

MODELAREA, IDENTIFICAREA ȘI CONDUCEREA SISTEMELOR CU ARC ELECTRIC. APLICAȚII PRIVIND CUPTORUL CU ARC ELECTRIC

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul INGINERIA SISTEMELOR
de către

Ing. Loredana Ghiorghioni

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Mihail Abrudean
prof.univ.dr.ing. Honoriu Vălean
prof.univ.dr.ing. Manuela Pănoiu

Ziua susținerii tezei: 03.11.2017

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 2. Chimie | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 3. Energetică | 12. Ingineria sistemelor |
| 4. Ingineria Chimică | 13. Inginerie energetică |
| 5. Inginerie Civilă | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 6. Inginerie Electrică | 15. Ingineria materialelor |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 16. Inginerie și Management |
| 8. Inginerie Industrială | 17. Arhitectură |
| 9. Inginerie Mecanică | 18. Inginerie civilă și instalații |

Universitatea Politehnica Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2017

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnica Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
Tel./fax 0256 403823
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în calitate de cadru didactic asociat, iar din ultimul an de cadru didactic titular la Facultatea de Inginerie Hunedoara, Departamentul de Inginerie Electrică și Informatică Industrială și în același timp doctorand la Facultatea de Automatică și Calculatoare, Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată ale Universității Politehnica Timișoara.

În cadrul acestei teze au fost analizate, modelate și conduse cuptoarele cu arc electric trifazate cu acțiuni directă utilizate în cadrul procesului de elaborare al oțelului.

Doresc să îmi exprim profunda recunoștință și să le mulțumesc tuturor celor care m-au îndrumat științific și m-au încurajat în demersul de finalizare al acestei lucrări.

Pentru realizarea întregii lucrări doresc să aduc alese mulțumiri conducătorului științific, Domnului Prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean, pentru sprijinul și îndrumarea deosebită pe întreaga perioadă de elaborare a tezei, dar și pentru răbdarea de care a dat dovadă.

De asemenea doresc să îmi exprim întreaga considerație față de Doamna Prof.univ.dr.ing. Manuela Pănoiu, respectiv față de Domnul Prof.univ.dr.ing. Caius Pănoiu al căror exemplu de dăruire profesională și didactică a constituit un adevărat model profesional pentru mine. Le mulțumesc pentru sprijinul științific și moral acordat pentru realizarea prezentei lucrări.

Doresc să le aduc mulțumiri Domnului Prof.univ.dr.ing. Ioan Filip de la Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată Timișoara pentru dialogurile constructive punctate, respectiv Domnului Conf.dr. Ionel Muscalagiu de la Departamentul de Inginerie Electrică și Informatică Industrială Hunedoara pentru sprijinul acordat.

De asemenea, îmi exprim adâncă recunoștință și mulțumire soțului, fetiței mele, părinților și fratelui meu pentru sprijinul și înțelegerea necondiționată pe durata elaborării acestei lucrări.

Timișoara, noiembrie 2017

Cu deosebită considerație,
Loredana Ghiorghioni (Ghiormez)

Pentru familia mea

Ghiorghioni, Loredana

MODELAREA, IDENTIFICAREA ȘI CONDUCEREA SISTEMELOR CU ARC ELECTRIC. APLICAȚII PRIVIND CUPTORUL CU ARC ELECTRIC

Teze de doctorat ale UPT, Seria 12, Nr. 19, Editura Politehnica, 2017, 224 pagini, 270 figuri, 4 tabele.

ISSN: 2068-7990

ISBN:978-606-35-0174-6

Cuvinte cheie:

procesul de elaborare al oțelului, arc electric, cuptorul cu arc electric, modelare matematică, identificare, rețele neuronale artificiale, reglarea curentului arcului, reglarea puterii arcului, logica fuzzy, sisteme de conducere clasice, sisteme de conducere bazate pe tehnici inteligente

Rezumat:

În cadrul prezentei lucrări se abordează domeniul de actualitate al conducerii proceselor metalurgice folosind metode convenționale și neconvenționale (logica fuzzy) cu particularizare la problematica modelării și conducerii procesului de elaborare al oțelului în cuptorul cu arc electric trifazat cu acțiune directă. Au fost dezvoltate modelele matematice bazate pe reprezentarea caracteristicii curent-tensiune a arcului electric, realizându-se analize comparative privitoare la influența parametrilor modelelor arcului, dar și a tensiunii din secundarul transformatorului cuptorului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric. Modelele au fost validate prin compararea datelor obținute prin simulare cu cele achiziționate de la un cuptor real. De asemenea au fost dezvoltate modele bazate pe rețele neuronale artificiale de tip perceptron multi-strat (MLP) sau rețele cu funcții de bază radiale (RBF) care au capacitatea de a învăța comportamentul sistemului. Un alt tip de rețea neuronală dezvoltată este rețeaua neuro-fuzzy adaptivă (ANFIS) care permite prescrierea valorilor curenților și ale tensiunilor arcului electric în funcție de datele achiziționate de la instalația tehnologică reală, luând în considerare un anumit pas de eșantionare.

S-au propus sisteme de conducere utilizate în vederea obținerii puterii maxime sau a unei puteri impuse a arcului electric prin modificarea vitezei și a sensului de deplasare al electrozilor de la cuptorul cu arc electric trifazat și anume: sistem cu regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire; sistem cu un regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire; sisteme bazate pe regulatoare clasice de tip proporțional (P), proporțional-integrator (PI), proporțional-derivativ (PD), proporțional-integrator-derivativ (PID); sisteme bazate pe strategii de conducere adaptivă în care se utilizează un regulator fuzzy pentru a seta parametrii reguletoarelor clasice. Sistemele de conducere propuse au fost analizate și comparate între ele pentru a evidenția care dintre acestea oferă performanțe mai bune referitoare la timpul de răspuns, suprareglajul obținut, respectiv la stabilitatea sistemului.

CUPRINS

Notații, abrevieri, acronime.....	8
Lista de tabele.....	11
Lista de figuri.....	12
1. INTRODUCERE	22
1.1 Oportunitatea și obiectivele tezei	22
1.2 Prezentarea conținutului tezei.....	23
2. PROCESUL DE ELABORARE AL OȚELULUI. PROBLEME DE IDENTIFICARE ȘI CONDUCERE	25
2.1 Stadiul actual și tendințe în procesul de elaborare al oțelului utilizând cuptoare cu arc electric.....	25
2.2 Considerații tehnologice privind procesele din cuptorul cu arc electric	28
2.2.2 Arcul electric	29
2.2.3 Arcul electric alimentat cu tensiune continuă	31
2.2.4 Arcul electric alimentat cu tensiune alternativă	32
2.3 Cuptoare cu arc electric cu acțiune directă pentru topirea oțelului	35
2.3.1 Elemente constructive ale cuptoarelor cu arc electric trifazat cu acțiune directă	35
2.3.2 Regimurile de funcționare ale cuptoarelor cu arc electric pentru topirea oțelului	37
2.3.3 Echipamentul electric al cuptorului cu arc electric cu acțiune directă... ..	38
2.3.4 Caracteristici de funcționare ale cuptoarelor cu arc electric cu acțiune directă	40
2.4 Operații și faze tehnologice pentru procesul de elaborare al oțelului în cuptorul cu arc electric.....	43
2.5 Parametrii energetici și tehnologici ai procesului de elaborare al oțelului ...	45
2.6 Probleme ale conducerii procesului de elaborare al oțelului în cuptorul cu arc electric	49
2.6.1 Regimurile de funcționare ale cuptorului	49
2.6.2 Sisteme de reglare automată a instalației cuptorului cu arc electric	50
2.6.3 Structura sistemului de conducere a procesului de elaborare al oțelului de la AM HD	52
2.6.4 Sisteme de conducere bazate pe tehnici inteligente.....	54
2.7 Concluzii	58
3. MODELAREA FUNCȚIONĂRII CUPTORULUI CU ARC ELECTRIC.....	59
3.1. Noțiuni generale	59
3.2. Analiza datelor achiziționate de la instalația reală.....	60
3.3. Schema electrică de funcționare a cuptorului cu arc electric ca și consumator trifazat simetric.....	62
3.4. Modelul liniarizat bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric 65	
3.4.1. Simularea MM-LIN cu valori reale ale instalației tehnologice	70
3.4.2. Analiza influenței parametrilor modelului MM-LIN asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric	72
3.4.2.1. Modificarea parametrului R_1	74
3.4.2.2. Modificarea lungimii arcului electric, L_{arc}	77
3.4.3. Influența tensiunii din secundarul transformatorului, U_s , asupra tensiunii, curentului și puterii arcului	79

6 Cuprins

3.4.4. Validarea MM-LIN	80
3.5. Modelul exponențial bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric (MM-EXP1)	83
3.5.1. Analiza influenței parametrilor modelului MM-EXP1 asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric	86
3.5.1.1. Modificarea parametrului R_1	88
3.5.1.2. Modificarea parametrului R_2	89
3.5.1.3. Modificarea parametrului R_3	90
3.5.1.4. Modificarea lungimii arcului electric, L_{arc}	92
3.5.2. Influența tensiunii din secundarul transformatorului, U_s , asupra tensiunii, curentului și puterii arcului	93
3.5.3. Validarea modelului MM-EXP1	94
3.6. Modelul MM-EXP2 bazat pe caracteristica curent-tensiune	97
3.6.1. Analiza influenței parametrilor modelului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric	99
3.6.2. Influența tensiunii din secundarul transformatorului, U_s , asupra tensiunii, curentului și puterii arcului	104
3.6.3. Validarea modelului MM-EXP2	106
3.7. Modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc (MM-HL)	108
3.7.1. Analiza influenței parametrilor modelului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric	110
3.7.2. Influența tensiunii din secundarul transformatorului, U_s , asupra tensiunii, curentului și puterii arcului	116
3.7.3. Validarea modelului MM-HL	118
3.8. Modelul dual-exponențial bazat pe caracteristica curent-tensiune (MM-DE)	120
3.8.1. Analiza influenței parametrilor modelului asupra tensiunii și curentului arcului electric	122
3.8.2. Influența tensiunii din secundarul transformatorului, U_s , asupra tensiunii, curentului și puterii arcului	127
3.8.3. Validarea modelului MM-DE	129
3.9. Modele bazate pe rețele neuronale artificiale	132
3.9.1. Modelul bazat pe rețele de tip perceptron multi-strat (MLP)	133
3.9.2. Modelul bazat pe rețele neuronale cu funcții de bază radiale (RBF) ...	134
3.9.3. Modelul bazat pe rețele neuro-fuzzy adaptive (ANFIS)	136
3.10. Concluzii	142
4. SISTEME DE CONDUCERE ÎN VEDEREA REGLĂRII PUTERII ARCULUI ELECTRIC	143
4.1. Preliminarii	143
4.2. Reglarea curentului arcului	144
4.2.1. Sistem de conducere bazat pe regulatoare fuzzy	144
4.2.1.1. Regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire	145
4.2.1.1.1. Proiectarea regulatorului fuzzy	145
4.2.1.1.2. Simularea funcționării sistemului de conducere cu regulator fuzzy	148
4.2.1.1.3. Variația treaptă a mărimii de referință	150
4.2.1.1.4. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte	151
4.2.1.1.5. Introducerea unei perturbații de tip treaptă în proces în cazul unei referințe constante	153

