantă pe arc electric în funcție de tensiunea de stingere  $U_{st}$  și de tensiunea din secundarul transformatorului  $U_{linie}$ : a) Puterea aparentă  $S=f(U_{st}, U_{linie})$ ; b) Puterea activă  $P=f(U_{st}, U_{linie})$ ; c) Puterea reactivă  $Q=f(U_{st}, U_{linie})$ ; d) Puterea deformantă  $D=f(U_{st}, U_{linie})$ ;

- Datorită erorilor care intervin în determinarea puterii reactive și deformante a arcului electric suprafața obținută, prezentată în figura 2.34.c) și d) este mai neregulată însă forma de variație păstrează alura celei de la puterile aparente și active prezentată în figura 2.34.a) și b);

- Deoarece rezultatele prezentate au fost obținute pentru situația în care primarul transformatorului cuptorului a fost în conexiune  $Y$  (vezi *anexa II.6*), se poate mări domeniul de variație al puterii active a arcului electric prin conectarea primarului în conexiune  $\Delta$ .

Modul de variație al puterilor în regim deformant, pentru valoarea tensiunii din secundarul transformatorului cuptorului pentru care s-a obținut puterea disipată pe arcul electric  $P=25,4 MW$  la tensiunea de stingere  $U_{sr}=200 V$  este reprezentat în figura 2.35.a), iar pentru valoarea maximă a tensiunii secundarului transformatorului pentru care s-a făcut reprezentarea din figura 2.34,  $U_{linie}=610 V$ , în figura 2.35.b).

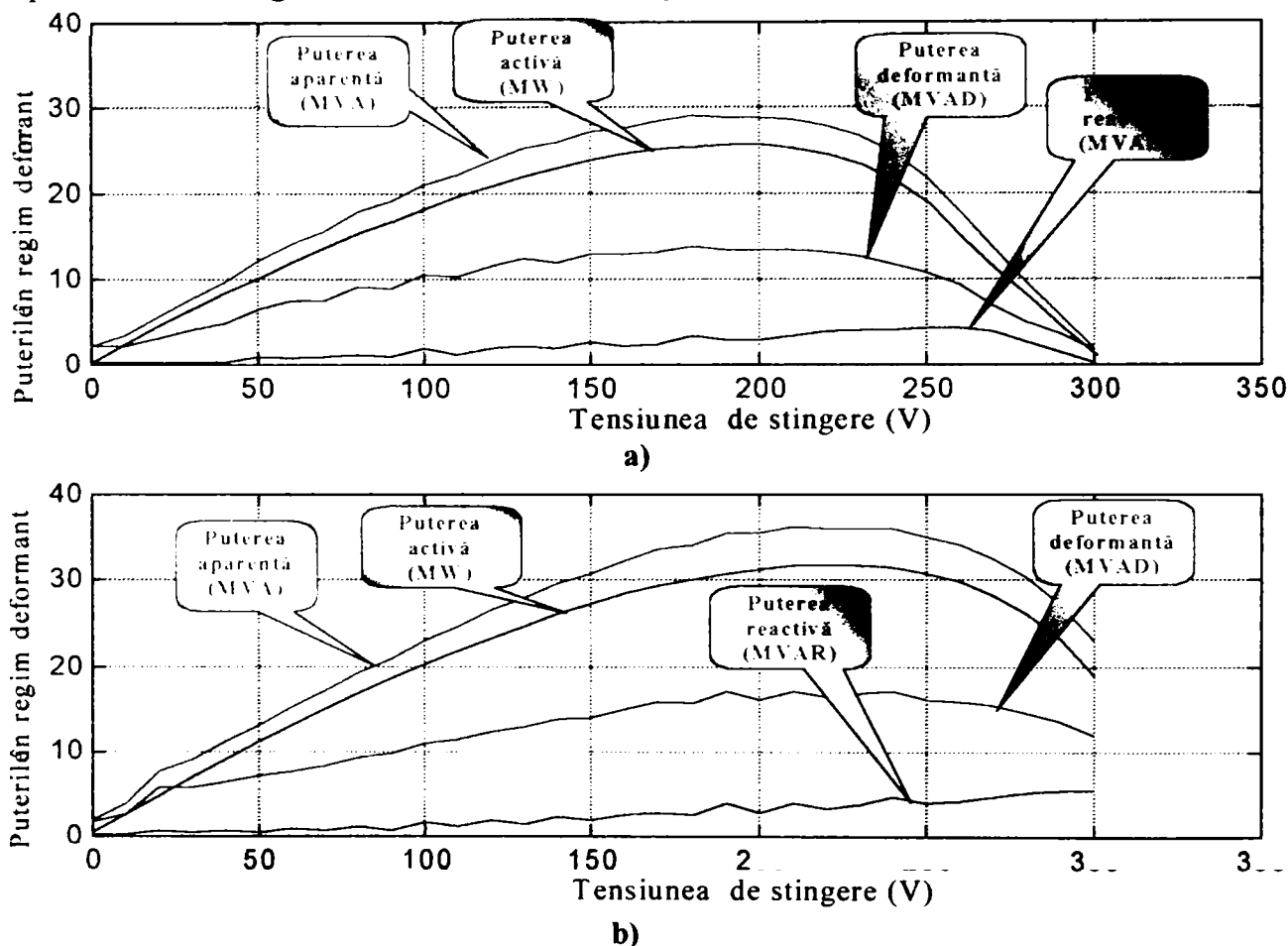


Fig. 2.35. Variația puterilor în regim deformant în funcție de valoarea tensiunii de stingere, dependentă de lungimea arcului electric: a)  $U_{linie}=520 V$ ; b)  $U_{linie}=610 V$ .

### 2.3.4. Modelarea funcționării cuptorului cu arc electric ca sarcină trifazată neechilibrată

În analiza făcută anterior în ceea ce privește modelarea funcționării cuptorului cu arc electric din punct de vedere al armonicilor generate în timpul funcționării precum și al puterilor în regim deformant s-a presupus faptul că acesta este un consumator echilibrat. Această ipoteză nu este îndeplinită în practică, constatându-se că datorită faptului că impedanța rețelei scurte pe cele trei faze nu este aceeași, precum și datorită faptului că lungimile arcului electric pe cele trei faze nu sunt întotdeauna egale curenții arcurilor electrice ale celor trei faze nu sunt egali fapt care face ca sarcina trifazată reprezentată de cuptorul cu arc electric să fie un consumator neechilibrat.

Din acest motiv, în acest paragraf autorul și-a pus problema **posibilității reproducerii prin simulare a regimului neechilibrat în faza de reducere**. Autorul a considerat că, presupunând transformatorul cuptorului ca un element simetric pe cele trei faze, cauza apariției regimului dezechilibrat o constituie inegalitatea celor trei impedanțe ale liniei de alimentare de joasă tensiune precum și a rezistenței arcului electric pe cele trei faze. În urma simulărilor s-a constatat că mărimile care pot influența apariția regimului dezechilibrat sunt:

- Influența alegerii valorilor inegale pe cele trei faze a parametrilor care determină valoarea rezistenței arcului electric (  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $D_a$  și  $D_b$  ) este relativ mică în dezechilibrul introdus pe cele trei faze;
- Inegalitatea valorilor inductivităților totale a fiecărei faze a rețelei de alimentare de joasă tensiune are influență asupra producerii regimului dezechilibrat;
- **Influența inegalității valorilor rezistenței totale a conductoarelor liniei de alimentare de joasă tensiune asupra dezechilibrului introdus pe cele trei faze este mare**, având în vedere că deși în practică cele trei conductoare care alimentează cei trei electrozi au rezistențele proprii de valori egale, rezistențele de cuplaj au o mare influență asupra valorilor rezistențelor totale, așa cum se va demonstra în capitolul următor;
- **Inegalitatea valorilor lungimilor arcului pe cele trei faze, reflectată în inegalitatea tensiunilor de stingere ale arcurilor electrice pe cele trei faze** are cea mai mare influență în procesul de simulare al dezechilibrului.

Pe baza acestor observații rezultă că simularea funcționării cuptorului cu arc electric ca sarcină dezechilibrată se poate face prin:

- alegerea valorilor diferite ale impedanțelor totale a fiecărei faze a rețelei de alimentare de joasă tensiune;
- alegerea valorilor diferite pentru tensiunea de stingere pe fiecare fază a arcului electric, fapt care corespunde în realitate lungimii diferite a arcurilor electrice pe cele trei faze.

## 2.4. Concluzii

În acest capitol autorul a studiat funcționarea instalației electrice a cuptorului cu arc electric utilizând patru modele ale arcului electric, modele prezentate din punct de vedere al relațiilor de implementare în capitolul precedent. În vederea comparării rezultatelor obținute simulările au fost realizate utilizând aceeași instalație electrică a cuptorului cu arc.

Studiul s-a axat pe analiza caracteristicilor de frecvență a curbelor de curent și de tensiune pe fiecare dintre liniile de alimentare de joasă, medie și înaltă tensiune, caracteristici obținute pe baza datelor rezultate în urma simulărilor utilizând **programul PSCAD-EMTDC**. În urma determinării armonicilor din componența undelor de curent și de tensiune s-au calculat coeficienții de distorsiune totală și ponderată precum și puterile în regim nesinusoidal și factorii de putere pentru fiecare linie de alimentare.

Pe baza rezultatelor obținute în acest capitol autorul a ajuns la următoarele **concluzii**:

- **Modelul bazat pe variația rezistenței arcului electric** prezintă ca **avantaje simplitatea în implementare și caracterul puternic rezistiv al arcului electric** însă are ca **dezavantaj lipsa din caracteristica de frecvență a armonicilor de ordin superior fundamentalei**, fapt care nu corespunde cu realitatea.

- **Modelul bazat pe variația amplitudinii tensiunii arcului electric** prezintă față de modelul precedent un **dezavantaj** care constă în faptul că **arcul electric nu mai are caracter rezistiv**.

- **Modelul bazat pe liniarizarea caracteristicii curent-tensiune a arcului electric** se caracterizează prin:



- posibilitatea obținerii *formelor de undă a tensiunii și curentului arcului electric* prezentate în figura 2.3;
- posibilitatea obținerii unei *caracteristici curent – tensiune* care reproduce forma din figura 2.4;
- prezența în spectrul curentului a *armonicilor de ordin 5,7,11 și 13*, respectiv *absența armonicilor cu ordinul multiplu de 3*;
- posibilitatea *reglării puterii arcului electric* prin modificarea parametrilor  $R_1$  și  $R_2$ .

• **Modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc** prezintă ca **avantaje**:

- posibilitatea obținerii *formelor curbilor tensiunii și curentului arcului electric* prezentate în figura 2.3;
- posibilitatea obținerii unei *caracteristici curent – tensiune* care reproduce forma din figura 2.4;
- din punct de vedere al *caracteristicii de frecvență* se constată că în timp ce caracteristica de frecvență a *curentului nu conține armonici cu ordinul multiplu de 3* ( datorită conexiunii  $\Delta$  a secundarului transformatorului cuptorului și faptului că rețeaua scurtă nu are conductor de nul), unda de tensiune conține aceste armonici pe linia de joasă tensiune și pe cea de medie tensiune (dar mai atenuate), iar pe cea de înaltă tensiune acestea sunt rejectate;
- în cazul modulării sinusoidale a lungimii arcului electric, în spectrele undelor de curent și de tensiune apar componente a căror frecvență diferă de a armonicilor cu multiplii frecvenței modulatorie;
- posibilitatea obținerii caracterului redresant al arcului electric prin alegerea diferită a constantelor  $C_a$  respectiv  $C_b$ ;
- permite modificarea puterii active arcului electric prin modificarea valorii tensiunii de stingere;

• **Modelul bazat pe utilizarea unui generator de armonici pentru obținerea tensiunii arcului electric** este utilizabil dacă se cunosc amplitudinile și fazele fundamentale și a armonicilor, fapt care presupune existența unor măsurători anterioare. Modelul prezintă **dezavantajul că este o reprezentare liniară a unui fenomen neliniar**.

Pe baza acestor concluzii autorul a ales ca, pe întreg parcursul lucrării simulările să se realizeze utilizând **modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc**, considerând că acesta este cel mai performant model dintre cele analizate în acest capitol.

**Contribuțiile autorului** în acest capitol sunt:

- sistematizarea mărimilor care caracterizează funcționarea cuptorului cu arc electric în regim deformant și dezechilibrat;
- identificarea în literatura de specialitate a 5 modele ale arcului electric;
- implementarea a 4 dintre modelele identificate ale arcului electric utilizând programul **PSCAD-EMTDC**, obținând 8 scheme de implementare;
- alegerea unor criterii de performanță a utilizării modelelor arcului electric în simularea funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc electric;
- realizarea unui studiu comparativ a modelelor prezentate, utilizând rezultatele simulărilor, în urma căruia a fost determinat cel mai performant model pe baza criteriilor de performanță alese;
- demonstrarea prin simulare a posibilității reglării puterii active a arcului electric prin modificarea valorii tensiunii de stingere;



### 3. MĂSURAREA UNOR MĂRIMI ELECTRICE ÎN INSTALAȚIILE CUPTORULUI TRIFAZAT CU ARC ELECTRIC

În acest capitol este prezentat sistemul de măsurare a indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice la cuptorul electric cu arc, sistem conceput și realizat de către autor, precum și rezultatele obținute în urma măsurătorilor efectuate la *Oțelăria OE2 a Combinatului Siderurgic Hunedoara* la instalația electrică a cuptorului electric de *100 tone*. De asemenea sunt prezentate rezultatele măsurătorilor parametrilor instalației electrice, rezultate utile în proiectarea instalației de compensare a puterii reactive, filtrare a armonicelor și echilibrare a sarcinii consumatorului trifazat.

#### 3.1. Schemele de măsurare a mărimilor electrice la cuptorul cu arc electric

##### 3.1.1. Schema de măsurare a mărimilor electrice pe linia de joasă tensiune

În capitolul 1 a fost prezentată în figura 1.4 schema instalației electrice a cuptorului electric cu arc de *100 tone* de la *Oțelăria OE2 a Combinatului Siderurgic Hunedoara*. Măsurarea curenților și tensiunilor se face prin utilizarea transformatoarelor de curent și de tensiune a căror secundare sunt conectate la un sistem de măsură care în momentul actual este de tip analogic. Deoarece metodele moderne de măsurare a mărimilor electrice utilizează tot mai mult sistemele numerice bazate pe utilizarea sistemelor de achiziție de date, metoda de măsurare propusă de autor utilizează un astfel de sistem.

În prezent măsurarea curentului pe fiecare fază a liniei de joasă tensiune se face prin conectarea în cascadă a unui transformator de curent de tip *CITO 70000 A / 70 A*, [112], care are montat în secundar un transformator de curent *TC 70 A / 5 A*. Conectarea în cascadă a celor două transformatoare de curent conduce la creșterea erorilor de măsurare a curenților de pe linia de alimentare de joasă tensiune. Datorită acestui fapt schema de măsurare *propusă de autor*, prezentată în figura 3.1, înlocuiește transformatoarele de curent *TC 70 A / 5 A* cu un bloc de adaptare a curenților de valori mari la un domeniu de tensiuni compatibil cu unul dintre domeniile sistemului de achiziție de date utilizat.

De asemenea, măsurarea tensiunilor arcului electric se face prin conectarea secundarului transformatoarelor de pe linia de joasă tensiune *CITO 660 V / 110 V*, [114], la blocul de adaptare a tensiunilor la un domeniu de tensiuni compatibil cu unul dintre domeniile sistemului de achiziție de date utilizat.

Rolul blocului de adaptare este prin urmare atât de a realiza compatibilitatea mărimilor de măsurat cu domeniul de măsură al sistemului de achiziție de date cât și de a realiza izolarea galvanică între circuitul de forță și sistemul de achiziție de date, în condițiile în care erorile introduse sunt mai mici decât cele existente în prezent.

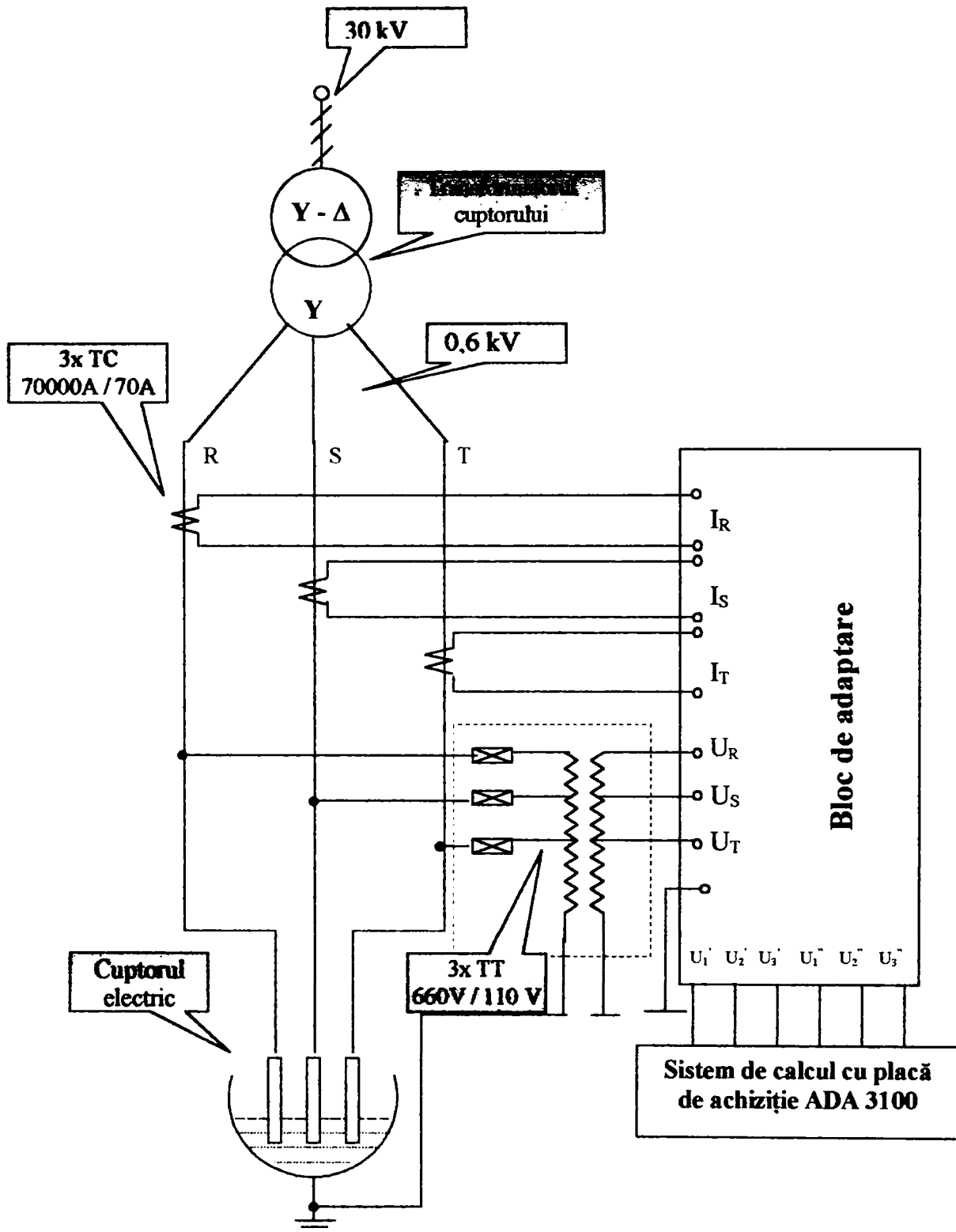


Fig. 3.1. Schema de măsurare a curenților și tensiunilor pe linia de joasă tensiune.

Cele *6 semnale* obținute la ieșirea blocului de adaptare a curenților și tensiunilor (3 proporționale cu curenții de fază și 3 proporționale cu tensiunile de fază de pe linia de alimentare de joasă tensiune) sunt achiziționate utilizând o placă de achiziție de date de tip *ADA 3100* conectată la un calculator.

Tensiunile  $U'_1, U'_2, U'_3$  sunt proporționale cu curenții de pe cele trei faze de pe linia de alimentare de joasă tensiune, constantele de proporționalitate depinzând de constanta transformatorului de curent ( $1/1000$ ) și de caracteristicile blocului de adaptare a curenților și tensiunilor de valori mari.

De asemenea, tensiunile  $U''_1, U''_2, U''_3$  sunt proporționale cu tensiunile de fază de pe linia de alimentare de joasă tensiune, constantele de proporționalitate depinzând de constanta transformatorului de tensiune ( $1/6$ ) și de amplificarea unui canal de măsurare a tensiunii a blocului de adaptare.

### 3.1.2. Măsurarea mărimilor electrice pe linia de medie tensiune

În vederea măsurării curenților și tensiunilor pe linia de alimentare de medie tensiune s-au folosit trei transformatoare de curent de tip *CITO 1500A / 5A*, [113], ( figura 1.3 ) și un transformator de tensiune trifazat *CITO 30000V / 1000V*, [115].

Secundarele transformatoarelor sunt conectate direct la blocul de adaptare al curenților și tensiunilor mari, fapt care face ca erorile de măsurare să depindă în principal de erorile introduse de transformatoare, erorile introduse de blocul de adaptare fiind, așa cum va fi prezentat ulterior mult mai mici.

## 3.2. Blocul de adaptare al curenților și tensiunilor de valori mari

### 3.2.1. Caracteristici generale ale blocului de adaptare

Așa cum s-a prezentat anterior, conectarea transformatoarelor de curent și de tensiune la sistemul de achiziție de date se face prin intermediul blocului de adaptare a curenților și tensiunilor de valori mari, a cărui structură este prezentată în figura 3.2.

Utilizarea eficientă a blocului de adaptare a curenților și tensiunilor mari necesită îndeplinirea de către acesta a următoarelor cerințe [4],[54] :

- În vederea achiziționării semnalelor provenite atât de la traductoarele din circuitul de medie cât și de joasă tensiune este necesară realizarea ***compatibilității acestora cu nivelele de tensiune acceptate de sistemul de achiziție de date.***

Datorită faptului că nivelele de tensiune acceptabile de către sistemul de achiziție de date utilizat (*placa de achiziție ADA 3100*) sunt de maxim  $\pm 10$  V rezultă că este necesar ca, pentru valoarea maximă a mărimii care se dorește a fi măsurată să se obțină o valoare de maxim 10 V la ieșirea blocului de adaptare.

- O altă cerință pe care trebuie să o îndeplinească blocul de adaptare o constituie ***realizarea izolării galvanice între instalația electrică a cuptorului cu arc electric și sistemul de achiziție de date,*** în vederea protecției acestuia din urmă.

- ***Erorile introduse de blocul de adaptare al curenților și tensiunilor mari trebuie să fie neglijabile*** în comparație cu erorile introduse de celelalte componente ale sistemului de măsură.

Blocul de adaptare proiectat și realizat de către autor permite achiziționarea simultană a trei tensiuni și trei curenți, structura blocului de adaptare având în componență următoarele elemente:

- divizorul rezistiv, *DR*, cu rolul de a diviza corespunzător tensiunea de la intrare. Domeniile de măsură a tensiunilor alese pentru blocul de adaptare sunt: *1000 V, 500V, 250V, 120V, 50V și 10V;*

- amplificatorul de izolare, *AI*, este utilizat în vederea realizării unei izolări galvanice între circuitul de înaltă tensiune și sistemul de achiziție de date;

- amplificatorul de curent alternativ, *ACA*, are rolul de a prelua și amplifica semnalele de la ieșirea amplificatorului de izolare având o rezistență de intrare mare și rezistența de ieșire mică. De asemenea are rolul de a rejecta oscilațiile din componența tensiunii de la ieșirea amplificatorului de izolare, jucând rolul unui filtru trece jos;
- traductorul de curent, *TC*, este utilizat în scopul obținerii unui curent proporțional cu curentul de măsurat, asigurând însă și o izolare galvanică între circuitul de forță și sistemul de achiziție de date;
- deoarece sistemul de achiziție de date poate achiziționa doar tensiuni în domenii standardizate, curentul de la ieșirea traductorului de curent este convertit într-o tensiune cu ajutorul convertorului curent-tensiune, *CCT*;
- blocul de alimentare, *BA*, are rolul obținerii tensiunilor de alimentare necesare funcționării blocurilor schemei. De asemenea, deoarece amplificatoarele de izolare sunt alimentate separat în secțiunea de intrare și de ieșire, blocul de alimentare trebuie să asigure și izolarea galvanică între cele două surse de tensiune.

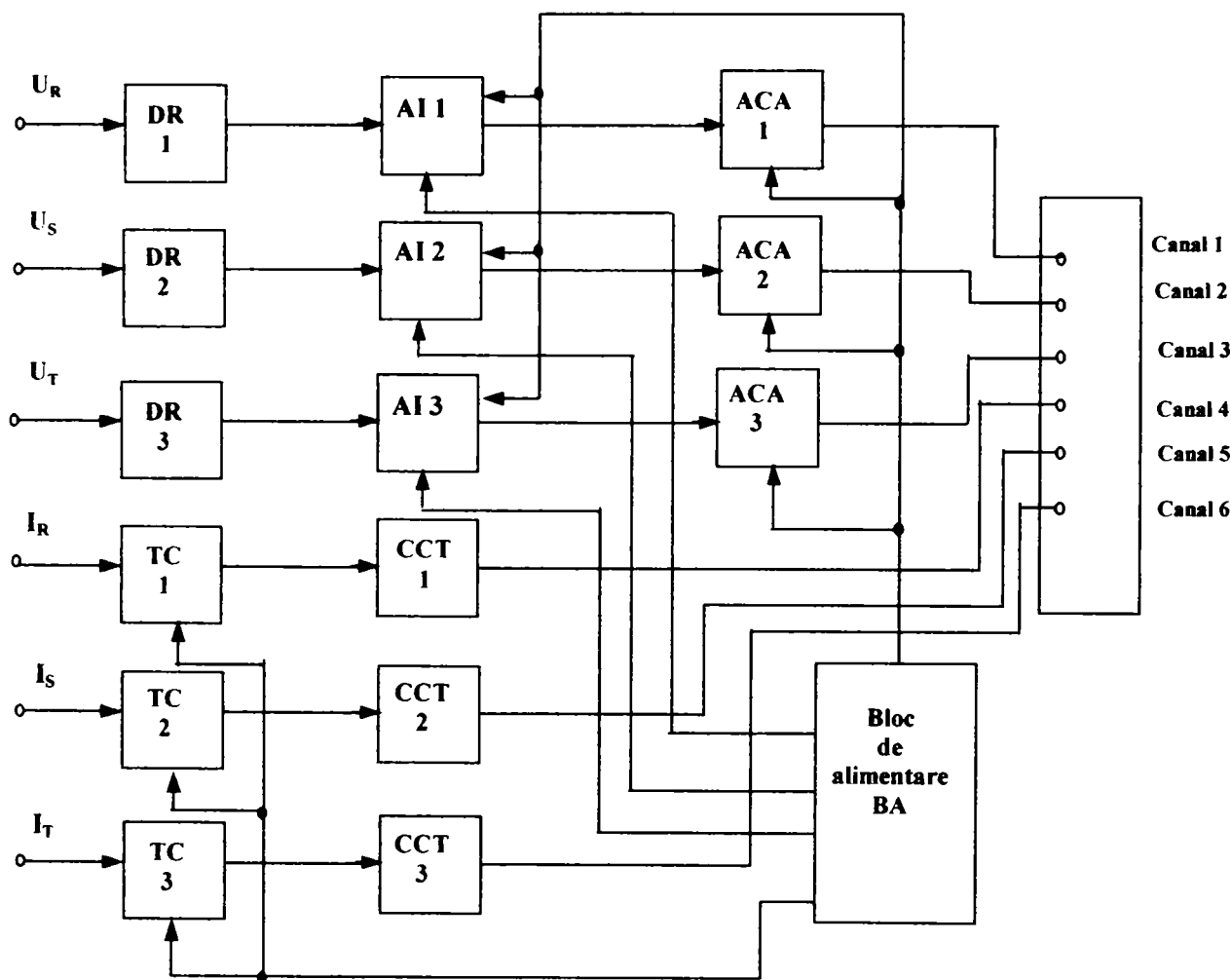


Fig. 3.2. Structura blocului de adaptare a curenților și tensiunilor mari.

### 3.2.2. Schema de măsurare a tensiunii pe un canal

Schema de măsurare a tensiunii de intrare pe un canal cuprinde, așa cum rezultă din figura 3.2, divizorul rezistiv, *DR*, amplificatorul de izolare, *AI* și amplificatorul de curent alternativ *ACA*.

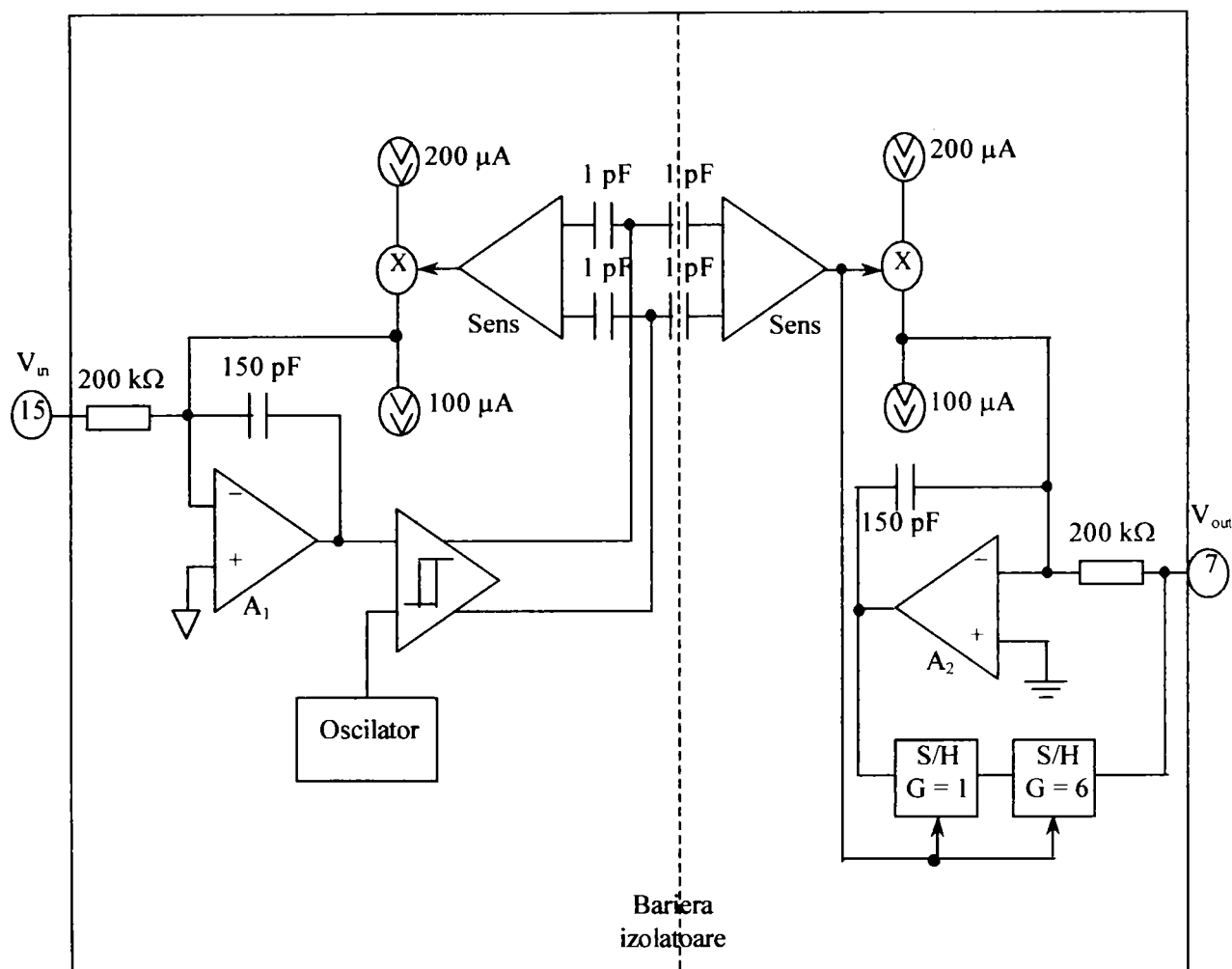


Fig. 3.3. Structura bloc a amplificatorului de izolare ISO 122P.

Elementul principal al schemei îl reprezintă amplificatorul de izolare, *AI*, realizat cu circuitul integrat *ISO 122P* care este un amplificator de izolare cu modulare-demodulare. Structura internă a amplificatorului de izolare, prezentată în figura 3.3, cuprinde două secțiuni.

**Secțiunea de intrare** preia semnalul din circuitul de forță și îl aplică unui amplificator care îl modulează, după care este transmis prin intermediul barierei de izolare spre secțiunea de ieșire. În vederea reducerii erorilor privitoare la forma semnalului transmis prin bariera izolatoare, înainte de a fi transmis prin bariera izolatoare, semnalul este convertit numeric pentru a nu fi denaturat.

**Secțiunea de ieșire** preia semnalul modulat, îl convertește analogic și îl demodulează. Această secțiune este prevăzută și cu un circuit de eșantionare care elimină componentele reziduale inerente procesului de demodulare.

Frecvența internă de modulare – demodulare este de **500 kHz** și este furnizată de oscilatorul intern. Datorită principiului de funcționare, în componența tensiunii de ieșire apar rippluri (oscilații) cu frecvența egală cu frecvența furnizată de oscilator și cu amplitudinea de **20 mV**.

Semnalul de la ieșirea amplificatorului de izolare este amplificat de amplificatorul de curent alternativ (*ACA*) prevăzut cu filtre trece jos cu frecvența de tăiere aleasă astfel încât să fie respectată teorema eșantionării. Amplificatorul de curent alternativ are rolul de a prelua și amplifica semnalul de la ieșirea amplificatorului de izolare, având rezistența de intrare mare și rezistivitatea de ieșire mică. De asemenea are rolul de a rejecta oscilațiile din componența tensiunii de la ieșirea amplificatorului de izolare, jucând rolul unui filtru trece-jos cu frecvența

de tăiere de **100 kHz**, frecvență egală cu jumătate din frecvența maximă de achiziție a plăcii **ADA 3100**, a cărei valoare este de **200 kHz**.

Pentru ca semnalul să ajungă la parametrii prescriși, acest etaj de amplificare cuprinde un amplificator operațional **βM 201A**, care este un amplificator operațional monolitic cu performanțe ridicate. Este bine protejat la suprasarcini pe intrare sau ieșire și nu prezintă fenomenul de agățare atunci când domeniul de “mod comun” este depășit.

Schema electronică de măsurare a tensiunii pe un canal este prezentată în figura 3.4.

Divizorul rezistiv **DR** este realizat cu grupul de rezistențe  $R_1 \div R_7$ . Amplificatorul de izolare, **AI** realizat cu circuitul integrat **ISO 122 P** are intrările protejate la apariția unor tensiuni mai mari de **10 V** prin intermediul **diodelor Zener D<sub>1</sub> și D<sub>2</sub>**.

Semnalul de la ieșirea amplificatorului de izolare este filtrat utilizând filtrul trece-jos de tip  $\pi$  realizat cu **R<sub>8</sub>, C<sub>5</sub> și C<sub>6</sub>** și amplificat de către amplificatorul de curent alternativ, **ACA**, realizat cu amplificatorul operațional **βM 201A**.

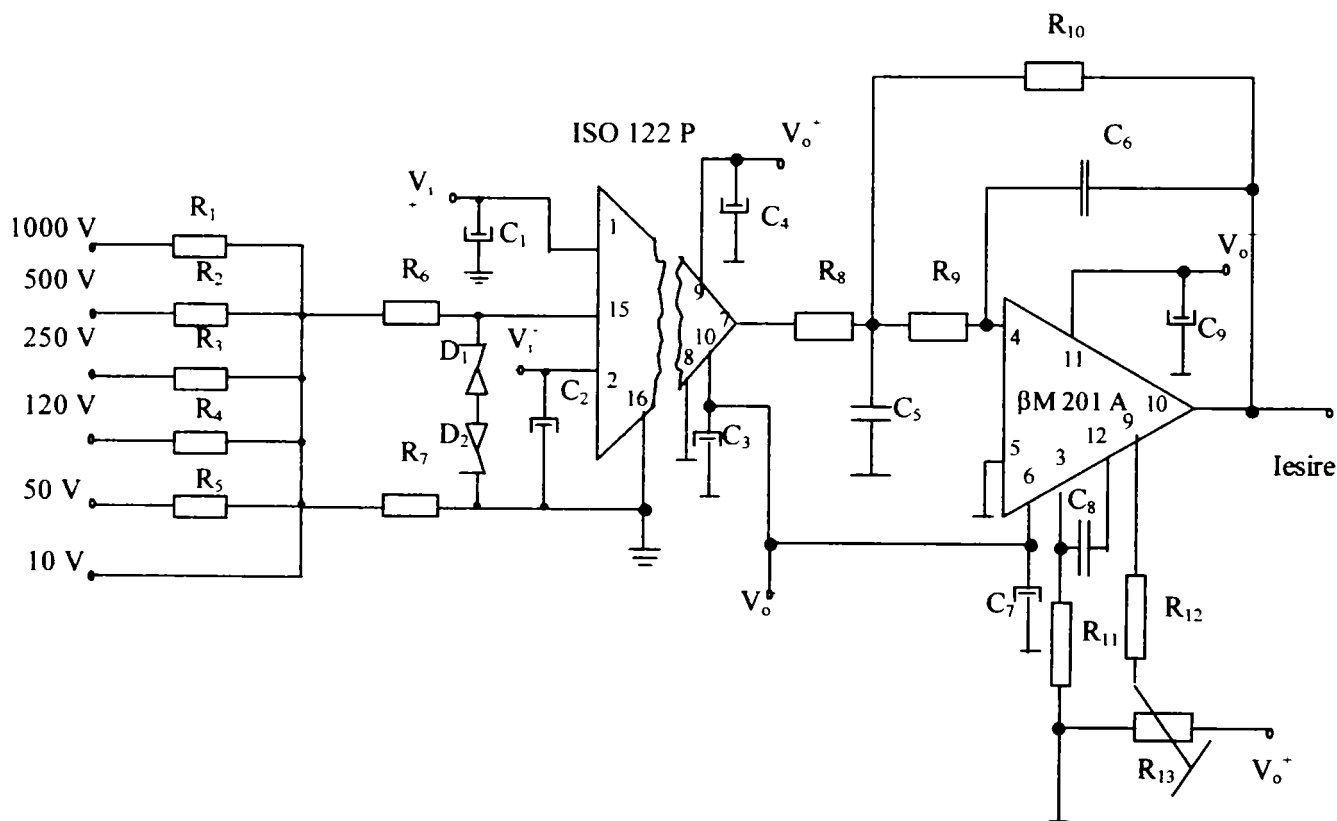


Fig. 3.4. Schema electronică de măsurare a tensiunii pe un canal.

### 3.2.3. Schema de măsurare a curentului pe un canal

Așa cum s-a prezentat anterior, blocul de adaptare a curenților și tensiunilor mari permite măsurarea valorilor curenților pe trei canale distincte. Și în cazul măsurării curentului, schema de măsurare trebuie să realizeze aceleași cerințe ca și în cazul măsurării tensiunilor mari și anume:

- obținerea unei tensiuni în domeniul sistemului de achiziție de date pentru o variație a curentului de intrare în gama dorită. În cazul blocului de adaptare realizat valoarea maximă a curentului de intrare este de **100 A**;
- realizarea unei izolații galvanice între instalația electrică a cuptorului electric cu arc și sistemul de achiziție de date;



• obținerea unor erori mici la măsurarea curentului necesită utilizarea traductoarelor de curent împreună cu circuite electronice adecvate care să permită obținerea unor performanțe îmbunătățite în ceea ce privește eroarea de neliniaritate, banda de frecvență precum și raportul de transformare.

Elementul principal al unui canal de măsurare a curentului îl **constituie traductorul de curent (TC)**, traductorul ales a fi folosit în structura blocului de adaptare fiind din clasa **LEM [122]**. Funcționarea traductorului de curent se bazează pe principiul compensării fluxului magnetic sau pe principiul fluctuației magnetice nule. Fluxul magnetic este menținut constant la o valoare nulă cu ajutorul unui curent din exterior, multiplicat cu raportul de transformare, curent care este chiar curentul de măsurare.

Pentru măsurarea curenților a fost utilizat câte un traductor **LC 100-S** pentru fiecare canal. Acest traductor poate fi utilizat atât ca traductor de curent cât și ca traductor de tensiune. Schema traductorului **LC 100-S** este prezentată în figura 3.5.

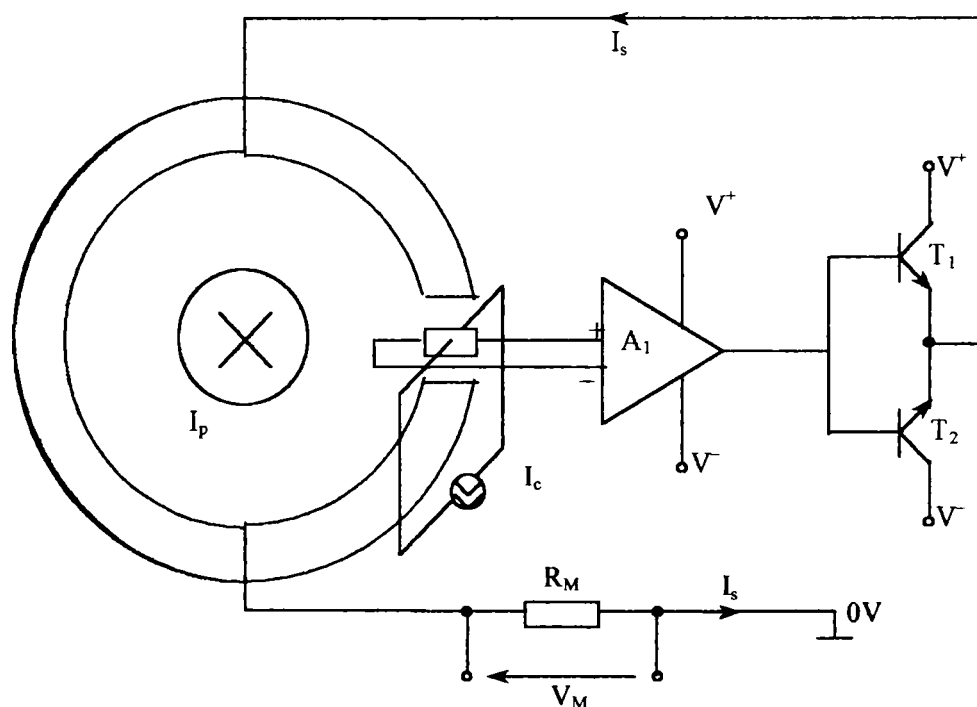


Fig. 3.5. Schema traductorului de curent LC 100-S.

Funcționarea traductorului de curent se bazează pe utilizarea unui **traductor Hall** care furnizează la ieșire o tensiune proporțională cu fluxul magnetic creat de curentul primar  $I_p$ . Tensiunea de la ieșirea traductorului **Hall** este amplificată de amplificatorul  $A_1$  a cărui ieșire comandă etajul în contratimp realizat cu tranzistoarele  $T_1$  și  $T_2$ . Curentul de la ieșirea etajului în contratimp reprezintă curentul din secundarul transformatorului (de compensare), sistemul purtând denumirea de sistem în buclă închisă.

Principalele caracteristici ale acestui traductor constau în funcționarea într-o bandă de frecvență din domeniul continuu până la **100 kHz**, cu o eroare de neliniaritate de **0,2%** și un raport de transformare de **1:1000**.

Deoarece placa de achiziție de date permite achiziționarea semnalelor de tensiune cu amplitudinea maximă de **10 V**, în timp ce traductorul de curent furnizează la ieșire un curent proporțional cu curentul de măsurat, rezultă că este necesară utilizarea unui convertor curent-tensiune. Acesta este realizat prin intermediul rezistenței  $R_M$  conectată la potențialul masei plăcii de achiziție de date.

### 3.2.4. Alimentarea blocului de adaptare a curenților și tensiunilor mari

Alimentarea blocului de adaptare se realizează prin intermediul unui transformator cu primarul conectat la rețeaua de  $220\text{ V}$  și prevăzut cu patru înfășurări secundare, schema blocului de alimentare fiind prezentată în figura 3.6.

Prima înfășurare este prevăzută cu priză mediană pentru referință. Semnalul alternativ este redresat cu ajutorul unui redresor bialternanță. Ieșirea de  $+15\text{ V}$  este stabilizată prin intermediul unui stabilizator *LM 7815* și se conectează la intrarea pozitivă a traductoarelor de curent. Ieșirea de  $-15\text{ V}$  este stabilizată prin intermediul unui stabilizator *LM 7915* și alimentează traductoarele de curent prin intermediul bornei negative. De asemenea, această sursă alimentează și circuitul de ieșire al amplificatoarelor de izolare precum și amplificatoarele de curent alternativ.

Celelalte trei înfășurări secundare ale transformatorului sunt construite identic. Tensiunea redresată de un redresor bialternanță este stabilizată de circuitul integrat *LM 7805* la  $\pm 5\text{ V}$ . Elementul principal al acestui etaj îl constituie un circuit integrat care oferă la ieșire o tensiune diferențială. Această tensiune diferențială alimentează circuitul de intrare al amplificatoarelor de izolare.

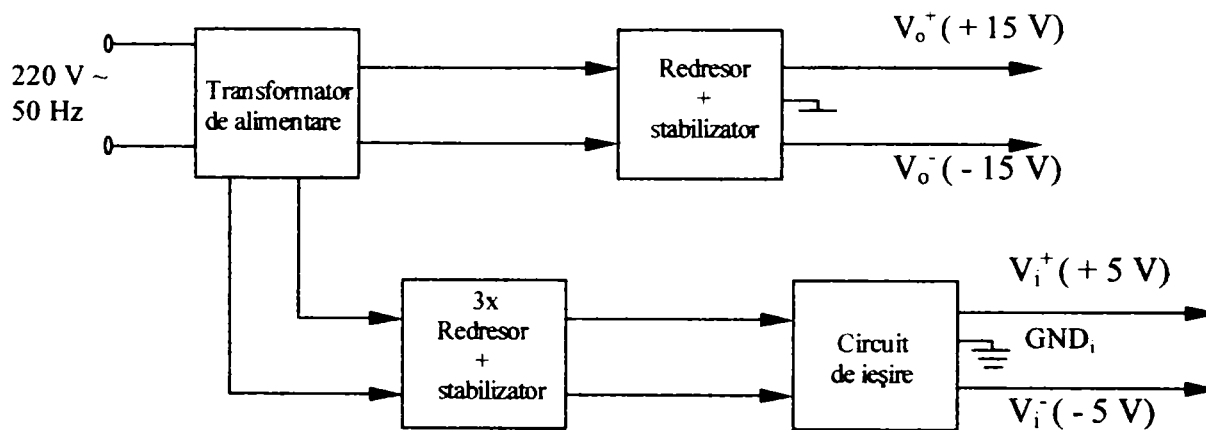


Fig. 3.6. Schema de alimentare a blocului de adaptare.

În urma realizării și măsurării experimentale a caracteristicilor blocului de adaptare a curenților și tensiunilor mari au rezultat principalele caracteristici ale acestuia:

- Frecvența maximă de funcționare a canalului de măsurare a tensiunii este de  $15\text{ KHz}$ , aceasta reprezentând frecvența de tăiere a ansamblului amplificator de izolare-amplificator de curent alternativ. În acest fel se poate analiza spectrul undei de tensiune până la armonica  $300$ , mai mult decât este necesar potrivit standardelor în vigoare [111];
- Eroarea de neliniaritate în procesul de măsurare a tensiunii pe domeniul de  $1000\text{ V}$  este sub  $1\%$  în banda de frecvență din domeniul de tensiune continuă până la  $15\text{ KHz}$ ;
- Eroarea de neliniaritate în procesul de măsurare al curentului este de  $0,5\%$  în banda de frecvență în care funcționează traductorul de curent și anume din domeniul de tensiune continuă până la  $100\text{ KHz}$ .

### 3.2.5. Placa de achiziție de date ADA 3100

Realizarea conversiei analog-numerică și numeric-analogică necesare, așa cum s-a prezentat anterior, în vederea măsurării valorilor momentane ale tensiunilor și curenților de pe fiecare fază a fost făcută cu ajutorul plăcii de achiziție de date *ADA 3100* ale cărei caracteristici principale sunt [116]:

- existența a **8 canale analogice de intrare** care pot fi utilizate în mod diferențial sau cu tensiunea de intrare măsurată față de masă;
- posibilitatea **realizării conversiei analog-numeric pe 12 biți**, la o **frecvență de eșantionare de 12 KHz pe un canal**;
- existența a **2 canale analogice de ieșire**, semnalele de ieșire provenind de la ieșirile a **două convertoare numeric-analogice pe 12 biți fiecare**;
- existența a **8 linii de intrare numerice** și a **8 linii de ieșire numerice** ;
- **domeniul tensiunilor de intrare  $\pm 5$ ,  $\pm 10$  sau  $0 - 10V$** , selectabil prin programare;
- **domeniul tensiunilor de ieșire  $\pm 5$ ,  $\pm 10$ ,  $0 - 5$  sau  $0 - 10V$** , selectabil prin programare;
- posibilitatea alegerii unei **amplificări a semnalului de la intrare de 1, 2, 4, 8, 16 sau reglabilă**, înaintea realizării operației de conversie analog-numerică;
- existența unei **memorii FIFO cu capacitate de 8 Kocteți**.

### 3.3. Măsurarea unor mărimi electrice la instalația cuptorului trifazat cu arc electric

Așa cum s-a prezentat în prima parte a acestui capitol măsurarea mărimilor electrice a instalației cuptorului cu arc s-a efectuat pe liniile de alimentare de **joasă** și de **medie tensiune** utilizând schemele de măsură prezentate, ieșirile traductoarelor de curent și de tensiune fiind conectate la placa de achiziție de date **ADA 3100** prin intermediul blocului de adaptare a curenților și tensiunilor mari.

În vederea realizării unei analize a modului de variație a mărimilor electrice pe întreaga durată a unei șarje de elaborare a oțelului și achiziția datelor s-a făcut pe toată durata șarjei. Acest proces prezintă o serie de caracteristici specifice determinate atât de natura mărimilor electrice care se doresc a fi măsurate cât și de caracteristicile tehnice a sistemului de achiziție de date utilizat și a calculatorului pe care s-au rulat programele de achiziție de date și de prelucrare a acestora:

- pentru ca, pe baza eșantioanelor achiziționate să se poată realiza o analiză spectrală a undelor de curent și de tensiune de pe fiecare fază incluzând **armonica 50**, corespunzătoare frecvenței de **2,5 KHz**, rezultă că frecvența de achiziție pe un canal trebuie să fie de **5 KHz**.
- deoarece achiziția datelor se face simultan pe **6 canale**, **3** pentru curenți și **3** pentru tensiuni, sistemul de calcul utilizat nu permite prelucrarea în timp real a datelor, fiind necesară memorarea acestora.
- datorită faptului că durată medie a unei șarje este de aproximativ **3 ore** capacitatea de memorie necesară ar fi prea mare (**620 megaoceteți**) iar prelucrarea ulterioară a acestora ar necesita un interval de timp extrem de mare.

Ținând seama atât de caracteristicile prezentate cât și de recomandările privitoare la achiziția datelor în sistemele de măsurare a curenților și tensiunilor pe liniile de medie și înaltă tensiune prezentate în [55], achiziția datelor pe cele **6 canale** s-a realizat astfel:

- pe durata a **250 ms** s-au achiziționat datele simultan pe cele **6 canale**, frecvența de achiziție aleasă fiind de **5 KHz**. În acest mod au fost achiziționate semnalele pe durata a **12,5 perioade**. Acest fapt a permis ca în cazul în care frecvența tensiunii de alimentare este diferită de **50 Hz** datele să conțină un număr de **12 perioade** întregi, selectabile prin program;
- procesul de achiziție al datelor pe durata de **250 ms** a fost reluat la un interval de **9,75 secunde**, interval pe durata căruia s-au salvat în memorie datele achiziționate anterior. În acest mod rezultă că au fost achiziționate, pe întreaga durată a șarjei, date în ferestre de timp cu lungimea de **250 ms**, intervalul între două ferestre de date consecutive fiind de **10 secunde**.

Procesul de elaborare a unei șarje conține intervale de timp în care cuptorul electric este deconectat de la rețeaua de alimentare. Aceste intervale sunt necesare intervenției personalului uman în vederea efectuării analizelor chimice asupra compoziției, adăugării diferitelor componente în vederea obținerii compoziției dorite, evacuării zgurii precum și alte intervenții care necesită decuplarea alimentării cuptorului. Deoarece procesul de achiziție al datelor se face automat la un interval de **10 secunde**, rezultă că în variația în timp a mărimilor electrice apar intervale în care acestea sunt nule.

În **anexa I.3** este prezentat programul scris în **limbajul Turbo Pascal** pentru achiziția datelor utilizând **placa de achiziție de date ADA 3100**, program care utilizează o serie de funcții și proceduri din unit-ul **ADA3100** prezentat în **anexa I.2**.

În vederea posibilității realizării unei comparații între rezultatele obținute în urma măsurărilor efectuate și a celor obținute prin simulare, forma de prezentare a rezultatelor va fi similară celei din capitolele precedente și cuprinde:

- Pe liniile de alimentare de **joasă** și de **medie tensiune** este prezentată forma de variație în timp și caracteristica spectrală a curenților și tensiunilor în diferite faze ale elaborării șarjei.
- Pe aceleași linii de alimentare este prezentată forma de variație a puterilor în regim deformant precum și a factorilor de putere, rezultatele obținute fiind necesare în vederea dimensionării instalației de compensare a puterii reactive.
- Pe linia de alimentare de **medie tensiune** este prezentată variația principalelor armonici, necesară dimensionării filtrelor de armonici.

### 3.3.1. Prezentarea rezultatelor măsurărilor efectuate pe linia de joasă tensiune

Măsurările pe linia de joasă tensiune au fost efectuate pe întreaga durată a trei șarje complete și au constat în achiziționarea eșantioanelor curbelor de curent și de tensiune de pe cele trei faze, urmată de memorarea acestora.

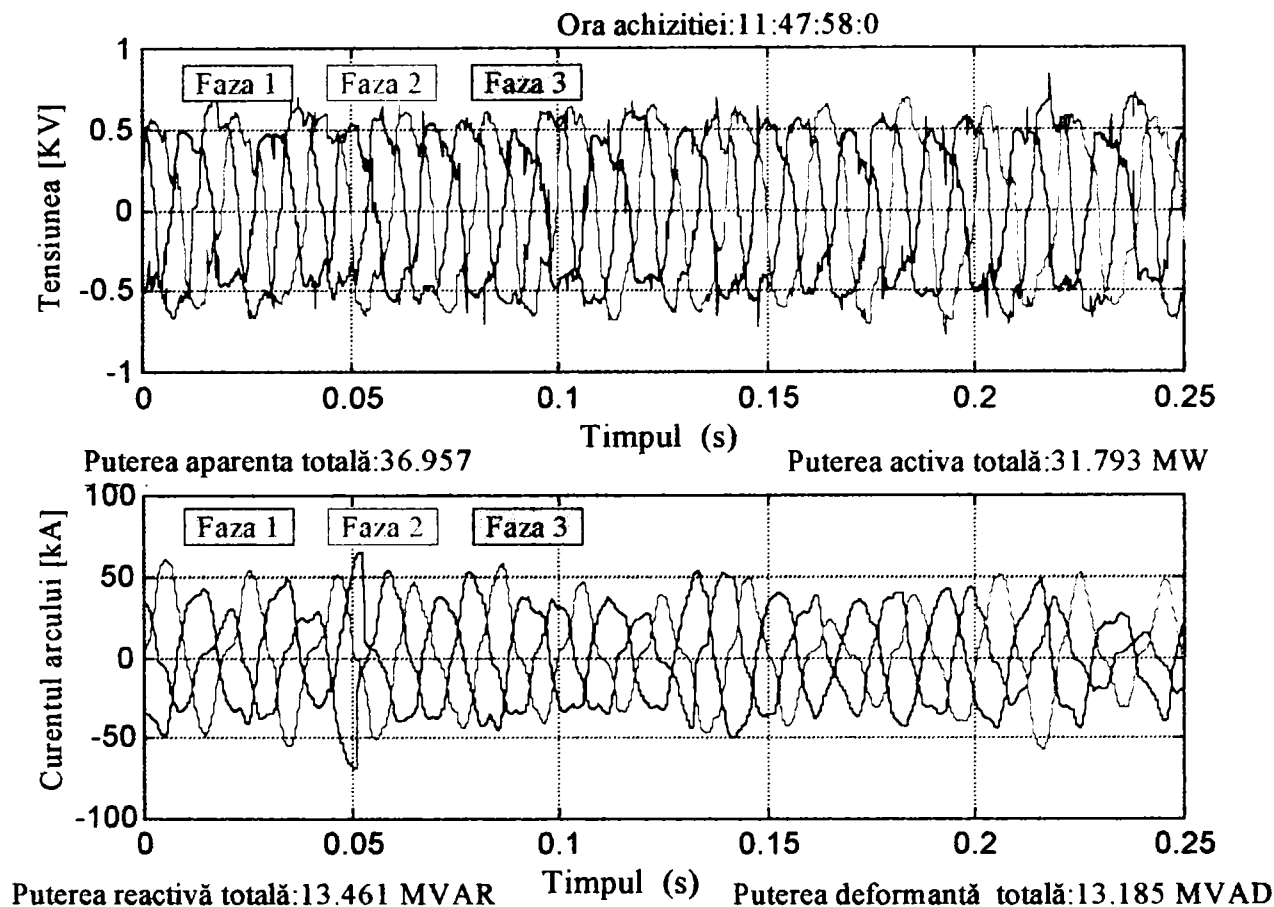
Pe baza datelor memorate și cunoscând constantele traductoarelor de curent și a transformatoarelor de tensiune precum și caracteristicile blocului de adaptare și a plăcii de achiziție de date s-a putut determina variația mărimilor electrice care caracterizează funcționarea cuptorului electric pe întreaga durată a unei șarje.

Rezultatele prezentate se referă la una dintre cele trei șarje, considerată de către autor ca fiind cea mai reprezentativă. Această șarjă, elaborată în **21.05.2000**, a conținut **116,3 tone** de oțel elaborat și a avut compoziția următoare:

- <b>Carbon</b>	- <b>174,75 Kg</b>	- <b>0,150%</b>
- <b>Mangan</b>	- <b>476,83 Kg</b>	- <b>0,410%</b>
- <b>Siliciu</b>	- <b>58,15 Kg</b>	- <b>0,050%</b>
- <b>Sulf</b>	- <b>40,71 Kg</b>	- <b>0,035%</b>
- <b>Fosfor</b>	- <b>23,26 Kg</b>	- <b>0,020%</b>
- <b>Crom</b>	- <b>814,1 Kg</b>	- <b>0,700%</b>
- <b>Molibden</b>	- <b>44,19 Kg</b>	- <b>0,038%</b>
- <b>Cupru</b>	- <b>232,6 Kg</b>	- <b>0,200%</b>
- <b>Fier</b>	- <b>114224,0 Kg</b>	- <b>98,215%</b>
- <b>Alte elemente</b>	- <b>211,37 Kg</b>	- <b>0,182%</b>

Primul contact al electrozilor cu deșeurile metalice a avut loc la ora **11:35**, iar procesul propriu-zis de achiziție al datelor a început la ora **11:39**.

În ceea ce privește *formele de undă ale curenților și tensiunilor* de pe linia de alimentare de joasă tensiune, prezentate în figura 3.7, în faza de topire se constată o distorsiune puternică a acestora. De asemenea, se observă că deoarece amplitudinile curenților și tensiunilor de pe cele trei faze sunt inegale rezultă că sarcina este puternic dezechilibrată.



**Fig. 3.7. Forma de variație a tensiunilor și curenților pe linia de joasă tensiune în faza de topire după 13 minute de la începerea elaborării șarjei.**

În faza de ardere stabilă a arcului electric, care apare spre finalul elaborării șarjei, în special în timpul proceselor de oxidare și reducere (dezoxidare), se constată că distorsiunile care apar în formele de undă ale curentului și tensiunii sunt mult mai reduse, așa cum rezultă din figura 3.8 în care sunt prezentate formele de undă obținute în faza de oxidare. În această fază amplitudinile curenților și tensiunilor sunt mult mai apropiate ca valoare fapt care arată că impedanța de sarcină este mai echilibrată.

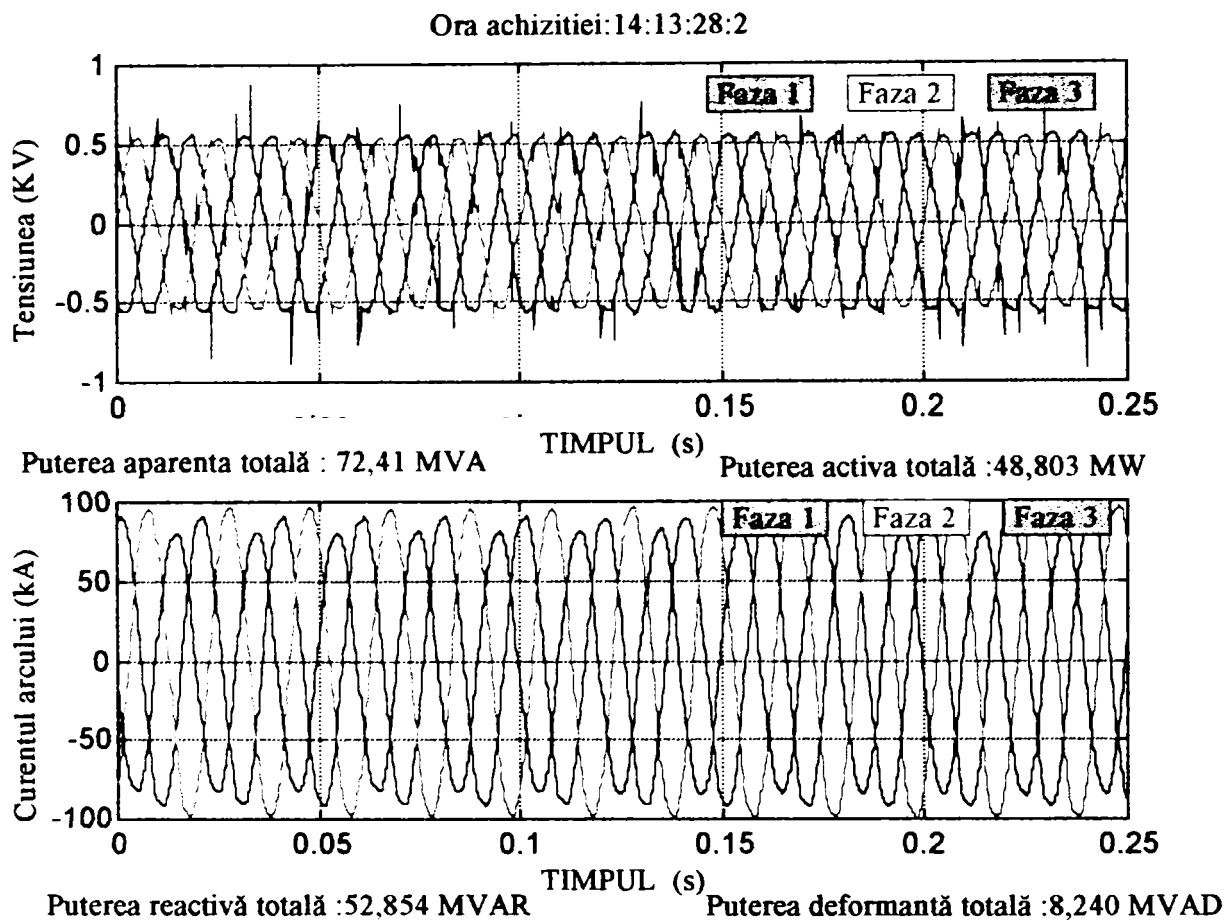
La concluzia că deformarea undelor de curent și de tensiune este mai mică în faza de oxidare se poate ajunge și din faptul că puterea deformantă este mai mică în această fază, în condițiile în care puterile aparentă, activă și reactivă sunt mai mari.

Analizând *caracteristicile spectrale ale undelor de curent și de tensiune* pentru aceleași ferestre de timp pentru care au fost făcute reprezentările anterioare s-au obținut reprezentările caracteristicilor spectrale din figura 3.9, pentru faza de topire, respectiv în figura 3.10, pentru faza de oxidare.

Atât aceste reprezentări ale caracteristicilor spectrale cât și reprezentările formelor de undă prezentate în figurile anterioare au fost realizate utilizând programul prezentat în *anexa I.4*. Caracteristicile spectrale au fost obținute prin prelucrarea datelor achiziționate utilizând *transformata Fourier*. Deoarece frecvența de achiziție a fost de  $5 \text{ KHz}$ , rezultă că banda de frecvență în care se face analiza este  $0 - 2,5 \text{ KHz}$ , care împărțită la numărul de  $1250$  de eșantioane din fereastra de date conduce la obținerea unui ecart de frecvență de  $2 \text{ Hz}$ .



Având în vedere că, potrivit literaturii de specialitate [55],[111] este suficientă analiza primelor **40 de armonici** determinările puterilor, a factorilor de putere și a coeficienților de distorsiune s-a făcut pe baza a **40 de armonici**, însă pentru o mai bună claritate reprezentările caracteristicilor spectrale au fost făcute până la frecvența de **1 KHz**, corespunzătoare primelor **20 de armonici** fapt care coincide și cu reprezentările realizate în urma simulărilor din capitolul precedent.



**Fig. 3.8. Forma de variație a tensiunilor și curenților pe linia de joasă tensiune în faza de reducere după 2 ore și 38 minute de la începerea elaborării sarjei.**

În ceea ce privește tensiunea pe linia de joasă tensiune, în faza de topire se observă prezența armonicilor de ordin 3, 5, 7 dar și a componentelor de alte frecvențe decât a armonicilor ( interarmonici ) în timp ce în faza de oxidare se constată practic doar prezența fundamentalei, fapt care demonstrează că în faza de topire curbele de tensiune sunt mult mai deformate decât în faza de oxidare.

În cazul curentului se constată că în faza de topire este predominantă componenta de frecvență fundamentală, celelalte armonici și interarmonici având amplitudini aproximativ egale, fapt ce demonstrează că în această fază curentul este puternic deformat. În faza de ardere stabilă a arcului electric se constată prezența armonicilor fundamentale și a armonicilor de ordin impar în timp ce interarmonicile sunt practic inexistente.

În vederea analizei **forme de variație a puterilor în regim deformant precum și a factorilor de putere**, a fost utilizat programul prezentat în **anexa I.5**. Programul calculează și memorează pentru fiecare fereastră de date de **250 ms** **puterile și factorii de putere în regim deformant, coeficienții de distorsiune totali și parțial ponderați, amplitudinile primelor 20 de armonici** pentru undele de curent și de tensiune precum și **puterile activă și reactivă disipată pe fiecare armonică**, pe baza relațiilor prezentate în capitolul precedent. În urma rulării programului s-a obținut forma de variație a tuturor mărimilor prezentate pe întreaga durată a șarjei.



Acest program a fost folosit și în analiza datelor de pe linia de alimentare de medie tensiune în vederea determinării formei de variație a aceluiași mărimi electrice. Deosebirea constă în aceea că valorile achiziționate au fost înmulțite cu alte constante de proporționalitate, determinate de traductoarele de curent și de tensiune folosite și de domeniile pe care s-a utilizat blocul de adaptare.

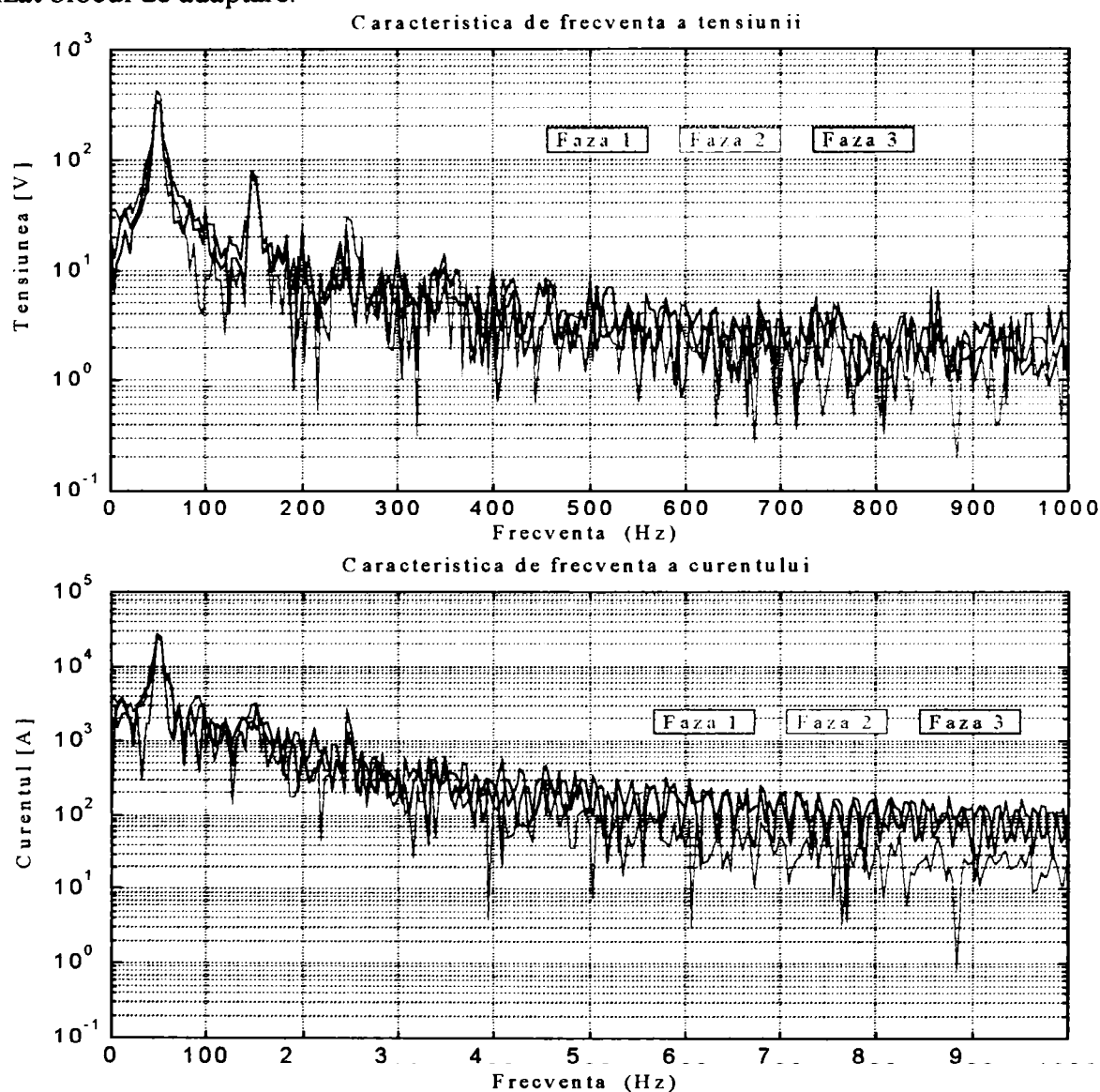


Fig. 3.9. Caracteristica spectrală a tensiunilor și curenților pe linia de joasă tensiune în faza de topire după 13 minute de la începerea elaborării șarjei.

În figura 3.11 este prezentată forma de variație a puterii aparente pe întreaga durată a șarjei de elaborare a oțelului analizată. **Se observă că există intervale de timp în care puterea aparentă este nulă, aceasta datorându-se întreruperii alimentării cuptorului electric în vederea executării unor operații tehnologice specifice** (adăugarea de elemente în vederea realizării compoziției dorite, măsurarea temperaturii șarjei precum și a compoziției acesteia). Aceste intervale se vor regăsi și în cazul variației celorlalte mărimi electrice reprezentate. Se constată că în prima perioadă, corespunzătoare fazei de topire, puterea aparentă este mai mică datorită atât faptului că în această perioadă tensiunea furnizată de către transformatorul cuptorului este mai mică, acesta găsimu-se pe o treaptă inferioară de tensiune, cât și faptului că electrozii sunt mai ridicați, în vederea asigurării protecției la rupere, aceasta determinând un curent de valoare mai mică. În faza de oxidare (afănare) se constată că amplitudinea puterii aparente este aproximativ constantă și mai mare decât în faza de topire, transformatorul cuptorului lucrând pe o treaptă superioară de tensiune, uzual  $19\Delta$ , operatorul menținând

constantă valoarea curentului de arc. La sfârșitul fazei de oxidare și în faza de reducere (dezoxidare) puterea aparentă este crescută din nou prin trecerea pe o treaptă superioară a transformatorului cuptorului, 21Δ.

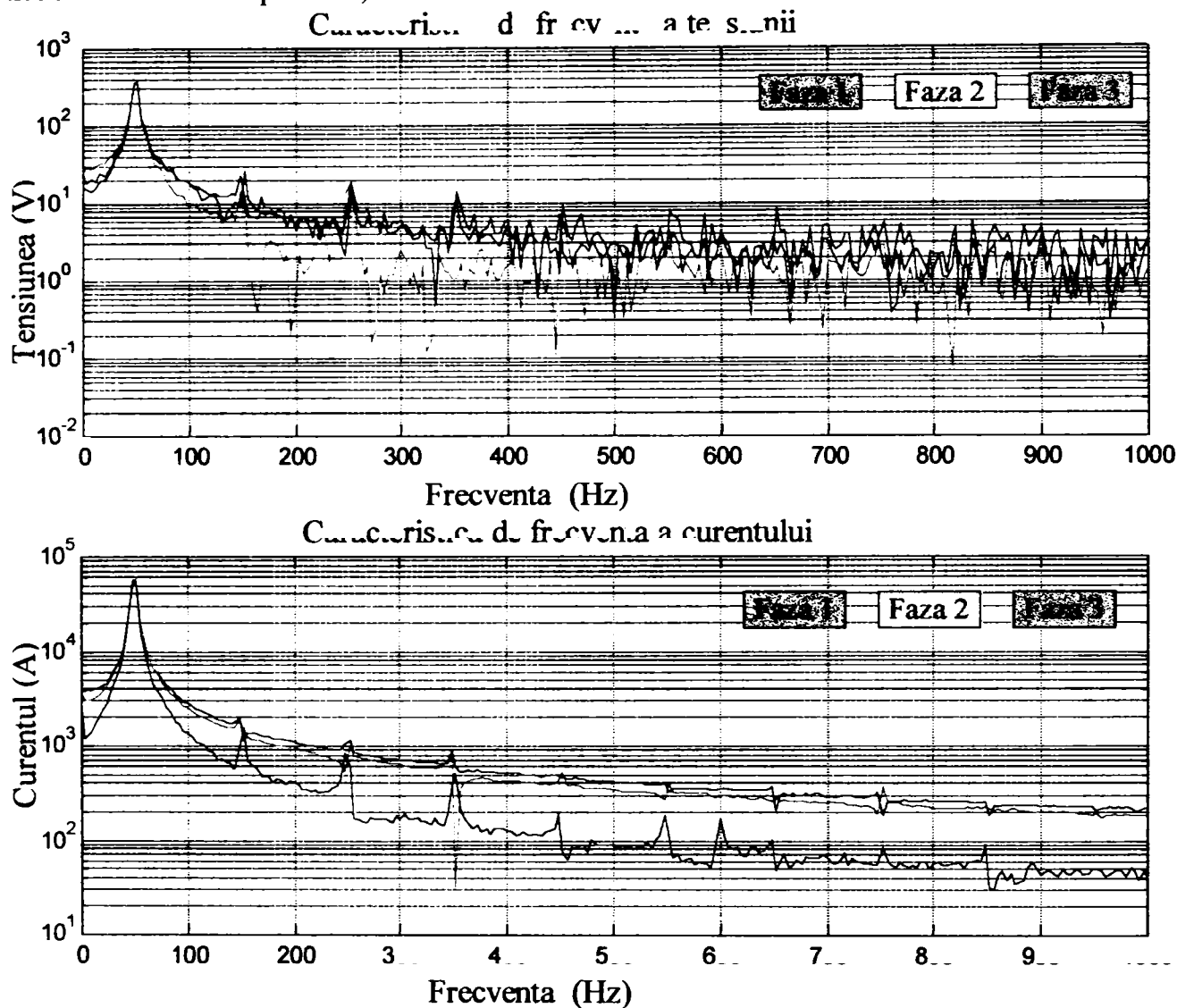


Fig. 3.10. Caracteristica spectrală a tensiunilor și curentilor pe linia de joasă tensiune în faza de reducere după 2 ore și 38 minute de la începerea elaborării șarjei.

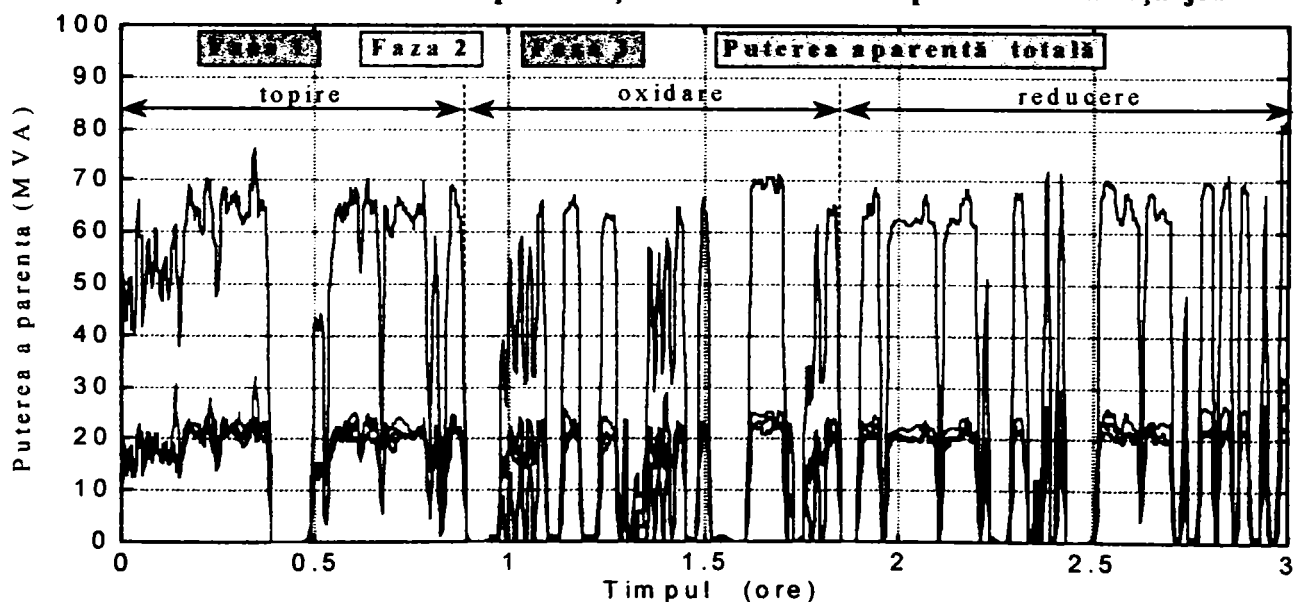


Fig. 3.11. Variația puterii aparente pe durata unei șarje, calculată cu relațiile (2.27) și (2.28), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

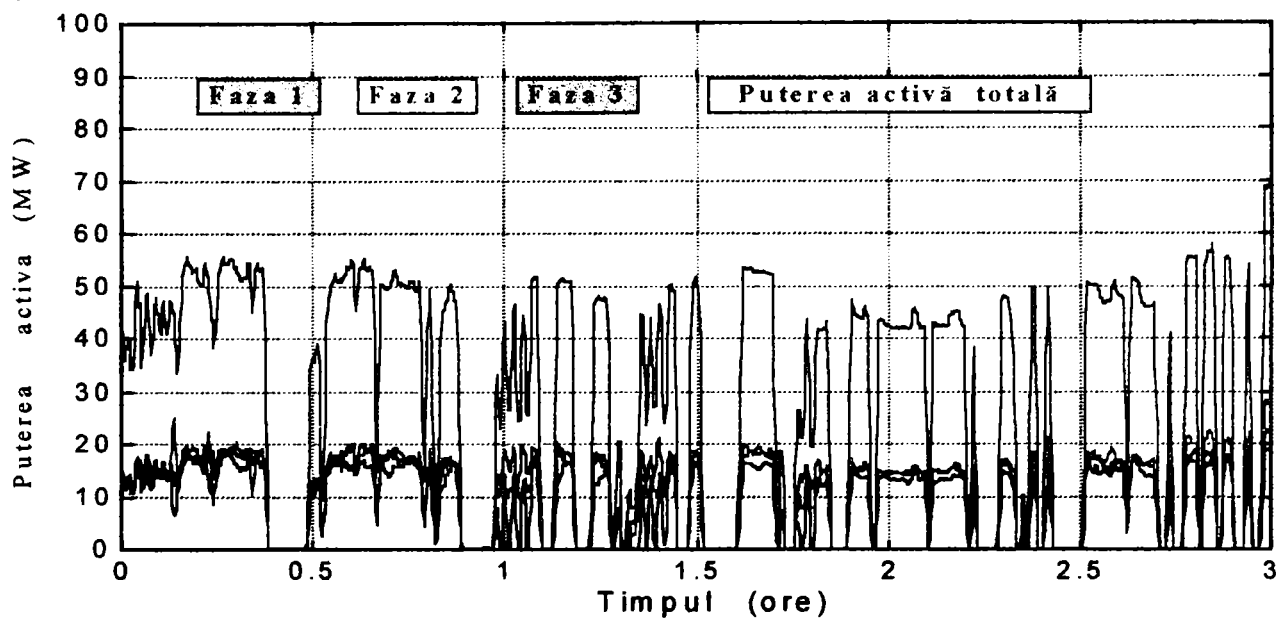


Fig. 3.12. Variația puterii active pe durata unei șarje, calculată cu relația (2.20), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

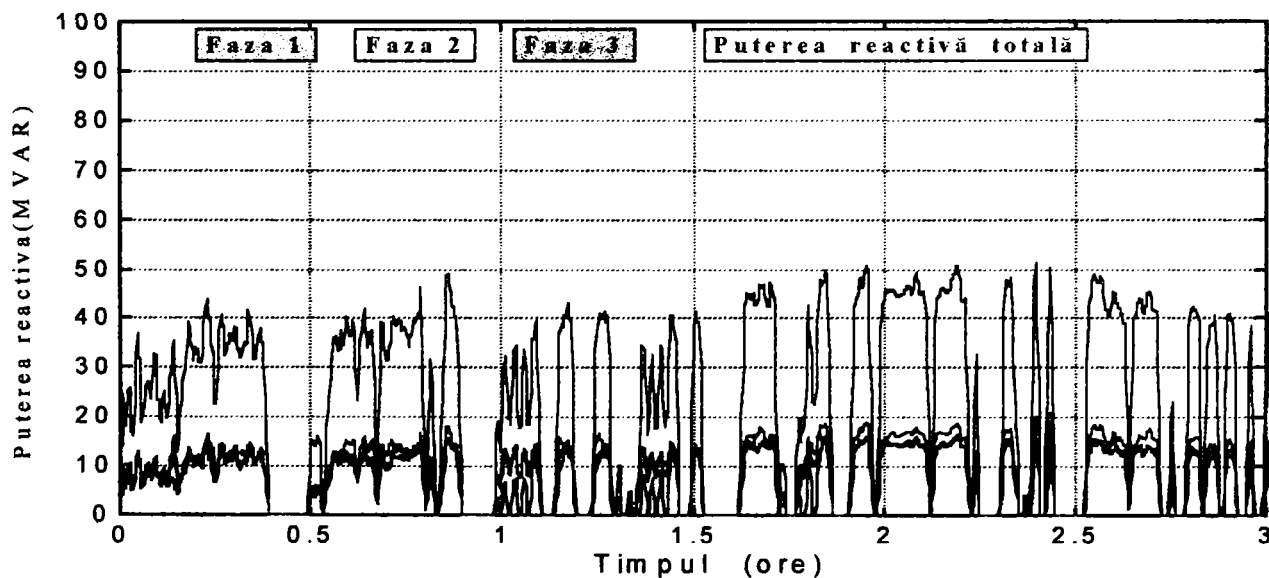


Fig. 3.13. Variația puterii reactive pe durata unei șarje, calculată cu relația (2.21), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

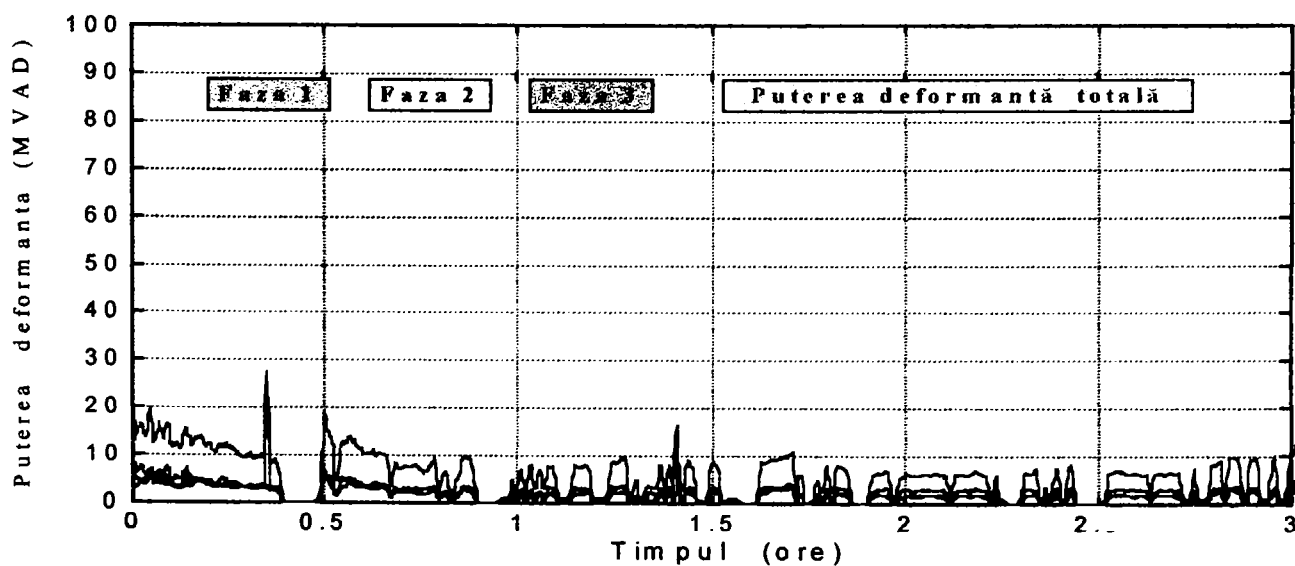
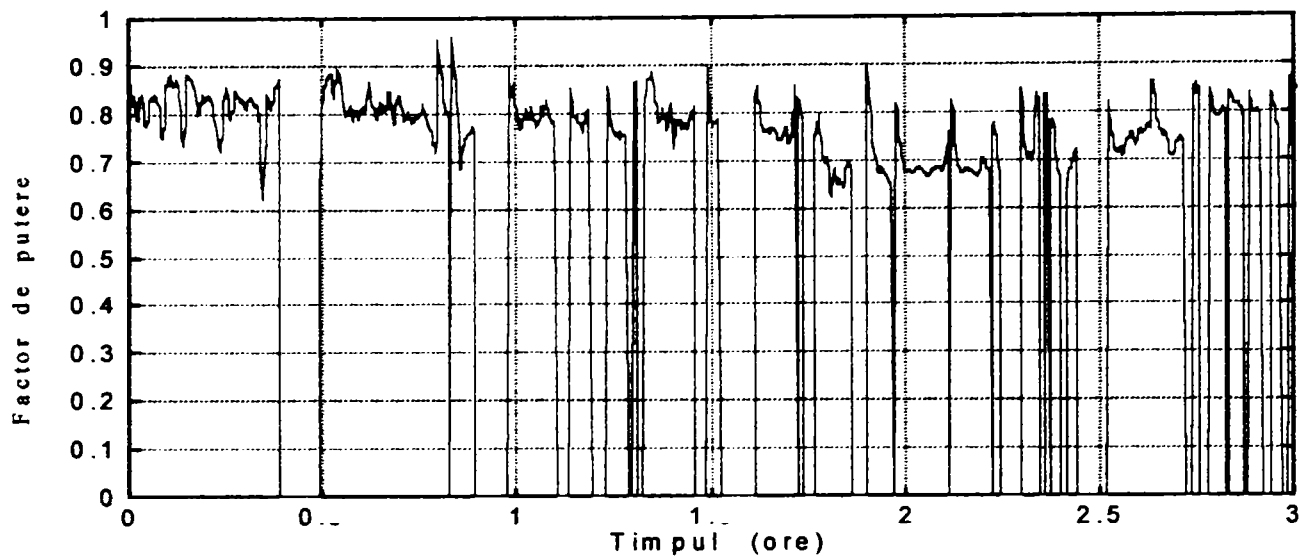
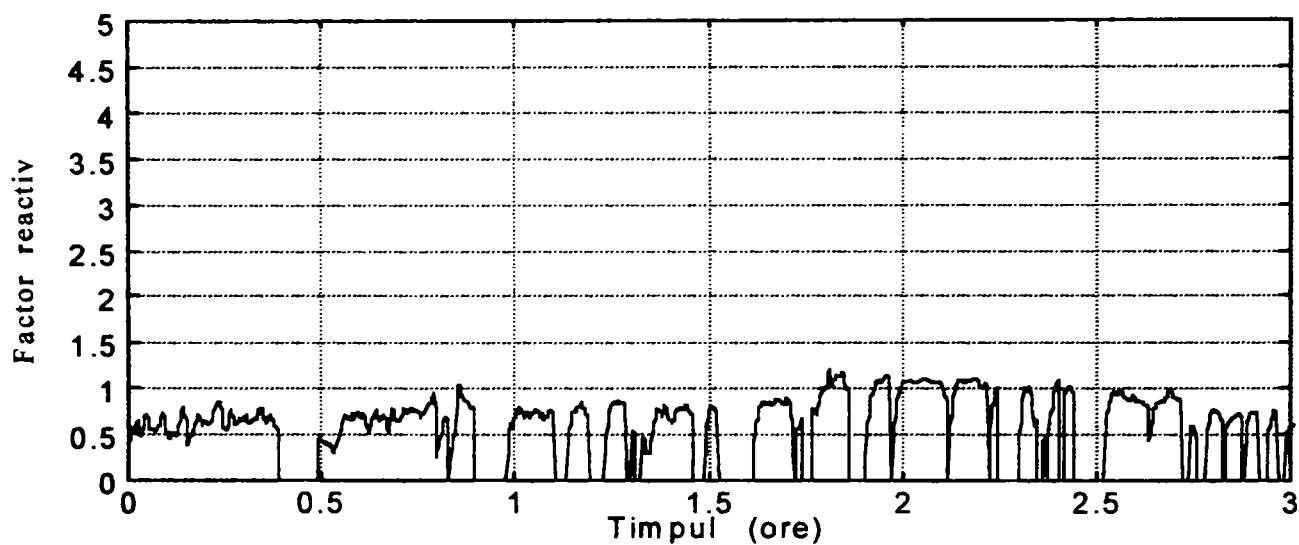


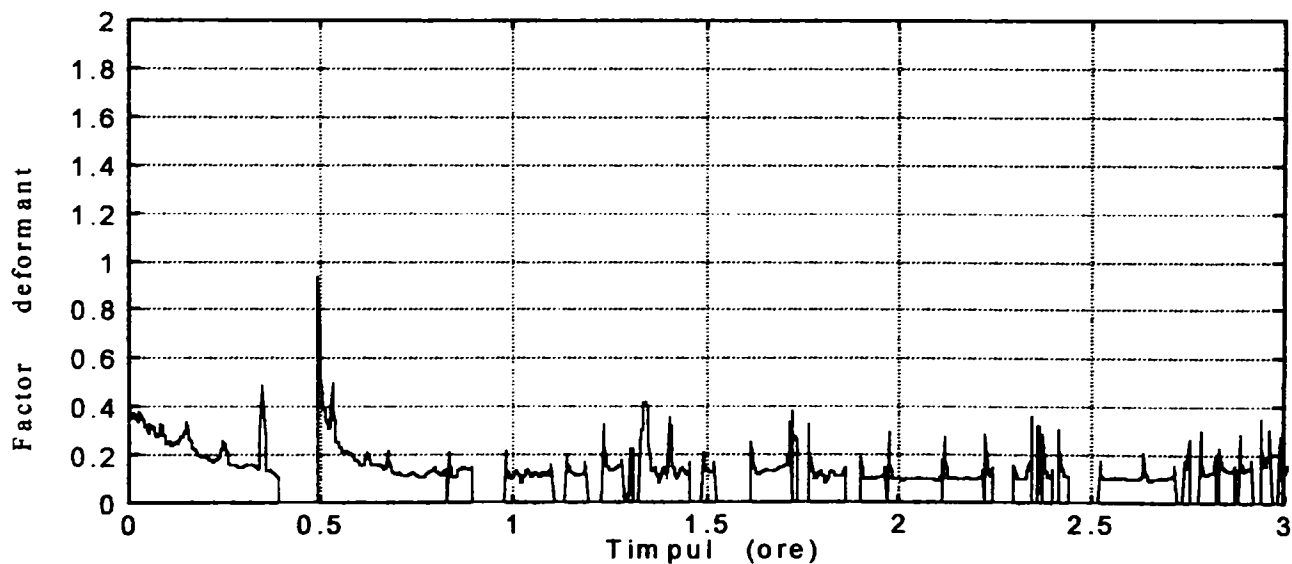
Fig. 3.14. Variația puterii deformante pe durata unei șarje, calculată cu relația (2.22), utilizând programul prezentat în anexa I.5.



**Fig. 3.15. Variația factorului de putere pe durata unei șarje, calculat cu relația (2.24), utilizând programul prezentat în anexa I.5.**



**Fig. 3.16. Variația factorului reactiv pe durata unei șarje, calculat cu relația (2.25), utilizând programul prezentat în anexa I.5.**



**Fig. 3.17. Variația factorului deformant pe durata unei șarje, calculat cu relația (2.26), utilizând programul prezentat în anexa I.5.**



Acest proces de reglare a tensiunii de alimentare de pe linia de joasă tensiune precum și a curentului arcului se reflectă parțial și în formele de variație a puterilor active și reactive pe durata șarjei. În figura 3.12 se observă faptul că forma de variație a puterii active este similară celei a puterii aparente. De asemenea, variația factorului de putere, prezentată în figura 3.15 arată că pe toată durata șarjei valoarea acestuia se găsește în domeniul  $0,6 - 0,9$ , având o valoare mai mică în faza de oxidare și o valoare mai mare în faza de reducere. În faza de topire, deși puterea aparentă și cea activă sunt mai mici, factorul de putere se situează în jurul valorii de  $0,8$ .

Analizând variația puterii reactive, prezentată în figura 3.13, se observă că în faza de topire are o valoare mai mică, în faza de oxidare are o valoare mai mare în timp ce la sfârșitul perioadei de elaborare a șarjei, în faza de reducere, valoarea acesteia scade. Această formă de variație a puterii reactive se reflectă în forma de variație a factorului reactiv, prezentată în figura 3.16, în care se observă că în faza de topire și începutul oxidării valoarea acestuia se găsește în domeniul  $0,6 - 0,8$ , în faza de oxidare și începutul reducerii valoarea se găsește în domeniul  $0,8 - 1,2$  iar în faza de reducere scade din nou în domeniul  $0,5 - 0,8$ .

În ceea ce privește variația puterii deformante, prezentată în figura 3.14, se observă că cea mai mare valoare se obține în faza de topire după care puterea deformantă scade spre o valoare aproximativ constantă pe durata celorlalte faze. Aceeași formă de variație se constată și în cazul factorului deformant, a cărui variație este prezentată în figura 3.17. Această formă de variație a puterii deformante demonstrează faptul că în faza de topire ponderea componentelor de frecvență diferită de cea a fundamentalei față de fundamentală este mai mare decât în celelalte faze ale procesului tehnologic.

Din cele prezentate a rezultat faptul că, indiferent de faza tehnologică, **curenții și tensiunile de pe linia de joasă tensiune sunt deformate**. De asemenea analizând formele de variație a puterilor în regim deformant pe fiecare fază se constată **caracterul dezechilibrat al consumatorului**. Dezechilibrul se păstrează indiferent de faza tehnologică, fapt care rezultă și din figurile 3.18 și 3.19 în care sunt reprezentate pe un interval de **6 minute** puterile în regim deformant în faza de topire, respectiv în cea de reducere.

Așa cum s-a prezentat anterior, atât formele de undă ale curenților și tensiunilor cât și puterile și factorii de putere în regim deformant depind de faza tehnologică în care se găsește șarja respectivă. Din acest motiv este de așteptat ca și valorile **distorsiunii armonice totale și parțial ponderate** să depindă de faza tehnologică. Pe baza datelor obținute prin rularea programului prezentat în **anexa I.5** s-au obținut valorile distorsiunii armonice totale și parțial ponderate pentru fiecare fereastră de date achiziționate. În figura 3.20 este prezentată forma de variație a distorsiunii armonice totale, iar în figura 3.21 a distorsiunii armonice parțial ponderate pentru undele de curent și de tensiune. Prin faptul că valoarea medie a ambelor distorsiuni pentru undele de tensiune este mai mare decât cea pentru undele de curent rezultă că pe linia de alimentare de joasă tensiune unda tensiunii este mai distorsionată decât unda curentului. Din punct de vedere al distorsiunii armonice totale, în urma măsurătorilor se constată că s-au obținut valori în domeniul  $5 - 25\%$  pentru tensiune, respectiv  $5 - 35\%$ , mai mari în faza de topire, pentru curent. Comparând aceste valori cu standardul **CEI 1000-3-2** în care valoarea distorsiunii armonice totale admisibilă pe liniile de joasă tensiune este de  $8\%$  (**CIGRE Sesiunea 1992**), [55], rezultă că **instalația existentă în prezent nu se încadrează în standardele internaționale**. Din punct de vedere al structurii de armonici, se poate trage concluzia că, datorită faptului că raportul între distorsiunea armonică a undelor de tensiune și a celor de curent este mai mare în cazul distorsiunii armonice parțial ponderate decât în cazul distorsiunii armonice totale, amplitudinea armonicilor de ordin mai mare raportată la amplitudinea fundamentalei este mai mare în cazul undei de tensiune. Aceasta arată că în cazul undei de tensiune ponderea armonicilor de ordin superior este mai mare decât în cazul undei curentului.