4.2.1.1.6. Introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces în cazul unei referințe constante	154
4.2.1.2. Regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire	156
4.2.1.2.1. Proiectarea regulatorului fuzzy	156
4.2.1.2.2. Simularea funcționării sistemelor de conducere cu regulator fuzzy	158
4.2.1.2.3. Variația treaptă a mărimii de referință	160
4.2.1.2.4. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte	161
4.2.1.2.5. Introducerea unei perturbații de tip treaptă în proces în cazul unei referințe constante	163
4.2.1.2.6. Introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces în cazul unei referințe constante	164
4.2.2. Sistem de conducere bazat pe regulator de tip P	166
4.2.2.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte	168
4.2.2.2. Introducerea unor perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante	170
4.2.3. Analiza comparativă a unor sisteme de conducere cu regulator fuzzy și cu regulator P	171
4.2.3.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte	171
4.2.3.2. Introducerea unor perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante	171
4.2.4. Sistem de conducere bazat pe regulator de tip PD	172
4.2.4.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte	175
4.2.4.2. Introducerea în proces a unei perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante	176
4.2.5. Analiza comparativă a sistemului prevăzut cu regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire - MF mixte și respectiv cu regulator PD	177
4.2.5.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte	177
4.2.5.2. Introducerea în proces unei perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante	178
4.2.6. Sistem de conducere bazat pe regulator de tip PI	178
4.2.6.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte	182
4.2.6.2. Introducerea în proces a unei perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante	183
4.2.7. Sistem de conducere bazat pe regulator de tip PID	183
4.2.7.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte	185
4.2.7.2. Introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces în cazul unei referințe constante	186
4.2.8. Sistem de conducere adaptiv bazat pe regulator de tip PI acordat de un regulator fuzzy	187
4.2.8.1. Proiectarea regulatorului fuzzy utilizat la acordarea regulatorului PI ..	188
4.2.8.2. Simularea funcționării sistemului de conducere cu regulator fuzzy cu MF triunghiulare, trapezoidale și mixte	190
4.2.8.3. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte	192
4.2.8.4. Introducerea în proces a unei perturbații de tip succesiuni de trepte la o referință constantă	193
4.2.9. Analiza comparativă a sistemului prevăzut cu regulator PI acordat de regulatorul fuzzy cu MF mixte și respectiv a sistemului cu regulator PI	194
4.2.9.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte	194

8 Cuprins

4.2.9.2. Introducerea în proces a unei perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante	194
4.3. Reglarea puterii arcului electric.....	195
4.3.1. Regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire	196
4.3.1.1. Simularea funcționării sistemului de conducere cu regulator fuzzy	196
4.3.1.2. Introducerea în proces a unei perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe variabile	198
4.3.1.3. Modificarea treptei de setare a transformatorului și variația treaptă a referinței, respectiv introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces	199
4.3.2. Regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire.....	200
4.3.2.1. Simularea funcționării sistemului de conducere cu regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire	202
4.3.2.2. Introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces în cazul unei referințe variabile.....	203
4.3.2.3. Modificarea treptei de setare a transformatorului și variația treaptă a referinței, respectiv introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces	204
4.4. Concluzii	206
5. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII. PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE.....	208
5.1. Concluzii finale	208
5.2. Contribuții personale	209
5.3. Perspective de dezvoltare	211
Anexa A1 Lista de lucrări publicate în domeniul tezei.....	212
Bibliografie.....	214

Notații, abrevieri, acronime

AM HD	– S.C. ArcelorMittal Hunedoara S.A.
ANFIS	– rețele neuro-fuzzy adaptive
ARCNET	– Attached Resource Computer Network
BCP	– blocul de control al puterii
BCT	– blocul de control al procesului de topire
BCTC	– bloc de control al poziției ploturilor transformatorului cuptorului
BCTp	– blocului de control al temperaturii din cuptor
C și D	– constante ce determină diferența dintre secțiunile caracteristicii curent-tensiune când curentul crește respectiv scade
CAE	– cuptor cu arc electric
EBT	– Excentric Bottom Tap-Hole
I_0	– curent de magnetizare
i_1	– valoarea curentului aferentă tensiunii U_{am}
i_2	– valoarea curentului aferentă tensiunii U_{st}
i_3 și $-i_3$	– valori ale curenților ce corespund tensiunilor U_m ale arcului electric pe fiecare semialternanță
i_4 și $-i_4$	– valoarea curentului arcului regăsită la intersecția celor două drepte date de pantele R_2 și R_3
I_{arc}	– curentul arcului electric
I_{sc}	– curentul de scurtcircuit
I_{Tn}	– curentul nominal de sarcină
I_1, I_2, I_3	– intensitatea curentului electric pe cele trei faze din secundarul transformatorului
L	– inductivitatea echivalentă a circuitului de alimentare
L_S, L_{RS}	– inductanța bobinei sursei de alimentare, respectiv a rețelei scurte de alimentare
L_{arc}	– lungimea arcului electric
MBCP	– model bazat pe control predictiv
MM-0	– model liniarizat bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric
MM-DE	– model matematic dual exponențial al arcului electric
MM-EXP1	– modelul exponențial bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric
MM-EXP2	– modelul 2 exponențial bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric
MM-HL	– model matematic hiperbolic liniarizat al arcului electric
MM-LIN	– model matematic liniarizat extins al arcului electric
P	– punctul de măsură din secundarul transformatorului
P_{arc}	– puterea arcului electric
P_t	– puterea activă absorbită
r	– rezistența echivalentă a circuitului de alimentare
R_{Bl}, X_{Bl}	– rezistența electrică, respectiv reactanța bobinei de limitare din circuitului de alimentare
R_T, X_T	– rezistența electrică, respectiv reactanța echivalentă ale transformatorului cuptorului
$R_{1rs}, R_{2rs}, R_{3rs}$	– rezistența electrică aferentă celor trei faze ale rețelei

10 Notății, abrevieri, acronime

	scurte
$r_1, r_2, r_3, x_1, x_2, x_3$	– rezistența electrică totală pe faze, respectiv reactanța totală pe faze ale circuitului de alimentare a cuptorului raportate la tensiunea din primarul transformatorului
R_0, X_0	– rezistența electrică, respectiv reactanța de magnetizare
R_1, R_2, R_3	– pante ale dreptelor
R_{arc}	– rezistența arcului electric
RNA MLP	– rețea neuronală artificială de tip perceptron multi-strat
RNA RBF	– rețea neuronală artificială cu funcții de bază radiale
SAH	– sistem de acționare hidraulic
SC	– sistem de conducere
t	– timpul
TC	– transformator de curent
TT	– transformator de tensiune
Tt	– traductorul de temperatură
UHP EAF	– Ultra High Power Electric Arc Furnace
U_0 și I_0	– componentele continue ale tensiunii și curentului
U_{arc}	– tensiunea arcului electric
U_c	– valoarea constantă a tensiunii arcului electric
U_k și I_k	– valorile efective ale armonicilor de tensiune și de curent
U_m	– tensiunea ce se obține ca medie aritmetică între tensiunea de amorsare și cea de stingere
U_s	– tensiunea sursei de alimentare
U_{st}	– tensiunea de stingere a arcului electric
$X_{1rs}, X_{2rs}, X_{3rs}$	– reactanțele aferente celor trei faze ale rețelei scurte
X_S	– reactanța sursei de alimentare
X_{RS}	– reactanța rețelei scurte de alimentare a cuptorului
Z	– impedanța schemei echivalente
Z_S	– impedanța sursei de alimentare
Z_{RS}	– impedanța rețelei scurte de alimentare a cuptorului
ω, f	– pulsația, respectiv frecvența rețelei de alimentare
ΔP_p	– pierderile de putere

Lista de tabele

Tabelul 2.1 – Valorile curenților și ale tensiunilor în primarul și secundarul transformatorului

Tabelul 3.1 Analiza comparativă a modelelor

Tabelul 4.1 – Baza de reguli pentru sistemul fuzzy propus

Tabelul 4.2 – Baza de reguli pentru regulatorul fuzzy care acordează regulatorul PI

Lista de figuri

Fig.2.1. Caracteristica statică a arcului electric alimentat cu tensiune continuă.	32
Fig.2.2. Caracteristica dinamică a arcului electric alimentat în tensiune continuă...	32
Fig.2.3. Schema echivalentă a circuitului de alimentare a arcului electric alimentat cu tensiune alternativă.	32
Fig.2.4. Forma de variație a mărimilor electrice în circuitul arcului electric.	33
Fig.2.5. Caracteristica dinamică a arcului electric alimentat cu tensiune alternativă.	34
Fig.2.6. Instalația cuptorului cu arc electric de tip EBT – vedere frontală secționată și vedere laterală.	35
Fig.2.7. Elementele constructive ale cuptorului cu arc electric cu acțiune directă utilizat pentru topirea oțelului.....	36
Fig.2.8. Schemele electrice echivalente ale cuptorului cu arc electric.	41
Fig.2.9. Operații și faze tehnologice ale procesului de elaborare a oțelului în cuptorul cu arc electric.....	43
Fig.2.10. Procesului tehnologic de elaborare al oțelului.	45
Fig.2.11. Sistemul de conducere al poziției electrozilor în cuptorul cu arc electric. .	50
Fig.2.12. Schema de principiu a unui sistem de conducere cu calculator de proces a cuptorului cu arc electric.....	51
Fig.2.13. Structura instalației de comandă a proceselor în cuptorul cu arc electric cu acțiune directă de la AM HD.	53
Fig.2.14. Sistem de conducere bazat pe regulator fuzzy.....	54
Fig.2.15. Schema bloc de reglare a curentului arcului pentru o fază.	54
Fig.2.16. Organigrama pentru algoritmi genetici.	55
Fig.2.17. Sistem de conducere bazat pe regulator fuzzy și pe un algoritm de interpolare.	55
Fig.2.18. Sistem de conducere bazat pe regulator PID acordat de regulator fuzzy.	56
Fig.2.19. Sistemul de conducere bazat pe regulator PID acordat o rețea neuronală ai cărei parametri sunt obținuți prin algoritmi genetici.....	56
Fig.2.20. Organigrama algoritmului genetic.....	57
Fig.2.21. Sistemul de conducere adaptiv.....	57
Fig.3.1. Forme de undă pentru tensiunile și curenții achiziționați de la instalația reală în faza de topire.	62
Fig.3.2. Forme de undă pentru tensiunile și curenții achiziționați de la instalația reală în faza de afânare.	62
Fig.3.3. Schema electrică de alimentare a cuptorului cu arc electric pentru o fază.	63
Fig.3.4. Schema Simulink implementată în Matlab/Simulink pentru simularea schemei electrice de funcționare a cuptorului cu arc electric.	65
Fig.3.5. Caracteristica reală și liniarizată a arcului electric.	66
Fig.3.6. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric pentru modelul <i>MM-0</i>	68
Fig.3.7. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric corespunzătoare <i>MM-LIN</i>	68
Fig.3.8. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric pentru <i>MM-0</i> și <i>MM-LIN</i>	69
Fig.3.9. Forme de undă pentru curentul și tensiunea arcului: a) <i>MM-0</i> , b) <i>MM-LIN</i>	70
Fig.3.10. Interfața grafică utilizator pentru simularea <i>MM-LIN</i>	73
Fig.3.11. Schema Simulink corespunzătoare implementării <i>MM-LIN</i>	73
Fig.3.12. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric.....	74
Fig.3.13. a) Variația parametrului R_I , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.....	75
Fig.3.14. Caracteristica curent-tensiune: a) a arcului electric, b) a cuptorului.	75

Fig.3.15. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	75
Fig.3.16. a) Variația parametrului R_2 , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.	76
Fig.3.17. Caracteristica curent-tensiune: a) a arcului electric, b) a cuptorului.	76
Fig.3.18. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	77
Fig.3.19. a) Variația lungimii arcului, b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.	78
Fig.3.20. Caracteristica curent-tensiune la modificarea lungimii arcului a) a arcului, b) a cuptorului.	78
Fig.3.21. Formele de undă ale curentului și tensiunii arcului electric la modificarea lungimii arcului.	78
Fig.3.22. Forme de undă ale tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului la valori diferite în secundarul transformatorului.	79
Fig.3.23. Forme de undă la modificarea tensiunii de alimentare pentru a) curentul arcului electric, b) tensiunea arcului electric.	80
Fig.3.24. Caracteristica curent-tensiune la modificarea tensiunii de alimentare a) a arcului, b) a cuptorului.	80
Fig.3.25. Variația puterilor în funcție de treptele de tensiune din secundarul transformatorului.	81
Fig.3.26. Forme de undă obținute pentru faza de topire și cea de afânare pentru:	81
Fig.3.27. Forme de undă pentru tensiunea măsurată și simulată în cele două faze tehnologice.	82
Fig.3.28. Forme de undă pentru curentul măsurat și simulat în cele două faze tehnologice.	82
Fig.3.29. Caracteristica curent-tensiune pentru cele două faze tehnologice (tensiune din punctul de măsură din secundarul transformatorului).	82
Fig.3.30. Caracteristica curent-tensiune pentru cele două faze tehnologice (tensiunea arcului electric).	83
Fig.3.31. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric pentru modelul MM-EXP1.	85
Fig.3.32. Interfața grafică utilizator pentru simularea modelului MM-EXP1.	86
Fig.3.33. Schema <i>Simulink</i> corespunzătoare implementării MM-EXP1.	87
Fig.3.34. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric.	87
Fig.3.35. a) Variația parametrului R_1 , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.	88
Fig.3.36. Caracteristica curent-tensiune: a) a arcului electric, b) a cuptorului.	88
Fig.3.37. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	89
Fig.3.38. a) Variația parametrului R_2 , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.	89
Fig.3.39. Caracteristica curent-tensiune: a) a arcului electric, b) a cuptorului.	90
Fig.3.40. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	90
Fig.3.41. a) Variația parametrului R_3 , b) Variația puterilor arcului.	91
Fig.3.42. Caracteristica curent-tensiune: a) a arcului electric, b) a cuptorului.	91
Fig.3.43. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	91
Fig.3.44. a) Variația lungimii arcului, b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.	92

14 Lista de figuri

Fig.3.45. Caracteristica curent-tensiune la modificarea lungimii arcului a) a arcului, b) a cuptorului.....	92
Fig.3.46. Formele de undă ale curentului și tensiunii arcului electric la modificarea lungimii arcului.	93
Fig.3.47. Forme de undă la modificarea tensiunii de alimentare pentru a) curentul arcului electric, b) tensiunea arcului electric.	94
Fig.3.48. Caracteristica curent-tensiune la modificarea tensiunii de alimentare a) a arcului electric, b) a cuptorului.	94
Fig.3.49. Variația puterilor în funcție de treptele de tensiune din secundarul transformatorului.	95
Fig.3.50. Forme de undă obținute în cele două faze tehnologice pentru:	96
Fig.3.51. Forme de undă pentru tensiunea măsurată și simulată în cele două faze tehnologice.	96
Fig.3.52. Forme de undă pentru curentul măsurat și simulat în cele două faze tehnologice.	96
Fig.3.53. Caracteristica curent-tensiune a cuptorului pentru cele două faze tehnologice (tensiune din punctul de măsură din secundarul transformatorului)... ..	96
Fig.3.54. Caracteristica curent-tensiune a arcului pentru cele două faze tehnologice.	97
Fig.3.55. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric corespunzătoare MM-EXP2.	98
Fig.3.56. Interfața grafică utilizator pentru simularea modelului MM-EXP2.....	99
Fig.3.57. Schema Simulink aferentă implementării MM-EXP2.....	100
Fig.3.58. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric.....	100
Fig.3.59. a) Variația parametrului R_L , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.....	101
Fig.3.60. Caracteristica curent-tensiune a) a arcului electric, b) a cuptorului.	101
Fig.3.61. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	102
Fig.3.62. a) Variația coeficientului c , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.....	102
Fig.3.63. a) Caracteristica curent-tensiune a arcului electric, b) Caracteristica curent-tensiune a cuptorului.....	102
Fig.3.64. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	103
Fig.3.65. a) Variația lungimii arcului, b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.....	103
Fig.3.66. Caracteristica curent-tensiune a arcului la modificarea lungimii arcului.	104
Fig.3.67. Formele de undă ale curentului și tensiunii arcului electric la modificarea lungimii arcului.	104
Fig.3.68. Forme de undă la modificarea tensiunii de alimentare pentru a) curentul arcului electric, b) tensiunea arcului electric.	105
Fig.3.69. Caracteristica curent-tensiune la modificarea tensiunii de alimentare a) a arcului electric, b) a cuptorului.	105
Fig.3.70. Variația puterilor în funcție de treptele de tensiune din secundarul transformatorului.	106
Fig.3.71. Forme de undă obținute în cele două faze tehnologice pentru:	106
Fig.3.72. Forme de undă pentru tensiunea măsurată și simulată în cele două faze tehnologice.	107
Fig.3.73. Forme de undă pentru curentul măsurat și simulat în cele două faze tehnologice.	107

Fig.3.74. Caracteristica curent-tensiune a cuptorului pentru cele două faze tehnologice.	107
Fig.3.75. Caracteristica curent-tensiune a arcului pentru cele două faze tehnologice.	108
Fig.3.76. Caracteristica curent-tensiune a arcului corespunzătoare MM-HL.	109
Fig.3.77. Interfața grafică utilizator pentru simularea MM-HL.	110
Fig.3.78. Schema Simulink aferentă implementării MM-HL.	111
Fig.3.79. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric.	111
Fig.3.80. a) Variația parametrului R_I , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.	112
Fig.3.81. a) Caracteristica curent-tensiune a) a arcului electric, b) a cuptorului. .	112
Fig.3.82. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	113
Fig.3.83. a) Variația parametrului C , b) Variațiile puterilor arcului.	113
Fig.3.84. a) Caracteristica curent-tensiune a arcului electric, b) Caracteristica curent-tensiune a cuptorului.	113
Fig.3.85. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	114
Fig.3.86. a) Variația parametrului D , b) Variația puterilor arcului.	114
Fig.3.87. Caracteristica curent-tensiune a) a arcului electric, b) a cuptorului.	114
Fig.3.88. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	115
Fig.3.89. a) Variația lungimii arcului, b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.	115
Fig.3.90. Caracteristica curent-tensiune a arcului la modificarea lungimii arcului.	116
Fig.3.91. Formele de undă ale curentului și tensiunii arcului electric la modificarea lungimii arcului.	116
Fig.3.92. Forme de undă la modificarea tensiunii de alimentare pentru a) curentul arcului electric, b) tensiunea arcului electric.	117
Fig.3.93. Caracteristica curent-tensiune la modificarea tensiunii de alimentare a) a arcului electric, b) a cuptorului.	117
Fig.3.94. Variația puterilor în funcție de treptele de tensiune din secundarul transformatorului.	118
Fig.3.95. Forme de undă obținute în cele două faze tehnologice pentru:	119
Fig.3.96. Forme de undă pentru tensiunea măsurată și simulată în cele două faze tehnologice.	119
Fig.3.97. Forme de undă pentru curentul măsurat și simulat în cele două faze tehnologice.	119
Fig.3.98. Caracteristica curent-tensiune pentru cele două faze tehnologice (tensiune din punctul de măsură din secundarul transformatorului).	119
Fig.3.99. Caracteristica curent-tensiune pentru cele două faze tehnologice (tensiunea arcului electric).	120
Fig.3.100. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric corespunzătoare modelului MM-DE.	121
Fig.3.101. Interfața grafică utilizator pentru simularea modelului MM-DE.	122
Fig.3.102. Schema Simulink aferentă implementării MM-DE.	123
Fig.3.103. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric.	123
Fig.3.104. a) Variația parametrului R_I , b) Variațiile puterilor arcului.	124
Fig.3.105. Caracteristica curent-tensiune a) a arcului electric, b) a cuptorului.	124
Fig.3.106. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	125

16 Lista de figuri

Fig.3.107. a) Variația coeficientului c , b) Variațiile puterilor arcului.	125
Fig.3.108. a) Caracteristica curent-tensiune a arcului electric, b) Caracteristica curent-tensiune a arcului electric măsurată în punctul de măsură din secundarul transformatorului cuptorului.	125
Fig.3.109. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.	126
Fig.3.110. a) Variația lungimii arcului, b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.	126
Fig.3.111. Caracteristica curent-tensiune la modificarea lungimii arcului.	127
Fig.3.112. Formele de undă ale curentului și tensiunii arcului electric la modificarea lungimii arcului.	127
Fig.3.113. Forme de undă la modificarea tensiunii de alimentare pentru a) curentul arcului electric, b) tensiunea arcului electric.	128
Fig.3.114. Caracteristica curent-tensiune la modificarea tensiunii de alimentare a) a arcului electric, b) a cuptorului.	128
Fig.3.115. Variația puterilor în funcție de treptele de tensiune din secundarul transformatorului.	129
Fig.3.116. Forme de undă obținute în cele două faze tehnologice pentru:	129
Fig.3.117. Forme de undă pentru tensiunea măsurată și simulată în cele două faze tehnologice.	130
Fig.3.118. Forme de undă pentru curentul măsurat și simulat în cele două faze tehnologice.	130
Fig.3.119. Caracteristica curent-tensiune a cuptorului pentru cele două faze tehnologice.	130
Fig.3.120. Caracteristica curent-tensiune a arcului pentru cele două faze tehnologice.	131
Fig.3.121. Arhitectura unei RNA de tip MLP cu propagare înainte.	133
Fig.3.122. a) Variația curentului măsurat și cel simulat, b) Variația tensiunii măsurate și cea simulate utilizând RNA MLP.	134
Fig.3.123. Caracteristica curent-tensiune a cuptorului pentru valori măsurate și simulate.	134
Fig.3.124. Arhitectura unei rețele neuronale de tip RBF.	135
Fig.3.125. a) Curentul măsurat și modelat, b) Tensiunea măsurată și modelată.	135
Fig.3.126. Caracteristica curent-tensiune a cuptorului obținută din măsurare și simulare.	135
Fig.3.127. a) Sistem fuzzy de tip Sugeno de ordinul 1 cu 2 intrări și 2 reguli, b) Structura echivalentă ANFIS (Jan93).	137
Fig.3.128. Structura sistemului ANFIS pentru $s=4$, $d=3$ și $p=4$	138
Fig.3.129. Formele de undă pentru a) tensiunea măsurată pe o fază, b) curentul măsurat pe o fază.	138
Fig.3.130. Variația curentului măsurat (albastru) și a curentului prezis (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la antrenarea rețelei.	139
Fig.3.131. Variația curentului măsurat (albastru) și a curentului prezis (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la validarea rețelei.	139
Fig.3.132. Variația curentului măsurat (albastru) și a curentului prezis (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la testarea rețelei.	140
Fig.3.133. Variația tensiunii măsurată (albastru) și a tensiunii prezisă (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la antrenarea rețelei.	140
Fig.3.134. Variația tensiunii măsurată (albastru) și a tensiunii prezisă (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la validarea rețelei.	141