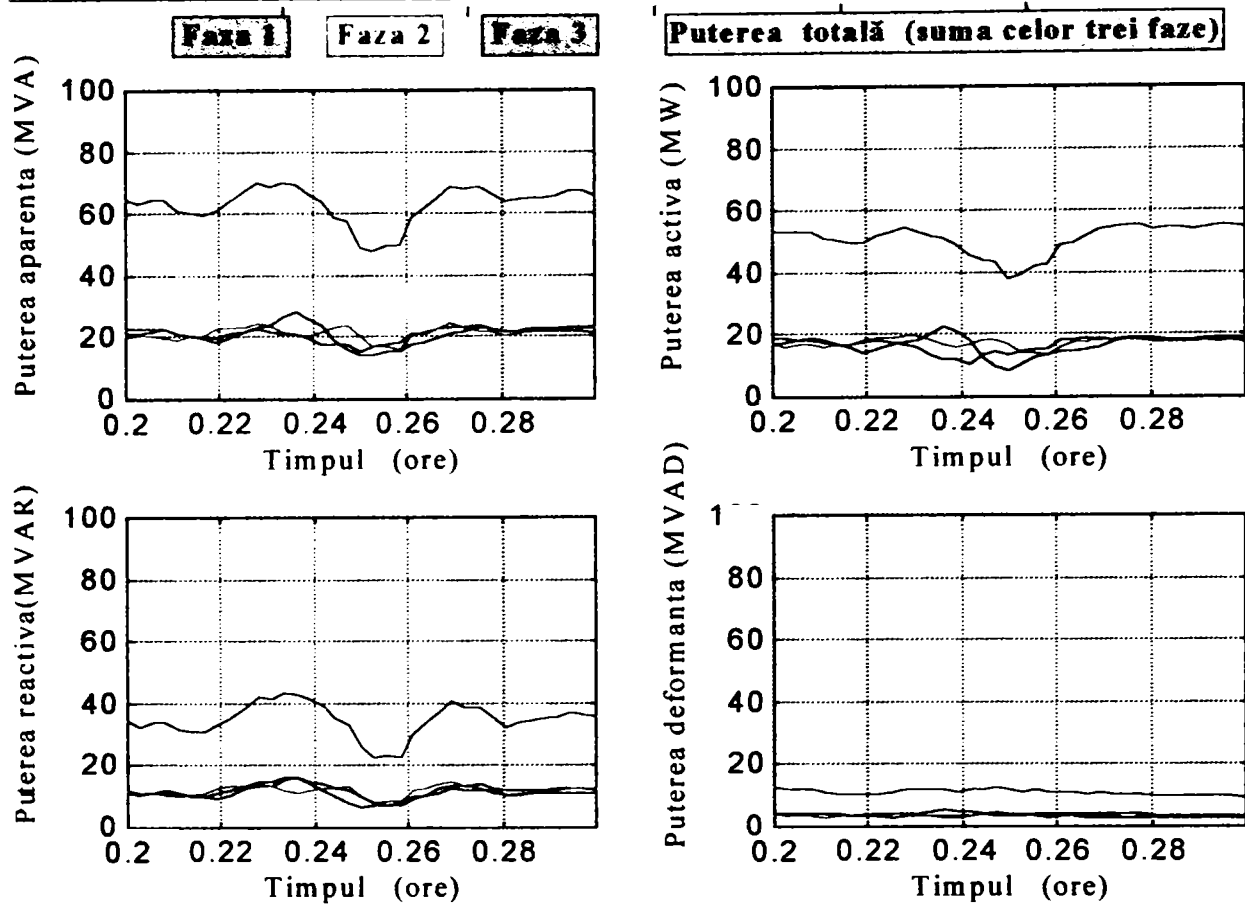


Fig. 3.18. Variația puterilor în regim deformant pe durata a 6 minute, în faza de topire pe linia de alimentare de joasă tensiune.

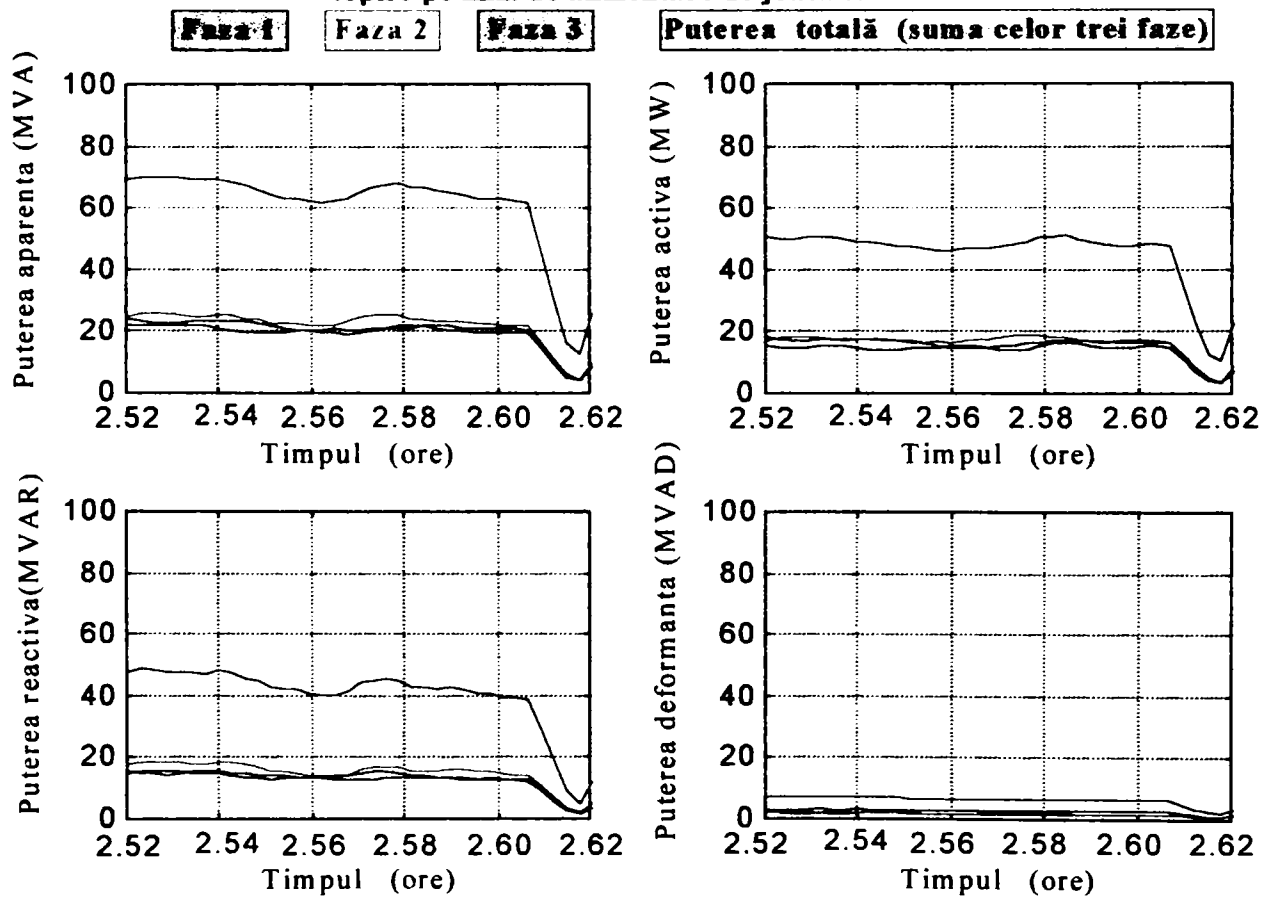


Fig. 3.19. Variația puterilor în regim deformant pe durata a 6 minute, în faza de reducere pe linia de alimentare de joasă tensiune.



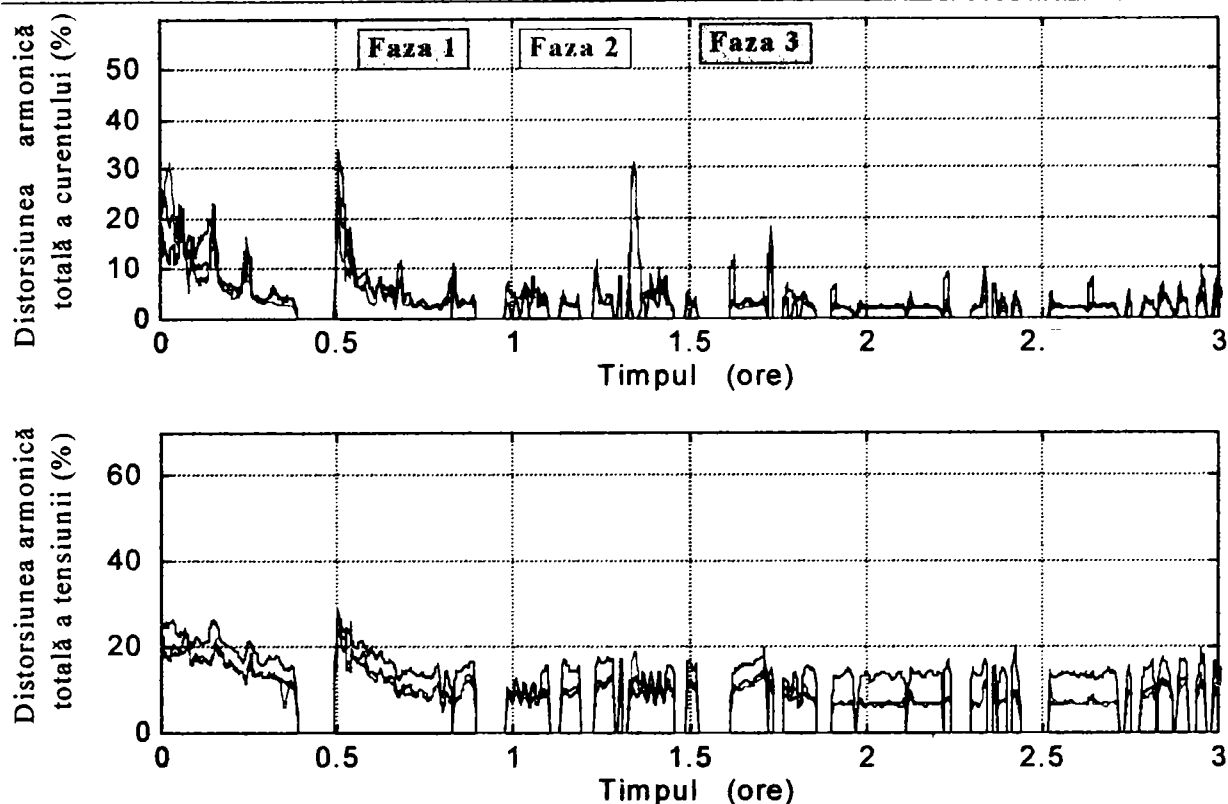


Fig. 3.20. Variația distorsiunii armonice totale pe linia de joasă tensiune, calculată cu relația (2.14), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

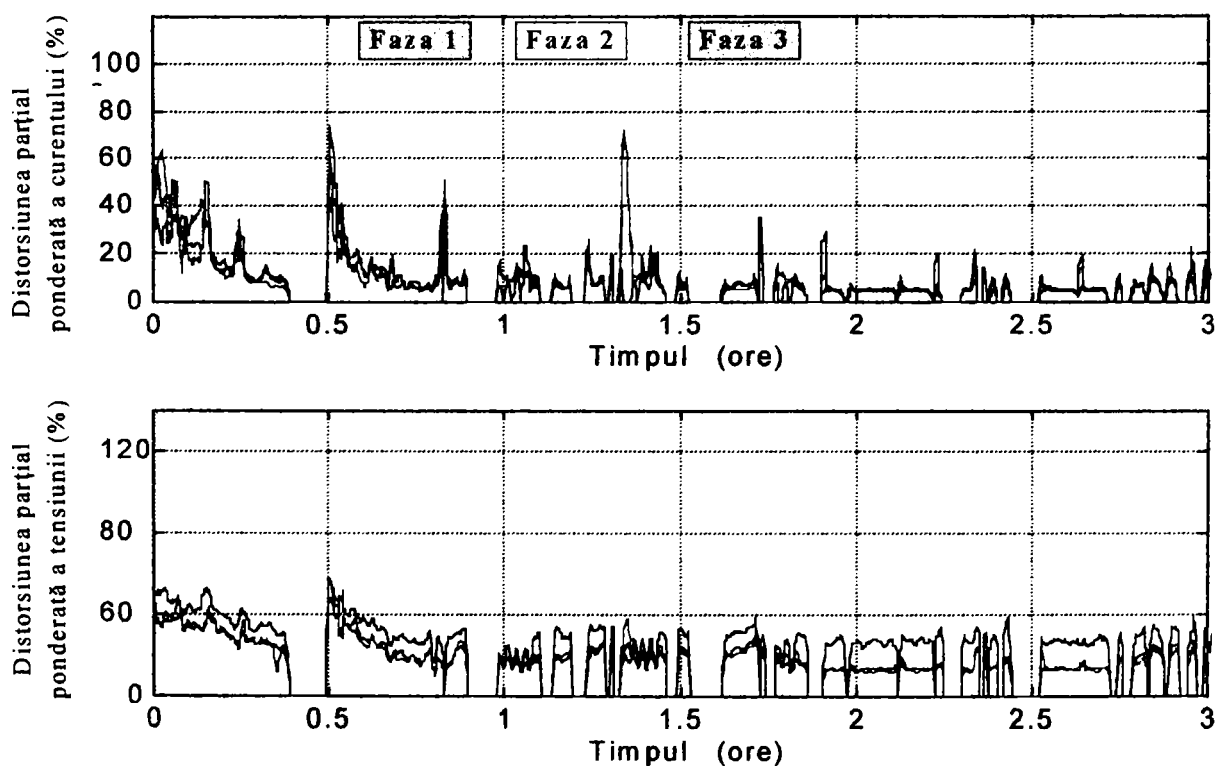


Fig. 3.21. Variația distorsiunii armonice parțial ponderate pe linia de joasă tensiune, calculată cu relația (2.15), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

### 3.3.2. Prezentarea rezultatelor măsurătorilor efectuate pe linia de medie tensiune

Ca și în cazul măsurării mărimilor electrice de pe linia de alimentare de joasă tensiune, măsurarea mărimilor electrice de pe linia de medie tensiune au fost efectuate pe durata a trei șarje, acest paragraf prezentând rezultatele obținute pentru o șarjă, considerată ca fiind cea mai reprezentativă.

Pentru a se putea realiza o comparație a rezultatelor măsurătorilor efectuate pe cele două linii de alimentare, ca șarje reprezentative au fost alese șarje din același schimb și anume schimbul I.

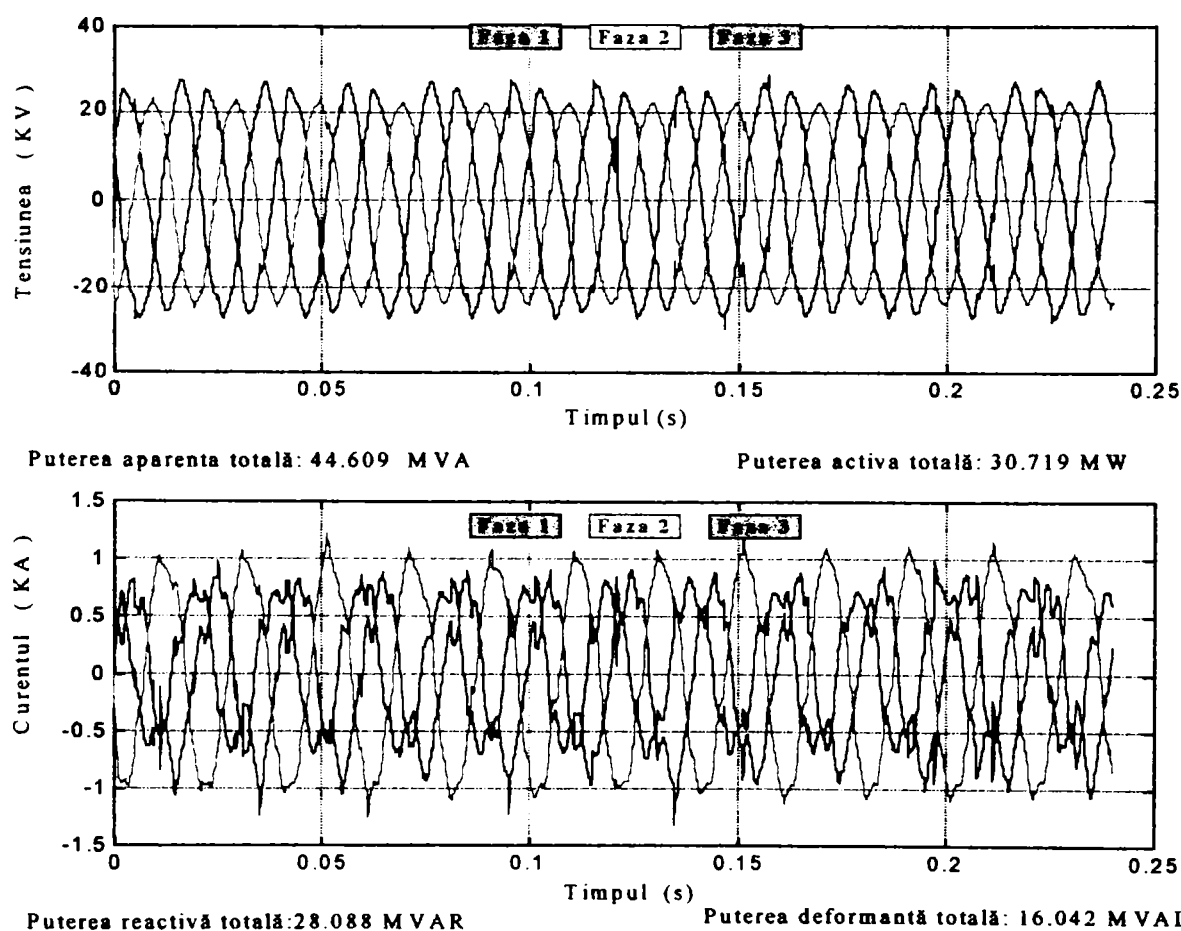
Rezultatele prezentate se referă la șarja elaborată în data de 23.05.2000 care a conținut 114,4 tone de oțel elaborat și a avut compoziția următoare:

- Carbon	- 491,92 Kg	- 0,430%
- Mangan	- 663,52 Kg	- 0,580%
- Siliciu	- 22,88 Kg	- 0,020%
- Sulf	- 34,32 Kg	- 0,030%
- Fosfor	- 10,16 Kg	- 0,014%
- Crom	- 125,84 Kg	- 0,110%
- Cupru	- 171,60 Kg	- 0,150%
- Fier	- 112757,00 Kg	- 98,564%
- Alte elemente	- 122,76 Kg	- 0,102%

Începutul elaborării șarjei a avut loc la ora 08:10, procesul propriu-zis de achiziție al datelor începând la ora 08:15.

Analiza efectuată a fost realizată din punct de vedere al formei de variație în timp și a caracteristicilor spectrale a curenților și tensiunilor, a formei de variație a puterilor în regim deformant precum și a factorilor de putere, dar și a formei de variație a armonicilor de curent și de tensiune, necesare proiectării sistemului de compensare al cuptorului.

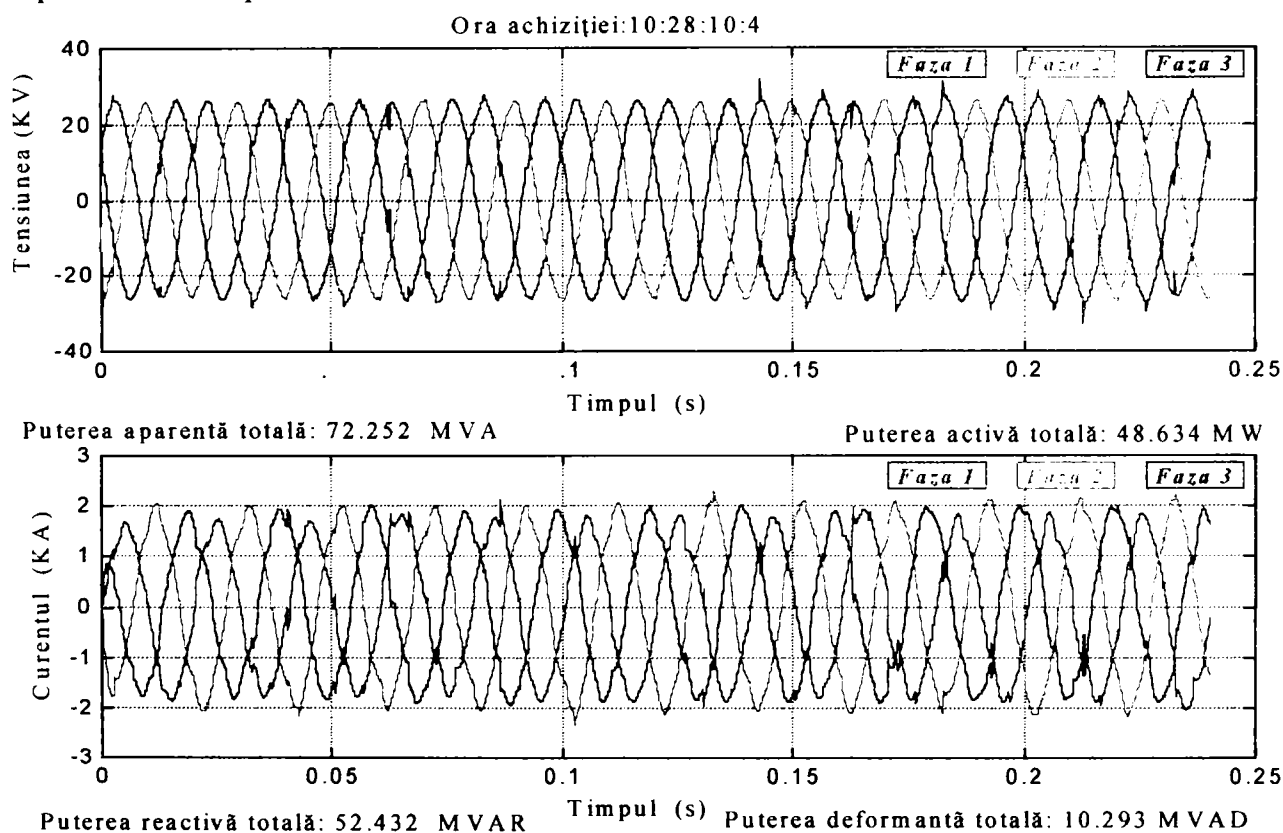
Ora achiziției: 8:22:15:0



**Fig. 3.22. Forma de variație a tensiunilor și curenților pe linia de medie tensiune în faza de topire după 12 minute de la începerea elaborării șarjei.**

Atât reprezentările formelor de undă cât și a caracteristicilor spectrale ale undelor de curent și de tensiune au fost realizate utilizând programul prezentat în *anexa I.4*, în care au fost modificate doar constantele transformatoarelor de curent și de tensiune utilizate.

În ceea ce privește *formele de undă ale curenților și tensiunilor* de pe linia de alimentare de medie tensiune, prezentate în figura 3.22, în faza de topire se constată atât prezența unei puternice distorsiuni a acestora cât și a unui dezechilibru datorat inegalității amplitudinilor de pe cele trei faze.



**Fig. 3.23. Forma de variație a tensiunilor și curenților pe linia de medie tensiune în faza de reducere după 2 ore și 13 minute de la începerea elaborării șarjei.**

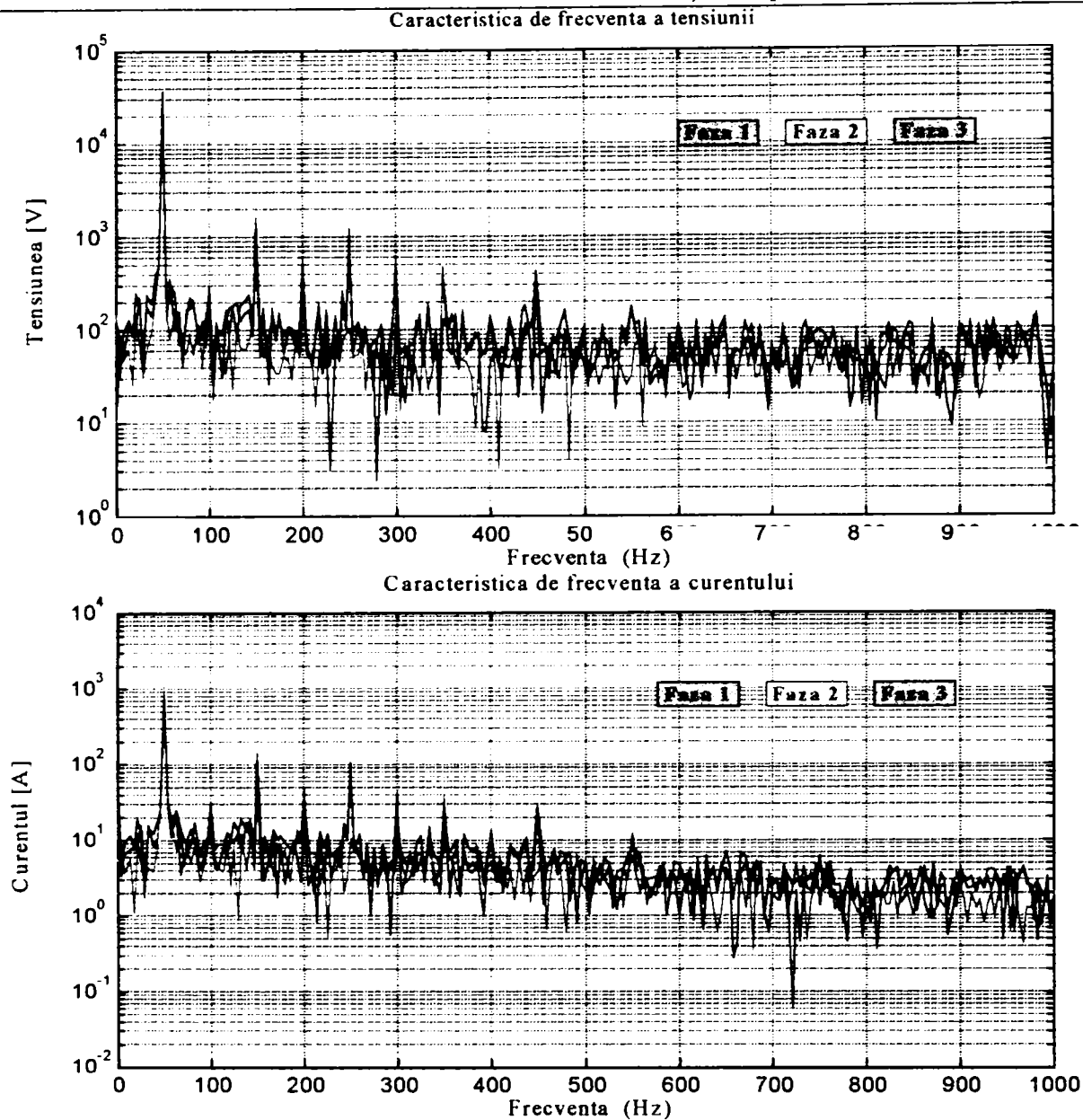
Ca și în cazul liniei de alimentare de joasă tensiune, pe linia de alimentare de medie tensiune în faza de ardere stabilă a arcului electric se constată atât reducerea distorsiunilor undelor curentului și tensiunii cât și a dezechilibrului pe cele trei faze, fapt care rezultă din figura 3.23.

În mod similar cu prelucrarea datelor achiziționate pe linia de alimentare de joasă tensiune, *caracteristicile spectrale ale undelor curentului și tensiunii* au fost realizate utilizând programul prezentat în *anexa I.4*, obținându-se reprezentările din figura 3.24, pentru faza de topire, respectiv din figura 3.25, pentru faza de ardere.

În cazul tensiunii se constată faptul că în faza de topire sunt prezente atât armonicile (de ordin impar dar și de ordin par) cât și interarmonicile în timp ce în faza de ardere stabilă a arcului pe lângă fundamentală mai sunt prezente armonicile de ordin 5 și 7, celelalte fiind puternic atenuate.

În cazul curentului în faza de topire, în mod asemănător cu tensiunea, se observă prezența atât a armonicilor de ordin impar cât și a celor de ordin par în timp ce în faza de ardere stabilă a arcului electric se observă prezența armonicilor de ordine 5 și 7 cu amplitudini mai mari, dar și a celor de ordin 11 și 13, însă de amplitudini mai reduse.

Prezența armonicilor de ordin par în faza de topire arată că în această fază arcul electric are o comportare specifică unei variații puternic aleatoare a lungimii arcului, asemănătoare cu cea rezultată prin simulare, prezentată în figura 2.30.



**Fig. 3.24. Caracteristica spectrală a tensiunilor și curentilor pe linia de medie tensiune în faza de topire după 12 minute de la începerea elaborării șarjei.**

Este de menționat faptul că deși în faza de topire se constată prezența practic a armonicilor de orice ordin, în faza de ardere stabilă a arcului atât unda de tensiune cât și cea de curent se caracterizează prin absența armonicilor a căror ordin este un multiplu de trei, acest fapt datorându-se conexiunilor înfășurărilor transformatorului cuptorului. Deoarece armonicile de rang multiplu de trei ale curentului electric formează sisteme de secvență zero (homopolar), propagarea lor este blocată în cazul conexiunilor stea fără conductor neutru.

Analiza formei de variație a **puterilor în regim deformant**, a **factorilor de putere** precum și a **distorsiunilor armonice totale și parțial ponderate** pentru linia de alimentare de medie tensiune s-a realizat utilizând programul prezentat în **anexa I.5**.

În figura 3.26 este prezentată forma de variație a puterii aparente pe întreaga durată a șarjei de elaborare a oțelului în care se observă că, așa ca și în cazul liniei de alimentare de joasă tensiune, în faza de topire puterea aparentă este mai mică în timp ce în fazele de afânare și oxidare este mai mare, fapt care se datorează comutării transformatorului cuptorului pe o treaptă superioară. Astfel, în faza de topire se utilizează transformatorul inițial în conexiunea **17  $\Delta$**  în timp ce în fazele de ardere stabilă a arcului electric transformatorul este conectat în conexiunea **21  $\Delta$**  (**anexa III**).



Și în cazul liniei de alimentare de medie tensiune forma de variație a puterii active este similară formei de variație a puterii aparente, fapt care rezultă din figura 3.27. De asemenea, din figura 3.30 se observă că valoarea factorului de putere se găsește în domeniul  $0,5 - 0,9$ , valoarea mai mare fiind atinsă pe durata arderii stabile a arcului electric iar valoarea mai mică pe durata fazei de topire.

În figurile 3.28 și 3.31 este prezentată forma de variație a puterii reactive și a factorului reactiv pe durata unei șarje. Se observă că cea mai mică valoare a puterii reactive se obține în faza de oxidare iar în faza de dezoxidare cea mai mare valoare. De asemenea se observă că forma de variație a factorului reactiv este în corelație cu cea a puterii reactive. În mod asemănător, în figurile 3.29 și 3.31 este prezentată forma de variație a puterii deformante și a factorului deformant în care se observă că valoarea cea mai mare a puterii deformante se obține la începutul fazei de oxidare fapt, care se explică prin aceea că în faza de topire, datorită utilizării transformatorului cuptorului pe o treaptă de tensiune mai mică amplitudinea armonicilor care se transmit în primarul transformatorului este mai redusă, deci și puterea deformantă.

Pentru a se observa dezechilibrul între cele trei faze au fost reprezentate în figurile 3.33 și 3.34 variațiile puterilor în regim deformant pe durata a **6 minute** atât în faza de topire cât și în cea de ardere stabilă a arcului electric. Se constată că și pe linia de alimentare de medie tensiune dezechilibrul este prezent indiferent de faza tehnologică de elaborare a șarjei.

În figura 3.35 este reprezentată forma de variație a **distorsiunii armonice totale** a curentului respectiv a tensiunii, iar în figura 3.36 a **distorsiunii armonice parțial ponderate** pe întreaga durată a șarjei. Se observă că și în cazul liniei de alimentare de medie tensiune valorile coeficienților de distorsiune depind de faza tehnologică și anume au valori mai mari în faza de topire și valori mai reduse în fazele de oxidare și dezoxidare. Analizând ambele figuri se constată că atât în cazul distorsiunii armonice totale cât și în cazul distorsiunii armonice parțial ponderate valoarea acestora este mai mare în cazul undei de curent decât în cazul celei de tensiune. Din acest motiv rezultă că pe linia de alimentare de medie tensiune unda curentului este mai deformată decât unda tensiunii.

Din punct de vedere al structurii de armonici se poate observa că valoarea medie a raportului între coeficienții de distorsiune ai undelor de curent și de tensiune este mai mare în cazul coeficientului de distorsiune armonică totală decât în cazul coeficientului de distorsiune armonică parțial ponderată, rezultând că ponderea armonicilor de ordin superior este mai mare în cazul undei de curent față de unda de tensiune.

În urma măsurătorilor s-au obținut valori pentru distorsiunea armonică totală în domeniul **8 - 12%** pentru tensiune, respectiv **10 - 40%** pentru curent. Comparând aceste valori cu standardul **CEI 1000-3-2** în care valoarea distorsiunii armonice totale admisibilă pe liniile de medie tensiune este de **8%** (*CIGRE Sesiunea 1992*), [55], rezultă că **instalația existentă în prezent nu se încadrează în standardele internaționale.**

Deoarece instalația electrică a cuptorului electric cu arc de la **Oțelăria OE2** de la **Siderurgica S.A. Hunedoara** nu are prevăzut nici un sistem de îmbunătățire a indicatorilor de utilizare a energiei electrice se pune problema proiectării unui astfel de sistem. Din acest motiv este necesară atât proiectarea unui sistem de compensare a puterii reactive și de filtrare a armonicilor cât și de echilibrare a sarcinii pe linia de medie tensiune. În vederea proiectării sistemului de compensare a puterii reactive este necesară cunoașterea formei de variație pe linia de alimentare de medie tensiune a puterilor în regim deformant precum și a factorilor de putere, fapt determinat până în momentul de față. Proiectarea filtrelor pe armonici necesită, așa cum se va vedea ulterior, cunoașterea pentru linia de alimentare de medie tensiune a puterii active și reactive debitate pe fiecare armonică precum și a formei de variație a valorilor efective a curentului și tensiunii pentru armonică respectivă.

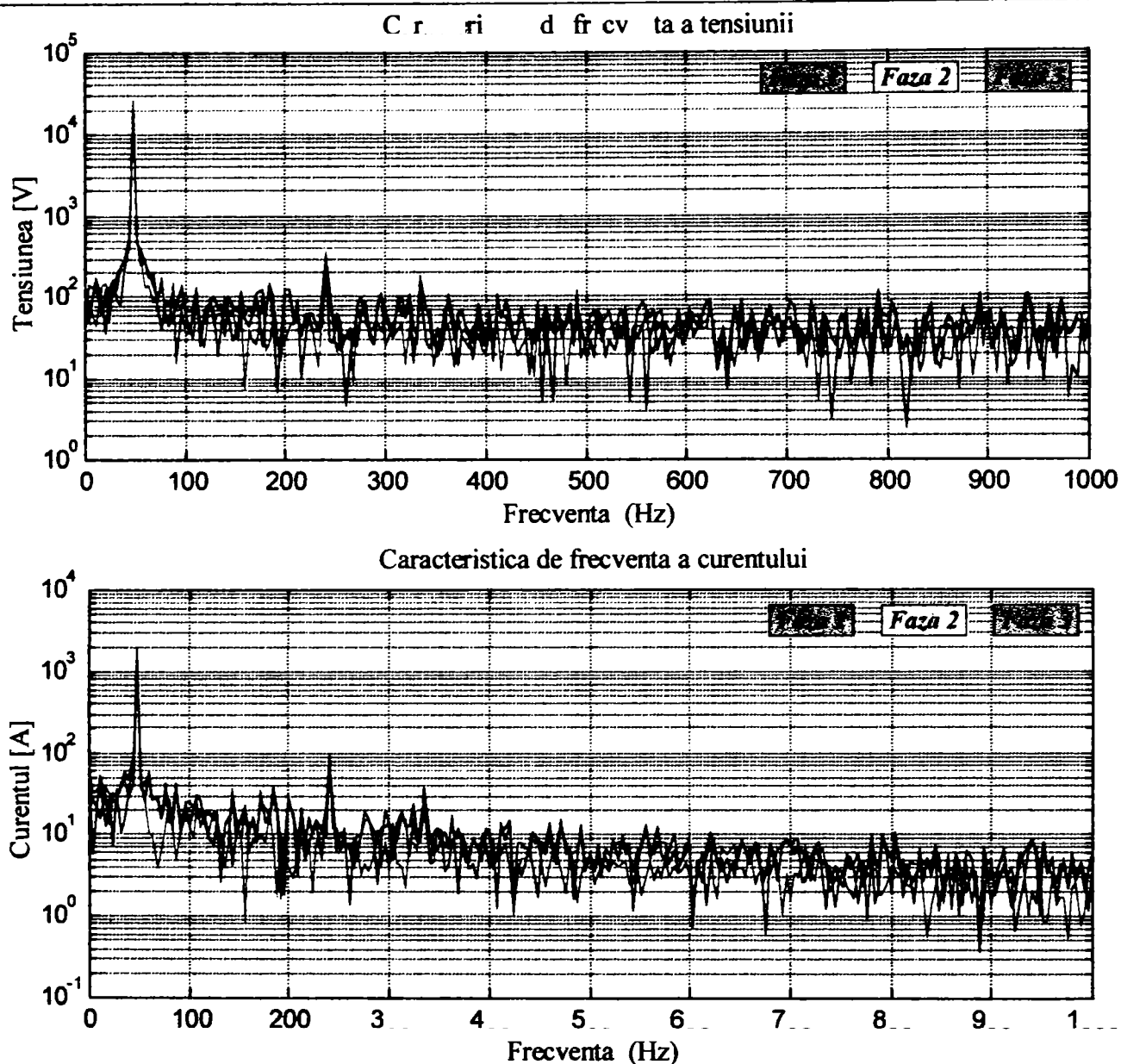


Fig. 3.25. Caracteristica spectrală a tensiunilor și curenților pe linia de medie tensiune în faza de reducere după 2 ore și 13 minute de la începerea elaborării șarjei.

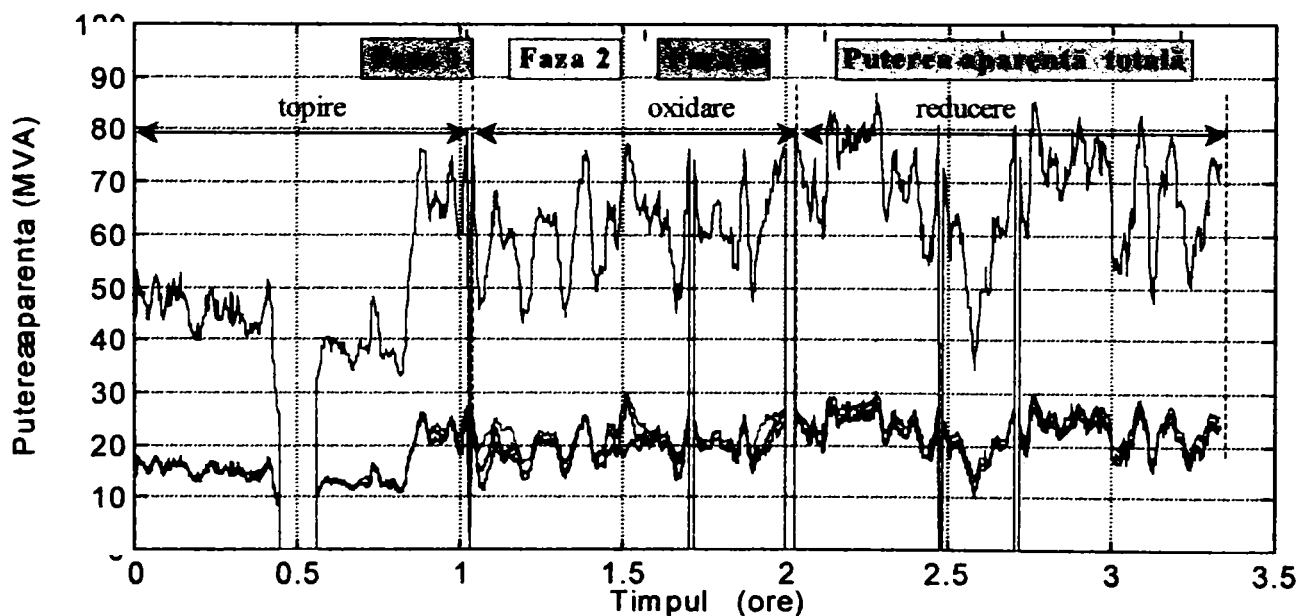


Fig. 3.26. Variația puterii aparente pe linia de medie tensiune pe durata unei șarje, calculată cu relațiile (2.27) și (2.28), utilizând programul prezentat în anexa I.5.



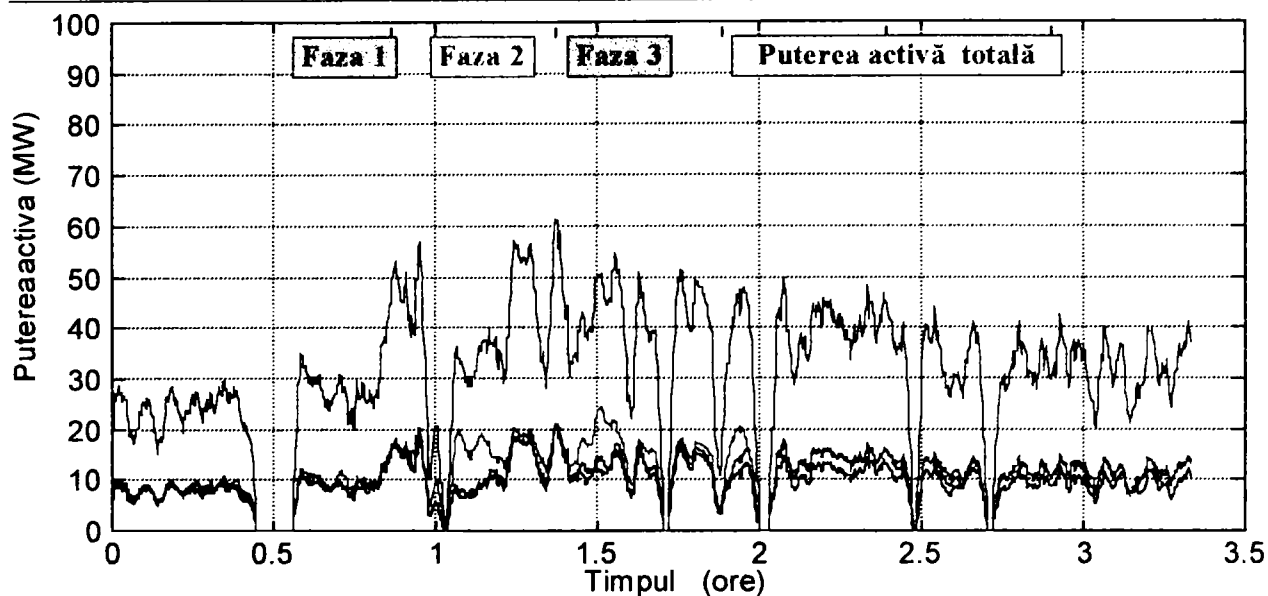


Fig. 3.27. Variația puterii active pe durata unei șarje, calculată cu relația (2.20), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

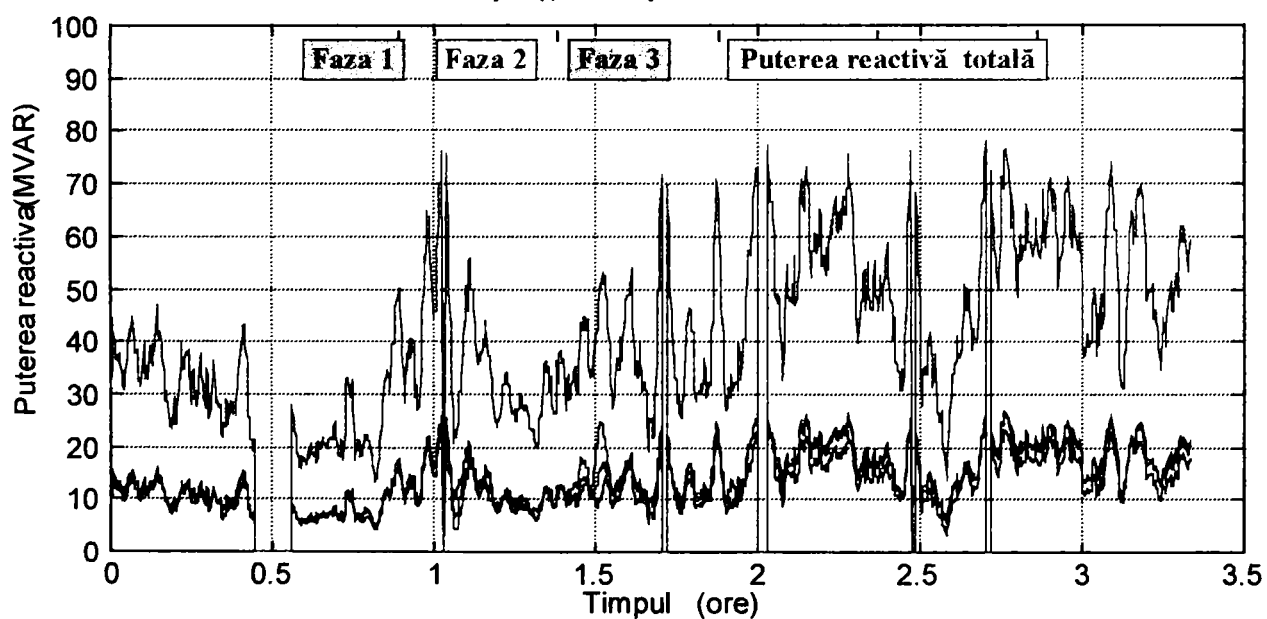


Fig. 3.28. Variația puterii reactive pe linia de medie tensiune pe durata unei șarje, calculată cu relația (2.21), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

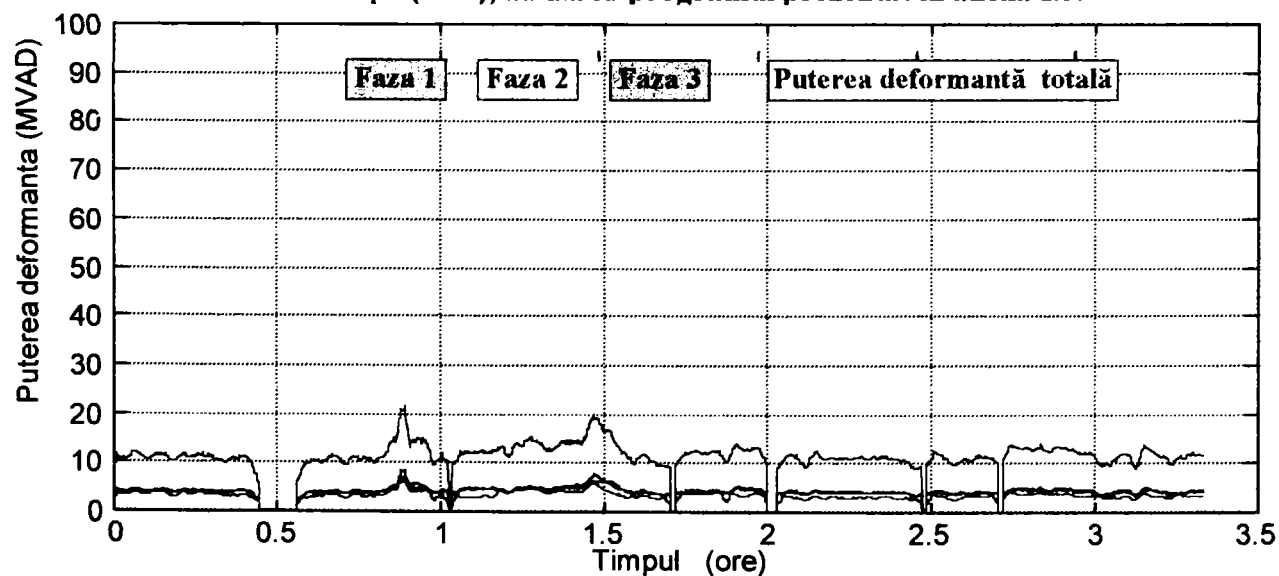


Fig. 3.29. Variația puterii deformante pe linia de medie tensiune pe durata unei șarje, calculată cu relația (2.22), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

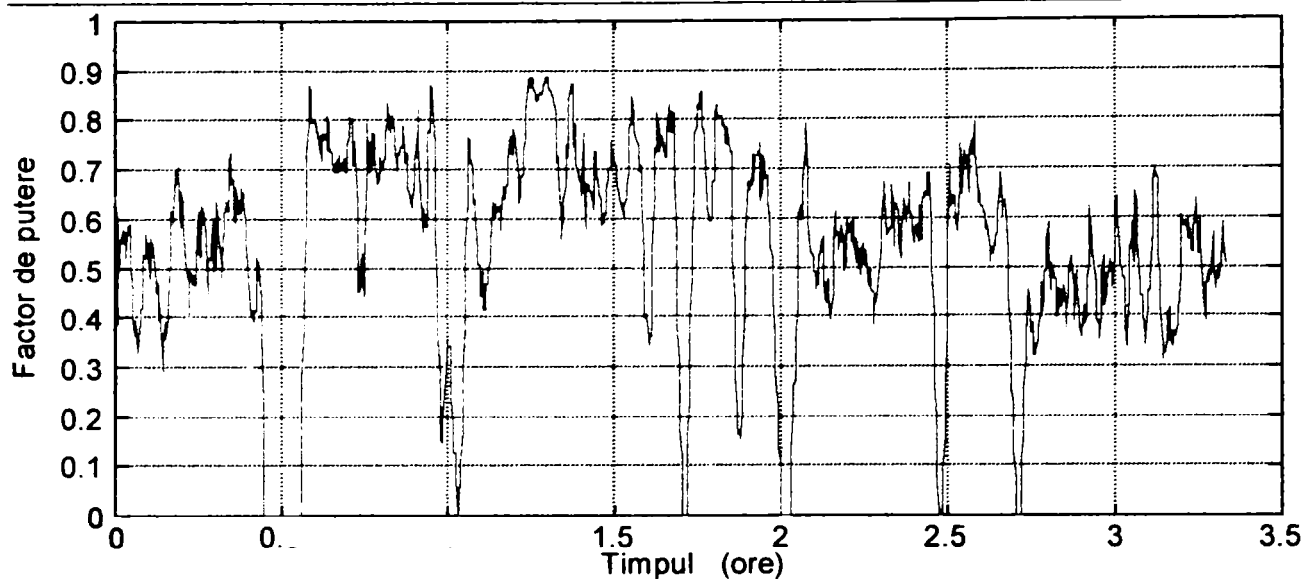


Fig. 3.30. Variația factorului de putere pe linia de medie tensiune pe durata unei șarje, calculat cu relația (2.24), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

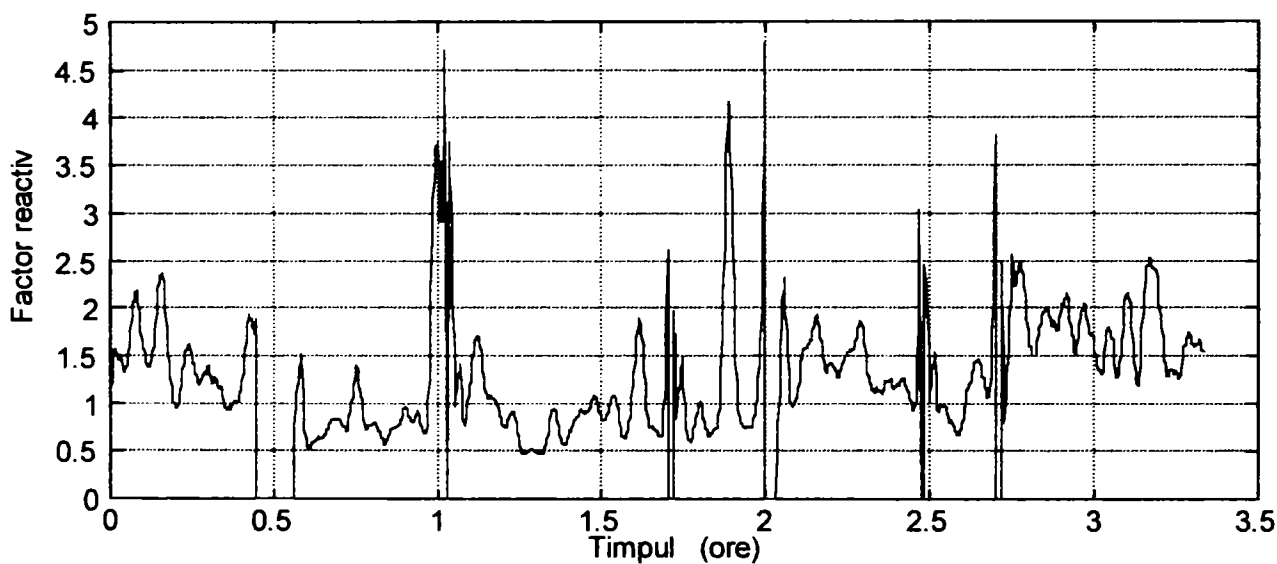


Fig. 3.31. Variația factorului reactiv pe linia de medie tensiune pe durata unei șarje, calculat cu relația (2.25), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

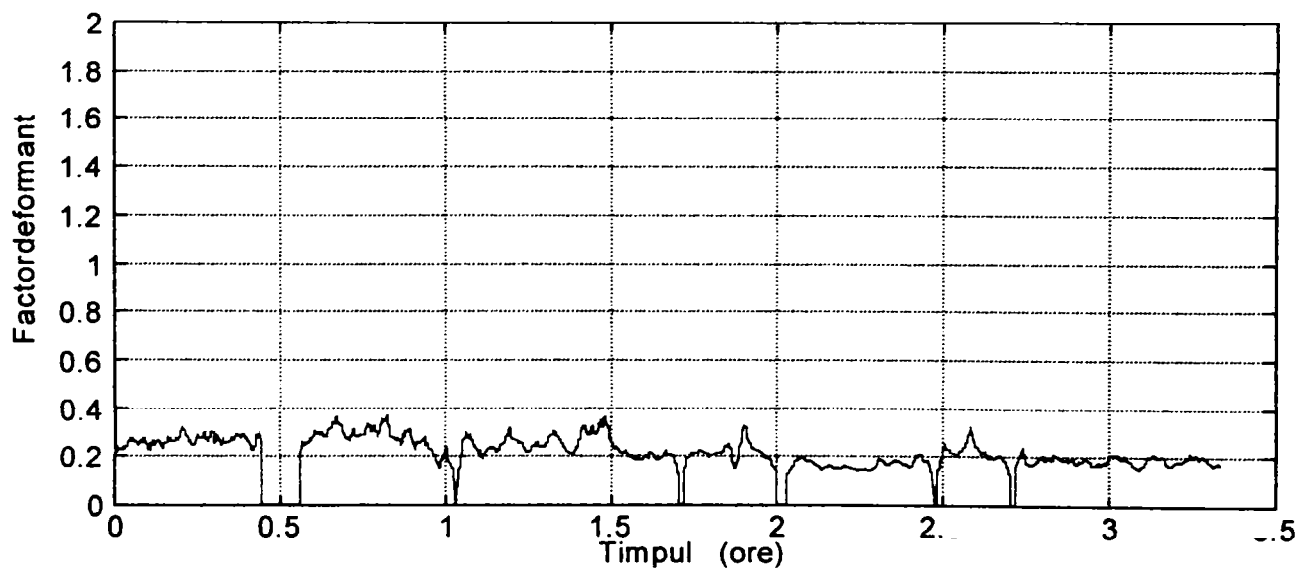


Fig. 3.32. Variația factorului deformație pe linia de medie tensiune pe durata unei șarje, calculat cu relația (2.26), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

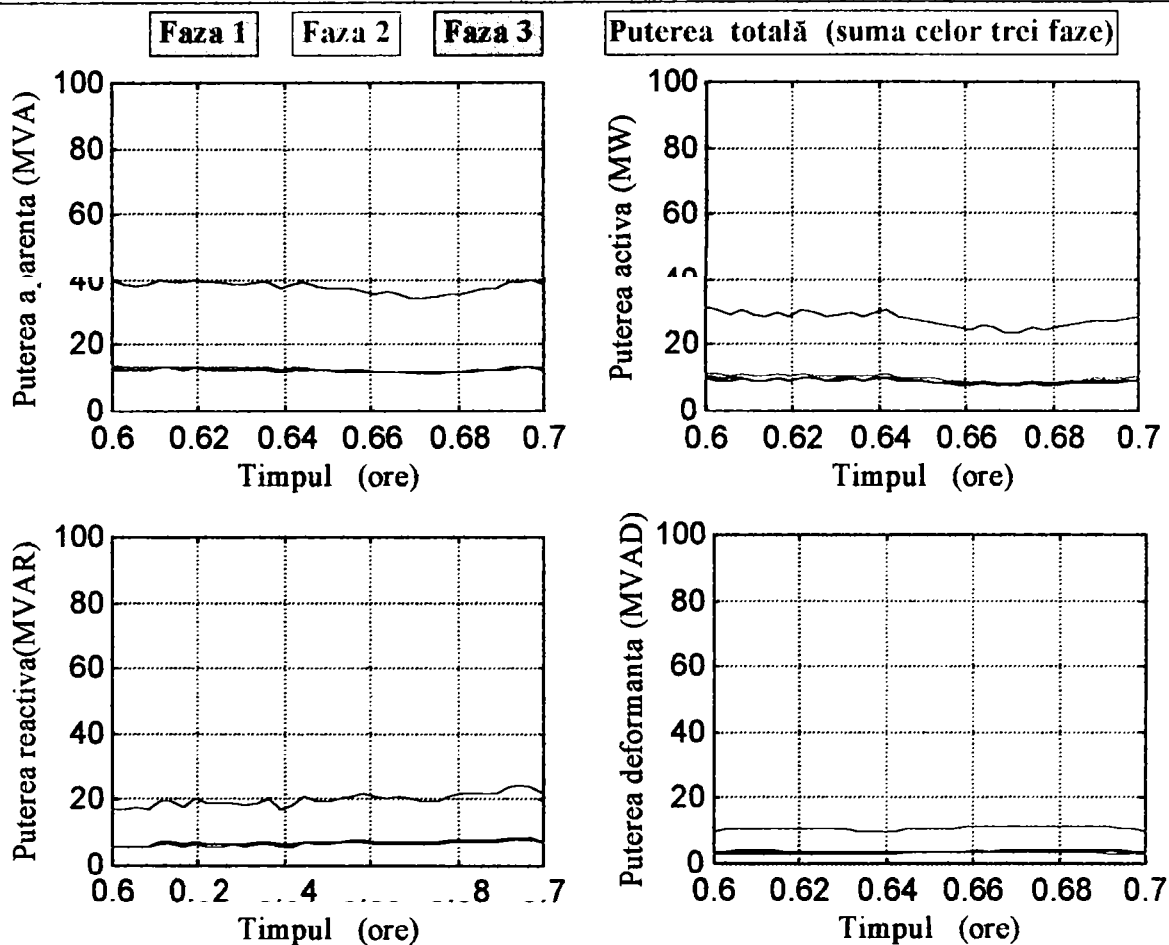


Fig. 3.33. Variația puterilor în regim deformant pe durata a 6 minute, în faza de topire pe linia de alimentare de medie tensiune.

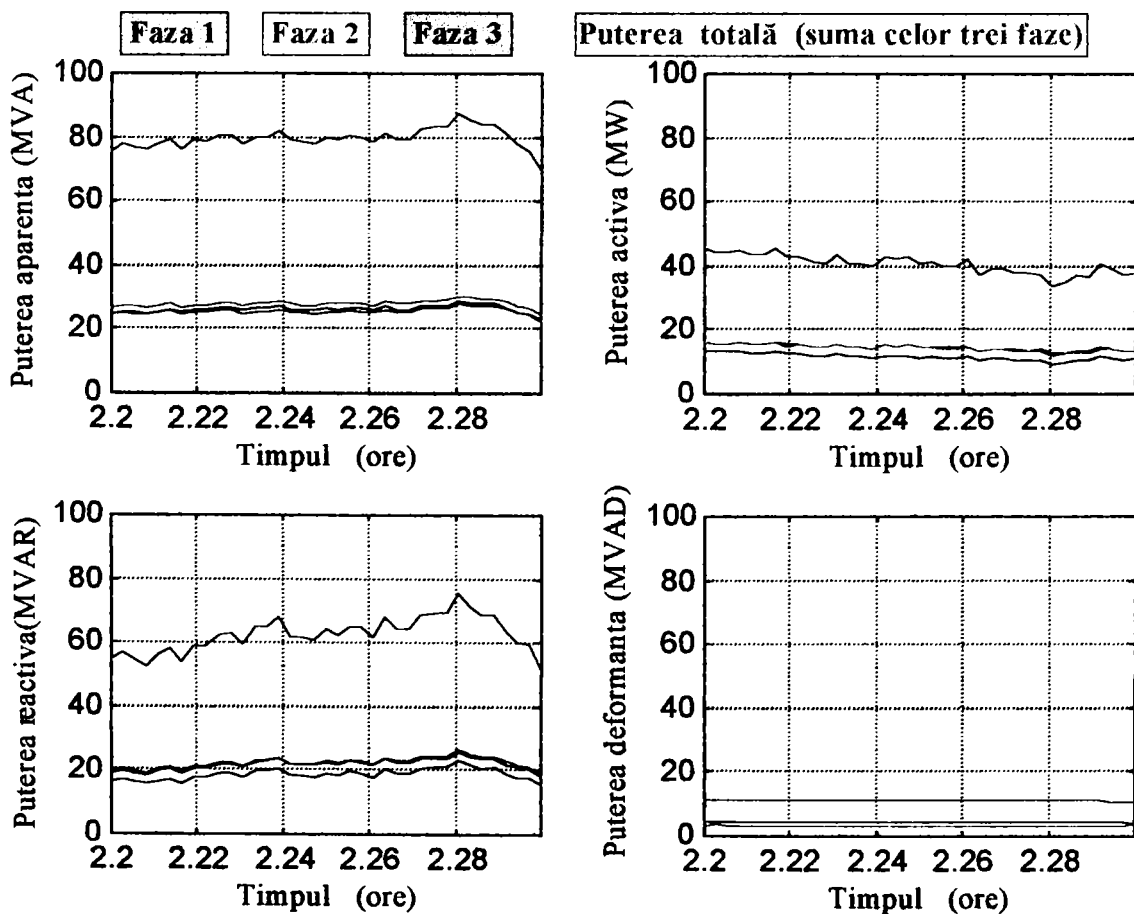


Fig. 3.34. Variația puterilor în regim deformant pe durata a 6 minute, în faza de reducere pe linia de alimentare de medie tensiune.

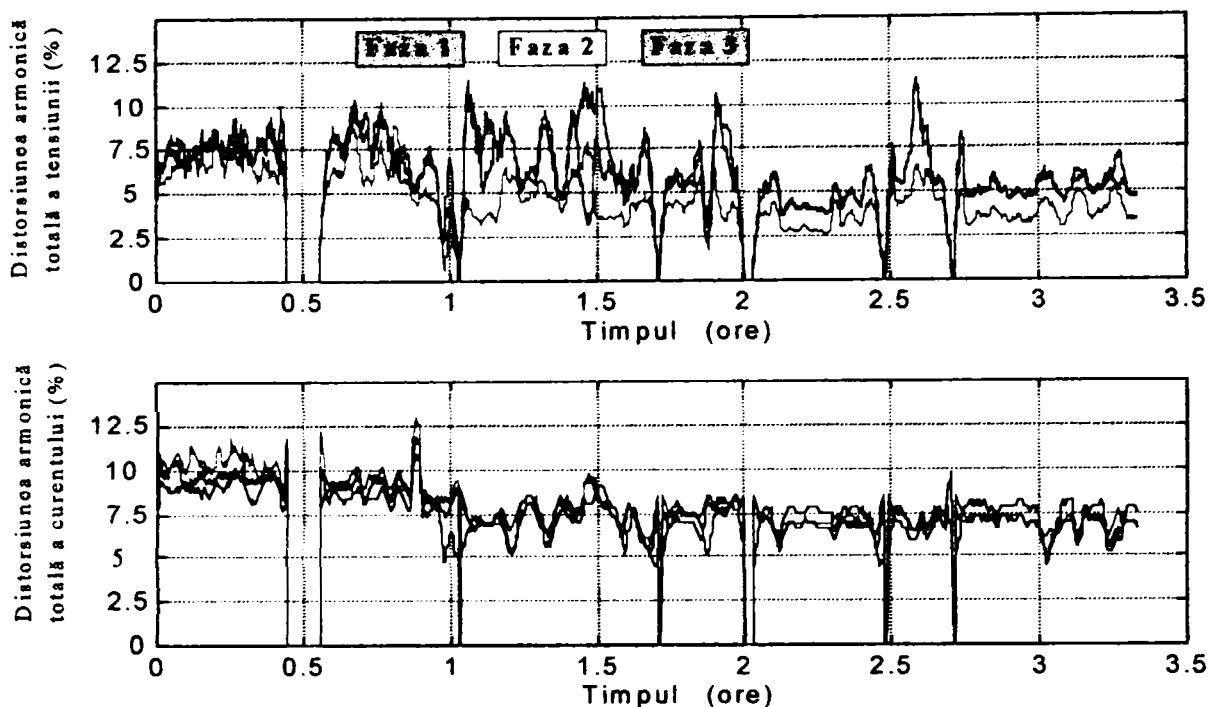


Fig. 3.35. Variația distorsiunii armonice totale a curentului și tensiunii pe linia de medie tensiune, calculată cu relația (2.14), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

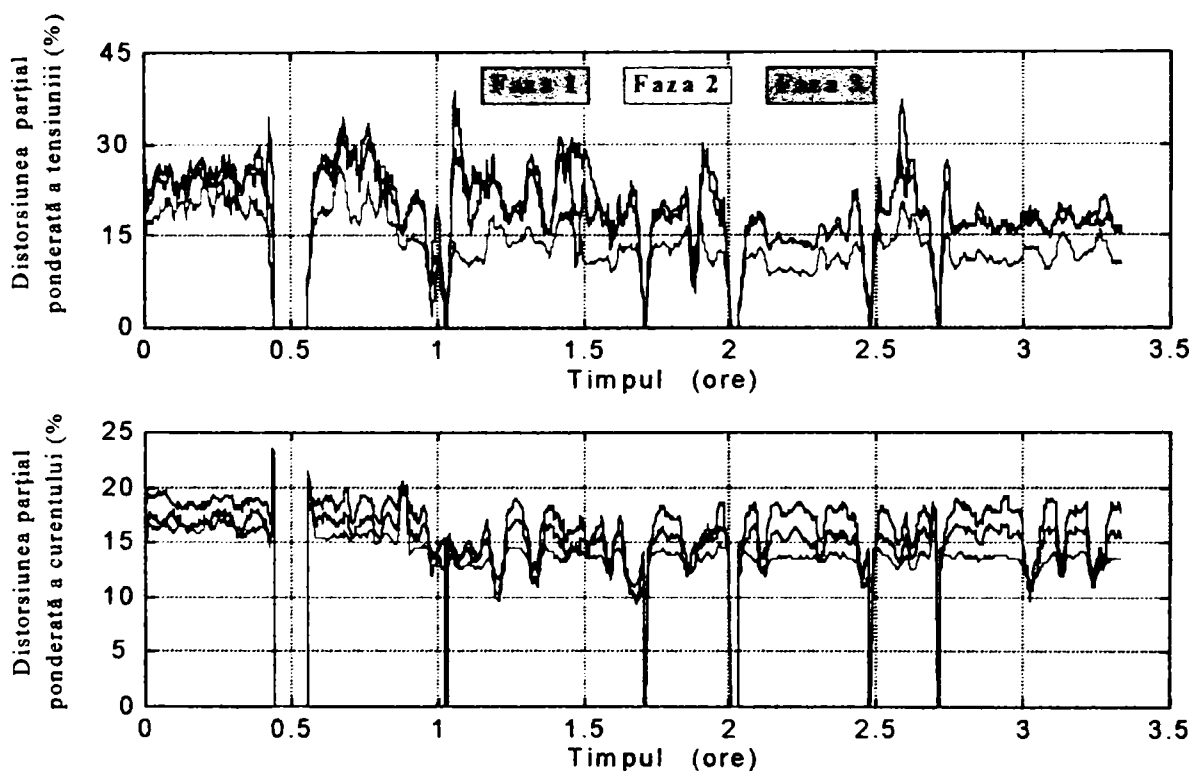


Fig. 3.36. Variația distorsiunii parțial ponderate a curentului și tensiunii pe linia de medie tensiune, calculată cu relația (2.15), utilizând programul prezentat în anexa I.5.

În urma prelucrării datelor achiziționate utilizând programul prezentat în *anexa I.5* s-au calculat pentru fiecare fereastră de date puterile active și reactive debitate pe primele 20 de *armonici* precum și valorile efective ale curenților și tensiunilor pentru aceste armonici. Rezultatele obținute sunt prezentate în *anexele IV.1* și *IV.2*.

În *anexa IV.1* este prezentată variația puterilor active și reactive pentru armonicile considerate ca fiind semnificative din punct de vedere al dimensionării ulterioare a filtrelor pe armonici, filtre conectate la linia de alimentare de medie tensiune. Analizând aceste rezultate se pot desprinde următoarele concluzii:

- **valorile puterii active pe aceste armonici sunt negative**, fapt care demonstrează că pe linia de alimentare de medie tensiune cuptorul cu arc electric poate fi considerat un generator de armonici;

- faza tehnologică în care se găsește procesul de elaborare a șarjei influențează, așa cum era de așteptat, valoarea puterii active (și mai puțin pe cea a puterii reactive). Se observă că în faza de topire cuptorul electric debitează puteri mai mari pe armonici în rețeaua de alimentare de medie tensiune în comparație cu celelalte faze tehnologice.

- valorile puterii reactive pe armonicile prezentate sunt în cea mai mare parte a duratei șarjei negative demonstrând că din punct de vedere al puterii reactive debitate pe armonici cuptorul electric este generator de putere reactivă în rețeaua de alimentare.

În *anexa IV.2* sunt prezentate formulele de variație ale valorilor efective ale fundamentalei precum și a armonicilor de ordin **5,7,11** și **13** ale curenților și tensiunilor pentru fiecare dintre cele trei faze. Se observă că și în acest caz valorile efective ale armonicilor curenților și tensiunilor depind de faza tehnologică și de ordinul armonicii.

### 3.4. Măsurarea impedanței instalației electrice de alimentare

#### 3.4.1. Schema electrică echivalentă a rețelei de alimentare

Potrivit [29] și [43] schema electrică generală echivalentă trifazată a circuitului de alimentare al cuptorului cu arc electric, neglijând curentul de magnetizare al transformatorului în raport cu curentul de sarcină este prezentată în figura 3.37.a. În această schemă s-au utilizat următoarele notații:

- $R'_b$  și  $X'_b$  reprezintă rezistența și reactanța bobinei;
- $R'_t$  și  $X'_t$  reprezintă rezistența și reactanța transformatorului cuptorului;
- $R_r$  și  $X_r$  reprezintă rezistența și reactanța rețelei scurte;
- $R_A$  rezistența arcului electric,

toate mărimile fiind raportate la secundarul transformatorului.

De asemenea se vor nota în continuare cu  $U_i$  tensiunile de fază din primarul transformatorului și cu  $u_i$  tensiunile de fază din secundarul transformatorului.

În timp ce parametrii bobinei și transformatorului se pot considera aceiași pentru cele trei faze, [29], parametrii rețelei scurte sunt diferiți pe cele trei faze, fiind notați cu indicii  $i=1,2,3$  atât în schema echivalentă monofazată (figura 3.37.b) cât și în cea echivalentă redusă (figura 3.37.c). Rezultă deci trei faze cu scheme diferite în general între ele și cu parametrii:

- rezistența echivalentă a unei faze

$$R_i = R'_b + R'_t + R_{ri} , \quad (3.1)$$

- reactanța echivalentă a unei faze

$$X_i = X'_b + X'_t + X_{ri} , \text{ cu } i = 1,2,3. \quad (3.2)$$

Valorile parametrilor raportați la secundarul transformatorului se pot determina pe baza relațiilor:

##### a. Bobina de reactanță

- rezistența bobinei raportată la secundarul transformatorului

$$R'_b = R_b \left( \frac{u}{U} \right)^2 [\Omega] , \quad (3.3)$$

- reactanța bobinei raportată la secundarul transformatorului

$$X'_b = X_b \left( \frac{u}{U} \right)^2 [\Omega] \quad (3.4)$$

unde  $R_b$  și  $X_b$  reprezintă rezistența, respectiv reactanța bobinei raportată la primarul transformatorului;

**b. Transformatorul de alimentare**

- rezistența raportată la secundarul transformatorului

$$R'_t = 3 \frac{\Delta P_{sc} \cdot u^2}{S_t^2} [\Omega], \quad (3.5)$$

- reactanța raportată la secundarul transformatorului

$$X'_t = 3 \frac{u_{sc\%} \cdot u^2}{100 S_t} [\Omega] \quad (3.6)$$

În aceste relații,  $\Delta P_{sc}$  sunt pierderile de putere activă la mersul în scurtcircuit,  $S_t$  reprezintă puterea aparentă și  $u_{sc}$  tensiunea de scurtcircuit exprimată în procente.

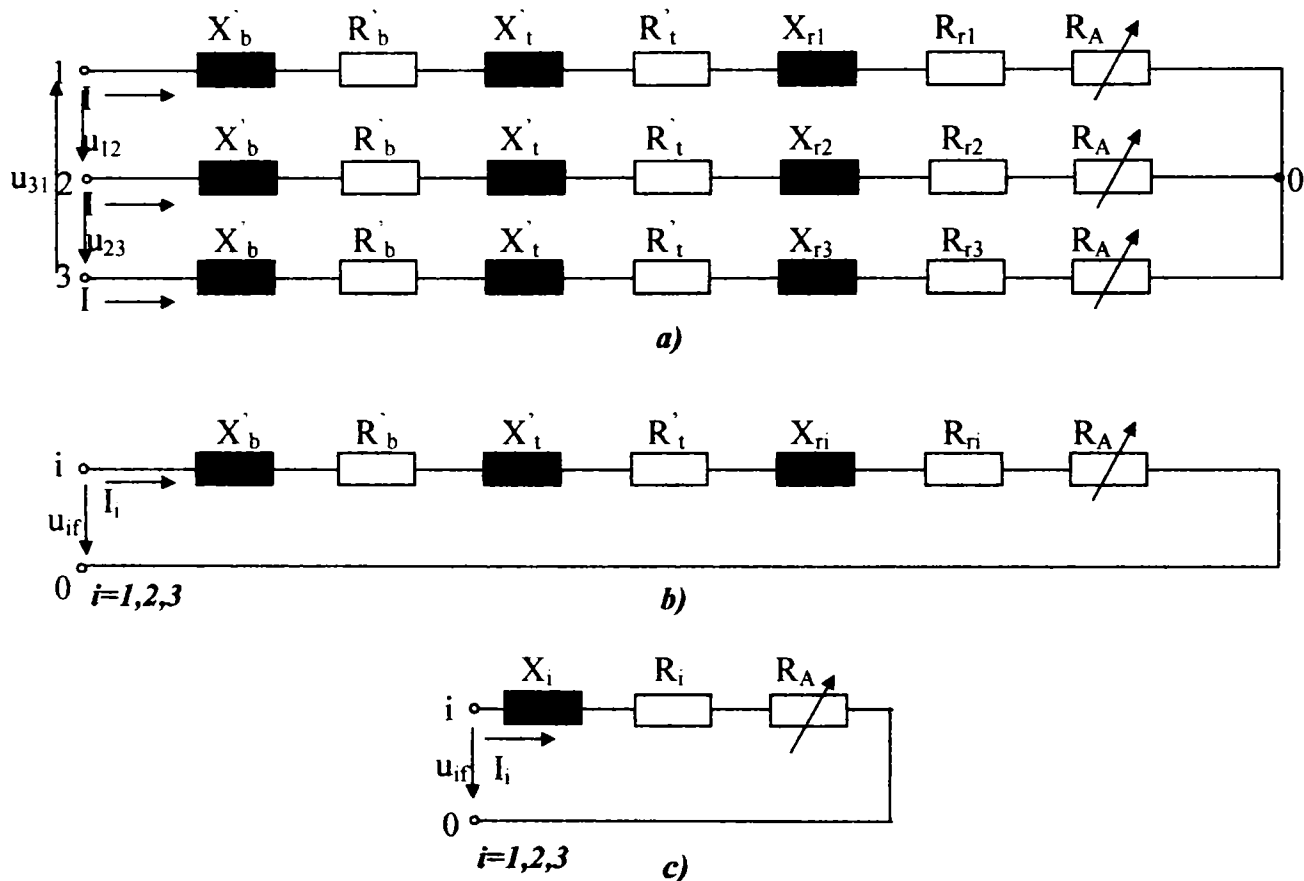


Fig. 3.37. Schema electrică echivalentă a cuptorului cu arc electric:  
a) trifazată; b) monofazată; c) redusă.

### 3.4.2. Calculul parametrilor rețelei scurte

Având în vedere că instalația electrică a cuptorului cu arc electric de la **Oțelăria OE2 a S.C. Siderurgica Hunedoara** are rețeaua scurtă în stea, în cele ce urmează va fi prezentat modul de calcul al parametrilor electrice ai acestei rețele [29]. Schema electrică echivalentă a rețelei scurte în stea este reprezentată în figura 3.38.a în care:

- $R_{pi}$  este rezistența proprie a fazei  $i$  ( $i = 1,2,3$ ), inclusiv rezistențele suportului de prindere și a electrodului;
- $L_{pi}$  – inductivitatea proprie a fazei  $i$ ;
- $M_{ij}$  – inductivitățile mutuale între fazele  $i$  și  $j$ ;
- $u_{ij}$  – tensiunile secundare ale transformatorului ( tensiunile de linie).



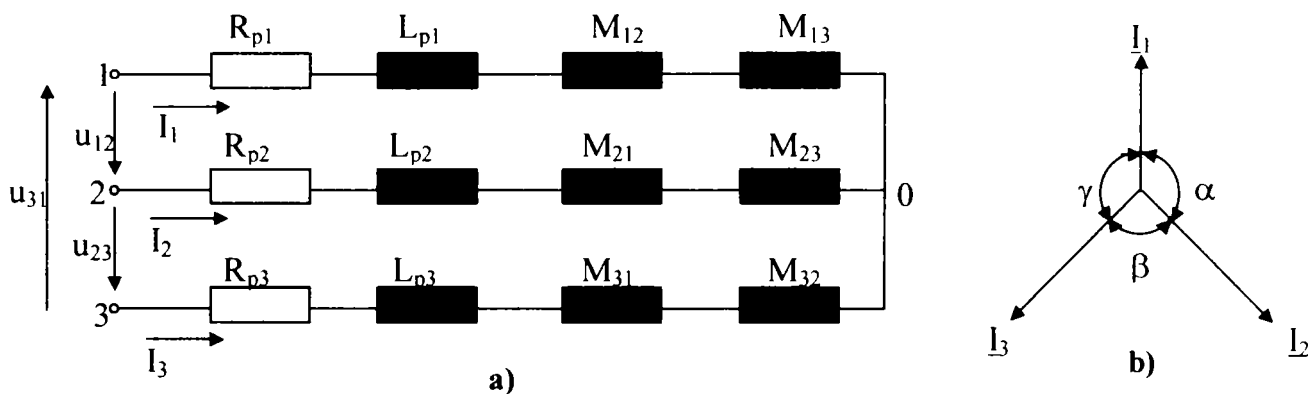


Fig. 3.38. Conexiunea stea a rețelei scurte;  
a) schema electrică echivalentă; b) diagrama fazorială a curenților dezechilibrați.

Ecuțiile tensiunilor pe fază sunt:

$$\begin{aligned} \underline{u}_{1f} &= \underline{I}_1 (R_{p1} + j\omega L_{p1}) + \underline{I}_2 j\omega M_{12} + \underline{I}_3 j\omega M_{13}, \\ \underline{u}_{2f} &= \underline{I}_2 (R_{p2} + j\omega L_{p2}) + \underline{I}_3 j\omega M_{23} + \underline{I}_1 j\omega M_{21}, \\ \underline{u}_{3f} &= \underline{I}_3 (R_{p3} + j\omega L_{p3}) + \underline{I}_1 j\omega M_{31} + \underline{I}_2 j\omega M_{32}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

iar ecuația curenților dezechilibrați, prezentați în figura 3.38.b este

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0. \quad (3.8)$$

Dând factor comun, în fiecare ecuație a sistemului, curentul propriu fiecărei faze și introducând coeficienții:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{I_2}{I_1} \sin \alpha; & p_1 &= \frac{I_2}{I_1} \cos \alpha; \\ k_2 &= \frac{I_1}{I_2} \sin \alpha; & p_2 &= \frac{I_1}{I_2} \cos \alpha; \\ k_3 &= \frac{I_2}{I_3} \sin \beta; & p_3 &= \frac{I_2}{I_3} \cos \beta; \end{aligned} \quad (3.9)$$

rezistențele de cuplaj ( $M_{ij} = M_{ji}$ ).

$$\begin{aligned} R_{c1} &= k_1 \omega \cdot (M_{12} - M_{13}), \\ R_{c2} &= k_2 \omega \cdot (M_{23} - M_{21}), \\ R_{c3} &= k_3 \omega \cdot (M_{31} - M_{32}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

și inductivitățile de cuplaj

$$\begin{aligned} L_{c1} &= p_1 \cdot M_{12} - (1 + p_1) M_{13}, \\ L_{c2} &= p_2 \cdot M_{12} - (1 + p_2) M_{23}, \\ L_{c3} &= p_3 \cdot M_{23} - (1 + p_3) M_{13}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

sistemul (3.7) împreună cu ecuația (3.8) devine

$$\begin{aligned} \underline{u}_{1f} &= \underline{I}_1 (R_{p1} + j\omega L_{p1} + R_{c1} + j\omega L_{c1}), \\ \underline{u}_{2f} &= \underline{I}_2 (R_{p2} + j\omega L_{p2} + R_{c2} + j\omega L_{c2}), \\ \underline{u}_{3f} &= \underline{I}_3 (R_{p3} + j\omega L_{p3} + R_{c3} + j\omega L_{c3}). \end{aligned} \quad (3.12)$$

Din sistemul (3.12) se pot obține valorile curenților pe fiecare fază a rețelei scurte.

**Parametrii totali ai rețelei scurte** sunt deci

$$R_{\pi i} = R_{pi} + R_{ci} \quad (3.13)$$

$$X_{\pi i} = \omega (L_{pi} + L_{ci}), \quad (3.14)$$

în care  $i = 1, 2, 3$ .

Pe baza celor prezentate rezultă următoarele observații:

- dacă curenții celor trei faze sunt simetrici ( $I_1 = I_2 = I_3$  și  $\alpha = \beta = \gamma = 120^\circ$ ), atunci

$$k_1 = k_2 = k_3 = \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad p_1 = p_2 = p_3 = -\frac{1}{2}, \quad (3.15)$$

$$R_{c1} + R_{c2} + R_{c3} = 0, \quad (3.16)$$

$$X_{c1} + X_{c2} + X_{c3} = -\omega(M_{12} + M_{23} + M_{31}). \quad (3.17)$$

Din relațiile (3.10) se observă că în timp ce rezistențele de cuplaj pot fi pozitive sau negative, reactanțele de cuplaj sunt întotdeauna negative, scăzându-se din reactanțele proprii.

- dacă conductoarele fazelor sunt dispuse în același plan (cu faza 2 între 1 și 3 ca în figura 3.39), adică  $M_{12} = M_{32}$  și  $M_{12} > M_{13}$ , atunci

$$R_{c2} = 0 \quad (3.18.a)$$

$$\text{și} \quad R_{c1} = -R_{c3} = \frac{\sqrt{3}}{2}(M_{12} - M_{13}) > 0. \quad (3.18.b)$$

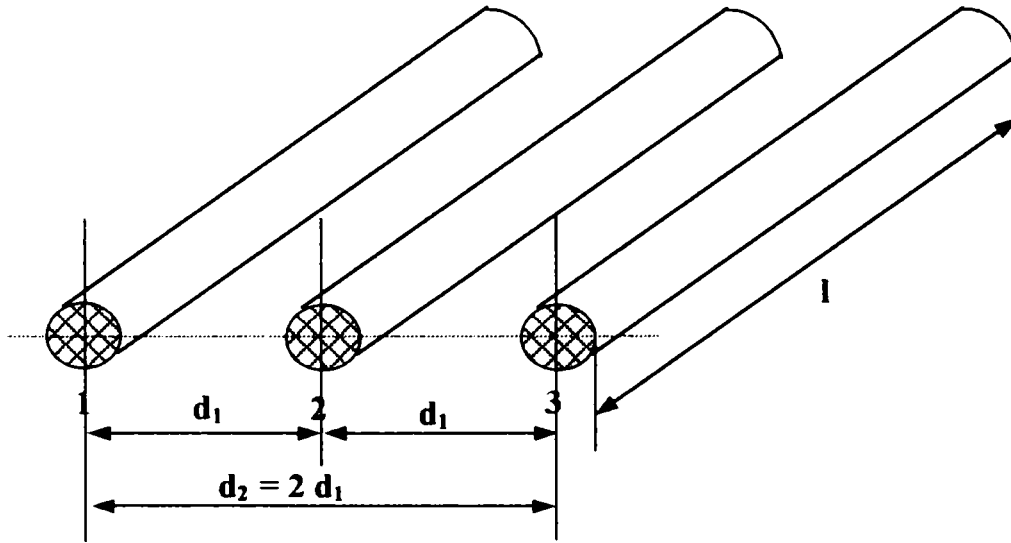


Fig. 3.39. Dispunerea în același plan a conductoarelor fazelor rețelei scurte.

În această situație între fazele 1 și 3 apare o circulație a puterii active dată de

$$P = R_{c1}(I_1^2 - I_3^2), \quad (3.19)$$

în care, ținând seama de (3.18.b) se obține

$$P = \frac{\sqrt{3}}{2}(M_{12} - M_{13})(I_1^2 - I_3^2). \quad (3.20)$$

Această circulație de putere activă micșorează puterea fazei 1 (aceasta purtând denumirea de fază slabă) și mărește pe cea a fazei 3 (aceasta purtând denumirea de fază tare), acest fenomen generând dezechilibrul sarcinii.

- dacă conductoarele fazelor sunt dispuse în vârfurile unui triunghi echilateral, adică  $M_{12} = M_{23} = M_{31}$ , atunci

$$R_{c1} = R_{c2} = R_{c3} = 0, \quad (3.21.a)$$

$$\text{și} \quad L_{c1} = L_{c2} = L_{c3} = -M_{12}. \quad (3.21.b)$$

În cazul concret al instalației electrice de la *Oțelăria OE2* de la *Combinatul Siderurgic Hunedoara*, cele trei conductoare ale fazelor sunt dispuse în vârfurile unui triunghi echilateral la ieșirea din camera transformatorului cuptorului, coboară și urcă în triunghi echilateral în timp ce pe orizontală sunt dispuse în același plan, rezultând o nesimetrie a rețelei scurte.

Acest fapt poate fi pus în evidență atât din figurile 3.7 și 3.8 (respectiv 3.9 și 3.10) în care *faza 3* este faza "tare" iar *faza 1* este faza "slabă", respectând notațiile din figuri.

### 3.4.3. Măsurarea parametrilor cuptoarelor cu arc electric

Măsurătorile din instalațiile electrice ale cuptoarelor cu arc electric se fac pe baza încercărilor de scurtcircuit al electrozilor cu șarja topită, situație în care rezistența arcului electric este nulă, respectiv prin metoda tehnică, care nu necesită scurtcircuitul, rezistența arcului electric fiind nenulă. La rândul lor, încercările în scurtcircuit se împart în încercări de scurtcircuit trifazat, respectiv bifazat.

#### a) Încercarea de scurtcircuit trifazat

Încercarea de scurtcircuit trifazat se poate efectua prin măsurători în primarul transformatorului sau în secundarul transformatorului. Această încercare presupune simetria curenților pe cele trei faze ale liniei de alimentare pe care se efectuează încercarea. Din acest motiv se disting două cazuri:

- dacă din punct de vedere al rețelei de alimentare, curenții sunt aproximativ simetrici, măsurătorile se efectuează în primarul transformatorului utilizând schema din figura 3.40. În acest caz se măsoară:

- puterea totală de scurtcircuit  $P_{sc} = P_{sc1} + P_{sc2}$ ;
- curenții de scurtcircuit pe fiecare fază  $I_{sc1}$ ,  $I_{sc2}$  și  $I_{sc3}$ ;
- tensiunea de linie  $U_l$ ;
- tensiunea pe bobină  $U_b$  (la Oțelăria OE2 nu există bobina).

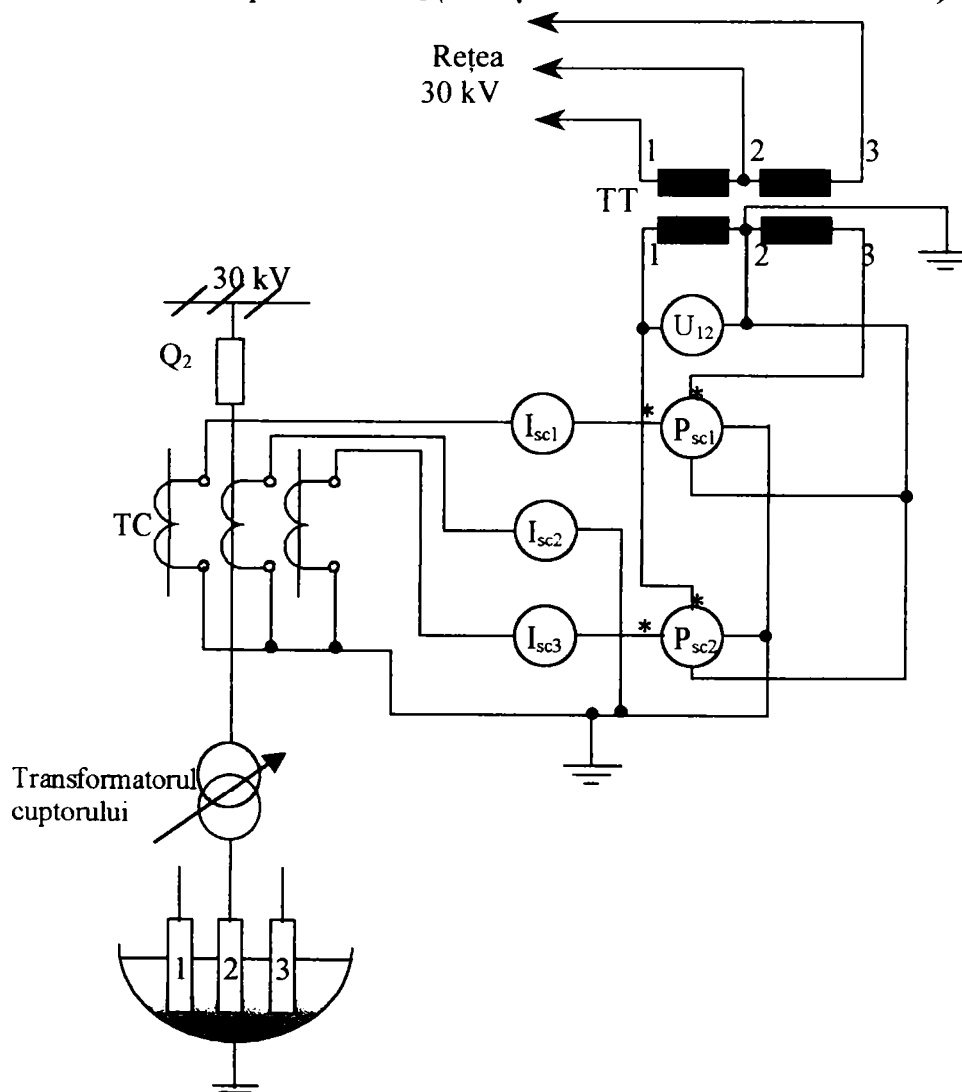


Fig. 3.40. Schema de încercare de scurtcircuit trifazat efectuând măsurători în primarul transformatorului.

Valoarea medie a curentului de scurtcircuit este

$$I_{sc} = \sqrt{\frac{I_{sc1}^2 + I_{sc2}^2 + I_{sc3}^2}{3}}. \quad (3.22)$$

Se calculează valorile medii ale parametrilor:

- rezistența totală

$$R = \frac{P_{sc}}{3I_{sc}^2}; \quad (3.23)$$

- impedanța totală

$$Z = \frac{U_l}{\sqrt{3}I_{sc}}; \quad (3.24)$$

- reactanța totală

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}; \quad (3.25)$$

- reactanța bobinei

$$X_b = \frac{U_b}{I_{sc}}. \quad (3.26)$$

Determinând rezistența  $R_t$  și reactanța  $X_t$  a transformatorului raportate la primar utilizând relațiile (3.5) și (3.6) în care se înlocuiește  $u$  cu  $U$ , rezultă valorile medii ale parametrilor rețelei scurte (raportați la primar):

- rezistența

$$R_r = R - R_t \quad (R_b = 0); \quad (3.27)$$

- reactanța

$$X_r = X - X_t - X_b. \quad (3.28)$$

• în situația în care și curenții din fazele rețelei scurte sunt aproximativ simetrici, măsurătorile se pot efectua în secundarul transformatorului. Măsurătorile în secundarul transformatorului se pot efectua față de neutrul acestuia, dacă este accesibil, sau față de neutrul cuptorului (șarja), care poate fi asimilat cu mantaua metalică a cuvei de topire, utilizându-se schema din figura 3.41.

În situația din urmă, se măsoară:

- curenții de scurtcircuit  $I_{sc1}$ ,  $I_{sc2}$  și  $I_{sc3}$ ;
- tensiunile pe fază  $u_1$ ,  $u_2$  și  $u_3$ ;
- tensiunea secundară de linie  $u_l$ ;
- puterea totală de scurtcircuit  $P_{sc} = P_{sc1} + P_{sc2} + P_{sc3}$ .

Parametrii rețelei scurte se calculează cu relațiile:

- rezistența rețelei scurte

$$R_r = \frac{P_{sc}}{3I_{sc}^2}; \quad (3.29)$$

- reactanța rețelei scurte

$$X_r = \sqrt{\left(\frac{u_l}{I_{sc}}\right)^2 - R_r^2}, \quad (3.30)$$

în care tensiunea  $u$  se calculează pe baza relației

$$u = \sqrt{\frac{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}{3}}. \quad (3.31)$$

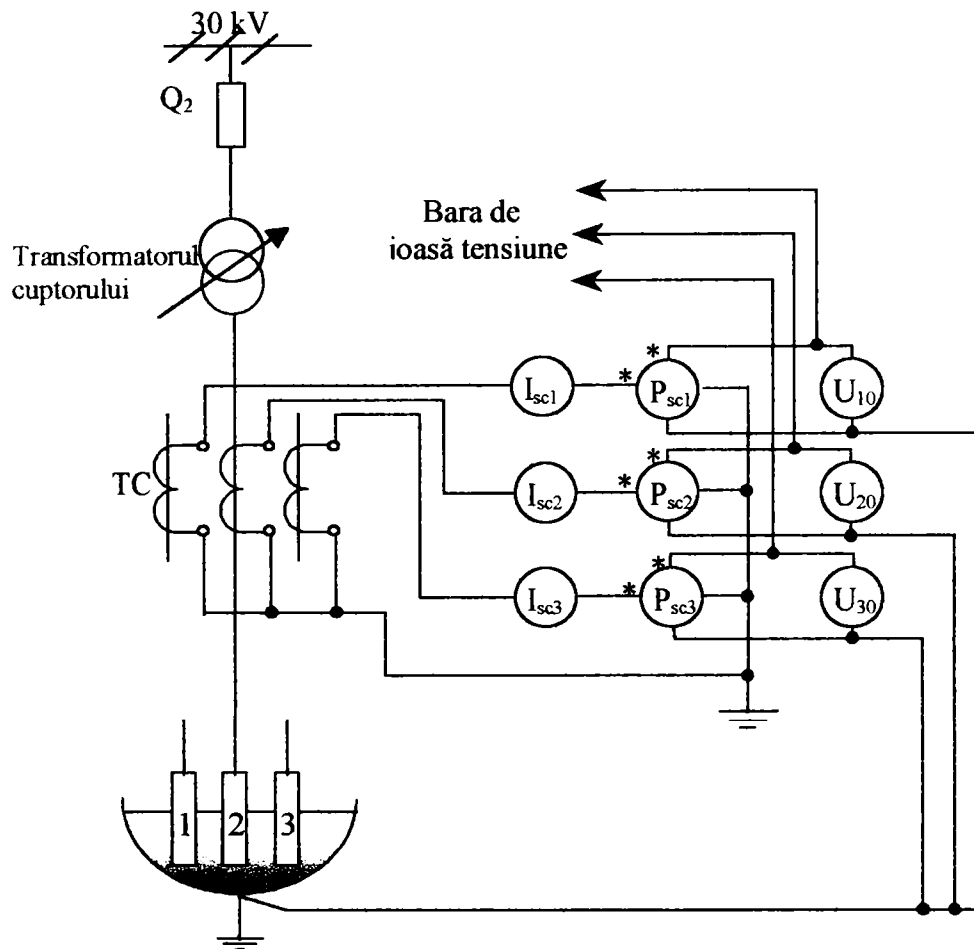


Fig. 3. 41. Schema de încercare de scurtcircuit trifazat efectuând măsurători în secundarul transformatorului.

### b) Încercarea de scurtcircuit bifazat

Separarea parametrilor proprii de cei de cuplaj ai rețelei scurte este posibilă numai prin încercarea de scurtcircuit bifazat. Această încercare este recomandată pentru rețele scurte monofilare, având un grad de dezechilibru ridicat, măsurătorile efectuându-se în secundarul transformatorului utilizând schema din figura 3.41.