Fig.3.135. Variația tensiunii măsurată (albastru) și a tensiunii prezisă (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la testarea rețelei.	141
Fig.4.1. Schema bloc a sistemului de conducere.	144
Fig.4.2. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "EroareaCurent".	147
Fig.4.3. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire "VitezaSensElectrozi".	147
Fig.4.4. Baza de reguli pentru sistemul fuzzy propus.	147
Fig.4.5. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "EroareaCurent".	147
Fig.4.6. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire "VitezaSensElectrozi".	147
Fig.4.7. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "EroareaCurent".	148
Fig.4.8. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire "VitezaSensElectrozi".	148
Fig.4.9. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe logica fuzzy.	149
Fig.4.10. Referința și răspunsurile sistemelor cu regulator fuzzy utilizând MF triunghiulare, trapezoidale respectiv mixte.	149
Fig.4.11. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului.	150
Fig.4.12. Schema bloc pentru regulatorul fuzzy pentru o variație treaptă a referinței.	150
Fig.4.13. a) Referința și răspunsurile sistemelor cu MF triunghiulare, trapezoidale și mixte, b) Variația lungimii arcului la modificarea treaptă a referinței.	151
Fig.4.14. Variația curentului și a tensiunii arcului la modificarea treaptă a referinței.	151
Fig.4.15. Schema bloc a sistemului de conducere cu regulator fuzzy pentru variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte.	152
Fig.4.16. a) Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte și respectiv variația răspunsului sistemului (curentul arcului), b) Variația lungimii arcului.	152
Fig.4.17. Schema bloc pentru regulator fuzzy la acțiunea unei perturbații de tip treaptă.	153
Fig.4.18 a) Variația lungimii arcului la acțiunea unei perturbații de tip treaptă, b) Referința și răspunsuri sisteme cu MF triunghiulare, trapezoidale respectiv mixte.	153
Fig.4.19. Variația curentului și tensiunii arcului la introducerea unei perturbații în proces.	154
Fig.4.20. Schema bloc a sistemului de conducere în cazul unei perturbații de tip succesiuni de trepte.	155
Fig.4.21. a) Variația lungimii arcului, b) Curentul de referință respectiv variația curentului arcului.	155
Fig.4.22. a) Variația lungimii arcului, b) Curentul de referință respectiv variația curentului arcului.	156
Fig.4.23. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "DerivataErorii"	157
Fig.4.24. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "DerivataErorii".	158
Fig.4.25. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "DerivataErorii".	158
Fig.4.26. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe logica fuzzy.	159
Fig.4.27. Referința și răspunsurile sistemelor cu regulator fuzzy utilizând MF triunghiulare, trapezoidale și mixte.	159
Fig.4.28. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului.	160
Fig.4.29. Schema bloc pentru regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire la modificarea treaptă a valorii referinței.	160
Fig.4.30. a) Referința și răspunsurile sistemelor cu MF triunghiulare, trapezoidale și mixte, b) Variația lungimii arcului la modificarea treaptă a referinței pentru regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire.	161
Fig.4.31. Variația curentului și a tensiunii arcului la o modificare a valorii referinței – regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire.	161

18 Lista de figuri

Fig.4.32. Schema bloc a sistemului de conducere cu regulator fuzzy pentru variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte.	162
Fig.4.33. a) Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte și respectiv variația răspunsului sistemului (curentul arcului), b) Variația lungimii arcului.	162
Fig.4.34. Schema bloc pentru simularea sistemului de conducere bazat pe regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire la introducerea unei perturbații de tip treaptă în proces.	163
Fig.4.35. a) Variația lungimii arcului la apariția unei perturbații, b) Referința și răspunsuri sisteme utilizând regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire.	163
Fig.4.36. Variația curentului și tensiunii arcului la introducerea unei perturbații în proces în cazul regulatorului fuzzy cu două intrări și o ieșire.	164
Fig.4.37. Schema bloc pentru regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire la acțiunea perturbațiilor de tip succesiuni de trepte.	164
Fig.4.38. a) Variația lungimii arcului la acțiunea perturbațiilor de tip succesiuni de trepte, b) Referința și răspunsul sistemului fuzzy cu două intrări și o ieșire.	165
Fig.4.39. a) Variația lungimii arcului, b) Curentul de referință respectiv variația curentului arcului.	165
Fig.4.40. Schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere cu regulator de tip P	166
Fig.4.41. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip P , cu diferite valori negative ale lui K_p	167
Fig.4.42. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip P , cu valori negative ale K_p în jurul valorii de $-5e-03$	167
Fig.4.43. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip P , cu diferite valori pozitive ale lui K_p	168
Fig.4.44. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului – regulator de tip P	168
Fig.4.45. Schema bloc a sistemului de conducere cu regulator P la variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte.	169
Fig.4.46. a) Referința și răspunsul sistemului de conducere cu regulator P , b) Variația lungimii arcului.	169
Fig.4.47. Schema bloc a sistemului de conducere cu regulator P cu perturbații de tip succesiuni de trepte.	170
Fig.4.48. a) Variațiile lungimii arcului pentru perturbații de tip succesiuni de trepte, b) Variațiile curentului arcului.	170
Fig.4.49. a) Răspunsurile sistemelor de conducere cu regulator fuzzy și regulator P la referință variabilă, b) Variația lungimii arcului.	171
Fig.4.50. a) Variația lungimii arcului pentru perturbații de tip succesiuni de trepte, b) Variațiile curentului arcului în cazul sistemelor cu regulator fuzzy și regulator P . .	172
Fig.4.51. Schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere bazat pe regulator de tip PD	173
Fig.4.52. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip PD pentru diferite valori negative ale lui K_D	173
Fig.4.53. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip PD pentru valori negative ale lui K_D în jurul valorii de $-5e-05$	174
Fig.4.54. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip PD pentru diferite valori pozitive ale lui K_D	174
Fig.4.55. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului – regulator de tip PD	175
Fig.4.56. Schema bloc pentru regulator PD la modificarea referinței sub forma unor succesiuni de trepte.	175

Fig.4.57. a) Variația referinței și răspunsul sistemului cu regulator PD, b) Variația lungimii arcului.	176
Fig.4.58. Schema bloc pentru regulator PD la introducerea unei perturbații sub forma unei succesiuni de trepte în proces.	176
Fig.4.59. a) Variațiile lungimii arcului la acționarea perturbațiilor asupra sistemului prevăzut cu regulator PD, b) Răspunsul sistemului cu regulator PD.	177
Fig.4.60. a) Răspunsurile sistemelor cu regulator fuzzy și regulator PD la variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte, b) Variația lungimii arcului.	177
Fig.4.61. a) Variația lungimii arcului, b) Răspunsurile sistemelor cu regulator fuzzy și regulator PD în cazul aplicării perturbațiilor.	178
Fig.4.62. Schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere bazat pe regulator de tip <i>PI</i>	179
Fig.4.63. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip <i>PI</i> pentru diferite valori negative ale lui K_I	179
Fig.4.64. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip <i>PI</i> pentru valori negative ale lui K_I în jurul valorii de $-5e-04$	180
Fig.4.65. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip <i>PI</i> pentru diferite valori pozitive ale lui K_I	180
Fig.4.66. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip <i>PI</i> pentru valori pozitive ale lui K_I în jurul valorii de $5e-04$	181
Fig.4.67. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip <i>PI</i> pentru valorile $K_I=-5e-04$ respectiv $K_I=5e-04$	181
Fig.4.68. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului pentru $K_I=-5e-04$	181
Fig.4.69. Schema bloc pentru regulator <i>PI</i> la modificarea referinței sub forma unor succesiuni de trepte.	182
Fig.4.70. a) Variația referinței și răspunsul sistemului cu regulator <i>PI</i> , b) Variația lungimii arcului.	182
Fig.4.71. Schema bloc pentru regulator <i>PI</i> la introducerea unei perturbații sub forma unei succesiuni de trepte în proces.	183
Fig.4.72. a) Variațiile lungimii arcului la acționarea perturbațiilor asupra sistemului prevăzut cu regulator <i>PI</i> , b) Răspunsul sistemului cu regulator <i>PI</i>	183
Fig.4.73. Schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere bazat pe regulator de tip <i>PID</i>	184
Fig.4.74. Referința și răspunsul sistemului cu regulator de tip <i>PID</i> obținut în regim staționar.	184
Fig.4.75. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului pentru regulator de tip <i>PID</i>	185
Fig.4.76. Schema bloc pentru regulator <i>PID</i> la modificarea referinței sub forma unor succesiuni de trepte.	185
Fig.4.77. a) Variația referinței și răspunsul sistemului cu regulator <i>PID</i> , b) Variația lungimii arcului.	186
Fig.4.78. Schema bloc pentru regulator <i>PID</i> la introducerea unei perturbații sub forma unei succesiuni de trepte în proces.	186
Fig.4.79. a) Variațiile lungimii arcului la acționarea perturbațiilor asupra sistemului prevăzut cu regulator <i>PID</i> , b) Răspunsul sistemului cu regulator <i>PID</i>	187
Fig.4.80. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe regulator <i>PI</i> acordat de regulator fuzzy.	187
Fig.4.81. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire " K_P ".	188
Fig.4.82. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire " K_I ".	188
Fig.4.83. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire " K_P ".	189

20 Lista de figuri

Fig.4.84. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire " K_I ".	189
Fig.4.85. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire " K_P ".	190
Fig.4.86. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire " K_I ".	190
Fig.4.87. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe regulator PI acordat de regulator fuzzy.	191
Fig.4.88. Răspunsul sistemelor cu regulator PI acordat de regulator fuzzy utilizând MF triunghiulare, trapezoidale și mixte.	191
Fig.4.89. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului.	191
Fig.4.90. Schema bloc pentru regulator fuzzy PI acordat de regulator fuzzy pentru variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte.	192
Fig.4.91. a) Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte și respectiv variația răspunsului sistemului (curentul arcului), b) Variația lungimii arcului.	192
Fig.4.92. Schema bloc pentru regulator PI acordat de regulator fuzzy la acțiunea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces.	193
Fig.4.93. a) Variația lungimii arcului, b) Referința și răspunsul sistemului cu regulator PI acordat de regulator fuzzy.	193
Fig.4.94. a) Răspunsurile sistemelor cu regulator PI acordat de regulator fuzzy și regulator PI la variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte, b) Variația lungimii arcului.	194
Fig.4.95. a) Variația lungimii arcului, b) Răspunsurile sistemelor cu regulator PI acordat de regulator fuzzy și regulator PI în cazul aplicării perturbațiilor.	195
Fig.4.96. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire.	196
Fig.4.97. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare " <i>EroareaPutere</i> ".	196
Fig.4.98. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire " <i>VitezaSensElectrozi</i> ".	196
Fig.4.99. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire.	197
Fig.4.100. Răspunsul sistemului de conducere cu regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire în regim staționar.	197
Fig.4.101. Schema bloc pentru sistemul de conducere bazat pe regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire la modificarea valorii referinței și la acțiunea perturbațiilor în proces pentru treapta 16 de setare a transformatorului.	198
Fig.4.102. a) Referința și răspuns sistem la modificarea valorii referinței și la acțiunea perturbațiilor în proces pentru treapta 16 a transformatorului, b) Variația lungimii arcului.	199
Fig.4.103. Schema bloc pentru sistemul de conducere bazat pe regulator fuzzy la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor în proces.	200
Fig.4.104. Variația referinței și răspunsul sistemului la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor în proces.	200
Fig.4.105. Variația lungimii arcului la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor în proces.	201
Fig.4.106. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire.	201
Fig.4.107. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare " <i>DerivataErorii</i> ".	201
Fig.4.108. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe logica fuzzy.	202
Fig.4.109. Răspunsul sistemului cu regulator fuzzy menținând constantă puterea de referință.	202
Fig.4.110. Schema bloc pentru sistemul de conducere bazat pe regulator fuzzy la modificarea valorii referinței și la acțiunea perturbațiilor în proces pentru treapta 16 de setare a transformatorului.	203

Fig.4.111. a) Variațiile referinței și răspunsului sistemului la modificarea valorii referinței și la acțiunea perturbațiilor asupra procesului pentru treapta 16 de setare a transformatorului, b) Variația lungimii arcului.	204
Fig.4.112. Schema bloc pentru sistemul de conducere bazat pe regulator fuzzy la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor asupra procesului.....	205
Fig.4.113. Variațiile referinței și răspunsul sistemului la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor în proces.....	205
Fig.4.114. Variația lungimii arcului la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor în proces.....	206

1. INTRODUCERE

1.1 Oportunitatea și obiectivele tezei

Proprietățile oțelurilor pot să varieze în limite largi în funcție de conținutul de carbon și de alte elemente de aliere, ele putând fi modificate prin tratamentele termice aplicate asupra oțelului. O mare parte din oțelul folosit astăzi este provenit din reciclarea deșeurilor feroase, acestea putând fi reciclate de nenumărate ori.

Cuptorul cu arc electric este utilizat pentru producerea oțelului prin topirea deșeurilor metalice, cuptorul fiind alimentat de la rețeaua electrică de putere.

Cuptoarele cu arc electric oferă o serie de avantaje: randament termic bun, durata mică de elaborare a șarjei, putere activă disipată mare, etc., dar există și anumite dezavantaje: generează curenți armonici pe cele trei faze, tensiuni armonice, consumă o cantitate însemnată de putere reactivă și produce dezechilibru pe cele trei faze ale rețelei electrice de putere. Cuptorul cu arc electric reprezintă însă o sarcină de putere neliniară, care înrăutățește considerabil calitatea energiei electrice din cauza caracterului neliniar al arcului electric, având un comportament aleatoriu [Gol97].

Deoarece există o preocupare crescută pentru calitatea energiei electrice este necesar să se adopte măsuri prin care să se reducă aceste efecte. Este important să se studieze comportarea arcului electric, deoarece, fiind un element neliniar de circuit [Sou09], acesta este principala cauză a perturbațiilor produse de cuptoarele cu arc electric în rețeaua electrică de putere.

Pentru a se putea desfășura procesul de topire este important să se atingă o temperatură mare în cuva cuptorului, în acest scop fiind utilizat arcul electric care fiind un mare consumator de energie electrică este necesar să se optimizeze puterea furnizată de transformatorul cuptorului. Deoarece puterea arcului electric depinde de lungimea acestuia, este necesar să existe un sistem care să modifice poziția electrozilor. Cuptorul cu arc electric nu ar putea funcționa dacă nu ar exista un control al energiei electrice cu care se alimentează acesta, tocmai din cauza variației aleatoare a sarcinii cuptorului. În timpul topirii apar multe scurtcircuite, iar dacă nu s-ar automatiza acest proces, s-ar putea să se ajungă la ruperea electrozilor sau să existe multe fluctuații de tensiune care vor fi introduse în rețeaua electrică de putere, producția ar scădea și ar fi afectate și celelalte echipamente conectate la rețeaua electrică. În acest sens, dacă se dorește înlăturarea acestor efecte nedorite, trebuie să existe un control eficient al poziției electrozilor.

Obiectivul principal al prezentei teze îl constituie modelarea, identificarea și implementarea unor structuri de conducere a sistemelor cu arc electric utilizate în procesul de elaborare al oțelului, cu scopul de a obține o anumită putere impusă pentru funcționarea cuptorului, reducându-se și efectele negative asupra rețelei electrice de putere, iar producția să fie optimă. În contextul acestui obiectiv în cadrul lucrării sunt dezvoltate următoarele direcții de cercetare:

- analiza procesului de elaborare al oțelului;

- dezvoltarea unor modele matematice utilizate pentru a descrie comportarea arcului electric ce apare în timpul procesului de elaborare al oțelului, pornind de la modelele existente în literatura de specialitate;
- dezvoltarea unor modele pentru sistemul de alimentare al cuptorului cu arc electric;
- dezvoltarea unor modele pentru sistemul cu acționare hidraulică, utilizat pentru modificarea poziției electrozilor;
- validarea modelelor dezvoltate prin compararea cu măsurători achiziționate de la instalația reală;
- modelarea întregii instalații a cuptorului cu arc electric;
- dezvoltarea unor variante de strategii/structuri de conducere performante, adecvate instalației tehnologice vizate;
- sinteza unor soluții de conducere a procesului de elaborare al oțelului bazate pe logica fuzzy;
- evaluarea performanțelor strategiilor de conducere.

Soluțiile moderne de conducere bazate pe utilizarea rețelelor neuronale, pe modele predictive, respectiv pe logica fuzzy, permit rezolvarea unor probleme care nu pot fi abordate prin soluții clasice.

1.2 Prezentarea conținutului tezei

Lucrarea care se constituie ca o sinteză a cercetărilor efectuate de autor pe parcursul stagiului de doctorat este structurată pe 5 capitole desfășurate pe 221 pagini, 270 figuri, 4 tabele și 125 referințe bibliografice.

O parte dintre contribuțiile aferente tezei au fost validate de către autor prin publicarea de lucrări științifice, după cum urmează: 9 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate ISI; 5 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate BDI; 1 lucrare publicată într-o revistă internațională din străinătate.

În **capitolul 1** sunt prezentate motivația și obiectivele tezei, avantajele și dezavantajele cuptoarelor cu arc electric trifazate, problemele care pot să apară în timpul funcționării acestor instalații, precum și conținutul tezei.

Capitolul 2 prezintă informațiile necesare cunoașterii procesului de elaborare al oțelului, a instalației cuptorului cu arc electric, a identificării și a conducerii procesului. Sunt prezentate modelele matematice abordate în literatura de specialitate care simulează comportamentul arcului electric, respectiv strategiile/structurile de conducere sintetizate în literatura de specialitate pentru conducerea procesului de elaborare al oțelului utilizând cuptoarele cu arc electric.

De asemenea este prezentată o clasificare a cuptoarelor cu arc electric fiind precizate principalele mărimi care caracterizează aceste instalații din punct de vedere energetic, dar și fenomenul care determină apariția arcului electric.

Pentru o cunoaștere cât mai precisă a cuptoarelor cu arc electric cu acțiune directă de tip EBT sunt prezentate elementele constructive, regimurile de funcționare, echipamentul electric și caracteristicile de funcționare ale acestora, iar pentru o cunoaștere cât mai precisă a procesului de elaborare al oțelului sunt prezentate operațiile și fazele tehnologice din cuptor și problemele conducerii procesului.

De asemenea sunt prezentate sistemele actuale de reglare automată a instalației cuptorului precum și sisteme de conducere bazate pe tehnici inteligente sintetizate în literatura de specialitate.

În **capitolul 3** sunt prezentate cinci modele matematice bazate pe reprezentarea caracteristicii curent-tensiune a arcului care simulează comportamentul arcului electric, respectiv un model care simulează funcționarea întregii instalații a cuptorului cu arc electric trifazat. Pentru fiecare model al arcului sunt realizate analize comparative privitoare la influența parametrilor modelelor arcului, dar și a tensiunii din secundarul transformatorului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric. Modelele propuse sunt validate prin compararea datelor obținute prin simulare cu cele achiziționate de la cuptorul real, pentru fiecare validare fiind ilustrate caracteristicile curent-tensiune a arcului, respectiv a cuptorului, dar și forma de undă a tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului, respectiv a curentului arcului.

De asemenea sunt dezvoltate modele bazate pe rețele neuronale artificiale de tip *perceptron multi-strat* (MLP) sau rețele cu funcții de bază radiale (RNA RBF) care au capacitatea de a învăța comportamentul sistemului. Un alt tip de rețea neuronală dezvoltată este cea de tip *ANFIS* (adaptive neuro-fuzzy inference system) care permite prescrierea valorilor curenților și ale tensiunilor arcului electric în funcție de datele achiziționate de la instalația tehnologică reală, luând în considerare un anumit pas de eșantionare.

În **capitolul 4** s-au sintetizat sisteme de conducere utilizate în vederea obținerii puterii maxime sau a unei puteri impuse a arcului electric prin modificarea vitezei și a sensului de deplasare al electrozilor de la cuptorul cu arc electric trifazat. În cadrul sistemelor de conducere dezvoltate mărimea reglată a fost curentul arcului sau puterea arcului.

Au fost sintetizate și analizate mai multe tipuri de sisteme de conducere considerate reprezentative pentru procesul avut în vedere: sistem cu regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire; sistem cu un regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire; sisteme bazate pe regulatoare clasice de tip proporțional (P), proporțional-integrator (PI), proporțional-derivativ (PD), proporțional-integrator-derivativ (PID); sisteme bazate pe strategii de conducere adaptivă în care se utilizează un regulator fuzzy pentru a seta parametrii reglatoarelor clasice.

Pentru implementarea sistemelor de conducere bazate pe logica fuzzy sunt considerate funcții de apartenență de tip triunghiular, trapezoidal sau mixt (trapezoidal la capete și triunghiular în rest), pentru fiecare variabilă lingvistică fiind utilizate 7 mulțimi fuzzy.

În cazul în care mărimea de referință este curentul arcului, pentru fiecare dintre sistemele de conducere propuse s-au prezentat răspunsurile obținute pentru: variația treaptă a mărimii de referință; variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte; introducerea unei perturbații de tip treaptă în proces în cazul unei referințe constante; introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces în cazul unei referințe constante.

Sistemele de conducere propuse au fost analizate și comparate între ele pentru a evidenția care dintre acestea oferă performanțe mai bune.

În cazul în care mărimea de referință este puterea arcului, pentru fiecare dintre sistemele de conducere propuse s-au prezentat răspunsurile obținute la: introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces în cazul unei referințe variabile; modificarea treptei de setare a transformatorului și variația treaptă a referinței, respectiv introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces.

Capitolul 5 prezintă concluziile generale, rezultate din cercetările efectuate, principalele contribuții ale autorului, precum și direcțiile viitoare de cercetare.

2. PROCESUL DE ELABORARE AL OȚELULUI. PROBLEME DE IDENTIFICARE ȘI CONDUCERE

2.1 Stadiul actual și tendințe în procesul de elaborare al oțelului utilizând cuptoare cu arc electric

Oțelul este cel mai important aliaj al fierului, principala componentă fiind carbonul într-o concentrație de maxim 2,11% din greutate. Utilizând elementele de aliere pot fi modificate principalele proprietăți ale oțelurilor: duritate, elasticitate, rezistența, flexibilitate, rezistența la coroziune, limita de curgere, rezistența la acizi. În cazul în care există un conținut mai mare de 2,11 %, oțelul devine mai greu, dar și mai rigid decât fierul (devine fontă), iar în cazul în care se micșorează temperatura va scădea rezistența materialului (limita de curgere este de 1370 °C) [***_a].

În anul 1899, odată cu dezvoltarea industriei energiei electrice, a început să se utilizeze curentul electric ca sursă de energie pentru a se produce oțelul realizându-se și primul cuptor cu arc electric cu acțiune directă construit de Paul Héroult în Franța [Fru99], [And11].

Capacitatea primelor cuptoare trifazate cu arc electric a fost de 5 - 6 tone. În acele timpuri, electricitatea și electrozii costau foarte mult, iar metalul cu un conținut scăzut de carbon era produs destul de rar prin intermediul acestor tipuri de cuptoare. Producerea oțelului prin intermediul cuptoarelor cu arc electric a crescut mult după anul 1930, actualmente cuptoarele de foarte mare putere necesitând puteri de circa 165 MVA, având capacitatea de circa 400 de tone [Pee06].

Majoritatea cuptoarelor care funcționează la ora actuală sunt alimentate la tensiune alternativă și sunt de mare și foarte mare putere [Gol97], [Pan09]. Aceste tipuri de cuptoare sunt sarcini neliniare, dezechilibrate, ce variază în timp și care cauzează în general, probleme ale calității energiei electrice din rețeaua electrică de putere [Hoo09]. Dintre acestea se pot enumera: apariția curenților armonici, nesimetrie pe cele trei faze, putere reactivă de valoare semnificativă, goluri de tensiune (efect de flicker) [Col97]. Preocuparea crescută pentru calitatea energiei electrice a condus la necesitatea adoptării de măsuri prin care să se reducă aceste efecte. În aceste condiții, este important să se studieze comportarea arcului electric, deoarece, fiind un element neliniar de circuit [Sou09], acesta este principala cauză a perturbațiilor produse de cuptoarele cu arc electric în rețeaua electrică de putere.