Scurtcircuitele se efectuează în trei etape, prin introducerea succesivă a câte doi electrozi în baia de metal topit și întreruperea celei de a treia faze la transformator sau prin ridicarea celui de al treilea electrod. În cazul acestei încercări se măsoară:

- curenții de scurtcircuit  $I_{sc1}$ ,  $I_{sc2}$  și  $I_{sc3}$ ;
- puterile  $P_{sc1}$ ,  $P_{sc2}$  și  $P_{sc3}$ ;
- tensiunile pe fază  $u_{ij}$  (tensiunea măsurată pe faza  $i$ , indusă pe faza  $j$ ; fazele  $i$  și  $j$  fiind cele neîntrerupte).

Se calculează parametrii rețelei scurte:

- rezistențele proprii

$$R_{pi} = \frac{P_{sci}}{I_{sci}^2}, \quad (3.32)$$

cu  $i = 1, 2$  și  $3$ ;

- parametrii  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$  din tabelul 3.1.
- rezistențele de cuplaj

$$R_{c1} = \frac{\sqrt{3}}{2}(C - A); \quad R_{c2} = \frac{\sqrt{3}}{2}(B - E); \quad R_{c3} = \frac{\sqrt{3}}{2}(F - D); \quad (3.33)$$

- reactanțele rețelei scurte

$$X_{r1} = \frac{1}{2}\omega(A+C); X_{r2} = \frac{1}{2}\omega(B+E); X_{r3} = \frac{1}{2}\omega(D+F); \quad (3.34)$$

- reactanțele de cuplaj

$$X_{c1} = \frac{1}{2}\omega(A-C); X_{c2} = \frac{1}{2}\omega(E-B); X_{c3} = \frac{1}{2}\omega(D-F); \quad (3.35)$$

- reactanțele proprii

$$X_{pi} = X_{ri} - X_{ci}. \quad (3.36)$$

Tabelul 3.1.

Parametrii A, B, C, D, E, F pentru calculul rețelei scurte.

Faza	Relația de calcul	Scurtcircuit
1	$A = L_{p1} - M_{12} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{u_{12}}{i_{sc1}}\right)^2 - R_{p1}^2}$	1 cu 2
2	$B = L_{p2} - M_{12} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{u_{12}}{i_{sc1}}\right)^2 - R_{p2}^2}$	
1	$C = L_{p1} - M_{13} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{u_{13}}{i_{sc1}}\right)^2 - R_{p1}^2}$	1 cu 3
3	$D = L_{p3} - M_{13} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{u_{13}}{i_{sc1}}\right)^2 - R_{p3}^2}$	
2	$E = L_{p2} - M_{23} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{u_{23}}{i_{sc2}}\right)^2 - R_{p2}^2}$	2 cu 3
3	$F = L_{p3} - M_{23} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{u_{23}}{i_{sc2}}\right)^2 - R_{p3}^2}$	

Parametrii calculați cu relațiile (3.33) – (3.36) sunt valabili în cazul în care curenții sunt simetrici. Dacă curenții sunt nesimetrici calculul se face pe baza relațiilor (3.9) - (3.11).

### c) Metoda tehnică

Metoda tehnică este o metodă independentă de gradul de dezechilibru sau de conexiunea fazelor rețelei scurte. Măsurătorile se pot efectua atât în primarul cât și în secundarul transformatorului, evitându-se scurtcircuitul electrozilor cu șarja [29]. Dacă se efectuează măsurătorile în secundarul transformatorului se măsoară:

- curenții pe fază  $I_1, I_2, I_3$ ;
- pierderile de putere în rețeaua scurtă  $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ ;
- pierderile de tensiune pe fazele rețelei scurte  $\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3$ .

Se calculează parametrii rețelei scurte:

- rezistența rețelei scurte pe fiecare fază

$$R_{ri} = \frac{\Delta P_i}{I_i^2}; \quad (3.37)$$



- rezistența tuturor fazelor rețelei scurte

$$\sum_{i=1}^3 R_{pi} + \sum_{i=1}^3 R_{ci} = \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta P_i}{I_i^2} \quad (3.38)$$

În cazul în care curenții sunt simetrici  $\left( \sum_{i=1}^3 R_{ci} = 0 \right)$  și rezistențele proprii ale fazelor sunt egale, din relația (3.38) rezultă valoarea medie a rezistenței proprii

$$R_p = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta P_i}{I_i^2} \quad (3.39)$$

- rezistențele de cuplaj

$$R_{ci} = R_{ri} - R_{pi} \quad (3.40)$$

- reactanța rețelei scurte

$$X_{ri} = \sqrt{\left( \frac{\Delta u_i}{I_i} \right)^2 - R_{ri}^2} \quad (3.41)$$

#### 3.4.4. Rezultatele măsurătorilor efectuate

Măsurătorile efectuate în vederea determinării impedanței circuitului de alimentare a rețelei de alimentare a cuptorului cu arc electric la *Oțelăria OE2* a *S.C. Siderurgica Hunedoara*, [110] au ținut seama de caracteristicile specifice instalației electrice existente:

- absența bobinei necesare stabilității arcului electric, datorită faptului că la cuptoarele de mare putere rolul ei este asigurat de inductivitatea proprie a circuitului de alimentare;

- absența instalațiilor de compensare a puterii reactive, a filtrelor pe armonici precum și a instalației de echilibrare a sarcinii.

Ca și *aparate de măsură* utilizate s-au folosit aparate cu clasa de precizie 0,5 (ampermetre, voltmetre și wattmetre). Este de menționat că wattmetrele utilizate au fost wattmetre monofazice cu trei trepte de putere, astfel încât pe treptele cu tensiune redusă ale transformatorului cuptorului, puterea activă absorbită poate fi citită, în condiții acceptabile și în partea din stânga extremă a scalei. S-a contracarat astfel neajunsul datorat faptului că la scurtcircuit, deși curentul este de circa două ori mai mare decât curentul nominal al treptei, puterea activă absorbită reprezintă numai pierderile electrice din rețea (factorul de putere fiind foarte mic: 0,14 – 0,15) [110],[29].

*O primă determinare a impedanței circuitului rețelei de alimentare* de la stația de 30 kV la cuptor s-a făcut prin *încercarea de scurtcircuit trifazat* cu cei trei electrozi introduși cu vârfurile circa 150 mm în baia de oțel lichid imediat după topire. Măsurătorile s-au efectuat concomitent în primarul transformatorului ( în camera de comandă a stației de 30 kV utilizând schema din figura 3.40 ) și în secundarul acestuia ( în cabina cuptorului utilizând schema din figura 3.41 ).

Valorile elementelor impedanței reduse la circuitul secundar al transformatorului, considerat simetric, determinate pe baza încercărilor de scurtcircuit trifazat, utilizând relațiile (3.22) – (3.25) sunt

$$\begin{aligned} R &= 0,478 \text{ m}\Omega \\ X &= 3,349 \text{ m}\Omega , \\ Z &= 3,383 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (3.42)$$

din care pentru circuitul de joasă tensiune, considerat simetric, pe baza relațiilor (3.29) – (3.31) se obține

$$\begin{aligned} R_r &= 0,364 \text{ m}\Omega \\ X_r &= 2,935 \text{ m}\Omega \\ Z_r &= 2,958 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (3.43)$$

Pe baza relațiilor (3.42) și (3.43) se obțin pentru cablurile de 30 kV și transformatorul cuptorului următoarele valori

$$\begin{aligned} R_{C+T} &= 0,114 \text{ m}\Omega \\ X_{C+T} &= 0,414 \text{ m}\Omega \\ Z_{C+T} &= 0,429 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (3.44)$$

Pentru determinarea acestor valori s-au efectuat 10 încercări de scurtcircuit, pe treptele 1 Y, 7 Y, 15 Y, 21 Y, 1 Δ, 5 Δ, 10 Δ ( de două ori) și 15 Δ (de două ori) ale primarului transformatorului cuptorului ( anexa III ).

A doua determinare a impedanței circuitului rețelei de alimentare s-a făcut prin încercarea de scurtcircuit bifazic, cu câte doi electrozi în baie și unul ridicat. În urma măsurătorilor efectuate s-au calculat utilizând relațiile (3.32) – (3.36) valorile elementelor impedanțelor reduse la circuitul secundar al transformatorului. S-a constatat că utilizând această a doua încercare valorile obținute diferă cu mai puțin de 5% față de cele date de relațiile (3.42) – (3.44).

S-a constatat faptul că în timpul funcționării reactanța își modifică valoarea, în sensul creșterii acesteia față de valoarea determinată în condiții de scurtcircuit. Din acest motiv s-a procedat la înregistrarea pe partea de joasă tensiune a curenților, tensiunilor precum și a puterilor active și reactive monofazate pe treptele cele mai des folosite ale transformatorului, în condițiile funcționării cu reglaj manual minim, normal și maxim, pe aceleași trepte.

Rezultatele au fost reprezentate în curbele din figura 3.42. Se constată că reactanța crește pe măsură ce crește factorul de putere și mai puțin cu treapta de putere, cauzele principale fiind modificarea geometriei cablurilor rețelei scurte, prin modificarea poziției electrozilor, și creșterea temperaturii datorate creșterii puterii active. Introducând aceste valori crescute ale reactanței în calculul puterilor absorbite maxime pe diversele trepte ale transformatorului se ajunge la valori mult diminuate ale acestora din urmă.

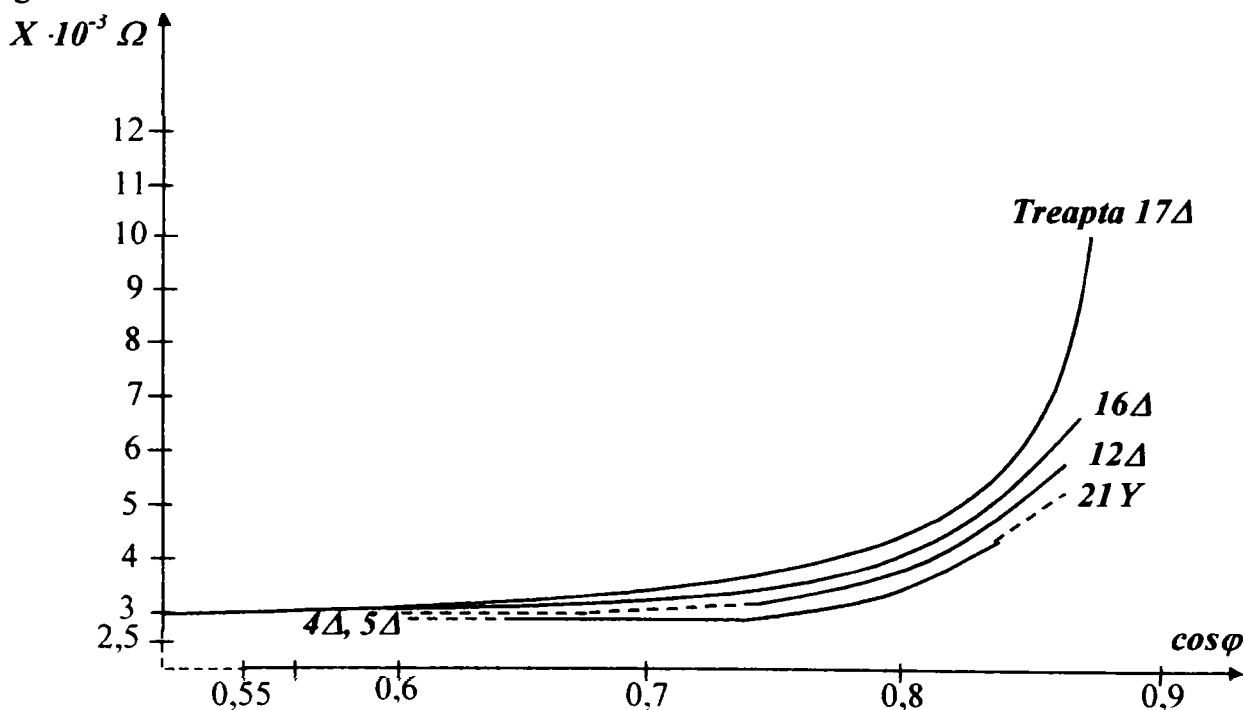


Fig. 3.42. Variația reactanței raportată la secundarul transformatorului.

Din acest motiv s-a recurs la **a treia determinare a impedanței circuitului de alimentare, prin metoda tehnologică**. S-au determinat prin măsurători pentru treptele  $4 \Delta$ ,  $5 \Delta$ ,  $12 \Delta$ ,  $16 \Delta$ ,  $17 \Delta$  ( de două ori ),  $21 Y$  ( de două ori ) valorile care corespund puterii active maxime absorbite de la rețea, precum și valorile care corespund prin calcul pentru treapta respectivă. Rezultatele obținute sunt prezentate în **tabelul 3.2**, puterea absorbită maximă fiind calculată cu relația [26],[29]:

$$P_{ab\ max} = 1,5 \sqrt{\frac{U_f^2}{X_{sc}}}, \quad (3.45)$$

în care  $U_f$  este tensiunea de fază și  $X_{sc}$  reactanța de scurtcircuit a secundarului dată de (3.42)

**Tabelul 3.2.**

**Puterea activă maximă absorbită pe diferite trepte ale transformatorului ( la  $\cos \varphi = 0,707$ ).**

Treapta pe care a funcționat transformatorul	P <sub>ab. max</sub> (MW)		Diferența (2)-(1)	Raportul $\frac{(2)}{(1)}$
	Înregistrată în funcționarea reală (1)	Calculată cu X <sub>sc</sub> (3.42) (2)		
4 Δ	14,400	14,819	0,419	1,029
5 Δ	16,036	15,662	-0,374	0,977
12 Δ	25,855	24,798	-1,057	0,959
16 Δ	33,709	34,218	0,509	1,015
17 Δ	36,982	37,331	0,349	1,009
	36,655		0,676	1,018
21 Y	18,982	18,551	-0,431	0,977
	18,818		-0,267	0,986

Comparând aceste valori cu cele determinate prin calcul se constată că valorile maxime absorbite se apropie, cu erori mici, de valorile calculate cu reactanța rezultată din încercarea de scurtcircuit trifazat.

Considerând că diferența se datorează atât variației tensiunii de alimentare, cât și erorii aparatelor de măsură, ridicarea caracteristicilor energetice ale cuptorului studiat se face, cu precizia admisă pentru aparatele de măsură, pe baza reactanței determinate din încercările de scurtcircuit, verificate cu puterea maximă absorbită în funcționarea reală, precum și pe baza rezistenței circuitului de alimentare determinată din aceleași încercări de scurtcircuit.

Concluzia care se desprinde din această analiză este că determinarea reactanței pentru stabilirea caracteristicilor energetice la orice cuptor electric cu arc este mai corect să fie calculată din puterea activă care se obține făcând  $\cos \varphi = 0,707$ , ea reprezentând reactanța „**în funcțiune**” a instalației [110].

Curentul de scurtcircuit se poate determina și prin construcția diagramei cercului stabilindu-se valorile optime pentru curentul și puterea din arc.

Determinarea valorilor impedanțelor pe fiecare fază se poate face pornind de la relațiile (3.7) – (3.14), considerând curenții de pe cele trei faze ca formând un sistem simetric potrivit relației

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= I \cdot e^{j\omega t}, \\ \underline{I}_2 &= I \cdot e^{j(\omega t - 2\pi/3)}, \\ \underline{I}_3 &= I \cdot e^{j(\omega t - 4\pi/3)}. \end{aligned} \quad (3.46)$$

Valorile impedanțelor totale a rețelei scurte sunt date de

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{r1} &= R_{p1} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \omega(M_{12} - M_{13}) + j\omega \cdot (L_{p1} - 0,5 \cdot M_{12} - 0,5 \cdot M_{13}), \\ \underline{Z}_{r2} &= R_{p2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \omega(M_{23} - M_{12}) + j\omega \cdot (L_{p2} - 0,5 \cdot M_{23} - 0,5 \cdot M_{12}), \\ \underline{Z}_{r3} &= R_{p3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \omega(M_{13} - M_{23}) + j\omega \cdot (L_{p3} - 0,5 \cdot M_{13} - 0,5 \cdot M_{23})\end{aligned}\quad (3.47)$$

Calculul inductivităților mutuale între fazele  $i$  și  $j$  se poate face pe baza relației

$$M_{ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( l \cdot \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + d_{ij}^2}}{d_{ij}} - \sqrt{l^2 + d_{ij}^2} + d_{ij} \right) \quad (3.48)$$

în care  $l$  reprezintă lungimea conductoarelor fazelor și  $d_{ij}$  reprezintă distanța dintre ele, ca în figura 3.49. Așa cum s-a prezentat anterior, dezechilibrul rețelei scurte se datorează zonei în care conductoarele rețelei scurte se situează în același plan.

În cazul concret al cuptorului cu arc electric de la *Oțelăria OE2* lungimea tronsonului în care conductoarele rețelei scurte se situează în același plan este

$$l = 10 \text{ m}, \quad (3.49)$$

iar distanța dintre conductoarele rețelei scurte

$$\begin{aligned}d_{12} &= d_{23} = d_1 = 1 \text{ m}, \\ d_{13} &= d_{12} + d_{23} = 2 \text{ m}.\end{aligned}\quad (3.50)$$

Cu aceste valori, inductivitățile mutuale între conductoarele fazelor în zona în care acestea sunt coplanare sunt

$$\begin{aligned}M_{12} &= M_{23} = 4,1865 \mu\text{H}, \\ M_{13} &= 2,9853 \mu\text{H}.\end{aligned}\quad (3.51)$$

Din relația (3.43) se obțin valorile rezistenței totale și a inductivității totale pe fiecare fază obținute în urma măsurătorilor parametrilor rețelei scurte, determinate în ipoteza în care rețeaua scurtă este simetrică și conductoarele fazelor sunt dispuse în triunghi. Aceste valori sunt

$$\begin{aligned}R_r &= 0,364 \text{ m}\Omega, \\ L_r &= 9,342 \mu\text{H}.\end{aligned}\quad (3.52)$$

Din relația (3.47) și utilizând (3.51) și (3.52) se obțin valorile rezistențelor totale

$$\begin{aligned}R_{r1} &= 0,6908 \text{ m}\Omega, \\ R_{r2} &= 0,3640 \text{ m}\Omega, \\ R_{r3} &= 0,0372 \text{ m}\Omega,\end{aligned}\quad (3.53)$$

precum și a inductivităților totale

$$\begin{aligned}L_{r1} &= L_{r3} = 9,5422 \mu\text{H}, \\ L_{r2} &= 8,9416 \mu\text{H}.\end{aligned}\quad (3.54)$$

Aceste valori vor fi utilizate în simularea funcționării instalației reale a cuptorului cu arc electric de la *Oțelăria OE2 de la Combinatul Siderurgic Hunedoara*.

### 3.5. Analiza erorilor de măsurare a curenților și tensiunilor

Erorile de măsurare a mărimilor electrice se datorează, așa cum s-a arătat la începutul acestui capitol, în principal datorită transformatoarelor de curent și de tensiune utilizate precum și blocului de adaptare al semnalelor de tensiune și de curent la domeniul plăcii de achiziție de date.

### 3.5.1. Funcționarea transformatoarelor de curent în regim deformant

Analiza erorilor introduse prin utilizarea unui transformator de curent se bazează pe determinarea funcției de transfer a acestuia. În acest scop este necesară determinarea schemei echivalente a transformatorului precum și a parametrilor acesteia.

Cele mai des folosite scheme echivalente sunt schema echivalentă în  $T$  [68] și schema echivalentă în  $\Gamma$  [68]. Folosind schema echivalentă în  $\Gamma$ , prezentată în figura 3.43, parametri înfășurării primare sunt reduși la nivelul de tensiune al înfășurării secundare și au următoarea semnificație:

- $L_m$  - inductivitatea de magnetizare a transformatorului;
- $L$  - inductivitatea de dispersie totală a înfășurărilor transformatorului și a firelor de legătură;
- $r$  - rezistența înfășurărilor și a firelor de legătură;
- $R$  - rezistența șuntului de măsură din secundar.

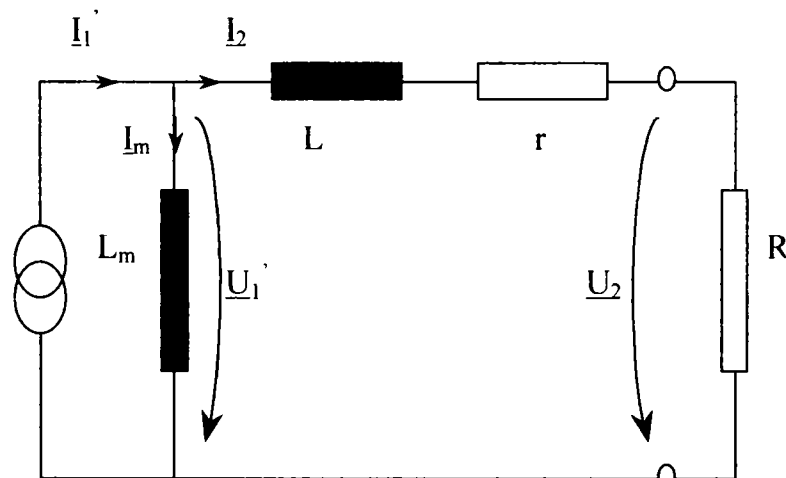


Fig. 3.43. Schema echivalentă în  $\Gamma$  pentru un transformator de curent.

Pentru schema din figura 3.43 se pot scrie relațiile:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1' &= \underline{I}_2 + \underline{I}_m \\ \underline{U}_1' &= \underline{E} \\ \underline{U}_2 &= \underline{E} - \underline{I}_2 \cdot (\underline{r} + j\omega L) \\ \underline{I}_m &= \underline{E} \cdot \underline{Y}_m = -\frac{j\underline{E}}{\omega L_m}, \end{aligned} \quad (3.55)$$

unde  $\underline{E}$  reprezintă tensiunea electromotoare.

Obținerea funcției de transfer se poate face exprimând curentul din secundar în funcție de cel din primar.

$$H(j\omega) = \frac{j\omega L_m}{R + r + j\omega(L + L_m)}. \quad (3.56)$$

Notând cu  $\omega_1$  pulsația corespunzătoare frecvenței fundamentale, funcția de transfer corespunzătoare pentru armonica de ordin  $k$  va fi

$$H(jk\omega_1) = \frac{jk\omega_1 L_m}{R + r + jk\omega_1(L + L_m)}. \quad (3.57)$$

Modulul funcției de transfer este dat de relația

$$G(k) = \frac{k\omega_1 L_m}{\sqrt{(R+r)^2 + k^2 \omega_1^2 (L+L_m)^2}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{L}{L_m}\right) \sqrt{1 + \left(\frac{R+r}{L+L_m}\right)^2} \cdot \frac{1}{k^2 \omega_1^2}} \quad (3.58)$$

și faza sa de relația

$$\phi(k) = \arctg \frac{R+r}{k\omega_1 (L+L_m)} \quad (3.59)$$

Din relațiile anterioare se desprind următoarele concluzii:

- curentul din secundar este mai mic decât curentul din primar, rezultând că și regimul nesinusoidal din secundar este atenuat față de cel din primar;
- atenuarea este cu atât mai pronunțată cu cât rapoartele  $L/L_m$  și  $(R+r)/[\omega \cdot (L+L_m)]$  au valoare mai mare și rangul armonicii este mai mic;
- eroarea de fază este cu atât mai mică cu cât raportul  $(R+r)/[\omega \cdot (L+L_m)]$  este mai mic, deci ordinul armonicii este mai mare.

În ceea ce privește sensibilitatea funcției de transfer cu frecvența, aceasta are expresia pentru amplitudine:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \omega} = \frac{L_m \cdot (R+r)^2}{\left[ (R+r)^2 + k^2 \cdot \omega_1^2 \cdot (L_m + L)^2 \right]^{3/2}} \quad (3.60)$$

iar pentru fază

$$\frac{\partial \theta}{\partial \omega} = - \frac{(R+r)(L+L_m)}{\left[ (R+r)^2 + k^2 \cdot \omega_1^2 \cdot (L_m + L)^2 \right]} \quad (3.61)$$

Din analiza relațiilor (3.60) și (3.61) se constată că sensibilitatea celor două mărimi depinde de raportul  $(R_m + r)/(L_m + L)\omega_1$  și de ordinul armonicii  $k$ .

### 3.5.2. Corecția măsurărilor efectuate cu transformatoarele de curent

În anumite cazuri nu este posibil a se realiza măsurători suficient de precise cu transformatoarele de măsură. Situația apare mai ales la transformatoarele de curent, curentul fiind de obicei mult mai distorsionat decât tensiunea.

În acest caz plecând de la caracteristicile cunoscute ale unui transformator de curent, este posibilă compensarea erorilor de amplitudine și defazare în domeniul timpului și frecvenței [68].

#### a) Corecția în frecvență

Dacă măsurătorile sunt deja efectuate este posibil ca în domeniul frecvență să se corecteze amplitudinea și faza unei mărimi electrice (de exemplu curent) prin intermediul unei tehnici informatice. Principial procesul decurge conform celor prezentate în figura 3.44.

La corecțiile prezentate se mai pot adăuga recomandările generale de folosire adecvată a transformatoarelor de curent, [68] cum ar fi: sarcina să fie cuprinsă între 25 % și 100 %, cablurile de legătură să aibă lungimea cât mai mică, folosirea unui raport de transformare mic la receptori ce prezintă defazaj mic și altele. În figura 3.45 este prezentată variația modulului funcției de transfer cu ordinul armonicii pentru două încărcări ale transformatorului de curent de tip *CIRS 20 KV 3x75/5/5 A*.



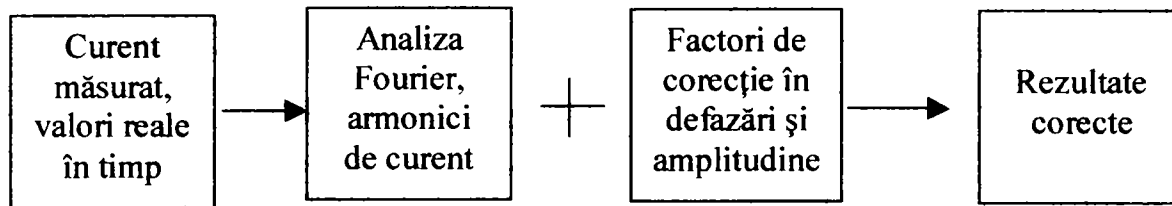


Fig. 3.44. Principiul procesului de compensare a erorilor transformatorului de curent în frecvență.

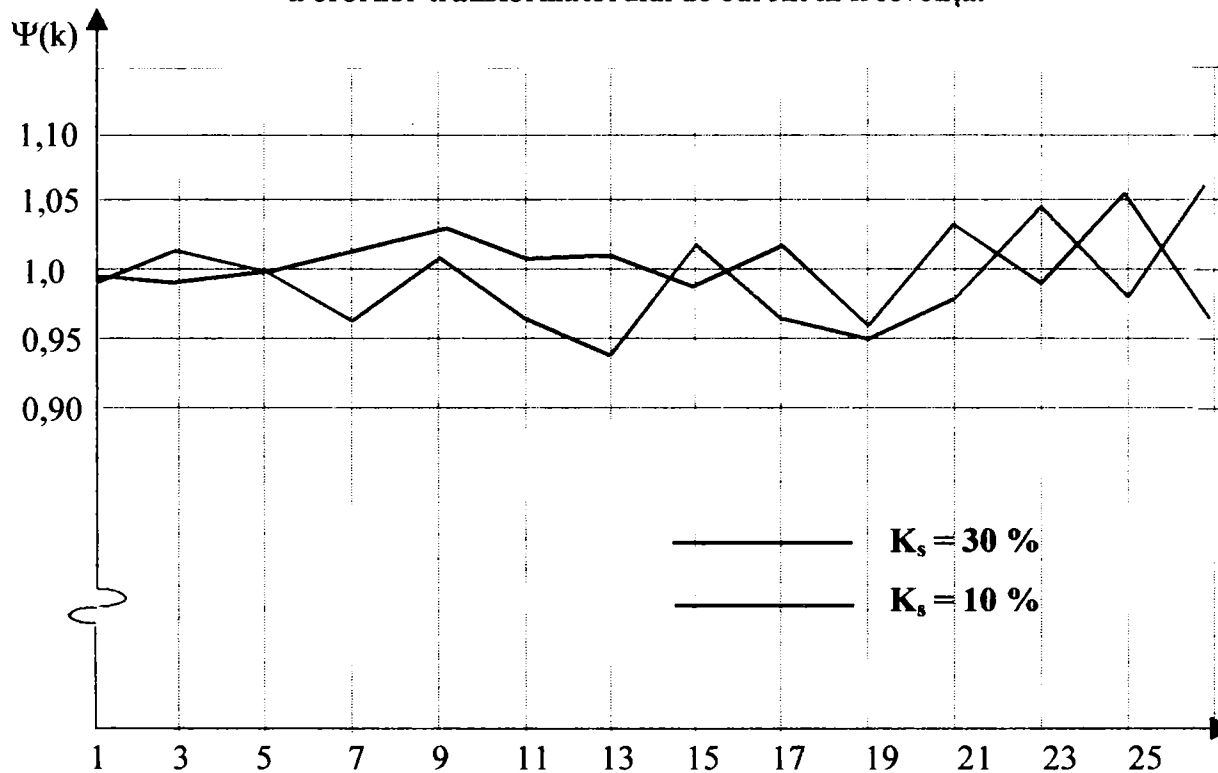


Fig. 3.45. Variația modului funcției de transfer cu ordinul armonicii.

### b) Corecția în timp

Constă în a utiliza o rețea pasivă  $R-L-C$  sau un circuit activ. Corecția este eficientă într-o bandă de frecvență, astfel că dacă semnalul de măsurat conține numeroase armonici sunt necesare mai multe circuite de corecție. Principiul corecției constă în a anula curentul inductiv, de magnetizare cu ajutorul unui curent capacitiv suplimentar, furnizat de un circuit cu caracter capacitiv. Schema de corecție în timp este prezentată în figura 3.46.

Metoda prezintă dezavantajul că, întrucât capacitatea împreună cu reactanța de magnetizare a transformatorului determină un circuit echivalent a cărui caracter se schimbă cu modificarea frecvenței este necesară utilizarea unui condensator neliniar, soluție complicată și costisitoare.

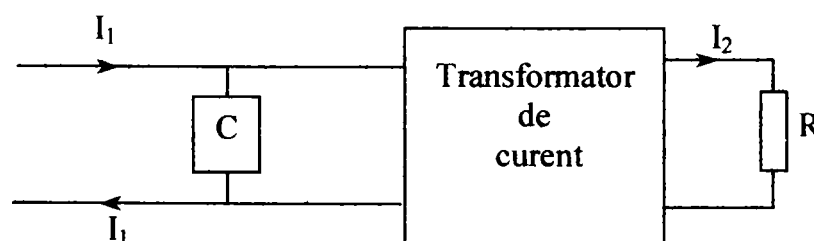


Fig. 3.46. Conectarea circuitului de compensare a curentului de magnetizare.

### 3.5.3. Funcționarea transformatoarelor de tensiune în regim deformant

Analiza funcționării transformatoarelor de tensiune în regim deformant se bazează pe modelarea transformatorului. Aceasta trebuie să ia în considerare și capacitatea parazită dintre înfășurări [68] care în schema echivalentă șuntează impedanța de magnetizare, ca în figura 3.47. Pe această schemă s-a notat cu „ $t$ ” raportul de transformare (și nu cu  $k$  pentru a nu fi confundat cu rangul armonicii).

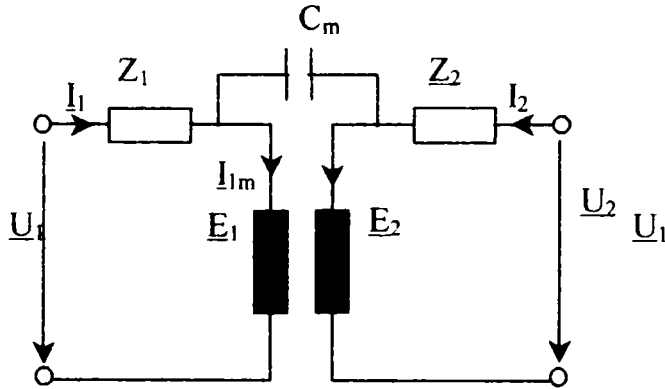


Fig. 3.47. Modelul fizic al transformatorului de tensiune.

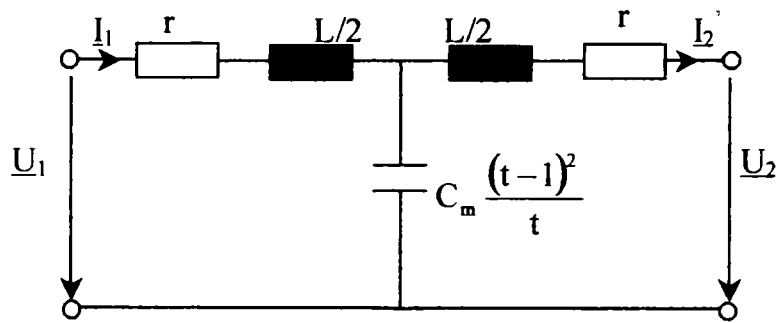


Fig. 3.48. Schema echivalentă în T a transformatorului de tensiune.

Ecuatiile care descriu funcționarea transformatorului din figură sunt

$$\begin{aligned} t \cdot \underline{E}_2 &= \underline{E}_1 = \underline{U}_1 - \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 \\ \underline{E}_2 &= \underline{U}_2 - \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2 \\ \underline{I}_{1m} &= \underline{I}_1 - j\omega C_m \cdot (\underline{E}_1 - \underline{E}_2) \\ -t \cdot \underline{I}_{1m} &= \underline{I}_{2m} = \underline{I}_2 - j\omega C_m \cdot (\underline{E}_2 - \underline{E}_1) \end{aligned} \quad (3.62)$$

iar frecvența de rezonanță a circuitului din figura 3.48 este dată de relația

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \frac{\sqrt{2t}}{(t-1)} \quad (3.63)$$

Tensiunea secundară în funcție de cea primară se exprimă prin relația

$$\underline{U}_2 = -j \frac{1}{\omega C_{ech}} \cdot \frac{\underline{U}_1}{\left[ r + j \left( \frac{\omega L}{2} - \frac{1}{\omega C_{ech}} \right) \right]}, \quad (3.64)$$

unde

$$C_{ech} = C_m \frac{(t-1)^2}{t}. \quad (3.65)$$

Funcția de transfer are expresia

$$\Psi_k = \frac{\omega C_{ech}}{\sqrt{\left( \frac{r}{2} \right)^2 + \left( \frac{\omega L}{2} - \frac{1}{\omega C_{ech}} \right)^2}}, \quad (3.66)$$

iar faza

$$\theta_k = \frac{r}{\omega L - 2 \cdot \omega C_{ech}}, \quad (3.67)$$

Faza  $\theta_k$  reprezintă tocmai eroarea de unghi  $\delta_U$  a transformatorului de tensiune.

### 3.5.4. Corecția măsurătorilor efectuate cu transformatoarele de tensiune

Dacă se definește raportul relativ de transformare ca fiind câtul dintre raportul real de transformare și raportul nominal de transformare, s-a constatat experimental că acesta variază cu frecvența [68]. Cunoscând această variație se pot introduce corecțiile necesare, pe baza unui program soft.

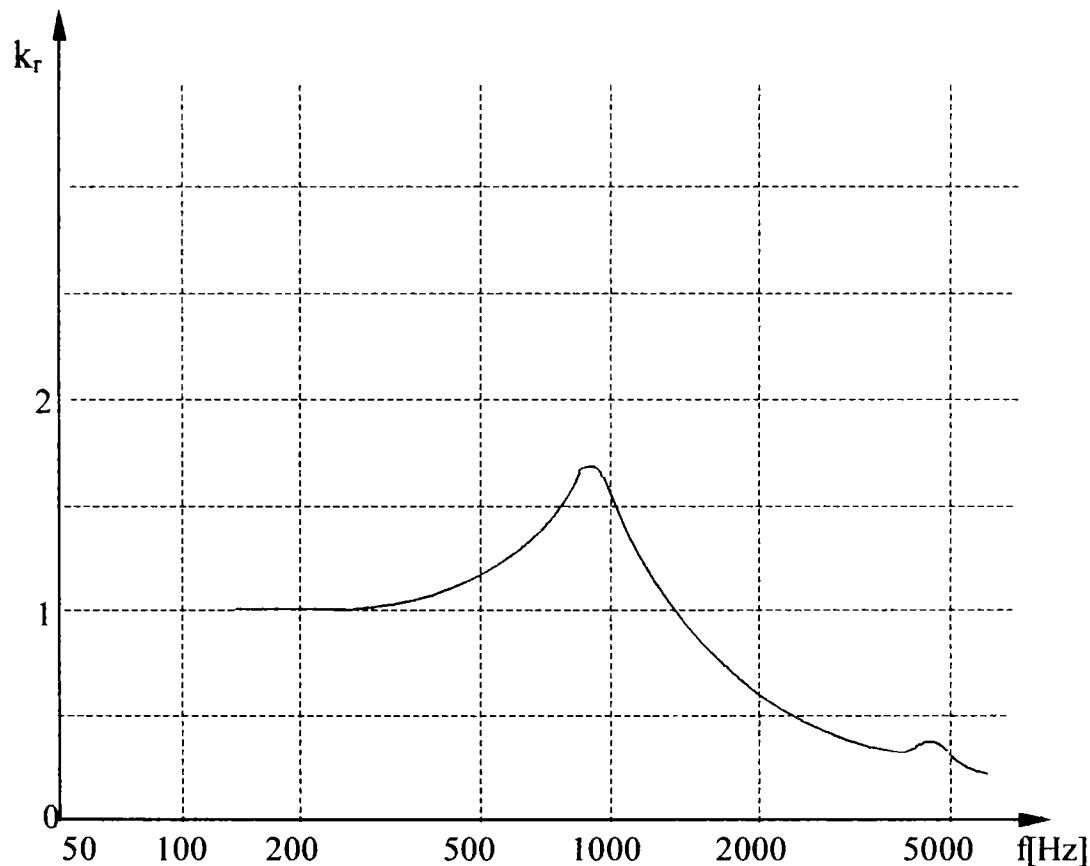


Fig. 3.49. Variația raportului relativ de transformare al unui transformator de tensiune cu  $U_n = 20 \text{ KV}$  cu frecvența.

În figura 3.49 este prezentată forma de variație a raportului relativ de tensiune pentru un transformator de tensiune cu circuit magnetic cu tensiunea nominală de  $20 \text{ KV}$ , formă prezentată în [68]. Se poate trage concluzia că utilizarea transformatoarelor de tensiune cu miez magnetic la frecvențe ridicate prezintă erori însemnate, cu atât mai mult cu cât la înaltă tensiune alimentarea lor se realizează cu divizoare capacitive.

### 3.5.5. Aparatura de măsură utilizată

În cadrul acestui paragraf sunt prezentate caracteristicile transformatoarelor de măsură utilizate la măsurările efectuate pe liniile de alimentare de joasă și de medie tensiune.

În ceea ce privește **măsurarea curentului** se disting două cazuri:

- În cazul măsurării curentului pe linia de alimentare de **joasă tensiune** s-a utilizat un transformator de curent  $70000 \text{ A} / 70 \text{ A}$  de tip **CITO 0,66** produs de **Electroputere Craiova** [112]. Datorită faptului că acest transformator este realizat cu miez de fier, banda de frecvență a acestuia este limitată atât inferior cât și superior. La frecvențe joase se manifestă micșorarea reactanței datorate inductivității proprii în timp ce la frecvențe înalte reactanța crește datorită creșterii inductivității de dispersie. Principalele caracteristici ale acestui transformator, prezentate în certificatul de calitate al acestuia, constau în **banda de frecvență de 4 KHz** și erori cuprinse între **4%** și **10%**, mai mari în timpul regimului tranzitoriu.

- În cazul măsurării curentului pe linia de alimentare de *medie tensiune* s-a utilizat un transformator de curent cu raportul de transformare de  $1500 A / 5 A$  caracterizat prin *banda de frecvență de 5 KHz și erori de 5%* [113].

În ambele cazuri benzile de frecvență asigurate de cele două transformatoare sunt suficiente realizării analizei realizate asupra undelor de curent deoarece banda de frecvență necesară analizei până la *armonica a 50-a* este de  $2,5 KHz$ , erorile introduse de către acestea fiind așa cum se va vedea ulterior acceptabile.

Datorită faptului că la măsurarea curentului erorile introduse de către blocul de adaptare a curenților și tensiunilor la placa de achiziție de date sunt de  $0,2\%$ , acesta asigurând o *bandă de frecvență de 100 KHz*, se poate considera că utilizarea acestuia se încadrează în limitele erorilor introduse de transformatoarele de curent.

Erorile care intervin în *măsurarea tensiunii* electrice se datorează în principal la două cauze. O *primă cauză* se datorează faptului că măsurarea tensiunii electrice se face utilizând transformatoare de tensiune care introduc erori de măsură.

- În cazul măsurării tensiunii electrice pe linia de alimentare de *joasă tensiune* s-a utilizat un *transformator de tensiune în V* de tip *CITO 0,66, 660 V / 110 V*, caracterizat prin *erori de măsură de 3% și bandă de frecvență de 5 KHz* [114].

- În cazul măsurării tensiunii pe linia de alimentare de medie tensiune s-a utilizat un *transformator de tensiune în V* de tip *CITO 0,66, 30000 V / 1000 V* caracterizat prin *erori de măsură de 5% și bandă de frecvență de 5 KHz* [115].

Și în această situație utilizarea blocului de adaptare pentru măsurarea curenților și tensiunilor mari se încadrează în erorile introduse de transformatoarele de tensiune deoarece, așa cum s-a prezentat anterior, banda de frecvență asigurată de acesta este de  $15 KHz$  cu o *eroare de neliniaritate de 1%*.

O *a doua cauză* o constituie tensiunile induse în conductoarele de măsură a tensiunii. Datorită valorilor foarte mari a curenților de pe linia de alimentare de joasă tensiune în imediata vecinătate a cuptorului electric câmpul magnetic care apare induce în conductoarele de măsură tensiuni a căror valoare poate produce erori foarte mari.

S-a constatat experimental faptul că fără măsuri speciale de ecranare a instalației de măsură funcționarea sistemului de calcul în care era introdusă placa de achiziție de date a fost puternic perturbată, monitorul pierzând informația de sincronizare și de culoare.

Din acest motiv au fost luate o serie de măsuri specifice măsurătorilor în câmpuri electromagnetice intense [48],[49],[54]:

- aparatele și echipamentele utilizate ( calculator cu placa de achiziție de date, monitor, blocul de adaptare pentru măsurarea curenților și tensiunilor, sursă de tensiune neîntreruptibilă ) au fost montate în camera de comandă, fiind închise într-o carcasă metalică cu rolul ecranării câmpului magnetic exterior;

- conductoarele utilizate la măsurarea curenților și tensiunilor au fost împletite în vederea reducerii buclelor în care s-ar putea induce tensiuni perturbatoare, după care acestea au fost ecranate;

- alimentarea a fost făcută de la o singură priză de tensiune monofazată prevăzută cu împământare, priză la care a fost conectată sursa de tensiune neîntreruptibilă. De la aceasta a fost realizată alimentarea calculatorului precum și a blocului de adaptare;

- carcasa metalică în care au fost închise aparatele și echipamentele utilizate, ecranul conductoarelor de măsură, cablul de împământare și carcasa sursei de tensiune neîntreruptibilă au fost conectate într-un singur punct, montaj care, așa cum se recomandă, asigură reducerea tensiunilor parazite induse.

Verificarea corectitudinii ipotezei că erorile de măsură obținute în aceste condiții sunt reduse s-a făcut astfel: pe parcursul perioadei de topire, în care efectele regimului deformant

sunt cele mai puternice, s-au scurtcircuitat intrările conductoarelor de măsură în imediata apropiere a secundarelor transformatoarelor de măsură (atât de curent cât și de tensiune). În aceste condiții valorile măsurate ar fi trebuit să fie nule. S-a constatat experimental faptul că valorile achiziționate în acest mod nu au depășit **2,5%** din domeniile de măsură a plăcii de achiziție, fapt care poate fi echivalat din punct de vedere al erorilor datorate tensiunilor induse cu o funcționare a unui aparat de măsură de **clasă 2,5**.

### 3.5.6. Influența introducerii corecțiilor asupra rezultatelor măsurătorilor

În acest paragraf autorul își propune să analizeze modul în care se pot corecta rezultatele obținute în urma măsurătorilor de pe linia de medie tensiune presupunând cunoscute caracteristicile transformatoarelor de curent și de tensiune utilizate.

Pentru aceasta s-a presupus că transformatoarele de curent și de tensiune au aceleași caracteristici cu cele din figurile 3.45 și 3.49, domeniile lor de funcționare fiind apropiate. Analizând figurile 3.45 și 3.49 se constată că:

- pentru măsurarea curentului se poate face o corecție până la armonica **25**;
- pentru măsurarea tensiunii datorită unei puternice reduceri a raportului relativ de transformare a transformatorului de tensiune peste valoarea de **1000 Hz** erorile de măsurare a armonicilor cu ordinul mai mare de **20** sunt foarte mari.

Din acest motiv corecția rezultatelor măsurătorilor s-a făcut numai pentru primele **20** de armonici ale curentului și tensiunii. Puterile în regim deformant "**corectate**" au fost calculate utilizând doar primele **20** de armonici a căror amplitudine a fost modificată în funcție de raportul de transformare al transformatoarelor pe armonica respectivă.

Pe baza acestor observații se poate considera că eroarea totală la calculul puterilor în regim deformant se datorează atât utilizării a **20** de armonici în locul a **50**, cât și datorită transformatoarelor de măsură folosite.

Pentru a determina influența utilizării unui număr de **20** de armonici în locul a **50** au fost calculate valorile puterilor aparentă, activă, reactivă și deformantă pentru un set de **20** de fișiere dintre cele **1200** achiziționate pe linia de **medie tensiune**, calculele efectuându-se în două variante: în prima variantă s-au luat în calcul primele **50 de armonici** obținute în urma aplicării *transformatei Fourier*, iar în a doua variantă s-au luat în calcul numai primele **20 de armonici**. Rezultatele sunt prezentate în **tabelul 3.3**.

Considerând că valorile obținute utilizând **50** de armonici sunt cele "**adevărate**" s-au calculat **erorile relative** exprimate în procente pentru puterile în regim deformant, precum și **eroarea medie pătratică**. Se observă că:

- erorile de măsurare a puterilor aparentă, activă și reactivă sunt mai mici de **1%**, fapt care demonstrează că ponderea armonicilor a căror ordin este mai mare de **20** este redusă;
- erorile de măsurare a puterii deformante sunt mai mari (**3 – 4 %**);
- puterea activă măsurată utilizând **20** de armonici este mai mare decât în cazul utilizării a **50** de armonici, fapt care demonstrează că, exceptând fundamentala, cuptorul electric este generator de armonici pentru instalația electrică de alimentare.

Influența "**corecției**" se poate determina pe baza rezultatelor prezentate în **tabelul 3.4**, în care au fost calculate valorile puterilor în regim deformant utilizând primele **20** de armonici cu și fără corecția rezultatelor provenite de la măsurarea curenților și tensiunilor. La calculul erorilor s-a considerat că valoarea "**adevărată**" este cea obținută în urma aplicării corecțiilor.

Analizând rezultatele prezentate în acest tabel se observă că **erorile introduse în calculul puterilor în regim deformant în lipsa corecției transformatoarelor de curent și de tensiune se situează în jurul valorii de 1%**.

**OBSERVAȚIE:** În **tabelele 3.3 și 3.4** linia marcată corespunde datelor reprezentate în figurile 3.23 și 3.25.



Tabelul 3.3.

Puterile în regim deformant calculate pe medie tensiune utilizând 50 și 20 de armonici.

Ora achiziției	Nr. fișier	Rezultate obținute utilizând 50 de armonici fără corecție				Rezultate obținute utilizând 20 de armonici fără corecție				ε <sub>S</sub> (%)	ε <sub>P</sub> (%)	ε <sub>Q</sub> (%)	ε <sub>D</sub> (%)
		S (MVA) (2.27),(2.28)	P (MW) (2.20)	Q (MVAR) (2.21)	D (MVAD) (2.22)	S (MVA) (2.27),(2.28)	P (MW) (2.20)	Q (MVAR) (2.21)	D (MVAD) (2.22)				
8:15:40	5	41,37	26,99	29,81	9,70	41,46	27,11	29,94	9,34	0,22	0,46	0,44	-3,69
8:17:20	15	37,09	26,82	23,74	9,61	37,15	26,96	23,87	9,16	0,19	0,50	0,56	-4,70
8:23:10	50	44,13	19,34	37,86	11,82	44,21	19,46	38,00	11,46	0,17	0,64	0,36	-3,05
8:32:20	105	37,61	28,49	21,94	11,03	37,68	28,62	22,07	10,66	0,18	0,45	0,61	-3,38
8:50:40	215	38,50	36,82	8,05	7,87	38,59	36,95	8,17	7,56	0,22	0,34	1,50	-3,87
9:04:50	300	59,34	54,17	19,19	14,77	59,40	54,30	19,32	14,34	0,09	0,24	0,64	-2,86
9:21:30	400	49,42	36,91	24,64	21,75	49,49	37,03	24,76	21,56	0,14	0,33	0,51	-0,87
9:29:50	450	62,23	53,40	28,10	15,24	62,29	53,52	28,24	14,79	0,09	0,23	0,49	-2,96
9:51:30	580	68,51	49,58	45,49	12,91	68,58	49,70	45,63	12,33	0,11	0,24	0,30	-4,43
10:07:20	675	36,90	28,22	19,18	14,04	36,95	28,35	19,33	13,71	0,13	0,46	0,76	-2,39
10:11:40	701	64,86	49,78	39,56	12,81	64,94	49,90	39,70	12,29	0,12	0,24	0,35	-4,05
10:24:00	775	63,78	57,55	24,69	12,10	63,85	57,66	24,83	11,63	0,11	0,20	0,55	-3,84
<b>10:28:10</b>	<b>800</b>	<b>72,18</b>	<b>48,52</b>	<b>52,29</b>	<b>11,07</b>	<b>72,25</b>	<b>48,63</b>	<b>52,43</b>	<b>10,29</b>	<b>0,09</b>	<b>0,24</b>	<b>0,27</b>	<b>-7,06</b>
10:29:00	805	66,31	57,33	30,82	12,67	66,37	57,44	30,96	12,11	0,09	0,20	0,45	-4,46
10:44:50	900	55,74	51,23	18,48	11,87	55,80	51,35	18,63	11,40	0,11	0,24	0,77	-3,91
10:51:30	940	30,34	19,37	20,91	10,42	30,43	19,49	21,03	10,16	0,28	0,66	0,62	-2,46
11:01:30	1000	63,87	49,97	37,19	14,15	63,92	50,09	37,33	13,56	0,08	0,25	0,38	-4,18
11:09:50	1050	66,77	51,90	39,55	14,17	66,84	52,01	39,70	13,67	0,10	0,22	0,36	-3,57
11:21:30	1120	32,92	29,82	12,06	7,00	33,04	29,94	12,19	6,81	0,34	0,39	1,04	-2,75
11:34:00	1195	67,14	49,19	43,49	14,04	67,19	49,31	43,64	13,35	0,07	0,25	0,35	-4,89
<b>EROAREA MEDIE PĂTRATICĂ</b>										<b>0,16</b>	<b>0,37</b>	<b>0,63</b>	<b>3,86</b>

### 3.6. Concluzii

În acest capitol s-au prezentat rezultatele măsurărilor efectuate de către autor asupra mărimilor electrice care caracterizează funcționarea cuptorului electric cu arc. În prima parte a capitolului sunt prezentate caracteristicile sistemului de măsură realizat de către autor urmate de rezultatele obținute în urma măsurărilor efectuate pe liniile de alimentare de joasă și de medie tensiune. Este prezentat de asemenea modul de determinare a impedanței circuitului de alimentare precum și o analiză a erorilor care intervin în procesul de măsurare.

În urma analizei rezultatelor măsurărilor s-au desprins următoarele **concluzii** importante:

- *Pe linia de alimentare de joasă tensiune unda de tensiunea este mai distorsionată decât curentul* (figurile 3.20 și 3.21) iar *pe linia de alimentare de medie tensiune curentul este mai distorsionat decât tensiunea* (figurile 3.35 și 3.36).



Tabelul 3.4.

Valorile puterilor în regim deformant calculate utilizând 20 de armonici, cu și fără corecția de frecvență.

Ora achiziției	Nr. fișier	Rezultate obținute utilizând 20 de armonici fără corecție				Rezultate obținute utilizând 20 de armonici cu corecție				$\epsilon_S$ (%)	$\epsilon_P$ (%)	$\epsilon_Q$ (%)	$\epsilon_D$ (%)
		S (MVA) (2.27),(2.28)	P (MW) (2.20)	Q (MVAR) (2.21)	D (MVAD) (2.22)	S (MVA) (2.27),(2.28)	P (MW) (2.20)	Q (MVAR) (2.21)	D (MVAD) (2.22)				
8:15:40	5	41,46	27,11	29,94	9,34	41,08	26,82	29,64	9,47	0,92	1,07	1,04	-1,43
8:17:20	15	37,15	26,96	23,87	9,16	36,81	26,68	23,63	9,21	0,94	1,05	1,03	-0,59
8:23:10	50	44,21	19,46	38,00	11,46	43,79	19,26	37,62	11,47	0,95	1,04	1,03	-0,07
8:32:20	105	37,68	28,62	22,07	10,66	37,33	28,33	21,85	10,67	0,94	1,03	1,03	-0,09
8:50:40	215	38,59	36,95	8,17	7,56	38,22	36,57	8,09	7,61	0,95	1,02	0,94	-0,60
9:04:50	300	59,40	54,30	19,32	14,34	58,83	53,75	19,12	14,37	0,95	1,03	1,01	-0,19
9:21:30	400	49,49	37,03	24,76	21,56	49,01	36,66	24,52	21,36	0,99	1,01	1,00	0,92
9:29:50	450	62,29	53,52	28,24	14,79	61,70	52,98	27,95	14,82	0,95	1,02	1,03	-0,21
9:51:30	580	68,58	49,70	45,63	12,33	67,93	49,20	45,16	12,40	0,97	1,02	1,02	-0,56
10:07:20	675	36,95	28,35	19,33	13,71	36,62	28,06	19,13	13,69	0,91	1,03	1,06	0,15
10:11:40	701	64,94	49,90	39,70	12,29	64,32	49,40	39,29	12,33	0,97	1,01	1,03	-0,29
10:24:00	775	63,85	57,66	24,83	11,63	63,23	57,08	24,57	11,66	0,97	1,01	1,03	-0,23
<b>10:28:10</b>	<b>800</b>	<b>72,25</b>	<b>48,63</b>	<b>52,43</b>	<b>10,29</b>	<b>71,55</b>	<b>48,14</b>	<b>51,90</b>	<b>10,42</b>	<b>0,97</b>	<b>1,01</b>	<b>1,03</b>	<b>-1,27</b>
10:29:00	805	66,37	57,44	30,96	12,11	65,73	56,87	30,64	12,16	0,97	1,01	1,03	-0,45
10:44:50	900	55,80	51,35	18,63	11,40	55,27	50,83	18,43	11,46	0,96	1,02	1,06	-0,51
10:51:30	940	30,43	19,49	21,03	10,16	30,15	19,30	20,82	10,14	0,93	1,02	1,01	0,25
11:01:30	1000	63,92	50,09	37,33	13,56	63,32	49,58	36,95	13,61	0,96	1,02	1,03	-0,37
11:09:50	1050	66,84	52,01	39,70	13,67	66,20	51,49	39,29	13,72	0,96	1,02	1,03	-0,36
11:21:30	1120	33,04	29,94	12,19	6,81	32,72	29,64	12,07	6,80	0,96	1,00	0,99	0,11
11:34:00	1195	67,19	49,31	43,64	13,35	66,55	48,82	43,19	13,45	0,96	1,02	1,04	-0,70
<b>EROAREA MEDIE PĂTRATICĂ</b>										<b>0,96</b>	<b>1,02</b>	<b>1,02</b>	<b>0,60</b>

• *Faza tehnologică a procesului de elaborare a șarjei are influență asupra mărimilor electrice.* Astfel în faza de topire undele de curent și de tensiune sunt mai deformate decât în celelalte faze, fapt care rezultă din:

- formele de undă prezentate în figurile 3.7 și 3.8 pentru linia de alimentare de joasă tensiune, respectiv 3.22 și 3.23 pentru linia de alimentare de medie tensiune;
- distribuția armonicilor și interarmonicilor din caracteristicile spectrale prezentate în figurile 3.9 și 3.10 pentru linia de alimentare de joasă tensiune, respectiv în figurile 3.24 și 3.25 pentru linia de alimentare de medie tensiune;
- variația valorilor puterilor deformante, prezentate în figurile 3.14 și 3.29, respectiv a factorului deformant, prezentate în figurile 3.17 și 3.32, pe durata unei șarje;

- variația valorilor coeficienților de distorsiune armonică totală și parțial ponderată pentru undele de curent și de tensiune de pe linia de alimentare de joasă tensiune (figurile 3.20 și 3.21) și de pe cea de medie tensiune (figurile 3.35 și 3.36).

• **Erorile de măsurare a puterilor în regim deformant** datorate neliniarității caracteristicii de frecvență a traductoarelor de curent și de tensiune se găsesc în jurul valorii de 2% pentru puterile **aparentă, activă și reactivă**, respectiv **4% pentru puterea deformantă**.

• **Erorile de măsurarea puterilor** datorate tensiunilor parazite induse sunt de 2,5%, comparabile cu cele datorate transformatoarelor.

**Contribuțiile autorului** în acest capitol sunt:

• **Conceperea și realizarea unui bloc de adaptare a tensiunilor și curenților de valori mari** la domeniul de intrare acceptat de placa de achiziție de date. Principalele caracteristici ale blocului de adaptare a curenților și tensiunilor constau în **realizarea unei izolări galvanice între circuitul de măsură și placa de achiziție de date** în condițiile în care **banda de frecvență asigurată de 100 kHz este superioară frecvenței de eșantionare de 5 kHz și erorile de neliniaritate introduse sunt de 0,2%**.

• Analiza rezultatelor măsurărilor atât pe linia de alimentare de joasă tensiune cât și pentru cea de medie tensiune făcută din punct de vedere al :

- formei de variație în timp a curenților și tensiunilor;
- caracteristicii spectrale a curenților și tensiunilor;
- variației puterilor în regim deformant pe durata unei șarje;
- variației factorilor de putere în regim deformant pe durata unei șarje;
- variației coeficienților de distorsiune totali și ponderați atât pentru unda de curent cât și pentru cea de tensiune.

• În vederea dimensionării instalației de compensare a puterii reactive și a filtrelor pe armonici s-au determinat suplimentar pe linia de alimentare de medie tensiune:

- variația puterii active și reactive pentru fiecare armonică;
- variația valorilor efective ale armonicilor de curenți și tensiune pe durata șarjei.

• S-au determinat erorile care pot interveni în procesul de măsurare a puterilor în regim deformant pe linia de alimentare de medie tensiune utilizând caracteristicile transformatoarelor de curent și de tensiune.

## 4. CALCULUL INSTALAȚIILOR DE ÎMBUNĂȚIRE A INDICATORILOR CALITATIVI DE UTILIZARE A ENERGIEI ELECTRICE

Îmbunătățirea indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice necesită întreprinderea unor acțiuni în vederea *îmbunătățirii factorului de putere*, a *echilibrării sarcinii* respectiv *de filtrare a curenților armonici* [3],[4],[7],[8].

Calculul este făcut pe baza rezultatelor obținute în urma măsurării mărimilor electrice de pe linia de alimentare de medie tensiune, rezultate prezentate în capitolul precedent. De asemenea o serie de valori ale parametrilor electrici ai instalației cuptorului electric cu arc de la *Oțelăria OE2 a Combinatului Siderurgic Hunedoara* au fost măsurate de către specialiștii de la oțelăria electrică și furnizate autorului în vederea acestei proiectări [110],[112],[113],[114],[115].

### 4.1. Calculul instalației de compensare dinamică directă a puterii reactive

Schema de principiu a instalației de compensare a puterii reactive este prezentată în figura 4.1.a [26]. Instalația de compensare dinamică este conectată în derivație la linia de alimentare de medie tensiune ( $30\text{ kV}$ ), fiind în mod uzual amplasată în stația de racord adânc (SRA).

Proiectarea instalației de compensare dinamică a puterii reactive se bazează pe compensarea în întregime sau menținerea constantă la o valoare acceptabilă a căderii de tensiune longitudinală  $U_L$ , produsă de curentul cuptorului pe impedanța internă a rețelei, dată de relația

$$\underline{Z}_N = R_N + jX_N. \quad (4.1)$$

Căderea de tensiune longitudinală pe impedanța rețelei este dată de relația

$$U_L = \operatorname{Re}\{\Delta \underline{u}\} = \operatorname{Re}\{(R_N + jX_N)(\underline{I}_c + \underline{I}_{comp})\}, \quad (4.2)$$

unde, potrivit figurii 4.1.b,  $\underline{I}_c$  este curentul cuptorului și  $\underline{I}_{comp}$  este curentul instalației de compensare.

Alegând ca referință tensiunea de fază  $\underline{U}_f$  și considerând că între  $\underline{I}_c$  și tensiunea de fază există defazajul  $\varphi_0$  rezultă diagrama fazorială din figura 4.2. Se poate deduce ușor că

$$U_L = I_c (R_N \cos \varphi_0 + X_N \sin \varphi_0) - X_N I_{comp}. \quad (4.3)$$



În cazul compensării căderea de tensiune trebuie să aibă o valoare constantă dorită, notată

$$U_L = U_{comp} = \text{const.} \quad (4.4)$$

Definind caracteristica rețelei de alimentare  $\varepsilon$  potrivit relației [26]:

$$\varepsilon = \frac{R_N}{X_N}, \quad (4.5)$$

din relațiile (4.3) și (4.5) se poate obține

$$I_{comp} = I_c (\varepsilon \cdot \cos \varphi_0 + \sin \varphi_0) - \frac{U_{comp}}{X_N}, \quad (4.6)$$

care prin amplificarea cu  $3U_f$  conduce la obținerea ecuației puterilor

$$Q_{comp} = S_C \cdot (\varepsilon \cdot \cos \varphi_0 + \sin \varphi_0) - \frac{3U_f \cdot U_{comp}}{X_N}. \quad (4.7)$$

În relația (4.7)  $U_f$  reprezintă tensiunea de fază  $\left(\frac{30}{\sqrt{3}} \text{ kV}\right)$  iar  $S_C$  puterea aparentă maximă a cuptorului. Dimensionarea instalației de compensare dinamică a puterii reactive se face pentru funcționarea pe treapta de tensiune maximă a transformatorului cuptorului [26].

Într-o primă etapă de dimensionare se presupune că rețeaua de alimentare scurtă este simetrică, având egale impedanțele pe cele trei faze ale liniei de joasă tensiune egale, iar funcționarea este echilibrată pe cele trei faze ale cuptorului.

În figura 4.3 este reprezentată diagrama cercului în sistem trifazat la funcționarea simetrică a rețelei de alimentare [1],[26]. Din această figură se observă că se poate scrie

$$S_C = \sqrt{2} S_{Cn} \sin \varphi_0, \quad (4.8)$$

unde  $S_{Cn}$  este puterea aparentă de topire de bază corespunzătoare unui  $\cos \varphi_{0n} = \frac{\sqrt{2}}{2}$ .

Înlocuind (4.8) în (4.7) se obține

$$\frac{Q_{comp}}{S_{Cn}} = \sqrt{2} (\sin^2 \varphi_0 + \varepsilon \cdot \sin \varphi_0 \cos \varphi_0) - \frac{3U_f \cdot U_{comp}}{S_{Cn} X_N}. \quad (4.9)$$

Notând cu  $\cos \varphi$  factorul de putere mediu propus a fi realizat, acestuia îi corespunde o cădere de tensiune longitudinală dată de relația

$$U_{comp} = \frac{S}{3U_f} (R_N \cos \varphi + X_N \sin \varphi), \quad (4.10)$$

în care  $S$  reprezintă puterea ansamblului cuptor-instalație de compensare.

Deoarece  $P = S \cdot \cos \varphi$  și  $Q = S \cdot \sin \varphi$  se poate arăta că

$$P \cdot R_N + Q \cdot X_N = 3U_{comp} \cdot U_f, \quad (4.11)$$

relație din care se obține

$$P = -\frac{1}{\varepsilon} \cdot Q + \frac{3U_{comp} \cdot U_f}{R_N}. \quad (4.12)$$

Ecuația (4.12) reprezintă o dreaptă cu coeficient unghiular  $\left(-\frac{1}{\varepsilon}\right)$  care intersectează axa absciselor în punctul  $A \left(0, \frac{3\varepsilon U_f \cdot U_{comp}}{S_{Cn} \cdot R_N}\right)$ .

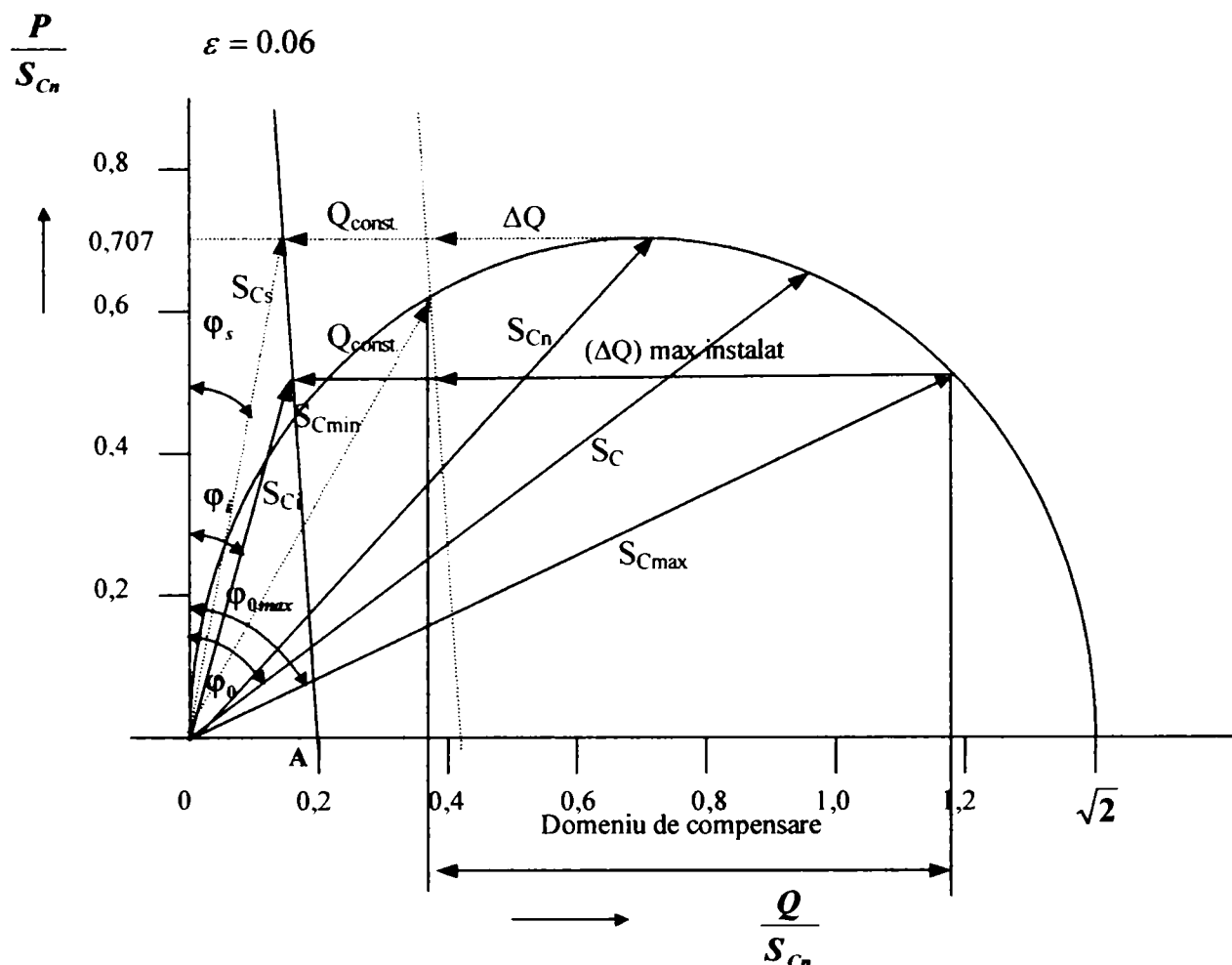


Fig. 4.3. Diagrama cercului pentru dimensionarea instalației de compensare prin metoda directă.

Neglijând puterea activă pierdută în instalația de compensare se obține

$$S \cos \varphi = S_C \cos \varphi_0 \quad (4.13)$$

din care prin înlocuire în (4.11) și utilizând (4.8) rezultă

$$U_{comp} = \frac{\sqrt{2} X_N S_{Cn}}{3U_f} \cdot \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 (\varepsilon + \operatorname{tg} \varphi). \quad (4.14)$$

Puterea reactivă a instalației de compensare este

$$\frac{Q_{comp}}{S_{Cn}} = \sqrt{2} \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 (\operatorname{tg} \varphi_0 - \operatorname{tg} \varphi). \quad (4.15)$$

Notând cu  $\varphi_{max}$  unghiul corespunzător punctului de pe diagrama cercului pentru care încă se mai dorește o compensare integrală până la  $\cos \varphi_{dorit}$  se obține relația de dimensionare

$$Q_{comp} = \sqrt{2} S_{Cn} \sin \varphi_{0max} \cos \varphi_{0max} (\operatorname{tg} \varphi_{0max} - \operatorname{tg} \varphi_{dorit}) \quad (4.16)$$

În literatura de specialitate sunt prezentate două metode de compensare a puterii reactive [26].

**Metoda directă** se bazează pe înregistrările de putere activă și reactivă efectuate pe linia de alimentare de medie tensiune. Principiul acestei metode este prezentat în figura 4.3.

Analizând variația puterii reactive se determină banda de variație a acesteia, rezultând că puterea reactivă totală care urmează a fi compensată se compune dintr-o parte constantă și o parte reglabilă în trepte, dată de relația

$$Q_{comp} = Q_{const} + \Delta Q \quad (4.17)$$



Analizând variația factorului de putere pe linia de alimentare de medie tensiune pe durata unei șarje, prezentată în figura 3.30, se constată că valoarea minimă atinsă, exceptând intervalele când electrozii nu sunt alimentați, poate fi aleasă  $0,3$ . Din acest motiv rezultă că pentru proiectare se alege

$$\cos(\varphi_{0_{\max}}) = 0,3 = \min. \quad (4.18)$$

Din *anexa III* se alege puterea nominală în timpul topirii ca puterea aparentă obținută în secundarul transformatorului cuptorului în cazul în care primarul este conectat în conexiunea  $2I \Delta$ , rezultând că

$$S_{Cn} = 73 \text{ MVA} \quad (4.19)$$

Alegând valoarea factorului de putere până la care se dorește a se realiza compensarea

$$\cos \varphi_{\text{dorit}} = 0,95 \quad (4.20)$$

și utilizând relația de dimensionare (4.16) se obține valoarea puterii reactive a instalației de compensare

$$Q_{\text{comp}} = 84,2 \text{ MVAR}. \quad (4.21)$$

Mărimea puterii reactive variabile care trebuie instalată în instalația de compensare trebuie să fie cuprinsă între

$$0,7 \leq \frac{\Delta Q}{S_{Cn}} \leq 1. \quad (4.22)$$

Pentru o valoare mare se acoperă întregul domeniu de variație a puterii reactive, inclusiv scurtcircuitul trifazat iar pentru valoarea inferioară se acoperă un domeniu cuprins între  $\cos \varphi = 0,4$  până la  $\cos \varphi = 0,82$ .

Deoarece valoarea minimă a factorului de putere activă este  $0,3$  s-a ales potrivit [26]

$$\frac{\Delta Q}{S_{Cn}} = 0,8. \quad (4.23)$$

Din relația (4.23) rezultă valoarea puterii reactive variabile instalate (*având caracter capacitiv*)

$$\Delta Q = 58,4 \text{ MVAR} \quad (4.24)$$

precum și valoarea puterii reactive instalate în baterii fixe

$$Q_{\text{const}} = Q_{\text{comp}} - \Delta Q = 25,8 \text{ MVAR} \quad (4.25)$$

Dimensionarea treptelor de comutație a puterii reactive se face astfel încât la comutația unei trepte variația tensiunii  $\Delta u \%$  să nu depășească o valoare limită de perceptibilitate a iluminatului. Potrivit normelor internaționale, [26], [55], valoarea maximă admisă este  $\Delta u_{\text{admis}} = 0,4 \%$ . Notând cu  $S_{sc}$  puterea de scurtcircuit pe linia de alimentare de  $110 \text{ KV}$ , ( $\approx 1100 \text{ MVA}$ ), care reprezintă punctul de conexiune comun cu alți consumatori, puterea reactivă totală pentru o treaptă este dată de relația

$$(\Delta Q)_{\text{treaptă}} = \Delta u_{\text{admis}} \cdot S_{sc}. \quad (4.26)$$

Numărul de trepte în care se face reglarea se calculează din relația

$$n = \frac{\Delta Q}{\Delta u_{\text{admis}} \cdot S_{sc}} = 13,27. \quad (4.27)$$

Alegându-se ca număr de trepte valoarea întregă imediat superioară numărului obținut, rezultă că reglarea puterii reactive a instalației de compensare se face în **14 trepte**, puterea reactivă pentru o treaptă este

$$\Delta Q_{\text{treaptă}} = 4,17 \text{ MVAR}, \quad (4.28)$$

## 4.2. Calculul filtrelor de absorbție pe armonicile 5,7,11 și 13

În acest paragraf se prezintă modul de calcul al filtrelor de absorbție pe armonicile 5,7,11 și 13.

Una dintre mărimile necesare a fi cunoscute o reprezintă valoarea curenților armonicilor de ordin  $k$  deoarece potrivit recomandărilor *CEI 70/1967* [26] un condensator cu o anumită tensiune nominală  $U_{n50}$ , corespunzătoare fundamentalei cu frecvența de  $50\text{ Hz}$  și un anumit curent nominal  $I_{n50}$  poate funcționa într-un regim deformant de lungă durată caracterizat prin  $U_{ef} = 1,1 \cdot U_{n50}$  și  $I_{ef} = 1,3 \cdot I_{n50}$ , adică o supraîncărcare din punct de vedere al puterii de  $43\%$ . Din acest motiv este important să se determine care este valoarea nominală a armonicii  $k$  care străbătând simultan cu armonica fundamentală filtrul  $L-C$  face ca puterea totală să nu depășească valoarea impusă de fabricant.

Cunoașterea domeniului de variație al curenților armonicilor este dificilă deoarece:

- consumatorul este reprezentat de o sarcină fluctuantă în timp;
- curentul armonicii de ordin  $k$  care s-a înregistrat pe barele de alimentare ale stației înaintea montării filtrelor se modifică după montarea acestora;
- curentul armonicii de ordinul  $k$  trebuie astfel ales încât să nu producă deconectări prea dese ale filtrului deoarece acestea duc la uzura rapidă a aparatelor de comutație și la slăbirea nivelului de izolație din instalație.

În urma înregistrării datelor obținute prin măsurarea mărimilor electrice de pe linia de alimentare de medie tensiune s-a putut determina forma de variație a armonicilor de curent și de tensiune pe durata unei șarje, prezentate în *anexa IV*.

Ținând seama de rezultatele măsurătorilor pe linia de alimentare de  $30\text{ KV}$ , curenții nominali ai filtrelor de absorbție aleși la proiectare sunt:

- curentul nominal al filtrului pentru *armonica 5*:  $I_n^5 = 100\text{ A}$  (*anexa IV.2*, figura 5);
- curentul nominal al filtrului pentru *armonica 7*:  $I_n^7 = 50\text{ A}$  (*anexa IV.2*, figura 6);
- curentul nominal al filtrului pentru *armonica 11*:  $I_n^{11} = 25\text{ A}$  (*anexa IV.2*, figura 7);
- curentul nominal al filtrului pentru *armonica 13*:  $I_n^{13} = 25\text{ A}$  (*anexa IV.2*, figura 8).

Valorile alese pentru curenții nominali sunt mai mari decât cele înregistrate în urma măsurătorilor datorită faptului că în practică au apărut multe cazuri de deteriorare a filtrelor dimensionate strict pe baza valorilor curenților armonici generați de consumatorul studiat [26]. Aceasta se datorează posibilității apariției unor circulații de curenți armonici proveniți de la consumatori deformanți îndepărtați [4],[7],[97].

În acest subcapitol vor fi prezentate mai multe metode utilizate în proiectarea filtrelor de absorbție precum și rezultatele obținute în urma aplicării acestora.

- Prima metodă permite dimensionarea filtrelor absorbante pe baza *condițiilor privitoare la tensiunea și solicitarea termică a condensatoarelor* [26].

Ca ipoteză simplificatoare s-a presupus că prin filtrul pentru o anumită armonică circulă la un moment dat doar curentul armonicii respective și curentul fundamentalei.

Prima condiție impune ca tensiunea la bornele capacității filtrului, datorată atât fundamentalei cât și armonicii de ordin  $k$ , să fie mai mică decât tensiunea admisibilă la bornele condensatorului ales. Aceasta se scrie sub forma

$$U_{C50} + U_{Ck} \leq U_{adm}, \quad (4.29)$$

în care  $U_{C50}$  reprezintă căderea de tensiune datorată fundamentalei,  $U_{Ck}$  căderea de tensiune datorată armonicii de ordin  $k$  și  $U_{adm}$  tensiunea admisibilă la bornele condensatorului ales.

Această relație poate fi scrisă sub forma

$$\frac{k^2}{k^2 - 1} U_f + \frac{I_n^k}{k\omega C} \leq U_{adm}, \quad (4.30)$$

unde  $U_f$  este tensiunea de fază. Din această relație rezultă prima condiție de dimensionare a capacității filtrului bazată pe limitarea tensiunii la bornele acestuia

$$C_u \geq \frac{I_n^k}{k\omega \left( U_{adm} - \frac{k^2}{k^2 - 1} U_f \right)} \quad (4.31)$$

A doua condiție impune ca puterea disipată pe filtru să fie mai mică decât cea admisibilă, adică

$$P_{C50} + P_{Ck} \leq P_{adm}, \quad (4.32)$$

în care  $P_{C50}$  reprezintă puterea activă disipată de către fundamentală,  $P_{ck}$  puterea armonicilor de ordin  $k$  și  $P_{adm}$  puterea admisibilă la bornele condensatorului ales. Această relație se mai poate scrie sub forma

$$\omega \cdot C \cdot U_{C50}^2 \cdot \text{tg}\delta + \frac{I_n^k}{k\omega C} \cdot \text{tg}\delta \leq \omega \cdot C \cdot U_{adm}^2 \cdot \text{tg}\delta, \quad (4.33)$$

unde  $\text{tg}\delta$  reprezintă tangenta unghiului de pierderi dielectrice al condensatoarelor alese. Din această relație rezultă a doua condiție de dimensionare a capacității filtrului bazată pe solicitarea termică a acestuia.

$$C_l \geq \frac{I_n^k}{\omega \sqrt{k \left( U_{adm}^2 - \left( \frac{k^2}{k^2 - 1} \right)^2 \cdot U_f^2 \right)}} \quad (4.34)$$

Alegerea valorii capacității filtrului se face astfel încât să fie respectate simultan relațiile (4.31) și (4.34).

Determinarea valorii inductivității filtrului de absorbție pe armonică de ordin  $k$  se face pe baza relației

$$L = \frac{1}{k^2 \omega^2 C} \quad (4.35)$$

Performanțele filtrului se pot determina pe baza valorilor elementelor din structura acestuia. Astfel, curentul corespunzător frecvenței de  $50 \text{ Hz}$  este dat de relația

$$I_{50} = \frac{U_f}{1 - \omega L} = \frac{k^2}{k^2 - 1} \cdot \omega C U_f, \quad (4.36)$$

iar curentul total care străbate filtrul este

$$I_F^k = \sqrt{(I_{50})^2 + (I_n^k)^2} \quad (4.37)$$

Notând cu  $Q_0$  puterea reactivă admisibilă pe un condensator, cu  $U_0$  tensiunea admisibilă a unei laturi și cu  $n$  numărul de condensatoare conectate în paralel curentul admisibil este dat de relația

$$I_{adm} = n \cdot \frac{Q_0}{U_0} \quad (4.38)$$

Verificarea corectitudinii proiectării filtrului din punct de vedere al curentului care străbate condensatoarele se face pe baza relației

$$\frac{I_F^k}{I_{adm}} \leq 1,3 \quad (4.39)$$

Tensiunea la bornele capacității filtrului se poate obține pe baza relației

$$U_c = \frac{k^2}{k^2 - 1} \cdot U_f + \frac{I_n^k}{k\omega C} \quad (4.40)$$

pe baza căreia se poate verifica condiția ca raportul între tensiunea la bornele capacității și tensiunea admisibilă să îndeplinească condiția

$$\frac{U_c}{U_0} \leq 1,1 \quad (4.41)$$

Puterea reactivă a filtrului la **50 Hz** este compusă din puterea reactivă capacitivă și cea inductivă. Puterea reactivă capacitivă este dată de relația

$$Q_{C50} = 3 \cdot X_{C50} \cdot I_{50}^2 = 3 \cdot \frac{U_f^2}{X_{C50}} \cdot \left( \frac{k^2}{k^2 - 1} \right)^2, \quad (4.42)$$

iar puterea reactivă inductivă este dată de relația

$$Q_{L50} = 3 \cdot X_{L50} \cdot I_{50}^2 = 3 \cdot \frac{U_f^2}{X_{L50}} \cdot \left( \frac{k^2}{k^2 - 1} \right)^2 \cdot \frac{1}{k^2}. \quad (4.43)$$

Deoarece la frecvența de **50 Hz** impedanțele filtrelor de absorbție au caracter capacitiv, puterea reactivă totală absorbită de către acestea este dată de relația

$$Q_{Filtru} = Q_{C50} - Q_{L50} = 3 \cdot \frac{U^2}{X_{C50}} \cdot \frac{k^2}{k^2 - 1}. \quad (4.44)$$

O condiție nerestrictivă care intervine în proiectarea filtrelor de absorbție constă în aceea că impedanțele caracteristice ale filtrelor trebuie să fie egale. Aceasta se poate scrie sub forma

$$Z_c^5 = Z_c^7 = Z_c^{11} = Z_c^{13}, \quad (4.45)$$

sau

$$\frac{L^5}{C^5} = \frac{L^7}{C^7} = \frac{L^{11}}{C^{11}} = \frac{L^{13}}{C^{13}}. \quad (4.46)$$

• A doua metodă de dimensionare a filtrelor absorbante prezentată în [26], constă în **determinarea numărului de condensatoare paralel după alegerea prealabilă a tipului de condensator** respectând condițiile

$$U_{C50} + U_{Ck} \leq U_0 \quad (4.47.a)$$

și

$$\sqrt{I_{50}^2 + (I_n^k)^2} \leq 1,3 \cdot I_{adm}, \quad (4.47.b)$$

$U_0$  reprezentând tensiunea maximă admisibilă pe o latură.

După efectuarea calculelor se obțin condițiile

$$n_1 \geq \frac{\frac{U_0^2}{Q_0} \cdot I_n^k}{k \left( U_0 - \frac{k^2}{k^2 - 1} \cdot U_f \right)} \quad (4.48.a)$$

respectiv

$$n_2 \geq \frac{\frac{U_0}{Q_0} \cdot I_n^k}{\sqrt{1,3^2 - \left( \frac{k^2}{k^2 - 1} \right)^2} \cdot \frac{U_f^2}{U_0^2}}. \quad (4.48.b)$$

Numărul de condensatoare conectate în paralel se alege astfel încât să fie respectate simultan (4.48.a) și (4.48.b), potrivit relației

$$n = \max([n_1], [n_2]), \quad (4.49)$$

celelalte elemente ale filtrului de absorbție fiind calculate pe baza relațiilor prezentate la metoda anterioară. Dimensionarea pe baza acestei metode este mai puțin economică, capacitatea rezultată în acest mod fiind mai mare decât cea rezultată utilizând metoda precedentă.

În continuare proiectarea filtrului decurge în mod similar metodei precedente.

• A treia metodă realizează dimensionarea filtrului pe baza **condițiilor privitoare la tensiunea și curentul admisibil**, fiind denumită și **metoda U-I**. Potrivit normelor, [26], în cazul acestei metode este necesar a fi îndeplinite simultan relațiile (4.47.a) și

$$I_{50}^2 + (I_n^k)^2 \leq (1,5I_0)^2, \text{ potrivit normelor VDE 0560} \quad (4.50)$$

sau 
$$I_{50}^2 + (I_n^k)^2 \leq (1,3I_0)^2, \text{ potrivit normelor CEI 70/1967} \quad (4.51)$$

În ipoteza în care se dorește proiectarea conform normelor VDE 0560 tensiunea  $U_0$  trebuie să îndeplinească relația

$$U_0 \geq \frac{k^2}{k^2 - 1} \cdot \frac{k^2 + \sqrt{1,25k^2 + 2,25}}{k^2 - 2,25} \cdot U_f = \alpha U_f. \quad (4.52)$$

Valoarea capacității filtrului se determină pe baza relației

$$C \geq \frac{I_n^k}{\omega U_f} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{k^2 - 1}{k^2} \cdot \frac{k^2 - 2,25}{k^2 + \sqrt{1,25k^2 + 2,25}} = \frac{I_n^k}{\omega U_f} \cdot \beta \quad (4.53)$$

În **tabelul 4.1** sunt prezentate valorile coeficienților  $\alpha$  și  $\beta$  pentru armonicile de diferite ordine.

**Tabelul 4.1.**

**Valorile parametrilor  $\alpha$  și  $\beta$  pentru diferite armonici la metoda U-I.**

$k$	3	5	7	11	13
$\alpha$	2,1124	1,4037	1,2439	1,1326	1,1077
$\beta$	1,0128	0,5434	0,6402	0,7313	0,7582

• A patra metodă realizează dimensionarea filtrului pe baza **condițiilor privitoare la tensiunea și puterea admisibilă**, fiind denumită și **metoda U-P**. În cazul acestei metode este necesar a fi îndeplinite simultan relațiile (4.47.a) și

$$\omega C \cdot U_{c50}^2 \cdot \text{tg}\delta + k\omega C \cdot U_{ck}^2 \cdot \text{tg}\delta \leq \omega C \cdot U_0^2 \cdot \text{tg}\delta. \quad (4.54)$$

În mod similar cu metoda precedentă pe baza relațiilor (4.47.a) și (4.54) se obțin relațiile de dimensionare a capacității filtrului

$$U_0 \geq \left(\frac{k}{k-1}\right)^2 \cdot U_f = \alpha U_f. \quad (4.55)$$

Valoarea capacității filtrului se determină din condiția

$$\frac{I_n^k}{k\omega C} \leq \frac{2}{k-1} \cdot U_{c50} = \frac{2}{k-1} \cdot \frac{k^2}{k^2-1} \cdot U_f, \quad (4.56)$$

din care rezultă relația de dimensionare a capacității filtrului

$$C \geq \frac{I_n^k}{\omega U_f} \cdot \frac{k-1}{2k} \cdot \frac{k^2-1}{k^2} = \frac{I_n^k}{\omega U_f} \cdot \beta. \quad (4.57)$$

În mod similar cu metoda precedentă, valorile coeficienților  $\alpha$  și  $\beta$  pentru armonicile de diferite ordine sunt prezentate în *tabelul 4.2*.

**Tabelul 4.2.****Valorile parametrilor  $\alpha$  și  $\beta$  pentru diferite armonici la metoda U-P.**

$k$	3	5	7	11	13
$\alpha$	2,2500	1,5625	1,3611	1,2100	1,1736
$\beta$	0,2963	0,3840	0,4198	0,4508	0,4588

În cazul acestei metode după determinarea valorii capacității filtrului este necesară o verificare suplimentară a faptului că încărcarea în curent să nu fie mai mare decât  $1,3 I_{adm}$ , (potrivit normelor *CEI 70/1967*) sau  $1,5 I_{adm}$  (potrivit normelor *VDE 0560*).

Atât în cazul *metodei U-I* cât și în cazul *metodei U-P* după alegerea valorii capacității filtrului proiectarea decurge în mod asemănător cu prima metodă.

Pe baza rezultatelor măsurătorilor privitoare la valorile curenților nominali ai filtrelor de absorbție aleși la proiectare autorul a proiectat filtrele de absorbție pentru armonicile 5, 7, 11 și 13 utilizând metodele prezentate anterior.

Prima fază de proiectare, indiferent de metoda de proiectare utilizată, constă în *alegerea tipului de condensator*.

Tensiunea la stația de racord adânc (*SRA*) la care se instalează filtrul este  $U_{linie} = 30000V$ , respectiv

$$U_{fază} = U_f = \frac{U_{linie}}{\sqrt{3}} = 17320 V. \quad (4.58)$$

În aceste condiții tensiunea la care trebuie să reziste condensatorul echivalent unei laturi este dată de relația

$$U_0 = U_{max} = 1,2U_f = 20785 V. \quad (4.59)$$

Deoarece tipul condensatorului ales influențează în special numărul de ramuri cu condensatoare necesar a fi conectat în paralele, deci schema finală a filtrului, în acest paragraf s-au ales pentru realizarea filtrului condensatoare produse de firma *BICC* cu principalele caracteristici electrice [121]

$$U_n = 10,5 kV, \quad (4.60.a)$$

$$Q_0 = 100 kVAR. \quad (4.60.b)$$

Obținerea tensiunii  $U_0 = 20785V$  necesită conectarea în serie a două astfel de condensatoare, astfel că pentru capacitatea echivalentă  $C$  a unei laturi se obțin următorii parametri

$$\begin{aligned} Q &= 200 kVAR, \\ U_c &= 21000 V, \\ C &= \frac{Q}{\omega \cdot U_c^2} = 1,44 \mu F, \\ I_n &= \frac{Q}{U_c} = 9,52 A. \end{aligned} \quad (4.61)$$



În cele ce urmează este prezentat modul de proiectare al filtrelor analizând în prima etapă de alegere a condensatorului fiecare dintre cele 4 metode, după alegerea capacității proiectarea decurgând în modul prezentat la prima metodă.

Se va prezenta *modul de proiectare al filtrului de absorbție pe armonica 5*, proiectarea celorlalte filtre decurgând în mod similar.

Aplicând prima metodă de dimensionare a filtrelor pe baza condițiilor privitoare la tensiunea și solicitarea termică a condensatoarelor rezultă potrivit relațiilor (4.31) și (4.34) condițiile

$$C_u \geq 21,52 \mu F \quad , \quad (4.62.a)$$

$$C_l \geq 13,24 \mu F \quad . \quad (4.62.b)$$

Pentru a fi îndeplinite simultan relațiile (4.62), valoarea capacității filtrului se alege

$$C = 16 \cdot 1,44 \mu F = 23,04 \mu F \quad , \quad (4.63)$$

filtru care necesită utilizarea a **48 condensatoare** echivalente conectate în paralel, deci **96 condensatoare** de tipul ales.

Utilizând *a doua metodă* de dimensionare, din relațiile (4.48) rezultă

$$n_1 \geq 15,74 \quad , \quad (4.64.a)$$

$$n_2 \geq 10,56 \quad , \quad (4.64.b)$$

Se observă că în cazul acestei metode numărul de condensatoare conectate în paralel este de **16** (similar metodei precedente).

Alegând valoarea condensatorului potrivit celei de *a treia metode* de proiectare prezentate potrivit relației (4.53) se obține

$$C \geq 9,98 \mu F \quad . \quad (4.65)$$

Alegând valoarea condensatorului potrivit celei de *a patra metode* de proiectare prezentate potrivit relației (4.57) se obține

$$C \geq 7,05 \mu F \quad . \quad (4.66)$$

Verificând dacă încărcarea în curent este mai mare decât  $1,3I_{adm}$  se observă necesitatea creșterii capacității filtrului, valoarea acestuia revenind la valoarea calculată cu prima metodă.

Pe baza valorii alese pentru capacitatea filtrului, din relația (4.35) rezultă valoarea inductivității filtrului

$$L = 17,59 mH \quad . \quad (4.67)$$

Verificarea corectitudinii proiectării filtrului din punct de vedere al curentului se face utilizând relațiile (4.36) – (4.39). Se obține pe rând

$$\begin{aligned} I_{50} &= 130 A, \\ I_F^5 &= 164 A, \end{aligned} \quad (4.68)$$

$$I_{adm} = 152,2 A,$$

fiind îndeplinită și condiția impusă de relația (4.39)

$$\frac{I_F^5}{I_{adm}} = 1,07 \leq 1,3 \quad (4.69)$$

Din punct de vedere al tensiunii la bornele capacității filtrului din relația (4.40) se obține

$$U_C = 20804 V \quad , \quad (4.70)$$

valoare care verifică condiția (4.41)

$$\frac{U_C}{U_0} = 0,99 \leq 1,1 \quad (4.71)$$

Puterea reactivă absorbită de filtrul pe *armonica 5* este dată de relația (4.44), rezultând

$$Q_{\text{Filtru}}^5 = 6,785 \text{ MVAR}, \quad (4.72)$$

puterea instalată fiind de

$$Q_{\text{Instalat}}^5 = 9,6 \text{ MVAR}. \quad (4.73)$$

În mod asemănător au fost proiectate și filtrele de absorbție pe *armonicile 7,11 și 13*, rezultatele obținute fiind prezentate în *tabelul 4.3*.

*Tabelul 4.3.*

**Parametrii filtrelor de absorbție pentru armonicile de ordin 5,7,11 și 13.**

	Armonica 5	Armonica 7	Armonica 11	Armonica 13
$C_u [\mu F]$	21,52	6,85	2,04	1,71
$C_l [\mu F]$	13,24	5,31	2,057	1,88
$C [\mu F]$	<b>23,04</b>	<b>8,64</b>	<b>5,76</b>	<b>5,76</b>
<i>Nr. condensatoare echivalente paralel</i>	<b>16</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
$L [mH]$	<b>17,59</b>	<b>23,93</b>	<b>14,54</b>	<b>10,41</b>
$I_{50} [A]$	130	48	31,6	31,5
$I_F^K [A]$	164	69,31	40,29	40,21
$I_{adm} [A]$	152,32	57,12	38,08	38,08
$\frac{I_F^K}{I_{adm}}$	1,07 < 1,3	1,21	1,058	1,055
$U_C [V]$	20804	20312	18720	18485
$\frac{U_C}{U_0}$	0,99 < 1,1	0,967	0,890	0,880
$Q^{(h)} [KVAR]$	<b>6785</b>	<b>2494</b>	<b>1628</b>	<b>1624</b>
$Q_{\text{Instalat}} [KVAR]$	<b>9600</b>	<b>3600</b>	<b>2400</b>	<b>2400</b>

Din punct de vedere constructiv, condensatoarele care compun filtrele sunt conectate în conexiune dublă stea astfel:

- la filtrul pe *armonica 5* sunt conectate câte **16 condensatoare** echivalente ( două condensatoare conectate în serie ) în paralel rezultând că pe o fază sunt conectate **32 condensatoare**, schema filtrului fiind prezentată în figura 4.4;

- la filtrul pe *armonica 7* sunt conectate câte **6 condensatoare** echivalente în paralel rezultând că pe o fază sunt conectate **12 condensatoare**, schema filtrului fiind prezentată în figura 4.5;

- la filtrul pe *armonicile 11 și 13* sunt conectate câte **4 condensatoare** echivalente în paralel rezultând că pe o fază sunt conectate **8 condensatoare**, schema filtrului fiind prezentată în figura 4.6;

Suma puterilor reactive absorbite de filtrele de absorbție este dată de relația

$$Q_{\text{Filtre}} = Q_{\text{Filtru}}^5 + Q_{\text{Filtru}}^7 + Q_{\text{Filtru}}^{11} + Q_{\text{Filtru}}^{13} = 12,53 \text{ MVAR}. \quad (4.74)$$

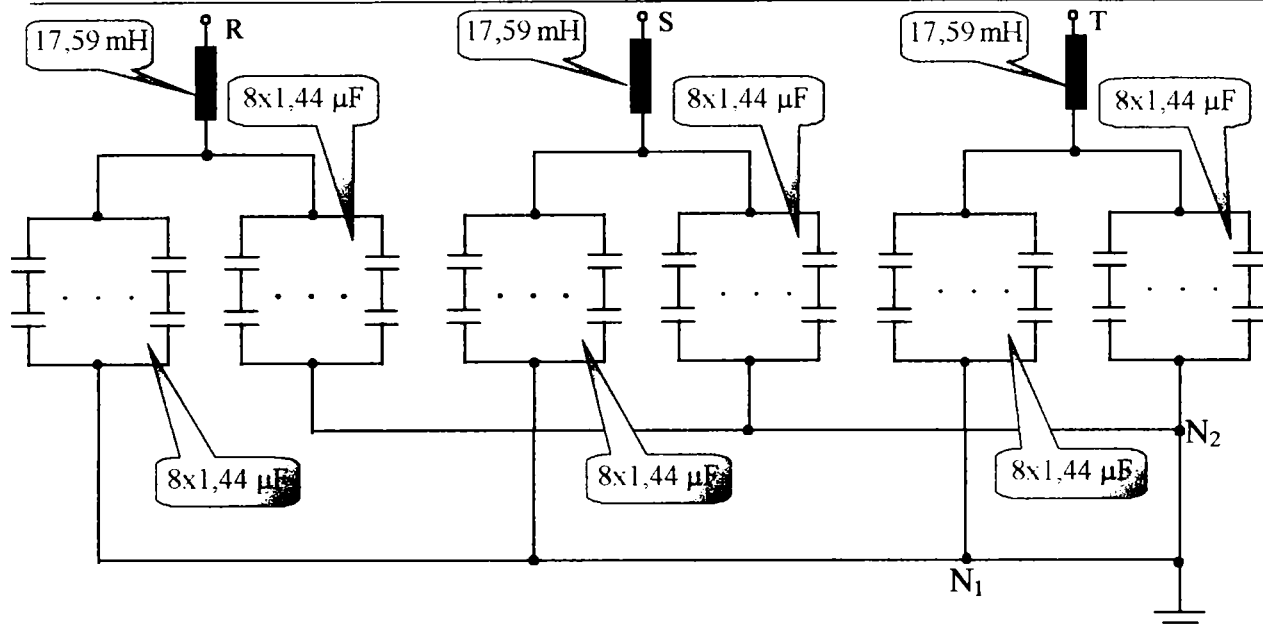


Fig. 4.4. Schema de conexiune a condensatoarelor filtrului pe armonica 5.