De-a lungul timpului s-au făcut îmbunătățiri din punct de vedere tehnologic, în special referitoare la timpul în care se elaborează o șarjă, existând însă în continuare probleme în ceea ce privește influențarea calității energiei electrice. Preocupările actuale sunt legate pe de-o parte de obținerea unui consum de energie electrică cât mai redus, dar și de eliminarea perturbațiilor care pot să afecteze alți consumatori ce sunt conectați la aceeași rețea electrică de putere [Gol97], [Pan08].

Pentru a analiza modul de comportare al arcului electric, în literatura de specialitate sunt considerate mai multe tipuri de modele.

În [Mok02], [Tav08], [Bho13], [Bho14] este considerat un model matematic combinat *Cassie-Mayr*, care permite descrierea comportamentului arcului electric dar și obținerea indicilor de calitate ai energiei electrice. În cadrul acestui model a fost luată în considerare și inductivitatea mutuală a rețelei scurte de alimentare a cuptorului cu arc electric. Modelul *Cassie* se folosește pentru reprezentarea arcului electric la curenți mici, iar modelul *Mayr* se folosește pentru reprezentarea arcului electric la curenți mari.

În [Mon94], [Pan07_1], [Pan07_2], [Pan07_3], [Pan08], [Pan08_2], [Pan08_3], [Pan09], [Sou09], [Aga10] este considerat modelul hiperbolic care permite reglarea puterii arcului prin modificarea tensiunii de stingere a acestuia, fapt ce corespunde în realitate modificării distanței dintre electrozi și metal.

În [Hoo08_1], [Hoo08_2], [Ban09], [Hoo09], [Bho11], [And11], [Bho13], [Bho14] este prezentat un model matematic combinat între modelul hiperbolic și modelul exponențial al arcului electric. Acest model permite descrierea comportamentului arcului electric în cele două faze tehnologice ale elaborării oțelului, topire și afânare.

În [Anu10] cuptorul cu arc electric este modelat ca o sursă de curent controlată printr-o rezistență neliniară fiind considerate două metode utilizate pentru controlul efectului de flicker care apare în cadrul tensiunii de alimentare.

În [Gom10], [Gra11], [Var12], [Whi12], [Kas13], [Har14] este considerat un model matematic reprezentat de ecuația diferențială care descrie principiul fundamental al conservării energiei a cărei rezolvare permite obținerea caracteristicii curent-tensiune a arcului electric.

Alte tipuri de modele care descriu comportarea arcului electric, cum ar fi cele prezentate în [One99], [Jan01], [Ozg02], [Car04] sunt bazate pe teoria haosului.

În [Wan05] și [Kim12] sunt prezentate modele matematice ale arcului electric bazate pe o combinație între teoria haosului și rețele neuronale artificiale.

În [O`Neil01], [Maz06], [Kho08], [Hui09], [Xu12], [Pan13_1], [Pan14_1] sunt prezentate modele matematice bazate pe rețele neuronale artificiale de tip *feedforward*. Aceste modele au o precizie ridicată având capacitatea de învățare și modelare a fenomenelor neliniare.

În [Sad00_1], [Sad00_2], [Sad01], [Wan05], [Wie08], [Har08], [Har10], [Sad11], [Pan14_2] sunt utilizate rețele neuro-fuzzy hibride pentru modelarea comportamentului arcului electric. Aceste rețele pot fi utilizate pentru rezolvarea unor categorii de probleme abordabile și prin rețele neuronale artificiale, dar sistemele hibride se pot adapta mai eficient pe parcursul unui proces de învățare.

În [Sad99_1] și [Sad99_2] sunt abordate modele matematice bazate pe logica fuzzy, modelarea fuzzy fiind una dintre tehnicile recomandate pentru modelarea sistemelor neliniare.

În [Sad00_3], [Par10], [Deh11] sunt prezentate modele matematice bazate pe rețele neuro-fuzzy adaptive, utilizate pentru predicția calității zgurii spumante care se formează în faza de fierbere activă, după ce tot metalul din cuptor a fost topit.

În [Sad99_3], [Wan05_2], [Cha08], [Cha10], [Cha10_2], [Cha12], [Pan14_1] sunt propuse modele care utilizează rețele neuronale bazate pe funcții radiale, rețelele utilizând mai mulți neuroni, antrenarea lor fiind mai rapidă.

În [Hui09], [Pan14_2] este utilizată o rețea de tip perceptron cu mai multe straturi de neuroni (Multi Layer perceptron – MLP) care învață variațiile curentului și tensiunii arcului electric.

În [Zhe98], [Zhe00], [Sha04], [Anx04], [Pla05], [Wan07], [Gol07], [Pan07_1], [Anu08], [Sar10], [Raj11], [Isl12], [Pan12] sunt prezentate modele bazate pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric, cuptorul cu arc electric fiind considerat în general o sarcină rezistivă, rezistența acestuia modificându-se în funcție de distanța dintre electrozi și baia metalică (lungimea arcului).

Pentru a dezvolta un model matematic al cuptorului cu arc electric trebuie identificate modele matematice pentru circuitul electric împreună cu arcul electric, respectiv pentru sistemul hidraulic prin care se permite obținerea diferitelor lungimi ale arcului electric.

În [Wan10] sunt considerate modele matematice pentru sistemul de electrozi (format din arcul electric, sistemul hidraulic și circuitul electric), modelul arcului electric fiind bazat pe ecuații diferențiale neliniare ale conductanței arcului.

Din punctul de vedere al conducerii procesului de elaborare al oțelului se intervine asupra instalației hidraulice care determină mișcarea electrozilor în plan vertical astfel încât lungimea arcului electric să rămână constantă, implicit curentul arcului să rămână constant [Mel09], [Anu10], [Li11].

Reglarea poziției electrozilor poate fi efectuată astfel încât să fie menținută constantă una din mărimile:

- tensiunea pe arc;
- curentul prin arc;
- rezistența arcului;
- puterea arcului;
- factorul de putere al circuitului;
- impedanța circuitului de alimentare;
- lungimea arcului.

În [Pai96], [Sha10] este prezentată o strategie de conducere bazată pe logica fuzzy care are ca deziderat menținerea constantă a impedanței circuitului de alimentare.

În [Mog11] este prezentată o strategie de conducere bazată pe utilizarea regulatorului fuzzy PI acordat de algoritmi genetici cu menținerea constantă a curentului arcului.

În [Zha14] este prezentată o strategie de conducere bazată pe logica fuzzy și pe un algoritm de interpolare cu menținerea constantă a curentului arcului.

În [Li10], [Tas12], [Xin14], [Hon15] este prezentată o strategie bazată pe un regulator PID acordat de un regulator cu logica fuzzy cu menținerea constantă a curentului arcului.

În [Bab12] sunt prezentate trei strategii de control: se utilizează regulator PID, regulator fuzzy, respectiv regulator PID cu acordare fuzzy cu menținerea constantă a temperaturii din cuptor.

În [Par07] este prezentat un sistem de conducere adaptivă și un sistem de conducere bazat pe regulator PI cu menținerea constantă a curentului arcului.

În [Wan11] este propus un algoritm de control care constă dintr-un regulator PID acordat printr-o rețea neuronală de tip *backpropagation* ai cărei parametri sunt optimizați prin algoritmi genetici.

În [Băl07], [Li11] este prezentat un algoritm de control bazat pe modele predictive cu menținerea constantă a curentului arcului.

În [Pee06] este prezentat un sistem de conducere bazat pe regulator PID cu menținerea constantă a curentului arcului.

În [Lu10] este propus un sistem de conducere pentru predicția factorului de putere al cuptorului respectiv al armonicilor de curent.

În [Jan09] este prezentat un sistem de conducere bazat pe rețele neuronale artificiale și logica fuzzy cu menținerea constantă a tensiunii arcului.

2.2 Considerații tehnologice privind procesele din cuptorul cu arc electric

Cuptorul cu arc electric este utilizat pentru topirea metalelor prin intermediul căldurii dezvoltată în arcul electric.

2.2.1 Tipuri de cuptoare cu arc electric

Cuptoarele cu arc electric pot fi clasificate în funcție de modul de transfer al energiei termice spre materialul care trebuie încălzit sau în funcție de domeniul de utilizare.

În funcție de modul de transfer al energiei termice spre materialul de încălzit există următoarele tipuri de cuptoare cu arc electric [Gol97]:

- *Cuptoare cu acțiune directă* – la care arcul electric apare între electrozi și metalul ce urmează să fie încălzit, respectiv topit;
- *Cuptoare cu acțiune indirectă* – la care arcul electric apare între doi dintre electrozi, iar pentru a se topi metalul se transmite căldura degajată de arcul electric prin radiație;
- *Cuptoare cu acțiune mixtă, rezistență și arc electric* - la care se disipă putere (căldură), atât în arcul electric cât și în rezistența electrică a metalului ce urmează să fie topit.

Principalele mărimi care caracterizează cuptoarele cu arc electric din punct de vedere energetic sunt [Gol97]:

- puterea aparentă a cuptorului (a transformatorului de alimentare a cuptorului) [MVA];
- puterea specifică a cuptorului [kVA/t];
- consumul specific de energie electrică pe durata topirii [kWh/t];
- productivitatea cuptorului [t/h];
- productivitatea cuptorului pe durata topirii [t/h];
- capacitatea cuptorului [t];
- factorul de putere;
- randamentul cuptorului.

Cuptorul cu arc electric este o sursă ce generează curenți armonici în rețea, dar și o sarcină care lucrează în regim periodic, nesimetric și nesinusoidal.

Deoarece acest tip de cuptor este o sarcină neliniară, acesta produce o serie de efecte negative asupra calității energiei electrice. Aceste efecte sunt mai accentuate în cazul cuptoarelor cu arc electric de mare putere (Ultra High Power Electric Arc Furnace - UHP EAF).

Cuptoarele cu arc electric trifazate destinate elaborării oțelurilor prezintă următoarele **avantaje**:

- construcție robustă;
- flexibilitate (adaptabilitate) din punct de vedere al materialului încărcăturii;
- capacitate foarte mare (până la 400 tone);
- puteri unitare ridicate (până la 160 MVA);
- puterile pe unitatea de capacitate au valori de 300 kVA/t la capacități mari și 1000 kVA/t la capacități mici și medii;

2.2 – Considerații tehnologice privind procesele din cuptorul cu arc electric 29

- procesul tehnologic permite controlul cu microcalculatoare și microprocesoare;
- consumul specific de energie este în limitele $400-750\text{kWh/t}$;
- productivitatea este între 2 și 100 t/h .

Principalele **dezavantaje** ale acestor cuptoare sunt:

- solicitare termică puternică a capacului și a pereților cuptorului;
- variație mare a puterii (25 la 100% din puterea nominală) între fazele procesului tehnologic;
- factor de putere scăzut ($\cos\varphi=0,7$ sau $0,8$);
- variații ale consumului de putere reactivă;
- este un consumator trifazat dezechilibrat, care constituie sursă de regim deformant;
- în faza de topire se dezvoltă un zgomot ce atinge $90 - 120\text{ db}$;
- cantitatea de praf ajunge la 20 kg pentru fiecare tonă de oțel.

2.2.2 Arcul electric

Dacă se consideră că există doi electrozi plasați într-un mediu gazos, iar între aceștia se aplică tensiune, va trece curent electric dacă se realizează un canal cu purtători de sarcină (electroni, ioni pozitivi sau negativi), aceștia prezentând astfel conductivitate electrică [Gol97].

Fenomenele care determină apariția de sarcini electrice în spațiul dintre electrozi sunt:

- termoionizarea la suprafața electrozilor;
- emisia secundară determinată de bombardarea catodului cu ioni pozitivi;
- emisia la rece.