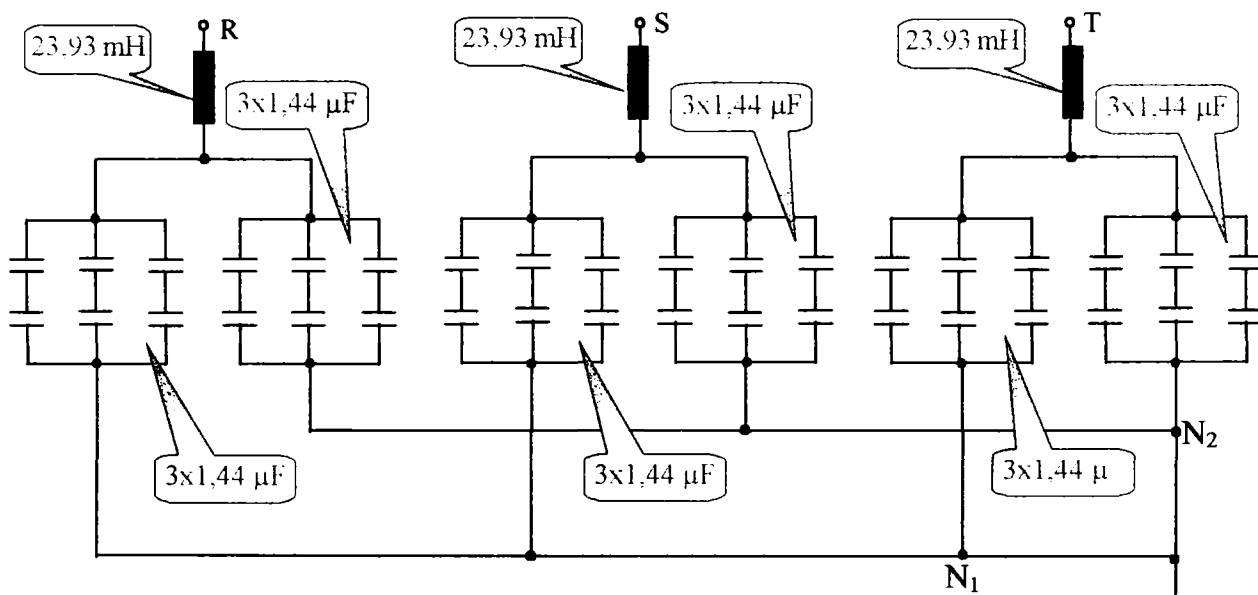


Fig. 4.5. Schema de conexiune a condensatoarelor filtrului pe armonica 7.

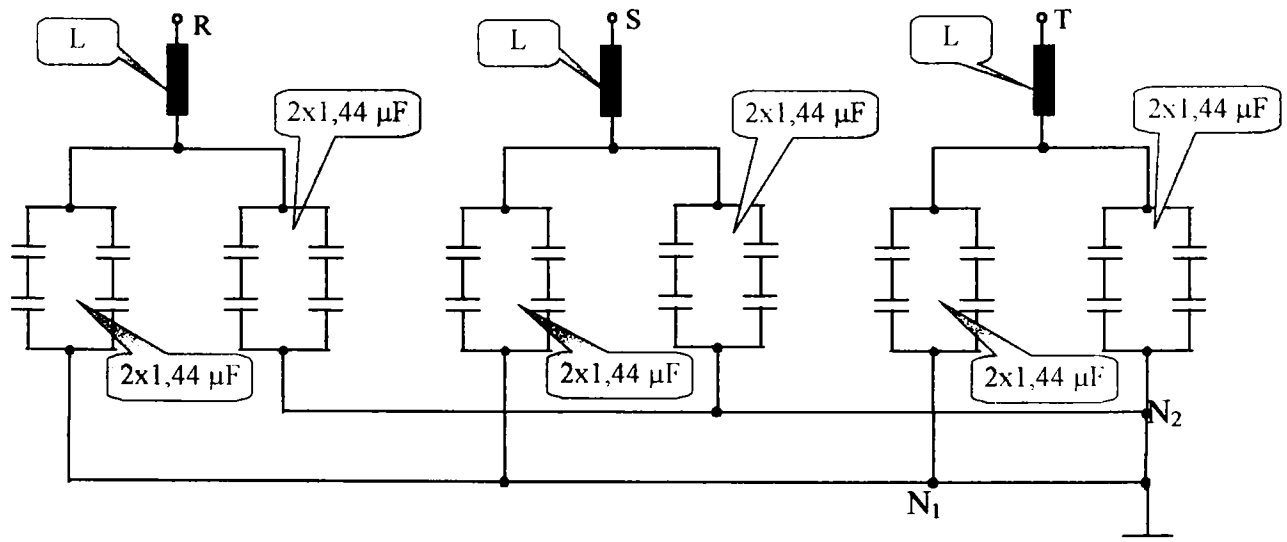


Fig. 4.6. Schema de conexiune a condensatoarelor filtrului pe armonicile 11 și 13; L=14,54 mH (armonica 11); L=10,41 mH (armonica 13).

Deoarece filtrele de absorbție sunt conectate permanent la linia de alimentare de medie tensiune rezultă că puterea reactivă absorbită de acestea face parte din puterea reactivă instalată în baterii fixe

$$Q_{\text{conect}} = Q_{\text{Filtre}} + Q_1 \quad (4.75)$$

unde  $Q_1$  este puterea unei baterii de condensatoare conectată permanent la linia de alimentare de medie tensiune, valoarea ei rezultând din relațiile (4.25) și (4.75)

$$Q_1 = 13,27 \text{ MVAR} \quad (4.76)$$

Elementele bateriei de condensatoare cu puterea reactivă  $Q_1$  se determină pe baza relației

$$C_1 = \frac{Q_1}{3\omega U_{\text{fază}}^2} = 46,93 \mu\text{F} \quad (4.77)$$

Numărul de condensatoare necesar pentru o fază este

$$n_1 = \frac{46,93 \mu\text{F}}{1,44 \mu\text{F}} = 32,59 \quad (4.78)$$

astfel încât alegând un număr de 33 condensatoare pe fază se obține capacitatea bateriei fixe pe o fază

$$C_{\text{fază}} = 33 \cdot 1,44 \mu\text{F} = 47,52 \mu\text{F} \quad (4.79)$$

În mod asemănător se pot determina elementele unei trepte a bateriei de condensatoare variabilă

$$C_{\text{var}} = \frac{\Delta Q_{\text{treaptă}}}{3\omega U_{\text{fază}}^2} = 14,74 \mu\text{F} \quad (4.80)$$

rezultând că numărul de condensatoare necesar pentru o fază este

$$n_2 = \frac{14,74 \mu\text{F}}{1,44 \mu\text{F}} = 10,23 \quad (4.81)$$

astfel încât alegând un număr de 10 condensatoare pe fază se obține capacitatea pentru o fază a unei trepte a bateriei de condensatoare variabilă

$$C_{\text{treaptă}} = 10 \cdot 1,44 \mu\text{F} = 14,4 \mu\text{F} \quad (4.82)$$

### 4.3. Calculul instalației de echilibrare a rețelei electrice de distribuție

Așa după cum s-a arătat, cuptorul cu arc electric pe lângă faptul că este un puternic generator de armonici în rețeaua de alimentare este totodată și un consumator dezechilibrat, fapt care se datorează în principal nesimetriei rețelei de alimentare de joasă tensiune. Această nesimetrie apare atât datorită inegalității impedanțelor liniei scurte cât și datorită lungimii diferite a arcului electric pe cele trei faze, indiferent de faza tehnologică. Ca urmare a nesimetriei consumatorului curenții pe cele trei faze sunt, de asemenea nesimetrice. Acest fapt conduce la aceea că și în ipoteza existenței unui sistem de alimentare simetric, datorită căderilor de tensiune diferite pe cele trei faze ale consumatorului va apare un dezechilibru al sistemului de tensiuni de alimentare la nivelul cuptorului trifazat.

Soluționarea problemei la nivelul cuptorului trifazat constă în echilibrarea artificială a sarcinilor dezechilibrate prin adăugarea în punctul de racord la rețea al acestora, în secțiunea în care se dorește echilibrarea, a unei scheme de compensare care să conțină numai elemente reactive de circuit [2],[4],[7],[8].

Se știe că orice element reactiv care intervine într-o rețea trifazată are influență asupra modificărilor produse în circulația puterilor reactive, asupra nivelului tensiunilor și factorului de putere. De asemenea, există repercursiuni în ceea ce privește regimul deformant prezent în rețea [4].

Pe baza celor prezentate anterior a rezultat că instalația electrică a cuptorului cu arc reprezintă un consumator echivalent dezechilibrat și deformant, racordat la rețeaua electrică de distribuție de 30 kV, schema echivalentă fiind reprezentată în figura 4.7.a.

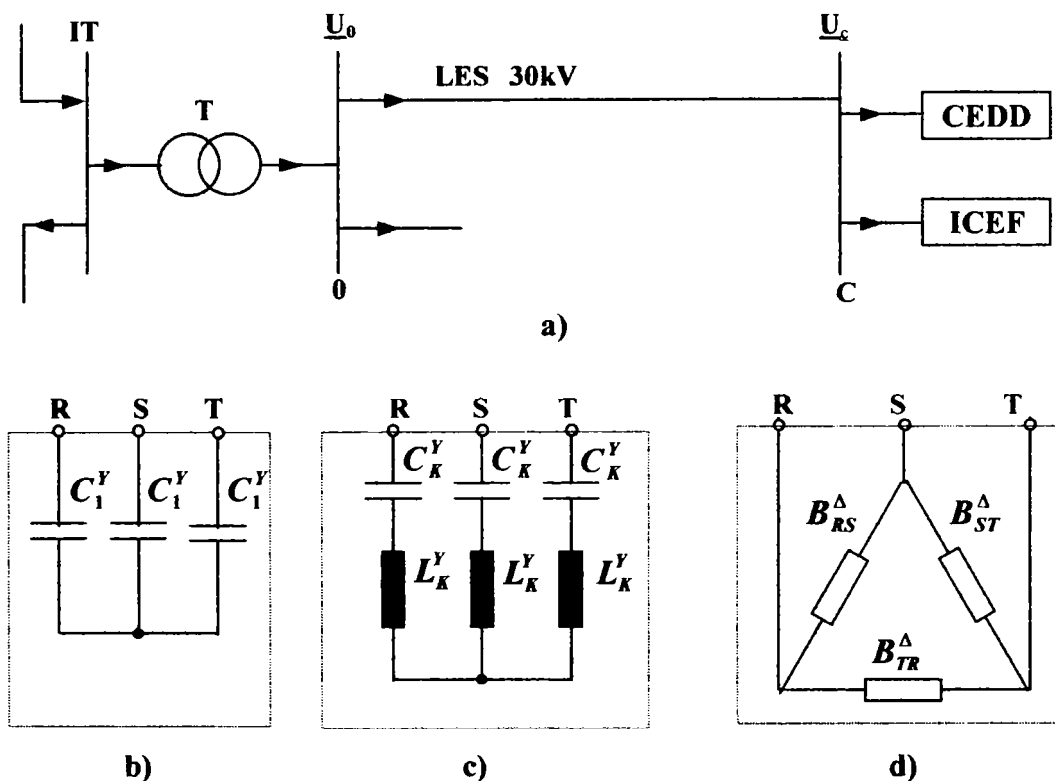


Fig. 4.7. a) Schema de alimentare a consumatorului dezechilibrat și deformant ; b) instalația de compensare a puterii reactive; c) instalația de filtrare; d) instalația de echilibrare a sarcinii.

Îmbunătățirea calității energiei în nodul de conectare a cuptorului cu arc ( considerat ca un Consumator Electric Dezechilibrat și Deformant – *CEDD* ) se face prin utilizarea Instalației de Compensare, Echilibrare și Filtrare, *ICEF*. Aceasta este constituită dintr-un ansamblu de două compensatoare, unul în conexiune Y iar celălalt în conexiune Δ .

În cazul *ICEF* calculată s-a considerat că rolul compensatorului în conexiune Y este de compensare a puterii reactive și de filtrare, el fiind constituit din două instalații:

- instalația de compensare a puterii reactive, ( figura 4.7.b) ;
- instalația de filtrare, ( figura 4.7.c).

În această situație rolul compensatorului conexiune Δ este de a îndeplini doar funcția de echilibrare a sarcinii (figura 4.7.d).

**Principiul echilibrării sarcinii** constă în utilizarea unui compensator în conexiune Δ ce prezintă curenții  $\underline{I}_{RS}^{\Delta}, \underline{I}_{ST}^{\Delta}, \underline{I}_{TR}^{\Delta}$  stabiliți din condiția anulării componente de secvență inversă a curentului pe line [3],[4]. Această condiție poate fi scrisă sub forma

$$\underline{I}_i = \underline{I}_{i\Delta}^C + \underline{I}_i^S, \tag{4.83}$$

unde

- $\underline{I}_i$  reprezintă curentul de secvență inversă pe linie,
- $\underline{I}_{i\Delta}^C$  reprezintă componenta de secvență inversă a curentului furnizat de compensator,
- $\underline{I}_i^S$  reprezintă componenta de secvență inversă a curentului de sarcină în planul fundamentalei.

Ecuția complexă (4.83) este echivalentă cu două ecuații scalare date de (4.84.a) și (4.84.b)

$$\operatorname{Re}(\underline{I}_i) = 0, \quad (4.84.a)$$

$$\operatorname{Im}(\underline{I}_i) = 0. \quad (4.84.b)$$

Determinarea susceptanțelor compensatorului necesită prezența a încă unei ecuații. Aceasta ar putea fi obținută pe baza uneia din următoarele condiții:

- suma algebrică a celor trei curenți reactivi pe laturile instalației de compensare să fie nulă;
- minimizarea pierderilor sau a puterilor capacitive instalate în bateriile de condensatoare.

Prima condiție asigură ca puterea reactivă absorbită de la rețea să fie nulă, deci compensatorul în conexiune  $\Delta$  realizează numai funcția de echilibrare.

$$\underline{I}_{RS}^C + \underline{I}_{ST}^C + \underline{I}_{TR}^C = 0. \quad (4.84.c)$$

Realizarea practică a echilibrării sarcinii on-line necesită utilizarea unor susceptanțe variabile, a căror valoare și caracter (inductiv sau capacitiv) se determină în fiecare moment prin rezolvarea sistemului de ecuații (4.84). Acestea trebuie să aibă drept caracteristici principale, următoarele:

- reglajul continuu al valorilor;
- viteza foarte mare a reglajului ca aceasta să poată fi adaptată variațiilor sarcinii.

O soluție de realizare a unei susceptanțe variabile, folosită pe scară largă în sistemele electroenergetice ale țărilor industrializate în special în cadrul compensatoarelor transversale (șunt) de putere reactivă, [4],[26],[38],[62],[81], este prezentată în figura 4.8.

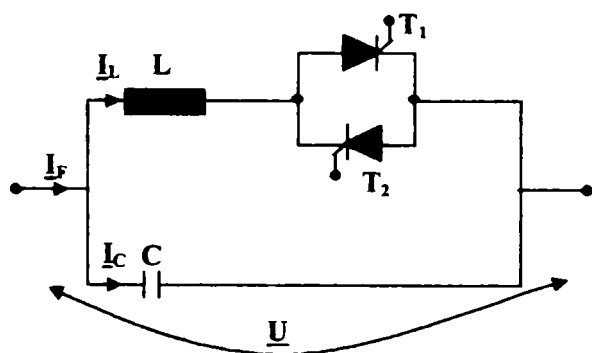


Fig. 4.8. Structura monofazată a unei susceptanțe variabile cu dublu caracter.

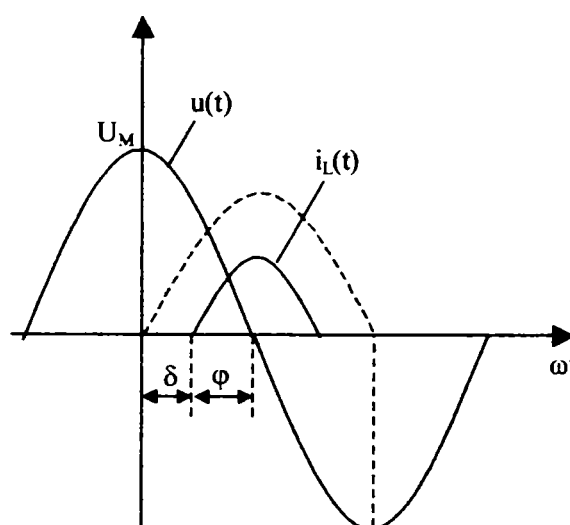


Fig. 4.9. Tensiunea și curentul pentru elementul monofazat.

Prin reglarea unghiului de comandă al tiristoarelor se modifică curentul care le traversează. Figura 4.9 prezintă forma acestui curent pentru un unghi de comandă oarecare. Considerând tensiunea de alimentare a elementului dată de relația

$$u(t) = U_M \cdot \cos \omega t, \quad (4.85)$$

expresia curentului care străbate bobina va fi

$$i_L(t) = I_T(t) = \frac{U_M}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \delta) = \frac{U_M}{\omega L} (\sin \omega t - \cos \varphi), \quad (4.86)$$

în care condiția de comandă a tiristorului este

$$0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{2} \text{ sau } 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}. \quad (4.87)$$

Expresiile valorilor medii și efective a curentului care străbate inductivitatea sunt date de relațiile



$$I_{L_{med}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{U_M}{\omega L} \cdot (\sin \varphi - \varphi \cos \varphi), \quad (4.88)$$

$$I_L = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{U_M}{\omega L} \cdot \sqrt{-\frac{3}{2} \sin 2\varphi - 2\varphi \left( \frac{1}{2} - \cos^2 \varphi \right)}. \quad (4.89)$$

Curentul care străbate condensatorul este constant și are valoarea efectivă dată de relația

$$I_C = \frac{U_M}{\sqrt{2}} \cdot \omega C \quad (4.90)$$

Curentul total al structurii monofazate este dat de relația:

$$I_F = I_L - I_C, \quad (4.91)$$

valoarea susceptanței echivalente fiind dată de relația

$$B = \frac{I_F \cdot \sqrt{2}}{U_M}. \quad (4.92)$$

Caracterul susceptanței echivalente se determină astfel:

- susceptanța are caracter inductiv dacă  $B > 0$ ,  $I_F > 0$ ,  $I_L > I_C$ ,
- susceptanța are caracter capacitiv dacă  $B < 0$ ,  $I_F < 0$ ,  $I_L < I_C$ .

Reglajul valorii susceptanței se realizează prin reglarea unghiului de comandă a tiristoarelor. Când  $\delta = 0$  ( $\varphi = 90^\circ$ ) se va obține curentul inductiv de valoare efectivă maximă. Valorile  $L$ ,  $C$  trebuie astfel alese încât curentul rezultat să aibă caracter inductiv și valoarea maximă necesară pentru compensare să corespundă susceptanței inductive maxime de care este nevoie pentru compensare.

Crescând unghiul de comandă a tiristoarelor  $\delta$ , curentul prin bobină scade. În momentul în care  $\delta = \pi/2$  curentul prin bobină se anulează, curentul rezultat fiind chiar curentul care circulă prin capacitatea  $C$ .

Procesul de control al tiristoarelor și modificarea curenților în interiorul structurii monofazate idealizate în funcție de unghiul de comandă al tiristoarelor ( $\delta$  crește de la  $0^\circ$  la  $90^\circ$ ) este prezentat în figura 4.10.

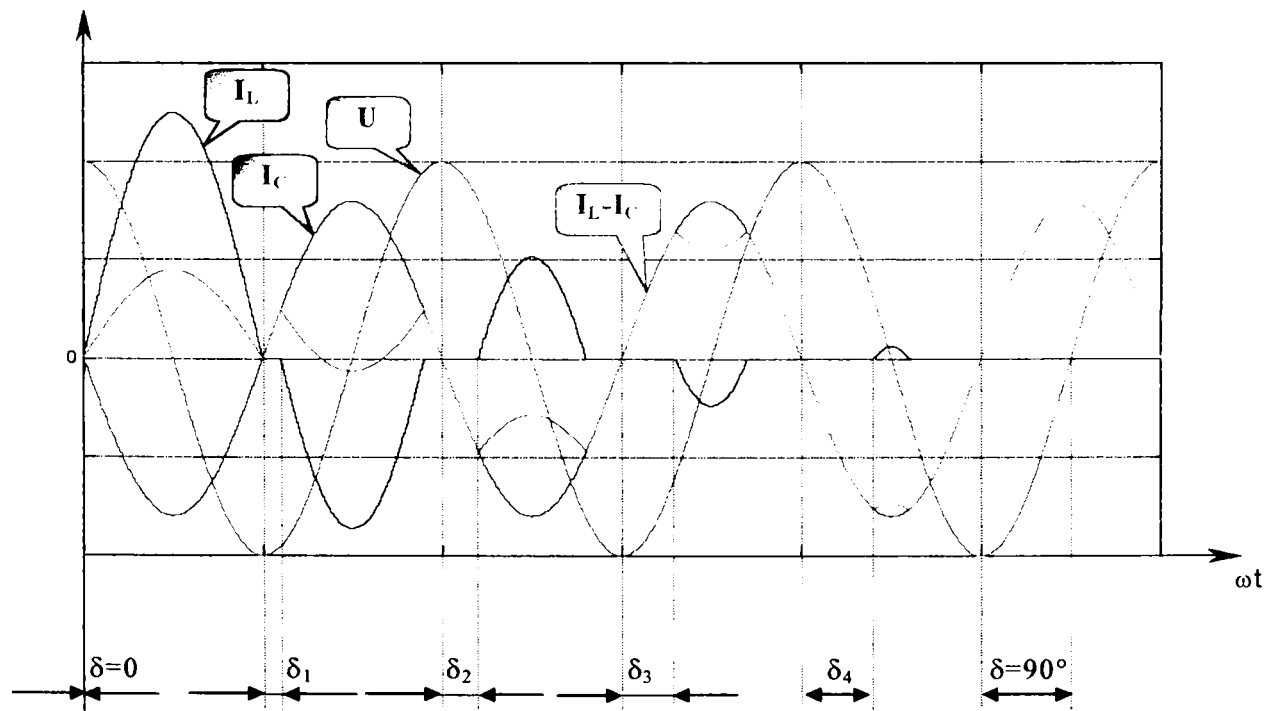


Fig. 4.10. Procesul de modificare al caracterului și mărimii susceptanței, în funcție de unghiul de comandă al tiristoarelor.

Pe baza celor prezentate, schema de realizare a unui astfel de compensator în conexiune  $\Delta$  este prezentată în figura 4.11. Aceasta este realizată folosind varianta divizării bobinei în două jumătăți în scopul îmbunătățirii condițiilor de comutație a tiristoarelor.

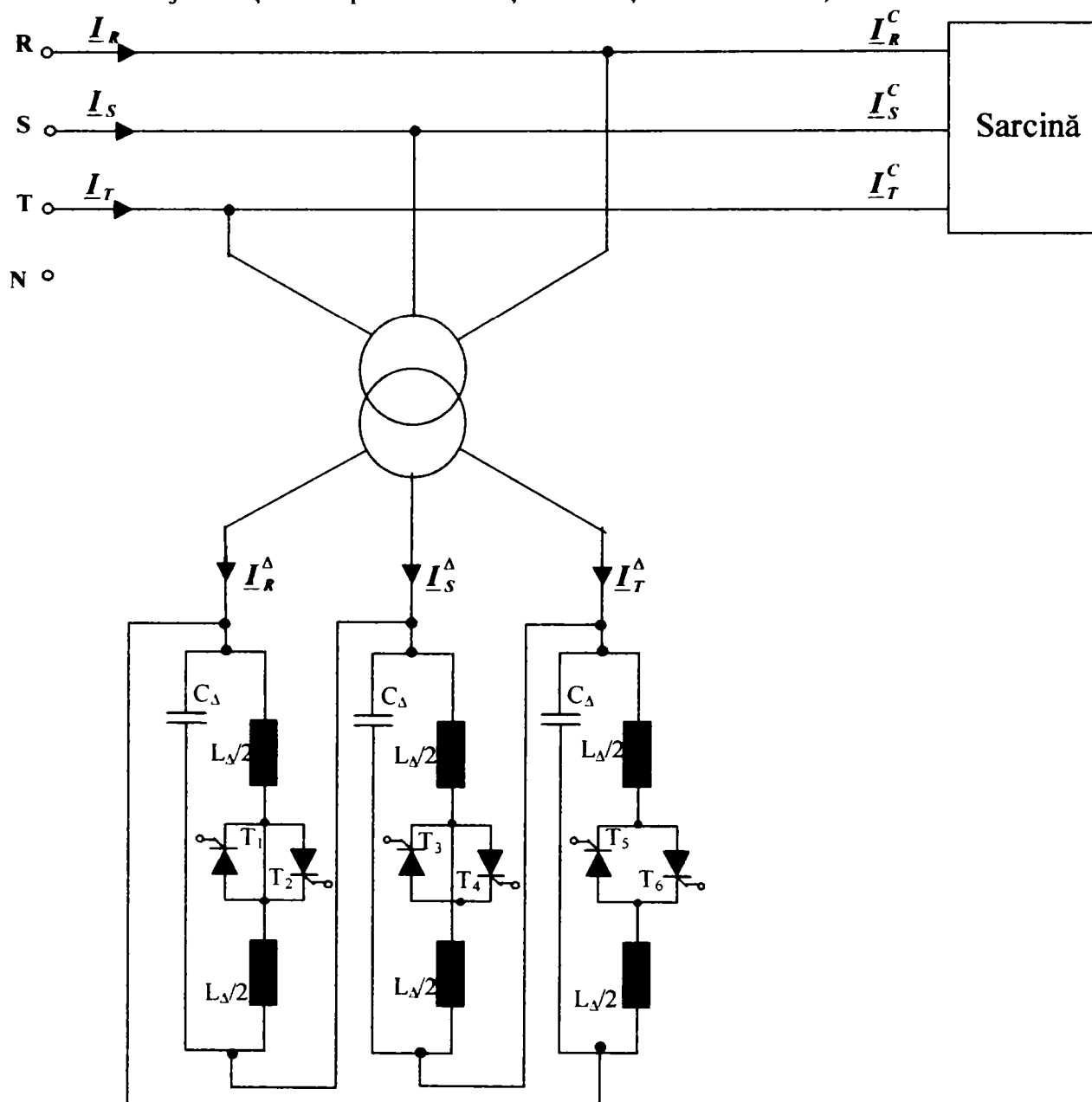


Fig. 4.11. Schema electrică a ansamblului consumator-compensator în conexiune  $\Delta$ .

Determinarea valorilor elementelor compensatorului în conexiune  $\Delta$  va fi prezentată în capitolul următor și se va face pe baza rezultatelor simulărilor privind funcționarea instalației electrice a cuptorului cu arc electric.

Pe baza calculului prezentate schema completă a instalației de compensare dinamică a puterii reactive, a filtrelor de absorbție pe armonicile 5,7,11, și 13 precum și a instalației de echilibrare este prezentată în figura 4.12.

#### 4.4. Concluzii

Instalația de compensare a puterii reactive, filtrare a armonicilor și echilibrare a sarcinii a fost proiectată pe baza metodei directe și permite compensarea unei puteri reactive  $Q_{comp} = 84,2 \text{ MVAR}$ . Această putere reactivă are două componente:

- Puterea reactivă instalată în baterii fixe cu structură în conexiune Y  $Q_{const} = 25,8 \text{ MVAR}$  este compusă la rândul ei din

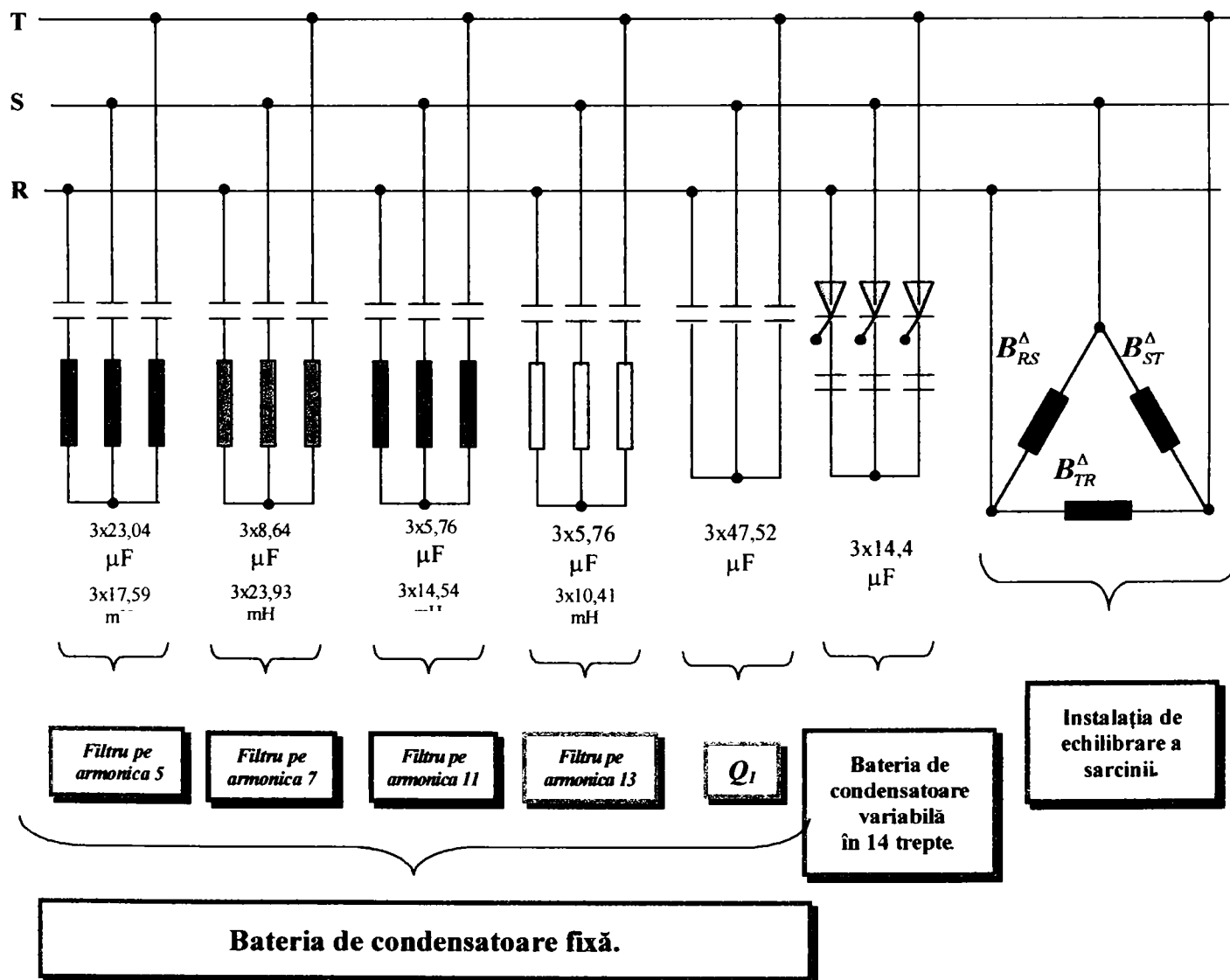
$$\begin{aligned}
 a) \quad Q_{\text{Filtru}}^5 &= 6,785 \text{ MVAR}, \\
 b) \quad Q_{\text{Filtru}}^7 &= 2,494 \text{ MVAR}, \\
 c) \quad Q_{\text{Filtru}}^{11} &= 1,628 \text{ MVAR}, \\
 d) \quad Q_{\text{Filtru}}^{13} &= 1,624 \text{ MVAR}, \\
 e) \quad Q_1 &= 13,27 \text{ MVAR}.
 \end{aligned}
 \tag{4.93}$$

Puterea reactivă variabilă  $\Delta Q = 58,4 \text{ MVAR}$  compusă din **14 trepte**, fiecare treaptă având o putere  $\Delta Q_{\text{treaptă}} = 4,17 \text{ MVAR}$ . Fiecare treaptă de compensare are o structură în conexiune Y.

Echilibrarea sarcinii se realizează cu un compensator în conexiune  $\Delta$ .

**Contribuțiile autorului** în acest capitol sunt:

- Calculul valorilor componentelor instalației de compensare a puterii reactive;
- Calculul valorilor componentelor filtrelor de armonici **5,7,11 și 13**;
- Prezentarea schemei de echilibrare a sarcinii.



**Fig. 4.12.** Schema instalației de compensare a puterii reactive și a filtrelor de armonici pentru instalația electrică a cuptorului electric cu arc de la Oțelăria OE2.

## 5. EFECTELE UTILIZĂRII INSTALAȚIEI COMPLEXE DE COMPENSARE LA FUNCȚIONAREA CUPTORULUI CU ARC ELECTRIC

Capitolul de față prezintă o analiză a efectelor obținute în urma utilizării instalației de compensare a puterii reactive, filtrare a armonicilor și echilibrare a sarcinii în ceea ce privește îmbunătățirea indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice la cuptorul cu arc electric.

Pe baza concluziilor la care s-a ajuns în capitolul 2 analiza a fost efectuată utilizând un model performant al arcului electric, *modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc.*

*O primă etapă a analizei a constat în determinarea valorilor parametrilor componentelor schemei electrice, valori care au fost păstrate la toate simulările efectuate.*

În procesul de simulare a funcționării instalației electrice *au fost parcurse următoarele etape:*

- *Alegerea unor astfel de valori a parametrilor care intervin în implementarea modelului încât în urma simulării funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc electric fără schema de compensare proiectată să se obțină rezultate identice celor obținute în urma măsurărilor efectuate de către autor pe liniile de alimentare de joasă și de medie tensiune în perioada de ardere stabilă a arcului electric.* În această etapă s-a presupus *consumatorul ca fiind simetric.*

- Realizarea unui studiu privitor la posibilitatea simulării obținerii regimului neechilibrat, caracteristic funcționării reale a instalației electrice a cuptorului.

- Demonstrarea faptului că, utilizând schema de compensare a puterii reactive și filtrele de armonici este posibilă compensarea integrală a puterii reactive pe linia de alimentare de medie tensiune. Analiza rezultatelor obținute se va face din punct de vedere al compensării puterii reactive funcție de treapta utilizată.

- Determinarea indicatorilor calitativi obținuți în urma simulării funcționării instalației electrice fără a se acționa în vederea compensării puterii reactive, a filtrării armonicilor și a echilibrării consumatorului.

- Analiza efectelor acțiunilor de compensare a puterii reactive, a filtrării armonicilor, precum și a utilizării instalației de echilibrare calculată la funcționarea în regim dezechilibrat în faza de reducere.

- Conceperea unui sistem de comandă și control al instalațiilor de compensare a puterii reactive, echilibrare a sarcinii și filtrare a curenților armonici utilizând valorile curenților și tensiunilor de pe linia de medie tensiune.

- Conceperea și verificarea prin simulare a funcționării unui sistem de reglare a valorii puterii active precum și determinarea influenței factorului de adaptare asupra vitezei de convergență a algoritmului și a erorii de ajustare.

## 5.1. Alegerea parametrilor care intervin în implementarea modelului

Parametrii care intervin în implementarea modelului se împart în parametrii schemei electrice a alimentării cuptorului cu arc electric și parametrii modelului arcului electric.

### 5.1.1. Alegerea valorilor parametrilor componentelor schemei electrice

Parametrii electrici ai schemei instalației electrice a cuptorului cu arc se împart în parametrii liniei de alimentare de joasă tensiune, parametrii transformatorului electric al cuptorului, parametrii transformatorului de tensiune de la înaltă tensiune, *ÎT*, la medie tensiune, *MT* și parametrii rețelei de alimentare de înaltă tensiune.

- **Parametrii liniei de alimentare de joasă tensiune** au fost aleși pe baza măsurărilor efectuate de către *Institutul de Cercetări și Modernizări Energetice București* [110]. Rezultatele încercărilor efectuate au fost prezentate în paragraful 3.4.4, valorile obținute pentru circuitul de *joasă tensiune* ( rețeaua scurtă ), fiind date de relația (3.43).

Pe baza acestor rezultate se poate considera că impedanța fiecărei faze a rețelei de joasă tensiune, *considerând consumatorul simetric* este reprezentată de un circuit de tip *R-L* a cărui parametri sunt

$$\begin{aligned} R_r &= 0,364 \text{ m}\Omega, \\ L_r &= 9,342 \text{ }\mu\text{H}. \end{aligned} \tag{5.1}$$

- **Parametrii transformatorului cuptorului** au fost aleși pe baza măsurărilor efectuate pe liniile de alimentare de joasă și de medie tensiune.

Pentru circuitul de medie tensiune ( partea de *30KV* ) rezultatele obținute în urma măsurării sunt date de relația (3.42), pentru cablurile de *30KV* și transformatorul cuptorului obținându-se valorile date de relația (3.44).

Deoarece impedanțele liniei de alimentare de medie tensiune sunt mici în comparație cu cele de pe linia de joasă tensiune acestea au fost înglobate în parametrii transformatorului cuptorului. Valorile principalilor parametri ai transformatorului cuptorului, care rezultă și din *anexa III*, alese în procesul de simulare sunt:

- tensiunea de linie a primarului transformatorului este de *30 KV*, acesta fiind conectat în conexiune  $\Delta$ , curentul de magnetizare fiind de *0,5%*.
- tensiunea de linie a secundarului transformatorului este de *0,6 KV*, acesta fiind conectat în conexiune *Y*, curentul de magnetizare fiind de *0,5%*.
- puterea aparentă a transformatorului este de *73MVA*.

- **Parametrii transformatorului *ÎT - MT*** au fost aleși pe baza datelor furnizate de către inginerii de la *Stația de Transformare de Medie Tensiune*, valorile principalilor parametri necesari simulării fiind:

- tensiunea de linie a primarului transformatorului este de *110 KV*, acesta fiind conectat în conexiune  $\Delta$ , curentul de magnetizare fiind de *1%*.
- tensiunea de linie a secundarului transformatorului este de *30 KV*, acesta fiind conectat în conexiune *Y*, curentul de magnetizare fiind de *0,5%*.
- puterea aparentă a transformatorului este de *100 MVA*.

- **Parametrii liniei de alimentare de înaltă tensiune** utilizați în cazul simulărilor :
  - tensiunea de linie de înaltă tensiune este de **110 KV**,
  - linia de alimentare de înaltă tensiune este presupusă simetrică,
  - puterea de scurtcircuit a liniei de înaltă tensiune este de **1100 MVA**.

### 5.1.2. Alegerea valorilor parametrilor modelului

Așa cum s-a prezentat în capitolul 2 acest model se bazează pe ipoteza că tensiunea arcului electric este dată de relația (2.73). Alegerea valorilor parametrilor modelului s-a făcut astfel încât formele de undă ale curenților și tensiunilor obținute în urma simulării utilizând schema prezentată în *anexa II.9*, să corespundă celor obținute în urma măsurătorilor efectuate pe instalația reală. În acest scop s-a analizat influența fiecărui parametru care intervine în relația (2.73), constatându-se următoarele:

- Constantele  $D_a$  și  $D_b$  au o mică influență asupra valorii amplitudinilor mărimilor măsurate precum și a formelor de undă, constatându-se că valori cuprinse între **2000 A** și **50000 A** nu modifică amplitudinea curenților și tensiunilor cu mai mult de **2%**, pentru aceleași valori ale celorlalți parametri. Din acest motiv în simulările efectuate valorile acestor constante au fost cele menționate în literatură,  $D_a = D_b = 5000 A$  [70],[89].

- În mod asemănător s-a constatat în urma simulărilor că influența constantelor  $C_a$  și  $C_b$  asupra valorilor tensiunii de amorsare rezultate în urma simulării este mică (valoarea tensiunii de amorsare modificându-se cu mai puțin de **1%**). Aceasta se explică prin faptul că valorile acestor constante (atât  $D_a$  și  $D_b$  cât și  $C_a$  și  $C_b$ ) determină variația maximă față de valoarea tensiunii de stingere, variație care este atinsă în momentul anulării curentului.

Deoarece în realitate această variație a tensiunii arcului este redusă față de valoarea tensiunii de stingere și în plus efectul ei în punctul de măsură, care este secundarul transformatorului cuptorului și nu arcul electric, este atenuat de către inductanța liniei scurte care reprezintă un filtru de tip trece-jos, *FTJ*, în simulările efectuate s-au luat pentru aceste constante valorile întâlnite în literatură,  $C_a = 190000 W$ , respectiv  $C_b = 39000 W$ . În acest fel pentru aceeași valoare a tensiunii de stingere valorile tensiunii de aprindere pe cele două semialternanțe sunt diferite [70],[89].

- În ceea ce privește valoarea tensiunii de stingere utilizată pe parcursul simulărilor s-a constatat că aceasta influențează puternic atât formele de undă cât și valorile curenților și tensiunilor obținute prin simulare. În urma analizei făcute au rezultat următoarele:

- valori mici ale tensiunii de stingere corespund unor amplitudini mai mari a curentului de pe linia de joasă tensiune și reciproc,
- valorile mici ale tensiunii de stingere generează o deformare mai puternică a tensiunii pe linia de joasă tensiune și reciproc,
- valoarea tensiunii de stingere nu influențează semnificativ valoarea amplitudinii tensiunii de pe liniile de joasă și de medie tensiune,
- tensiunea de pe linia de medie tensiune este mult mai puțin influențată de valoarea tensiunii de stingere.

Pe baza acestor concluzii combinate cu un număr mare de simulări a rezultat că valoarea tensiunii de stingere care permite cea mai bună reproducere a rezultatelor obținute în urma măsurătorilor în faza de reducere este  $U_{st} = 200 V$ .

## 5.2. Rezultatele simulării funcționării instalației reale

Așa cum s-a observat în urma măsurătorilor efectuate pe instalația reală a cuptorului cu arc, funcționarea acestuia se caracterizează prin prezența unui regim neechilibrat indiferent de



faza tehnologică, atât pe linia de alimentare de joasă tensiune ( figurile 3.7 și 3.8 ) cât și pe cea de medie tensiune ( figurile 3.22 și 3.23 ).

Din acest motiv, în acest paragraf autorul și-a pus problema **posibilității reproducerii prin simulare a regimului neechilibrat în faza de reducere.**

În urma analizei efectuate în capitolul 2 privitoare la posibilitatea simulării funcționării cuptorului cu arc electric ca sarcină neechilibrată au rezultat două cauze importante de dezechilibru:

- inegalitatea valorilor impedanțelor totale ale fazelor rețelei scurte;
- inegalitatea valorilor tensiunilor de stingere pe cele trei faze, datorată inegalității lungimilor arcurilor electrice pe cele trei faze.

În continuare sunt prezentate rezultatele simulării funcționării instalației reale a cuptorului cu arc electric de la **Oțelăria OE2 a Combinatului Siderurgic Hunedoara** în faza de reducere, ținând seama și de dezechilibrul pe cele trei faze constat în urma măsurătorilor.

### 5.2.1. Simularea funcționării instalației reale utilizând valori inegale ale impedanțelor rețelei scurte

În capitolul 3 a fost arătat că datorită faptului că există tronsoane ale rețelei scurte în care cablurile celor trei faze sunt dispuse în același plan apare un dezechilibru al valorilor impedanțelor totale ale rețelei scurte. Pe baza geometriei conductoarelor rețelei scurte și a măsurătorilor efectuate au fost determinate valorile rezistențelor totale și a inductivităților totale ale rețelei scurte date de relațiile (3.53) și (3.54). Simulările au fost realizate pentru valori ale tensiunii din secundarul transformatorului cuptorului care să permită obținerea acelorași rezultate ca cele obținute în urma măsurătorilor efectuate pe linia de medie tensiune. Aceasta a necesitat utilizarea transformatorului cuptorului în conexiunea  $21\Delta$ .

Utilizând aceste valori ale impedanțelor totale ale rețelei scurte precum și a parametrilor modelului arcului electric prezentate anterior, rezultatele simulărilor efectuate utilizând schema prezentată în **anexa II. 9** pot fi analizate din punct de vedere al:

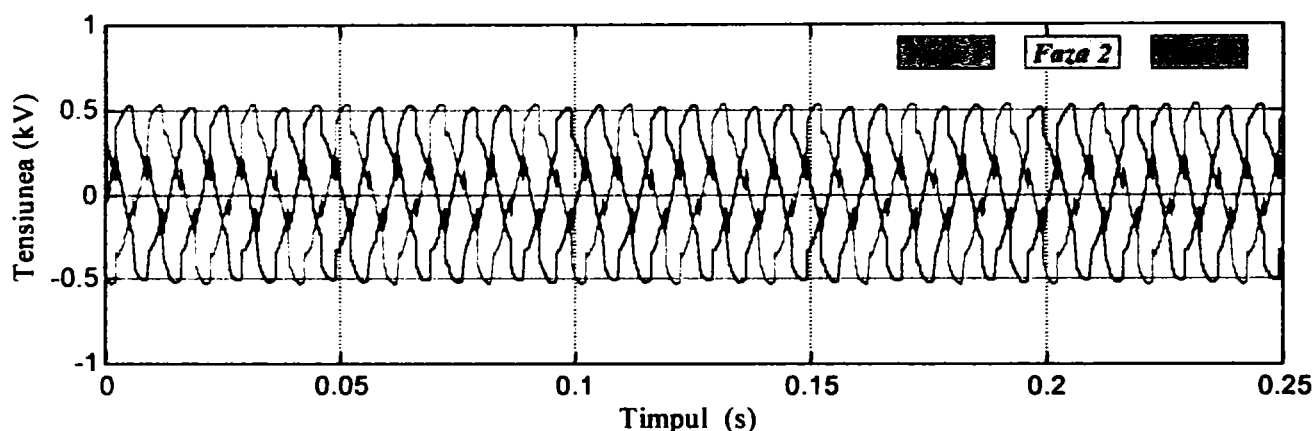
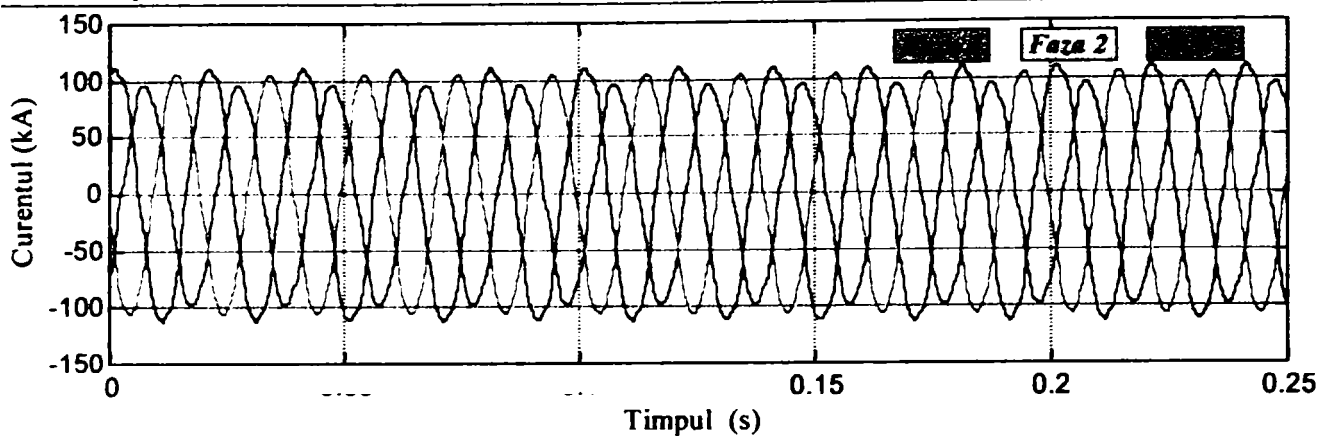
- **forme de undă, amplitudinii și gradului de nesimetrie al curenților și tensiunilor de pe liniile de alimentare de joasă și de medie tensiune;**
- **caracteristicilor de frecvență și al amplitudinii armonicelor;**
- **puterilor, factorilor de putere și coeficienților de distorsiune în regim deformant.**

În figurile 5.1 și 5.2 sunt prezentate **formele de undă ale curenților și tensiunilor obținute în urma simulărilor pe liniile de alimentare de joasă și de medie tensiune.**

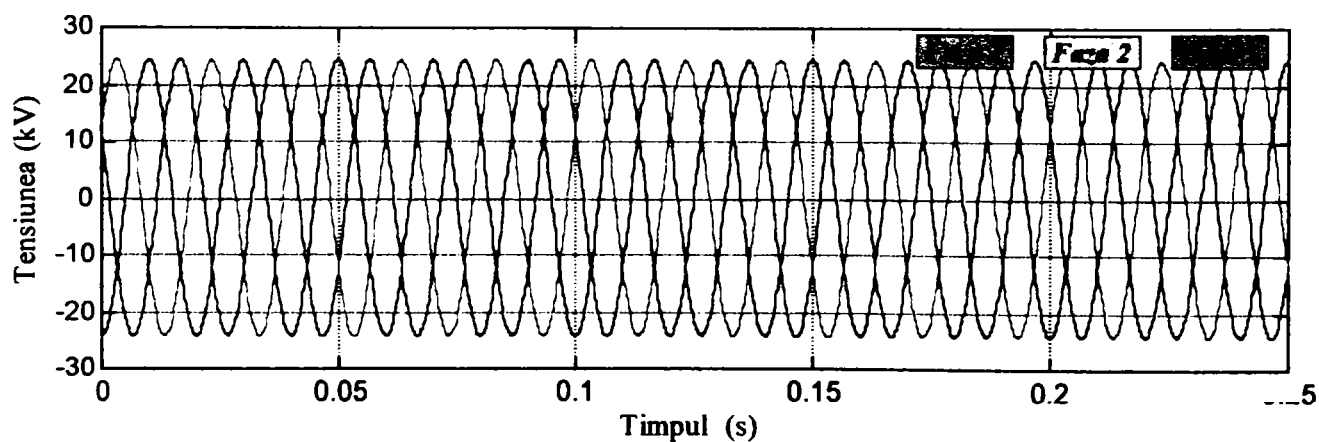
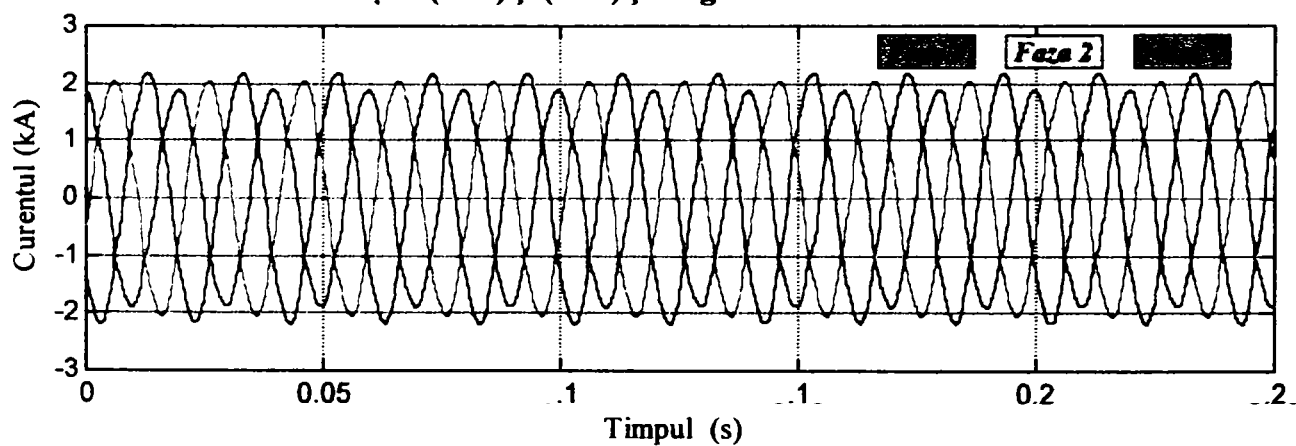
Comparând din punct de vedere al formelor de undă formele de variație ale curenților și tensiunilor obținute în urma simulărilor cu cele obținute în urma măsurărilor pe instalația reală se observă următoarele:

- **Valoarea amplitudinii curentului de pe linia de joasă tensiune obținută în urma simulărilor** ( figura 5.1 ) este egală cu cea **obținută în urma măsurătorilor efectuate în faza de reducere** ( figura 3.8 ) fapt explicabil prin aceea că puterea obținută în cazul funcționării transformatorului în conexiunea  $21\Delta$ ,  $S = 73 \text{ MVA}$  – **anexa III**, este egală cu cea din figura 3.8,  $S_{m\acute{a}s} = 72,41 \text{ MVA}$ . De asemenea, atât forma undei obținută prin simulare cât și gradul de nesimetrie corespund celei măsurate.

- **Valoarea amplitudinii tensiunii pe linia de joasă tensiune obținută în urma simulărilor** ( figura 5.2 ) corespunde cu erori de **10% cu cea obținută în urma măsurătorilor efectuate în faza de reducere** ( figura 3.8 ). **Forma undei de tensiune obținută în urma simulărilor prezintă un vârf mai proeminent în timp ce în urma măsurătorilor forma este mai aplatizată.**



**Fig. 5.1.** Forma de variație a curenților și tensiunilor de pe linia de alimentare de joasă tensiune obținute în urma simulărilor utilizând valori diferite ale impedanțelor rețelei scurte, date de relațiile (3.53) și (3.54) și lungimea arcului electric de 16 cm.



**Fig. 5.2.** Forma de variație a curenților și tensiunilor de pe linia de alimentare de medie tensiune obținute în urma simulărilor utilizând valori diferite ale impedanțelor rețelei scurte, date de relațiile (3.53) și (3.54) și lungimea arcului electric de 16 cm.

- **Pe linia de alimentare de medie tensiune se constată că atât amplitudinea curentului cât și cea a tensiunii obținute în urma simulărilor ( figura 5.2 ) corespunde cu erori de 10%, cu cele obținute în urma măsurărilor efectuate în faza de reducere (figura 3.23 ).** Ca deosebire se constată că unda curentului măsurată este mai distorsionată decât cea rezultată în urma simulărilor.

Pe baza rezultatelor obținute în urma simulărilor, utilizând programul prezentat în *anexa I. 5* au fost determinate caracteristicile spectrale și amplitudinile armonicilor undelor de curent și de tensiune pentru liniile de alimentare de joasă tensiune și de medie tensiune prezentate în figurile 5.3 respectiv 5.4. Comparând rezultatele obținute în urma simulărilor cu cele măsurate la *Oțelăria OE2* se pot trage următoarele concluzii:

- **caracteristicile spectrale obținute în urma măsurărilor efectuate pe linia de alimentare de joasă tensiune în faza de reducere ( figura 3.10 ) corespund din punct de vedere al armonicilor prezente în spectru celor obținute prin simulare ( figura 5.3 ).** Astfel, caracteristica spectrală a tensiunii conține toate armonicile în timp ce în cea a curentului armonicile a căror ordin este multiplu de 3 sunt atenuate. O deosebire constă în aceea că în timp ce în cazul caracteristicilor spectrale obținute prin simulare energia semnalului este concentrată în special în armonicile acestuia, în cazul caracteristicilor spectrale ale semnalelor măsurate energia semnalelor este distribuită și în domeniul interarmonicilor, amplitudinea armonicilor nemaifiind dominantă față de cea a interarmonicilor.

- **în cazul liniei de alimentare de medie tensiune se constată aceeași corespondență între caracteristicile spectrale obținute pentru semnalele măsurate în faza de reducere ( figura 3.25 ) și cele obținute prin simulare ( figura 5.4 ).** În cazul tensiunii se constată faptul că, în urma simulărilor, armonicile a căror ordin este multiplu de 3 sunt puternic atenuate, fapt care corespunde situației reale.

Pe baza acestor observații rezultă că **din punct de vedere al amplitudinilor, formelor de undă și gradului de nesimetrie dar și din punct de vedere al caracteristicilor de frecvență și a amplitudinii armonicilor curentilor și tensiunilor, valorile parametrilor instalației electrice și ale parametrilor modelului aleși permit o bună reproducere a funcționării instalației reale a cuptorului cu arc electric.**

Cu aceste valori ale parametrilor, cu programul prezentat în *anexa I.5* au fost determinate **puterile și factorii de putere în regim deformant precum și valorile distorsiunii armonice totale și parțial ponderate pentru curent și tensiune** atât pe linia de alimentare de joasă tensiune (*tabelul 5.2*) cât și pe cea de medie tensiune (*tabelul 5.3*).

Pentru linia de joasă tensiune se observă că puterile și factorii de putere în regim deformant obținuți în urma simulărilor se situează în domeniul valorilor măsurate în faza de reducere, prezentate în figurile 3.11 – 3.17. De asemenea, valorile distorsiunii armonice totale și parțial ponderate corespund celor măsurate, prezentate în figurile 3.20 și 3.21.

În mod asemănător, analizând valorile acelorași mărimi obținute prin simulare comparativ cu cele măsurate pe linia de medie tensiune ( figurile 3.26 – 3.32, 3.35 și 3.36 ) se constată că există o bună corespondență.

### **5.2.2. Simularea funcționării instalației reale utilizând valori inegale ale lungimii arcului electric**

Influența inegalității lungimii arcului electric pe cele trei faze se reflectă asupra apariției valorilor diferite a tensiunii de stingere pe cele trei faze, fapt care determină apariția unui puternic regim dezechilibrat.

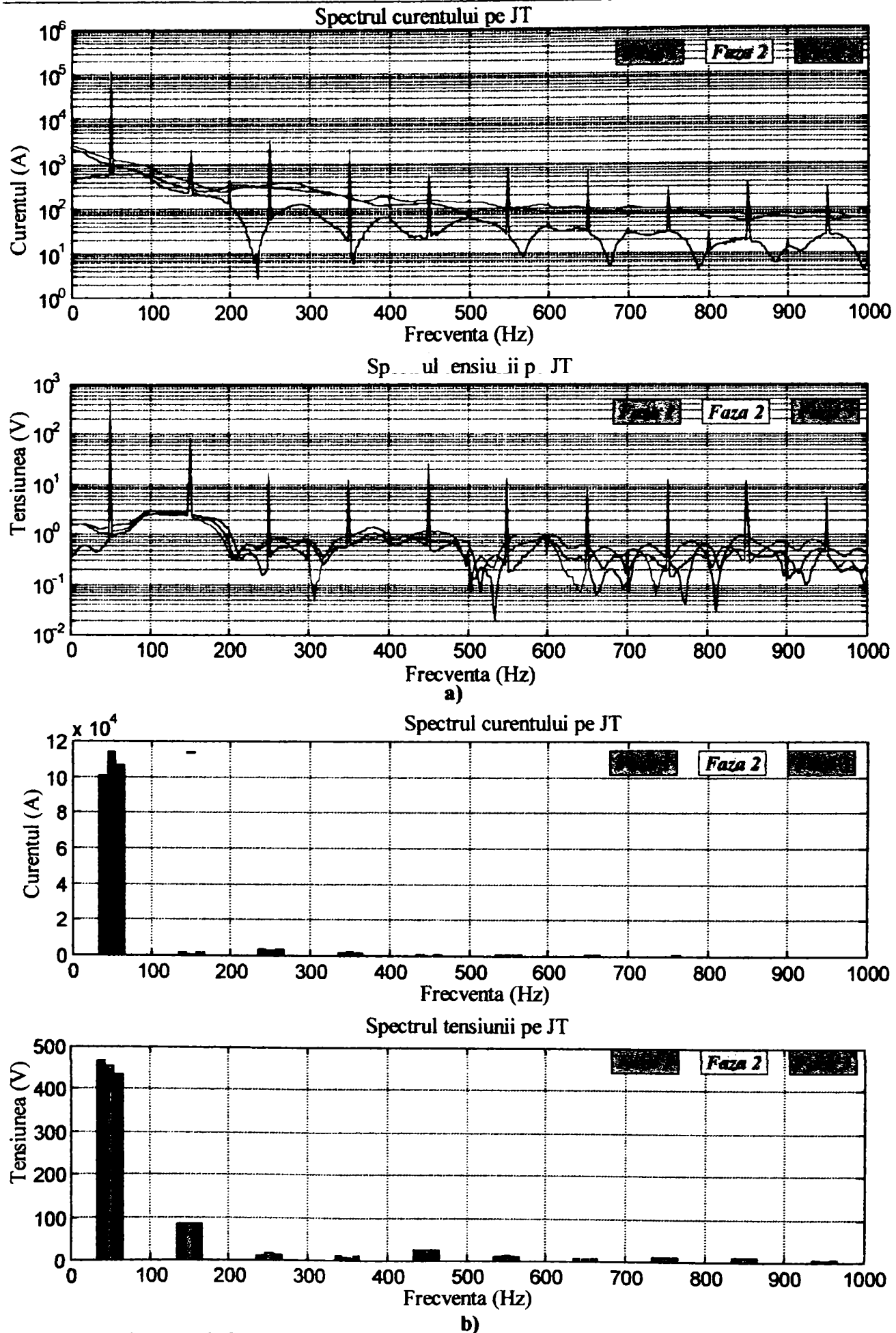
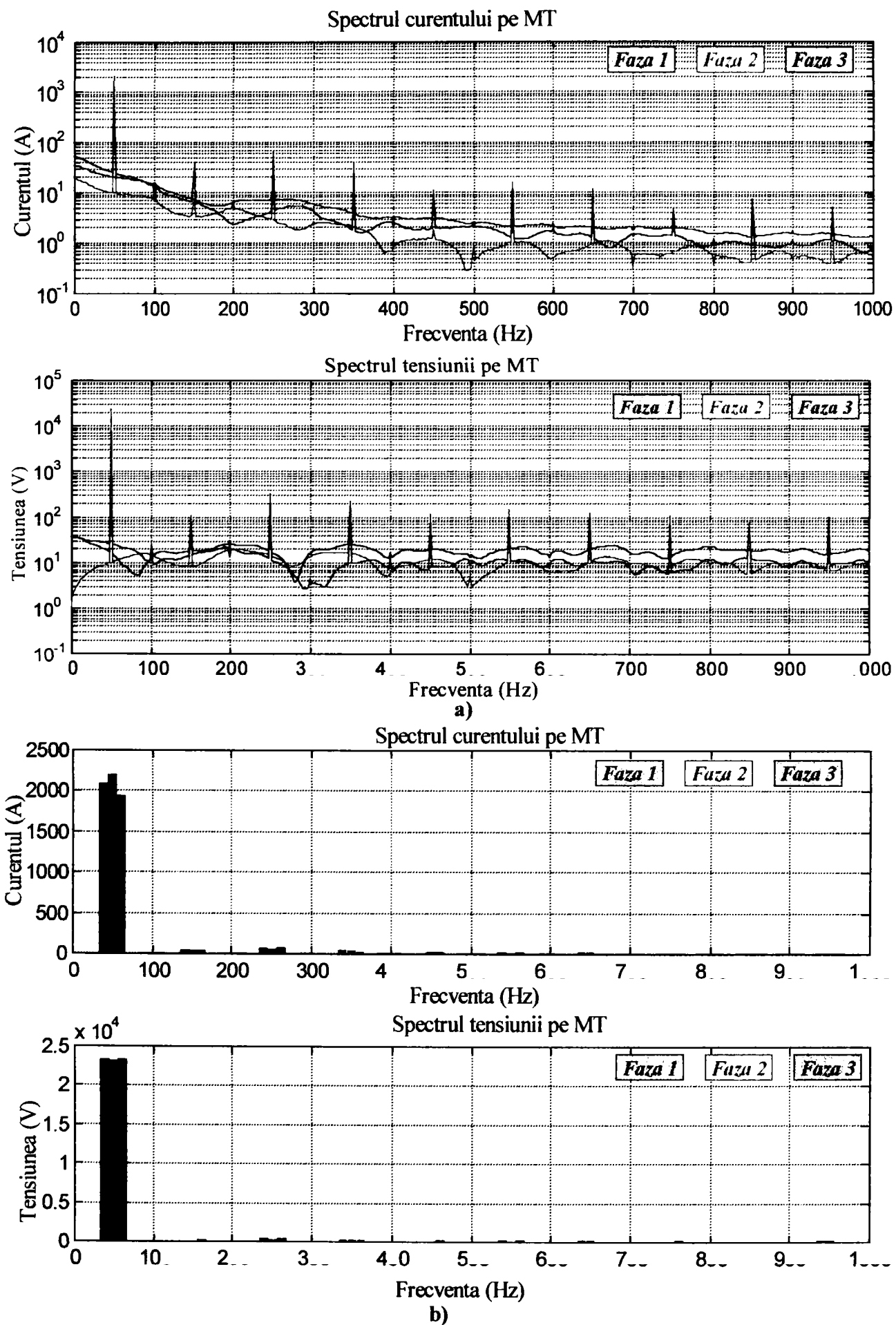


Fig. 5.3. a) Caracteristica spectrală; b) Amplitudinea armonicilor curentului și tensiunii pe linia de alimentare de joasă tensiune (JT), utilizând valori diferite a impedanțelor rețelei scurte, date de relațiile (3.53) și (3.54) și lungimea arcului electric de 16 cm.





**Fig. 5.4. a) Caracteristica spectrală; b) Amplitudinea armonicilor curentului și tensiunii pe linia de alimentare de medie tensiune (MT), utilizând valori diferite a impedanțelor rețelei scurte date de relațiile (3.53) și (3.54) și lungimea arcului electric de 16 cm.**

Dacă cuptorul cu arc electric este prevăzut cu instalație automată de reglare a poziției electrozilor, dezechilibrul care apare este redus prin acțiunea de modificare a lungimilor arcurilor electrice pe cele trei faze.

Anularea totală a dezechilibrului utilizând instalația automată de reglare a poziției electrozilor nu este posibilă datorită timpului de răspuns mare, de ordinul zecilor de secunde, al sistemului de poziționare al electrozilor dar și vitezei mici de deplasare a acestora ( $n \times 10 \text{ cm/min}$ ) [1],[26],[29],[43].

În urma simulărilor a rezultat că utilizând valori egale ale rezistențelor totale și inductivităților totale ale conductoarelor rețelei scurte, date de relația (3.52), alegând pentru lungimile arcului electric valorile:

$$\begin{aligned} l_1 &= 19,5 \text{ cm} \\ l_2 &= 16 \text{ cm} \\ l_3 &= 12,5 \text{ cm} \end{aligned} \quad (5.2)$$

care, pe baza relației (2.83) duc la obținerea valorilor tensiunii arcului electric date de relația:

$$\begin{aligned} U_{s1} &= 235 \text{ V} \\ U_{s2} &= 200 \text{ V} \\ U_{s3} &= 165 \text{ V} \end{aligned} \quad (5.3)$$

se obține același dezechilibru pe linia de alimentare de medie tensiune.

Aceasta rezultă comparând rezultatele din tabelul 5.1 în care sunt prezentate valorile componentelor de secvență directă și inversă ale curenților și tensiunilor rezultate în urma simulării dezechilibrului în cele două situații. Rezultatele au fost obținute utilizând programul prezentat în anexa I.6.

*Tabelul 5.1.*

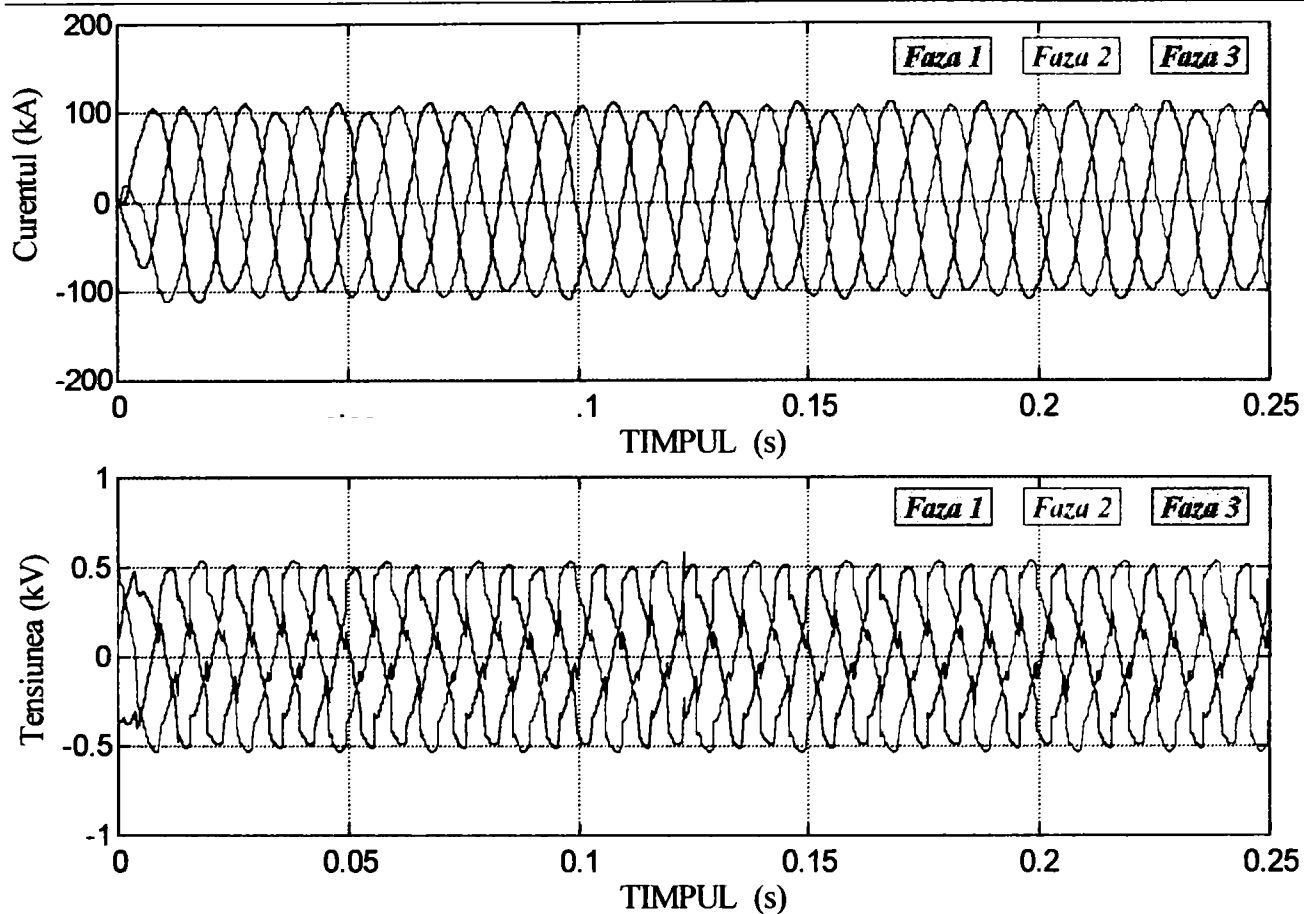
**Simularea dezechilibrului utilizând valori inegale ale impedanței rețelei scurte, respectiv a lungimii arcului electric.**

	<i>Simulare utilizând valori inegale ale impedanțelor fazelor rețelei scurte (3.53),(3.54)</i>	<i>Simulare utilizând valori inegale ale lungimii arcului electric (5.2)</i>
$\underline{I}^+ (A)$	$-569,4 - j \cdot 1308,4$	$-567,2 - j \cdot 1300,3$
$I^+ (A)$	1427	1418,6
$\underline{U}^+ (V)$	$7001 - j \cdot 15450$	$7601,5 - j \cdot 15451$
$U^+ (V)$	17219	17219
$\varphi(\underline{I}^+, \underline{U}^+) (^\circ)$	49,71	49,76
$\underline{I}^- (A)$	$98,14 - j \cdot 46,4$	$109,48 + j \cdot 23,62$
$I^- (A)$	108,55	112
$\underline{U}^- (V)$	$-5,04 - j \cdot 7,57$	$3,49 - j \cdot 8,74$
$U^- (V)$	9,09	9,42

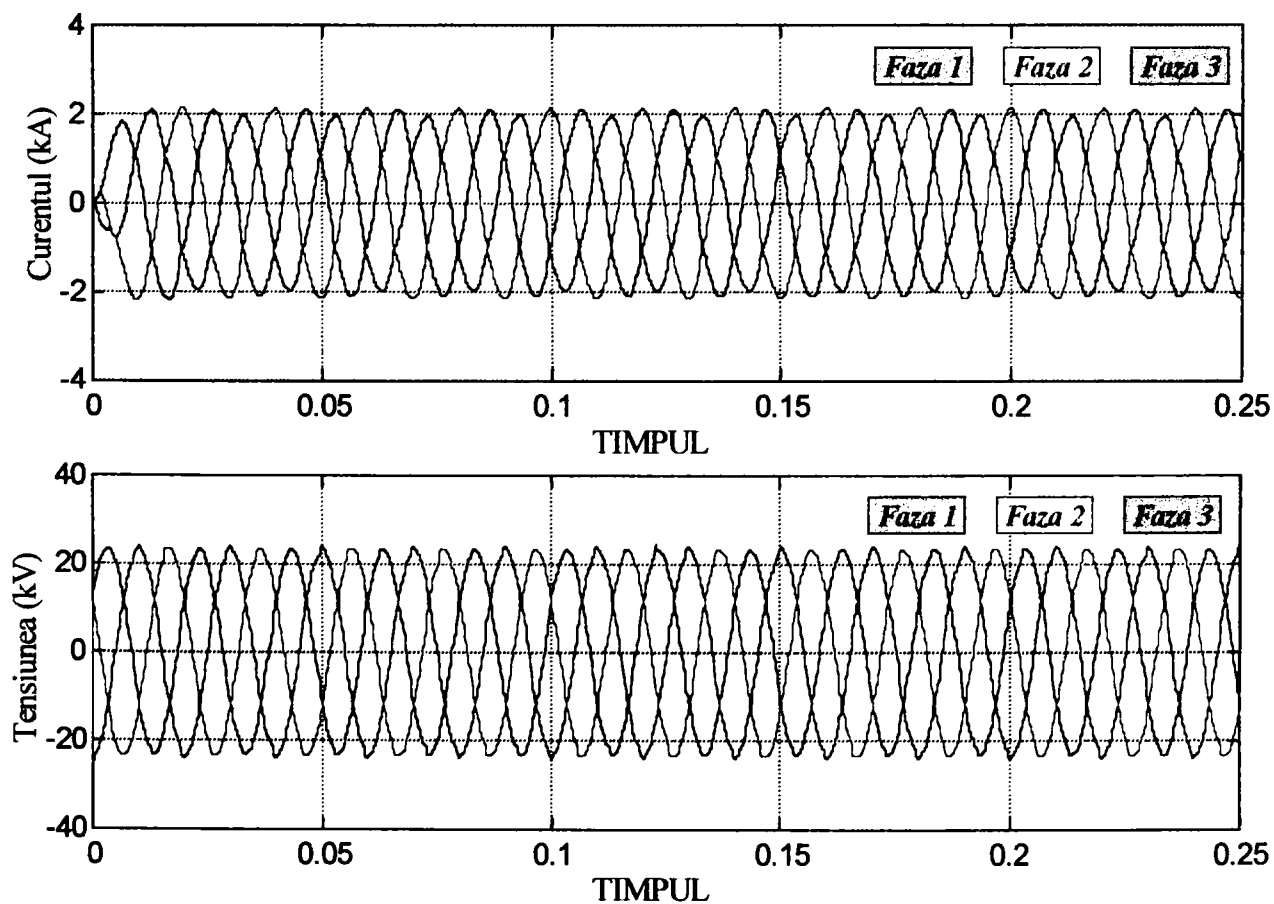
Utilizând schema din anexa II.9, cu valorile lungimii arcului electric date de (5.2) în urma simulării s-au obținut formele de undă prezentate în figura 5.5 pentru linia de joasă tensiune, respectiv figura 5.6 pentru linia de medie tensiune.

În concluzie s-a demonstrat că se poate obține același dezechilibru fie utilizând valori diferite ale impedanțelor totale ale fazelor rețelei scurte, fie utilizând lungimi diferite ale arcului electric pe cele trei faze.





**Fig. 5.5.** Forma de variație a curentului și tensiunii pe linia de joasă tensiune, JT, pentru valori inegale ale lungimii arcului :  $l_1=19,5$  cm,  $l_2=16$  cm,  $l_3= 12,5$  cm.



**Fig. 5.6.** Forma de variație a curentului și tensiunii pe linia de medie tensiune, MT, pentru valori inegale ale lungimii arcului :  $l_1=19,5$  cm,  $l_2=16$  cm,  $l_3= 12,5$  cm.

### 5.3. Rezultatele simulării utilizând instalația de compensare a puterii reactive și filtrele pe armonicile 5, 7, 11 și 13

Analiza efectelor utilizării filtrelor și a instalației de compensare proiectate în capitolul precedent s-a făcut utilizând schema prezentată în *anexa II. 10*, dar din care lipsește instalația de echilibrare a sarcinii. Schema instalației electrice determinată în paragraful precedent a fost completată cu cele 4 filtre pe armonicile 5, 7, 11 și 13 precum și cu bateria de condensatoare fixă, în care valoarea unui condensator este de 47,52  $\mu F$ .

Valorile obținute pentru puterile și factorii de putere în regim deformant precum și a coeficienților de distorsiune, atât pentru linia de joasă cât și de medie tensiune fără utilizarea instalației de compensare a puterii reactive și a filtrelor au fost trecute pe prima linie în *tabelele 5.2*, respectiv *5.3*.

*Tabelul 5.2.*

#### Indicatorii calitativi ai utilizării energiei electrice pe linia de alimentare de joasă tensiune rezultați în urma simulărilor.

Treapta	Puteri în regim deformant				Factori de putere			Coeficienți de distorsiune			
	S (MVA)	P (MW)	Q (MVAR)	D (MVAD)	Kp	$\rho$	$\sigma$	Thdi (%)	Thdpi (%)	Thdu (%)	Thdpu (%)
Fără inst.de compensare	75,13	47,29	55,9	16,82	0,629	1,182	0,230	4,45	11,13	21,65	58,52
Q <sub>1</sub>	75,60	47,50	56,33	16,92	0,628	1,186	0,230	4,45	11,12	21,67	58,98
1.	75,63	47,49	56,36	16,99	0,628	1,187	0,230	4,46	11,15	21,75	59,71
2.	75,73	47,56	56,45	16,93	0,628	1,187	0,229	4,46	11,15	21,65	58,89
3.	75,90	47,66	56,58	16,97	0,628	1,187	0,229	4,43	11,08	21,64	58,87
4.	75,88	47,62	56,58	16,99	0,628	1,188	0,230	4,45	11,13	21,69	59,37
5.	76,03	47,71	56,69	17,02	0,628	1,188	0,230	4,44	11,09	21,67	59,27
6.	76,09	47,73	56,75	17,06	0,627	1,189	0,230	4,42	11,05	21,72	59,69
7.	76,22	47,78	56,87	17,11	0,627	1,190	0,230	4,41	11,03	21,74	59,87
8.	76,26	47,82	56,90	17,06	0,627	1,190	0,230	4,42	11,06	21,67	59,39
9.	76,30	47,82	56,95	17,08	0,627	1,191	0,230	4,43	11,07	21,69	59,58
10.	76,41	47,90	57,02	17,09	0,627	1,191	0,229	4,42	11,05	21,67	59,43
11.	76,54	47,95	57,13	17,15	0,627	1,191	0,230	4,40	11,01	21,71	59,82
12.	76,58	47,95	57,18	17,20	0,626	1,192	0,230	4,40	11,01	21,77	60,33
13.	76,61	47,95	57,22	17,23	0,626	1,193	0,231	4,40	11,01	21,81	60,74
14.	76,68	48,00	57,29	17,18	0,626	1,194	0,230	4,41	11,04	21,72	60,09

Se observă că valorile obținute pe prima linie din **tabelul 5.2 reproduc rezultatele măsurătorilor de pe linia de joasă tensiune**, prezentate în figurile 3.8 și 3.10

De asemenea, valorile obținute pe prima linie din **tabelul 5.3 reproduc rezultatele măsurătorilor de pe linia de medie tensiune**, prezentate în figurile 3.23 și 3.25, respectiv fișierul cu numărul 800 din **tabelele 3.3 și 3.4**.

Pe linia a doua (**Q1**) din **tabelele 5.2 și 5.3** s-au trecut rezultatele obținute în urma simulărilor utilizând numai bateria fixă de condensatoare și instalația de filtrare a armonicilor.

Așa cum s-a arătat în capitolul precedent, instalația de compensare a puterii reactive cuprinde, pe lângă bateria de condensatoare fixă, un număr de **14** baterii de condensatoare identice, care pot fi conectate în funcție de valoarea puterii reactive care se disipă pe linia de alimentare de medie tensiune la un moment dat.

**Tabelul 5.3.**

**Indicatorii calitativi ai utilizării energiei electrice pe linia de alimentare de medie tensiune rezultați în urma simulărilor.**

Treapta	Puteri în regim deformant				Factori de putere			Coeficienți de distorsiune			
	S (MVA)	P (MW)	Q (MVAR)	D (MVAD)	Kp	$\rho$	$\sigma$	Thdi (%)	Thdpi (%)	Thdu (%)	Thdpu (%)
Fără inst.de compensare	73,51	47,36	55,97	5,35	0,644	1,182	0,073	4,44	11,11	3,17	13,18
Q <sub>1</sub>	56,74	47,58	30,57	4,63	0,839	0,642	0,082	3,77	9,19	2,34	8,32
1.	54,67	47,57	26,53	4,64	0,870	0,558	0,085	3,94	9,67	2,16	7,76
2.	52,91	47,65	22,55	4,61	0,900	0,473	0,087	4,12	10,13	2,06	7,23
3.	51,46	47,75	18,61	4,61	0,928	0,390	0,090	4,21	10,40	1,94	6,86
4.	50,08	47,71	14,53	4,59	0,953	0,305	0,092	4,36	10,80	1,83	6,45
5.	49,17	47,80	10,55	4,61	0,972	0,221	0,094	4,45	11,00	1,67	6,12
6.	48,49	47,83	6,51	4,58	0,986	0,136	0,095	4,48	11,10	1,58	5,72
7.	48,16	47,87	2,53	4,61	0,994	0,053	0,096	4,51	11,17	1,52	5,34
8.	48,17	47,92	-1,55	4,62	0,995	-0,032	0,096	4,56	11,25	1,48	5,12
9.	48,47	47,92	-5,61	4,61	0,989	-0,117	0,096	4,54	11,17	1,54	5,25
10.	49,18	48,00	-9,65	4,65	0,976	-0,201	0,095	4,49	11,03	1,67	6,21
11.	50,18	48,06	-13,67	4,68	0,958	-0,284	0,094	4,37	10,73	1,71	6,64
12.	51,45	48,06	-17,76	4,71	0,934	-0,369	0,092	4,26	10,45	1,79	6,72
13.	53,00	48,05	-21,86	4,72	0,907	-0,455	0,089	4,14	10,14	1,85	6,83
14.	54,85	48,10	-25,93	4,70	0,877	-0,539	0,086	4,03	9,85	1,92	6,98

Deoarece valoarea capacității necesare realizării unei astfel de baterii este de  $14,4 \mu F$ , pentru a simula introducerea unui număr de  $n$  trepte, valoarea capacității alese în schema bateriei de condensatoare fixe este dată de relația (5.4).

$$C = 47,52 + n \cdot 14,4 \quad (\mu F) \quad (5.4)$$

Valorile puterilor, factorilor de putere și distorsiunilor obținute pentru fiecare dintre cele 14 trepte au fost trecute în *tabelul 5.2*, respectiv în *tabelul 5.3*, pentru liniile de alimentare de joasă, respectiv medie tensiune. Analizând aceste rezultate se observă că:

- **Efectul utilizării instalației de compensare a puterii reactive este neglijabil pe linia de alimentare de joasă tensiune.** Se observă faptul că puterea reactivă păstrează valori mari, indiferent de treapta de compensare, fapt care se reflectă și în păstrarea unei valori mici, chiar descrescătoare, a factorului de putere.

- Deoarece puterea deformantă păstrează valori mari indiferent de treapta de compensare rezultă că **pe linia de alimentare de joasă tensiune filtrele de armonici nu au efect semnificativ.**

- Pe **linia de alimentare de medie tensiune** se constată că instalația de compensare a puterii reactive permite ca, în funcție de treapta de compensare, să ofere o reglare a puterii reactive în domeniul  $+30,57 \text{ MVAR} \div -25,93 \text{ MVAR}$ . Aceasta face ca, pentru o anumită treaptă valoarea puterii reactive să fie cea mai apropiată de zero (figura 5.7). Se observă că variația puterii reactive între două trepte consecutive este de  $\Delta Q_{\text{treaptă, simulat}} = 4,04 \text{ MVAR}$ , mai mică decât cea proiectată,  $\Delta Q_{\text{treaptă}} = 4,17 \text{ MVAR}$ , dată de relația (4.28) datorită faptului că valoarea aleasă pentru capacitatea pe o fază a unei trepte de compensare este mai mică decât cea rezultată prin calcul, relațiile (4.80) și (4.82).

- Valoarea puterii reactive compensate de bateriile fixe (diferența între valorile puterii reactive din primele două linii ale *tabelului 5.3*) este  $Q_{\text{const, simulat}} = 25,4 \text{ MVAR}$ , apropiată de cea rezultată din proiectare  $Q_{\text{const}} = 25,8 \text{ MVAR}$ , dată de relația (4.25).

- Valoarea puterii reactive totale compensate (diferența între valorile puterii reactive din prima și ultima linie a *tabelului 5.3*) este  $Q_{\text{comp, simulat}} = 81,9 \text{ MVAR}$ , iar cea rezultată din proiectare  $Q_{\text{comp}} = 82,4 \text{ MVAR}$ , dată de relația (4.21).

- Deoarece puterea deformantă este relativ mică, se observă că, practic în momentul în care puterea reactivă este nulă puterea activă este aproximativ egală cu cea aparentă, fapt care duce la obținerea unei valori maxime a factorului de putere (figura 5.8).

- Din punct de vedere al distorsiunilor armonice totale se observă că valoarea maximă a acestora este obținută pentru valori apropiate de unitate a factorului de putere. De asemenea, valorile obținute se încadrează în domeniul de valori măsurate pe linia de alimentare de medie tensiune și prezentate în figurile 3.35 și 3.36.

Din cele prezentate anterior a rezultat faptul că simulările privitoare la funcționarea instalației de compensare a puterii reactive confirmă concluziile la care s-a ajuns în capitolul precedent, instalația permițând obținerea unui factor de putere foarte apropiat de unitate.

Analiza efectelor utilizării filtrelor pe armonicile 5, 7, 11 și 13 se poate face comparând caracteristicile spectrale și amplitudinile armonicilor curentului și tensiunii de pe linia de alimentare de medie tensiune, obținute pentru funcționarea instalației electrice fără filtre (figura 5.4) și cele obținute în situația în care se utilizează filtrele, pe treapta de compensare optimă, a 8-a din *tabelul 5.3*, prezentate în figura 5.9.

Se observă că atât în cazul caracteristicii spectrale a curentului cât și a tensiunii, în cazul utilizării filtrelor de armonici, amplitudinea armonicilor pentru care s-au amplasat filtrele este mult redusă față de situația în care nu s-au utilizat acestea.

## Variația puterilor funcție de treapta de compensare

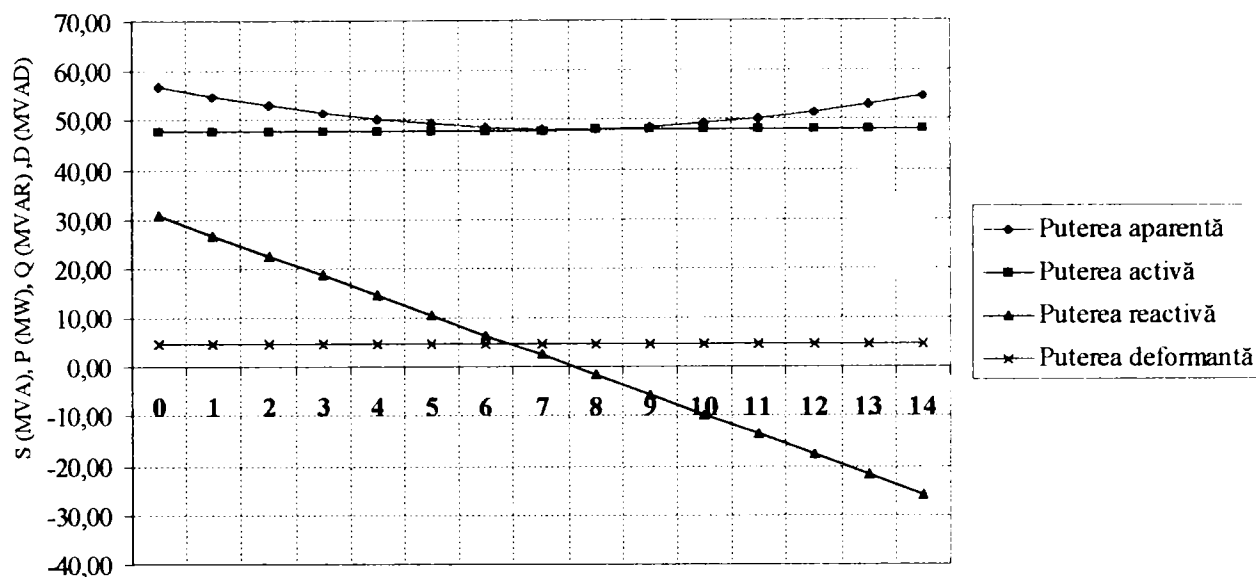


Fig. 5.7. Variația puterilor în regim deformant pe linia de alimentare de medie tensiune în funcție de treapta de compensare.

## Variația factorului de putere, a factorului reactiv și a factorului deformant

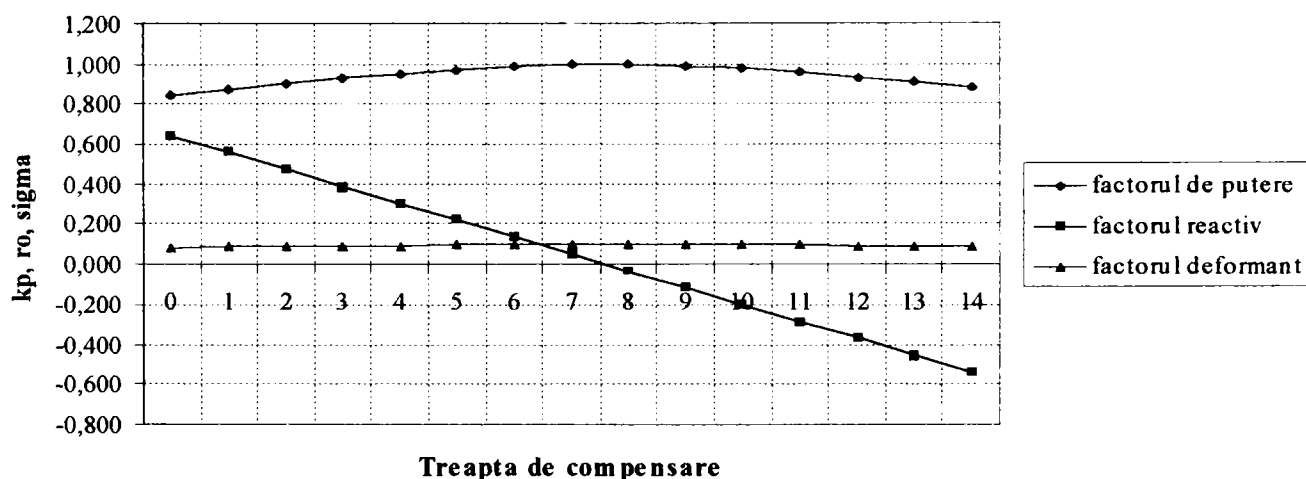


Fig. 5.8. Variația factorilor de putere pe linia de medie tensiune în funcție de treapta de compensare.

Cu toate acestea, așa cum era de așteptat, puterea deformantă nu poate fi anulată deoarece, în spectrul curentului și tensiunii, pe lângă armonicile de ordin 5, 7, 11 și 13 pentru care s-au proiectat și amplasat filtre, există pe de o parte și alte armonici al căror efect nu a fost anulat dar și o serie de interarmonici care, împreună contribuie la generarea unei puteri deformante, dar de valoare mult redusă.

În concluzie, în acest paragraf autorul a demonstrat prin simulare faptul că, valorile obținute pentru parametrii instalației de compensare a puterii reactive, precum și ai filtrelor pentru armonicile de ordin 5, 7, 11 și 13 în capitolul precedent, utilizând modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc, permit o îmbunătățire semnificativă a indicatorilor de utilizare calitativă a energiei electrice la cuptorul electric cu arc atât din punct de vedere al factorului de putere, a puterilor în regim deformant, precum și distorsiunii armonice totale și parțial ponderate a curentului și tensiunii.



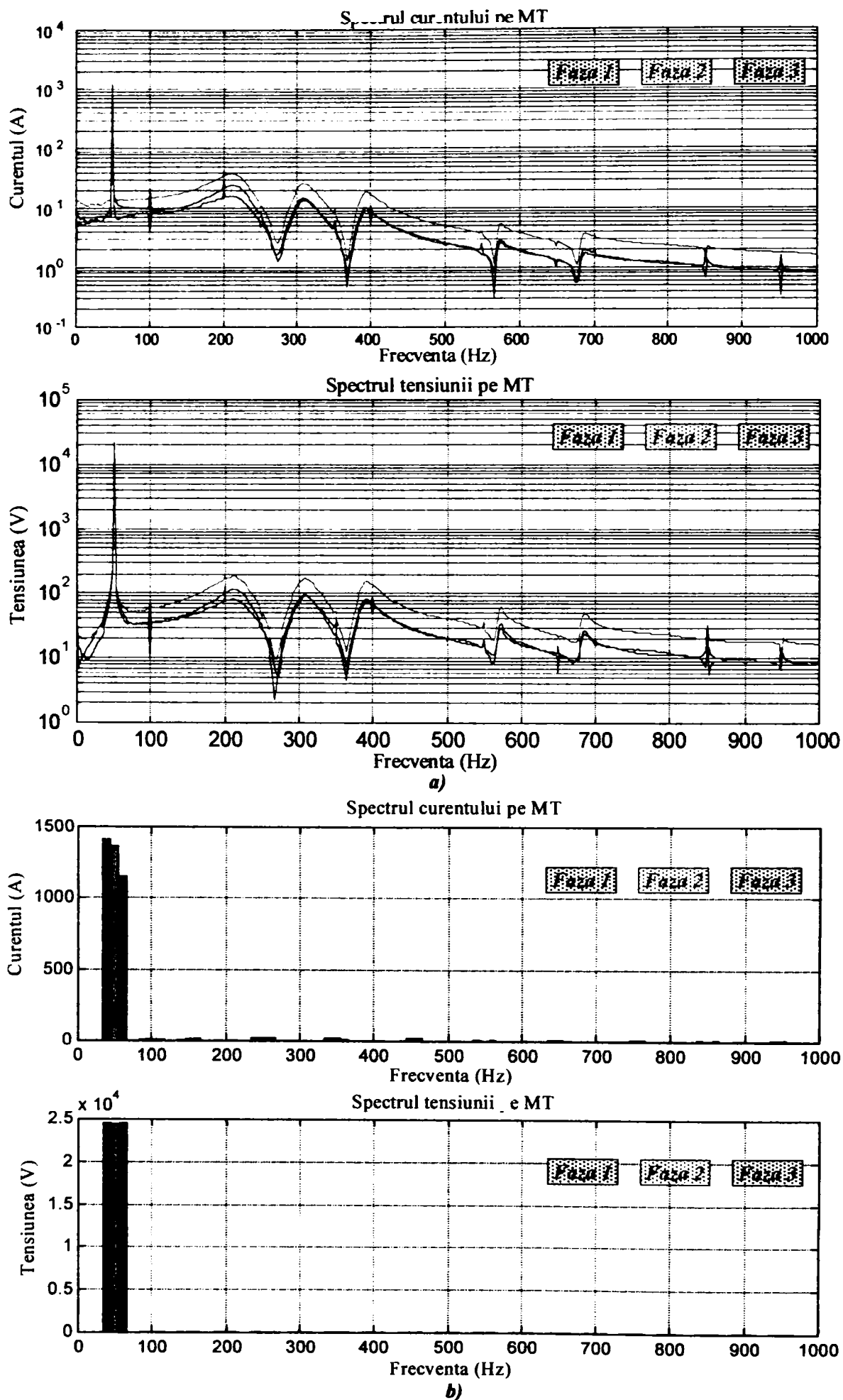


Fig. 5.9. a) Caracteristica spectrală; b) Amplitudinea armonicilor curentului și tensiunii pe linia de alimentare de medie tensiune (MT) utilizând filtrele pe armonici.



#### 5.4. Interdependența acțiunilor de compensare a puterii reactive, echilibrare a sarcinii și filtrare a curenților armonici

În acest paragraf se va analiza influența acțiunilor de îmbunătățire a calității energiei în nodul de rețea reprezentat de linia de alimentare de medie tensiune ( $30kV$ ) a cuptorului cu arc electric a cărei funcționare a fost reprodusă prin simulare așa cum a fost prezentat în paragrafele anterioare. Având în vedere că îmbunătățirea calității energiei electrice în nod se poate obține ca urmare a trei acțiuni independente, în cele ce urmează se vor lua în considerare următoarele cazuri [3],[4]:

- nu se intervine în nici un fel în ameliorarea regimului de funcționare;
- se acționează doar pentru rezolvarea uneia dintre cele trei probleme;
- se acționează pentru rezolvarea simultană a celor trei probleme.

Pentru fiecare din situațiile în care se acționează se vor dimensiona elementele compensatoarelor utilizate în vederea compensării puterii reactive (prin alegerea treptei optime de compensare), echilibrării sarcinii (prin calculul susceptanțelor necesare), respectiv filtrării curenților armonici (prin conectarea filtrelor de armonici calculate în capitolul precedent).

De asemenea, pe baza relațiilor prezentate în capitolul 2 au fost calculați indicatorii necesari analizei interdependenței acțiunilor de optimizare.