Termoionizarea la suprafața electrozilor este principalul fenomen care determină dezvoltarea arcului electric.

Principalele caracteristici ale canalului de descărcare electrică între doi electrozi pot fi evidențiate din caracteristica curent-tensiune a arcului electric. Arcul electric este o descărcare autonomă caracterizată de densități mari ale curentului electric [Gol97].

Amorsarea arcului electric

Pentru a avea loc fenomenul de descărcare în arc electric trebuie să apară o cantitate importantă de sarcini electrice, energia necesară pentru producerea lor fiind asigurată prin încălzire.

În prima fază, electrodul este presat asupra materialului ce este în stare solidă și care urmează să fie încălzit pentru a fi topit. Circuitul de alimentare, implicit și zona de contact dintre electrod și metal sunt parcurse de curentul de scurtcircuit al sursei. În consecință, zona dintre electrozi și metalul de încălzit este caracterizată de o rezistență electrică mare, deoarece contactul dintre electrozi și metal este unul imperfect. În această zonă are loc o puternică disipare de căldură la apariția curentului de scurtcircuit, care conduce la topirea locală a metalului solid și formarea unei lentile cu material lichid. Rezistența electrică rămâne ridicată în această zonă având în vedere creșterea rezistivității materialului cu temperatura, deși contactul dintre electrod și metalul încălzit este unul bun. Căldura care se degajă determină topirea în continuare a zonei de contact. După un interval de timp electrodul este ridicat antrenând și metalul aflat în stare lichidă. Deoarece în zona

centrală a canalului cu metal lichid secțiunea este redusă, apare o rezistență electrică ridicată, rezultând o degajare intensă de căldură. În această zonă materialul aflat în stare lichidă ajunge la temperatura de fierbere. Datorită apariției vaporilor metalului care sunt ușor ionizabili se întrerupe canalul conductor dintre electrod și metalul aflat în stare solidă [Gol97].

Când între electrod și metal se regăsește tensiunea sursei de alimentare, apare un câmp electric intens ce determină accelerarea electronilor produși în urma fenomenelor intense de termoionizare. În urma ionizărilor din spațiul gazos dintre electrod și metalul solid apar ionii pozitivi care bombardează catodul, menținând astfel temperatura ridicată a acestuia. Între electrod și metalul de încălzit se formează un canal cu sarcini electrice ce are o anumită conductivitate și prin care va trece curentul electric determinat de sursă. În circuit nu se observă întreruperea curentului electric deoarece intervalul de timp dintre momentul ruperii canalului cu metal lichid și momentul formării canalului conductor este mic. La trecerea curentului electric prin canalul ionizat dintre electrod și metal apar următoarele fenomene: încălzirea zonei, intensificarea proceselor de termoionizare, creșterea conductivității canalului, creșterea în continuare a intensității curentului electric în canal și reducerea tensiunii arcului, U_{arc} , la bornele canalului conductor. Impedanța sursei de alimentare este cea care va limita curentul electric din circuit.

Structura arcului electric

Canalul arcului electric dintre anod și catod poate fi împărțit în trei zone cu caracteristici diferite: zona catodică, coloana arcului electric, respectiv zona anodică.

Electronii care pleacă de la catod determină în drumul lor spre anod ionizări intense, astfel dând naștere ionilor pozitivi, de viteză relativ mică. În acest context, în jurul catodului apare o concentrație importantă de ioni pozitivi care vor determina în zona catodică o intensitate ridicată a câmpului electric. Așadar zona catodică este caracterizată de o cădere relativ mare de tensiune.

Pe suprafața catodului apare o zonă care se numește *pată catodică*, de temperatură ridicată, reprezentând baza arcului electric [Gol97].

Temperatura petei catodice va fi mai ridicată în cazul în care catodul este din cărbune datorită conductivității termice mai reduse decât la alte materiale, iar în cazul în care catodul corespunde materialului de încălzit cu o conductivitate termică mai ridicată, asigurând astfel un transfer mai rapid al căldurii în material, temperatura petei catodice va fi mai scăzută.

În concluzie, temperatura petei catodice este diferită în cazul în care electrodul din cărbune este catod sau materialul de încălzit este catod. Rezultă că în cele două cazuri intensitatea curentului electric va fi diferită în canalul arcului electric.

Cea mai mare porțiune a descărcării în arcul electric, de lungime L_{arc} , o reprezintă *coloana arcului*. Aceasta cuprinde ioni pozitivi, ioni negativi și atomi neutri, aflați sub formă de plasmă, la o temperatură de $5000...10000\text{ K}$. Căderea de tensiune pe coloana arcului electric este relativ redusă datorită conductivității ridicate.

Anodul este bombardat în special de electronii (sarcini negative) care sunt cuprinși în zona anodică a spațiului dintre electrozi. Acest fenomen determină încălzirea intensă a anodului ajungând până la temperatura de topire a materialului anodului, această temperatură fiind însă mai scăzută decât cea din canalul de plasmă. Deoarece conductivitatea zonei anodice este mai redusă decât cea a

canalului de plasmă, apare o cădere de tensiune importantă (intensitatea câmpului electric în zona anodică este relativ mare).

Ca și în cazul catodului, în zona anodului apare o pată anodică a cărei dimensiuni variază, menținându-se practic constantă densitatea de curent.

Căderile de tensiune în lungul canalului de descărcare sau valorile câmpului electric în zonă și temperatura din canal pot caracteriza arcul electric dintre electrozi.

În cazul arcului electric de lungime redusă, temperatura cea mai ridicată este în coloana acestuia, iar cea mai mare parte a tensiunii care este aplicată se regăsește în zonele anodică și catodică. Căderea de tensiune pe coloana arcului electric devine importantă în cazul în care arcul electric este de lungime mare.

2.2.3 Arcul electric alimentat cu tensiune continuă

Caracteristicile statică și dinamică ale arcului electric alimentat cu tensiune continuă

Caracteristica statică a arcului electric $U_{arc} = f(I_{arc})$ definește dependența dintre tensiunea arcului (U_{arc}) și intensitatea curentului (I_{arc}) în canalul descărcării arcului electric atunci când curentul I_{arc} prezintă o variație lentă [Gol97].

În fig.2.1 sunt reprezentate două caracteristici statice ale arcului electric pentru două lungimi diferite ale arcului $L_{arc1} < L_{arc2}$, fiind evidențiate trei zone caracteristice: *ab*, *bc* și *cd*.

Forma caracteristicii statice este determinată în special de modul de comportare a coloanei arcului (plasmă) deoarece intensitatea curentului electric în arc influențează doar într-o mică măsură căderile de tensiune catodică și anodică.

În zona *ab* a caracteristicii valorile curentului electric sunt reduse, temperatura canalului crește, procesele de termoionizare sunt mai intense, conductivitatea canalului crește, iar tensiunea la bornele arcului electric scade.

În zona *bc* valorile curentului electric sunt relativ mari, conductivitatea canalului crește liniar cu intensitatea curentului electric astfel încât căderea de tensiune pe coloana arcului electric rămâne practic constantă.

În zona *cd* valorile curenților sunt de amplitudine foarte mare, procesele de ionizare ating nivelul de saturație, coloana arcului având conductivitatea constantă. În cazul în care densitatea curentului electric în arc crește are loc o creștere și a tensiunii la bornele arcului [Gol97].

În fig.2.2 este prezentată caracteristica dinamică a arcului electric, $U_{arc} = f(I_{arc})$, la amorsarea (curba *a*), respectiv la stingerea arcului electric (curba *b*). Se poate observa că tensiunea de amorsare a arcului electric U_{am} este mai mare decât tensiunea de stingere U_{str} , datorită ionizării remanente și inerției termice a coloanei arcului electric. În cazul arcului electric ce este alimentat cu tensiune continuă regimurile dinamice care au un rol important în determinarea caracteristicilor energetice apar în zonele de amorsare și stingere a arcului electric și sunt însoțite de fenomene tranzitorii pregnante, ce sunt sesizabile în rețeaua electrică de putere.

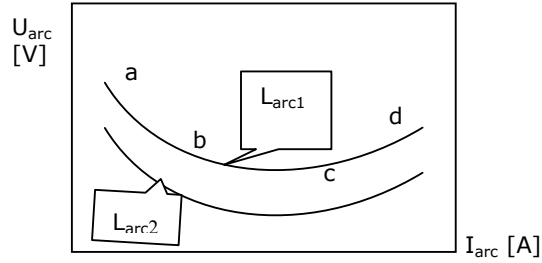


Fig.2.1. Caracteristica statică a arcului electric alimentat cu tensiune continuă.

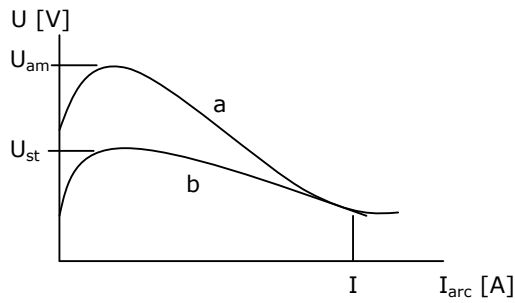


Fig.2.2. Caracteristica dinamică a arcului electric alimentat în tensiune continuă.

2.2.4 Arcul electric alimentat cu tensiune alternativă

Caracteristicile arcului electric alimentat cu tensiune alternativă

Se poate considera că pe durata arderii arcului electric care este alimentat cu tensiune alternativă, schema echivalentă a circuitului de alimentare este de forma indicată în fig.2.3 [Gol97], [Pan07_2] și [Pan08].

L și r reprezintă inductivitatea, respectiv rezistența echivalentă a circuitului de alimentare, i_{arc} este curentul arcului electric (este și cel al circuitului), iar R_{arc} și u_{arc} rezistența (variabilă) arcului electric, respectiv tensiunea la bornele arcului.

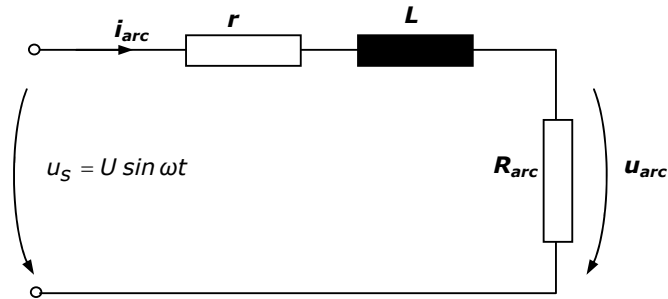


Fig.2.3. Schema echivalentă a circuitului de alimentare a arcului electric alimentat cu tensiune alternativă.

Forma de variație a mărimilor electrice din schema echivalentă a circuitului de alimentare al arcului electric este prezentată în fig.2.4.

Se pot desprinde următoarele concluzii:

- curentul electric din circuit trece de două ori prin zero, în fiecare perioadă a tensiunii alternative aplicate, ceea ce determină stingerea și reaprinderea arcului electric cu o frecvență dublă față de cea a tensiunii aplicate;
- pe durata arderii arcului electric tensiunea U_{arc} la bornele acestuia este practic constantă, iar curentul electric este variabil, în consecință arcul electric reprezintă un receptor neliniar;
- tensiunea la bornele arcului electric U_{arc} , și curentul arcului electric i_{arc} , sunt în fază, așadar arcul electric are caracter rezistiv;
- tensiunea de amorsare U_{am} a arcului electric este mai mare decât U_{arc} ;
- curentul electric din circuit este periodic, dar deformat (nesinusoidal);

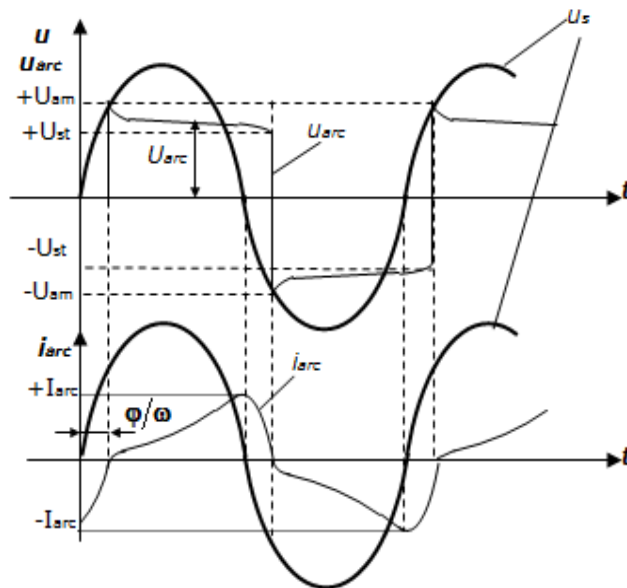


Fig.2.4. Forma de variație a mărimilor electrice în circuitul arcului electric.