##### 5.4.1. Prezentarea situației în care nu se intervine pentru ameliorarea regimului de funcționare

Deoarece alimentarea cuptorului cu arc electric se realizează printr-o rețea trifazată cu trei conductoare curenții homopolari care apar au valori foarte mici, astfel încât se pot neglija. În aceste condiții din relațiile (2.51) și (2.54) și ținând seama de (2.44) și de (2.55), expresia factorului de putere este dată de

$$k_p = \frac{\cos \varphi_1^+}{\sqrt{1 + k_{ni1}^2 \cdot \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} (\gamma_{I_k}^-)^2\right) + \sum_{k=2}^{\infty} (\gamma_{I_k}^+)^2}} \quad (5.5)$$

Din analiza expresiei factorului de putere se constată că aceasta pune în evidență atât regimul nesimetric, prin intermediul coeficientului de disimetrie  $k_{ni1}$ , cât și pe cel nesinusoidal, prin nivelul curenților armonici de secvență directă și inversă pentru armonicile de rang mai mare decât unu,  $\gamma_{I_k}^-$  și  $\gamma_{I_k}^+$ .

În ceea ce privește efectul celor trei elemente și anume circulația puterii reactive pe fundamentală, dezechilibrul curenților respectiv nesinusoidalitatea acestora asupra creșterii pierderilor în rețea, acesta este diferit. Dacă se consideră reducerea pierderilor prin aplicarea celor trei acțiuni de optimizare ca fiind:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{min}} = \frac{1 + k_{ni1}^2 \cdot \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} (\gamma_{I_k}^-)^2\right) + \sum_{k=2}^{\infty} (\gamma_{I_k}^+)^2}{\cos^2 \varphi_1^+} \quad (5.6)$$

se poate stabili sensibilitatea reducerii pierderilor cu fiecare dintre acțiunile amintite, calculând derivatele parțiale. Astfel se poate calcula:

- sensibilitatea reducerii pierderilor cu echilibrarea sarcinii pe fundamentală,

$$\frac{\partial(\Delta P / \Delta P_{min})}{\partial k_{ni1}} = 2 \cdot k_{ni1} \cdot \frac{1 + \sum_{k=2}^{\infty} (\gamma_{I_k}^-)^2}{\cos^2 \varphi_1^+} \quad (5.7)$$

- sensibilitatea în raport cu atenuarea armonicilor

$$\frac{\partial(\Delta P / \Delta P_{\min})}{\partial \gamma_{rk}^-} = \frac{2 \cdot k_{m1}^2 \cdot \gamma_{rk}^-}{\cos^2 \varphi_1^+} \quad (5.8)$$

respectiv

$$\frac{\partial(\Delta P / \Delta P_{\min})}{\partial \gamma_{rk}^+} = \frac{2 \cdot \gamma_{rk}^+}{\cos^2 \varphi_1^+} \quad (5.9)$$

- sensibilitatea în raport cu îmbunătățirea factorului de putere pe fundamentală:

$$\frac{\partial(\Delta P / \Delta P_{\min})}{\partial \cos \varphi_1^+} = -\frac{2}{\cos^3 \varphi_1^+} \left[ 1 + k_{m1}^2 \cdot \left( 1 + \sum_{k=2}^{\infty} (\gamma_{rk}^-)^2 \right) + \sum_{k=2}^{\infty} (\gamma_{rk}^+)^2 \right] \quad (5.10)$$

Având în vedere valorile uzuale ale mărimilor care intervin în relațiile (5.7) - (5.10) rezultă că eficiența acțiunilor de optimizare sub aspectul reducerii pierderilor de putere este dată, în ordinea importanței de:

- compensarea puterii reactive pentru îmbunătățirea factorului de putere;
- echilibrarea sarcinii;
- atenuarea armonicilor de curent.

Pentru a se putea analiza efectele acțiunilor de optimizare precum și interdependența acțiunilor lor s-a pornit de la determinarea indicatorilor prezentați în capitolul 2. În **tabelul 5.4** sunt prezentate rezultatele obținute în urma simulărilor în condițiile în care nu s-a efectuat nici o acțiune de optimizare. Datele prezentate au fost determinate prin "măsurarea" curenților și tensiunilor de fază pe linia de alimentare de medie tensiune utilizând schema prezentată în **anexa II.9** în care regimul dezechilibrat a fost obținut pentru valorile inegale ale lungimii arcului electric date de relația (5.2). Rezultatele au fost obținute pe baza datelor obținute în urma simulărilor, utilizând programul prezentat în **anexa I.6**.

**Tabelul 5.4.**

**Rezultatele simulării pe MT fără utilizarea instalației de filtrare, compensare și echilibrare.**

	<i>Fundamentală</i>	<i>Armonica 5</i>	<i>Armonica 7</i>	<i>Armonica 11</i>	<i>Armonica 13</i>
$I_R$	-458,16-j1324,82	-18,02+j46,25	6,89+j26,80	-9,58-j3,44	-8,19+j2,20
$I_R$	1401,81	49,64	27,67	10,17	8,48
$I_S$	-876,95+j1248,53	-27,63-j16,91	6,80-j24,86	0,83-j3,00	7,07-j1,39
$I_S$	1525,73	32,39	25,77	3,11	7,21
$I_T$	1335,10+j76,29	45,65-j29,34	-13,69-j1,94	8,75+j6,43	1,11-j0,81
$I_T$	1337,28	54,27	13,82	10,86	1,38
$I^+$	-567,17-j1300,31	-12,53+j1,93	10,07+j19,39	-1,99-j3,97	-3,92+j2,85
$I^+$	1418,62	12,68	21,85	4,44	4,84
$I^-$	109,48-j23,63	-5,54+j44,34	-3,20+j7,59	-7,55+j0,58	-4,32-j0,59
$I^-$	112,00	44,68	8,24	7,57	4,36
$I^0$	-1e-029+j7,4e-013	-4,5e-013-j5e-013	2,5e-013-j4e-013	-8e-013-j1,8e-013	-3,5e-013-j2e-013
$I^0$	7,41e-013	6,7328e-013	4,58e-013	8,11e-013	4,07e-013
$k_{m1} [\%]$	7,90	352,32	37,70	170,58	90,11
$k_{m2} [\%]$	0,05	368,09	37,50	191,39	85,77
$\gamma_{UR}$	0,98815	0,03499	0,01950	0,00717	0,00598
$\gamma_{US}$	1,07550	0,02283	0,01817	0,00219	0,00508
$\gamma_{UT}$	0,94266	0,03825	0,00974	0,00765	0,00097
$\gamma_{UR}$	1,00036	0,00092	0,00062	0,00026	0,00024
$\gamma_{US}$	0,99946	0,00061	0,00056	0,00010	0,00020
$\gamma_{UT}$	1,00017	0,00100	0,00031	0,00028	0,00004

Analizând rezultatele prezentate se constată:

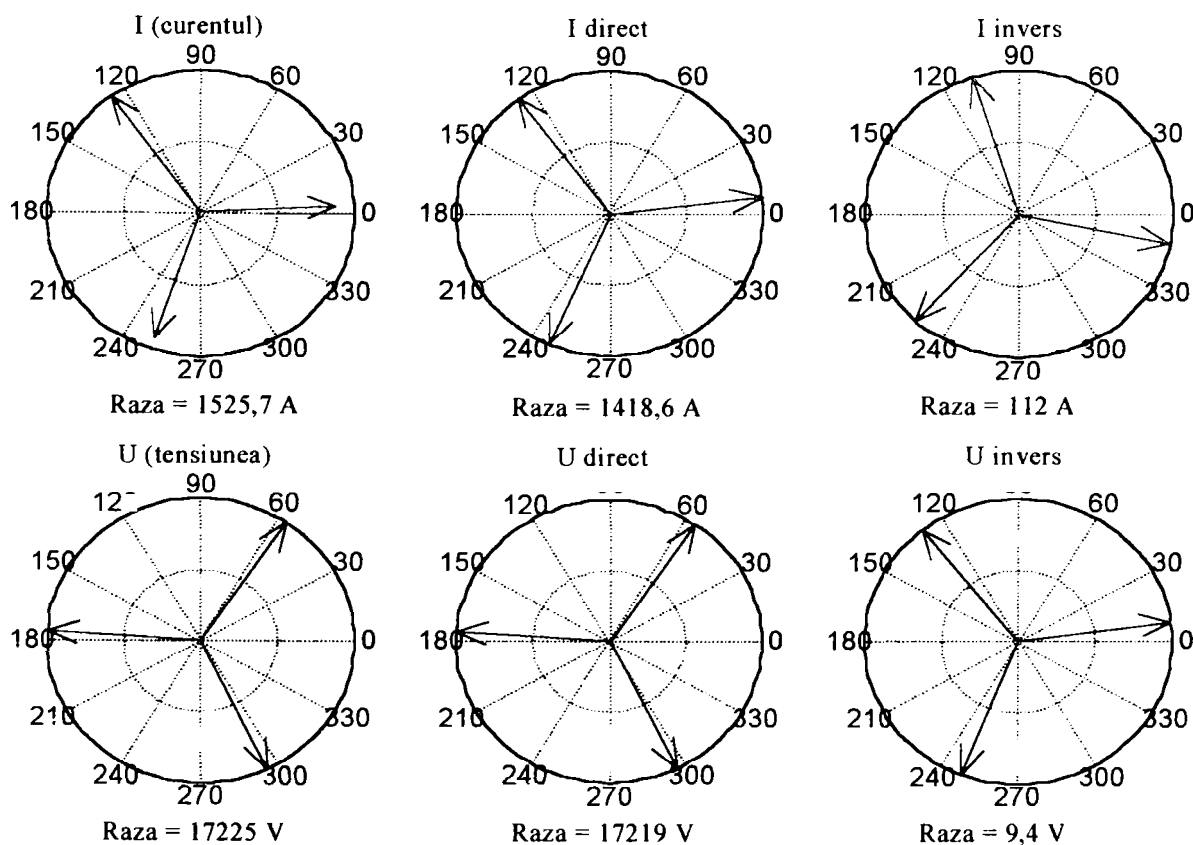
- sistemul de alimentare este dezechilibrat, fapt care rezultă din
  - valorile coeficienților de disimetrie ale curenților și tensiunilor (mult mai mari pentru armonici);
  - valoarea mare a componentei de secvență inversă a curentului atât pentru fundamentală, (**112 A**), cât și pentru armonici, distingându-se armonica a **5-a** pentru care valoarea efectivă a curentului de secvență inversă este **44,68 A**.

- cuptorul cu arc electric este un puternic generator de armonici în rețeaua de alimentare, fapt care rezultă din valorile mari ale curenților de secvență directă, respectiv inversă a armonicilor de ordin **5,7,11** și **13**. De asemenea se constată un mare dezechilibru al curenților armonici, în special pentru armonica a **5-a**.

- deși nu rezultă din **tabelul 5.6**, datorită inexistenței instalației de compensare a puterii reactive valoarea factorului de putere este redusă,  $k_p = 0,644$ , (**tabelul 5.3, linia 1**).

- valorile curenților homopolarizări obținute în urma simulărilor sunt foarte mici, fapt care justifică aproximările făcute anterior.

În figura 5.10 sunt reprezentați fazorii curenților și tensiunilor precum și a componentelor de secvență directă și inversă ale acestora, iar în **anexa V.1** fazorii armonicilor curentului și tensiunii.



**Fig. 5.10. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe fundamentală și a componentelor simetrice corespunzătoare fără optimizarea funcționării.**

#### 5.4.2. Prezentarea situației în care se intervine pentru compensarea puterii reactive

În această situație nu se ia în considerare prezența regimului dezechilibrat și nesinusoidal, pentru îmbunătățirea factorului de putere efectuându-se o compensare capacitivă transversală simetrică. Valorile curenților de compensare, aceleași pe fiecare fază, se determină din condiția anulării componentei reactive a curentului de secvență directă corespunzător fundamentalei (după compensare) ( $\cos \varphi_1^{+c} = 1$ ):

$$\underline{I}_m(\underline{I}_1^{+c}) = 0 \quad (5.11)$$

Dimensionarea compensatorului în conexiune Y se face pornind de la valorile curenților, din **tabelul 5.6** și tensiunilor, rezultate în urma rulării programului din **anexa I.6**, determinate în cazul simulării funcționării instalației pentru care nu s-a efectuat nici o acțiune de optimizare. Aceste valori sunt

$$\begin{aligned} \underline{I}_R &= -458,2 - j1342,8 \text{ A} & \underline{U}_R &= 7598 - j15459 \text{ V} \\ \underline{I}_S &= -876,9 + j1248,5 \text{ A} & \underline{U}_S &= -17172 + j1143,5 \text{ V} \\ \underline{I}_T &= 1335,1 + j76,3 \text{ A} & \underline{U}_T &= 9574,1 + j14315 \text{ V} \end{aligned} \quad (5.12)$$

pe baza cărora rezultă componentele de secvență directă a curentului și tensiunii, **tabelul 5.1**, date de:

$$\begin{aligned} \underline{I}^+ &= -567,16 - j1300,3 = 1418,6 \cdot e^{-j113,56^\circ} \\ \underline{U}^+ &= 7601,5 - j15450,7 = 17219 \cdot e^{-j63,80^\circ} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Valoarea capacității necesară echilibrării rezultă din condiția de anulare a componentei reactive a curentului de secvență directă, adică

$$C^Y = \frac{I^+ \cdot \sin(\underline{I}^+, \underline{U}^+)}{\omega U^+} = 200,18 \mu F. \quad (5.14)$$

Simulările efectuate pe cea mai apropiată treaptă de valoarea dată de (5.14), **treapta 11**, pentru instalația de compensare calculată anterior ( $C_1^Y = 205,92 \mu F$ ) au arătat că pe această treaptă nu se reușește o anulare totală a componentei reactive a curentului de secvență directă (defazajul față de componenta de secvență directă a tensiunii fiind  $\Delta\varphi_1 = -1,4422^\circ$ ).

**Tabelul 5.5.**

**Rezultatele simulării pe MT utilizând numai instalația de compensare a puterii reactive.**

	<i>Fundamentala</i>	<i>Armonica 5</i>	<i>Armonica 7</i>	<i>Armonica 11</i>	<i>Armonica 13</i>
$\underline{I}_R$	537,55-j842,88	-15,01+j51,92	13,06+j28,78	-12,11-j0,02	-7,79+j7,00
$I_R$	999,70	54,04	31,61	12,11	10,47
$\underline{I}_S$	-955,84+j147,55	-31,90-j15,42	2,71-j29,00	-0,58-j3,79	6,93-j5,35
$I_S$	967,16	35,43	29,13	3,83	8,76
$\underline{I}_T$	418,29+j695,33	46,91-j36,50	-15,77+j0,22	12,69+j3,81	0,86-j1,65
$I_T$	811,45	59,44	15,77	13,25	1,86
$\underline{I}^+$	427,36-j817,82	-13,45+j3,34	15,04+j19,79	-3,85-j3,80	-2,80+j5,31
$I^+$	922,75	13,86	24,86	5,41	6,00
$\underline{I}^-$	109,57-j24,91	-1,53+j48,75	-2,01+j8,95	-8,32+j3,84	-4,96+j1,69
$I^-$	112,37	48,78	9,17	9,16	5,24
$\underline{I}^0$	2,7e-013-j2,4e-013	-6,5e-013-j5e-013	-1e-013-j1,5e-013	3,7e-013-j7e-013	7,5e-013-j7e-013
$I^0$	3,6e-013	8,1e-013	1,9e-013	7,7e-013	1,009e-012
$k_{mi} [\%]$	12,18	351,98	36,89	169,49	87,34
$k_{mi} [\%]$	0,05	350,09	36,97	166,46	87,96
$\gamma_{IR}$	1,08340	0,05857	0,03425	0,01312	0,01135
$\gamma_{IS}$	1,04813	0,03839	0,03157	0,00415	0,00949
$\gamma_{IT}$	0,87939	0,06441	0,01709	0,01436	0,00202
$\gamma_{UR}$	1,00037	0,00100	0,00068	0,00030	0,00027
$\gamma_{US}$	0,99947	0,00065	0,00063	0,00010	0,00023
$\gamma_{UT}$	1,00016	0,00109	0,00034	0,00033	0,00004

Efectuând simulări pe treapta precedentă ( $C_2^Y = 191,52 \mu F$ ) s-a constatat că defazajul a crescut la valoarea  $\Delta\varphi_2 = 3,4229^\circ$ , fiind de natură inductivă. Deși în urma unui proces iterativ s-a constatat că valoarea optimă a capacității, (pentru care se obține defazaj nul) este  $C_{optim}^Y = 201,7 \mu F$ , apropiată de valoarea dată de relația (5.14), rezultatele acțiunii de compensare, prezentate în **tabelul 5.5**, sunt cele obținute **la funcționarea pe treapta optimă a instalației de compensare**, în care  $C_1^Y = 205,92 \mu F$ .

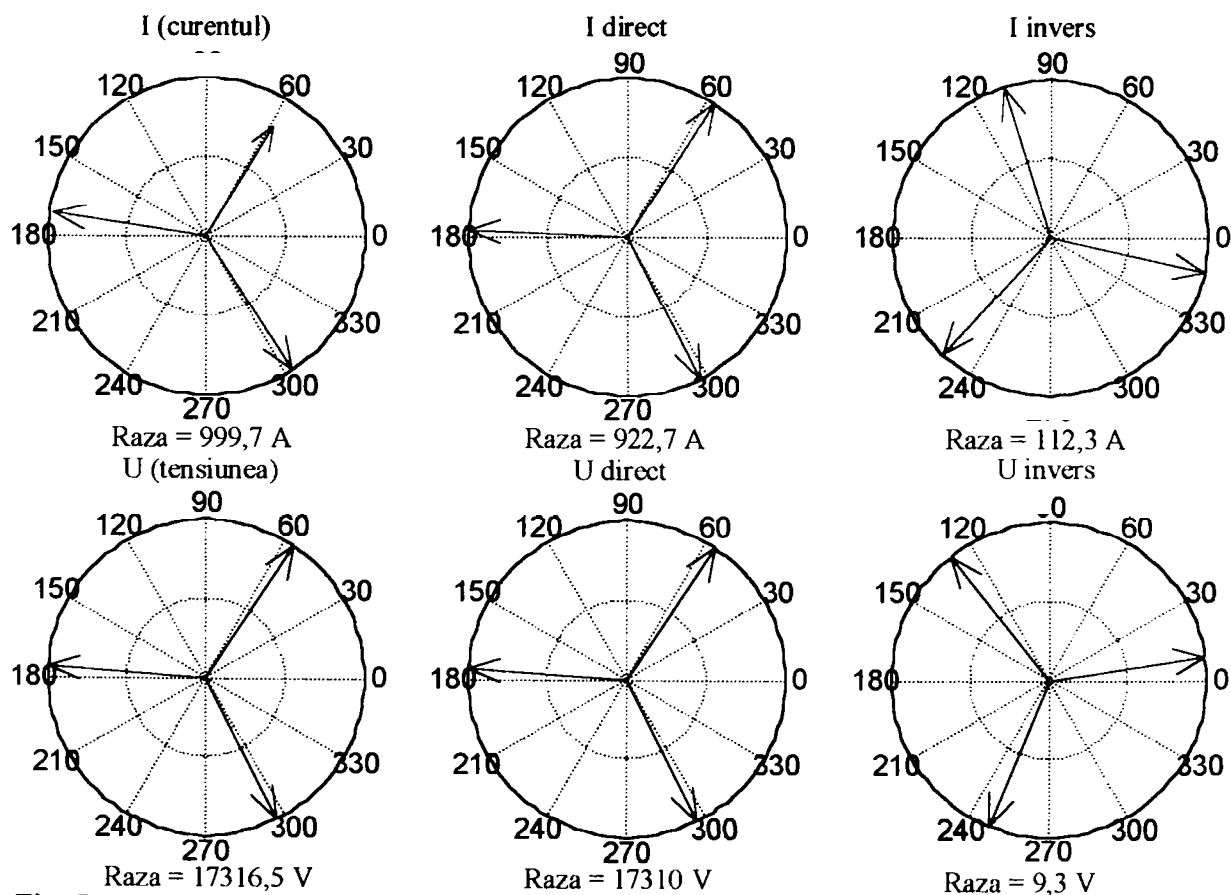
În cazul compensării puterii reactive, nu se intervine asupra componentei de secvență inversă pe fundamentală a curenților, în schimb componenta de secvență directă se reduce de la  $I_1^+$  la  $I_1^{+c} = I_1^+ \cdot \cos\varphi_1^+ = \text{Re}(\underline{I}_1^+)$ ,  $I_1^+$  respectiv  $\cos\varphi_1^+$  fiind curentul de secvență directă respectiv factorul de putere pe fundamentală. Corespunzător, coeficientul de disimetrie pe fundamentală, după compensare, devine

$$k_{n1} = \frac{I_1^-}{I_1^+ \cdot \cos\varphi_1^+} \tag{5.15}$$

crescând cu atât mai mult cu cât factorul de putere înainte de compensare este mai mic.

Se constată, deci că în cazul acțiunii de compensare a puterii reactive **gradul de nesimetrie al regimului se accentuează**.

În figura 5.11 s-au reprezentat fazorii curenților și tensiunilor fundamentale precum și a componentelor de secvență directă și inversă, iar în **anexa V.2** sunt reprezentați fazorii curenților și tensiunii armonicilor.



**Fig. 5.11. Reprezentarea fazorilor curenților și tensiunii pe fundamentală și a componentelor simetrice corespunzătoare utilizând numai instalația de compensare a puterii reactive.**

Se constată pe de o parte faptul că fazorii curenților și tensiunii pentru secvența directă sunt în fază dar și o scădere a valorii curenților combinată cu creșterea valorii tensiunii.



### 5.4.3. Prezentarea situației în care se intervine pentru echilibrarea sarcinii

În această situație se intervine asupra echilibrării sarcinii fără a se urmări îmbunătățirea factorului de putere sau atenuarea armonicilor. Compensarea este nesimetrică și este posibilă cu ajutorul unui circuit în conexiune  $\Delta$ , care conține numai susceptanțe, racordat în paralel cu rețeaua, în secțiunea în care se dorește echilibrarea.

O **primă metodă** de determinare a elementelor compensatorului care să permită realizarea funcției de echilibrare a sarcinii se bazează pe rezolvarea ecuațiilor (4.84), caz în care compensatorul nu consumă putere reactivă.

Așa cum s-a prezentat anterior, la realizarea compensării puterii reactive, datorită treptelor în care poate varia capacitatea compensatorului în Y nu întotdeauna poate fi realizată anularea totală a componentei reactive a curentului de secvență directă. Pe de altă parte, în [4] s-a arătat că se poate determina un compensator în configurație  $\Delta$  care pe lângă funcția de echilibrare poate compensa total puterea reactivă ( $\cos \varphi^+ = 1$ ).

În această situație, compensatorul poate fi considerat ca fiind realizat din două compensatoare, unul care să îndeplinească numai funcția de echilibrare iar cel de al doilea funcția de anulare a componentei reactive a curentului de secvență directă.

Pe baza acestor observații autorul a calculat valorile elementelor instalației de echilibrare utilizând o **a doua metodă**. Această metodă constă în calculul elementelor instalației de echilibrare utilizând valorile curenților și tensiunilor obținute după cea mai bună compensare a puterii reactive, instalația de echilibrare fiind în acest caz un compensator în configurație  $\Delta$  care poate compensa total diferența de putere reactivă.

Avantajele metodei propuse de autor constau în:

- ansamblul compensator de putere reactivă – instalație de echilibrare are aceleași performanțe ca un compensator total de putere reactivă împreună cu o instalație de echilibrare care nu consumă putere reactivă;
- instalația de echilibrare a sarcinii, deși consumă putere reactivă, valoarea acesteia este mică încât tiristoarele din structură nu vor fi suprasolicitate, în condițiile în care se poate realiza și o reglare continuă a puterii reactive a compensatorului.

Calculul instalației de echilibrare pornește de la determinarea valorilor curenților și tensiunilor în situația celei mai bune compensări a puterii reactive, utilizând valoarea optimă a capacității de compensare  $C_{optim}^Y = 201,7 \mu F$ . Aceste valori au fost obținute pe baza datelor rezultate în urma simulării prin rularea programului din *anexa I.6*, fiind date de relațiile

$$\begin{aligned}\underline{I}_R^S &= 516,93 - j 852,41 A \\ \underline{I}_S^S &= 952,32 + j 167,66 A \\ \underline{I}_T^S &= 435,39 + j 684,74 A\end{aligned}\tag{5.16}$$

$$\begin{aligned}\underline{U}_R^S &= 7624,4 - j 15547 V \\ \underline{U}_S^S &= -17260 + j 1163,9V \\ \underline{U}_T^S &= 9635,6 + j 14381 V\end{aligned}\tag{5.17}$$

pe baza cărora se pot calcula admitanțele sarcinii în conexiune Y

$$\begin{aligned}\underline{Y}_R^S &= G_R - jB_R = 0,057343 + j 0,005128 = 0,057572 \cdot e^{j 5,1102^\circ} \\ \underline{Y}_S^S &= G_S - jB_S = 0,055577 - j 0,005966 = 0,055896 \cdot e^{-j 6,1270^\circ} \\ \underline{Y}_T^S &= G_T - jB_T = 0,046861 + j 0,001123 = 0,046875 \cdot e^{j 1,3728^\circ}\end{aligned}\tag{5.18}$$



Se constată prezența unui dezechilibru în ceea ce privește modulele celor trei admitanțe, în timp ce fazele lor sunt foarte mici, fapt care arată că s-a realizat o compensare corectă. Pe baza valorilor admitanțelor sarcinii în conexiune Y se pot determina valorile admitanțelor sarcinii în conexiune Δ potrivit relațiilor prezentate în [4]

$$\begin{aligned}
 G_{RS}^S &= \frac{1}{6} \left[ (G_R + G_S) + \frac{1}{\sqrt{3}} (B_S - B_R) \right] = 0,01988773 \\
 B_{RS}^S &= \frac{1}{6} \left[ (B_R + B_S) + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_R - G_S) \right] = 0,00030963 \\
 G_{TR}^S &= \frac{1}{3} \left[ G_R + \frac{1}{\sqrt{3}} (B_R - B_S) \right] = 0,01697944 \\
 B_{TR}^S &= \frac{1}{3} \left[ B_R + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_S - G_R) \right] = -0,00204928 \\
 G_{ST}^S &= \frac{1}{3} \left[ G_S + \frac{1}{\sqrt{3}} (B_R - B_S) \right] = 0,01639071 \\
 B_{ST}^S &= \frac{1}{3} \left[ B_S + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_S - G_R) \right] = 0,00164883
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

Dimensionarea compensatorului în conexiune Δ se face pe baza condițiilor de anulare a curentului de secvență inversă, potrivit relațiilor (4.84.a) și (4.84.b) și de anulare a puterii reactive absorbite din rețea. Aceasta conduce la sistemul de ecuații

$$\begin{aligned}
 -G_{RS} + 2G_{ST} - G_{TR} + \sqrt{3}(B_{TR} - B_{RS}) &= 0 \\
 \sqrt{3}(G_{TR} - G_{RS}) + B_{RS} - 2B_{ST} + B_{TR} &= 0 \\
 G_{RS} - G_{TR} - \sqrt{3}(B_{RS} + B_{TR}) &= 0
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

sistem în care s-au utilizat notațiile

$$\begin{aligned}
 G_{RS} &= G_{RS}^S & G_{ST} &= G_{ST}^S & G_{TR} &= G_{TR}^S \\
 B_{RS} &= B_{RS}^S + B_{RS}^\Delta & B_{ST} &= B_{ST}^S + B_{ST}^\Delta & B_{TR} &= B_{TR}^S + B_{TR}^\Delta
 \end{aligned} \tag{5.21}$$

în care exponentul <sup>S</sup> definește elementele sarcinii, iar exponentul <sup>Δ</sup> definește elementele compensatorului.

Rezolvând sistemul de ecuații (5.20) considerând ca necunoscute susceptanțele compensatorului se obțin valorile

$$\begin{aligned}
 B_{RS}^\Delta &= -B_{RS}^S + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{ST}^S - G_{TR}^S) = -0,00064953 \\
 B_{ST}^\Delta &= -B_{ST}^S + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{TR}^S - G_{RS}^S) = -0,00332793 \\
 B_{TR}^\Delta &= -B_{TR}^S + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{RS}^S - G_{ST}^S) = 0,00406828
 \end{aligned} \tag{5.22}$$

În acest caz compensatorul în conexiune Δ are ca elemente

$$\begin{aligned}
 C_{RS} &= 2,0675 \mu F \\
 C_{ST} &= 10,5931 \mu F \\
 L_{TR} &= 0,7824 H
 \end{aligned} \tag{5.23}$$

Cu aceste valori, în urma simulărilor efectuate s-au obținut rezultatele prezentate în tabelul 5.6.

Tabelul 5.6.

## Rezultatele simulării pe MT utilizând numai instalația de echilibrare a sarcinii.

	Fundamentala	Armonica 5	Armonica 7	Armonica 11	Armonica 13
$\underline{I}_R$	-567,81-j1300,14	-17,94+j46,50	6,93+j26,98	-9,60-j3,30	-8,21+j2,37
$I_R$	1418,72	49,84	27,86	10,15	8,55
$\underline{I}_S$	-844,92+j1143,65	-27,99-j16,50	6,61-j25,54	0,37-j2,89	7,21-j1,92
$I_S$	1421,91	32,49	26,38	2,92	7,46
$\underline{I}_T$	1412,73+j156,49	45,93-j30,01	-13,54-j1,44	9,23+j6,19	1,00-j0,45
$I_T$	1421,37	54,86	13,62	11,11	1,10
$\underline{I}^+$	-568,51-j1301,39	-12,81+j1,80	10,41+j19,33	-2,11-j4,22	-3,68+j2,95
$I^+$	1420,15	12,93	21,95	4,72	4,71
$\underline{I}^-$	1,15+j1,43	-5,22+j44,54	-3,53+j7,67	-7,44+j0,85	-4,56-j0,65
$I^-$	1,83	44,85	8,44	7,49	4,60
$\underline{I}^0$	2,2e-013-j1,2e-013	-4,7e-013-j6e-013	9e-013+j9,1e-013	7,3e-013+j3e-013	6,4e-013+j4,4e-014
$I^0$	2,5e-013	7,6e-013	1,3e-012	7,9e-013	6,4e-013
$k_{n1}[\%]$	0,13	346,75	38,45	158,66	97,65
$k_{n2}[\%]$	0,00	371,23	39,34	193,33	96,09
$\gamma_{IR}$	0,99900	0,03510	0,01962	0,00715	0,00602
$\gamma_{IS}$	1,00124	0,02288	0,01858	0,00205	0,00525
$\gamma_{IT}$	1,00086	0,03863	0,00959	0,00782	0,00077
$\gamma_{UR}$	1,00001	0,00092	0,00062	0,00026	0,00024
$\gamma_{US}$	0,99998	0,00062	0,00057	0,00010	0,00020
$\gamma_{UT}$	1,00000	0,00101	0,00029	0,00028	0,00003

Analizând rezultatele obținute se constată următoarele

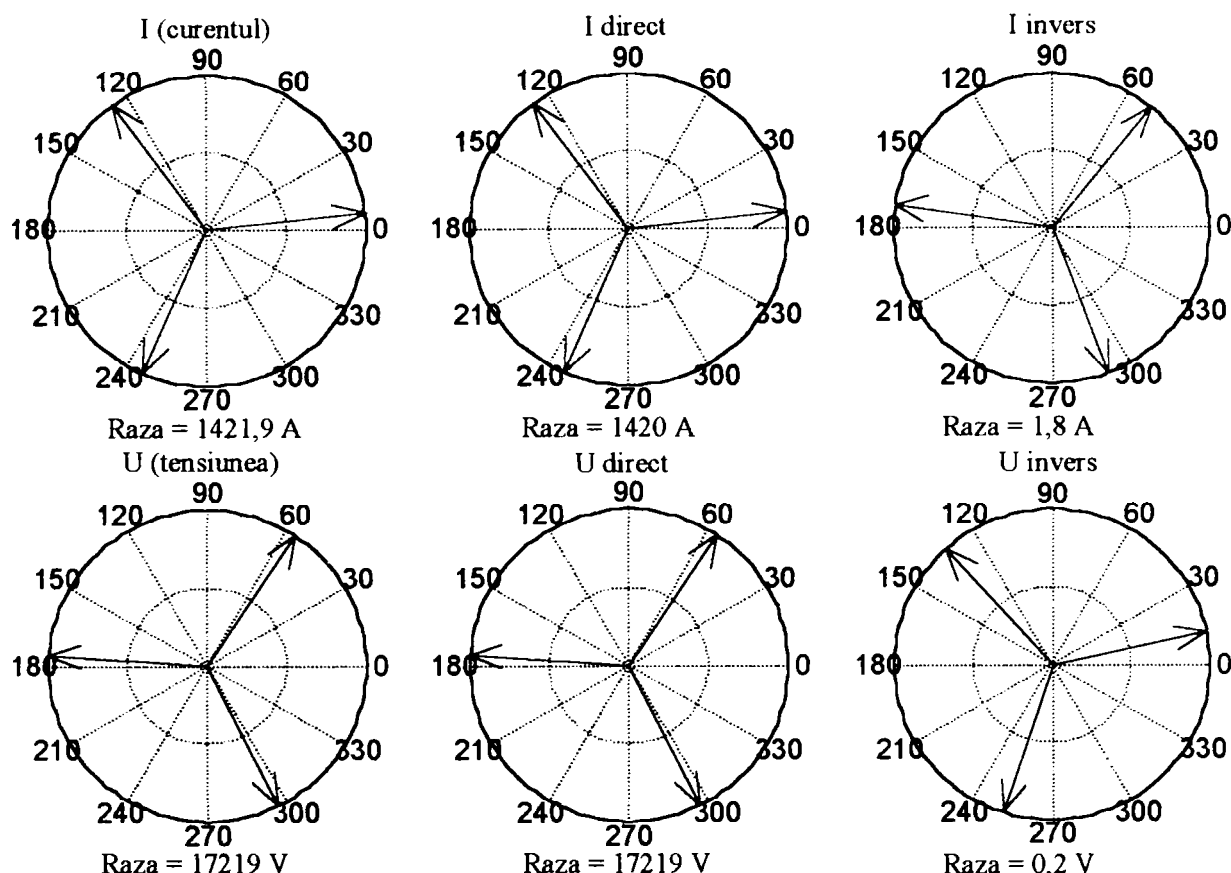
- valoarea curentului de secvență inversă este foarte mică, fapt care demonstrează că s-a realizat o bună echilibrare a sarcinii;
- în ceea ce privește curenții pe cele trei faze se constată o foarte bună simetrie pe fundamentală a curenților pe cele trei faze;
- factorul de disimetrie este mult diminuat comparativ cu varianta în care nu se acționa pentru îmbunătățirea calității energiei, prezentată în *tabelul 5.4*;

În figura 5.12 sunt reprezentați fazorii curenților și tensiunii precum și ai componentelor de secvență directă și inversă, iar în *anexa V.3* sunt reprezentați curenții și tensiunile pe armonicile 5,7,11 și 13.

Ca și în cazul compensării puterii reactive s-a pus problema găsirii unor valori a instalației de echilibrare pentru care să se obțină o valoare cât mai mică a componentei de secvență inversă a curentului. În urma unui proces iterativ s-a constatat că valorile optime ale instalației de echilibrare sunt

$$\begin{aligned}
 C_{RS,optim} &= 2,10 \mu F \\
 C_{ST,optim} &= 10,60 \mu F, \\
 L_{TR,optim} &= 0,79 H
 \end{aligned}
 \tag{5.24}$$

pentru care s-a obținut o valoare efectivă a curentului de secvență inversă de  $I^- = 0,8752A$ , mai mică decât cea prezentată în *tabelul 5.6*.



**Fig. 5.12. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe fundamentală și a componentelor simetrice corespunzătoare cu instalația de echilibrare a sarcinii.**

#### 5.4.4. Prezentarea situației în care se intervine pentru filtrarea curenților armonici

Așa cum a fost prezentat în capitolul 4, filtrarea curenților armonici se realizează utilizând filtre de tip trece-bandă de ordin I. Ținând cont că în funcționare principalele armonici ale curentului și tensiunii sunt cele de ordin 5, 7, 11 și 13, analiza influenței filtrelor a fost făcută utilizând valorile determinate în capitolul precedent pentru aceste filtre.

Se știe că dimensionarea circuitelor rezonante se poate face pe baza a două criterii, [4],[26], în funcție de rolul pe care îl au:

- pentru circuite cu rol principal de filtrare;
- pentru circuite cu dublu rol, compensare – filtrare.

În cazul filtrelor proiectate în capitolul 4 a rezultat că filtrele calculate cedează putere reactivă pe fundamentală, vezi **tabelul 4.3**, astfel încât în cazul unui consumator cu caracter inductiv este de așteptat să contribuie și la îmbunătățirea factorului de putere al ansamblului consumator-filtru.

În urma simulărilor efectuate utilizând simultan cele 4 filtre de armonici s-au obținut rezultatele prezentate în **tabelul 5.7** pe baza cărora se constată următoarele:

- valorile curenților armonici sunt puternic diminuate, atât pentru componenta de secvență directă, cât și pentru cea de secvență inversă;
- deoarece condensatoarele dispuse pe cele trei faze sunt identice rezultă o compensare a componentei de secvență directă a curentului de sarcină.

Din acest motiv rezultă o micșorare a valorilor efective ale acestora, gradul de nesimetrie a curenților accentuându-se, fapt care rezultă și din valorile coeficienților de nesimetrie pe fundamentală.

În figura 5.13 sunt prezentați fazorii curenților și tensiunilor fundamentalei precum și a componentelor de secvență directă și inversă ale acestora. De asemenea, pentru armonici, aceiași fazori sunt reprezentați în **anexa V.4**.

Tabelul 5.7.

Rezultatele simulării pe MT utilizând numai instalația de filtrare a curenților armonici.

	Fundamentală	Armonica 5	Armonica 7	Armonica 11	Armonica 13
$\underline{I}_R$	-167,25-j1225,60	3,29+j6,77	5,99+j5,25	-3,09+j0,09	-1,93+j1,11
$I_R$	1236,96	7,53	7,96	3,09	2,22
$\underline{I}_S$	-947,08+j947,05	-3,57+j1,40	-2,35-j7,21	-0,12-j1,05	1,84-j0,94
$I_S$	1339,35	3,84	7,59	1,05	2,07
$\underline{I}_T$	1114,33+j278,56	0,28-j8,17	-3,64+j1,97	3,21+j0,96	0,09-j0,16
$I_T$	1148,62	8,18	4,14	3,35	0,18
$\underline{I}^+$	-276,93-j1207,51	-1,84+j1,05	5,57+j2,90	-1,06-j0,95	-0,82+j1,01
$I^+$	1238,86	2,11	6,28	1,43	1,30
$\underline{I}^-$	109,48-j17,23	5,14+j4,65	0,45+j2,32	-2,09+j0,96	-1,11+j0,07
$I^-$	110,83	6,93	2,36	2,30	1,11
$\underline{I}^0$	-6e-013-j1,7e-013	-5,4e-013-j1,2e-013	1e-013-j3,3e-013	-7,3e-013-j1,2e-013	3e-013-j4,2e-013
$I^0$	6,2e-013	5,6e-013	3,5e-013	7,4e-013	5,2e-013
$k_{nl}[\%]$	8,95	327,85	37,67	161,36	85,80
$k_{nd}[\%]$	0,11	1129,99	43,48	608,33	59,92
$\gamma_{IKR}$	0,99847	0,00608	0,00643	0,00250	0,00179
$\gamma_{IKS}$	1,08111	0,00310	0,00612	0,00085	0,00167
$\gamma_{IKT}$	0,92716	0,00660	0,00334	0,00270	0,00015
$\gamma_{UKR}$	1,00075	0,00034	0,00048	0,00025	0,00026
$\gamma_{UKS}$	0,99894	0,00021	0,00038	0,00019	0,00020
$\gamma_{UKT}$	1,00031	0,00026	0,00024	0,00021	0,00010

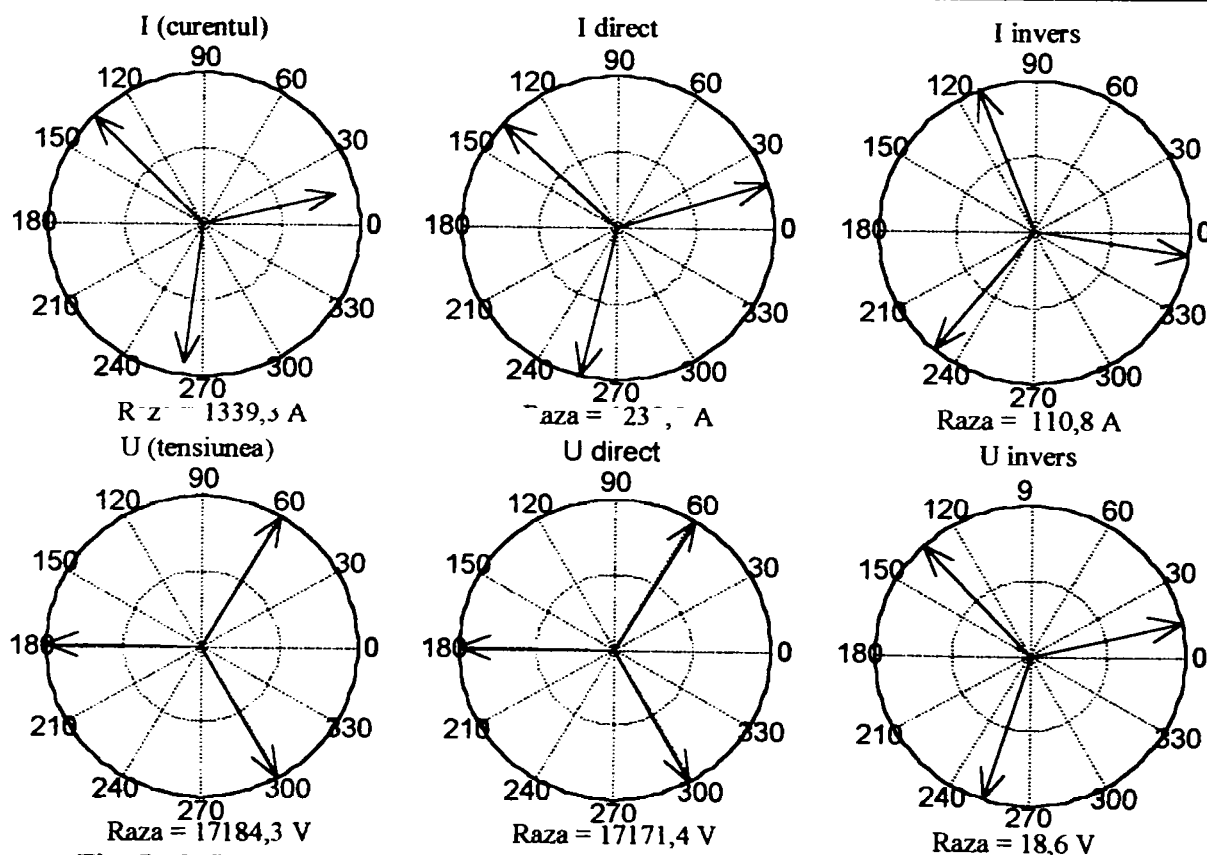


Fig. 5.13. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe fundamentală și a componentelor simetrice corespunzătoare după filtrarea curenților armonici.

### 5.4.5. Prezentarea situației când se acționează în vederea compensării puterii reactive, a echilibrării sarcinii și filtrării curenților armonici

Din cele prezentate anterior a rezultat că întreprinderea unei singure acțiuni de optimizare dintre cele trei nu este deplin avantajoasă. Astfel, de regulă se elimină cauza pentru care s-a aplicat măsura respectivă în timp ce celelalte perturbații se accentuează sau nu se modifică. Nici abordarea simultană a câte două dintre cele trei aspecte nu rezolvă în totalitate problema pentru că de regulă eliminarea a două dintre perturbații conduce la accentuarea celei de-a treia.

Situația cea mai favorabilă, care conduce de fapt la optimizarea regimului de funcționare al rețelei până la unul foarte apropiat de cel ideal, se obține în mod evident, prin acționarea pentru rezolvarea simultană a celor trei probleme [4].

Acest lucru se poate realiza prin folosirea a două compensatoare unul în conexiune Y și celălalt în conexiune  $\Delta$ . Primul este obligatoriu atunci când se dorește filtrarea armonicilor de curent iar cel de-al doilea pentru simetrizare. Fiecare dintre ele poate îndeplini și funcția de compensare a puterii reactive pe fundamentală.

Se disting astfel două posibilități de dimensionare a celor două compensatoare și anume:

- Compensatorul Y îndeplinește atât funcția de filtrare cât și pe cea de compensare a puterii reactive pe fundamentală până la nivelul cerut, iar compensatorul  $\Delta$  îndeplinește numai funcția de echilibrare a sarcinii.

Compensarea puterii reactive pe fundamentală va fi realizată de către unitățile trifazate ale filtrului, dimensionarea capacităților din componența lor făcându-se astfel încât suma puterilor reactive debitate pe secvența directă a fundamentalei să fie chiar puterea reactivă necesară pentru compensare.

Această soluție de compensare este eficientă în cazul aplicării ei în secțiuni de rețea cu variații mici ale sarcinii.

- Compensatorul Y este constituit din unități de filtrare, dimensionate simetric, din condiția ca puterea reactivă capacitivă instalată să fie minimă, compensatorului  $\Delta$  revenindu-i funcția ca pe lângă echilibrare să realizeze și restul de compensare a puterii reactive pe secvența directă a fundamentalei până la nivelul dorit cu scopul îmbunătățirii factorului de putere sau de reglare a tensiunii. Datorită posibilităților realizării compensatorului  $\Delta$  cu susceptanțe variabile, această soluție de compensare prezintă o flexibilitate și o eficiență considerabil mai mare.

Din punct de vedere teoretic, cele două metode de dimensionare sunt absolut similare. Având în vedere faptul că instalația calculată face parte din prima categorie, analiza efectuată a fost realizată numai pentru primul caz.

Rezultatele obținute în cazul în care se acționează în toate cele trei direcții sunt prezentate în **tabelul 5.8**.

Atât din **tabelul 5.8** cât și din reprezentarea fazorilor curenților și tensiunilor din figura 5.14 se observă următoarele:

- s-a realizat o bună compensare a puterii reactive, fapt care rezultă din aceea că defazajul între fazorii de secvență directă a fundamentalei curentului și tensiunii este foarte mic, aceștia fiind practic în fază;

- valoarea mică a componentelor de secvență inversă a curenților și tensiunilor arată că s-a realizat și o bună echilibrare. Acest proces poate fi îmbunătățit în cazul în care elementele instalației de echilibrare sunt calculate ca în **paragraful 5.4.3**, însă ca mărimi de intrare se consideră valorile curenților și tensiunilor obținute în urma acțiunii de compensare a puterii reactive;



Tabelul 5.8.

Rezultatele simulării utilizând instalațiile de compensare, filtrare și echilibrare.

	Fundamentala	Armonica 5	Armonica 7	Armonica 11	Armonica 13
$I_R$	476,56-j789,50	4,15+j6,64	6,94+j4,57	-3,25+j0,90	-1,70+j1,85
$I_r$	922,18	7,83	8,31	3,38	2,51
$I_S$	-922,28-j19,46	-4,70+j1,81	-3,42-j6,83	-0,35-j0,93	1,58-j1,43
$I_s$	922,49	5,04	7,64	0,99	2,13
$I_T$	445,72+j808,96	0,55-j8,45	-3,52+j2,26	3,61+j0,03	0,12-j0,42
$I_t$	923,62	8,46	4,18	3,61	0,43
$I^+$	477,69-j789,42	-0,91+j2,00	6,07+j2,32	-1,32-j0,74	-0,53+j1,31
$I^+$	922,70	2,20	6,50	1,51	1,41
$I^-$	-0,55-j0,09	4,70+j4,64	0,77+j2,36	-1,89+j1,57	-1,17+j0,54
$I^-$	0,55	6,60	2,48	2,45	1,29
$I^0$	-4e-013+j6,2e-013	-2,7e-013+j8e-014	1,4e-013+j3e-013	-2,9e-013+j3e-013	2,7e-013-j5,6-014
$I^0$	7,48873e-013	2,8905e-013	3,55604e-013	4,23877e-013	2,7628e-013
$k_m[\%]$	0,06	300,76	38,17	162,29	91,53
$k_{m0}[\%]$	0,00	296,36	37,83	159,13	90,89
$\gamma_{IR}$	0,99944	0,00848	0,00901	0,00366	0,00272
$\gamma_{IS}$	0,99977	0,00546	0,00828	0,00107	0,00231
$\gamma_{IT}$	1,00099	0,00917	0,00453	0,00391	0,00047
$\gamma_{UR}$	0,99999	0,00031	0,00042	0,00024	0,00020
$\gamma_{US}$	1,00001	0,00020	0,00039	0,00007	0,00017
$\gamma_{UT}$	1,00000	0,00034	0,00022	0,00026	0,00003

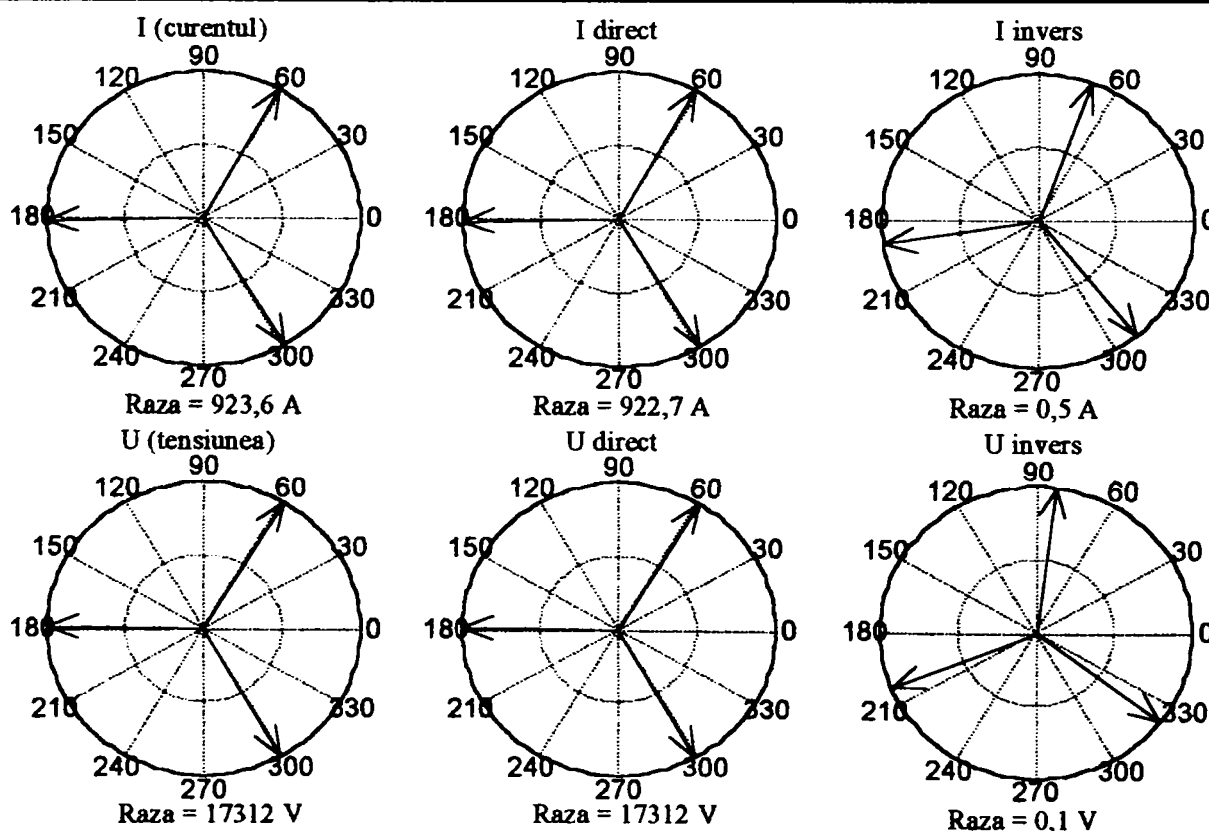


Fig. 5.14. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe fundamentală și a componentelor simetrice corespunzătoare cu instalația de compensare, echilibrare și filtrare.



- valorile mici a curenților armonici prezentate atât în *tabelul 5.8* cât și în *anexa V.5* arată că s-a realizat și o bună filtrare;
- în ansamblu calitatea energiei electrice în nodul în care s-a acționat este mult îmbunătățită.

#### 5.4.6. Prezentarea sintetică a rezultatelor obținute privitor la interdependența acțiunilor de îmbunătățire a calității energiei

În urma simulărilor efectuate pentru fiecare dintre cazurile prezentate anterior au rezultat o serie de mărimi care permit obținerea unor concluzii comparative referitoare la efectele obținute în ceea ce privește îmbunătățirea calității energiei electrice în nodul în care se acționează. Rezultatele obținute sunt prezentate în *tabelul 5.9*.

**Tabelul 5.9**

**Rezultatele simulării instalației electrice în funcție de acțiunea de optimizare .**

		<i>Fără compensare, filtrare și echilibrare</i>	<i>Cu compensare</i>	<i>Cu echilibrare</i>	<i>Cu filtrare</i>	<i>Cu compensare, filtrare și echilibrare</i>
Y	<i>C</i>	–	205,92 μF	–	–	162,72 μF
	<i>L</i>	–	–	–	–	–
Δ	<i>C<sub>RS</sub></i>	–	–	2,0675 μF	–	2,0675 μF
	<i>C<sub>ST</sub></i>	–	–	10,5931 μF	–	10,5931 μF
	<i>L<sub>TR</sub></i>	–	–	0,7824 H	–	0,7824 H
	<i>U [V]</i>	17219,4	17310,2	17219,2	17171,4	17312,2
	<i>U<sub>1</sub> [V]</i>	17219,4	17310,2	17219,2	17171,4	17312,1
	<i>U<sub>k</sub> [V]</i>	20,0996	22,1964	20,2206	25,4385	38,5512
	<i>I [A]</i>	1425,16	932,313	1422,1	1244,61	923,842
	<i>I<sub>1</sub> [A]</i>	1423,76	929,741	1420,67	1244,09	922,762
	<i>I<sub>k</sub> [A]</i>	63,17	69,199	63,7738	36,075	44,6559
	<i>I<sup>+</sup> [A]</i>	-567,17-j1300,31	427,36-j817,82	-568,51-j1301,39	-276,93-j1207,5	477,69-j789,42
	<i>I<sup>+</sup> [A]</i>	1418,62	922,75	1420,15	1238,86	922,70
	<i>I<sup>-</sup> [A]</i>	109,48-j23,63	109,57-j24,91	1,15+j1,43	109,48-j17,23	-0,55-j0,09
	<i>I<sup>-</sup> [A]</i>	112,00	112,37	1,83	110,83	0,55
	<i>k<sub>nd</sub> [%]</i>	7,90	12,18	0,13	8,95	0,06
	<i>k<sub>nd</sub> [%]</i>	0,05	0,05	0,00	0,11	0,00
	<i>k<sub>pn</sub></i>	0,645947	0,999684	0,645573	0,737698	0,99957
	<i>k<sub>pn</sub></i>	-7,236e-006	-9,967e-006	-1,784e-008	-1,317e-005	-1,127e-009
	<i>k<sub>pd</sub></i>	-9,481e-005	-0,000177896	-9,539e-005	-2,494e-005	-7,145e-005
	<i>k<sub>p</sub></i>	0,645845	0,999496	0,645478	0,73766	0,999499
	<i>S [MVA]</i>	73,621	48,416	73,462	64,115	47,981
	<i>S<sub>1</sub> [MVA]</i>	73,549	48,282	73,388	64,088	47,925
	<i>S<sub>d</sub> [MVA]</i>	3,264	3,594	3,296	1,861	2,322
	<i>P [MW]</i>	47,359	47,904	47,365	47,107	47,904
	<i>Q [MVAR]</i>	55,966	-1,185	56,052	43,068	-1,390
	<i>D [MVAD]</i>	6,708	6,919	3,379	6,072	2,342
	<i>σ</i>	1,25E-04	3,01e-009	6,27e-010	1,49e-009	1,02e-009
	<i>Th<sub>di</sub></i>	4,443	7,472	4,489	2,905	2,839
	<i>Th<sub>du</sub></i>	3,17	3,28	3,17	1,48	2,22
	<i>Th<sub>dpi</sub></i>	11,117	18,966	11,255	6,625	5,891
	<i>Th<sub>dpu</sub></i>	13,18	13,51	13,20	6,05	7,91

Pe baza rezultatelor prezentate se constată următoarele:

- în situația în care se acționează în sensul desfășurării unei singure acțiuni de îmbunătățire a calității energiei, acțiunea efectuată are efecte asupra circulației de putere reactivă, nesimetriei curenților și regimului nesinusoidal al curenților. Aceste efecte sunt sintetizate în *tabelul 5.10* [4].

*Tabelul 5.10.*

**Sinteza simplificată a interdependenței acțiunilor ce vizează compensarea puterii reactive, simetrizarea sarcinii și filtrarea armonicilor.**

<i>Efect asupra: → Acțiunea: ↓</i>	<i>Circulației de putere reactivă</i>	<i>Nesimetriei curenților</i>	<i>Regimului nesinusoidal în curenți</i>
<b>Compensarea puterii reactive</b>	se elimină	se accentuează	se accentuează
<b>Echilibrarea sarcinii</b>	nu se elimină	se elimină	se accentuează
<b>Filtrarea armonicilor de curent</b>	se reduce	se accentuează	se elimină

- în situația în care se desfășoară toate cele trei acțiuni se obține cea mai bună îmbunătățire a calității energiei în nodul în care s-a acționat.

**5.5. Sistem inteligent utilizat la acțiunea de compensare – echilibrare – filtrare**

În cele prezentate anterior a rezultat că elementele care contribuie la desfășurarea unei acțiuni în ceea ce privește îmbunătățirea calității energiei electrice se pot grupa în:

- bateria de condensatoare fixă în conexiune *Y* utilizată la compensarea puterii reactive constante;
- **14** baterii de condensatoare conectabile independent, în conexiune *Y*, utilizate la compensarea puterii reactive variabile;
- un *Compensator de Echilibrare Adaptabil (CEA)* realizat cu **3** susceptanțe controlate cu tiristoare în conexiune  $\Delta$  utilizat la echilibrarea sarcinii precum și la compensarea diferenței între puterea reactivă instalată în bateriile de condensatoare și filtrele de armonici și necesarul de putere reactivă până la obținerea unui factor de putere unitar;
- **4** blocuri de filtrare de tip filtru trece jos în conexiune *Y* utilizate la filtrarea armonicilor **5,7,11** și **13** ale curentului.

Utilizarea acestor instalații în vederea îndeplinirii funcțiilor pentru care au fost proiectate necesită utilizarea unui sistem inteligent de comandă a lor.

Acesta trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- să permită determinarea on–line a mărimilor electrice ale instalației cuptorului cu arc electric;
- să calculeze treapta necesară pentru compensarea puterii reactive precum și valoarea susceptanțelor necesare echilibrării sarcinii. Pe baza acestor valori, având în vedere soluția constructivă aleasă de susceptanță reglabilă cu tiristoare, calculează unghiul de comandă al fiecărui tiristor;
- să permită comanda conectării – deconectării de la linia de medie tensiune a bateriilor de condensatoare, filtrelor pe armonici și a instalației de echilibrare;
- să permită comanda intrării în conducție a fiecărui tiristor independent;
- să afișeze on–line valorile mărimilor electrice.

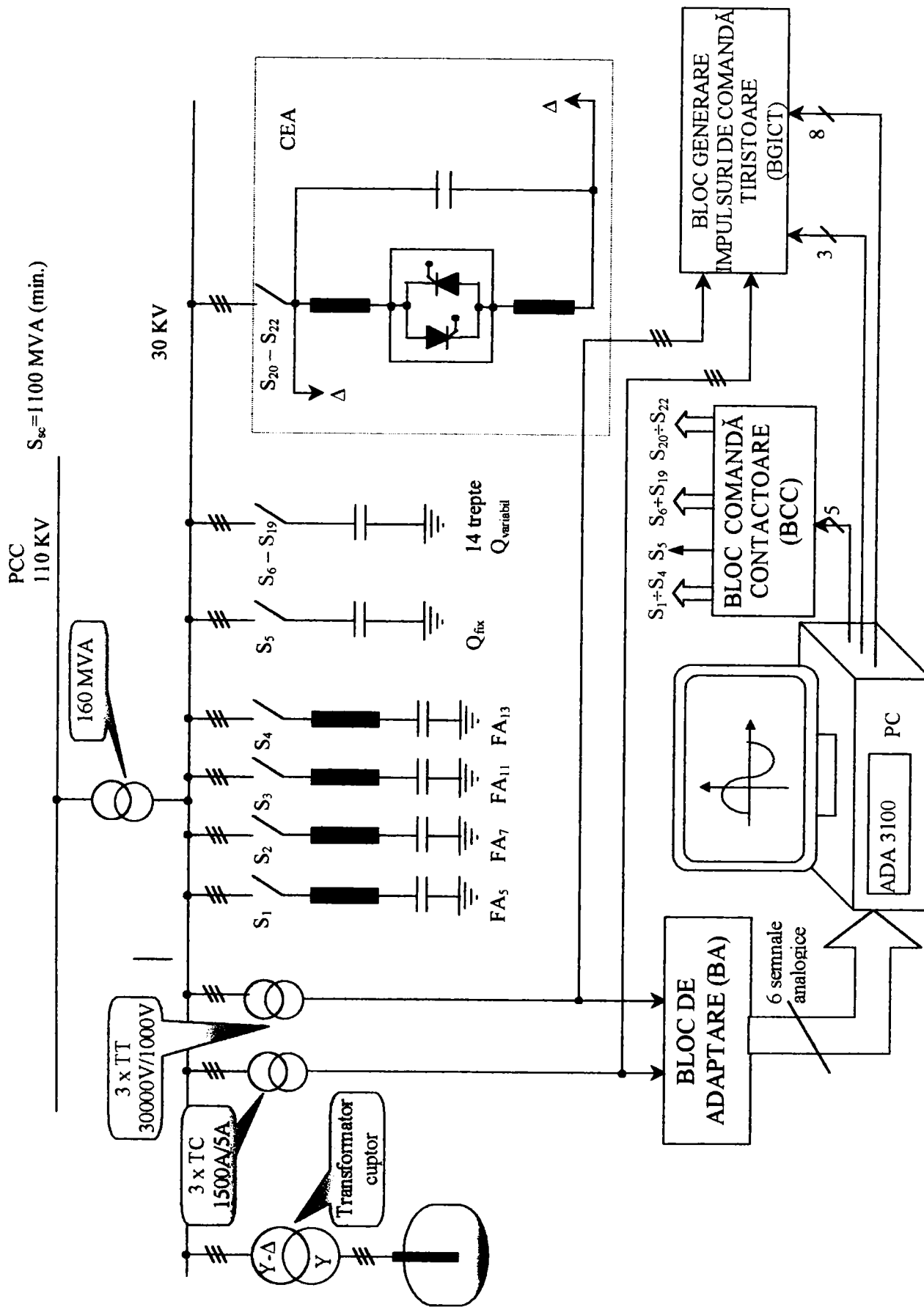


Fig. 5.15. Structura unui sistem inteligent pentru compensare – echilibrare – filtrare.

### 5.5.1. Schema sistemului inteligent de compensare – echilibrare - filtrare

Schema sistemului inteligent propus de autor a fi utilizat la compensarea – echilibrarea – filtrarea sarcinii este prezentată în figura 5.15.

Sistemul conține ca element principal un calculator dotat cu placă de achiziție de date (de exemplu *ADA 3100*).

Sistemul permite măsurarea prin intermediul unui bloc de adaptare al curenților și tensiunilor mari la nivelele acceptabile de placa de achiziție de date a curenților și tensiunilor de pe linia de alimentare de medie tensiune prin intermediul a câte trei transformatoare de măsură a curenților și a tensiunilor. Caracteristicile transformatoarelor în ceea ce privește banda de frecvență și erorile de măsură în această bandă sunt cunoscute.

Pe baza valorilor curenților și tensiunilor achiziționate se pot determina valorile puterilor în regim deformant pe fiecare fază urmând ca în funcție de valorile obținute să se acționeze asupra instalațiilor de compensare – echilibrare – filtrare.

Având în vedere că placa de achiziție de date are și 16 ieșiri numerice (2 porturi a câte 8 biți) apare posibilitatea comandării prin intermediul plăcii de achiziție de date a contactoarelor care permit conectarea – deconectarea instalațiilor la linia de medie tensiune. De asemenea există posibilitatea comandării blocului de generare a impulsurilor de comandă a tiristoarelor (*BGICT*). Acesta are ca intrări tensiunile și curenții din secundarele transformatoarelor de măsură, necesare sincronizării impulsurilor, trei intrări numerice pentru selecția susceptanței ce urmează să fie controlată, precum și 8 intrări numerice necesare reglării unghiului de comandă al tiristoarelor.

Funcționarea acestui sistem inteligent de compensare – echilibrare – filtrare se face potrivit algoritmului descris în ordinograma din figura 5.16.

Pentru a demonstra modul de funcționare al sistemului propus, autorul a simulat funcționarea instalației electrice a cuptorului astfel:

- s-a simulat funcționarea instalației electrice a cuptorului cu arc electric, fără a se acționa în vederea ameliorării regimului de funcționare, pe parcursul unui interval de timp mare, interval în care s-a presupus că poziția electrozilor se modifică de la regimul de scurtcircuit la lungimea maximă a arcului electric pentru care se mai produce amorsarea arcului. Pe acest interval de timp s-a determinat modul de variație a puterii active și reactive;
- s-a simulat funcționarea instalației electrice a cuptorului cu arc electric utilizând instalația de filtrare și compensare a puterii reactive în care treapta de compensare este reglată automat;
- s-a studiat posibilitatea reglării puterii active utilizând un algoritm de reglare a poziției electrozilor.

### 5.5.2. Simularea funcționării cuptorului cu arc electric la modificarea poziției electrozilor

Analiza variației mărimilor electrice în diferite regimuri de funcționare se poate face numai dacă se consideră o variație a lungimii arcului electric de la valoarea zero, corespunzătoare regimului de scurtcircuit al electrozilor la o valoare maximă pentru care arcul electric se mai amorsează. Pentru a se putea observa domeniul de variație al puterilor în regim deformant pe linia de medie tensiune măsurarea puterilor activă și reactivă s-a efectuat ca în figura 5.17, la ieșire fiind furnizate valorile efective ale acestora.

Reglarea poziției electrozilor s-a realizat ținând seama de condițiile concrete existente la *Oțelăria OE2 a Combinatului Siderurgic Hunedoara*.

- Viteza de deplasare maximă a electrozilor este de 3 *m/min* și se atinge în regim de avarie [110], modificarea acesteia fiind realizată ca în figura 5.18.a);

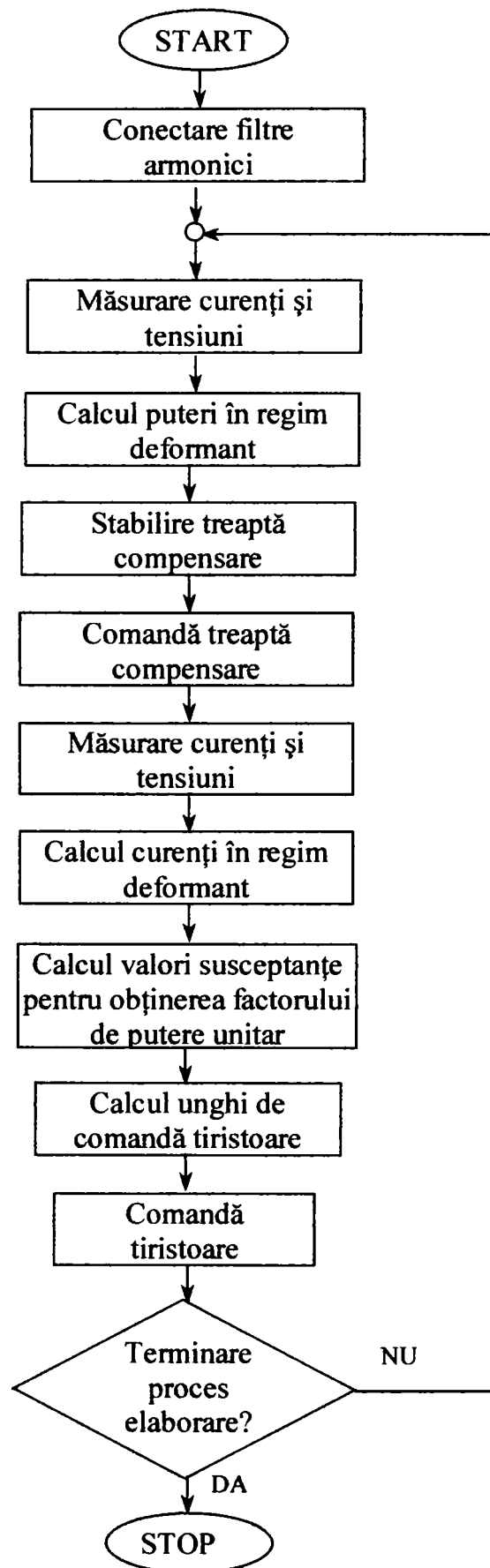


Fig. 5.16. Ordinograma de funcționare a sistemului inteligent de compensare – echilibrare – filtrare.

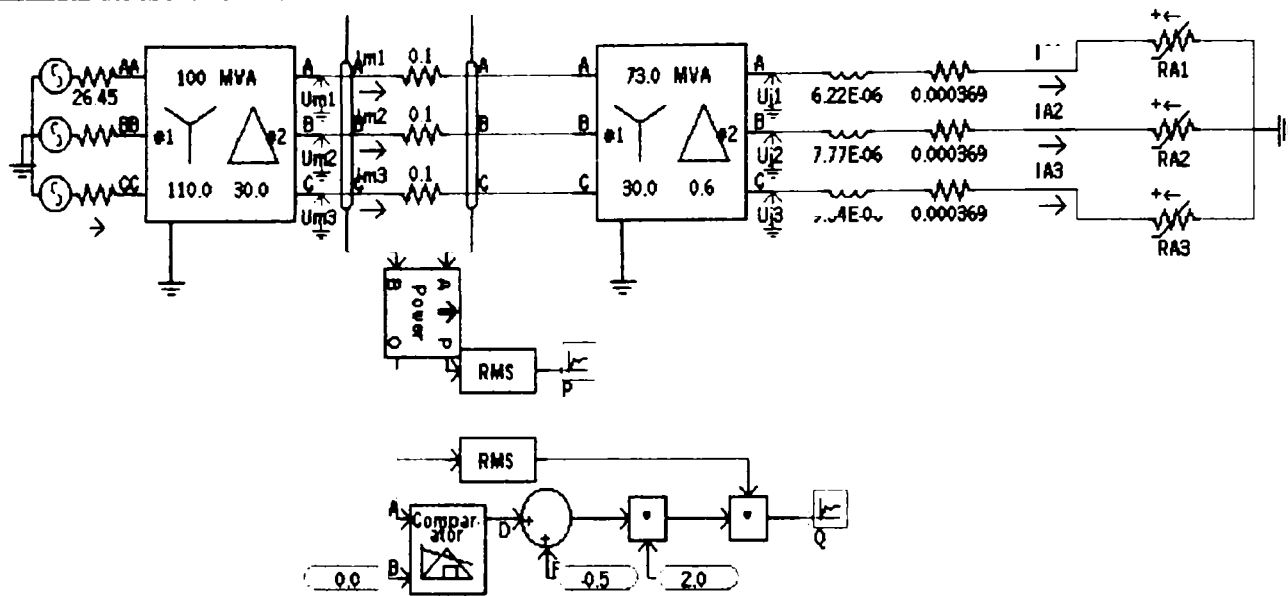


Fig. 5.17. Schema instalației electrice a cuptorului cu arc electric și a sistemului de măsură a mărimilor electrice.

- Lungimea arcului electric poate fi modificată de la zero la o valoare maximă determinată prin limitarea ieșirii integratorului, figura 5.18.b);
- Calculul tensiunii de stingere se face pe baza relației (2.83), schema de implementare fiind cea din figura 5.18.c);
- Reglarea poziției electrozilor se face independent pe fiecare fază, schema de simulare rezultată fiind prezentată în anexa II.11.

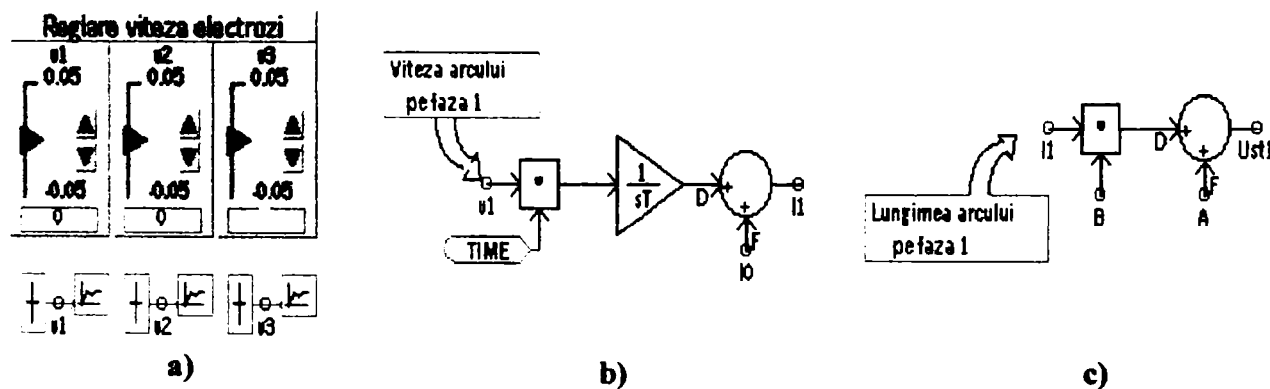


Fig. 5.18. a) Alegerea vitezei de deplasare a electrozilor; b) Calculul lungimii arcului electric; c) Calculul tensiunii de stingere.

Simularea funcționării instalației electrice modificând lungimea arcului electric s-a făcut astfel:

- S-a ales valoarea inițială a lungimii arcului electric  $l_0 = 16 \text{ cm}$  precum și viteza inițială a electrozilor  $v_1 = v_2 = v_3 = 0 \text{ m/min}$ ;
- După aproximativ 2-3 secunde s-a comandat, independent pe fiecare fază, ridicarea electrozilor cu viteze diferite până la lungimea maximă considerată a arcului electric  $l_{\text{max}} = 26 \text{ cm}$ ;
- După aproximativ 8-9 secunde s-a comandat coborârea electrozilor până la îndeplinirea condiției de scurtcircuit;
- După aproximativ 12-13 secunde, s-a comandat ridicarea din nou a electrozilor până la lungimea maximă considerată a arcului electric;



- După aproximativ **16-17 secunde** s-a încercat compensarea dezechilibrului datorat inegalității impedanțelor rețelei de joasă tensiune prin stabilirea pozițiilor finale ale electrozilor.

În acest fel s-a acoperit, practic întregul domeniu de funcționare, de la regimul de scurtcircuit până la îndeplinirea condițiilor în care arcul electric nu se mai amorsează.

Rezultatele simulării sunt prezentate în figurile 5.19 și 5.20. Se observă că:

- Valoarea cea mai mare a puterii active se obține în momentul în care valoarea tensiunii de stingere este de **200 V**, vezi figura 2.34;

- Puterea reactivă este pozitivă indiferent de regimul de lucru, având valori cuprinse în domeniul **15-100 MVAR**, fiind deci necesară utilizarea instalației de compensare a puterii reactive. Se observă că domeniul în care trebuie compensată puterea reactivă este mai mare decât cel ales în cazul proiectării instalației de compensare a puterii reactive din **capitolul 4**, dat de relația (4.21). Aceasta se datorează faptului că simularea a inclus și regimul de scurtcircuit în care puterea reactivă considerând rețeaua scurtă simetrică are potrivit diagramei cercului din figura 4.3 valoarea

$$Q_{sc} = \sqrt{2} \cdot S_{cm} = 103,23 \text{ MVAR} \quad (5.25)$$

- Valorile efective ale curenților și tensiunilor pe liniile de alimentare de joasă și de medie tensiune sunt diferite pe cele trei faze datorită atât valorilor diferite ale impedanțelor totale pe fiecare fază, date de relațiile (3.53) și (3.54), pentru rețeaua scurtă dar și a lungimilor diferite a arcului electric pe cele trei faze;

- În regimul de scurtcircuit al electrozilor se obțin valori maxime ale curenților pe cele trei faze, pe ambele linii de alimentare și valori minime ale tensiunilor, fapt datorat încărcării mari a transformatoarelor trifazate;

### 5.5.3. Simularea funcționării sistemului de reglare a puterii active în urma compensării puterii reactive și filtrării curenților armonici

Pentru a simula funcționarea sistemului de reglare a puterii în diferite regimuri utilizând instalația de filtrare și de compensare a puterii reactive s-a utilizat schema prezentată în figura 5.21. Aceasta conține cele **4** filtre pe armonicile **5,7,11 și 13** și instalația de compensare a puterii reactive compusă din partea constantă ( în conexiune *Y* ) și partea reglabilă în trepte. Valorile elementelor sunt cele proiectate în **capitolul 4**.

Pentru a asigura compensarea puterii reactive pe întreaga durată a procesului de reglare a puterii active este necesar ca în funcție de valoarea momentană a puterii reactive să se conecteze sau să se deconecteze câte o treaptă de compensare.

Alegerea treptei de compensare se face potrivit următorului algoritm:

- Dacă puterea reactivă se situează în domeniul **-4,00 ÷ 4,00 MVAR** nu se modifică treapta de compensare;

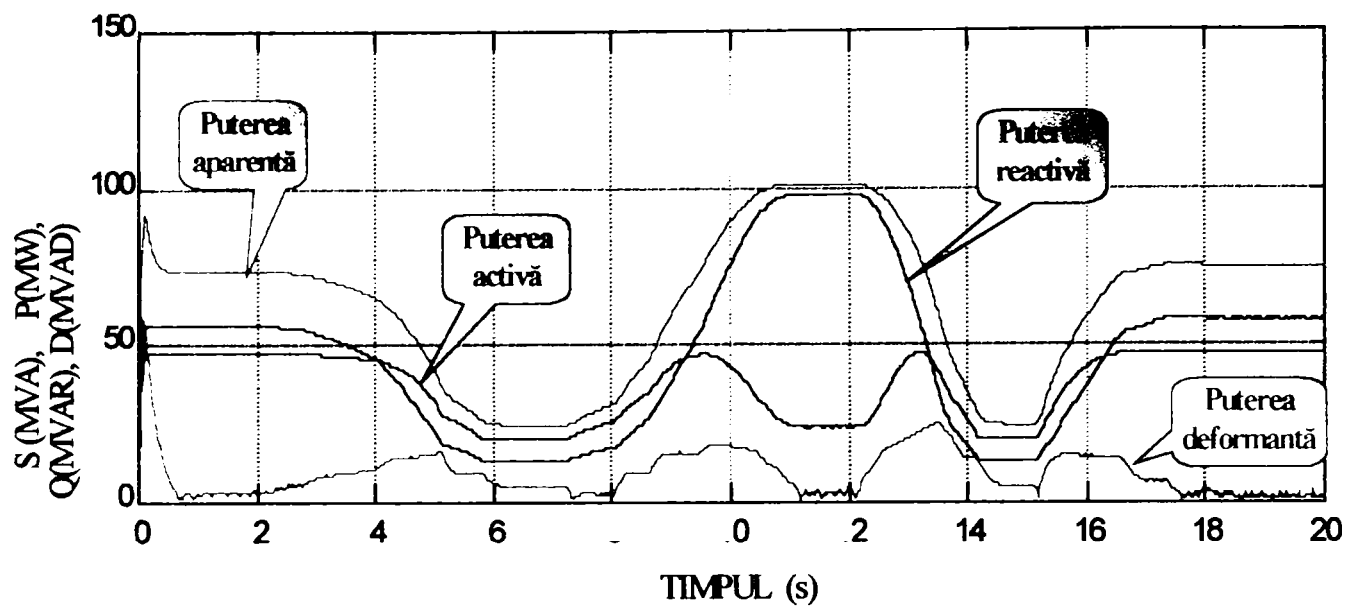
- Dacă puterea reactivă este mai mare decât **4,00 MVAR** se introduce o nouă treaptă de compensare;

- Dacă puterea reactivă este mai mică decât **-4,00 MVAR** se deconectează o treaptă de compensare.

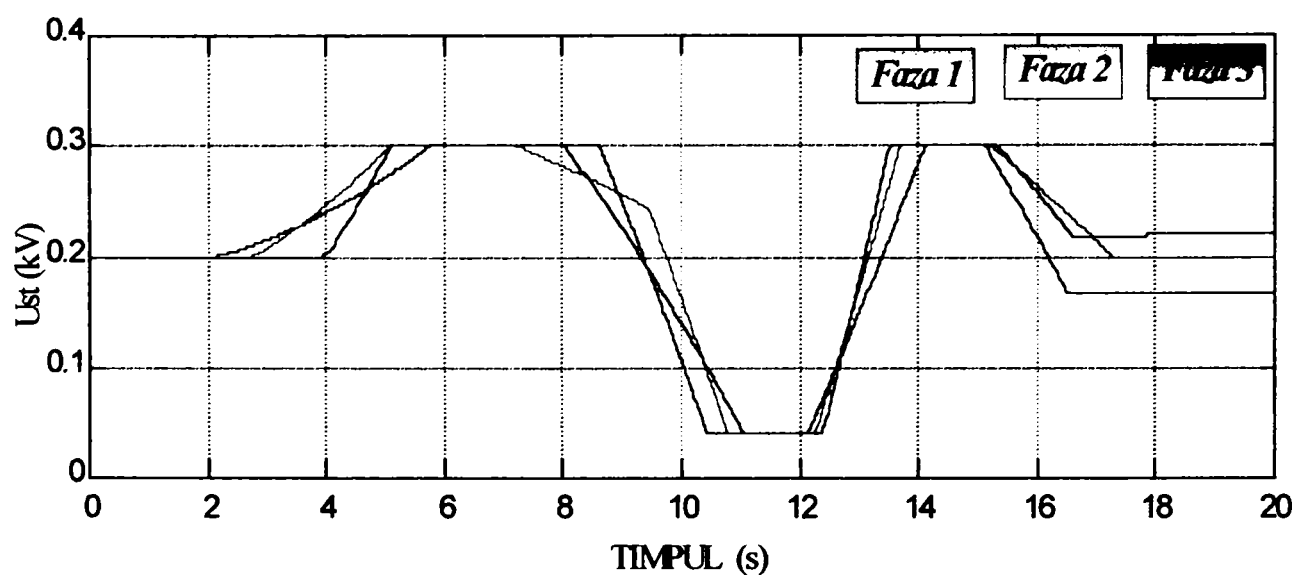
Schema de implementare a reglării treptei de compensare a puterii reactive este prezentată în figura 5.22.

În figura 2.35 a fost prezentată dependența puterilor în regim deformant de tensiunea de stingere. Se observă că puterea activă atinge valoarea maximă pentru o anumită valoare a tensiunii de stingere. Rezultă că puterea activă ca funcție de tensiunea de stingere este o funcție monoton crescătoare pentru valori ale tensiunii de stingere cuprinse între zero și cea corespunzătoare puterii active maxime. De asemenea, pe acest domeniu de variație a tensiunii de stingere puterea activă este o funcție bijectivă.

## Forma de variație a puterilor



## Variația tensiunii de stingere



## Variația lungimii arcului

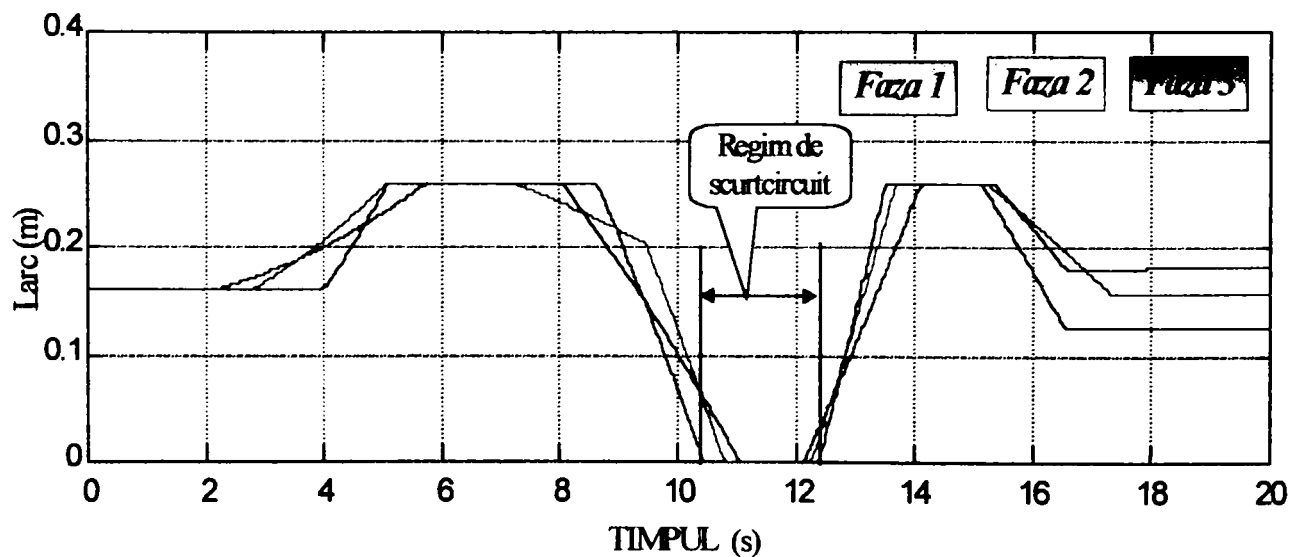


Fig. 5.19. Variația puterilor, a tensiunii de stingere și a lungimii arcului electric în timpul funcționării instalației cuptorului cu arc electric în diferite regimuri de funcționare.

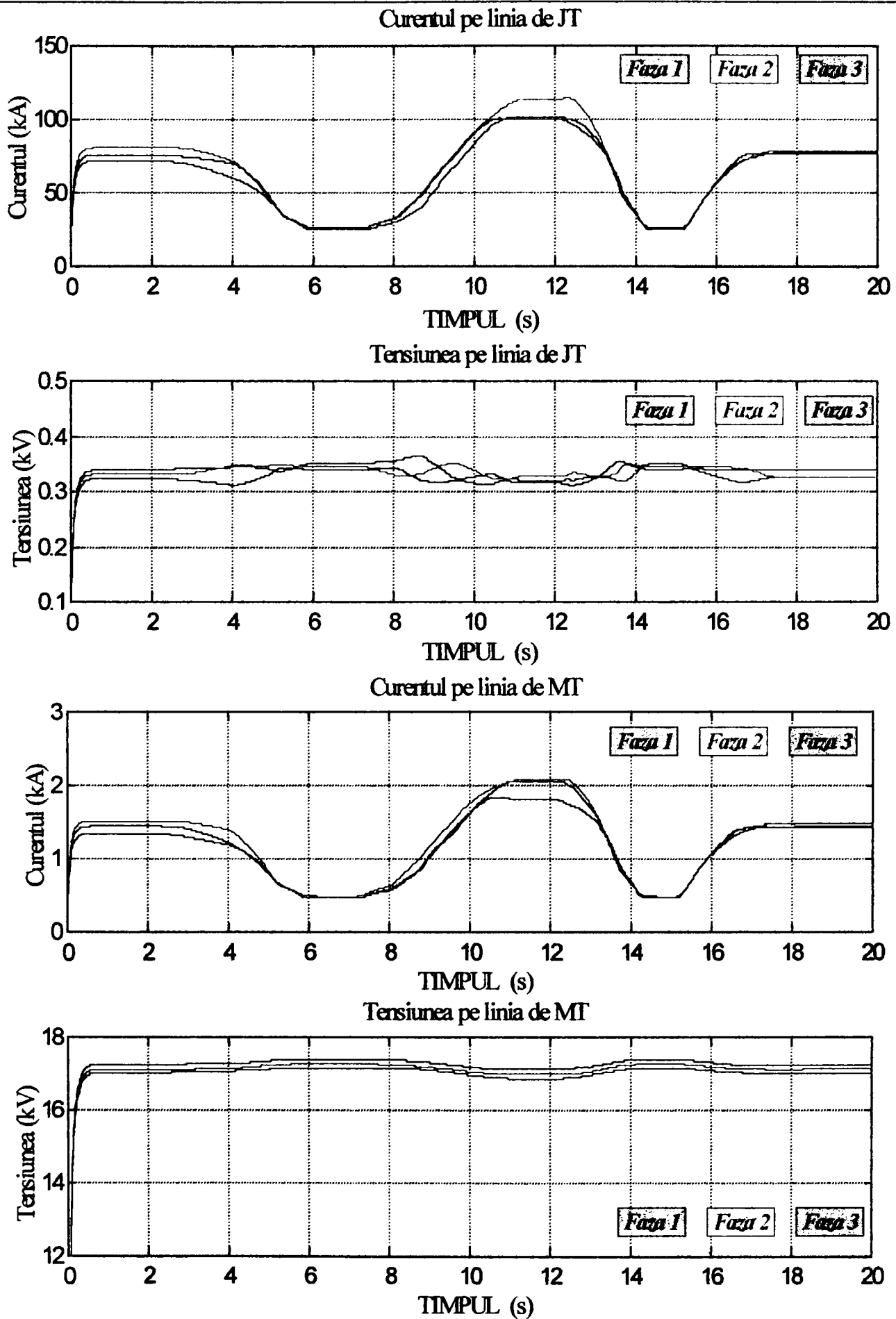


Fig. 5.20. Variația valorilor efective ale tensiunilor și curenților pe liniile de alimentare de joasă tensiune JT și de medie tensiune MT.

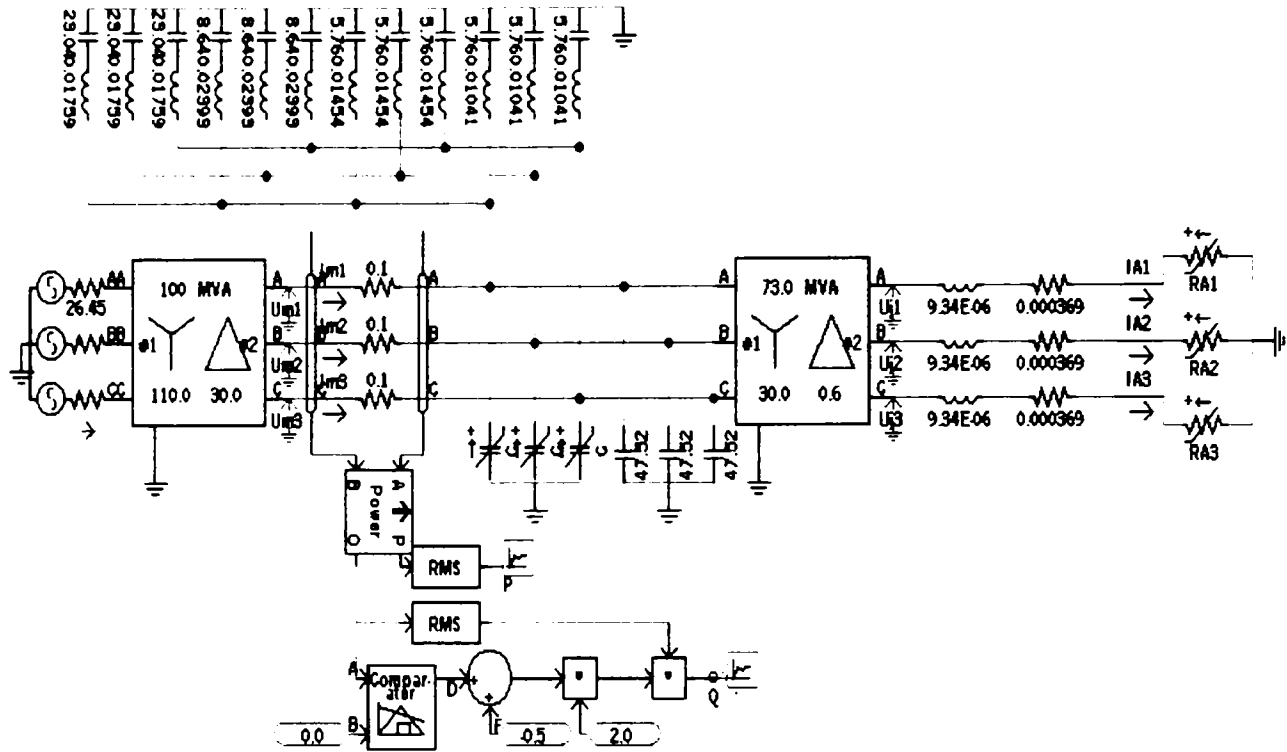


Fig. 5.21. Schema instalației electrice a cuptorului cu arc electric utilizând instalația de filtrare și compensare a puterii reactive.

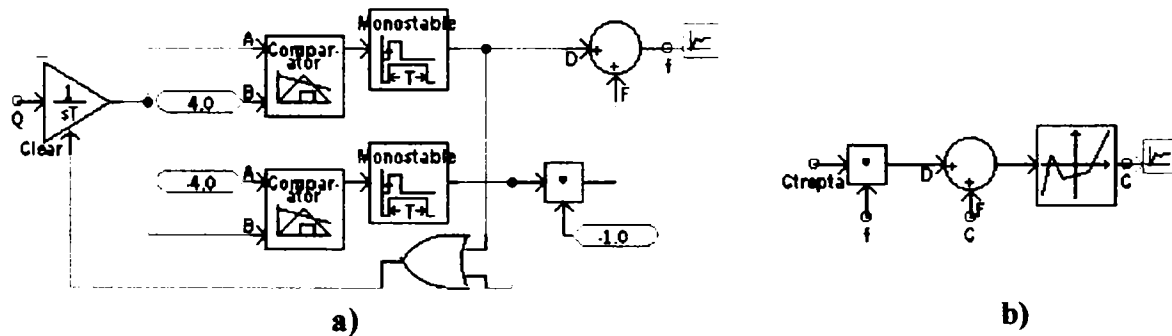


Fig. 5.22. a) Determinarea sensului de modificare a treptei de compensare; b) Calculul capacității instalației de compensare a puterii reactive.

Deoarece tensiunea de stingere depinde liniar de lungimea arcului electric rezultă că și puterea activă depinde de lungimea arcului electric.

Pe baza acestor observații **algoritmul iterativ de reglare a puterii active propus de autor se bazează pe modificarea lungimii arcului electric în funcție de puterea activă dorită a se obține.**

Presupunând că la iterația  $n$  lungimea arcului este  $l(n)$ , iar puterea activă este  $P(n)$ , lungimea arcului la iterația  $n + 1$  va fi dată de relația

$$l(n + 1) = l(n) + \alpha \cdot e(n), \tag{5.26}$$

unde

$$e(n) = P_0 - P(n) \tag{5.27}$$

reprezintă eroarea cu care se obține puterea activă impusă  $P_0$  la iterația  $n$ , iar  $\alpha$  reprezintă un factor de adaptare. Este evident că dacă valoarea puterii active obținută la iterația  $n$  este mai mare decât valoarea puterii active impuse  $P_0$  este necesară reducerea lungimii arcului electric și invers, fapt asigurat de algoritmul prezentat. [43].

Acest algoritm este cunoscut sub denumirea de algoritmul *LMS* ( Least Mean Square ) sau algoritmul gradientului stocastic, fiind datorită simplității sale cel mai utilizat algoritm implementat în sistemele actuale [12],[13],[39],[43].

Alegerea valorilor factorului de adaptare se face ținând seama de influența acestuia asupra principalelor caracteristici ale algoritmului:

- Viteza de convergență a algoritmului;
- Eroarea de ajustare.

Astfel, valori mari ale factorului de adaptare permit obținerea unei viteze de convergență mai mare a algoritmului însă dispersia obținută în jurul valorii dorite este mai mare, algoritmul putându-și pierde convergența.

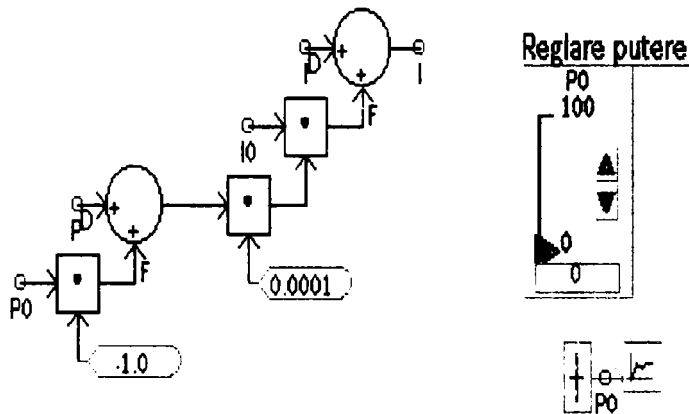


Fig. 5.23. Schema de reglare a puterii active prin modificarea lungimii arcului electric.

Valori mici ale factorului de adaptare permit obținerea unei dispersii mai mici a valorilor de la ieșirea sistemului dar viteza de convergență este mai mică [12],[13],[39].

Pe baza acestui algoritm a rezultat schema de reglare a puterii active prezentată în figura 5.23.

Pe baza schemei prezentate în anexa II.12 s-au obținut rezultatele prezentate în figura 5.24 pentru o valoare a factorului de adaptare  $\alpha = 0,000001$ , respectiv figura 5.25 pentru o valoare a factorului de adaptare  $\alpha = 0,00001$ . Aceste valori au rezultat

în urma simulărilor repetate și s-au obținut din condiția ca algoritmul de reglare să fie convergent.

Se observă că pentru o valoare mai mică a factorului de adaptare,  $\alpha = 0,000001$  viteza de convergență a valorii momentane a puterii active la valoarea prescrisă este mai mică, însă odată atinsă această valoare variațiile de putere activă sunt mici ( figura 5.24 ).

În schimb, valori mai mari ale a factorului de adaptare,  $\alpha = 0,00001$  permit o mai bună urmărire a valorii puterii active prescrise, însă după atingerea acesteia prezintă oscilații mai mari decât în varianta precedentă.

## 5.6. Concluzii

În acest capitol autorul a demonstrat prin simulare eficiența instalației de compensare a puterii reactive, de echilibrare a sarcinii și a instalației de filtrare a armonicilor de ordin 5, 7, 11 și 13. În acest scop a utilizat modelul bazat pe relații empirice între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc.

Principalele contribuții ale autorului în acest capitol sunt:

- demonstrarea faptului că există valori ale parametrilor modelului care să conducă în urma simulărilor la obținerea unor rezultate identice celor obținute în urma măsurărilor în faza de reducere, atât pe linia de alimentare de joasă tensiune cât și pe cea de medie tensiune, în ipoteza în care nu se utilizează instalația de compensare a puterii reactive și filtrele pe armonici. În această etapă s-a presupus consumatorul ca fiind simetric;
- determinarea valorilor indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice în absența instalației de compensare a puterii reactive și a filtrelor pe armonici utilizând datele obținute în urma simulărilor;

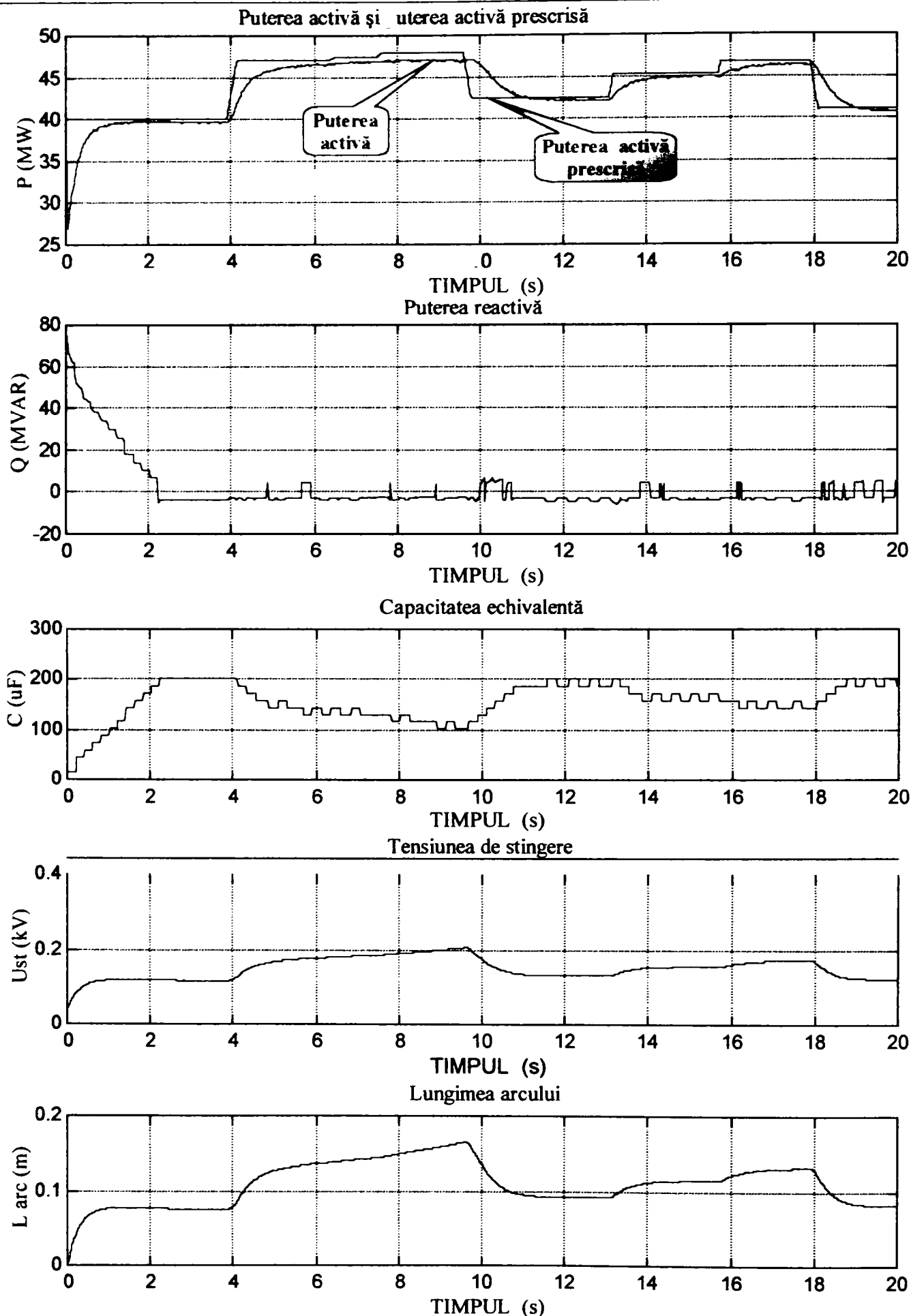


Fig. 5.24. Variația puterii active și reactive, a capacității instalației de compensare a puterii reactive, a tensiunii de stingere și a lungimii arcului electric pentru factorul de adaptare  $\alpha = 10^{-6}$ .



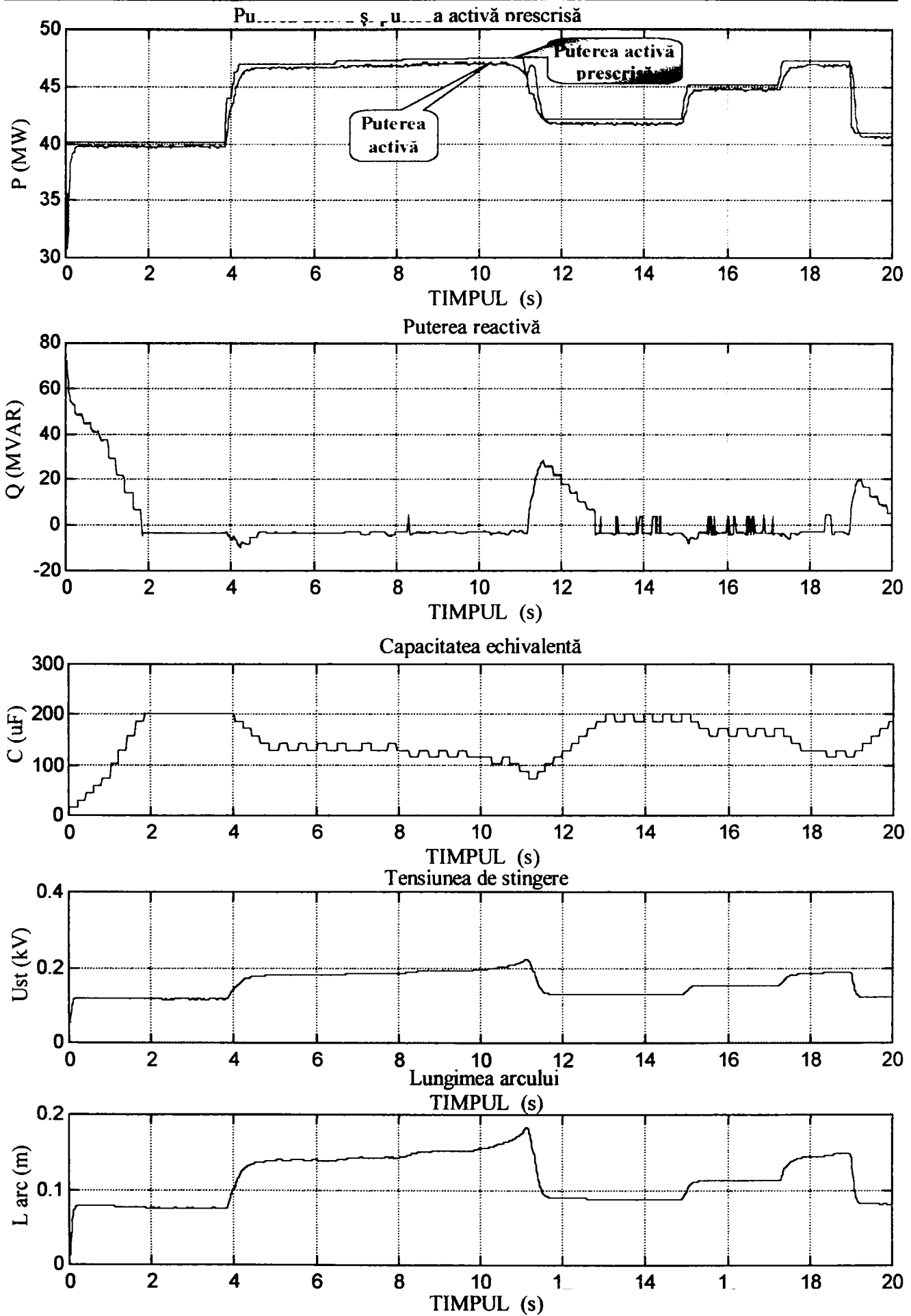


Fig. 5.25. Variația puterii active și reactive, a capacității instalației de compensare a puterii reactive, a tensiunii de stingere și a lungimii arcului electric pentru factorul de adaptare  $\alpha = 10^{-5}$ .

- determinarea valorilor indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice pentru fiecare treaptă de compensare. În acest fel s-a demonstrat că există o treaptă pentru care factorul de putere activă este cel mai aproape de unitate;
- calculul valorilor elementelor instalației de echilibrare a sarcinii în situațiile în care se acționează numai în vederea echilibrării sarcinii, compensării puterii reactive și echilibrării sarcinii sau tuturor acțiunilor
- proiectarea unui sistem de comandă și control al instalațiilor de compensare a puterii reactive, echilibrare a sarcinii și filtrare a curenților armonici utilizând valorile curenților și tensiunilor de pe linia de medie tensiune. Măsurarea curenților și tensiunilor se face prin intermediul unui sistem de achiziție de date conectat la un calculator **IBM-PC**;
- conceperea și verificarea prin simulare a funcționării unui sistem de reglare a valorii puterii active precum și determinarea influenței factorului de adaptare asupra vitezei de convergență a algoritmului și a erorii de ajustare.

## 6. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ALE AUTORULUI

Teza abordează problematica îmbunătățirii indicatorilor calitativi de utilizarea energiei electrice la cuptoarele cu arc electric. În prima parte a lucrării autorul a realizat o prezentare a regimului electric nesinusoidal, a expresiilor puterilor în regim nesimetric și nesinusoidal. A fost realizat un studiu privitor la posibilitatea simulării funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc electric utilizând patru modele ale arcului electric, obținând concluzii importante. În continuare sunt prezentate rezultatele măsurărilor realizate de autor și modul de determinare a indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice pe liniile de alimentare de joasă și de medie tensiune. Pe baza rezultatelor obținute autorul a calculat elementele instalației de compensare a puterii reactive, de echilibrare a sarcinii și de filtrare a armonicilor. În finalul lucrării a fost demonstrată prin simulare posibilitatea îmbunătățirii calității energiei electrice utilizând instalația de compensarea puterii reactive calculată, echilibrare a sarcinii și filtrele pe armonici, fiind propus un sistem de comandă și control al acestora.

*În primul capitol* sunt prezentate noțiuni generale privitoare la construcția și funcționarea cuptoarelor cu arc electric.

*În capitolul 2* sunt prezentate principalele caracteristici ale mărimilor nesinusoidale precum și modul de definire al puterilor și factorilor de putere în regim deformant. A fost studiată funcționarea instalației electrice de alimentare a cuptorului cu arc electric pe cele trei linii de alimentare, joasă, medie și înaltă tensiune, utilizând patru modele ale arcului electric. Obținerea concluziilor s-a făcut în urma simulărilor efectuate în aceleași condiții pentru fiecare model. Cele patru modele au fost analizate din punct de vedere al caracteristicilor spectrale, al amplitudinilor armonicilor precum și al puterilor și factorilor de putere în regim deformant. În urma acestui studiu autorul a determinat cel mai bun model al arcului electric, model care a stat la baza simulărilor din capitolele următoare.

*2.1. Modelul bazat pe variația rezistenței arcului electric prezintă avantajul unei implementări ușoare.* Utilizarea acestui model a demonstrat că acesta conferă arcului electric un caracter puternic *rezistiv*, asigurând *păstrarea constantă a puterii medii a arcului electric*. Principalele *dezavantaje* constau în *obținerea unei caracteristici curent tensiune care nu reproduce caracteristica reală* și faptul că *spectrul curentului și tensiunii nu conține decât armonica fundamentală*.

**2.2. Modelul bazat pe variația amplitudinii tensiunii arcului electric**, prezentând aceleași caracteristici ca și cel precedent, *permite modificarea puterii medii a arcului electric prin modificarea valorii medii a amplitudinii tensiunii arcului electric*. Față de modelul precedent prezintă *dezavantajul că arcul electric nu mai are caracter rezistiv*.

**2.3. Modelul bazat pe liniarizarea caracteristicii curent-tensiune a arcului electric** *permite o bună reproducere a caracteristicii reale curent-tensiune a arcului electric însă forma de variație a tensiunii arcului nu corespunde cu cea reală*. Un avantaj al acestui model constă în aceea că *parametrii caracteristicii curent-tensiune depind de puterea arcului electric*. Modelul se caracterizează prin faptul că *atât în spectrul curentului cât și al tensiunii de pe liniile de alimentare de medie și de înaltă tensiune lipsesc armonicile cu ordinul multiplu de 3*

**2.4. Modelul bazat pe relații între lungimea arcului electric, tensiunea și curentul prin arc** *permite o bună reproducere a caracteristicii curent-tensiune a arcului electric, prezentând și posibilitatea reproducerii caracterului redresant al arcului electric*. Un alt avantaj al acestui model constă în faptul că *permite reproducerea unor forme de undă și caracteristici spectrale ale curenților și tensiunilor de pe liniile de alimentare de joasă, medie și înaltă tensiune identice celor reale*. Caracteristica spectrală a curentului nu conține armonici a căror ordin este multiplu de 3. Caracteristicile spectrale ale tensiunii de pe linia de joasă și de medie tensiune prezintă aceste armonici în timp ce pe linia de înaltă tensiune acestea sunt reiectate.

Au fost analizate două posibilități de obținere a unei caracteristici dinamice, prima presupunând o variație sinusoidală a lungimii arcului electric, a doua presupunând că lungimea arcului electric variază aleator. În cazul modulării sinusoidale a lungimii arcului electric în spectrul undelor de curent și de tensiune de pe cele trei linii de alimentare apar componente a căror frecvență diferă de cea a armonicilor cu multiplii frecvenței modulatorie.

**2.5. Modelul bazat pe utilizarea unui generator de armonici pentru obținerea tensiunii arcului electric** este utilizabil dacă se cunosc amplitudinile și fazele fundamentalei și a armonicilor, fapt care presupune existența unor măsurători anterioare. Modelul prezintă *dezavantajul că este o reprezentare liniară a unui fenomen neliniar*.

În finalul capitolului, utilizând *modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc*, considerat de către autor ca fiind *cel mai performant model al arcului electric*, a fost determinat modul în care se poate simula caracterul neechilibrat al sarcinii reprezentată de cuptorul cu arc electric.

**În capitolul 3** autorul a prezentat sistemul de măsură utilizat la măsurarea curenților și tensiunilor de pe cele trei faze a liniilor de alimentare de joasă și de medie tensiune. Au fost prezentate rezultatele obținute în urma măsurărilor efectuate pe întreaga durată a unei șarje. A fost prezentat calculul parametrilor rețelei scurte precum și a parametrilor cuptorului. A fost efectuată o analiză a erorilor de măsurare introduse de transformatoarele de măsură de curent și de tensiune, precum și o corecție soft a acestor erori.

Analiza rezultatelor măsurărilor atât pe linia de alimentare de joasă tensiune cât și pentru cea de medie tensiune s-a făcut din punct de vedere al formei de variație în timp a curenților și tensiunilor, al caracteristicii spectrale a curenților și tensiunilor, al variației puterilor în regim deformant pe întreaga durată a unei șarje, a variației factorilor de putere în regim deformant precum și a variației distorsiunii armonice totale și parțial ponderate atât pentru unda de curent cât și pentru cea de tensiune. În plus, pentru linia de alimentare de medie tensiune, în vederea dimensionării instalației de compensare a puterii reactive și a filtrelor pe armonici s-au determinat suplimentar variația puterii active și reactive pentru fiecare armonică și variația valorilor efective ale armonicilor de curenți și tensiune pe durata șarjei.

**3.1.** În vederea utilizării unui sistem de achiziție de date performant *autorul a proiectat, realizat și testat un bloc de adaptare a tensiunilor și curenților de valori mari la domeniul de intrare acceptat de placa de achiziție de date*.

**3.2. Faza tehnologică a procesului de elaborare a șarjei are influență asupra mărimilor electrice.** În faza de topire undele de curent și de tensiune sunt mai deformate decât în celelalte faze.

**3.3. Pe linia de alimentare de joasă tensiune unda de tensiunea este mai distorsionată decât curentul iar pe linia de alimentare de medie tensiune curentul este mai deformat decât tensiunea.**

Utilizând rezultatele obținute în urma măsurătorilor de pe linia de alimentare de medie tensiune **în capitolul 4 autorul a calculat elementele instalației de compensare a puterii reactive, echilibrare a sarcinii precum și a filtrelor pe armonicile 5, 7, 11 și 13.**

**În capitolul 5 autorul a demonstrat prin simulare eficiența instalației de compensare a puterii reactive, de echilibrare a sarcinii și a instalației de filtrare a armonicilor de ordin 5, 7, 11 și 13.** În acest scop a utilizat cel mai performant model al arcului electric analizat în lucrare și anume **modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc.** Autorul a demonstrat că **există valori ale parametrilor modelului care să permită obținerea în urma simulărilor a unor rezultate similare celor obținute în urma măsurătorilor în faza de reducere,** atât pe linia de alimentare de joasă tensiune cât și pe cea de medie tensiune, în ipoteza în care nu se utilizează instalația de compensare a puterii reactive și filtrele pe armonici.

**5.1. Cu datele obținute în urma simulărilor autorul a determinat valorile indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice în absența instalației de compensare a puterii reactive, de echilibrare a sarcinii și a filtrelor pe armonici.**

**5.2. S-a demonstrat faptul că există valori ale parametrilor modelului care să conducă în urma simulărilor la obținerea unui grad de nesimetrie similar celui obținut în urma măsurătorilor,** pe ambele linii de alimentare și fără a se utiliza instalația de compensare a puterii reactive și filtrele pe armonici.

**5.3. S-au determinat valorile indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice pentru fiecare treaptă de compensare** în situația utilizării instalației de compensare a puterii reactive și filtrele pe armonici. În acest fel **s-a demonstrat că există o treaptă pentru care factorul de putere activă este cel mai aproape de unitate.**

**5.4. S-a efectuat un studiu privind interdependența acțiunilor de compensare a puterii reactive, echilibrare a sarcinii și filtrare a curenților armonici, luându-se în considerare următoarele cazuri:**

- Nu se intervine în nici un fel pentru ameliorarea regimului de funcționare;
- Se intervine pentru eliminarea doar a uneia dintre cele trei probleme;
- Se intervine pentru eliminarea simultană a celor trei probleme.

S-a constatat că **dacă se intervine pentru eliminarea doar a uneia dintre cele trei probleme se rezolvă problema în direcția căreia s-a acționat dar se obține o înrăutățire a indicatorilor în celelalte două direcții.**

În final s-a arătat că **în cazul în care se utilizează toate cele trei instalații de îmbunătățire a calității energiei se obțin cele mai bune rezultate,** fiind prezentate sintetic rezultatele obținute privitor la interdependența acțiunilor de îmbunătățire a calității energiei electrice.

Autorul **propune un sistem de comandă și control al instalațiilor de compensare a puterii reactive, echilibrare a sarcinii și filtrare a curenților armonici pe baza valorilor curenților și tensiunilor de pe linia de alimentare de medie tensiune.** În finalul capitolului este verificată prin simulare funcționarea instalației de compensare a puterii reactive și a filtrelor pe armonici, precum și posibilitatea reglării puterii active.

## CONTRIBUȚIILE AUTORULUI SUNT:

### a) În domeniul cercetării teoretice:

- Realizarea unui studiu privitor la performanțele a patru modele ale arcului electric în ceea ce privește formele de undă a curenților și tensiunilor, a caracteristicilor de frecvență ale acestora, precum și caracteristicilor curenț-tensiune obținute în urma simulărilor.

În acest sens autorul a conceput un număr de 9 scheme de simulare a funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc electric utilizând programul de simulare *PSCAD-EMTDC*.

Pe baza unui studiu comparativ al modelelor prezentate, utilizând criteriile de performanță alese și rezultatele simulărilor autorul a considerat că **modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc** este mai performant.

- Demonstrarea posibilității simulării caracterului neechilibrat în funcționarea cuptorului cu arc electric și calculul mărimilor care caracterizează această funcționare.

- Conceperea sistemului de măsurare a mărimilor electrice pe liniile de alimentare de joasă și de medie tensiune. În acest sens se disting mai multe etape:

- proiectarea schemelor de măsurare;
- conceperea și testarea programelor de achiziție a datelor;
- proiectarea schemei electronice a blocului de adaptare a tensiunilor și curenților de valori mari la domeniul de intrare acceptat de placa de achiziție de date.

- Conceperea programelor de prelucrare a datelor achiziționate, fapt care a permis determinarea valorilor indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice.

- Calculul erorilor care pot interveni în procesul de măsurare a puterilor în regim deformant pe linia de alimentare de medie tensiune utilizând caracteristicile transformatoarelor de măsură de curent și de tensiune.

- Calculul valorilor componentelor instalației de compensare a puterii reactive, de echilibrare a sarcinii și a filtrelor pe armonicile 5, 7, 11 și 13.

- Demonstrarea prin simulări a posibilității îmbunătățirii valorilor indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice în ipoteza utilizării instalației de compensare a puterii reactive, echilibrare a sarcinii și a filtrelor pe armonici. În cadrul acestei demonstrații autorul a conceput un număr de 3 scheme de simulare a funcționării instalației electrice a cuptorului cu arc electric.

- **Conceperea unui sistem de comandă și control al instalațiilor de compensare a puterii reactive, echilibrare a sarcinii și filtrare a curenților armonici.**

- Verificarea prin simulare a posibilității reglării puterii active și a funcționării instalației de compensare a puterii reactive și a filtrelor pe armonici.

### b) În domeniul cercetării experimentale:

- Realizarea și testarea blocului de adaptare a tensiunilor și curenților de valori mari la domeniul de intrare acceptat de placa de achiziție de date. Principalele caracteristici ale blocului de adaptare a curenților și tensiunilor constau în **realizarea unei izolații galvanice între circuitul de măsură și placa de achiziție de date** în condițiile în care **banda de frecvență asigurată de 100 kHz este superioară frecvenței de eșantionare de 5 kHz și erorile de neliniaritate introduse sunt de 0,2%.**

- Măsurarea curenților și tensiunilor pe liniile de alimentare de joasă și de medie tensiune la instalația electrică a cuptorului cu arc electric de la **Oțelăria OE2 de la Combinatul Siderurgic Hunedoara.**



## 7. BIBLIOGRAFIE

- [1] **Golovanov, N., Șora, I., și alții**, Electrotermie și electrotehnologii, vol I, *Editura Tehnică București, 1997.*
- [2] **Șora I., ș.a.**, Utilizări ale energiei electrice, *Editura Facla Timișoara 1984*
- [3] **Buta, A., Pană, A.**, Calitatea tensiunii – Criteriu principal de analiză a interdependenței dintre compensarea puterii reactive, echilibrarea sarcinii și filtrarea armonicilor în rețelele de distribuție performante, *Revista ENERGETICA, Februarie 1999.*
- [4] **Buta, A., Pană, A.**, Simetrizarea sarcinii rețelelor electrice de distribuție, *Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000.*
- [5] **Buta, A., Ivașcu, C., Tițihăzan, V., Pană, A.**, A new remarks regarding current transformers functioning in nonsinusoidal conditions. Part II: Measuring correction. Experimental determination, *Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 42(56), fascicula 2, 1997, pp.87-92.*
- [6] **Buta, A., Ivașcu, C., Pană, A.**, Observații asupra comportării transformatoarelor electrice care funcționează în regim nesinusoidal, *Conferința internațională de transformatoare electrice CITE '96 – secțiunea "Contribuții la teoria transformatoarelor (TT)", București 9-10 mai 1996, pp.34-37.*
- [7] **Buta, A., Pană, A., Ivașcu, C.**, Criterii pentru compensarea puterii reactive în rețele cu sarcini dezechilibrate, *Energetica, vol. 45, 1997, nr.5-6, pp. 289-294.*
- [8] **Buta, A., Pană, A.**, Îmbunătățirea factorului de putere și echilibrarea sarcinii, acțiuni independente în rețele de distribuție performante, *Buletinul Științific al Universității "Politehnica" Timișoara, Tom 42(56), fascicula 1, 1997, pp.148-153.*
- [9] **Buta, A., Ivașcu, C., Tițihăzan, V., Pană, A.**, A new remarks regarding current transformers functioning in nonsinusoidal conditions. Part I: Mathematical Model, *Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 42(56), fascicula 2, 1997, pp.82-86.*

- [10] **C.I. Budeanu**, Puissances reactives et fictives, *Instytut Romain de l'Energie, București, 1927.*
- [11] **Rusu N., Pănoiu M., Pănoiu C., Anghel S.**, The temperature adaptive control system of an furnace with electric resistance using an IBM-PC, *Buletinul Științific și Tehnic al U.T.T., seria Mec. Agr. Tom 40 (54), fasc. 1,2.*
- [12] **Pănoiu M., Deaconu S., Pănoiu C.**, Numerical System of electrical power controlling of the electric arc furnaces, *Automatic Control and Testing Conference A 96-Theta 10-Cluj, 1996.*
- [13] **Pănoiu C., Pănoiu M.**, The temperature adaptive control system of furnace, with electric resistance modeled by an IIR – OSLMS adaptive filter, *Conferința Internațională EMES 99 Oradea.*
- [14] **Pănoiu M., Tutelea L., Lako L.**, Bloc de adaptare pentru măsurarea tensiunilor și curenților mari, *Analele Facultății de Inginerie. Tom I.Fasc. 2. ISSN 1454-6531, Hunedoara.1999, pag. 207-210*
- [15] **Pănoiu M., Pănoiu C.**, Sistem de analiză a armonicilor provenite de la cuptorul cu arc electric *Analele Facultății de Inginerie, Tom I.Fasc. 2. ISSN 1454-6531. Hunedoara,1999, pag. 216-221*
- [16] **Pănoiu M., Pănoiu C.**, Metode de determinare a tensiunii de flicker utilizând un sistem de achiziție de date numeric, *Analele Facultății de Inginerie. Tom I.Fasc. 2. ISSN 1454-6531, Hunedoara,1999, pag. 222-225*
- [17] **Pănoiu M., Pănoiu C.**, Modelarea funcționării cuptorului cu arc electric de la oțelăria OE2 utilizând programul PSCAD/EMTDC, *Analele Facultății de Inginerie, Tom I,Fasc. 2, ISSN 1454-6531, Hunedoara.1999, pag. 226-231*
- [18] **Pănoiu M., Pănoiu C.**, Determinarea indicatorilor calitativi de utilizare a energiei electrice utilizând programul PSCAD-EMTDC, *Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, noiembrie 2000, Tom2, fascicola 2, ISSN 1454-6531, pag. 225-232*
- [19] **Pănoiu M., Pănoiu C.**, Modelarea rezistenței arcului electric utilizând programul PSCAD-EMTDC *Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, noiembrie 2000, Tom2, fascicola 2, ISSN 1454-6531, pag.233-238*
- [20] **Pănoiu M., Deaconu S., Pănoiu C., Anghel S.**, Studiu privind înlocuirea cuplajelor electromagnetice tip TOSHIBA cu convertizoare statice de frecvență HITACHI în circuitul de comandă alimentare a motoarelor de acționare a electrozilor, *Contract cercetare S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara 350000-52-1996.*
- [21] **Andrews, D., Bishop, T., Witte, J.F.**, Harmonic Measurements, Analysis and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility, *IEEE Transactions on Industry Applications. vol. 32, No. 3, pg. 617-624, May/June 1996.*
- [22] **Beare, R.D., Overgaard, J., Rasmussen, E.**, An excentric Botton Tapping system Month experience/*Iron and Steel Engineer, 1984, No. 7, pg. 27-32.*
- [23] **Bekker, J., Swart, P.H., Landy, C.F., Marshall, D.A.**, Modelling of a DC Arc Furnace for Optimal Integration with the Supply System, *IEEE Transactions on Industry Applications, pg. 1741-1748, 1995.*
- [24] **Bhargava, B.**, Arc Furnace Flicker Measurements and Control, *IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, No. 1, pg. 400-410, January 1993.*

- [25] **Ameling, D.**, Electric Arc furnace with eccentric bottom tap system (EDT) offers a new method for a free tapping/ "Metallurgical Plant and Technology", 1985, No. 5, pg. 36-49.
- [26] **Chiuță, I., Conecini, I.**, Compensarea regimului energetic deformant, Editura Tehnică, București, 1989.
- [27] **Chen, M.T.**, Using FFT in measurement of voltage flicker, *IEEE Proceedings General Transmission and Distribution*, vol. 144, No. 2, pg. 175-180, March 1997.
- [28] **Collantes-Bellido, R., Gomez, T.**, Identification and Modelling of a Three Phase Arc Furnace for Voltage Disturbance Simulation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, No. 4, pg. 1812-1817, October 1997.
- [29] **Comșa, D.**, Instalații electrotermice industriale, vol II, Editura Tehnică, București, 1986.
- [30] **Coorax, V.**, Calculating Lightning-Induced Overvoltages in Power Lines: A Comparison of Two Coupling Models, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, No. 3, pg. 179-182, August 1994.
- [31] **Cooray, V., Scuka, V.**, Lightning-Induced Overvoltages in Power Lines: Validity of Various Approximations Made in Overvoltage Calculations, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 40, No. 4, pg. 355-363, November 1998.
- [32] **Courtenay, J., Jaunich, H.**, Lower Electrode Consumption on through Reduced Sidewall Oxidation/F.N.M. 1985, Bd. 23, No. 10.
- [33] **Crawford, G.P.**, Iron and Steelmaking 1989, vol.16, No. 5, pg. 314-319.
- [34] **Czarnecki, L., S.**, Minimisation of unbalanced and reactive currents in three-phase asymmetrical circuits with nonsinusoidal voltage, *IEE Proceedings. Part B. Electric Power Applications*, vol.139, no.4, 1992, pp.347-354.
- [35] **Czarnecki, L., S.**, Power factor improvement of three-phase unbalanced loads with nonsinusoidal supply voltage, *European Transaction on Electrical Power Engineering (ETEP)*, vol.3, no.1, 1993, pp.67-72.
- [36] **Czarnecki, L., S.**, Power related phenomena in three-phase unbalanced systems, *IEE Transactions on Power Delivery*, vol.10, no.3, 1995, pp.1168-1176.
- [37] **Czarnecki, L., S., Hsu, S., M.**, Thyristor controlled susceptances for balancing compensators operated under nonsinusoidal conditions, *IEE Proceedings. Electric Power Applications*, vol. 141, no.4, 1994, pp.177-185.
- [38] **Czarnecki, L., S., Shin, M., H., Guangda, C.**, Adaptive balancing compensator, *IEE Transactions on Power Delivery*, vol.10, no.3, 1995, pp.1663-1669.
- [39] **Haykin, S.**, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [40] **Deckmann, S.M., Rabelo, G.F.**, A Quality Index Based on Voltage Flicker and Distortion Evaluations, *IEEE Proceedings General Transmission and Distribution*, vol. 2, pg. 235-241, February 1997.
- [41] **Dudley, R.F., Fellers, C., Bonner, J.A.**, Special Design Considerations for Filters Banks in Arc Furnace Installations, *IEEE Transactions on Power Delivery*, pg. 1109-1116, 1995.

- [42] **El-Sharkavvi, M.A., Szofran, A., Hurang, T., Andexler, G., Dong, M., Venkata, S.S., Rodriguez, A., Butler, N., Van Lenven, A., Smith, D.**, Development and Field Testing of an Adaptive Flicker Controller for 15-kV Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, No. 2, pg. 1025-1030, April 1995.
- [43] **Alexander, S. T.**, Adaptive Signal Processing, *Springer Verlag New York Inc.*, 1986.
- [44] **Gordin, P., Soide, C., Dez, A., Grullaume, I.**, Use of physical and numerical simulation methodes to caractrise gas flow in triectode electric arc furnaces/*Iron and Steel making*,1992, vol. 19, No. 4. Pg. 306-309.
- [45] **Grünberg, D., Reiche, W.**, Netzrückwirkungen von Lichtbogenöfen und ihre Kompensation, *Brown Boveri Technik* 8, 1986.
- [46] **Hanksdottir, A.S., Soderstran, T., Thorfinusson, Y.P., Getsson, A.**, System Identification of a Three-Phase Submerged – Arc Ferrosilicon Furnace, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 3, No. 4, pg. 377-387, December 1995.
- [47] **Hoidalén, H.K., Sletbak, J., Henricsen, T.**, Ground Effects on Induced Voltages from Nearby Lightning, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 39, No. 4, pg. 269-278, November 1997.
- [48] **Hortopan, Gh, Truşcă, V., Pavelescu, D., Şerbănescu, M., Niţu, S.**, Aparate electrice de comutaţie. Tehnica fenomenelor rapide, *Editura Tehnică, Bucureşti*, 1985.
- [49] **Hortopan, Gh., Vlase, I., Niţu, S.**, Ecranarea electromagnetica în tehnica curenţilor intensi, *Editura Tehnică, Bucureşti* 1990.
- [50] **Hu, W., Lavers, J.D.**, Coupled Electro-Thermal-Flow Model for Very Long Electric Arcs, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, No. 2, pg. 1726-1729, March 1997.
- [51] **Huang, S.J., Huang, C.L., Hshieh, C.T.**, A method of Supervising Power System Harmonic Trends, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pg. 685-688, 1996.
- [52] **Huang, S.J., Huang, C.L., Hsieh, C.T.**, Application of GABOR transform technique to supervise power system transient harmonics, *IEEE Proceedings General Transmission and Distribution*, vol. 143, No. 5 pg. 461-466, September 1996
- [53] **Huge, O.**, Steelmaking Machine/33 *Metal Producing* 1984, No. 7, pg. 43-45.
- [54] **Ignea A.**, Introducere în compatibilitatea electromagnetica, *Editura de Vest, Timişoara*, 1998.
- [55] **Ionescu T., Pop, O.**, Ingineria sistemelor de distribuţie a energiei electrice, *Editura Tehnică, Bucureşti* 1998.
- [56] **Ivaşcu, C., Buta, A., Pană, A.**, Implicaţii ale regimului nesimetric asupra funcţionării unei reţele electrice, *Simpozionul Naţional de Reţele Electrice, Cluj-Napoca 2 – 4 oct. 1996*, pp. 316-317.
- [57] **Ivaşcu, C., Buta, A., Titihăzan, V., Pană, A.**, Observaţii referitoare la funcţionarea transformatoarelor de tensiune în regim nesinusoidal, *Simpozionul Naţional de Reţele Electrice, 9-10 sept. 1998, vol.I*, pp. 645-652.

- [58] **Jeschar, R.**, Analytical solution for steady and nonsteady heat conduction with temperature dependent material values/*Steel Research 1990, No. 11, pg. 560-568.*
- [59] **Kelemen, A., Imecs, M.**, *Electronică de putere, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.*
- [60] **Köhle, S.**, Ersatzschaltbilder und Modelle des Hochstromsystems von Drehstrom-Lichtbogenöfen, *Metallurgie, Stahl und Eisen 110, Nr. 11, pg. 51-59, November 1990.*
- [61] **King, B., Olejniczak, K. J.**, An evaluation of static Var compensation strategies for voltage flicker mitigation in electric distribution systems, *Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power, oct. 16-18, Las Vegas, 1996, pp.6-11.*
- [62] **Maltavelli, P., Tenti, P.**, An Integrated Design Approach of Hybrid Compensation Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications, pg. 2348-2355, 1996.*
- [63] **Manchur, G., Erven, C.C.**, Development of a Model for Predicting Flicker from Electric Arc Furnaces, *IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, No. 1, pg. 416-426, January 1992.*
- [64] **Mayordomo, J.G., Beites, L.F., Asenzi, R., Izzedinne, M., Zabala, L., Amantegni, J.**, A New Frequency Domain Arc Furnace Model for Iterative Harmonic Analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, No. 4, pg. 1771-1778, October 1997.*
- [65] **Mendis, S.R., Bishop, M.T., Do, A.V., Boyd, D.M.**, Investigation of Transmission System Voltage Flicker due to Multiple AC and DC Furnace Operations, *IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, No. 1, pg. 483-496, January 1995.*
- [66] **Mendis, S.R., Bishop M.T., Witte J. F.**, Investigations of Voltage Flicker in Electric Arc Furnace Power Systems, *IEEE Industry Applications Magazine, January/February 1996, pg. 28-34.*
- [67] **Mendis, S.R., Gonzales, D.A.**, Harmonic and Transient Overvoltage Analyses in Arc Furnace Power Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, No. 2, pg. 336-342, March/April 1992.*
- [68] **Milea, L.**, Analiza regimului deformant în sistemul Electroenergetic – Lucrare de doctorat, *Universitatea Politehnică Timișoara, Fac. De Electrotehnică, 1998.*
- [69] **Mohan, N., Kamath, G.R.**, A Novel, High-Frequency, Per-Phase Static VAR Compensator, *IEEE Transactions on Industry Applications, pg. 2581-2586, 1995.*
- [70] **Montanari, G.C., Loggini, M., Cavallini, A., Pitti, L., Zaminelli, D.**, Arc-Furnace model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks, *IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, No. 4, pg. 2026-2036, October 1994.*
- [71] **Möller, B., Schultz, P.**, Kontinuierliche Temperaturmessung von Flüssigstahl, *Metallurgie, Stahl und Eisen 110, Nr. 10, pg. 147-152, Oktober 1990.*
- [72] **Naylor, J.B., Griffiths, J., Naim, M.M.**, Estimation of Steel Plant Performance Using a Knowledge Based System, *5<sup>th</sup> Conference on FACTORY 2000, 3-4 April 1997, pg. 303-310.*



- [73] **Nicholson, H., Roebuck, R.**, Simulation and Control of Electrode Position Controllers for electric Arc Furnaces, *Automatica*, vol. 8, pg. 683-693, 1972.
- [74] **Nucci, C.A., Rachidi, F.**, On the Contribution of the Electromagnetic Field Components in Field-to-Transmission Line Interaction, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, No. 4, pg. 505-508, November 1995.
- [75] **Pană, A., Buta, A., Ivaşcu, C.**, Sistem de achiziții și prelucrare a datelor pentru analiza regimurilor permanente de funcționare ale rețelelor electrice, *Simpozionul de informatică în energetică, Suceava, 23-24 mai 1996, Vol. II, pp. 10-17.*
- [76] **Petersen, H.M., Koch, R.G., Swart, P.H., R. van Heereden**, Modelling Arc Furnace Flicker and Investigating Compensation Techniques, *IEEE Transactions on Power Delivery*, pg. 1733-1740, 1995.
- [77] **Pondroux, C., Rifi, M., Demoulin, B.**, A Simplified Approach to Determine the Amplitude of the Transient Voltage Induced on a Cable Bundle, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, No. 4, pg. 497-504, November 1995.
- [78] **Răduca, E.**, Algoritmi pentru reglarea parametrilor arcului electric de curent continuu în cuptoarele electrice cu arc, *Analele Universității "Eftimie Murgu", Reșița, 1994.*
- [79] **Rău, A., Tripșa, I.**, Metalurgia oțelului, *Editura Didactică și Pedagogică, București, 1990.*
- [80] **Saimac, A., Roșu, E., Gostian, C.**, Utilizarea energiei electrice în metalurgie, *Editura Didactică și Pedagogică, București, 1990.*
- [81] **San, Y., L., Chi, J., W.**, On-line reactive power compensation schemes for unbalanced three-phases four wire distributions feeders, *IEEE Transaction on Power Delivey*, vol.8, no.4, 1993, pp.1958-1965.
- [82] **Sandu, F., Szabo, W., Ursuțiu, D.**, Măsurarea puterilor la frecvențe industriale prin achiziții scurte cu rată adaptivă și procesare temporală, *Revista de Instrumentație virtuală, Brașov, Anul 1, volumul 1, numărul 1, 1998.*
- [83] **Sharma, C.**, Modelling of an Island Grid, *IEEE Transactions on Industry Applications*, pg. 213-220, 1997.
- [84] **Shiran, S., Reiser, B., Cory, H.**, A Probabilistic Model for the Evaluation of Coupling Between Transmission Lines, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 35, No. 3, pg. 387-392, August 1993.
- [85] **Singh, A.K., Tech, M.**, Dri melting in electric arc furnaces/*Tool and Alloy Steel 1985, vol. 19, No.5, pg. 167-170.*
- [86] **Stone, I.K.**, Timken expanda steelmaking using latest technology/*Steel Times International 1985, No. 2, pg. 42-43.*
- [87] **Subjak, J., Mcquilkkin, J.**, Harmonics – Causes, Effects, Measurements, and Analysis: An Update, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. No. 6, November/December
- [88] **Sutherland, P.**, Harmonic Measurements in Industrial Power Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 1, January/ February 1995, pg. 175 – 183.



- [89] **Tang, L., Kolluri, S., Mark, F. Mc-Granaghan**, Voltage Flicker Prediction for two simultaneously operated Arc Furnaces, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, No. 2, April 1997.
- [90] **Tang, C.K.K., Turner, D.R.**, Modelling of large nonlinear loads and thyristor controlled shunt compensators, *IEEE Proceedings - C*, vol. 138, No. 6, pg. 505-517, November 1991.
- [91] **Teoh, L. L.**, Electric arc furnaces technology: Recent developments and future trends/Iron-making and Steelmaking 1989, vol. 16, No. 5, pg. 303-313.
- [92] **Thiolker, K.H.**, Prozes Führung in Lichtbogen Ofen der Stahl and Rohenwerk Reisholtz GmbH, *Luxembourg 1970 Dissertation 1*, pg. 324-334.
- [93] **Thomas, W.P., Christopoulos, C., Pereira, E.T.**, Calculation of Radiated Electromagnetic Fields from Cables Using Time-Domain Simulation, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, No. 3, pg. 201-205, August 1994.
- [94] **Tkatchenko, S., Rachidi, F., Ianoz, M.**, Electromagnetic Field Coupling to a Line of Finite Length: Theory and Fast Iterative Solutions in Frequency and Time Domains, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, No. 4, pg. 509-518, November 1995.
- [95] **Țugulea, A.**, Factorul de putere în regim deformant, *Energetica*, vol. 34, Nr. 9, pg. 407-413, 1986.
- [96] **Țugulea, A.**, Considerații referitoare la definirea factorului de putere pentru sistemele trifazate dezechilibrate, *Energetica*, vol. 34, Nr. 4, pg. 164-167, 1986.
- [97] **Țugulea, A.**, Considerații privind efectele energetice ale regimului deformant, *Energetica*, vol. 34, Nr. 1, pg. 27-31, 1986.
- [98] **Țugulea, A.**, Criteria for the Definition of the Electric Power Quality and its Measurement System, *ETEP*, Vol. 6, no. 5, September/October, 1996.
- [99] **Țugulea, A.**, Considerații privind efectele energetice ale regimurile armonice nesimetrice ale sistemelor trifazate, *Energetica*, vol.34, nr.3, 1986, pp.121-129.
- [100] **Oppenheim, A. V., Schaffer R. W.**, Digital Signal Processing, *Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey*, 1986.
- [101] **Valcarcel, M., Mayordomo, J.G.**, Harmonic Power Flow for unbalanced systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, No. 4, pg. 2052-2059, October 1993.
- [102] **Varadan, S., Makram, E.B., Girgis, A.A.**, A New Time Domain Voltage Source Model for an Arc Furnace using EMPT, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, No. 3, pg. 1685-1691, July 1996.
- [103] **Zoshioka, Y., Konishi, S., Eguchi, N., Yamamoto, M., Endo, K., Maruyama, K., Hino, K.**, Self-Commutated Static Flicker Compensator for Arc Furnaces, *IEEE Transactions on Power Delivery*, pg. 891-897.
- [104] **Wilson, P., Palmer, L.**, Water Cooled oxygen lances, experience at Shermees Steel /*Electric Furnace Conference Proceedings 1984*, vol. 42, pg. 375-381.
- [105] **\*\*\***, Innovations from Daniely/Metals and Minerals International, 1986, No. 1, pg. 15.

- [106] \*\*\*, Soviet steel-an industrial comparison/*Steel Times International*, September 1991, pg.32-34.
- [107] \*\*\*, Favorable electricity charge ald French minimill/*Steel Times* 1986, vol. 214, No. 6, pg. 308-310.
- [108] \*\*\*, Le 2-e congres europeen de l'acien electrique/*Journal de four Electrique* 1983, No. 9, pg. 13-16.
- [109] \*\*\*, Worldwide DC Arc Furnaces Installations/*Metal producing* 5/92, pg. 22.
- [110] **Bălan GH., Constantinescu J., Marcu B., Cotenescu Ș.**, Raționalizarea consumului de energie electrică la cuptorul nr. 1 de 100 t pe baza bilanțului energetic, Contract nr. 6572, București 1983.
- [111] \*\*\*, Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads, *IEEE Working Group on nonsinusoidal situations: Effects on meter performance and definitions of power*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, 1998, pg. 79-87.
- [112] \*\*\*, Certificat calitate *CITO 0,66 , 70000A / 70A Electroputere Craiova.*
- [113] \*\*\*, Certificat calitate *CITO 0,66 , 1500A / 5A Electroputere Craiova.*
- [114] \*\*\*, Certificat calitate *CITO 0,66 , 660V / 110V Electroputere Craiova.*
- [115] \*\*\*, Certificat calitate *CITO 0,66 , 30000V / 1000V Electroputere Craiova.*
- [116] \*\*\*, ADA 3100/ ADA3100A, User's Manual, Real Time Devices Inc., USA 1991.
- [117] \*\*\*, Signal Math, User's Manual, Real Time Devices Inc., USA 1991.
- [118] \*\*\*, Signal View, User's Manual and Reference Guide, Real Time Devices Inc., USA 1991.
- [119] \*\*\*, REACTIVE POWER MANAGEMENT – Adaptive VAR Compensator, [hptt://www.trenchgroup.com](http://www.trenchgroup.com).
- [120] \*\*\*, PSCAD-EMTDC , User's Manual, *Manitoba HVDC Research Centre, USA, 1999.*
- [121] \*\*\*, Catalog de produse, *BICC, 1984.*
- [122] \*\*\*, Catalog de produse, *LEM, 1993.*







```

Xt2=fft(u);
Xm2=abs(Xt2);
ampl2=Xm2(1,1:N/2+1)/(N/2);
ampl21=ampl2*1000;

f=[0:N/2]*fe/N;

frecv=f(2:20);
ampli=ampl11(2:20);
amplu=ampl21(2:20);

subplot(2,1,1);
bar(frecv,ampli,0.4,'r');
grid;
xlabel('Frecventa (Hz)');
ylabel('Curentul (A)');
title('Spectrul semnalelor');

subplot(2,1,2);
bar(frecv,amplu,0.4,'b');
grid;
xlabel('Frecventa (Hz)');
ylabel('Tensiunea (V)');
pause;

```

4 Determinarea transformatei  
 5 FFT  
 6 a semnalului 2

8 Matricea frecvențelor

9  
 10 Selectare domeniu de frecvențe  
 11 reprezentabil

12  
 13  
 14  
 15  
 16  
 17  
 18  
 19  
 20  
 21  
 22  
 23  
 24  
 25  
 26  
 27  
 28  
 29  
 30  
 31  
 32  
 33  
 34  
 35  
 36  
 37  
 38  
 39  
 40  
 41  
 42  
 43  
 44  
 45  
 46  
 47  
 48  
 49  
 50  
 51  
 52  
 53  
 54  
 55  
 56  
 57  
 58  
 59  
 60  
 61  
 62  
 63  
 64  
 65  
 66  
 67  
 68  
 69  
 70  
 71  
 72  
 73  
 74  
 75  
 76  
 77  
 78  
 79  
 80  
 81  
 82  
 83  
 84  
 85  
 86  
 87  
 88  
 89  
 90  
 91  
 92  
 93  
 94  
 95  
 96  
 97  
 98  
 99  
 100  
 101  
 102  
 103  
 104  
 105  
 106  
 107  
 108  
 109  
 110  
 111  
 112  
 113  
 114  
 115  
 116  
 117  
 118  
 119  
 120  
 121  
 122  
 123  
 124  
 125  
 126  
 127  
 128  
 129  
 130  
 131  
 132  
 133  
 134  
 135  
 136  
 137  
 138  
 139  
 140  
 141  
 142  
 143  
 144  
 145  
 146  
 147  
 148  
 149  
 150  
 151  
 152  
 153  
 154  
 155  
 156  
 157  
 158  
 159  
 160  
 161  
 162  
 163  
 164  
 165  
 166  
 167  
 168  
 169  
 170  
 171  
 172  
 173  
 174  
 175  
 176  
 177  
 178  
 179  
 180  
 181  
 182  
 183  
 184  
 185  
 186  
 187  
 188  
 189  
 190  
 191  
 192  
 193  
 194  
 195  
 196  
 197  
 198  
 199  
 200  
 201  
 202  
 203  
 204  
 205  
 206  
 207  
 208  
 209  
 210  
 211  
 212  
 213  
 214  
 215  
 216  
 217  
 218  
 219  
 220  
 221  
 222  
 223  
 224  
 225  
 226  
 227  
 228  
 229  
 230  
 231  
 232  
 233  
 234  
 235  
 236  
 237  
 238  
 239  
 240  
 241  
 242  
 243  
 244  
 245  
 246  
 247  
 248  
 249  
 250  
 251  
 252  
 253  
 254  
 255  
 256  
 257  
 258  
 259  
 260  
 261  
 262  
 263  
 264  
 265  
 266  
 267  
 268  
 269  
 270  
 271  
 272  
 273  
 274  
 275  
 276  
 277  
 278  
 279  
 280  
 281  
 282  
 283  
 284  
 285  
 286  
 287  
 288  
 289  
 290  
 291  
 292  
 293  
 294  
 295  
 296  
 297  
 298  
 299  
 300  
 301  
 302  
 303  
 304  
 305  
 306  
 307  
 308  
 309  
 310  
 311  
 312  
 313  
 314  
 315  
 316  
 317  
 318  
 319  
 320  
 321  
 322  
 323  
 324  
 325  
 326  
 327  
 328  
 329  
 330  
 331  
 332  
 333  
 334  
 335  
 336  
 337  
 338  
 339  
 340  
 341  
 342  
 343  
 344  
 345  
 346  
 347  
 348  
 349  
 350  
 351  
 352  
 353  
 354  
 355  
 356  
 357  
 358  
 359  
 360  
 361  
 362  
 363  
 364  
 365  
 366  
 367  
 368  
 369  
 370  
 371  
 372  
 373  
 374  
 375  
 376  
 377  
 378  
 379  
 380  
 381  
 382  
 383  
 384  
 385  
 386  
 387  
 388  
 389  
 390  
 391  
 392  
 393  
 394  
 395  
 396  
 397  
 398  
 399  
 400  
 401  
 402  
 403  
 404  
 405  
 406  
 407  
 408  
 409  
 410  
 411  
 412  
 413  
 414  
 415  
 416  
 417  
 418  
 419  
 420  
 421  
 422  
 423  
 424  
 425  
 426  
 427  
 428  
 429  
 430  
 431  
 432  
 433  
 434  
 435  
 436  
 437  
 438  
 439  
 440  
 441  
 442  
 443  
 444  
 445  
 446  
 447  
 448  
 449  
 450  
 451  
 452  
 453  
 454  
 455  
 456  
 457  
 458  
 459  
 460  
 461  
 462  
 463  
 464  
 465  
 466  
 467  
 468  
 469  
 470  
 471  
 472  
 473  
 474  
 475  
 476  
 477  
 478  
 479  
 480  
 481  
 482  
 483  
 484  
 485  
 486  
 487  
 488  
 489  
 490  
 491  
 492  
 493  
 494  
 495  
 496  
 497  
 498  
 499  
 500  
 501  
 502  
 503  
 504  
 505  
 506  
 507  
 508  
 509  
 510  
 511  
 512  
 513  
 514  
 515  
 516  
 517  
 518  
 519  
 520  
 521  
 522  
 523  
 524  
 525  
 526  
 527  
 528  
 529  
 530  
 531  
 532  
 533  
 534  
 535  
 536  
 537  
 538  
 539  
 540  
 541  
 542  
 543  
 544  
 545  
 546  
 547  
 548  
 549  
 550  
 551  
 552  
 553  
 554  
 555  
 556  
 557  
 558  
 559  
 560  
 561  
 562  
 563  
 564  
 565  
 566  
 567  
 568  
 569  
 570  
 571  
 572  
 573  
 574  
 575  
 576  
 577  
 578  
 579  
 580  
 581  
 582  
 583  
 584  
 585  
 586  
 587  
 588  
 589  
 590  
 591  
 592  
 593  
 594  
 595  
 596  
 597  
 598  
 599  
 600  
 601  
 602  
 603  
 604  
 605  
 606  
 607  
 608  
 609  
 610  
 611  
 612  
 613  
 614  
 615  
 616  
 617  
 618  
 619  
 620  
 621  
 622  
 623  
 624  
 625  
 626  
 627  
 628  
 629  
 630  
 631  
 632  
 633  
 634  
 635  
 636  
 637  
 638  
 639  
 640  
 641  
 642  
 643  
 644  
 645  
 646  
 647  
 648  
 649  
 650  
 651  
 652  
 653  
 654  
 655  
 656  
 657  
 658  
 659  
 660  
 661  
 662  
 663  
 664  
 665  
 666  
 667  
 668  
 669  
 670  
 671  
 672  
 673  
 674  
 675  
 676  
 677  
 678  
 679  
 680  
 681  
 682  
 683  
 684  
 685  
 686  
 687  
 688  
 689  
 690  
 691  
 692  
 693  
 694  
 695  
 696  
 697  
 698  
 699  
 700  
 701  
 702  
 703  
 704  
 705  
 706  
 707  
 708  
 709  
 710  
 711  
 712  
 713  
 714  
 715  
 716  
 717  
 718  
 719  
 720  
 721  
 722  
 723  
 724  
 725  
 726  
 727  
 728  
 729  
 730  
 731  
 732  
 733  
 734  
 735  
 736  
 737  
 738  
 739  
 740  
 741  
 742  
 743  
 744  
 745  
 746  
 747  
 748  
 749  
 750  
 751  
 752  
 753  
 754  
 755  
 756  
 757  
 758  
 759  
 760  
 761  
 762  
 763  
 764  
 765  
 766  
 767  
 768  
 769  
 770  
 771  
 772  
 773  
 774  
 775  
 776  
 777  
 778  
 779  
 780  
 781  
 782  
 783  
 784  
 785  
 786  
 787  
 788  
 789  
 790  
 791  
 792  
 793  
 794  
 795  
 796  
 797  
 798  
 799  
 800  
 801  
 802  
 803  
 804  
 805  
 806  
 807  
 808  
 809  
 810  
 811  
 812  
 813  
 814  
 815  
 816  
 817  
 818  
 819  
 820  
 821  
 822  
 823  
 824  
 825  
 826  
 827  
 828  
 829  
 830  
 831  
 832  
 833  
 834  
 835  
 836  
 837  
 838  
 839  
 840  
 841  
 842  
 843  
 844  
 845  
 846  
 847  
 848  
 849  
 850  
 851  
 852  
 853  
 854  
 855  
 856  
 857  
 858  
 859  
 860  
 861  
 862  
 863  
 864  
 865  
 866  
 867  
 868  
 869  
 870  
 871  
 872  
 873  
 874  
 875  
 876  
 877  
 878  
 879  
 880  
 881  
 882  
 883  
 884  
 885  
 886  
 887  
 888  
 889  
 890  
 891  
 892  
 893  
 894  
 895  
 896  
 897  
 898  
 899  
 900  
 901  
 902  
 903  
 904  
 905  
 906  
 907  
 908  
 909  
 910  
 911  
 912  
 913  
 914  
 915  
 916  
 917  
 918  
 919  
 920  
 921  
 922  
 923  
 924  
 925  
 926  
 927  
 928  
 929  
 930  
 931  
 932  
 933  
 934  
 935  
 936  
 937  
 938  
 939  
 940  
 941  
 942  
 943  
 944  
 945  
 946  
 947  
 948  
 949  
 950  
 951  
 952  
 953  
 954  
 955  
 956  
 957  
 958  
 959  
 960  
 961  
 962  
 963  
 964  
 965  
 966  
 967  
 968  
 969  
 970  
 971  
 972  
 973  
 974  
 975  
 976  
 977  
 978  
 979  
 980  
 981  
 982  
 983  
 984  
 985  
 986  
 987  
 988  
 989  
 990  
 991  
 992  
 993  
 994  
 995  
 996  
 997  
 998  
 999  
 1000



## ANEXA I.2.

```
unit AD3100;
interface
uses crt;

Const DIGITAL_IO = 0;
      TRIGGER_SLCT = 1;
      CHANNEL_SLCT = 0;
      SCAN_SLCT = 2;
      GAIN_SLCT = 2;
      STATUS_BYTE = 3;
      READ_FIFO = 4;
      START_CONVERSION = 4;
      CLEAR_DMA_DONE = 5;
      IRQ_DMA_SLCT = 6;
      CLEAR_BOARD = 7;
      TIMER_1_CLCK0 = 8;
      TIMER_1_CLCK1 = 9;
      TIMER_1_CLCK2 = 10;
      TIMER_1_CTRL = 11;
      TIMER_2_CLCK0 = 12;
      TIMER_2_CLCK1 = 13;
      TIMER_2_CLCK2 = 14;
      TIMER_2_CTRL = 15;
      DAC1_LSB = 16;
      DAC1_MSB = 17;
      DAC2_LSB = 18;
      DAC2_MSB = 19;
      BURST_CHANNELS = 20;

      DIRECT_SCAN = 0;
      AUTO_SCAN = 1;
      BURST = 2;

      SINGLE_INT_TRIG = 0;
      MULTI_INT_TRIG = 1;
      SINGLE_EXT_TRIG = 2;
      MULTI_EXT_GATE = 2;

      INT_HALT = 0;
      INT_EF = 1;
      INT_DMA_DONE = 2;
      INT_BURST_DONE = 3;
      EXT_TRIG = 4;
      EXT_GATE = 5;
      COUNTER_OUT = 6;
      TIMER_IRQ = 7;
      IRQ_DISABLED = 1;

Var VoltageRange,
      ConversionFactor,
      Baseline : Real;
      BaseAddress:Word;

Procedure InitializeBoardSettings(BA : Word; Range : Real);
Function DigitalToReal(DigitalValue : Integer) : Real;
Procedure ClearBoard;
Procedure ClearFiFo;
```

```

Procedure SetChannel(ChannelNumber:Byte);
Procedure SetGain(Gain:Byte);
Procedure SetTriggerType(TriggerType:byte);
Procedure SetScanType(ScanType:Byte);
Procedure SetBurstChannels(n:byte);
Procedure SetIRQ(IRQNumber:byte);
Procedure SetINTSource(INTSource:byte);
Procedure SetDMAChannel(DMAMode:Byte);
Procedure ClearDMADone;
Procedure StartConversion;
Function BurstDone:boolean;
Function DataInFiFo:Boolea;
Function ReadFiFo:integer;
Procedure ClockMode(Chip, Clock, Mode :Byte);
Procedure ClockDivisor(Chip, Clock:byte; Divisor:Word);
Procedure SetUserClock(frecv:real);
Procedure SetPacerClock(frecv:real);
Function ClockDone(PIT,Clock:byte):boolean;
Function ReadDigitalIO:byte;
Procedure WriteDigitalIO(v:byte);
Procedure SetMuxChannel(channel:byte);

```

### implementation

```

Procedure InitializeBoardSettings(BA : Word; Range : Real);
{ Stabileste adresa de baza a placii si domeniul valid de tensiuni
achizitionate}
    begin
        BaseAddress := BA;
        VoltageRange := Range;
        ConversionFactor := VoltageRange / 4096.0;
        Baseline := 0;
    end;

Function DigitalToReal(DigitalValue : Integer) : Real;
    begin
        DigitalToReal := DigitalValue * ConversionFactor + Baseline;
    end;

Procedure ClearBoard;
{ Initializare placa de achizitie }
    begin
        Port[BaseAddress + CLEAR_BOARD] := 0;
        delay(5);
    end;

Procedure ClearFiFo;
{ Goleste memoria FIFO a placii de achizitie }
    begin
        Port[BaseAddress + STATUS_BYTE] := 0;
    end;

Procedure SetChannel(ChannelNumber : Byte);
{Stabileste canalul pe care se va face achizitia(in cazul in care se
lucreaza cu un singur canal)}

```

**Var B : Byte;**

**begin**

```
B := Port[BaseAddress + CHANNEL_SLCT];
B := B AND 04F;
B := B OR ChannelNumber;
Port[BaseAddress + CHANNEL_SLCT] := B;
```

**end;**

**Procedure SetGain(Gain : Byte);**

{Stabileste amplificarea}

**Var B : Byte;**

**begin**

**Case (Gain) of**

```
0 : Gain := 5;
1 : Gain := 1;
2 : Gain := 1;
4 : Gain := 2;
8 : Gain := 3;
16 : Gain := 4;
```

**else**

```
Gain := 1;
```

**end;**

```
B := Port[BaseAddress + GAIN_SLCT];
B := B AND 31;
B := B OR (Gain * 32);
Port[BaseAddress + GAIN_SLCT] := B;
```

**end;**

**Procedure SetTriggerType(TriggerType : Byte);**

{Stabileste modul de conversie folosit}

**Var B : Byte;**

**begin**

```
B := Port[BaseAddress + TRIGGER_SLCT];
B := B AND 252;
B := B OR TriggerType;
Port[BaseAddress + TRIGGER_SLCT] := B;
```

**end;**

**Procedure SetScanType(ScanType : Byte);**

{stabileste modul de citire al canalelor analogice}

**Var B : Byte;**

**begin**

```
B := Port[BaseAddress + SCAN_SLCT];
B := B AND 231;
B := B + (ScanType * 8);
Port[BaseAddress + SCAN_SLCT] := B;
```

**end;**

**Procedure SetBurstChannels(n : Byte);**

{Stabileste numarul de canale pe care se va face achizitia,  
in cazul in care se va lucra cu mai multe canale simultan}

```

    begin
        Port[BaseAddress + BURST_CHANNELS] := n;
    end;

Procedure SetIRQ(IRQNumber : Byte);
{Stabileste intreruperea care va fi folosita, in cazul in care se lucreaza
cu intreruperi}

Var B : Byte;

    begin
        B := Port[BaseAddress + IRQ_DMA_SLCT];
        B := B AND 0FF;
        B := B OR ((IRQNumber - 1) * 8);
        Port[BaseAddress + IRQ_DMA_SLCT] := B;
    end;

Procedure SetINTSource(INTSource : Byte);
{ Programeaza sursa de intrerupere interna }

Var B : Byte;

    begin
        B := Port[BaseAddress + IRQ_DMA_SLCT];
        B := B AND 0FF;
        B := B OR INTSource;
        Port[BaseAddress + IRQ_DMA_SLCT] := B;
    end;

Procedure SetDMAChannel(DMAMode : Byte);
{ Stabilire canal DMA, folosit in cazul accesului direct la memorie }

Var B : Byte;

    begin
        B := Port[BaseAddress + IRQ_DMA_SLCT];
        B := B AND 0B;
        B := B OR (DMAMode * 04);
        Port[BaseAddress + IRQ_DMA_SLCT] := B;
    end;

Procedure ClearDMADone;

    begin
        Port[BaseAddress + CLEAR_DMA_DONE] := 0;
    end;

Procedure StartConversion;
{ Initiaza o conversie analog numerica }

    begin
        Port[BaseAddress + START_CONVERSION] := 0;
    end;

Function BurstDone : Boolean;
{ Verifica daca s-au citit toate canalele programate }

```

```

Var BurstStatus : Byte;

  begin
    BurstStatus := Port[BaseAddress + STATUS_BYTE];
    if ((BurstStatus AND ...) = ...) Then
      BurstDone := TRUE
    else
      BurstDone := FALSE;
    end;

Function DataInFiFo : Boolean;

{Verifica daca sunt sau nu date in memoria FIFO a placii de achizitie}

Var FiFoStatus : Byte;

  begin
    FiFoStatus := Port[BaseAddress + STATUS_BYTE];
    If (FiFoStatus AND ... = ...) Then
      DataInFiFo := TRUE
    Else
      DataInFiFo := FALSE;
    end;

Function ReadFIFO : Integer;

{Citeste date din memoria FIFO}

Var MSB, LSB : Byte;
    DigitalValue : Integer;

  begin
    MSB := Port[BaseAddress + READ_FIFO];
    LSB := Port[BaseAddress + READ_FIFO];
    DigitalValue := (MSB * 256 + LSB);
    ReadFiFo := DigitalValue;
  end;

Procedure ClockMode(Chip, Clock, Mode : Byte);

Var PortID : Word;
    StatusByte : Byte;

  begin
    PortID := BaseAddress + TIMER_1_CTRL + (1 * (Chip - 1));
    StatusByte := (Clock * 64) + (Mode * 2) + 4;
    Port[PortID] := StatusByte;
  end;

Procedure ClockDivisor(Chip, Clock : Byte; Divisor : Word);

Var LSB, MSB : Byte;
    PortID : Word;

  begin
    PortID := BaseAddress + TIMER_1_CLK0 + Clock + (1 * (Chip - 1));
    LSB := Divisor MOD 256;
    MSB := Divisor DIV 256;
    Port[PortID] := LSB;
    Port[PortID] := MSB;
  end;

```

```

Procedure SetUserClock(frecv : Real);

  begin
    ClockMode(., ., 0);
    ClockDivisor(., ., 0);
    ClockMode(., ., 0);
    ClockDivisor(., ., Trunc(8254 / frecv));
    ClockMode(., ., 0);
    ClockDivisor(., ., 0);
  end;

Procedure SetPacerClock(frecv : Real);

  begin
    { Stabileste clock 0 a 8254 #1 sa lucreze la 500,000 KHz }

    ClockMode(., ., 0);
    ClockDivisor(., ., 0);

    { Stabileste clock 1 a 8254 #1 sa lucreze la o frecventa specificata }

    ClockMode(., ., 0);
    ClockDivisor(., ., Trunc(8254 / frecv));
  end;

Function ClockDone(PIT, Clock : Byte) : Boolean;

Var CounterValue : Word;
    LSB, MSB : Byte;

  begin

    LSB := Port[BaseAddress + TIMER_1_CLK0 + 4 * (PIT - 1) + Clock];
    MSB := Port[BaseAddress + TIMER_1_CLK0 + 4 * (PIT - 1) + Clock];
    CounterValue := (MSB * 256) + LSB;
    If (CounterValue > _) Then
      ClockDone := FALSE
    else
      ClockDone := TRUE;
    end;

Function ReadDigitalIO : Byte;

  begin
    ReadDigitalIO := Port[BaseAddress + DIGITAL_IO];
  end;

Procedure WriteDigitalIO(v : Byte);

  begin
    Port[BaseAddress + DIGITAL_IO] := v;
  end;

Procedure SetMUXChannel(Channel : Byte);

  begin
    WriteDigitalIO(Channel);
  end;
end.

```



## ANEXA I.3.

```

program achiz;

{Programul achizitioneaza date pe 6 canale timp de aproximativ
3 ore si jumătate. Datele sunt achizitionate la interval de 10 secunde.
Durata ferestrei de date este de 250 ms}

uses graph,crt,dos,ad3100;

var p,pp,ppp:pointer;
    imr,x,msb,lsb,semn:byte;
    j,i:longint;
    f,g:text;
    data,t,tc,dt,ora,min,sec,ssec,oral,min1,secl,ssecl:word;
    nume,s:string;
    b:array[1..1000,1..2] of byte;

procedure init;

{ Inițializează modul de lucru grafic}

var gd,gm:integer;
    begin
        gd:=detect;
        initgraph(gd,gm,'c:\tp\bgi');
    end;

procedure desen;

{procedura afiseaza pe ecran datele achizitionate
la fiecare 10 secunde}

var i,j,x:word;
    s,sora,smin,sesec:string;
    a:array[1..600,1..8] of word;

    begin
        assign(f,nume);
        reset(f);
        readln(f,s);
        for i:=1 to 600 do
            for j:=1 to 8 do
                begin
                    read(f,x);
                    a[i,j]:=x;
                end;
            close(f);
            cleardevice;
            str(ora,sora);str(min,smin);str(sec,sesec);
            outtextxy(10,10,nume+' '+sora+' '+smin+' '+sesec);
            x:=20;
            for j:=1 to 8 do
                begin
                    setcolor(lightblue);
                    line(0,x,600,x);
                    setcolor(red);
                    moveto(1,60*(j-1)+trunc(a[1,j]/4096*60));
                end;
            end;

```

```

        for i:=1 to 639 do
            begin
                lineto(i,60*(j-1)+trunc(a[i,j]/4096*60));
            end;
            x:=x+60;
        end;
    end;

procedure set_pacer(frecv:real);
{Procedura stabileste frecventa de achizitie}

    begin
        clockmode(1,1,0);
        clockdivisor(1,1,25);
        clockmode(1,1,0);
        clockdivisor(1,1,5);
    end;

begin
{Program principal}

    initializeboardsettings(768,10.1);
        {Adresa de baza a placii de achizitie 768,
        domeniul valid de tensiuni 0-10 V}
    clearboard;
    clearfifo;
    setchannel(1);
    setgain(1);
    settriggertype(1);
    setscantype(1);
    setburstchannels(8);
    set_pacer(100000); { frecventa de achizitie 100 kHz}
    j:=0;
    assign(g,'timp.txt');
    rewrite(g);
    close(g);
    init;

repeat
    gettime(ora,min,sec,ssec);
    tc:=3600*ora+60*min+sec;
    str(j,s);
    nume:=s;
    assign(f,nume);
    writeln(nume);
    rewrite(f);
    writeln(f,ora,':',min,':',sec,':',ssec);
    append(g);
    writeln(g,nume,' ',ora,':',min,':',sec,':',ssec);
    close(g);
    startconversion;
    j:=j+1;
    i:=0;
    while i<=639 do
        begin
            x:=port[768+3];
            x:=x and 1;
            if x=1 then

```

```

        begin
            inc(i);
            {Citeste consecutiv doi octeti reprezentand
             cel mai putin semnificativ, respectiv cel mai
             semnificativ octet de date}
            b[i,1]:=port[255+i] and 0x0f;
            b[i,2]:=port[256+i];
        end;
    end;
for i:=1 to 255 do
    begin
        msb:=b[i,1];
        lsb:=b[i,2];
        semn:=msb and 0x80;
        if semn=0 then
            data:=(msb and 0x7f) * 256 + lsb
        else
            data:=lsb + (msb and 0x7f) * 256 + lsb;
        {scrie datele in fisier}
        write(f,data:");
        if i mod 25 = 5 then writeln(f);
    end;
close(f);
desen;
clearfifo;
repeat
    gettime(oral,min1,secl,ssecl);
    t:=2800*oral+60*min1+secl;
    dt:=t-tc;
    {asteapta 10 secunde}
until dt>=10;
until j=255;
closegraph;
end.

```

## ANEXA I.4.

```

N=1250;                               % Numar de esantioane
fe=5000;                               % Frecventa de esantionare
ki=10000*sqrt(2);                     % Constanta pentru curent
ku=281/44*22;                          % Constanta pentru tensiune
t=1:1:100;                              % Matricea fereastra timp
t1=1:1:1250;                            % Axa timpului

for n=753:753                           % Buclă fișier date de intrare

    s=strcat('d:\sarjal\',int2str(n));
    f=fopen(s,'r');                      % Citire date
    timp=fscanf(f,'%s',1);               % din
    s1=strcat('d:\sarjal\',int2str(n));  % fișierul cu
    s='d:\manu\matlab\copiere ';        % datele
    s2=strcat(s,blanks(1),s1);           % achiziționate
    [s w]=dos(s2);
    load x -ascii ;                      % x reprezinta matricea cu
    fclose(f);                            % datele achizitionate

    for j=2:4
        for k=1:1250
            x(k,j)=(x(k,j)-2048)*10/2048*ku;
        end
    end
    for j=6:8
        for k=1:1250
            x(k,j)=(x(k,j)-2048)*10/2048*ki;
        end
    end
    end

    u1=zeros(100);
    u2=zeros(100);
    u3=zeros(100);
    i1=zeros(100);
    i2=zeros(100);
    i3=zeros(100);
    pa=zeros(1,20);
    qa=zeros(1,20);

    s=0;
    p=0;
    q=0;

    Utilizarea transformatei Fourier Discrete
    pentru calculul puterilor in regim deformant

    for m=1:12                            % Buclă perioadă

        u1=x((m-1)*100+1:m*100,4)';
        u2=x((m-1)*100+1:m*100,3)';
        u3=x((m-1)*100+1:m*100,2)';
        i1=x((m-1)*100+1:m*100,6)';
        i2=x((m-1)*100+1:m*100,7)';
        i3=x((m-1)*100+1:m*100,8)';

        Extragere matrice
        curenți și tensiuni
        pentru o perioadă
    end
end

```



```
d=sqrt(s*s-p*p-q*q);
```

Putere deformanta

```
end
```

```
s=s/1000000;
```

```
p=p/1000000;
```

```
q=q/1000000;
```

```
d=d/1000000;
```

```
x=x/1000;
```

```
subplot(2,1,1);
```

```
plot(t1,x(t1,4),'r',t1,x(t1,3),'g',t1,x(t1,2),'b');
```

```
grid;
```

```
xlabel('TIMPUL (s)');
```

```
ylabel('Tensiunea [KV]');
```

```
axis([0 1200 -1 1]);
```

Reprezentare  
forme de  
undă

```
subplot(2,1,2);
```

```
plot(t1,x(t1,6),'r',t1,x(t1,7),'g',t1,x(t1,8),'b');
```

```
grid;
```

```
xlabel('TIMPUL (s)');
```

```
ylabel('Curentul arcului [kA]');
```

```
axis([0 1200 -100 100]);
```

curenți și  
tensiuni

```
gtext(strcat('Ora achizitiei:',timp));
```

```
gtext(strcat('Puterea aparenta:',num2str(s,5),' [MVA]'));
```

```
gtext(strcat('Puterea activa:',num2str(p,5),' [MW]'));
```

```
gtext(strcat('Puterea reactivă:',num2str(q,5),' [MVAR]'));
```

```
gtext(strcat('Puterea deformantă:',num2str(d,5),' [MVAD]'));
```

```
pause;
```

```

      * * * * *
      Utilizarea transformatei Fourier Discrete
      pentru reprezentarea caracteristicilor spectrale
      * * * * *

```

```
u1=x(:,4)';
```

```
u2=x(:,3)';
```

```
u3=x(:,2)';
```

```
i1=x(:,6)';
```

```
i2=x(:,7)';
```

```
i3=x(:,8)';
```

```
xt1=fft(u1);
```

```
xm1=abs(xt1);
```

```
amp11=1000*xm1(1,1:N/5+1)/(N/2);
```

```
xt2=fft(u2);
```

```
xm2=abs(xt2);
```

```
amp12=1000*xm2(1,1:N/5+1)/(N/2);
```

```
xt3=fft(u3);
```

```
xm3=abs(xt3);
```

```
amp13=1000*xm3(1,1:N/5+1)/(N/2);
```

```
xil=fft(i1);
```

```
xm1=abs(xil);
```

```
amp1i1=1000*xm1(1,1:N/5+1)/(N/2);
```

```
xi2=fft(i2);
```

```
xm2=abs(xi2);
```

```
amp1i2=1000*xm2(1,1:N/5+1)/(N/2);
```



```
xi3=fft(i3);
xm3=abs(xi3);
ampli3=1000*xm3(1,1:N/5+1)/(N/2);

f=[0:N/5]*fe/N;

subplot(2,1,1);
semilogy(f,ampli1,'r',f,ampli2,'g',f,ampli3,'b');
grid;
xlabel('Frecventa (Hz)');
ylabel('Tensiunea [V]');
title('Caracteristica de frecventa a tensiunii');

subplot(2,1,2);
semilogy(f,ampli1,'r',f,ampli2,'g',f,ampli3,'b');
grid;
xlabel('Frecventa (Hz)');
ylabel('Curentul [A]');
title('Caracteristica de frecventa a curentului');
```

Reprezentarea  
caracteristicilor  
spectrale  
ale  
curentului  
și  
tensiunii

## ANEXA I.5.

```

N=100;
fe=5000;
ki=1;
ku=1;
t=1:1:100;
p_ap1=zeros(1,10);
p_ap2=zeros(1,10);
p_ap3=zeros(1,10);
p_ac1=zeros(1,10);
p_ac2=zeros(1,10);
p_ac3=zeros(1,10);
p_re1=zeros(1,10);
p_re2=zeros(1,10);
p_re3=zeros(1,10);
p_def1=zeros(1,10);
p_def2=zeros(1,10);
p_def3=zeros(1,10);
P1_arm=zeros(20,10);
P2_arm=zeros(20,10);
P3_arm=zeros(20,10);
q1_arm=zeros(20,10);
q2_arm=zeros(20,10);
q3_arm=zeros(20,10);
i1arm=zeros(20,10);
i2arm=zeros(20,10);
i3arm=zeros(20,10);
u1arm=zeros(20,10);
u2arm=zeros(20,10);
u3arm=zeros(20,10);
thd_i=zeros(1,10);
thd_u=zeros(1,10);
thdp_i=zeros(1,10);
thdp_u=zeros(1,10);

for n=1:1200
    n=n
    s1=strcat('d:\sarja2m\',int2str(n),'.out');
    s='d:\manu\matlab\copiere ';
    s2=strcat(s,blanks(1),s1);
    [s w]=dos(s2);
    load x -ascii ;

    u1=zeros(100);
    u2=zeros(100);
    u3=zeros(100);
    i1=zeros(100);
    i2=zeros(100);
    i3=zeros(100);
    pa1=zeros(1,20);
    pa2=zeros(1,20);
    pa3=zeros(1,20);
    qa1=zeros(1,20);
    qa2=zeros(1,20);
    qa3=zeros(1,20);
    i1a=zeros(1,20);
    i2a=zeros(1,20);
    i3a=zeros(1,20);
    u1a=zeros(1,20);
    u2a=zeros(1,20);
    u3a=zeros(1,20);

```

Numar de esantioane  
 Frecventa de esantionare  
 Constanta pentru curent  
 Constanta pentru tensiune  
 Matricea fereastră timp

Inițializare  
 puteri și factori  
 de putere  
 în regim deformant

Inițializare matrice  
 armonici  
 curenți, tensiuni

Inițializare  
 coeficienți  
 distorsiune

Buclă fișier date de intrare

citire date din  
 fișierul cudatele  
 achiziționate  
 x reprezinta matricea cu  
 datele achizitionate

Inițializare matrice  
 curenți, tensiuni  
 putere activă și reactivă  
 pentru o perioadă

```

s1=0;
s2=0;
s3=0;
pf1=0;
pf2=0;
pf3=0;
qf1=0;
qf2=0;
qf3=0;
d1=0;
d2=0;
d3=0;

thdi=0;    thdu=0;
thdpi=0;   thdpu=0;

w=12;
for m=1:w

ti=0;
tu=0;
tpi=0;
tpu=0;

u1=sqrt(3)*x((m-1)*100+1:m*100,5)';
u2=sqrt(3)*x((m-1)*100+1:m*100,6)';
u3=sqrt(3)*x((m-1)*100+1:m*100,7)';
i1=sqrt(3)*x((m-1)*100+1:m*100,2)';
i2=sqrt(3)*x((m-1)*100+1:m*100,3)';
i3=sqrt(3)*x((m-1)*100+1:m*100,4)';

% Utilizarea transformatei Fourier Discrete

ut1=fft(u1);
ua1=abs(ut1);
fu1=angle(ut1);
ut2=fft(u2);
ua2=abs(ut2);
fu2=angle(ut2);
ut3=fft(u3);
ua3=abs(ut3);
fu3=angle(ut3);

it1=fft(i1);
ia1=abs(it1);
fi1=angle(it1);
it2=fft(i2);
ia2=abs(it2);
fi2=angle(it2);
it3=fft(i3);
ia3=abs(it3);
fi3=angle(it3);

% Calculul coeficienților de distorsiune totali și ponderați
% ai curentului și tensiunii
for i=3:50
    tu=tu+(ua1(i)/ua1(2))^2+(ua2(i)/ua2(2))^2+(ua3(i)/ua3(2))^2;
    ti=ti+(ia1(i)/ia1(2))^2+(ia2(i)/ia2(2))^2+(ia3(i)/ia3(2))^2;
    tpu=tpu+i*((ua1(i)/ua1(2))^2+(ua2(i)/ua2(2))^2+(ua3(i)/ua3(2))^2);
    tpi=tpi+i*((ia1(i)/ia1(2))^2+(ia2(i)/ia2(2))^2+(ia3(i)/ia3(2))^2);
end

```

```

% Puterea aparenta pe faza 1
% Puterea aparenta pe faza 2
% Puterea aparenta pe faza 3
% Puterea activa pe faza 1
% Puterea activa pe faza 2
% Puterea activa pe faza 3
% Puterea reactiva pe faza 1
% Puterea reactiva pe faza 2
% Puterea reactiva pe faza 3
% Puterea deformanta pe faza 1
% Puterea deformanta pe faza 2
% Puterea deformanta pe faza 3

```

```

% nr. perioade
% Buclă perioadă

```

```

%
%
% Extragere matrice
% curenți și tensiuni
% pentru o perioadă
%

```

```

thi=sqrt(ti);
thu=sqrt(tu);
thpi=sqrt(tpi);
thpu=sqrt(tpu);

```

```

p1=0;
q1=0;
p2=0;
q2=0;
p3=0;
q3=0;
i1=0;
i2=0;
i3=0;
u1=0;
u2=0;
u3=0;

```

```

                Inițializare valori
                putere activă și reactivă
                pe cele trei faze

```

```

                Inițializare valori efective
                a curenților și tensiunilor
                pe cele trei faze

```

```

for i=1:51

```

```

    p1=p1+ua1(i)*ial(i)*cos(fu1(i)-fi1(i))/5000;
    q1=q1+ua1(i)*ial(i)*sin(fu1(i)-fi1(i))/5000;
    p2=p2+ua2(i)*ia2(i)*cos(fu2(i)-fi2(i))/5000;
    q2=q2+ua2(i)*ia2(i)*sin(fu2(i)-fi2(i))/5000;
    p3=p3+ua3(i)*ia3(i)*cos(fu3(i)-fi3(i))/5000;
    q3=q3+ua3(i)*ia3(i)*sin(fu3(i)-fi3(i))/5000;
    u1=u1+ua1(i)*ual(i)/5000;
    i1=i1+ial(i)*ial(i)/5000;
    u2=u2+ua2(i)*ua2(i)/5000;
    i2=i2+ia2(i)*ia2(i)/5000;
    u3=u3+ua3(i)*ua3(i)/5000;
    i3=i3+ia3(i)*ia3(i)/5000;

```

```

end

```

```

                Calcul valori putere
                activă și reactivă
                pe cele trei faze

```

```

% Calculul puterilor pentru o perioada

```

```

s1=s1+u1*i1;
s2=s2+u2*i2;
s3=s3+u3*i3;
pf1=pf1+p1*p1;
pf2=pf2+p2*p2;
pf3=pf3+p3*p3;
qf1=qf1+q1*q1;
qf2=qf2+q2*q2;
qf3=qf3+q3*q3;
d1=d1+u1*i1-p1*p1-q1*q1;
d2=d2+u2*i2-p2*p2-q2*q2;
d3=d3+u3*i3-p3*p3-q3*q3;

```

```

                Puterea aparenta pe faza 1
                Puterea aparenta pe faza 2
                Puterea aparenta pe faza 3
                Puterea activa pe faza 1
                Puterea activa pe faza 2
                Puterea activa pe faza 3
                Puterea reactiva pe faza 1
                Puterea reactiva pe faza 2
                Puterea reactiva pe faza 3
                Puterea deformanta pe faza 1
                Puterea deformanta pe faza 2
                Puterea deformanta pe faza 3

```

```

i1=sqrt(i1);
u1=sqrt(u1);
i2=sqrt(i2);
u2=sqrt(u2);
i3=sqrt(i3);
u3=sqrt(u3);

```

```

                Calcul valori efective
                a curenților și tensiunilor
                pe cele trei faze

```

```

% Calculul puterii active și reactive totale

```

```

for i=1:20

```

```

    pa1(i)=pa1(i)+ua1(i)*ial(i)*cos(fu1(i)-fi1(i))/12/5000;
    pa2(i)=pa2(i)+ua2(i)*ia2(i)*cos(fu2(i)-fi2(i))/12/5000;
    pa3(i)=pa3(i)+ua3(i)*ia3(i)*cos(fu3(i)-fi3(i))/12/5000;

```



```

thd_i(n)=thdi;
thd_u(n)=thdu;
thdp_i(n)=thdpi;
thdp_u(n)=thdpu;
end
fiss1=fopen('d:\manu\teza\puteri\s1.txt','w');
fiss2=fopen('d:\manu\teza\puteri\s2.txt','w');
fiss3=fopen('d:\manu\teza\puteri\s3.txt','w');
fisp1=fopen('d:\manu\teza\puteri\p1.txt','w');
fisp2=fopen('d:\manu\teza\puteri\p2.txt','w');
fisp3=fopen('d:\manu\teza\puteri\p3.txt','w');
fisq1=fopen('d:\manu\teza\puteri\q1.txt','w');
fisq2=fopen('d:\manu\teza\puteri\q2.txt','w');
fisq3=fopen('d:\manu\teza\puteri\q3.txt','w');
fisd1=fopen('d:\manu\teza\puteri\d1.txt','w');
fisd2=fopen('d:\manu\teza\puteri\d2.txt','w');
fisd3=fopen('d:\manu\teza\puteri\d3.txt','w');
fis51=fopen('d:\manu\teza\puteri\p1_arm.txt','w');
fis52=fopen('d:\manu\teza\puteri\p2_arm.txt','w');
fis53=fopen('d:\manu\teza\puteri\p3_arm.txt','w');
fis61=fopen('d:\manu\teza\puteri\q1_arm.txt','w');
fis62=fopen('d:\manu\teza\puteri\q2_arm.txt','w');
fis63=fopen('d:\manu\teza\puteri\q3_arm.txt','w');
fis7=fopen('d:\manu\teza\puteri\thd_i.txt','w');
fis8=fopen('d:\manu\teza\puteri\thd_u.txt','w');
fis9=fopen('d:\manu\teza\puteri\thdp_i.txt','w');
fis10=fopen('d:\manu\teza\puteri\thdp_u.txt','w');
fis11=fopen('d:\manu\teza\puteri\i1.txt','w');
fis12=fopen('d:\manu\teza\puteri\i2.txt','w');
fis13=fopen('d:\manu\teza\puteri\i3.txt','w');
fis14=fopen('d:\manu\teza\puteri\u1.txt','w');
fis15=fopen('d:\manu\teza\puteri\u2.txt','w');
fis16=fopen('d:\manu\teza\puteri\u3.txt','w');
for n=1:1200
fprintf(fiss1,'%f\n',p_ap1(n));
fprintf(fiss2,'%f\n',p_ap2(n));
fprintf(fiss3,'%f\n',p_ap3(n));
fprintf(fisp1,'%f\n',p_ac1(n));
fprintf(fisp2,'%f\n',p_ac2(n));
fprintf(fisp3,'%f\n',p_ac3(n));
fprintf(fisq1,'%f\n',p_re1(n));
fprintf(fisq2,'%f\n',p_re2(n));
fprintf(fisq3,'%f\n',p_re3(n));
fprintf(fisd1,'%f\n',p_def1(n));
fprintf(fisd2,'%f\n',p_def2(n));
fprintf(fisd3,'%f\n',p_def3(n));

for i=1:20
fprintf(fis51,'%f\t',p1_arm(i,n));
fprintf(fis52,'%f\t',p2_arm(i,n));
fprintf(fis53,'%f\t',p3_arm(i,n));
fprintf(fis61,'%f\t',q1_arm(i,n));
fprintf(fis62,'%f\t',q2_arm(i,n));
fprintf(fis63,'%f\t',q3_arm(i,n));
fprintf(fis11,'%f\t',ilarm(i,n));
fprintf(fis12,'%f\t',i2arm(i,n));
fprintf(fis13,'%f\t',i3arm(i,n));
fprintf(fis14,'%f\t',ularm(i,n));
fprintf(fis15,'%f\t',u2arm(i,n));
fprintf(fis16,'%f\t',u3arm(i,n));
end

```

\*  
\* Salvare valori  
\* coeficienți  
\* de distorsiune

Fișiere  
puteri  
Fișiere puteri  
în regim deformant  
Fișiere  
coeficienți  
distorsiune

Fișiere  
armonici  
de curent  
și de tensiune

Salvare date  
obținute  
în urma  
prelucrării

în fișiere



```
fprintf(fis51, '\n');
fprintf(fis52, '\n');
fprintf(fis53, '\n');
fprintf(fis61, '\n');
fprintf(fis62, '\n');
fprintf(fis63, '\n');
fprintf(fis11, '\n');
fprintf(fis12, '\n');
fprintf(fis13, '\n');
fprintf(fis14, '\n');
fprintf(fis15, '\n');
fprintf(fis16, '\n');
fprintf(fis7, '%f\n', thd_i(n));
fprintf(fis8, '%f\n', thd_u(n));
fprintf(fis9, '%f\n', thdp_i(n));
fprintf(fis10, '%f\n', thdp_u(n));
end
```

```
fclose(fiss1); fclose(fiss2); fclose(fiss3);
fclose(fispl); fclose(fisp2); fclose(fisp3);
fclose(fisq1); fclose(fisq2); fclose(fisq3);
fclose(fisd1); fclose(fisd2); fclose(fisd3);
fclose(fis51); fclose(fis52); fclose(fis53);
fclose(fis61); fclose(fis62); fclose(fis63);
fclose(fis7); fclose(fis8); fclose(fis9);
fclose(fis10); fclose(fis11); fclose(fis12);
fclose(fis13); fclose(fis14); fclose(fis15);
fclose(fis16);
```



```

for x=4:11
    l=x*100;
i1m=1000*semn_01(1:l+99,5)';
i2m=1000*semn_01(1:l+99,6)';
i3m=1000*semn_01(1:l+99,7)';

u1m=1000*semn_01(1:l+99,11)';
u2m=1000*semn_02(1:l+99,2)';
u3m=1000*semn_02(1:l+99,3)';

N=100;
f=[0:N/2]*fe/N;
frecv=f(2:20);

    it1m=fft(i1m)/(N/2*sqrt(2));
    ialm=abs(it1m);
    film=angle(it1m);
    ialm=ialm(1:51);
    it2m=fft(i2m)/(N/2*sqrt(2));
    ia2m=abs(it2m);
    fi2m=angle(it2m);
    ia2m=ia2m(1:51);
    it3m=fft(i3m)/(N/2*sqrt(2));
    ia3m=abs(it3m);
    fi3m=angle(it3m);
    ia3m=ia3m(1:51);

    ut1m=fft(u1m)/(N/2*sqrt(2));
    ualm=abs(ut1m);
    fulm=angle(ut1m);
    ualm=ualm(1:51);
    ut2m=fft(u2m)/(N/2*sqrt(2));
    ua2m=abs(ut2m);
    fu2m=angle(ut2m);
    ua2m=ua2m(1:51);
    ut3m=fft(u3m)/(N/2*sqrt(2));
    ua3m=abs(ut3m);
    fu3m=angle(ut3m);
    ua3m=ua3m(1:51);

    ih=ih+(it1m+it2m+it3m)/24;
    id=id+(it1m+a*it2m+a*a*it3m)/24;
    ii=ii+(it1m+a*a*it2m+a*it3m)/24;
    uh=uh+(ut1m+ut2m+ut3m)/24;
    ud=ud+(ut1m+a*ut2m+a*a*ut3m)/24;
    ui=ui+(ut1m+a*a*ut2m+a*ut3m)/24;
    Iah=Iah+abs(ih)/8;
    Iad=Iad+abs(id)/8;
    Iai=Iai+abs(ii)/8;
    Uah=Uah+abs(uh)/8;
    Uad=Uad+abs(ud)/8;
    Uai=Uai+abs(ui)/8;
    fih=fih+angle(ih)/8;
    fid=fid+angle(id)/8;
    fii=fii+angle(ii)/8;
    fuh=fuh+angle(uh)/8;
    fui=fui+angle(ui)/8;
    fud=fud+angle(ud)/8;
end

```

extragere 100 de esantioane  
din esantioanele de curent si  
de tensiune

Calcul transformata Fourier pentru  
esantioanele de curent si tensiune

Calcul valori efective si defazaje  
pentru esantioanele de curent si de  
tensiune

Extragere 50 armonici  
obtinute prin aplicarea transformatei  
Fourier

Calculul componentelor simetrice  
ale curentului si tensiunii in  
complex

Calculul valorilor efective ale  
componentelor simetrice pentru  
curent si tensiune

Calculul defazajelor  
componentelor simetrice  
ale curentului si tensiunii

```

p=1;
while (p<=13)
  if (p~=3)&(p~=9)
    p=p+1;
    q=p-1
    fazor_i=[it1m(p),it2m(p),it3m(p)];
    fazor_u=[ut1m(p),ut2m(p),ut3m(p)];
    fazor_id=[id(p),a*id(p),a*a*id(p)];
    fazor_ii=[ii(p),a*ii(p),a*a*ii(p)];
    fazor_ih=[ih(p),ih(p),ih(p)];
    subplot(2,4,1);
    compass(fazor_i,'r');grid;title('I (curentul)');
    subplot(2,4,5);
    compass(fazor_u);grid;title('U (tensiunea)');
    subplot(2,4,2);
    compass(fazor_id,'r');grid;title('I direct');
    subplot(2,4,3);
    compass(fazor_ii,'r');grid;title('I invers');
    subplot(2,4,4);
    compass(fazor_ih,'r');grid;title('I homopolar');
    fazor_ud=[ud(p),a*ud(p),a*a*ud(p)];
    fazor_ui=[ui(p),a*ui(p),a*a*ui(p)];
    fazor_uh=[uh(p),uh(p),uh(p)];
    subplot(2,4,6);
    compass(fazor_ud);grid;title('U direct ');
    subplot(2,4,7);
    compass(fazor_ui);grid;title('U invers ');
    subplot(2,4,8);
    compass(fazor_uh);grid;title('U homopolar ');
    I1=it1m(p) ;
    I1e=abs(I1);
    I2=it2m(p) ;
    I2e=abs(I2);
    I3=it3m(p) ;
    I3e=abs(I3);
    Ih=ih(p) ;
    Ihe=abs(Ih);
    Id=id(p) ;
    Ide=abs(Id);
    Ii=ii(p) ;
    Iie=abs(Ii)
    kni=abs(ii(p))/abs(id(p))
    knu=abs(ui(p))/abs(ud(p))
    gama_u1=u1m(p)/abs(ud(2));
    gama_u2=ua2m(p)/abs(ud(2));
    gama_u3=ua3m(p)/abs(ud(2));
    gama_i1=ia1m(p)/abs(id(2));
    gama_i2=ia2m(p)/abs(id(2));
    gama_i3=ia3m(p)/abs(id(2));

    * valoarea curentului pe faza 1 in complex
    * valoarea efectiva a curentului pe faza 1
    * valoarea curentului pe faza 2 in complex
    * valoarea efectiva a curentului pe faza 2
    * valoarea curentului pe faza 3 in complex
    * valoarea efectiva a curentului pe faza 3
    * valoarea curentului homopolar in complex
    * valoarea efectiva a curentului homopolar
    * valoarea curentului direct in complex
    * valoarea efectiva a curentului direct
    * valoarea curentului invers in complex
    * valoarea efectiva a curentului invers
    * coeficientul de disimetrie al curentului
    * coeficientul de disimetrie al tensiunii
    * nivelul armonicii tensiunii pe faza 1
    * nivelul armonicii tensiunii pe faza 2
    * nivelul armonicii tensiunii pe faza 3
    * nivelul armonicii curentului pe faza 1
    * nivelul armonicii curentului pe faza 2
    * nivelul armonicii curentului pe faza 3

    Reprezentarea
    grafica a
    fazorilor
    tensiunii si
    curentului pentru
    fundamentala
    si armonicile
    5,7,11 si 13

fprintf(fis,'Armonica %d\n',q);

fprintf(fis,'I1=%.4f+%.4fiI1e=%.4f\nI2=%.4f+%.4fiI2e=%.4f\nI3=%.4f+%.4fiI3e=
%.4f\n',real(I1),imag(I1),I1e,real(I2),imag(I2),I2e,real(I3),imag(I3),I3e);

fprintf(fis,'Id=%.4f+%.4fiIde=%.4f\nIi=%.4f+%.4fiIie=%.4f\nIh=%g+%giIhe=%g\n
',real(Id),imag(Id),Ide,real(Ii),imag(Ii),Iie,real(Ih),imag(Ih),Ihe);

fprintf(fis,'kni= %.4f knu= %.4f\n',kni,knu);

```

```

fprintf(fis, 'Nivelul armonicilor de tensiune pe fazele 1,2,3 \n %.5f %.5f
%.5f \n', gama_ul, gama_u2, gama_u3);

fprintf(fis, 'Nivelul armonicilor de curent pe fazele 1,2,3 \n %.5f %.5f %.5f
\n', gama_il, gama_i2, gama_i3);
pause;
p=p-1;
end
    p=p+2;
end

kps=cos(fud(2)-fid(2))           % factorul de putere fundamental

kpn=(Uai(2)*Iai(2)*cos(fui(2)-fii(2))+Uah(2)*Iah(2)*cos(fuh(2)-
fih(2)))/Uad(2)/Iad(2)         % factor de putere nesimetric
kpd=0;

for i=3:51
kpd=kpd+ualm(i)*ialm(i)*cos(fulm(i)-film(i))+ua2m(i)*ia2m(i)*cos(fu2m(i)-
fi2m(i))+ua3m(i)*ia3m(i)*cos(fu3m(i)-fi3m(i));
end

kpd=kpd/Uad(2)/Iad(2)/3        % factor de putere deformant
kp=kps+kpn+kpd                 % factorul de putere

fprintf(fis, 'Factorii de putere \n');
fprintf(fis, 'Factorul de putere fundamental: %g\n', kps);           % salvare
fprintf(fis, 'Factorul de putere nesimetric: %g\n', kpn);           % rezultate
fprintf(fis, 'Factorul de putere deformant: %g\n', kpd);           % in fisier
fprintf(fis, 'Factorul de putere : %g\n', kp);                       %

    pm=0;
    qm=0;
    ilem=0;
    ulem=0;
    i2em=0;
    u2em=0;
    i3em=0;
    u3em=0;

for k=2:51

pm=pm+(ualm(k)*ialm(k)*cos(fulm(k)-film(k))+ua2m(k)*ia2m(k)*cos(fu2m(k)-
fi2m(k))+ua3m(k)*ia3m(k)*cos(fu3m(k)-fi3m(k)));
qm=qm+(ualm(k)*ialm(k)*sin(fulm(k)-film(k))+ua2m(k)*ia2m(k)*sin(fu2m(k)-
fi2m(k))+ua3m(k)*ia3m(k)*sin(fu3m(k)-fi3m(k)));

ulem=ulem+ualm(k)*ualm(k); %
ilem=ilem+ialm(k)*ialm(k); % Calculul puterilor activa si reactiva
u2em=u2em+ua2m(k)*ua2m(k); % calculul sumei patratelor curentilor si
i2em=i2em+ia2m(k)*ia2m(k); % tensiunilor pe cele trei faze pentru
u3em=u3em+ua3m(k)*ua3m(k); % primele 50 de armonici
i3em=i3em+ia3m(k)*ia3m(k); %
end

I=sqrt((ilem+i2em+i3em)/3); % calculul valorilor efective
U=sqrt((ulem+u2em+u3em)/3); % ale curentului si tensiunii

I1=sqrt((ialm(2)*ialm(2)+ia2m(2)*ia2m(2)+ia3m(2)*ia3m(2))/3); % valoare
U1=sqrt((ualm(2)*ualm(2)+ua2m(2)*ua2m(2)+ua3m(2)*ua3m(2))/3); % efectiva a
% fundamentalei

```

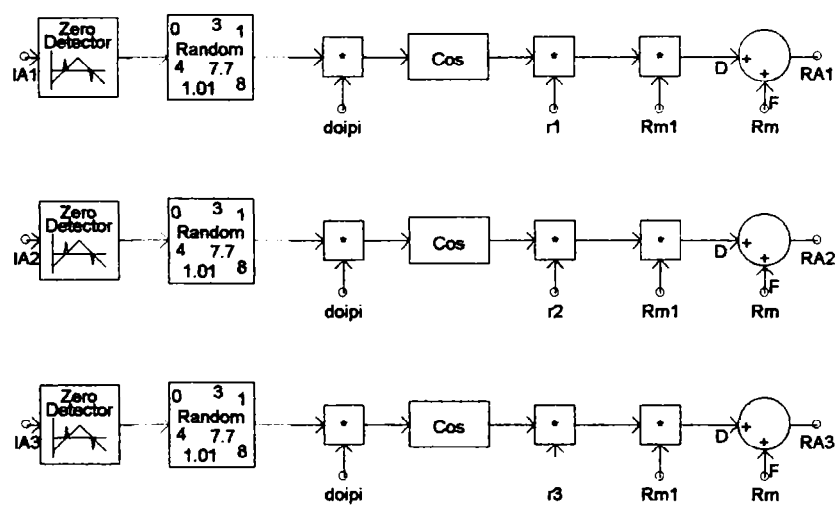
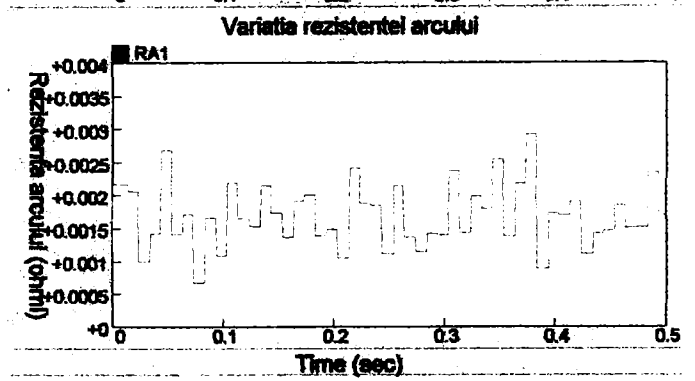
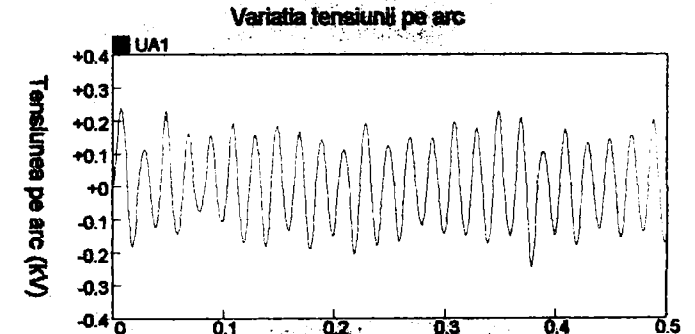
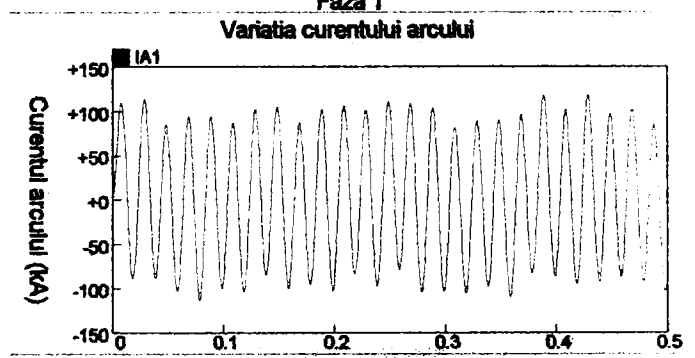
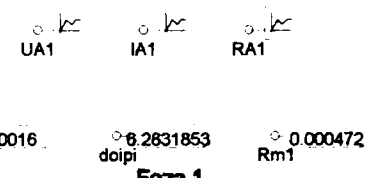
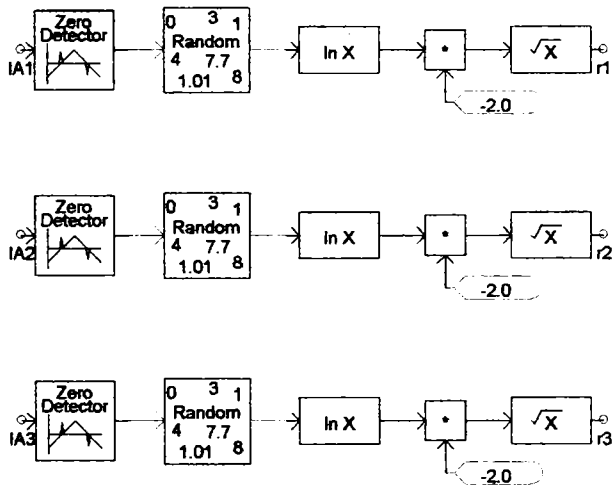
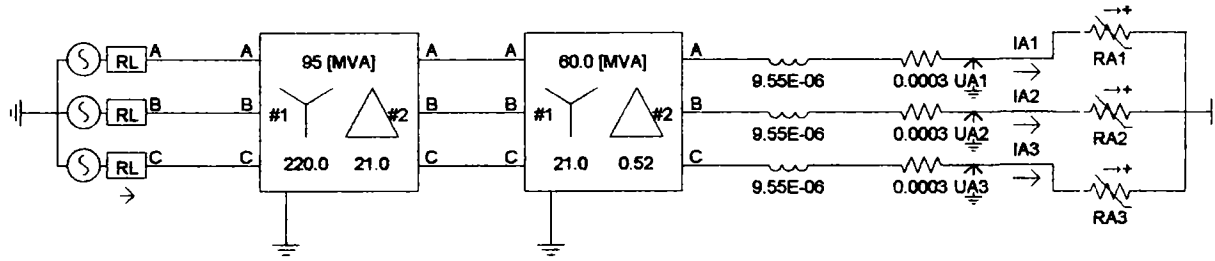




Modelul bazat pe variatia aleatoare a rezistentei arcului electric.

ANEXA II.1

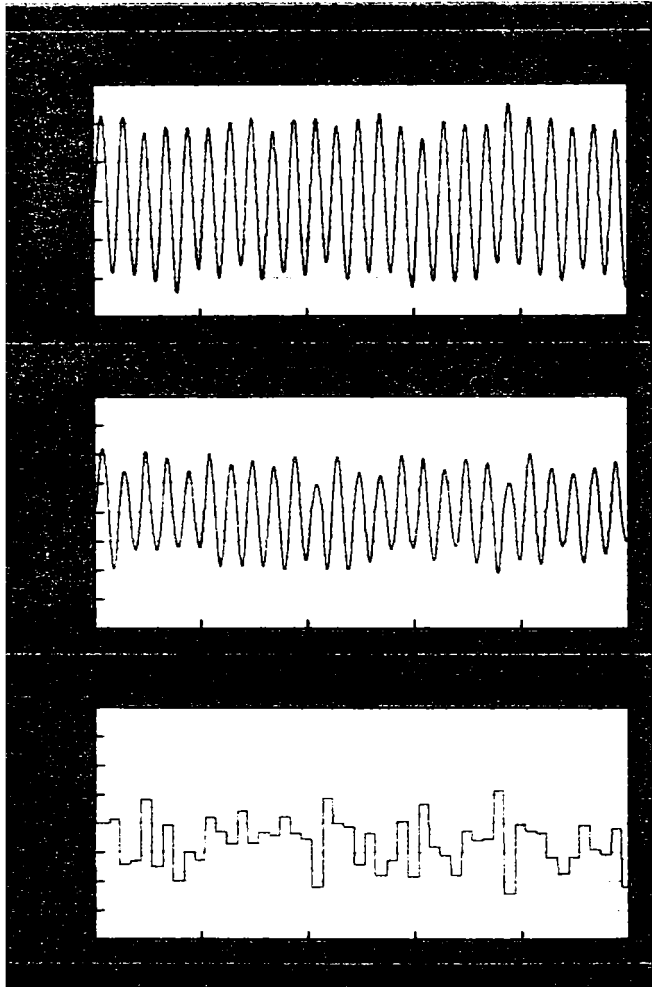
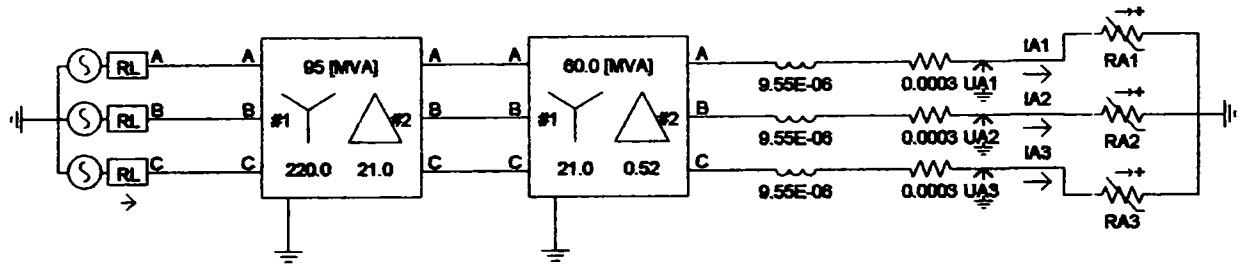
Varianta 1.



Modelul bazat pe variatia aleatorie a rezistentei arcului electric.

ANEXA II.2

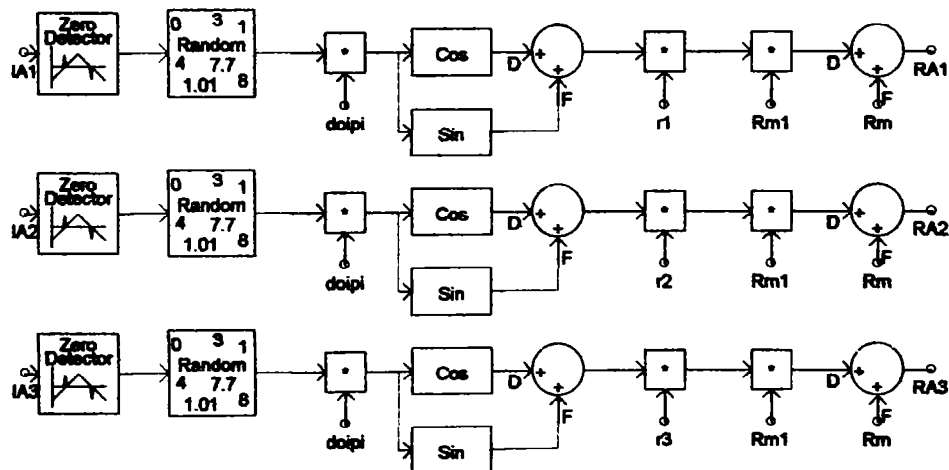
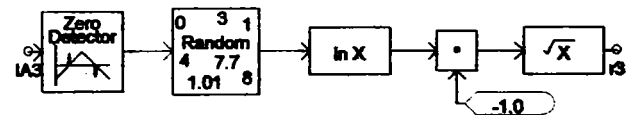
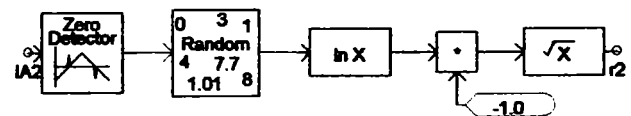
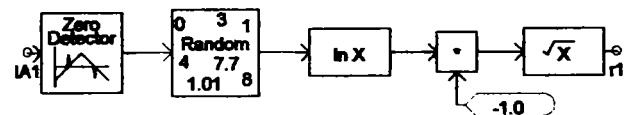
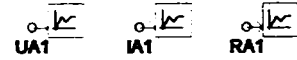
Varianta 2.



0.000472  
Rm1

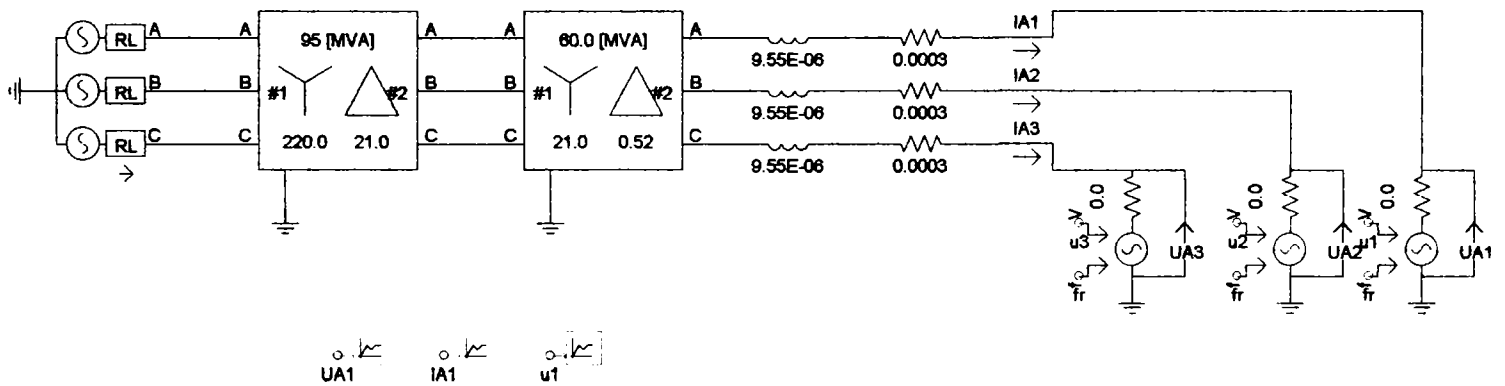
6.2831853  
doipi

0.0019  
Rm



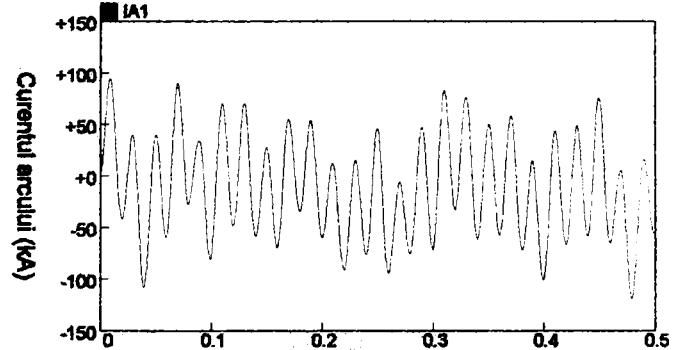
Modelul bazat pe variatia aleatoare a tensiunii arcului electric.  
Varianta 1.

ANEXA II.3

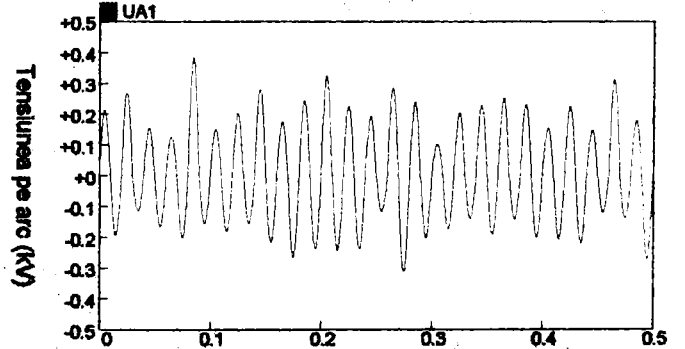


Faza 1

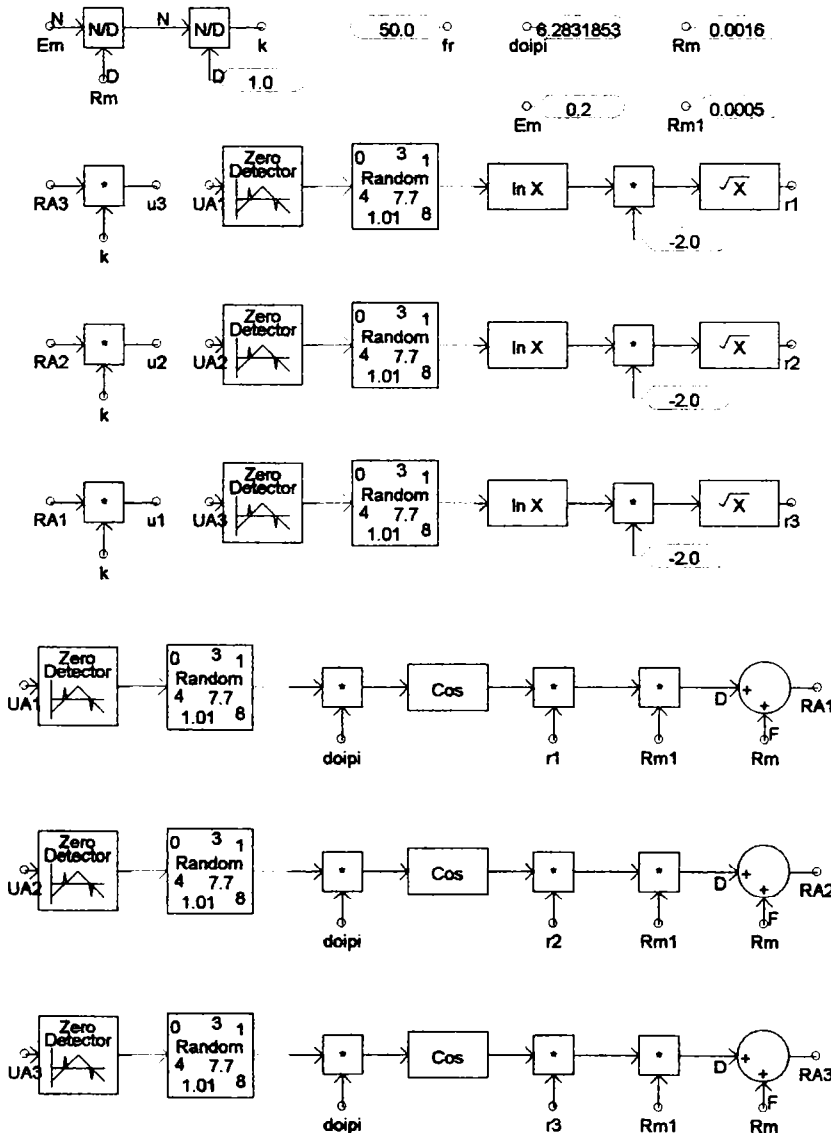
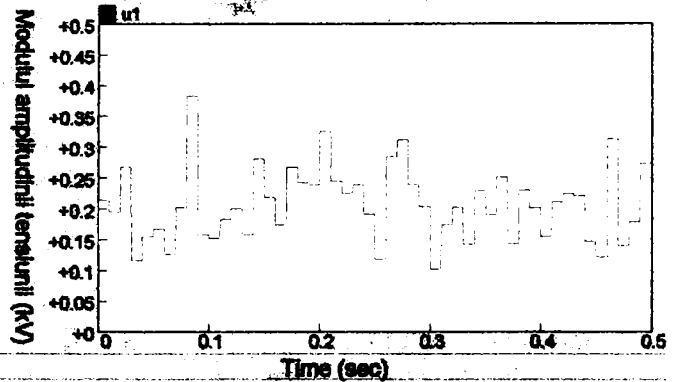
Variatia curentului arcului



Variatia tensiunii pe arc

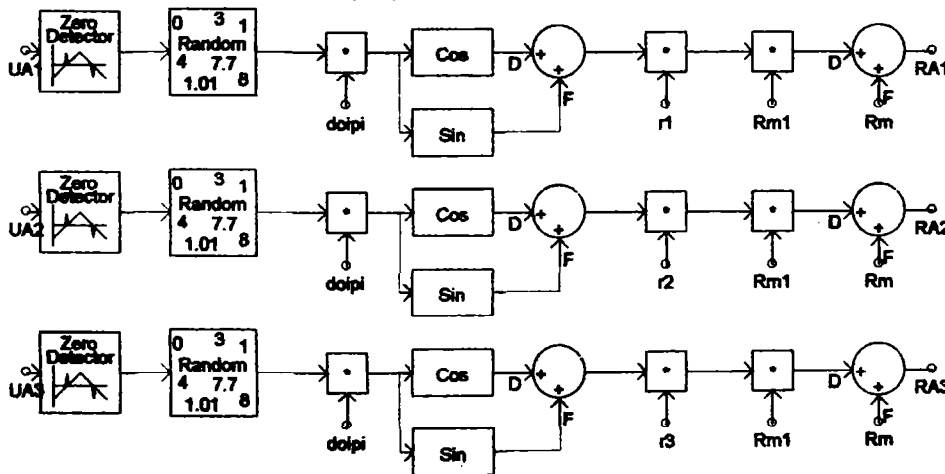
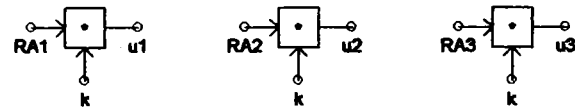
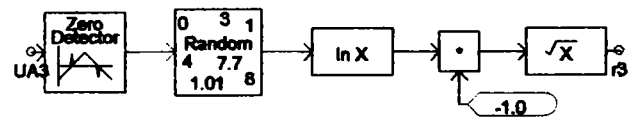
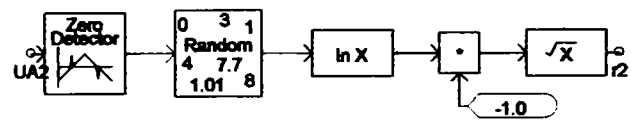
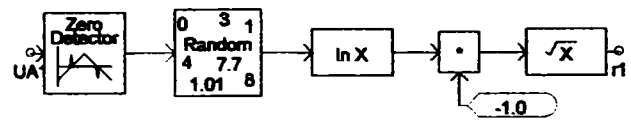
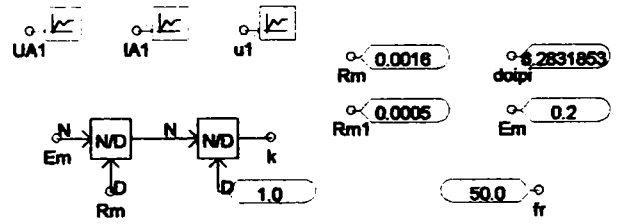
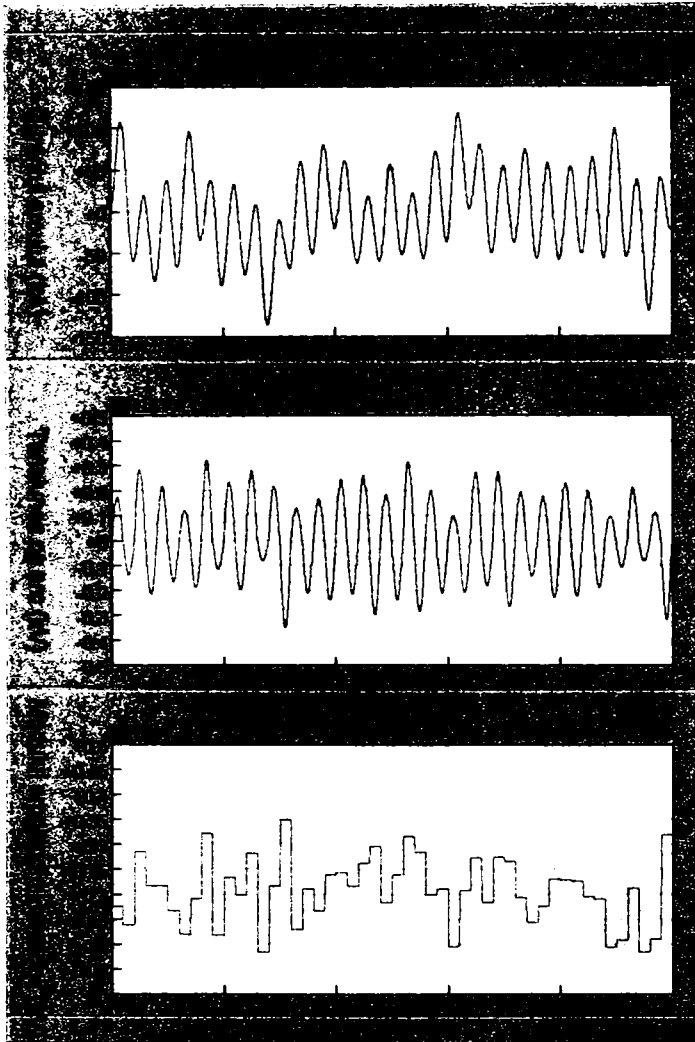
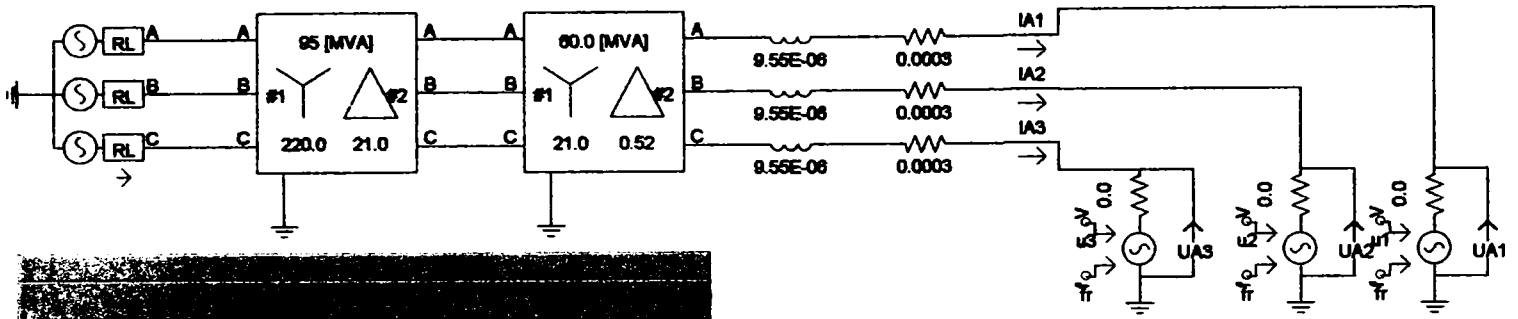


Ampitudinea tensiunii



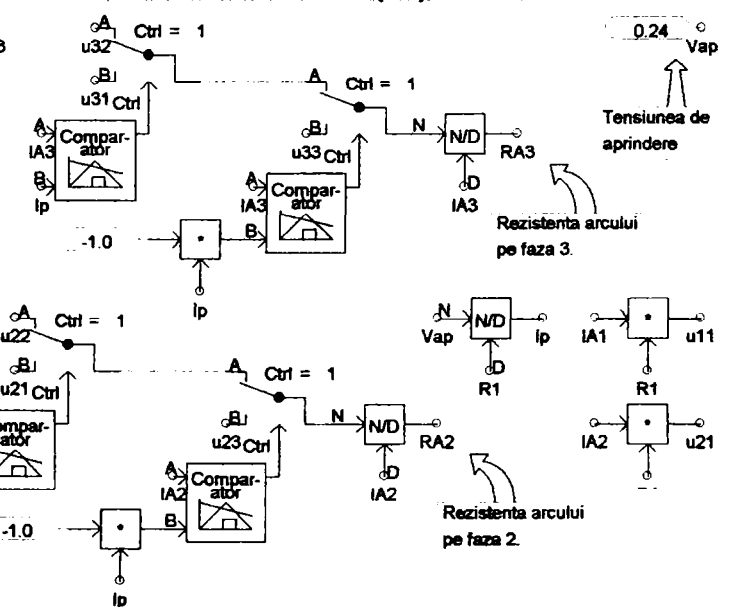
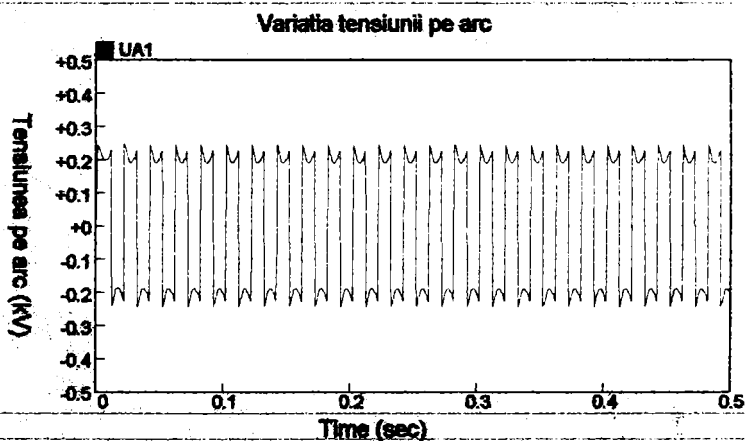
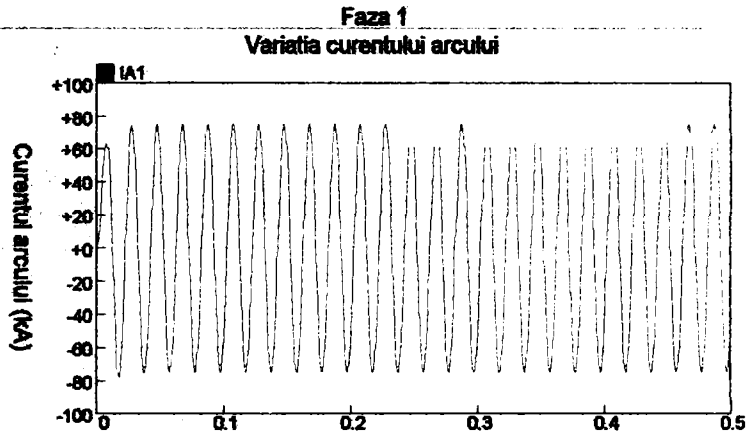
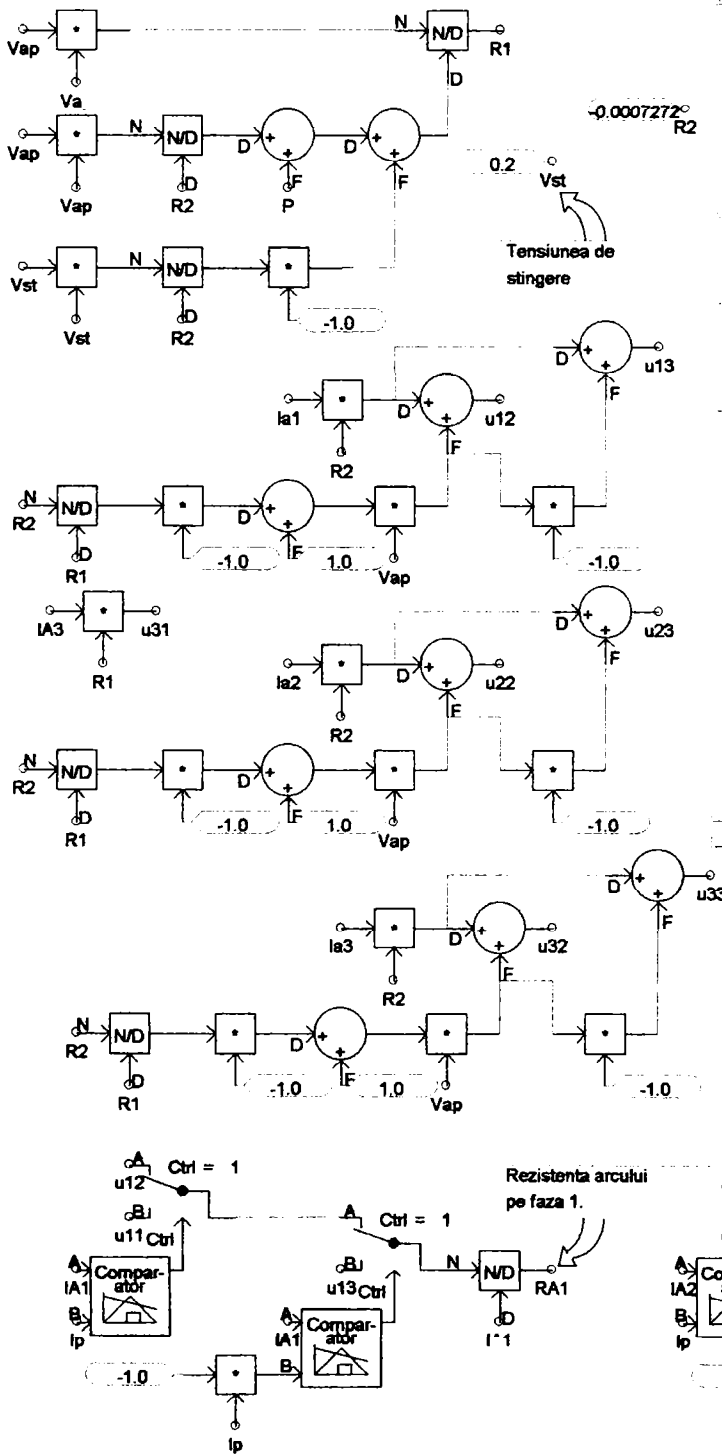
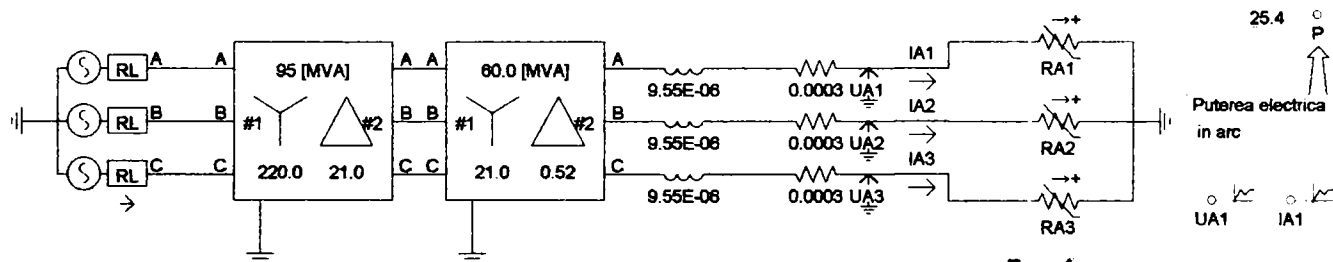
Modelul bazat pe variatia aleatorie a  
tensiunii arcului electric.  
Varianta 2.

ANEXA II.4



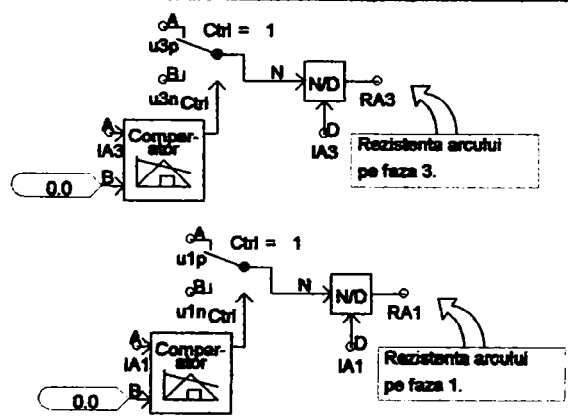
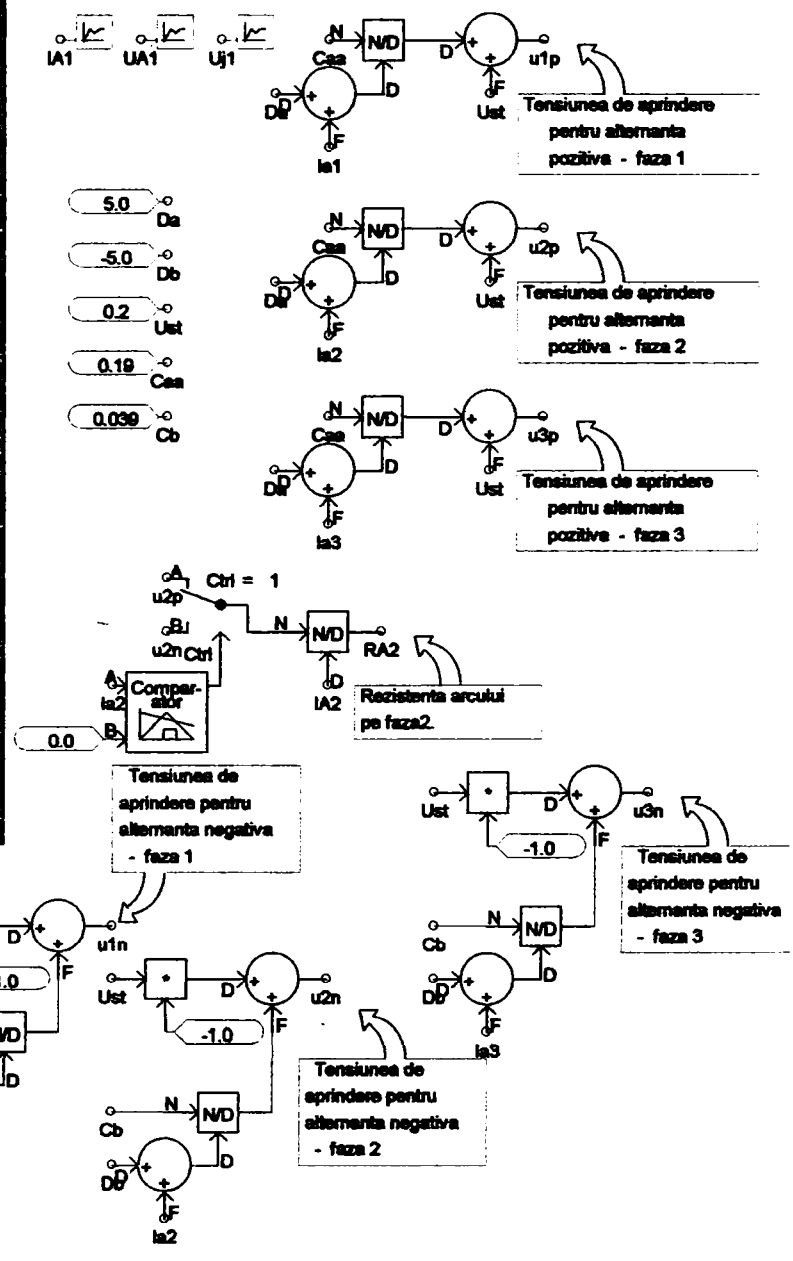
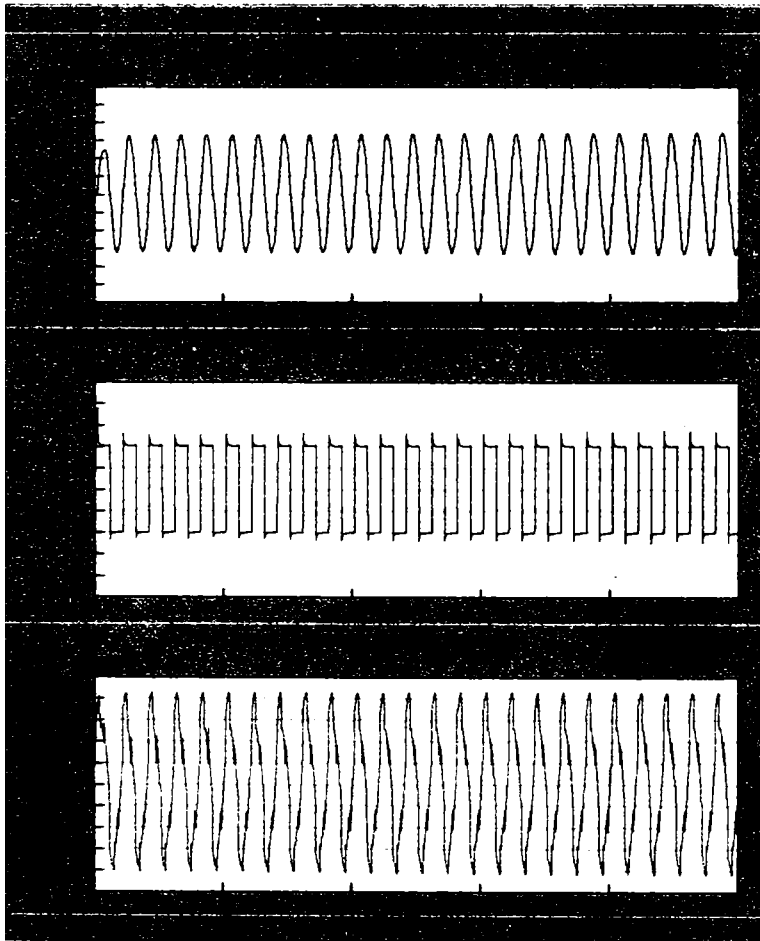
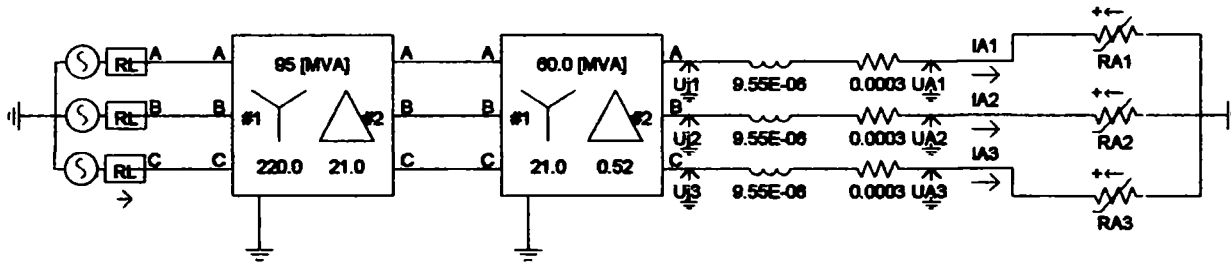
Modelarea rezistenței arcului  
bazată pe caracteristica  
dinamică a arcului.

ANEXA II. 5.



Modelul bazat pe relatii intre lungimea arcului, tensiunea si curentul arcului, lungimea arcului fiind constanta

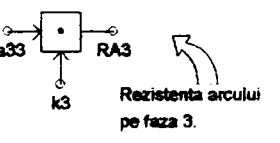
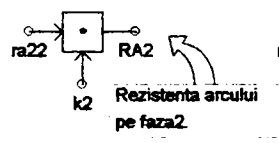
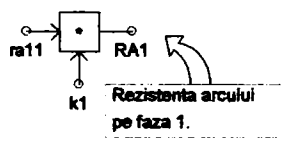
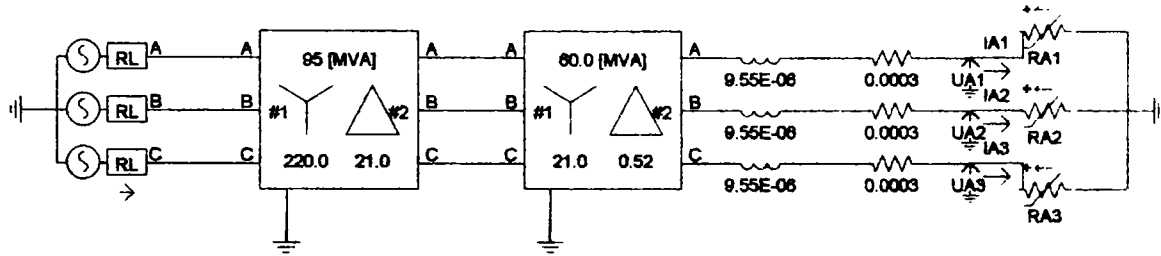
ANEXA II.6



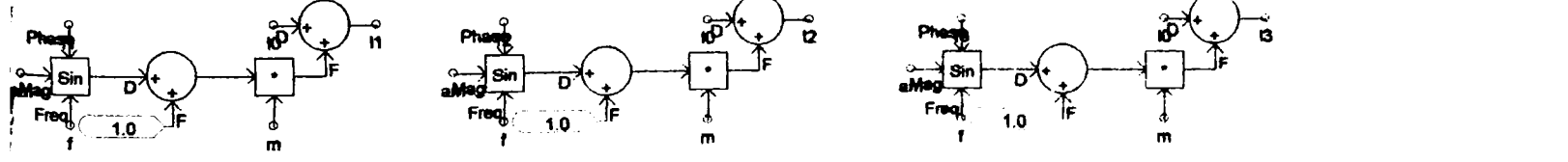
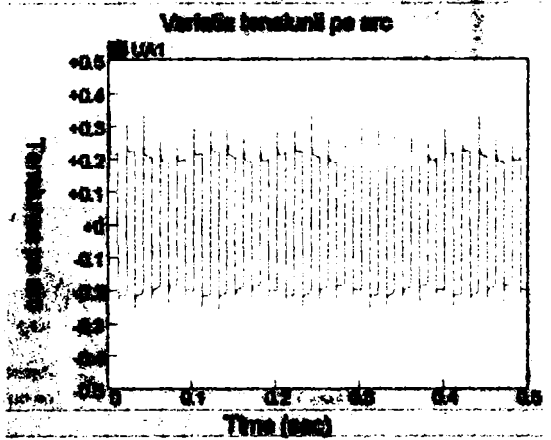
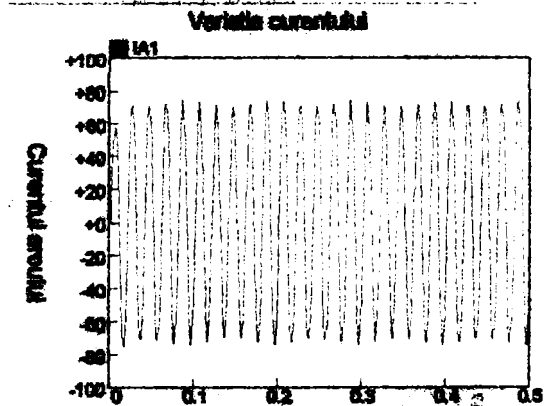
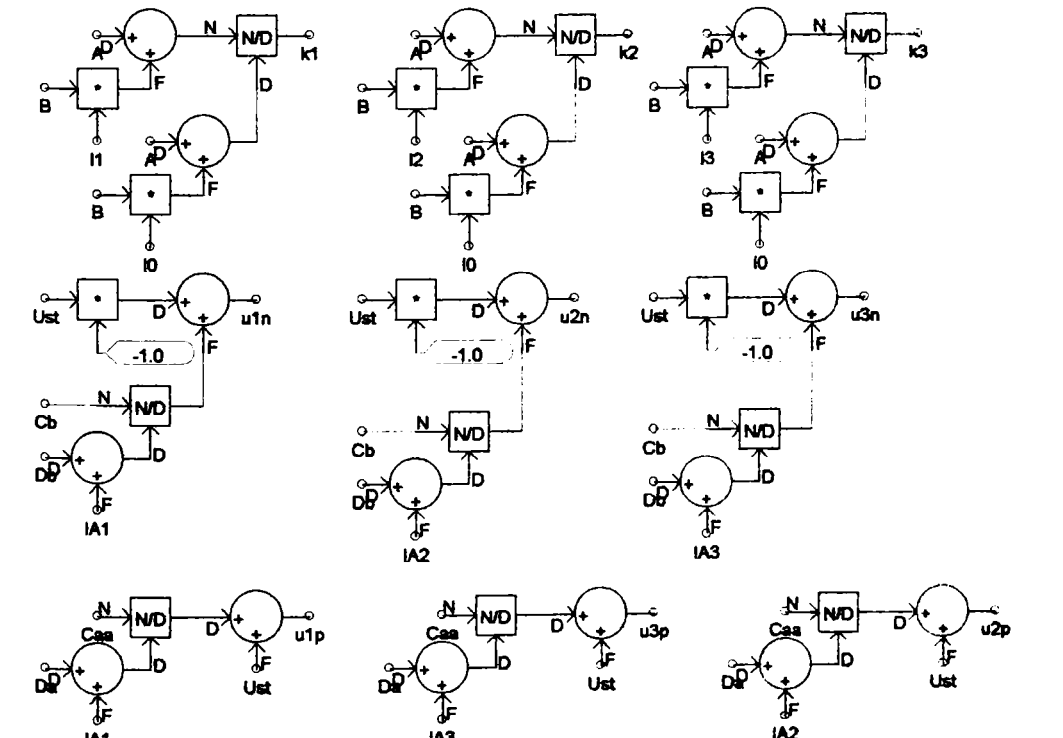
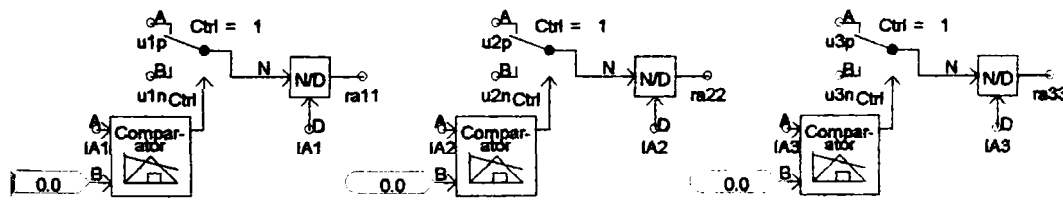


Modelul bazat pe caracteristica dinamica a arcului, in care lungimea arcului are o variatie sinusoidata in timp

ANEXA II.7

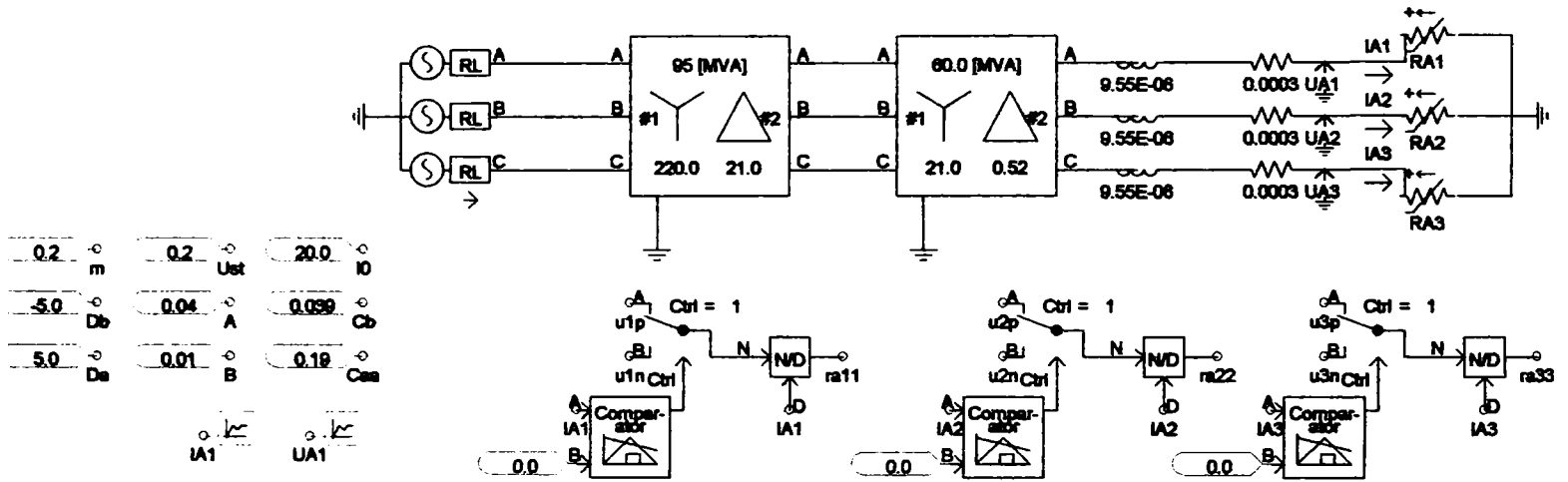


0.2	Ust	20.0	0.2	m	-120.0	f2
0.19	Caa	0.04	0.0	f1	120.0	f3
0.039	Cb	0.01	10.0	am		
5.0	Da	-5.0	10.0	f		

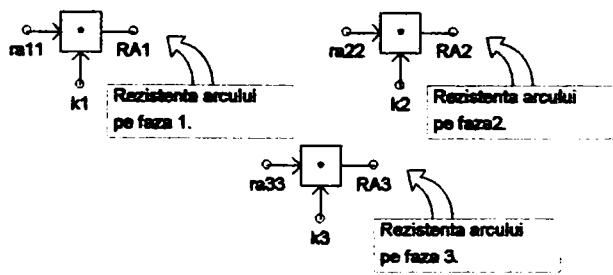
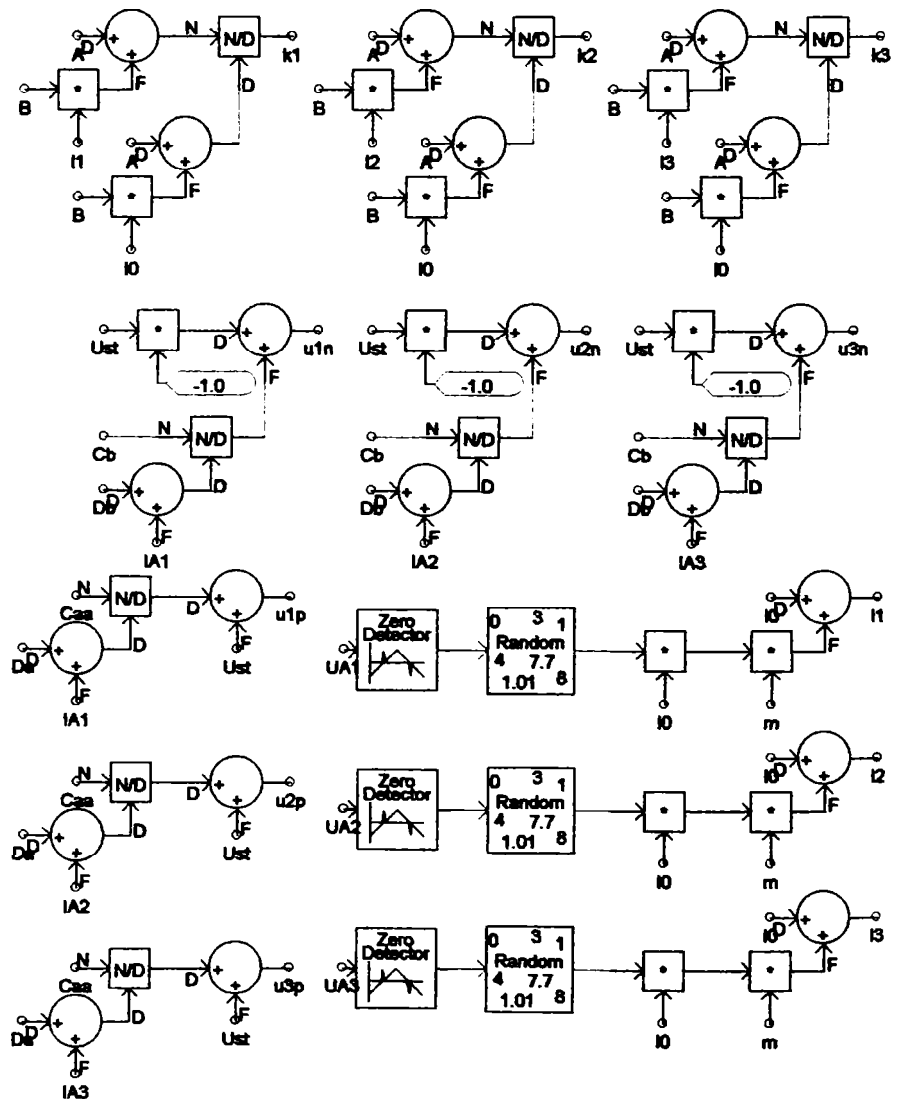
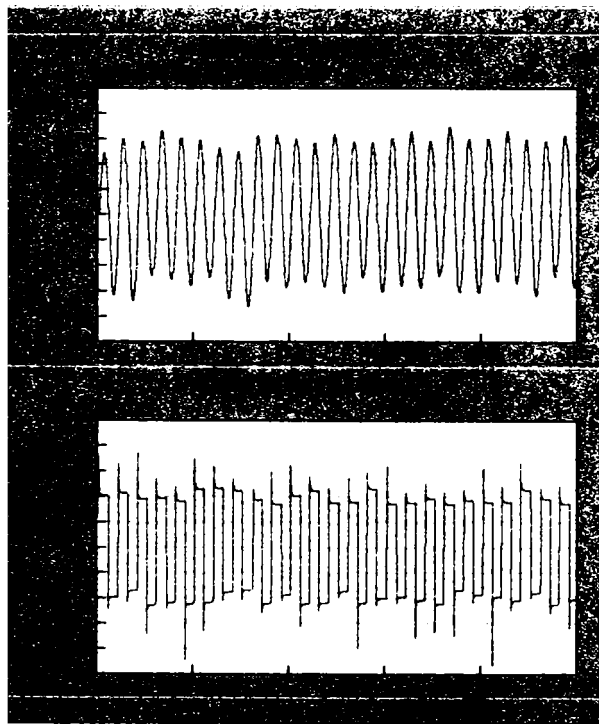


Modelul bazat pe relații între lungimea arcului, curentul și tensiunea pe arc în care lungimea arcului are o variație aleatoare în timp

ANEXA II 8

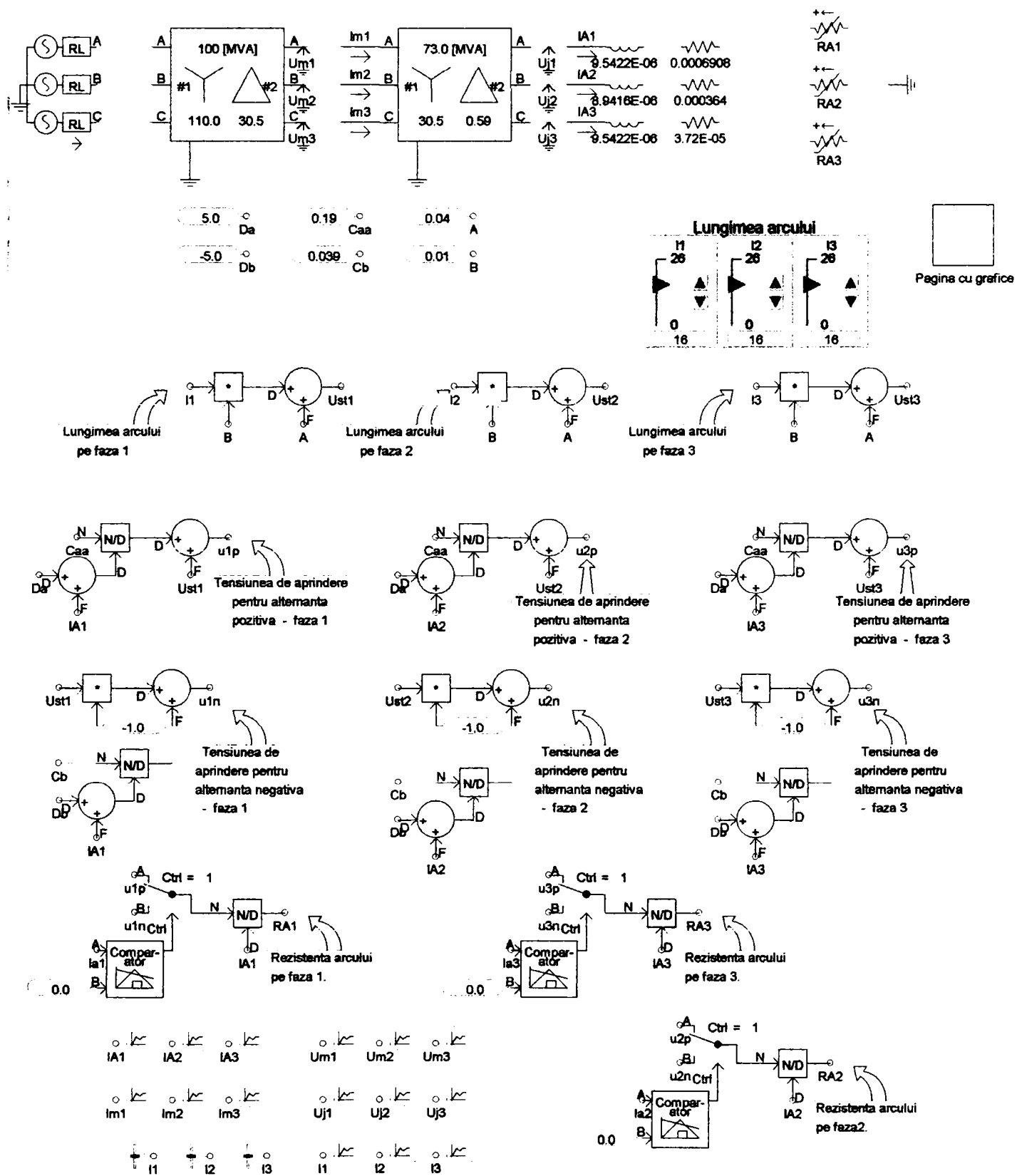


- 0.2 m
- 0.2 Ust
- 20.0 ID
- 5.0 Db
- 0.04 A
- 0.039 Cb
- 5.0 De
- 0.01 B
- 0.19 Cab
- IA1
- UA1

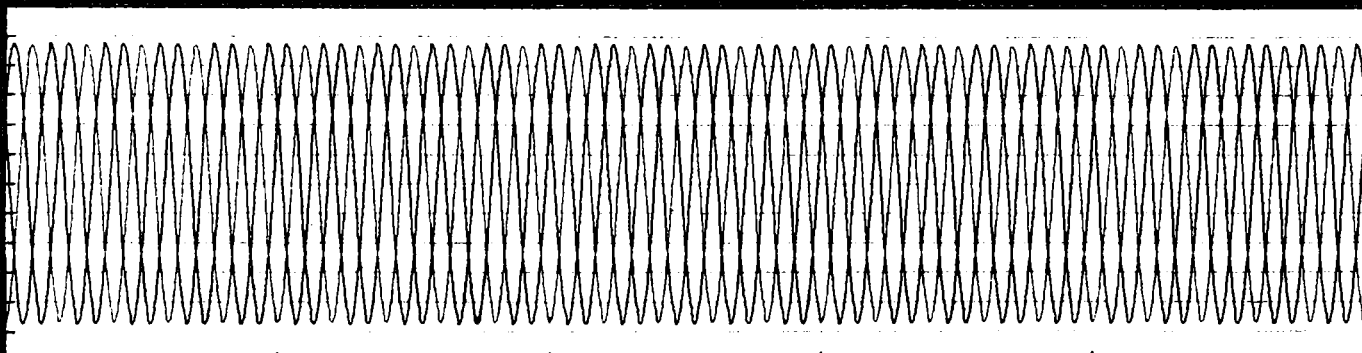
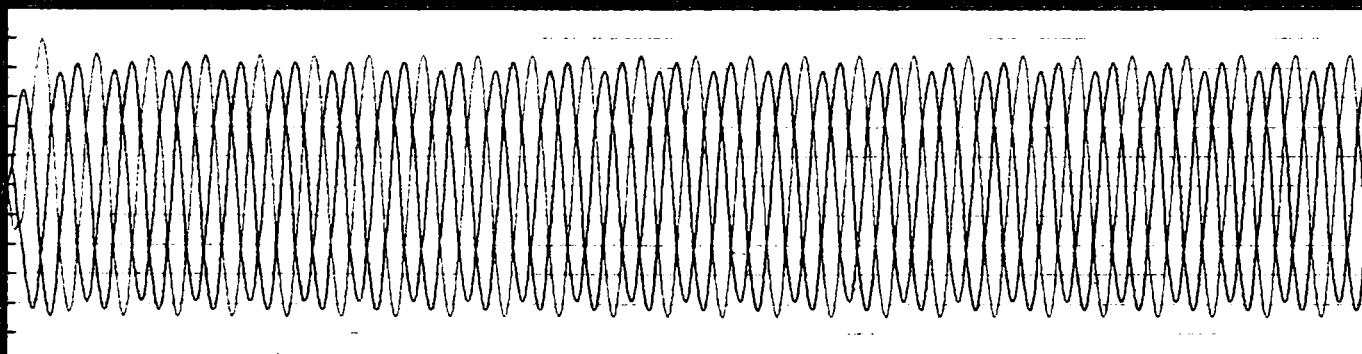
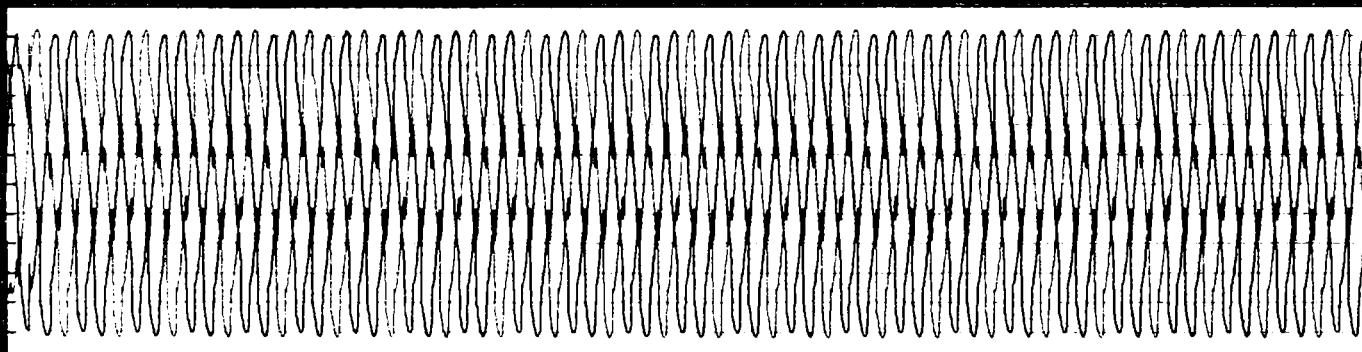
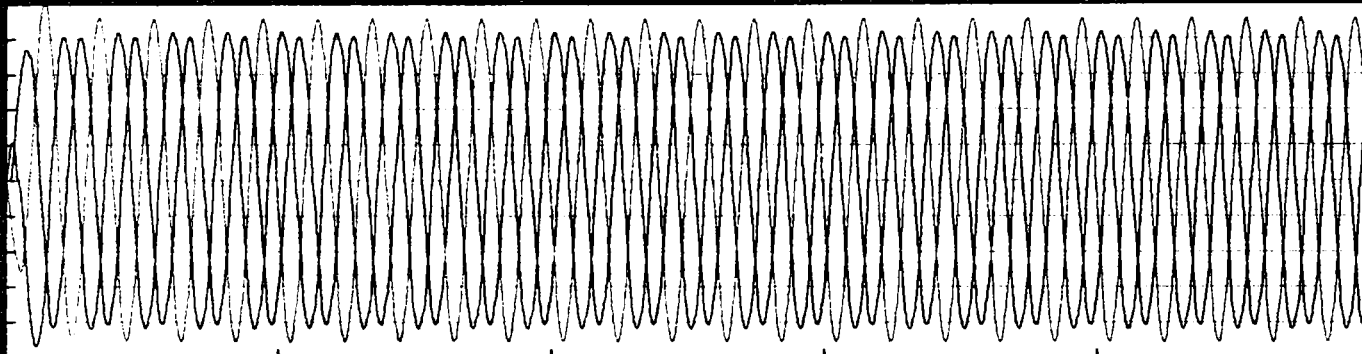


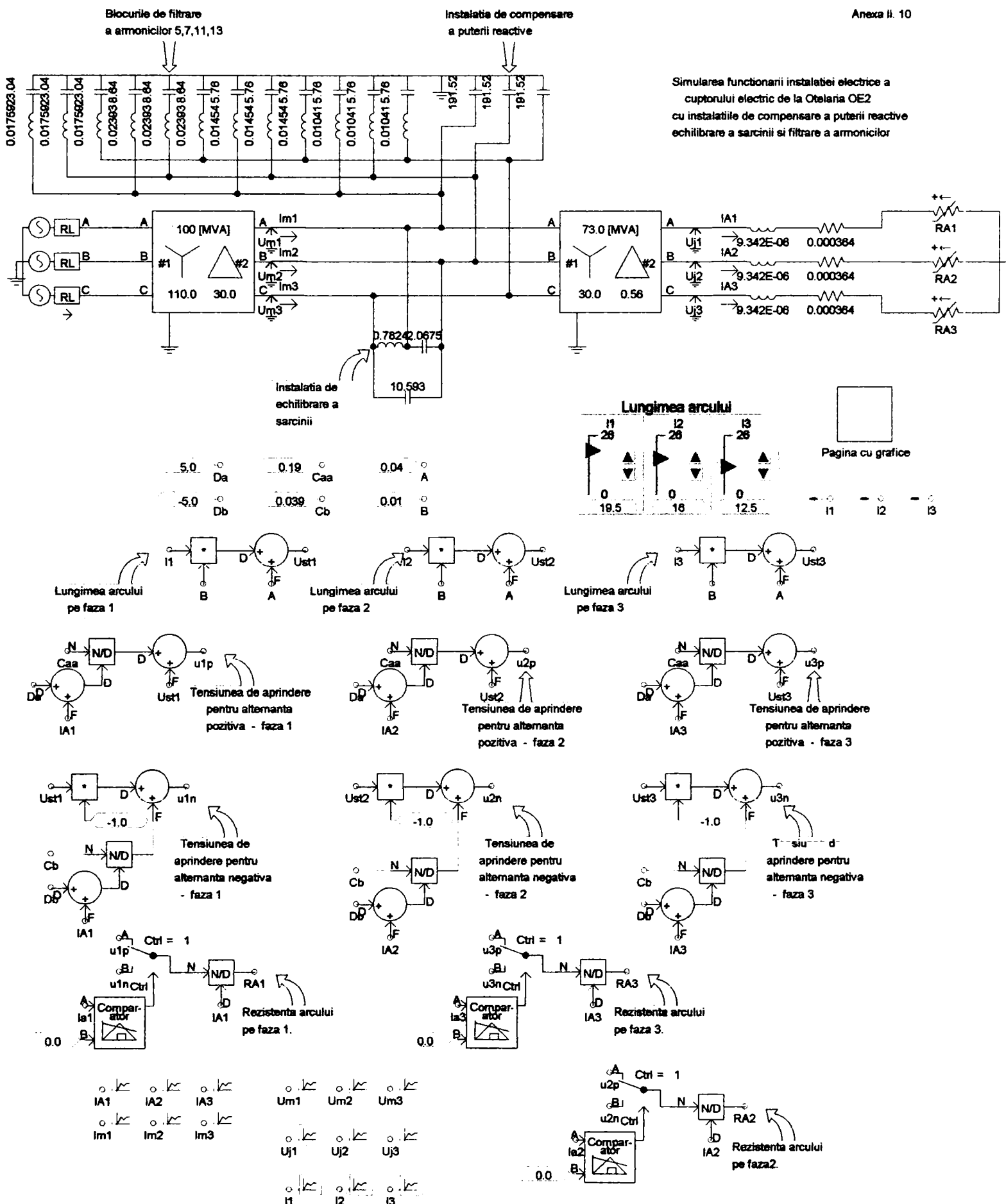
Simularea funcționării instalației electrice a  
 cuptorului electric de la Oțelăria OE2 necompensată  
 cu modelul bazat pe relații între tensiunea,  
 curentul și lungimea arcului

ANEXA II.9



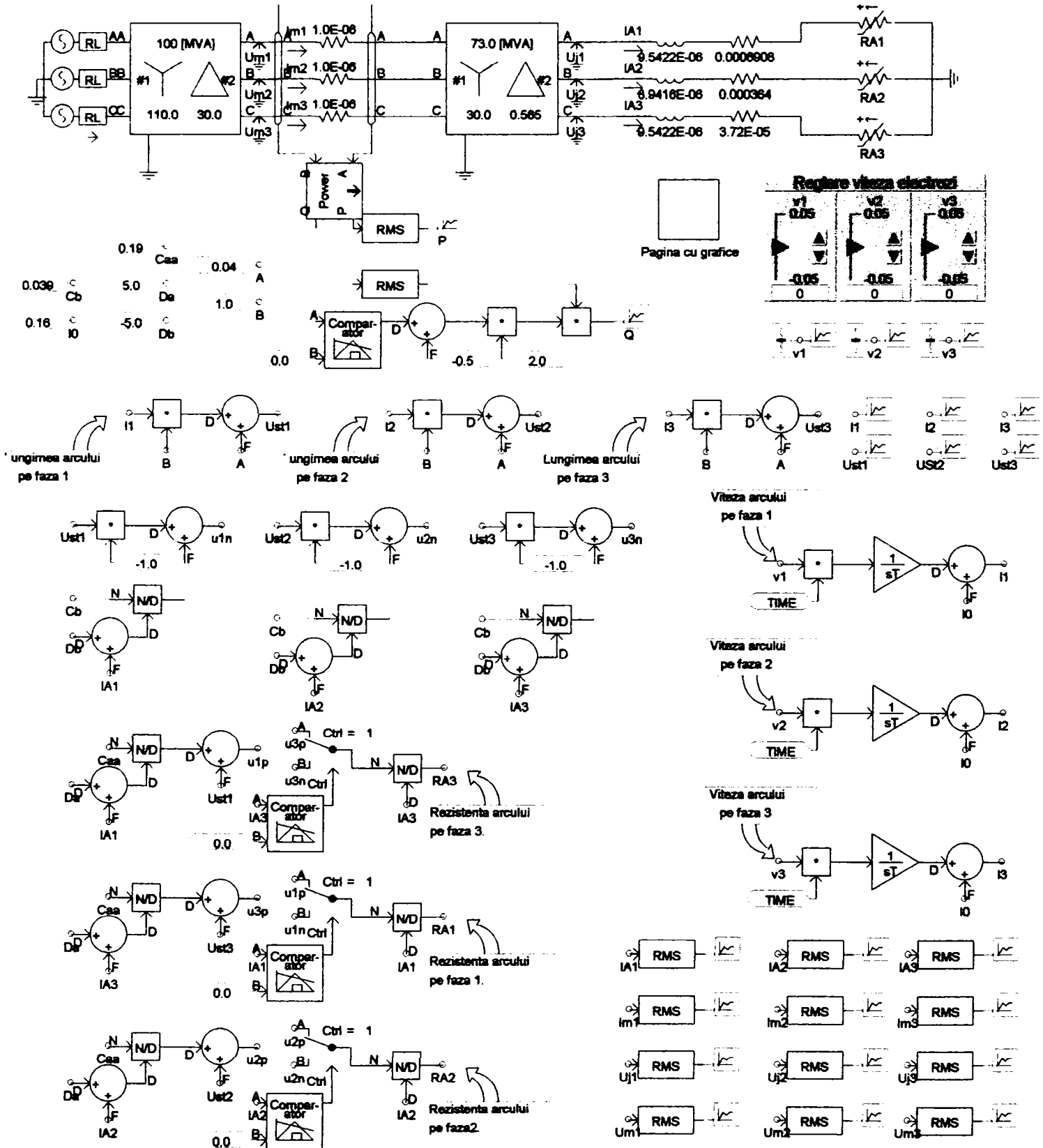
Anexa 8.9  
Pagina cu grafice



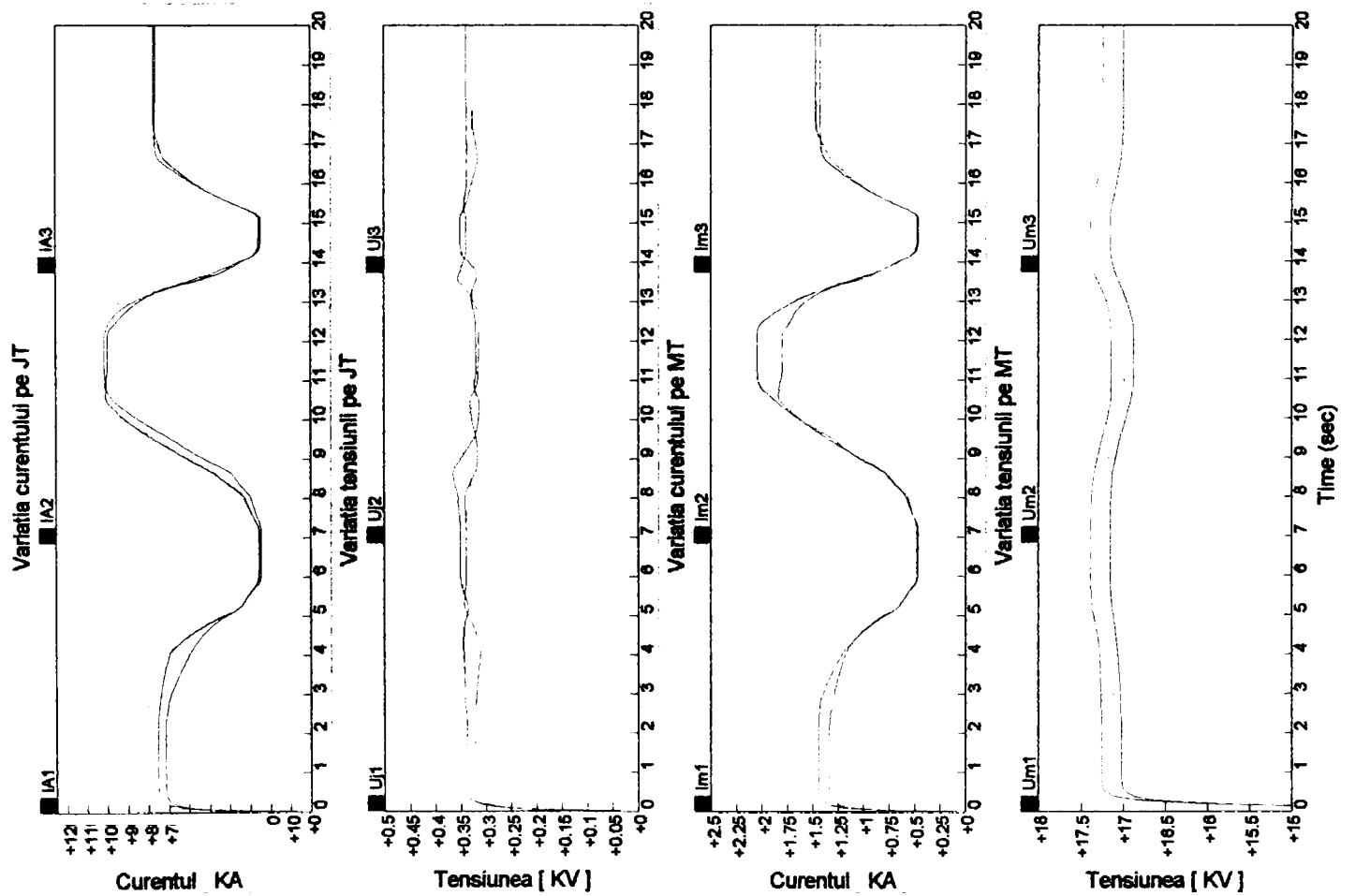
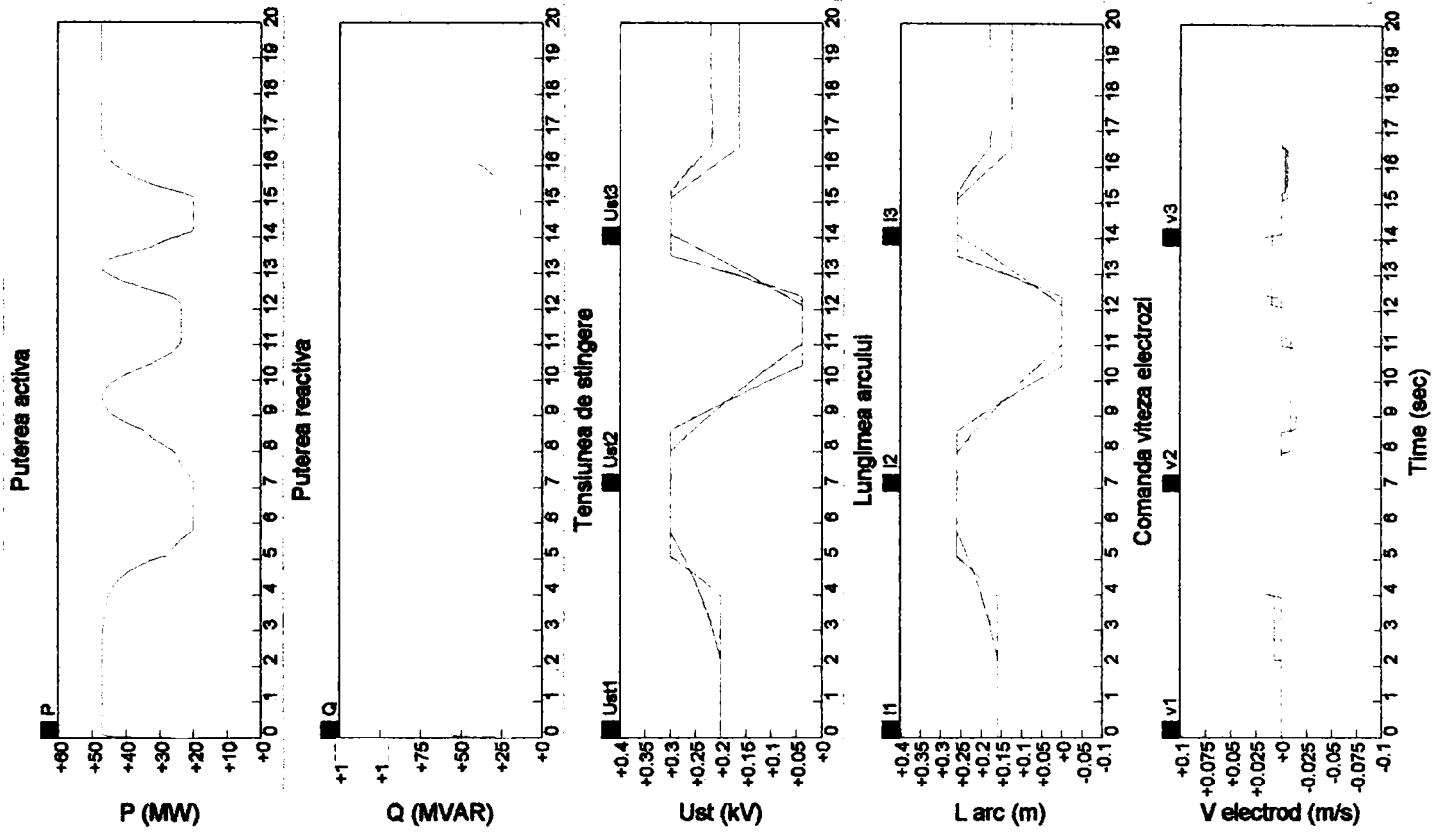


Simularea funcționării instalației actuale cuptorului cu arc electric de la Otelaria OE2 prin reglarea poziției electrozilor

ANEXA II.11

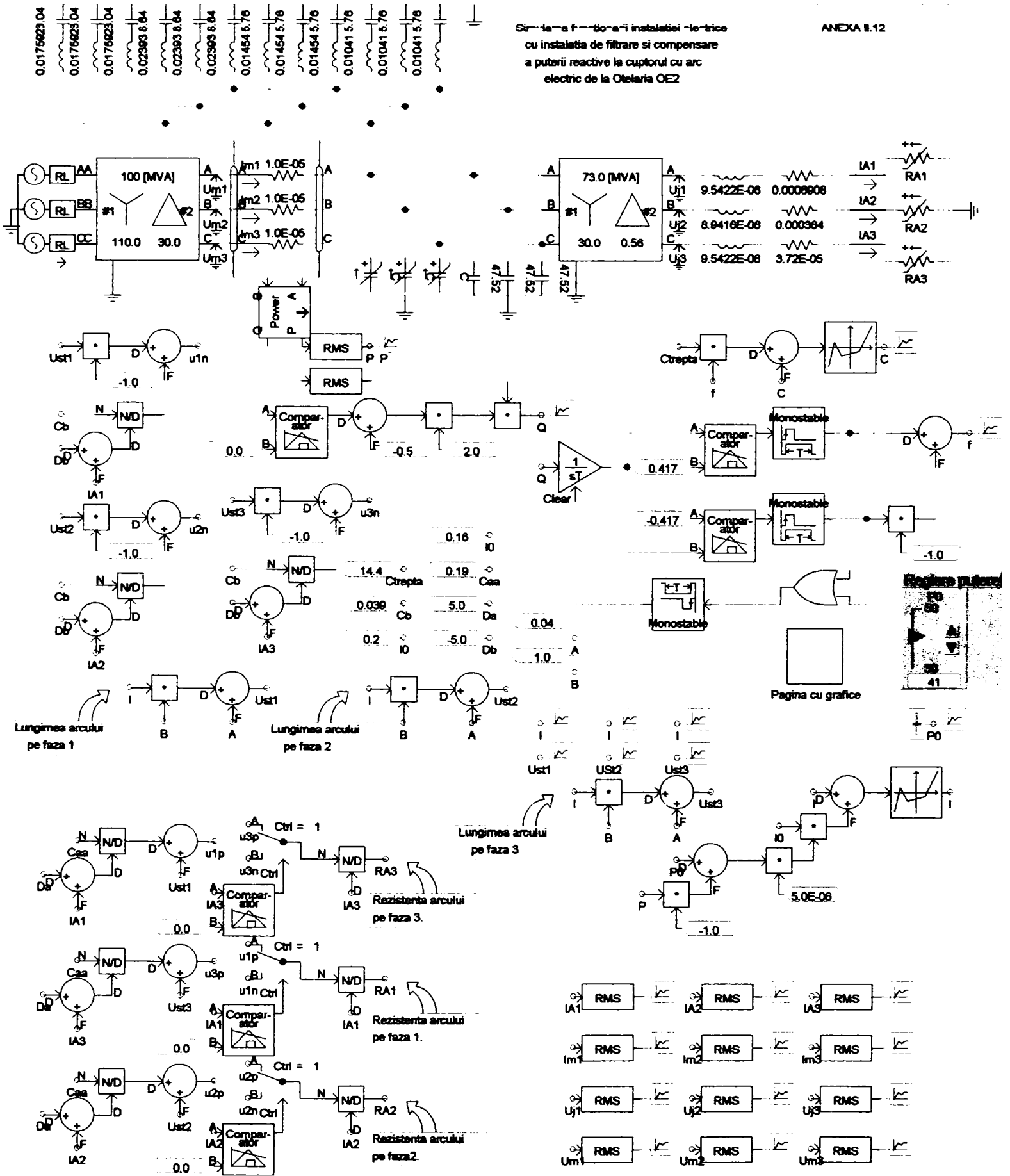




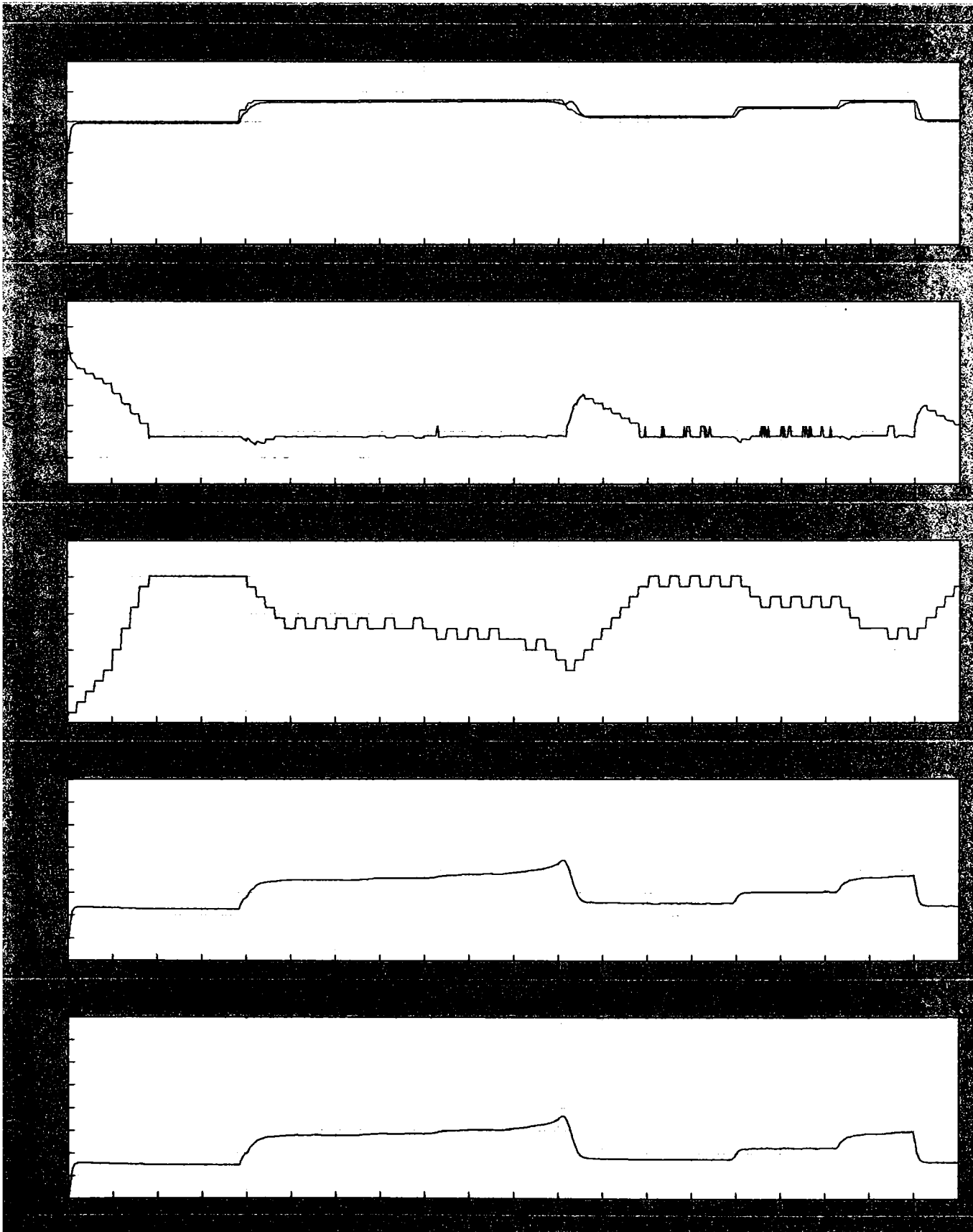


Sistemul de funcționare a instalației electrice cu instalația de filtrare și compensare a puterii reactive la cuplul cu arc electric de la Otelaria OE2

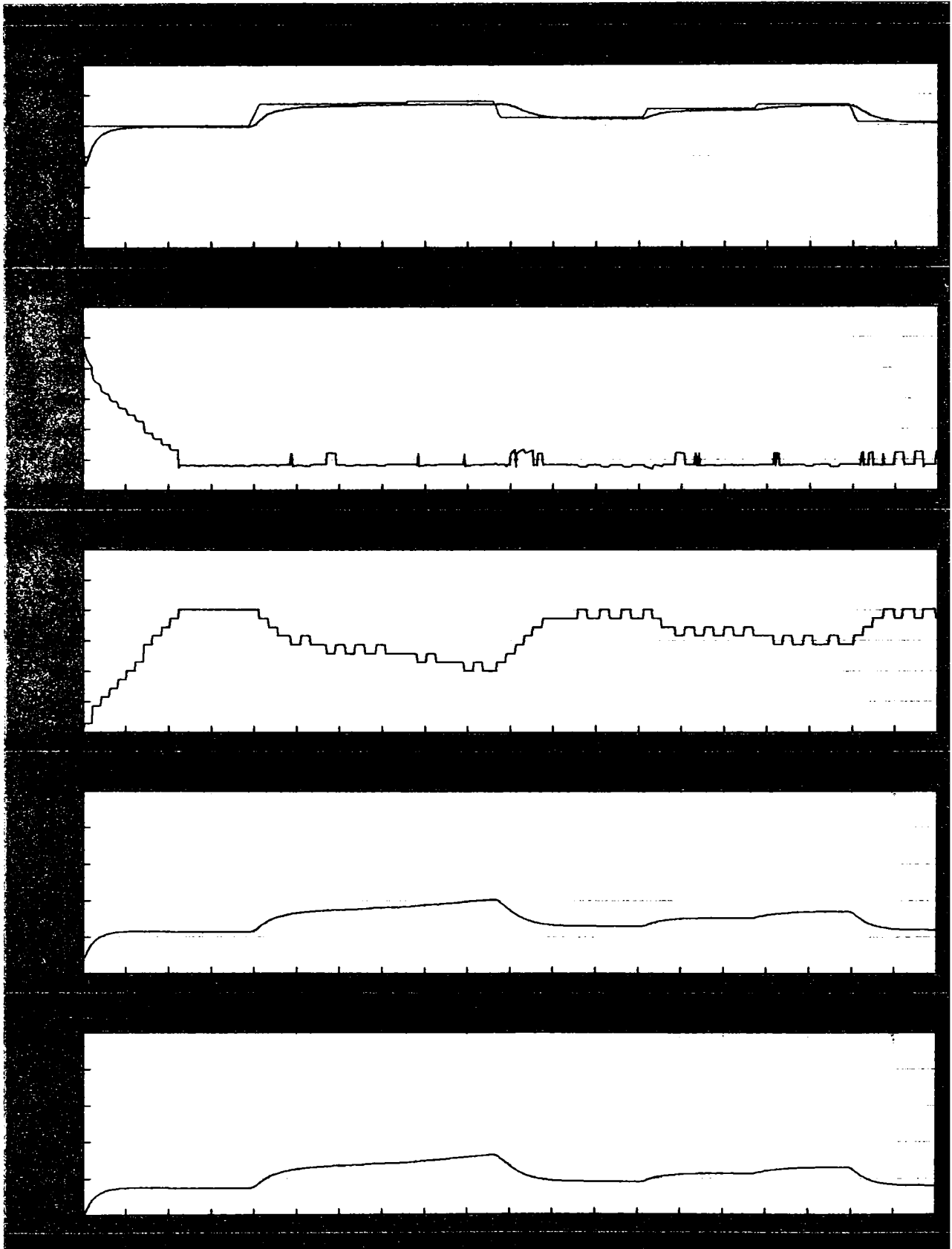
ANEXA II.12



Anexa II.12  
Pagina cu grafice  
alfa = 0.00001



Anexa B. 12  
Pagina cu grafice  
alfa = 0.000001





## ANEXA IV.1.

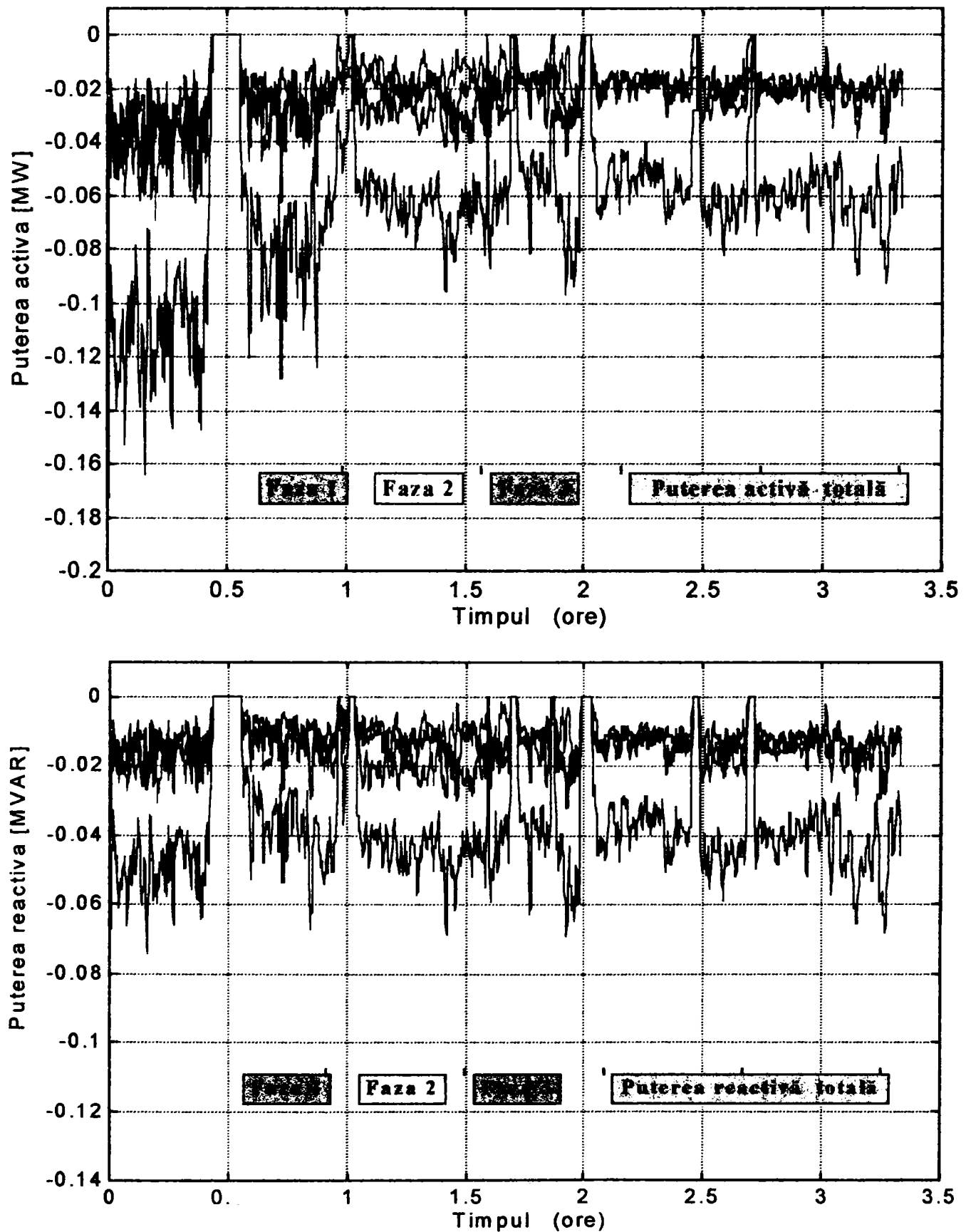
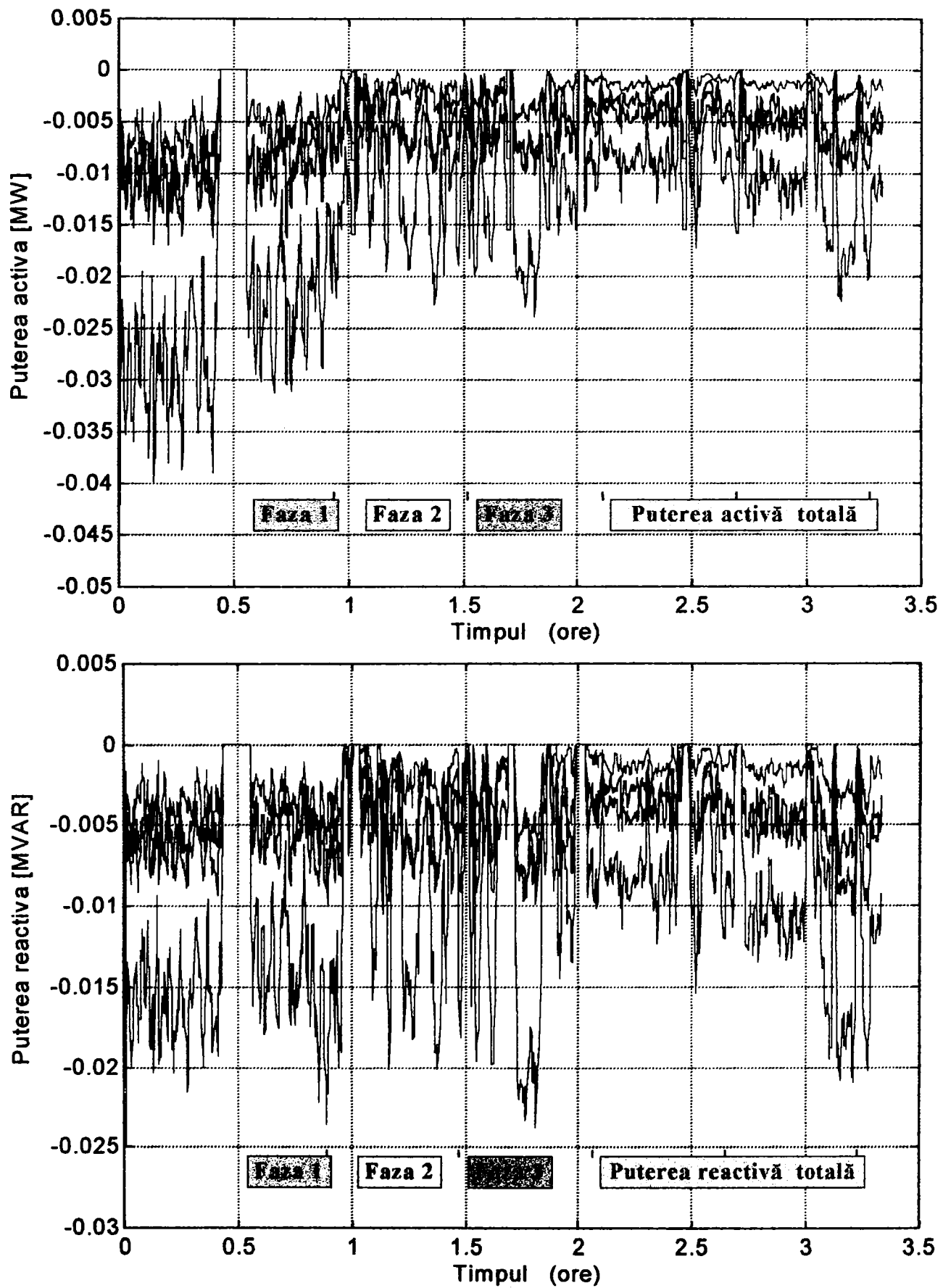
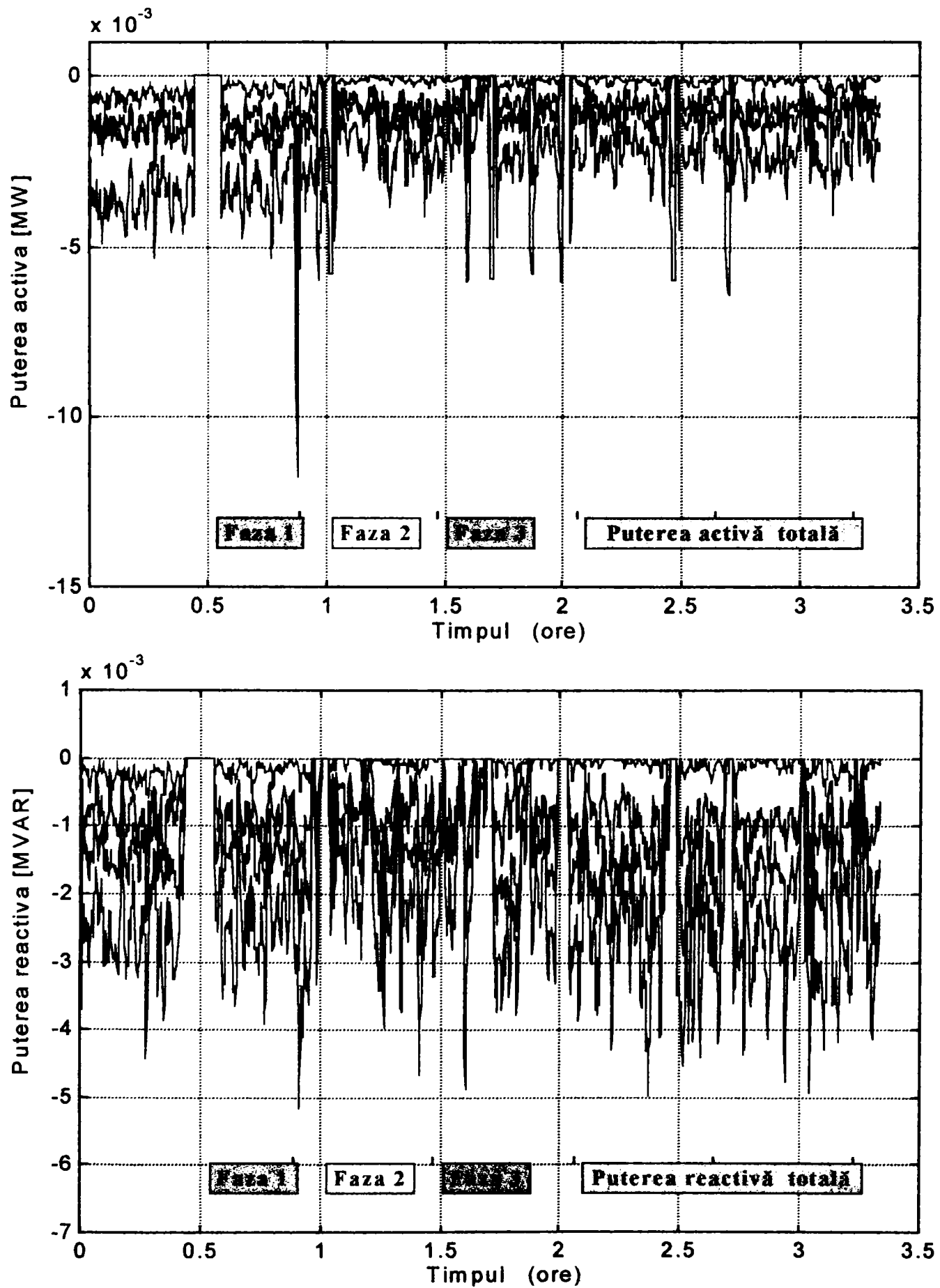


Fig. 1. Variația puterii active și reactive pentru armonica a 5-a pe linia de alimentare de medie tensiune pe durata unei șarje.





**Fig. 2. Variația puterii active și reactive pentru armonica a 7-a pe linia de alimentare de medie tensiune pe durata unei șarje.**



**Fig. 3. Variația puterii active și reactive pentru armonica a 11-a pe linia de alimentare de medie tensiune pe durata unei șarje.**

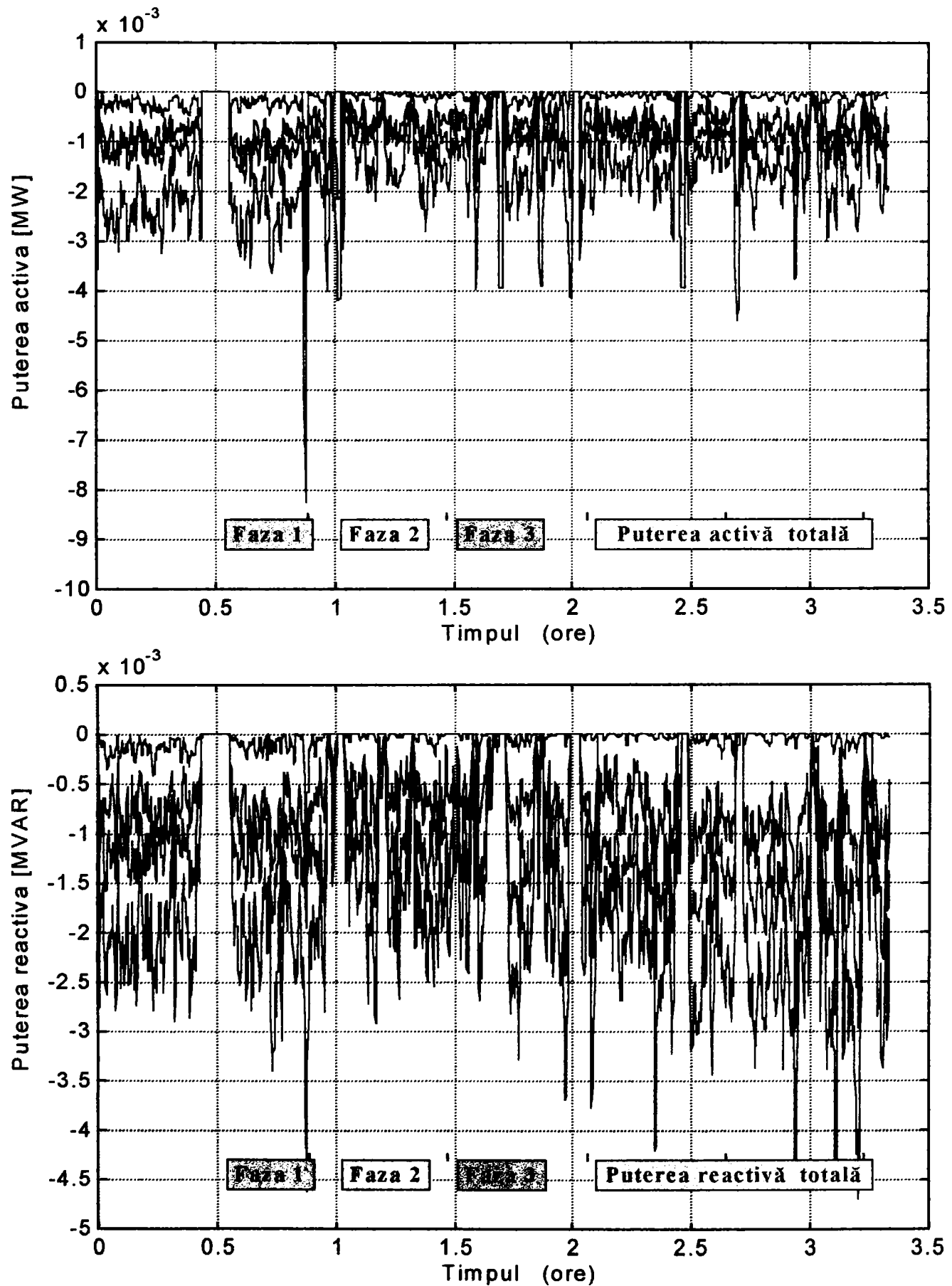
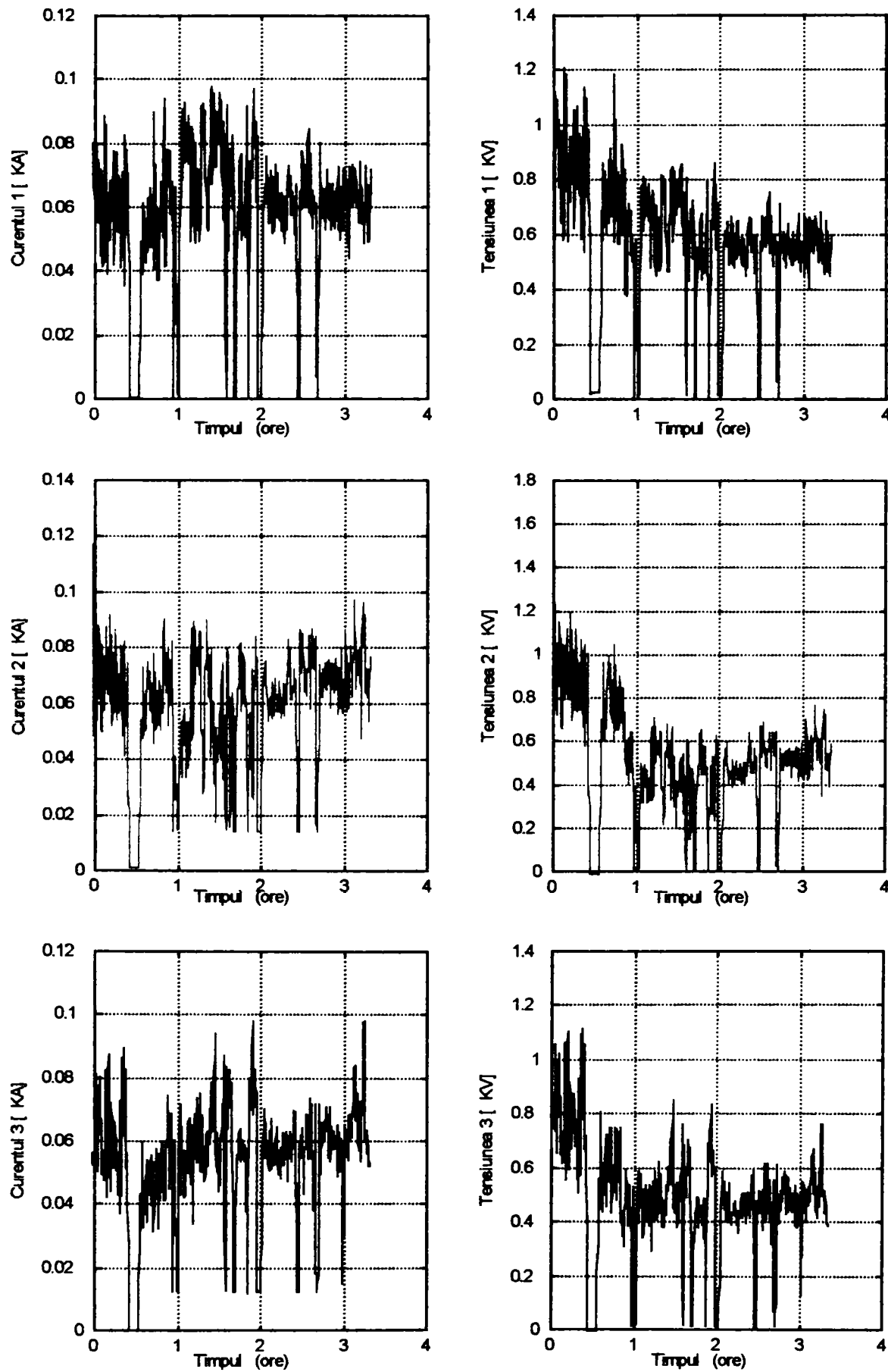
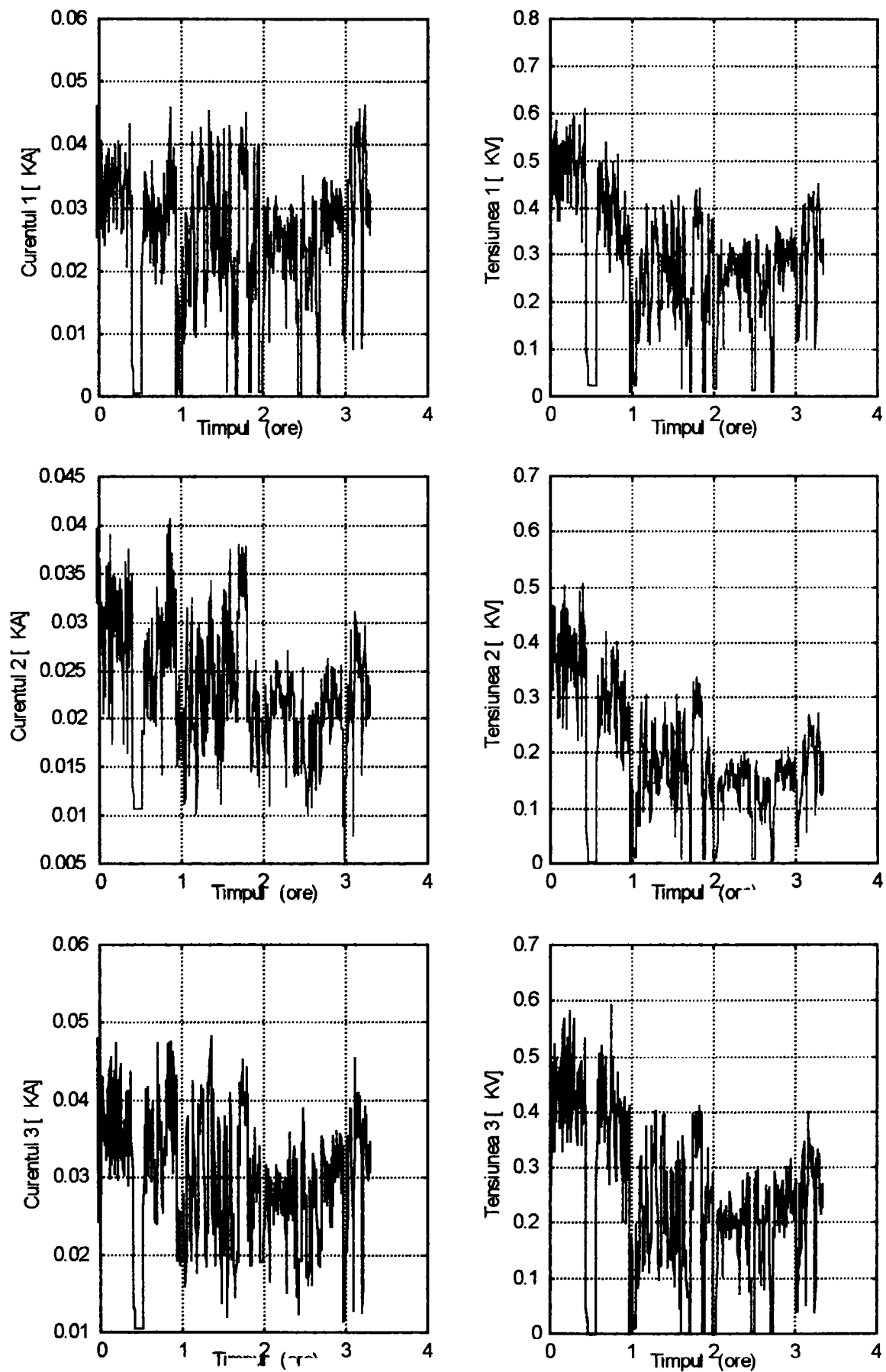


Fig. 4. Variația puterii active și reactive pentru armonica a 13-a pe linia de alimentare de medie tensiune pe durata unei șarje.

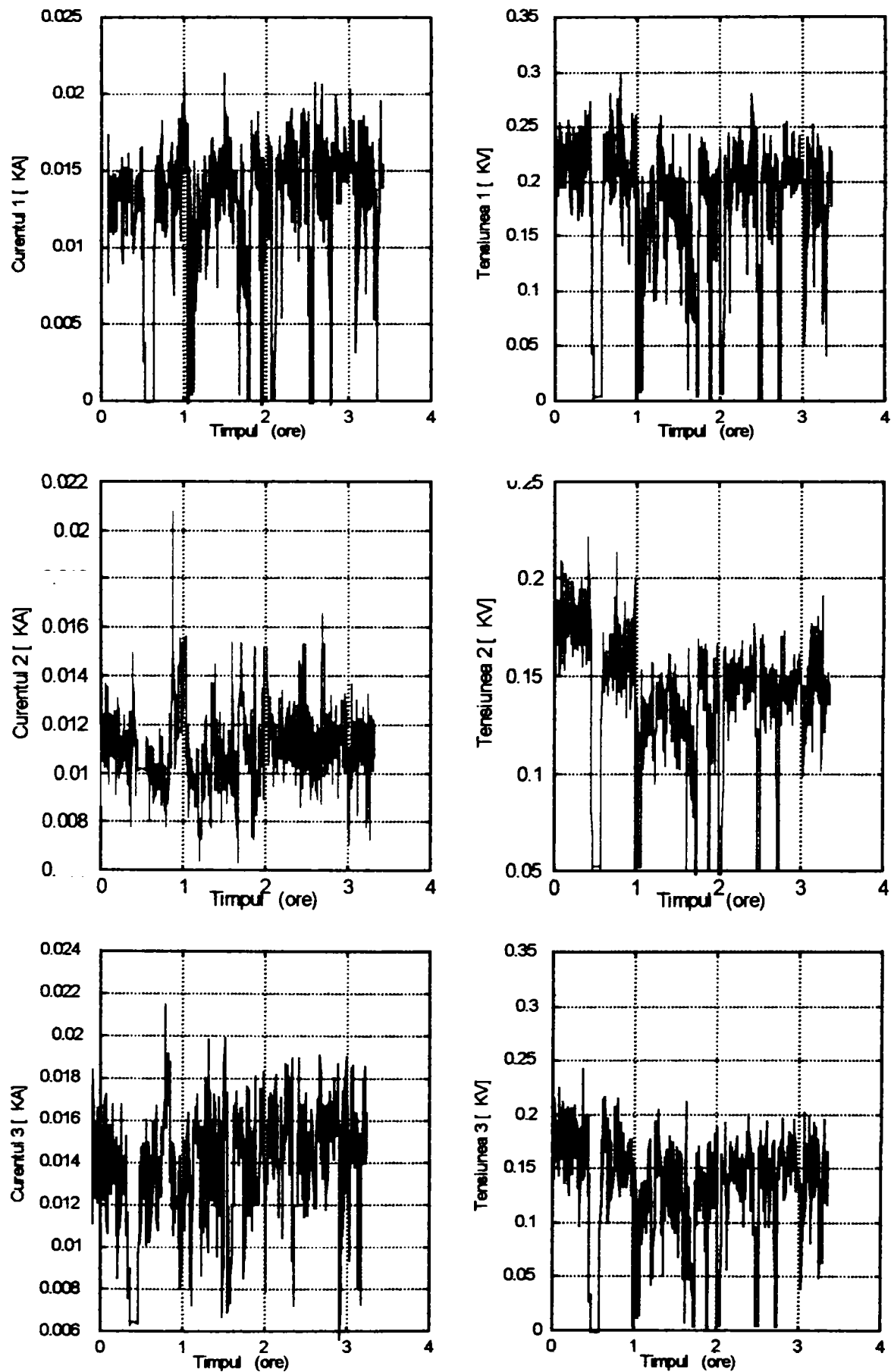
## ANEXA IV.2.



**Fig. 5. Variația armonicii a 5-a a curenților și tensiunilor pe linia de alimentare de medie tensiune pe durata unei șarje.**

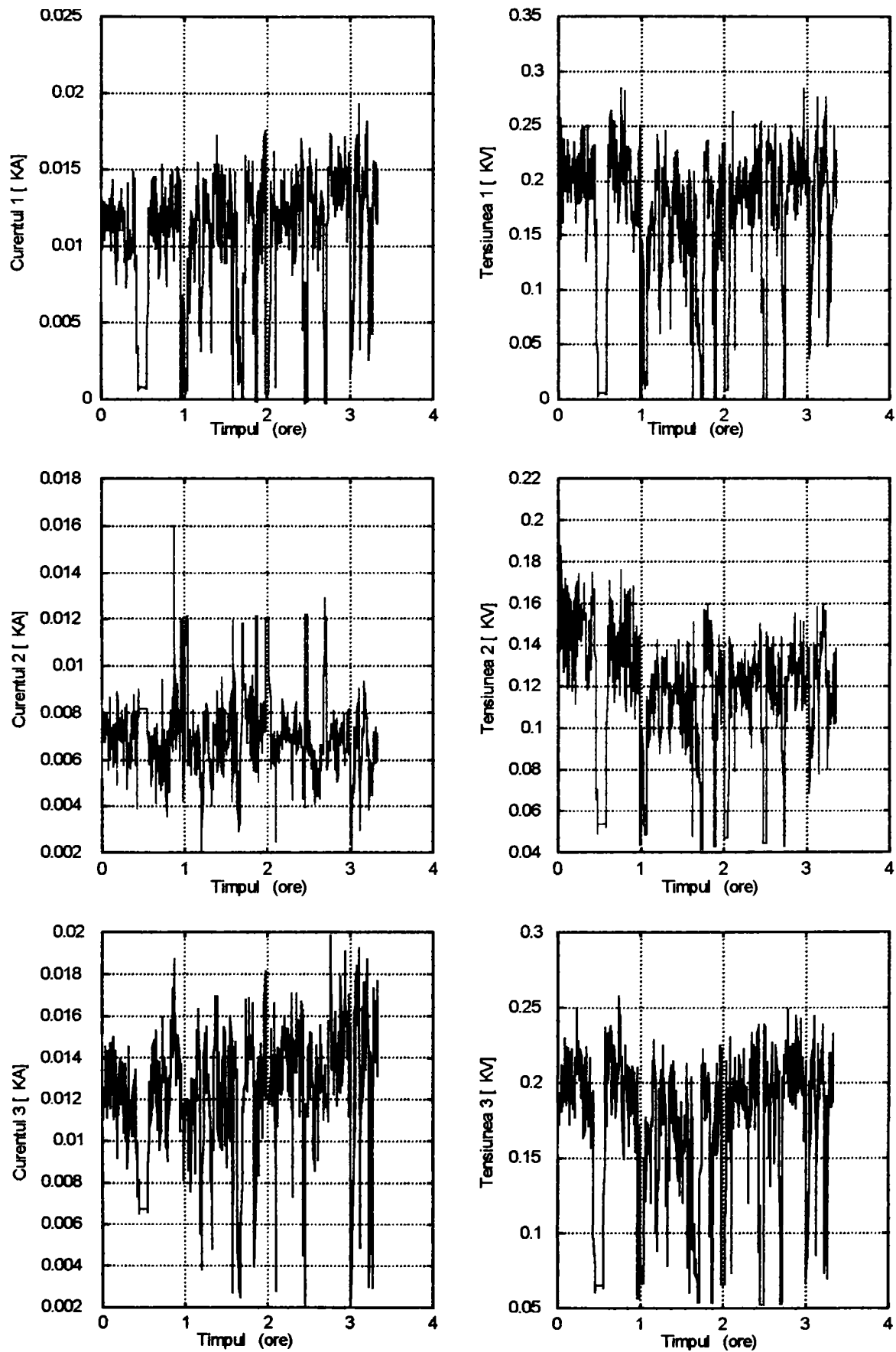


**Fig. 6. Variația armonicii a 7-a a curentilor și tensiunilor pe linia de alimentare de medie tensiune pe durata unei șarje.**



**Fig. 7. Variația armonicii a 11-a a curenților și tensiunilor pe linia de alimentare de medie tensiune pe durata unei șarje.**





**Fig. 8. Variația armonicii a 13-a a curentilor și tensiunilor pe linia de alimentare de medie tensiune pe durata unei șarje.**

## Anexa V.1.

## Rezultatele simulării fără utilizarea instalației de filtrare, compensare și echilibrare.

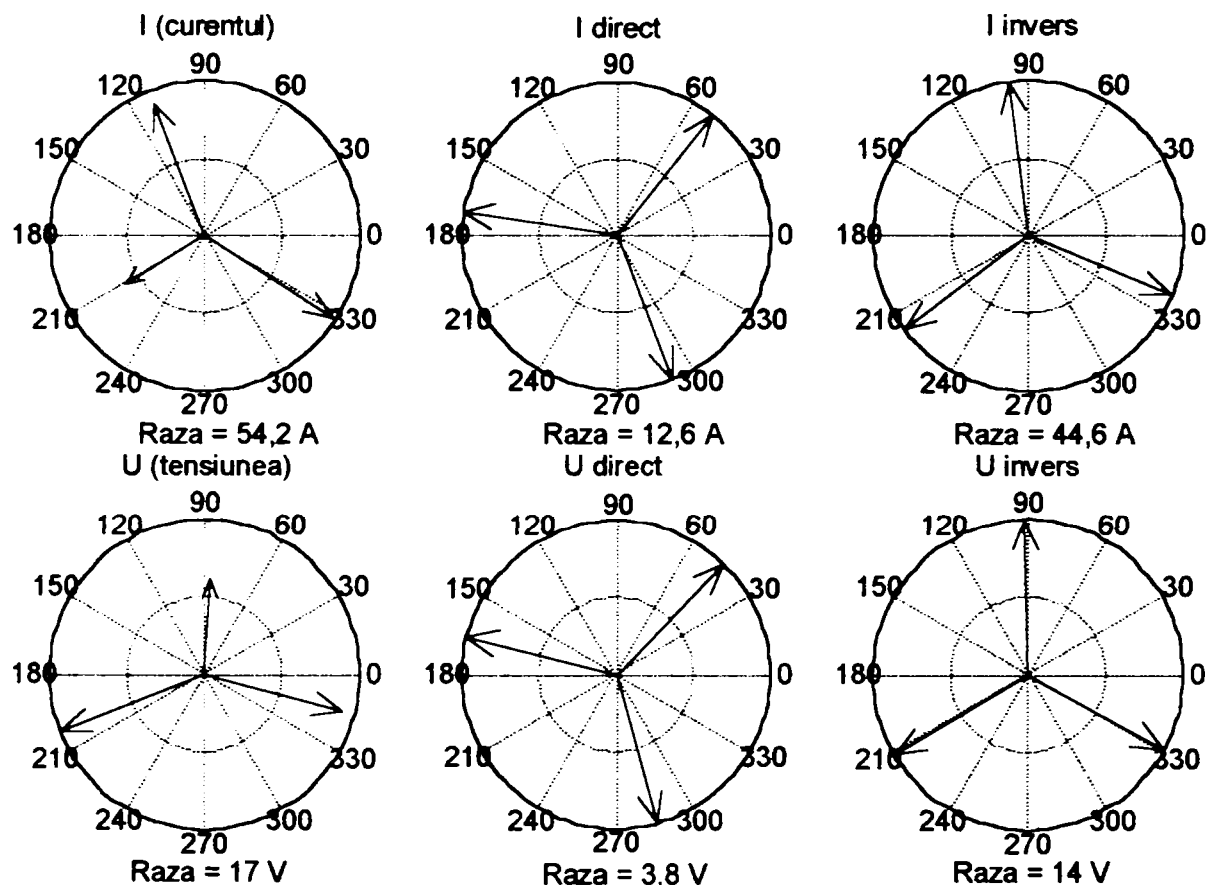


Fig. 1. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 5 și a componentelor simetrice corespunzătoare fără optimizarea funcționării.

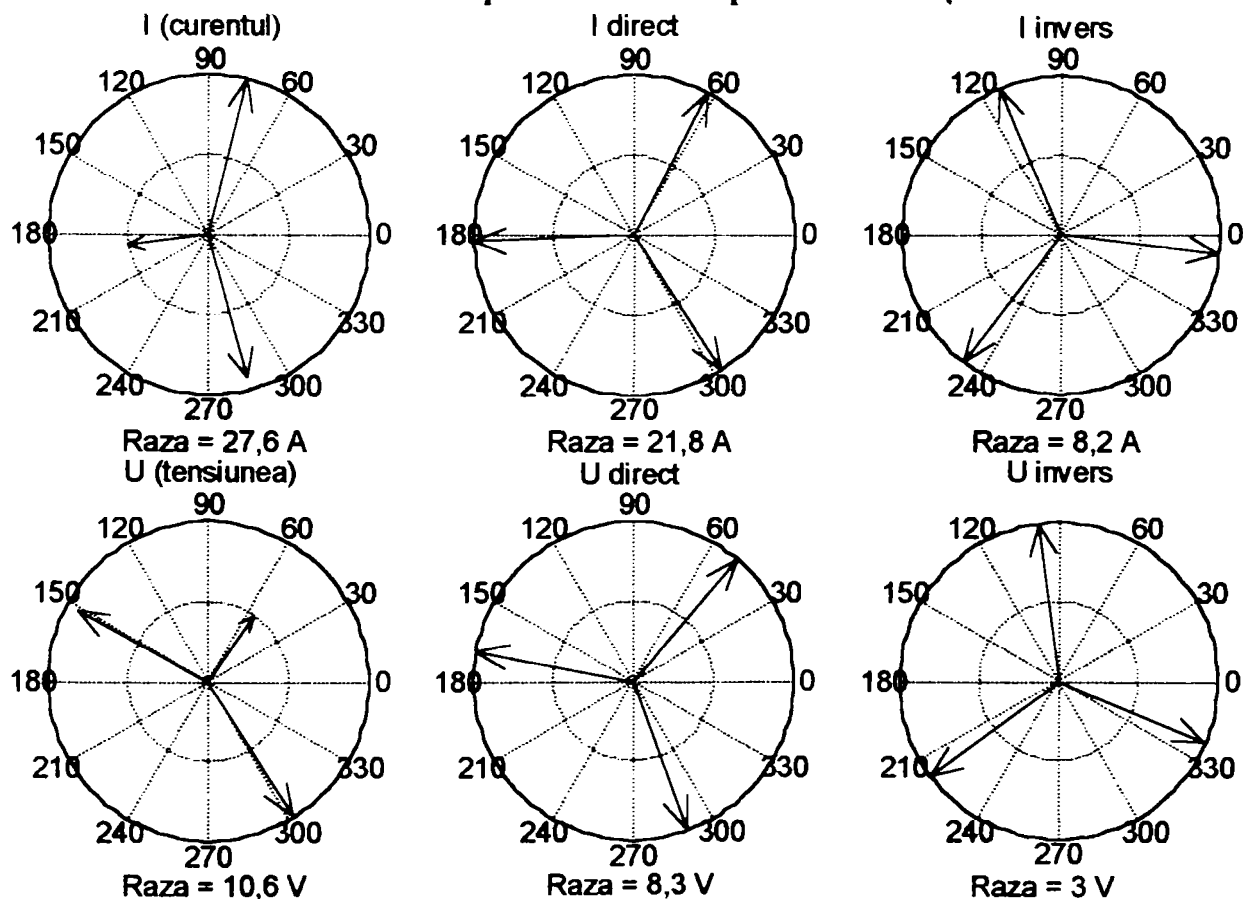
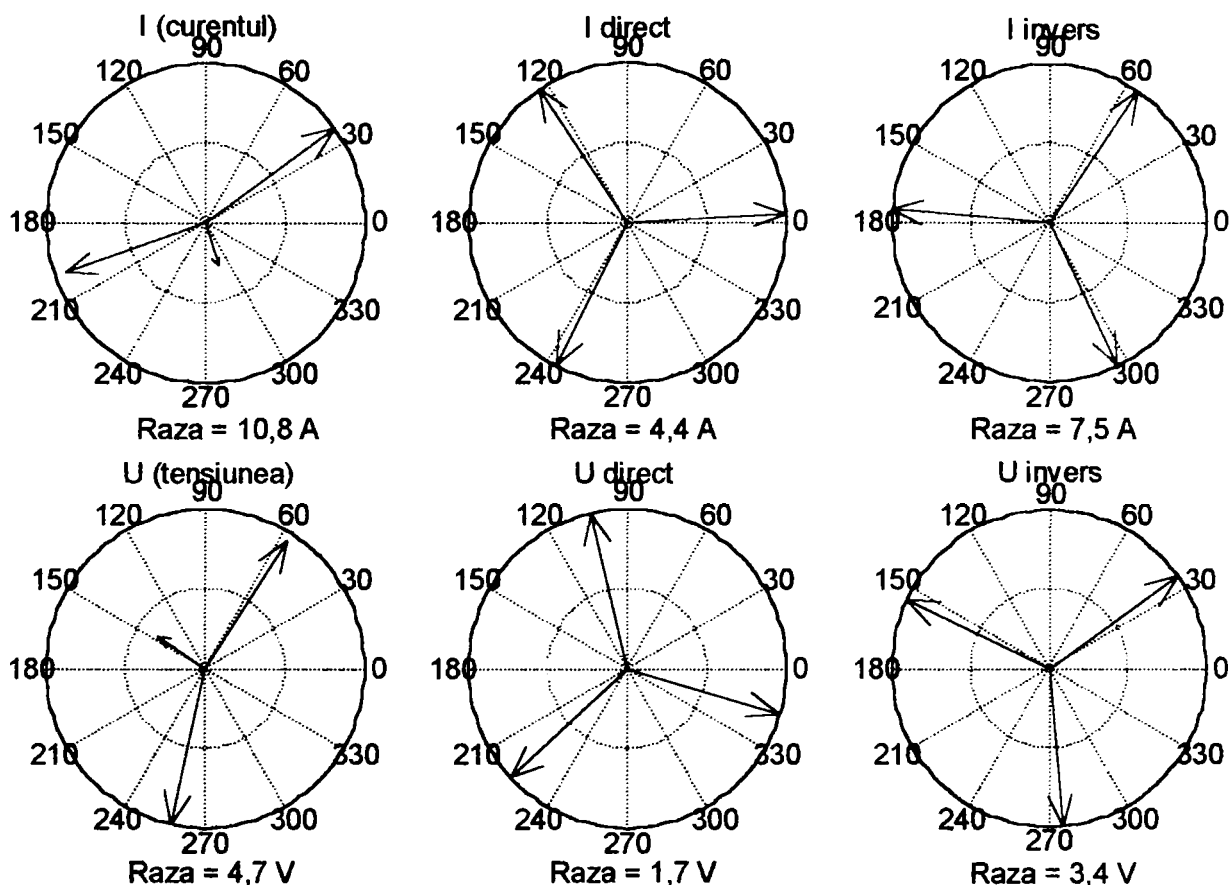
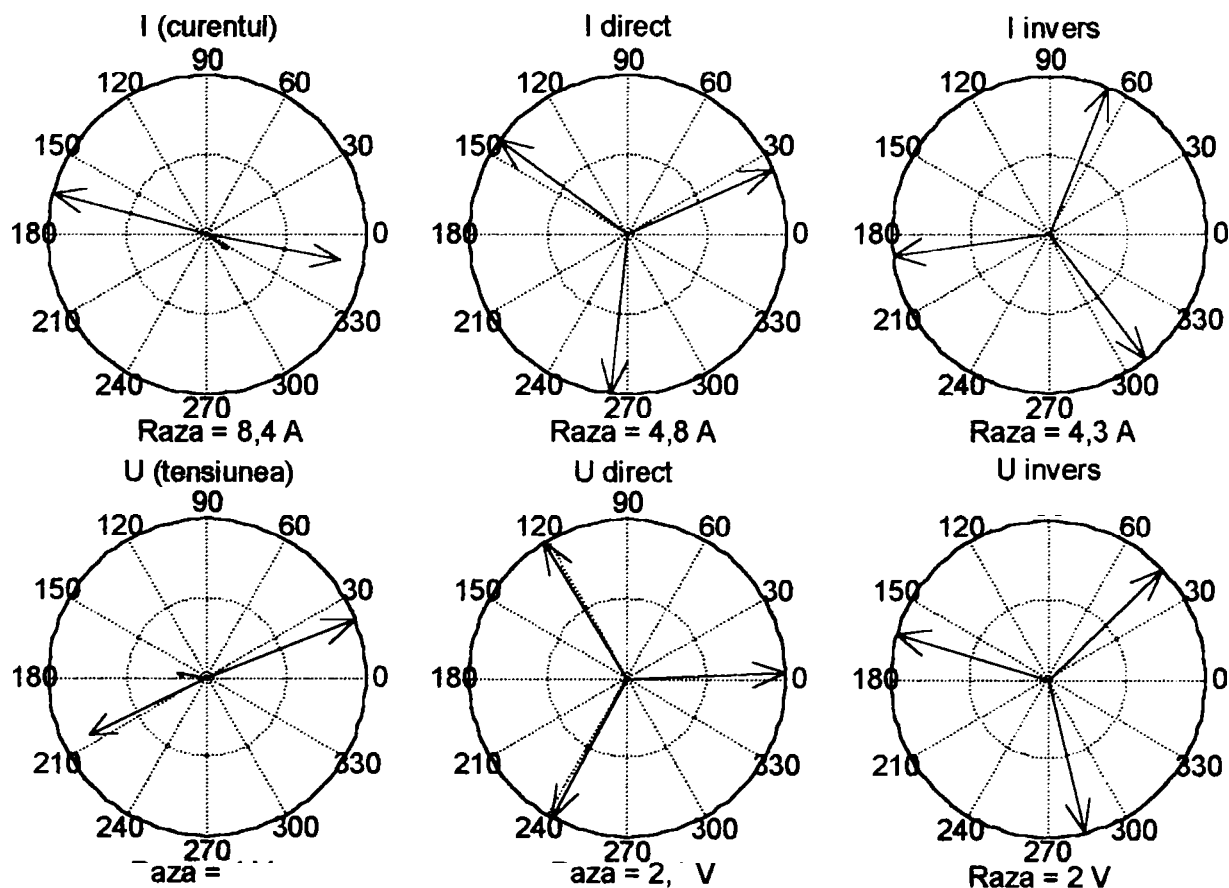


Fig. 2. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 7 și a componentelor simetrice corespunzătoare fără optimizarea funcționării.



**Fig. 3. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 11 și a componentelor simetrice corespunzătoare fără optimizarea funcționării.**



**Fig. 4. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 13 și a componentelor simetrice corespunzătoare fără optimizarea funcționării.**

## Anexa V.2.

## Rezultatele simulării utilizând numai instalația de compensare a puterii reactive.

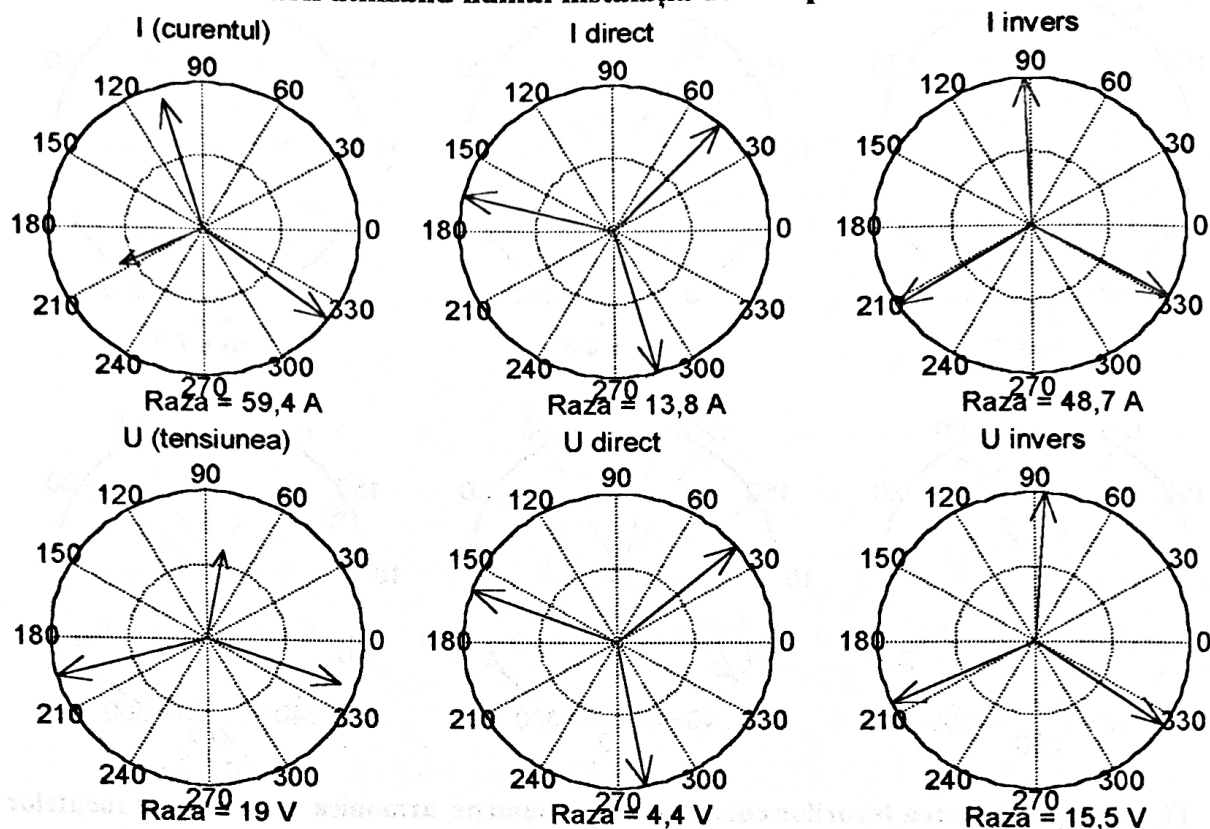


Fig. 5. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 5 și a componentelor simetrice corespunzătoare utilizând numai instalația de compensare a puterii reactive.

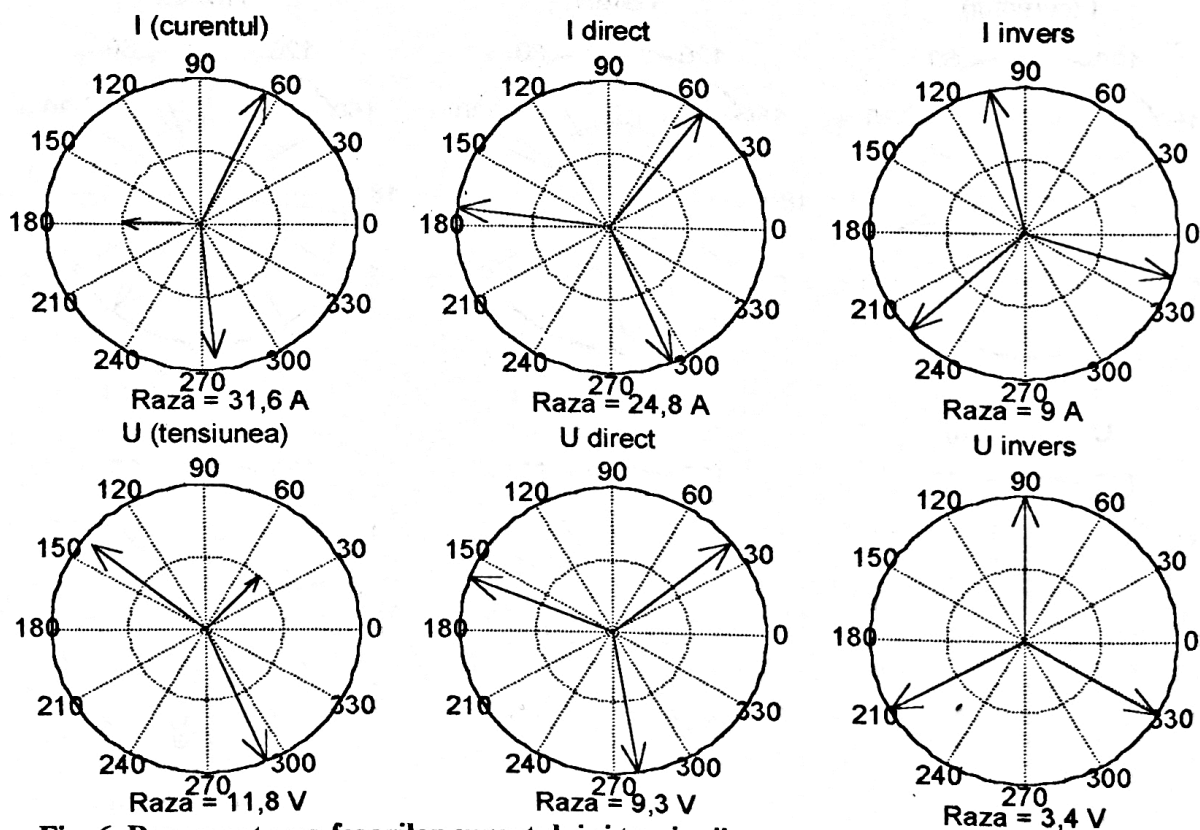


Fig. 6. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 7 și a componentelor simetrice corespunzătoare utilizând numai instalația de compensare a puterii reactive.



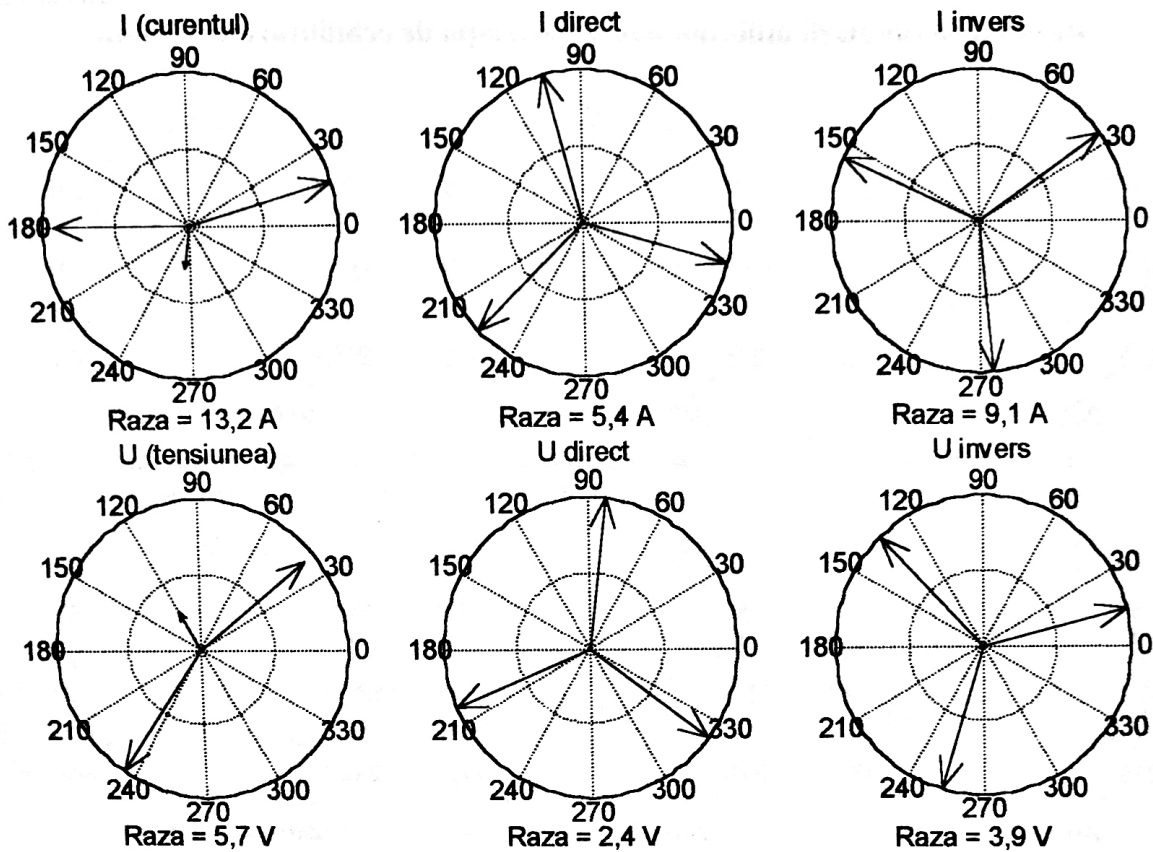


Fig. 7. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 11 și a componentelor simetrice corespunzătoare utilizând numai instalația de compensare a puterii reactive.

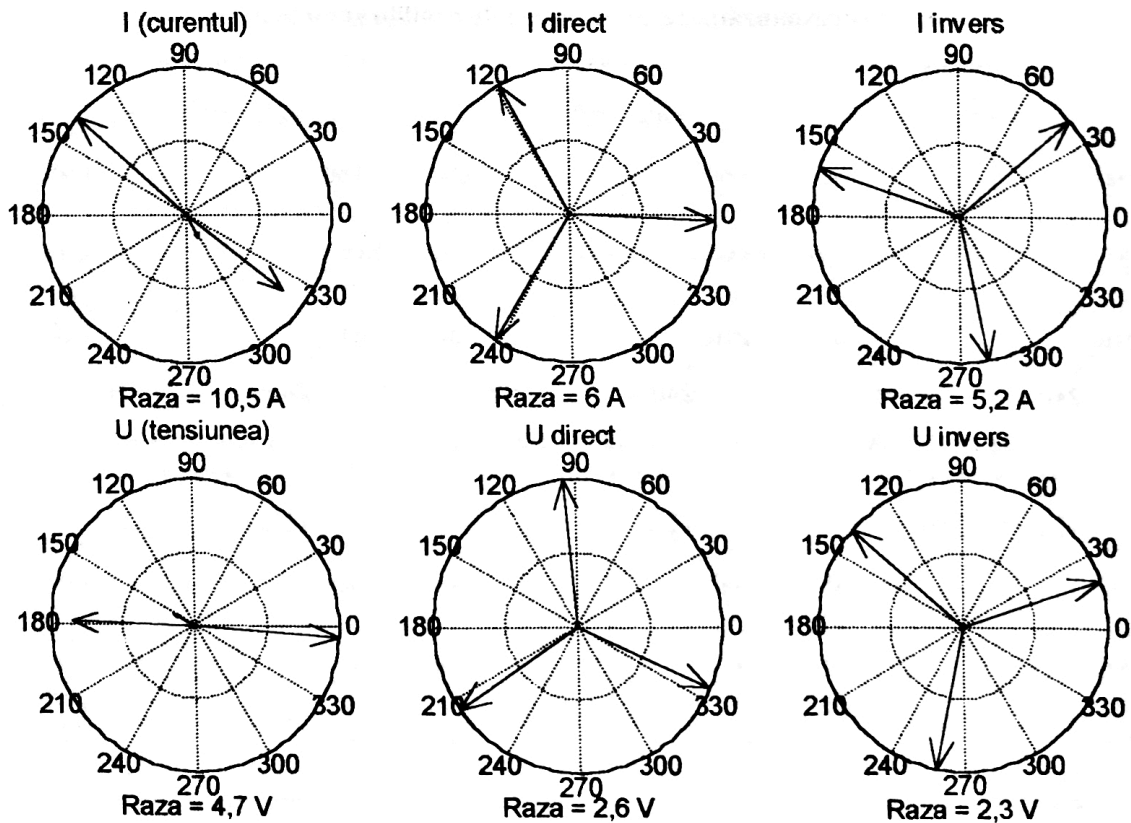


Fig. 8. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 13 și a componentelor simetrice corespunzătoare utilizând numai instalația de compensare a puterii reactive.

## Anexa V.3.

## Rezultatele simulării utilizând numai instalația de echilibrare a sarcinii.

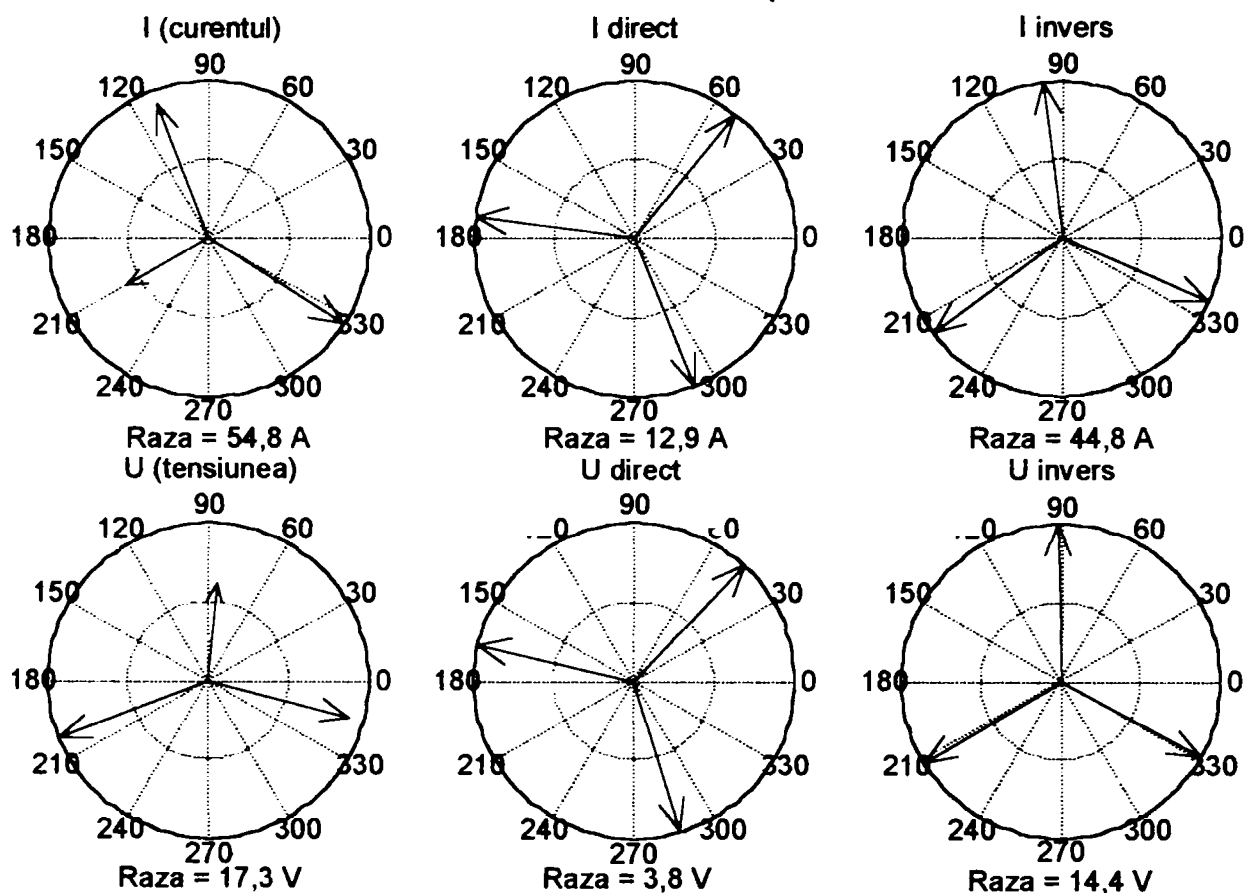


Fig. 9. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 5 și a componentelor simetrice corespunzătoare cu instalația de echilibrare a sarcinii.

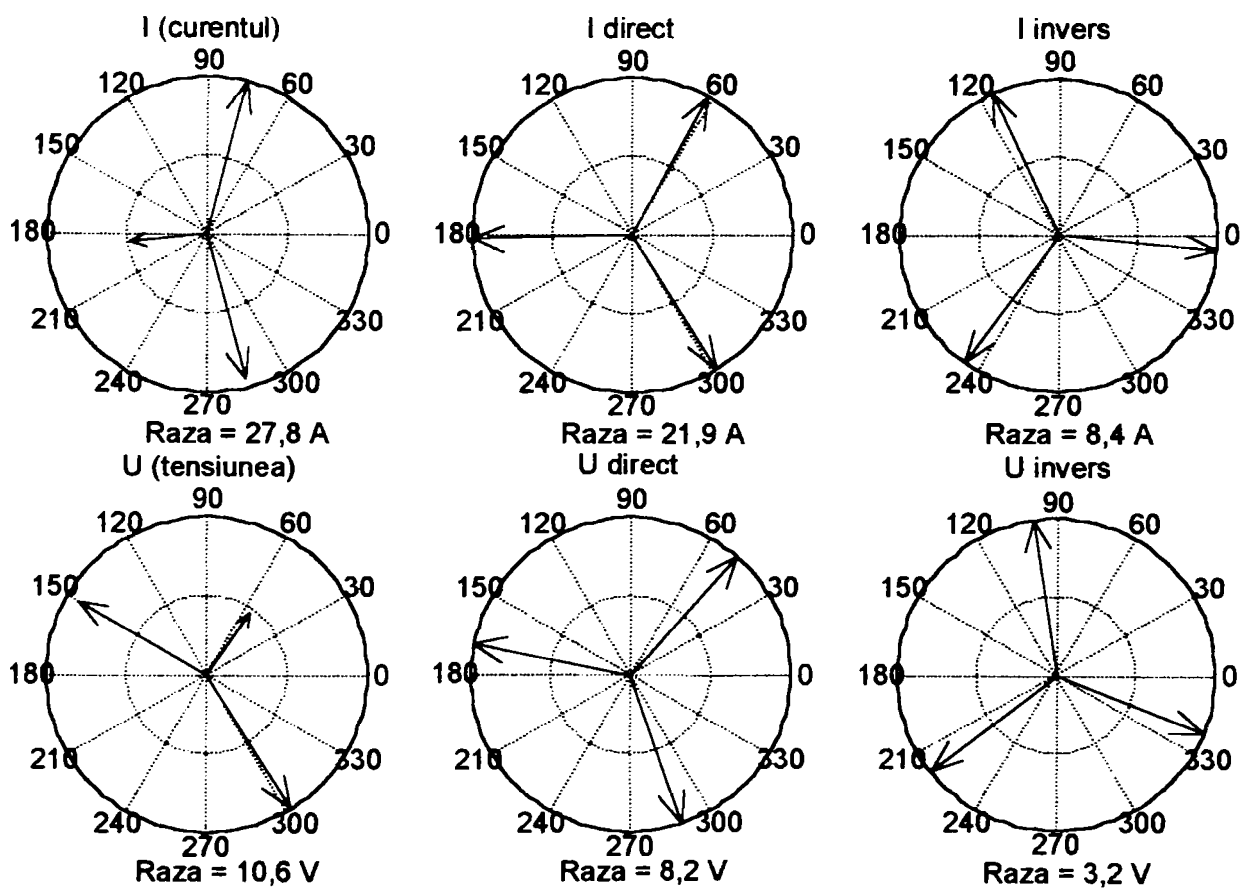


Fig. 10. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 7 și a componentelor simetrice corespunzătoare cu instalația de echilibrare a sarcinii.



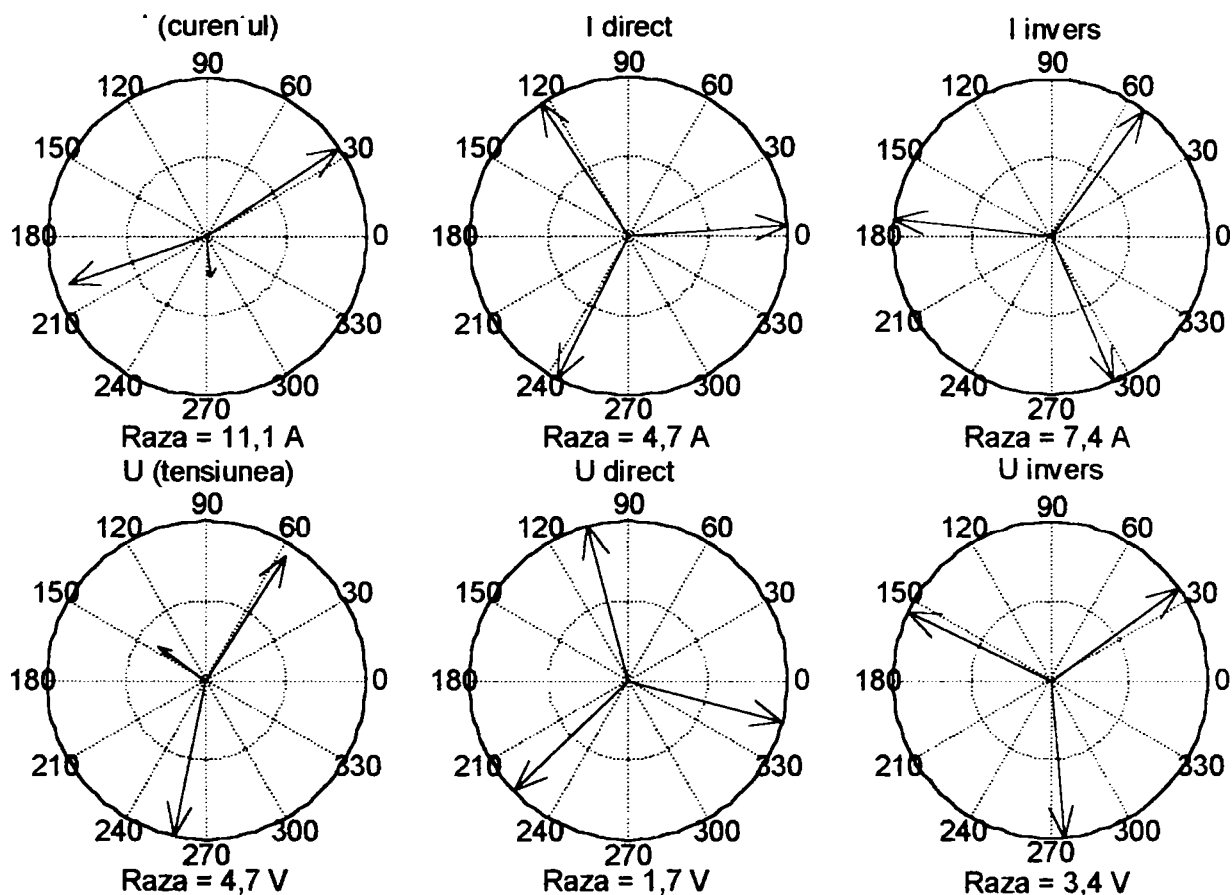


Fig. 11. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 11 și a componentelor simetrice corespunzătoare cu instalația de echilibrare a sarcinii.

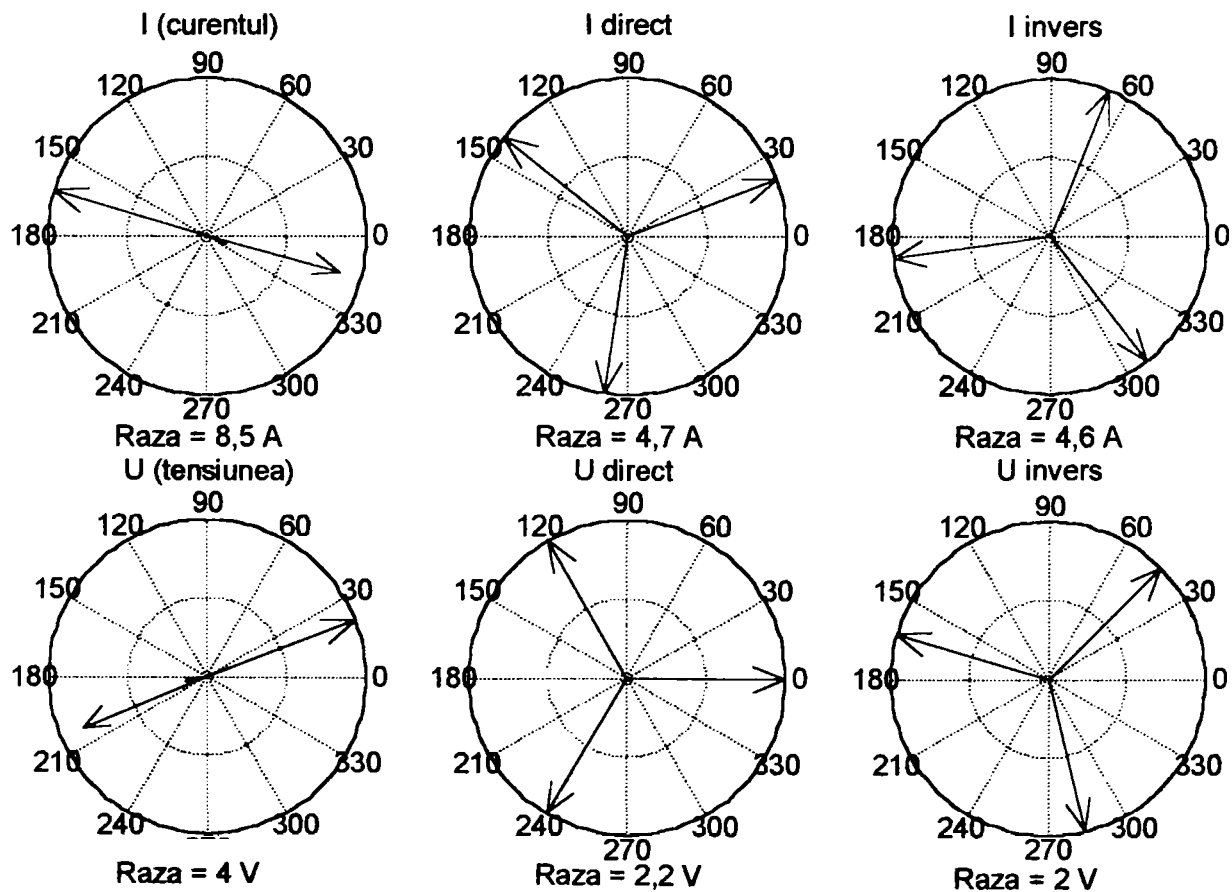


Fig. 12. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 13 și a componentelor simetrice corespunzătoare cu instalația de echilibrare a sarcinii.

## Anexa V.4.

## Rezultatele simulării utilizând numai instalația de filtrare a curenților armonici.

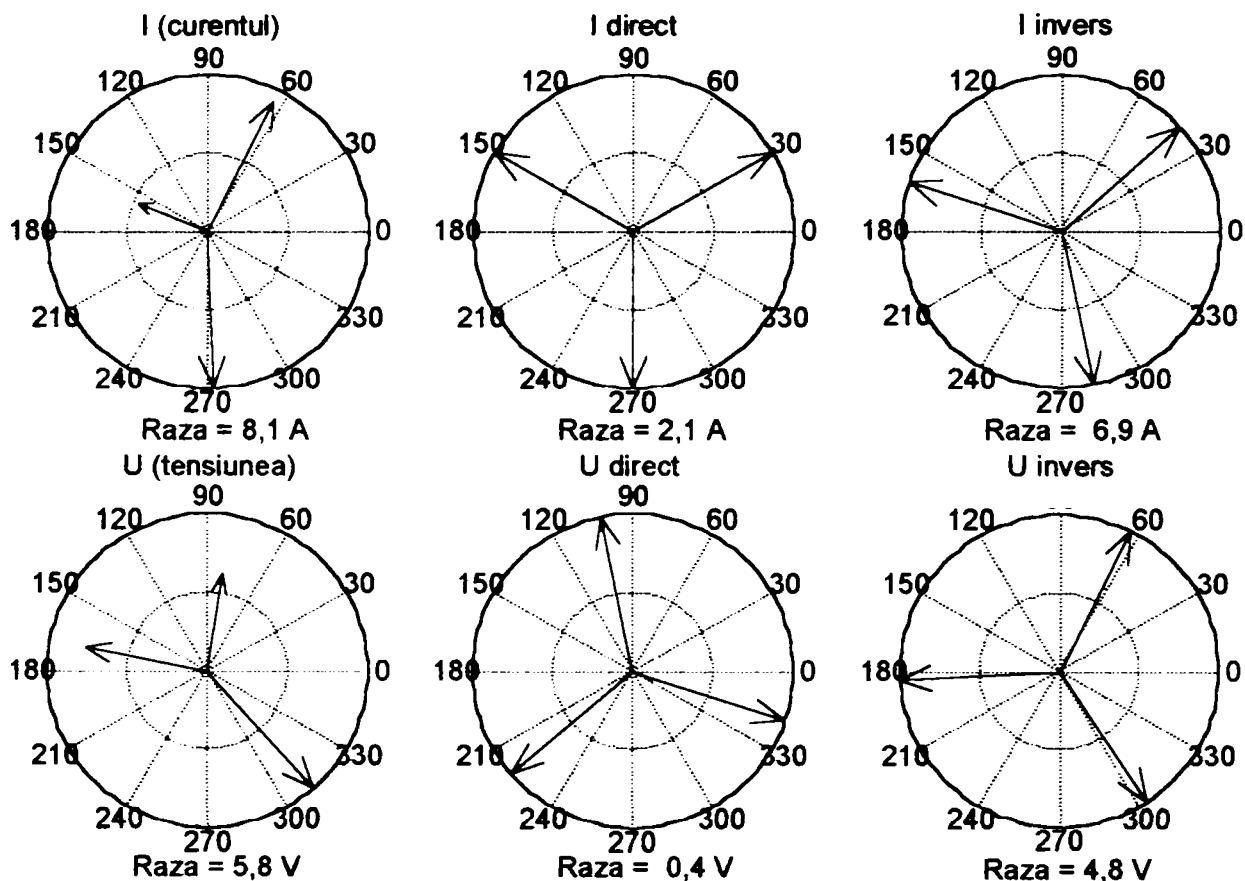


Fig. 13. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 5 și a componentelor simetrice corespunzătoare după filtrarea curenților armonici.

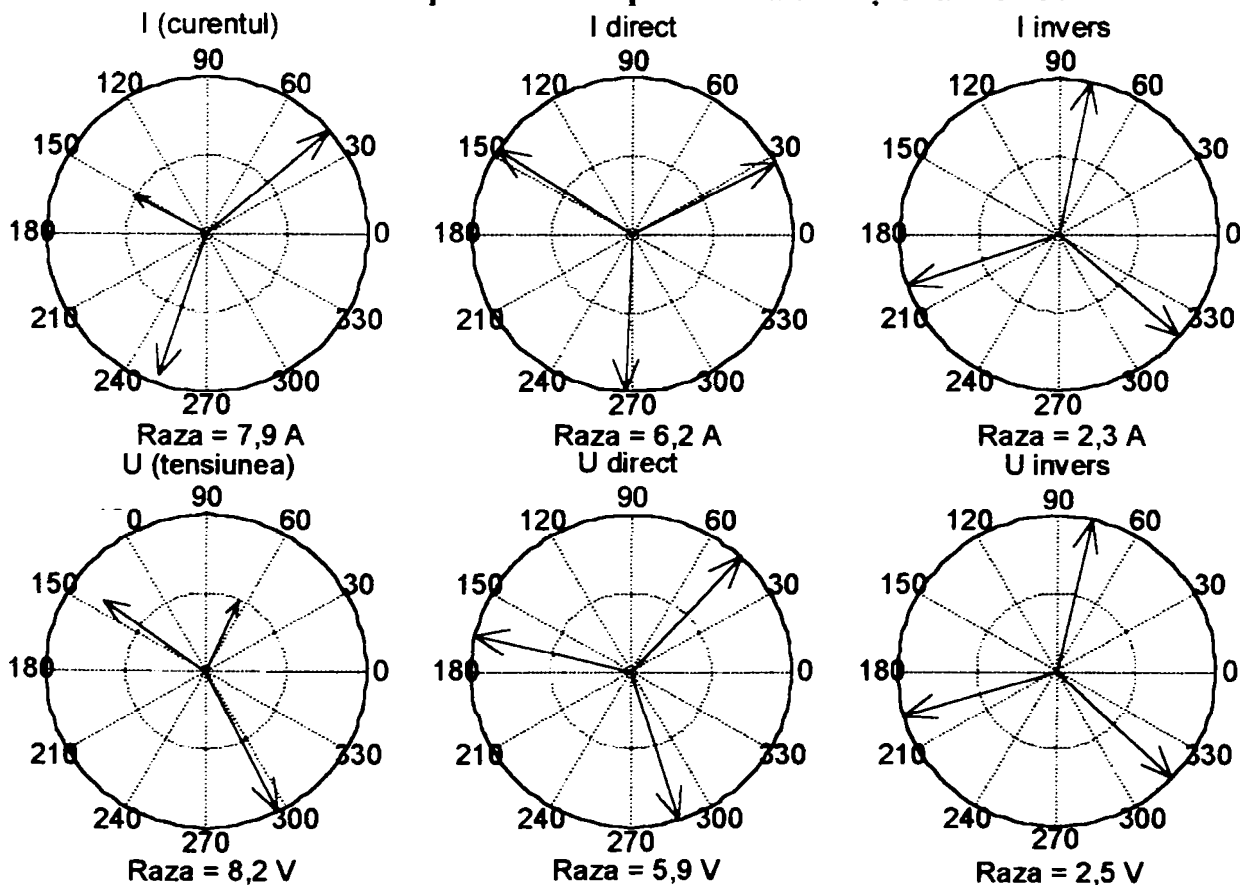


Fig. 14. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 7 și a componentelor simetrice corespunzătoare după filtrarea curenților armonici.

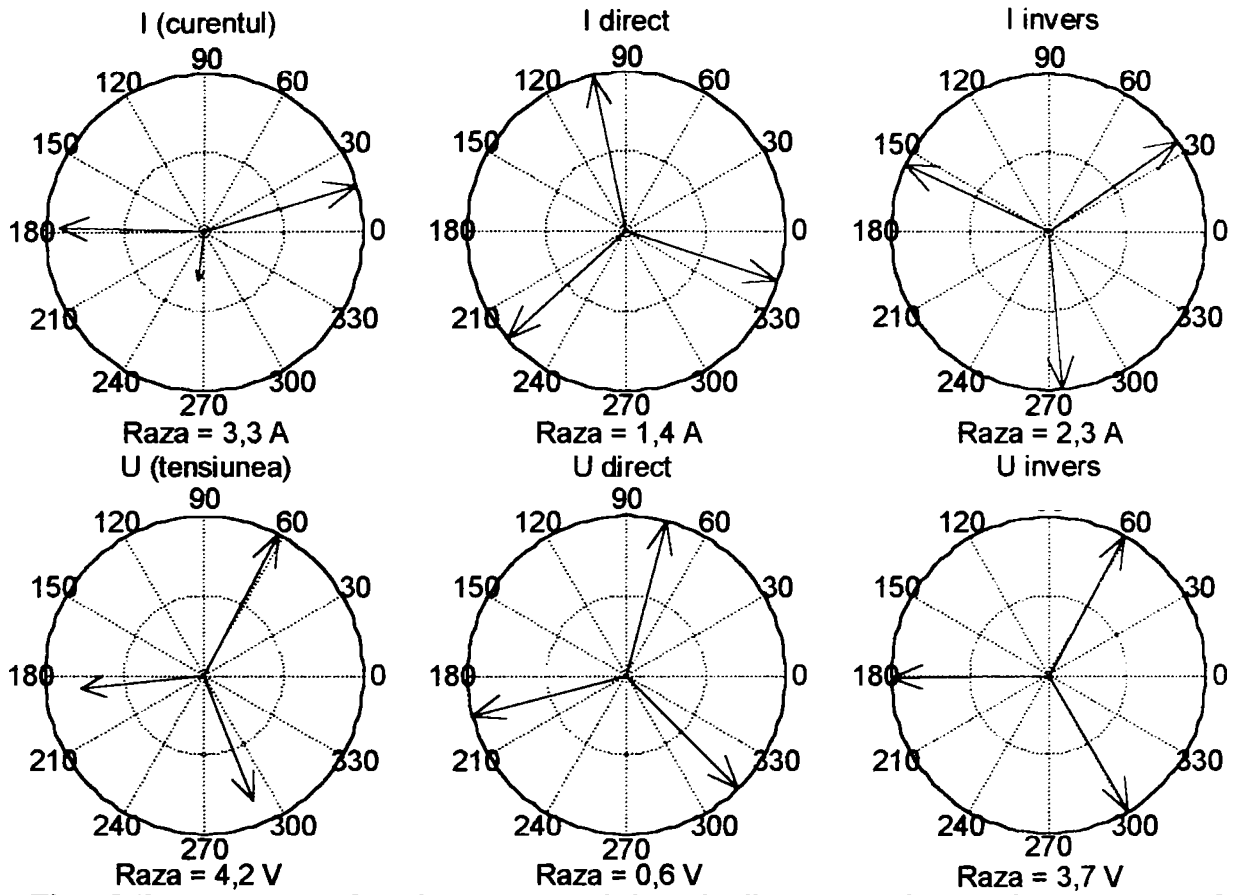


Fig. 15. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 11 și a componentelor simetrice corespunzătoare după filtrarea curenților armonici

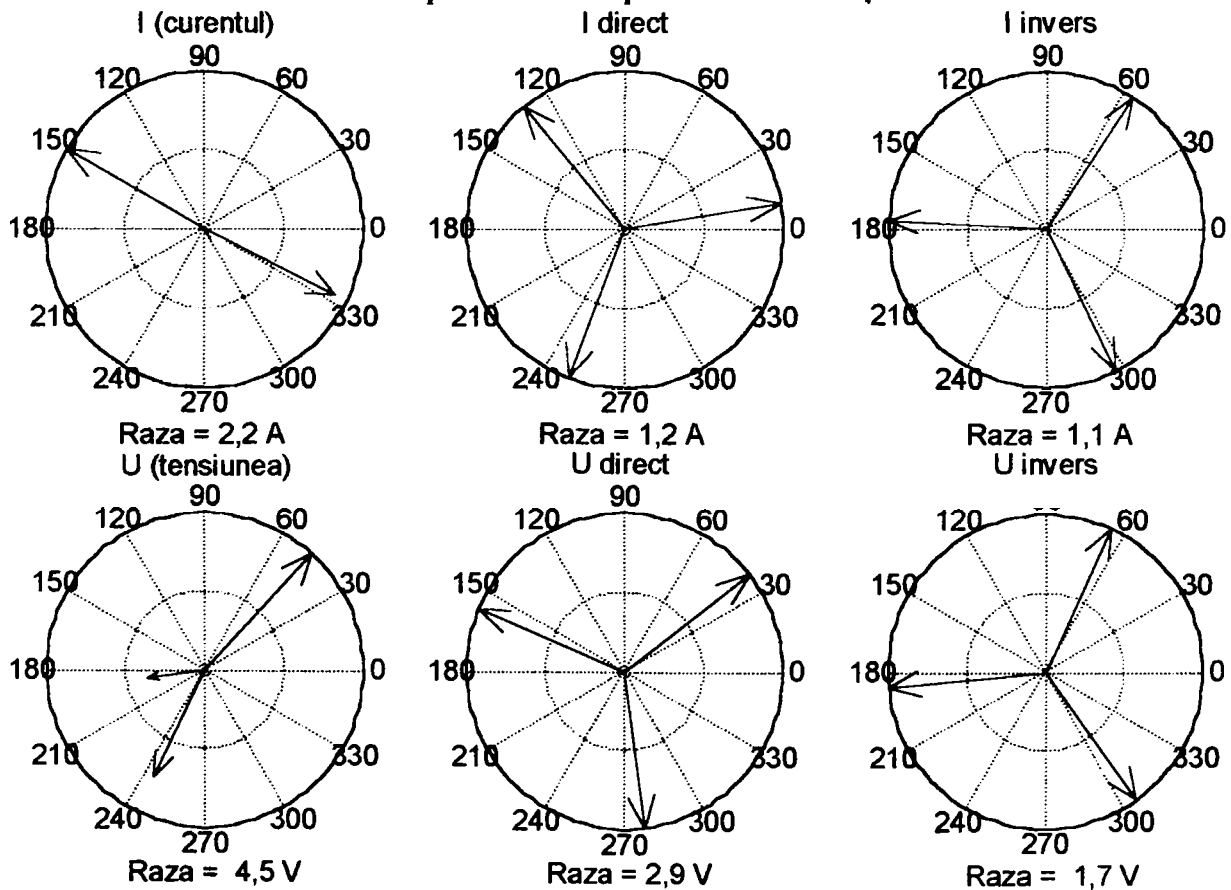


Fig. 16. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 13 și a componentelor simetrice corespunzătoare după filtrarea curenților armonici.

## Anexa V.5.

## Rezultatele simulării utilizând instalația de filtrare, compensare și echilibrare.

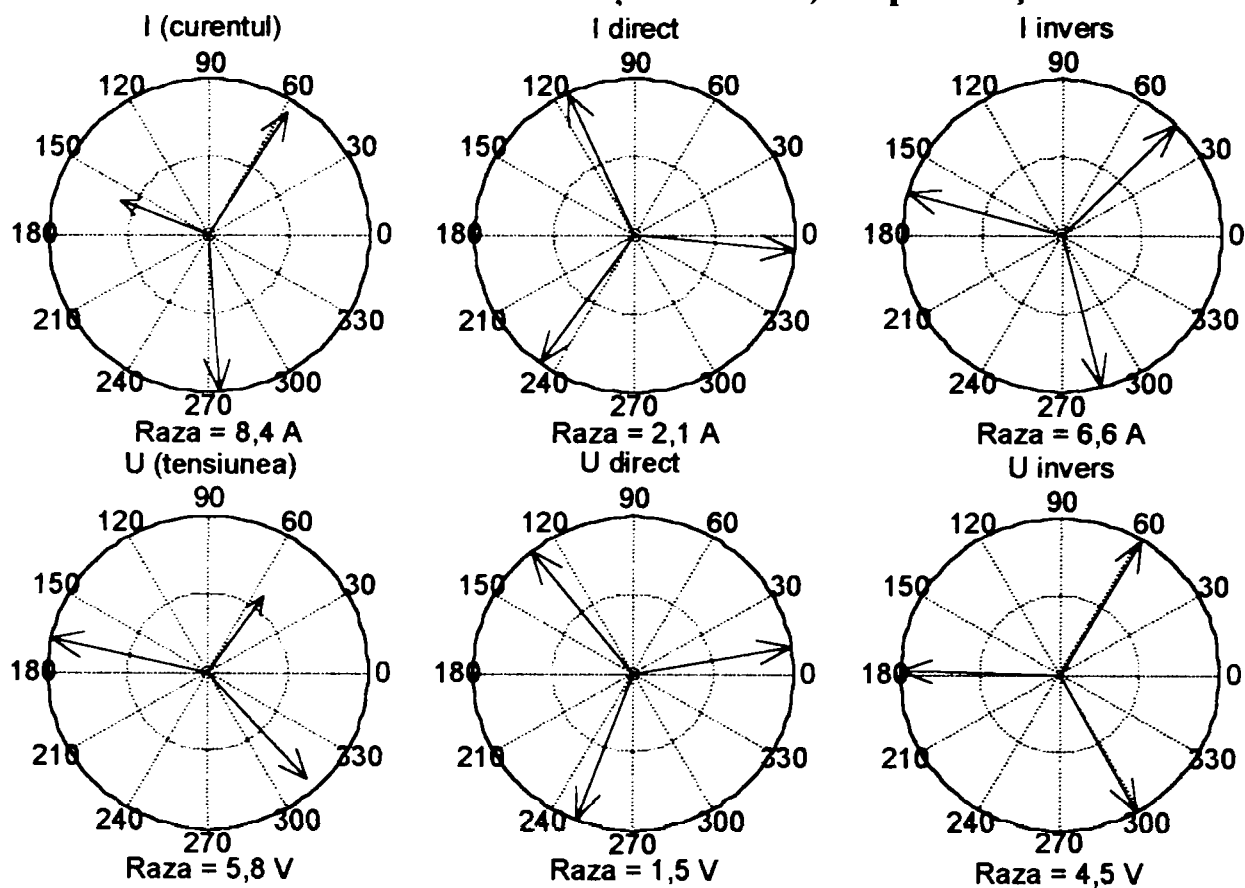


Fig. 17. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 5 și a componentelor simetrice corespunzătoare cu instalația de compensare, echilibrare și filtrare.

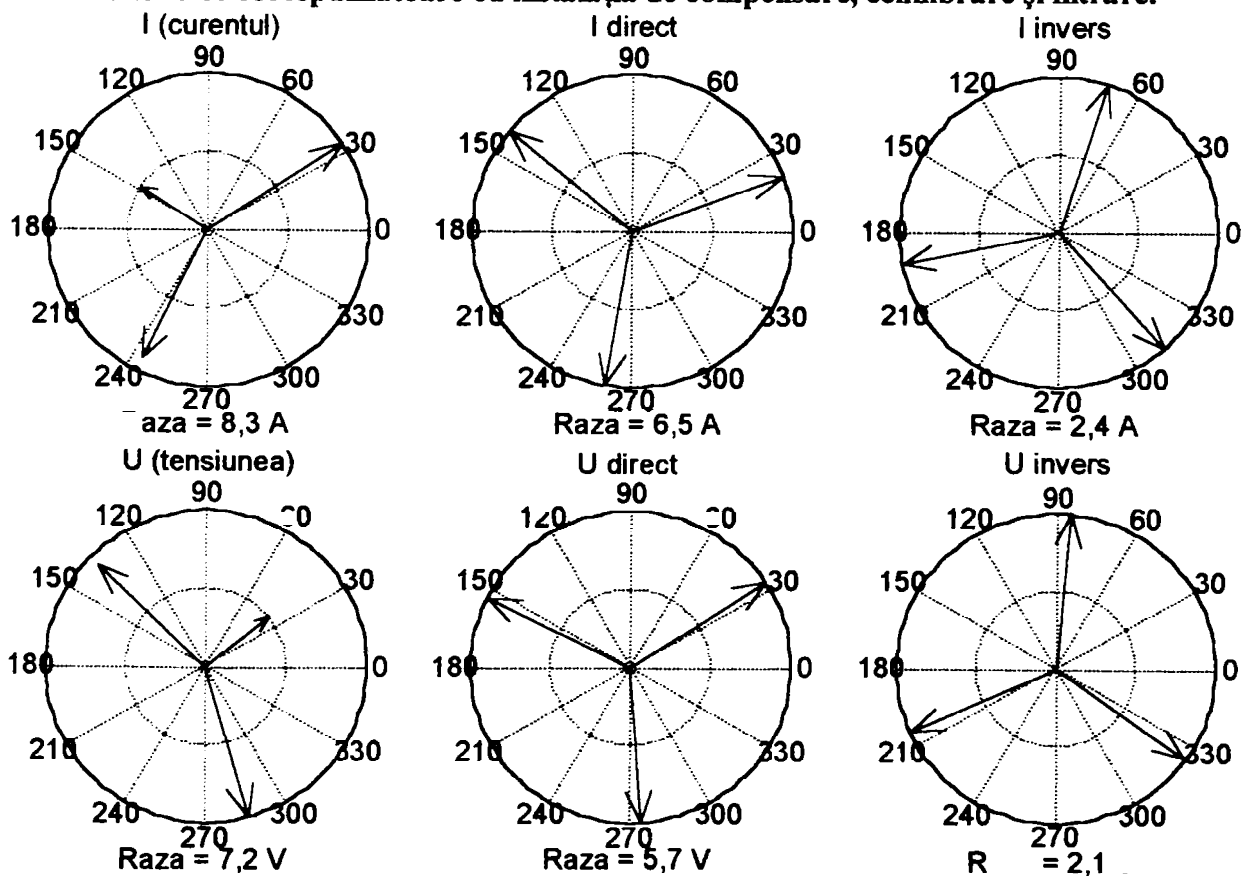


Fig. 18. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 7 și a componentelor simetrice corespunzătoare cu instalația de compensare, echilibrare și filtrare.

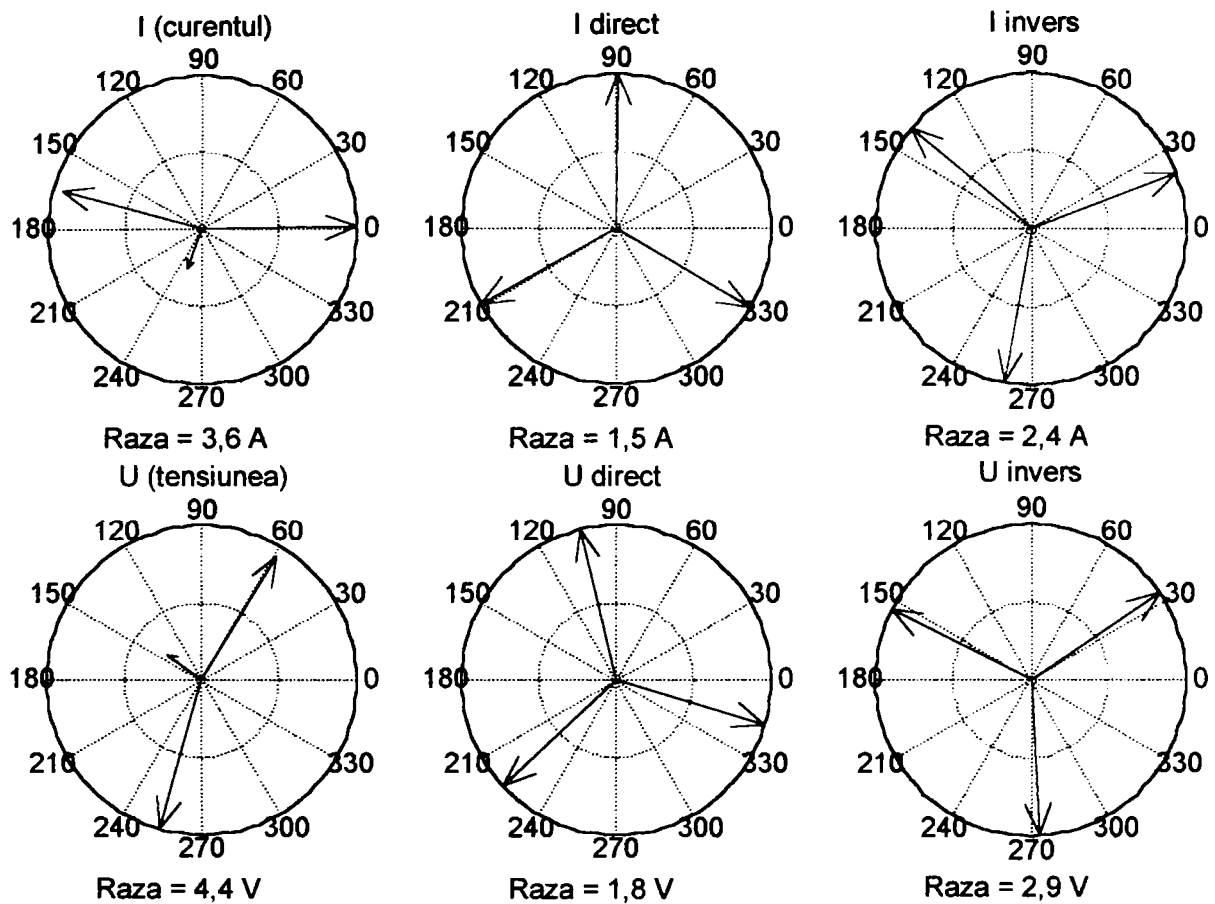


Fig. 19. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 11 și a componentelor simetrice corespunzătoare cu instalația de compensare, echilibrare și filtrare.

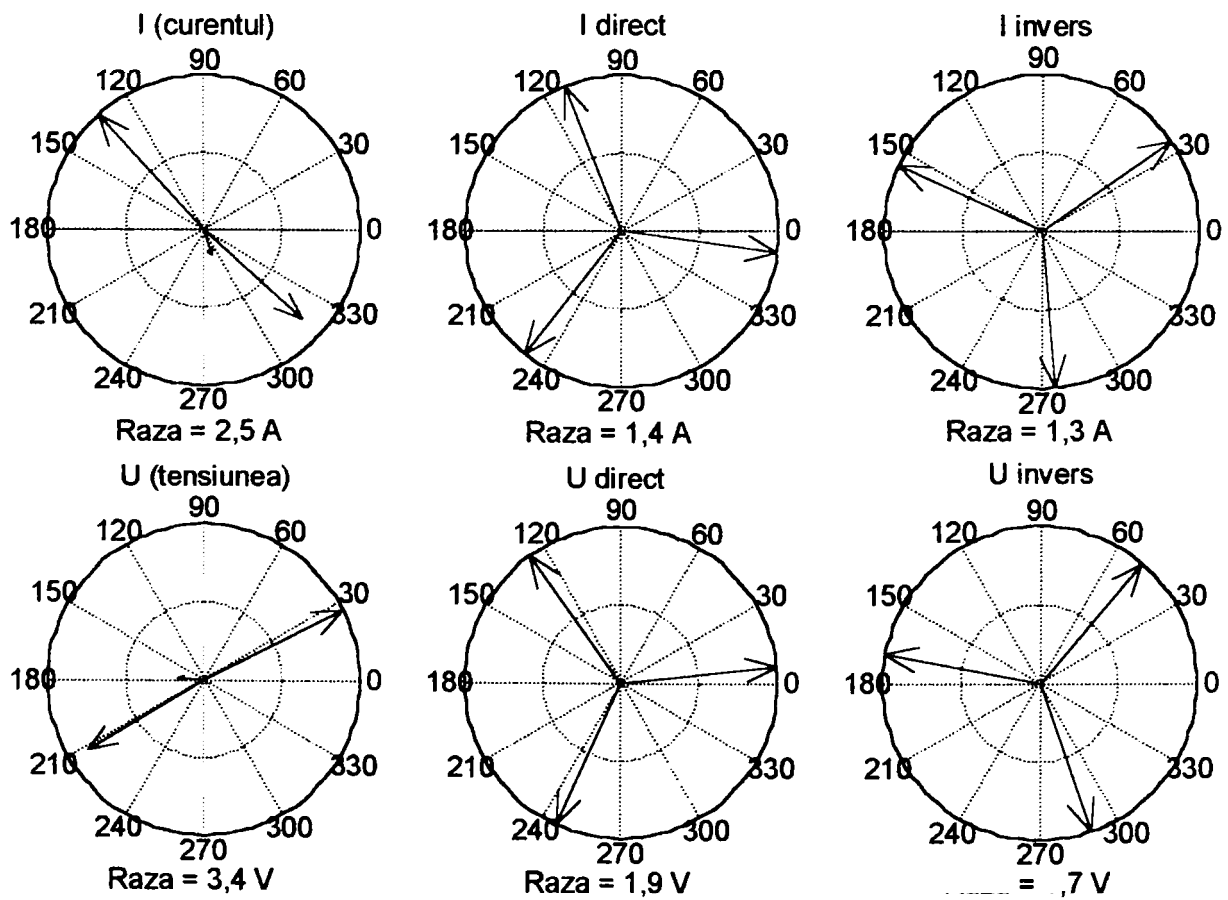


Fig. 20. Reprezentarea fazorilor curentului și tensiunii pe armonica 13 și a componentelor simetrice corespunzătoare cu instalația de compensare, echilibrare și filtrare.