În fig.2.5 este reprezentată caracteristica dinamică a arcului electric alimentat cu tensiune alternativă $U_{arc}(t)=f(i_{arc}(t))$.

Stabilitatea arcului electric

Stabilitatea arcului electric alimentat cu tensiune alternativă poate să fie analizată în funcție de condițiile necesare pentru a se reamorsa (practic instantaneu) arcul electric după ce are loc trecerea curentului prin zero.

În funcție de curentul arcului electric, arderea arcului poate avea loc în regim de curent întrerupt sau de curent neîntrerupt. În regimul de curent întrerupt arderea arcului electric determină o funcționare instabilă a acestuia, curba curentului fiind puternic deformată [Pan08]. Astfel, este necesar ca arcul electric să

ardă fără pauze. În [Pan08] a fost determinată condiția de ardere a arcului electric fără pauze în ipotezele simplificatoare: $+U_{am} \cong |-U_{am}| \cong |-U_{st}| \cong U_{arc}$ cu tensiunea de alimentare $u_s(t) = U_s \cdot \sin \omega \cdot t$.

Această condiție este dată de

$$U_s \cdot \sin \varphi \geq U_{arc} \quad (2.1)$$

care conduce la [Pan08]

$$\frac{U_{arc}}{U_s} \leq \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\pi^2}{4}}} = 0,54 \quad (2.2)$$

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

$$\cos \varphi \leq 0,85 \quad (2.3)$$

În cazul cuptoarelor de mare putere, arderea stabilă a arcului electric are loc și pentru $\cos \varphi > 0,85$ datorită temperaturii ridicate a electrozilor și a inerției termice a acestora [Gol97].

Aria cuprinsă în interiorul caracteristicii dinamice a arcului electric este proporțională cu puterea disipată în arcul electric, P_{arc} . Această putere poate fi determinată prin relația (2.4), relație ce reprezintă modul de definire al puterii active absorbită de un dipol receptor ce este alimentat cu energie electrică astfel încât tensiunea la borne, respectiv curentul să fie nesinusoidale.

$$P_{arc} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{arc} \cdot i_{arc} \cdot dt \quad (2.4)$$

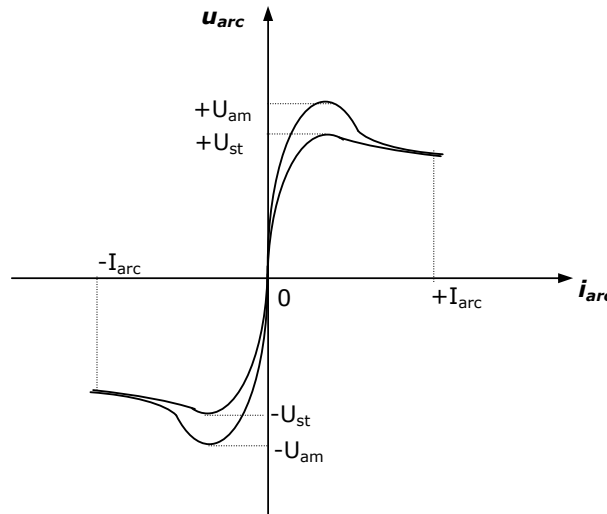


Fig.2.5. Caracteristica dinamică a arcului electric alimentat cu tensiune alternativă.

În cadrul acestei teze, tipul de cuptor avut în vedere este cuptorul cu arc electric trifazat cu acțiune directă de tip **EBT** (Excentric Bottom Tap-Hole) [***_2].

2.3 Cuptoare cu arc electric cu acțiune directă pentru topirea oțelului

2.3.1 Elemente constructive ale cuptoarelor cu arc electric trifazat cu acțiune directă

Cuptoarele cu arc electric trifazate cu acțiune directă sunt utilizate pentru topirea oțelului, elaborarea oțelurilor aliate, respectiv înalt aliate, dar și pentru topirea metalelor și aliajelor greu fuzibile.

Este considerat cuptorul cu arc electric cu acțiune directă de 120 tone de la Oțelăria Electrică 3 (OE3) S.C. ArcelorMittal Hunedoara S.A [***_2].

În fig.2.6 este prezentată vederea frontală secționată și vederea laterală a instalației cuptorului cu arc electric cu acțiune directă de tip EBT utilizat pentru topirea oțelului, iar în fig.2.7 sunt indicate elementele constructive ale acestuia [Gol97], [Pan08].

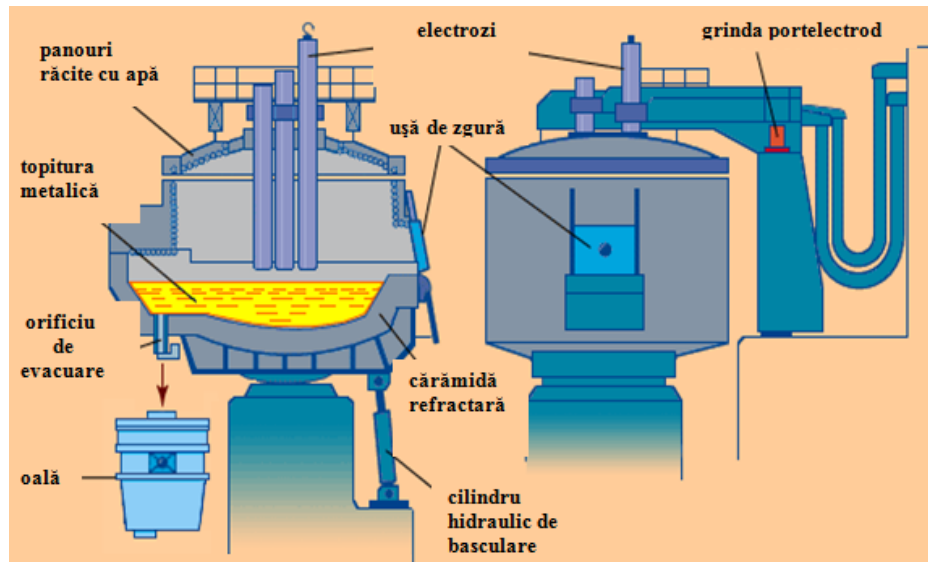


Fig.2.6. Instalația cuptorului cu arc electric de tip EBT – vedere frontală secționată și vedere laterală.

Elementele constructive ale cuptorului cu arc electric ilustrat în fig.2.8 sunt următoarele:

- 1 – cuvă de topire;
- 2 – sistemul de pivotare a bolții;
- 3 – transformatorul cuptorului;
- 4 – rețeaua scurtă de alimentare;
- 5 – grinda portelectrod;
- 6 – dispozitivul de comandă hidraulică a electrozilor;

- 7 – cei trei electrozi folosiți pentru topirea oțelului;
- 8 – orificiul de evacuare al oțelului topit;
- 9 – izolatoare;
- 10 – încăperea specială în care se plasează transformatorul pentru a nu fi perturbat de instalația cuptorului cu arc electric;
- 11 – arcul electric;
- 12 – baia metalică în care se găsește metalul ce va fi topit;
- 13 – ușă de zgură.

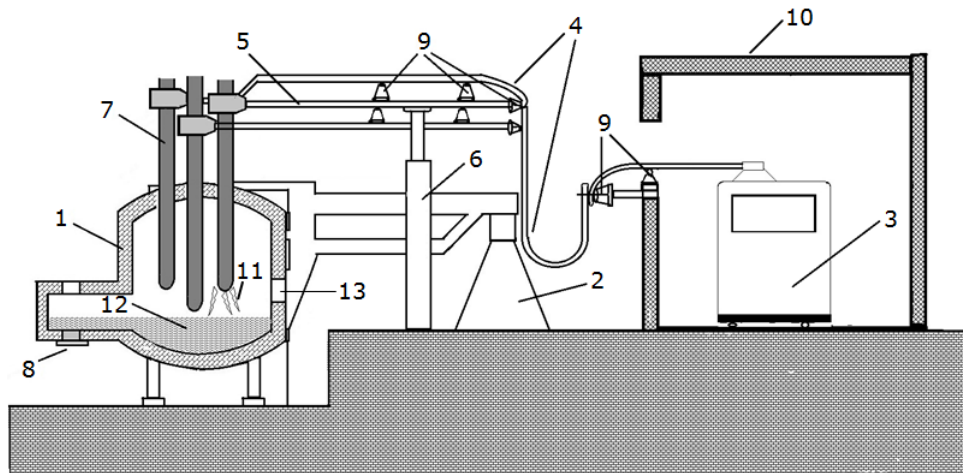


Fig.2.7. Elementele constructive ale cuptorului cu arc electric cu acțiune directă utilizat pentru topirea oțelului.

Oțelul care urmează să fie topit se pune în cuva de topire (1) care este prevăzută cu orificiul de evacuare al oțelului topit (8) pentru a se goli conținutul cuvei cuptorului. Sistemul de pivotare a bolții (2) are rolul de a ajuta la golirea conținutului cuvei, în interiorul căreia se poate găsi metalul topit dar și zgura rezultată, această operație fiind realizată prin înclinarea aferentă a cuvei de topire. Cuptorul este de tip EBT, așadar zgura se va elimina prin ușa de zgură (13). Cuptorul cu arc electric este alimentată cu energie electrică de la transformatorul (3), care trebuie să fie situat într-o încăpere specială (10), pentru ca parametrii transformatorului să nu fie afectați de armonicile generate de fenomenele care au loc în arcul electric.

Cuptorul este alimentat cu energie electrică prin intermediul rețelei scurte de alimentare (4) care utilizează izolatoare (9) cu rolul de a izola rețeaua scurtă de eventualele perturbații.

Electrozii fixați rigid pe portelectrozi (5) sunt deplasați pe verticală cu ajutorul dispozitivului de comandă hidraulică (6), arcul electric (11) apare între cei trei electrozi (7) și metalul ce urmează să fie topit (12), topirea realizându-se prin încălzire directă între electrozi și baia metalică. Reglarea puterii disipate în masa metalică se face prin modificarea distanței dintre electrozi și masa metalică adică a lungimii arcului electric [Gol97].

Rețeaua scurtă de alimentare cuprinde trei porțiuni:

- Prima porțiune este cea care realizează legătura (prin intermediul unor bare) dintre bobinele secundare ale transformatorului și ieșirea din încăpere.

- Cea de-a doua porțiune este formată din cabluri (de cupru) care asigură flexibilitatea necesară preluării modificării poziției electrozilor pe durata elaborării șarjei.
- Cea de-a treia porțiune este realizată din bare răcite cu apă conectate la portelectrozii 5 izolate electric (pe fiecare fază a tensiunii de alimentare) prin intermediul izolatoarelor 9.

Carcasa cuptorului (cuva) este alcătuită din panouri din țevi de oțel (20 de panouri, așezate în formă cilindrică), având rolul de a face cuva mai rezistentă la eforturile generate de zidăria refractară și de metalul topit din interior.

În bolta metalică (răcită cu apă) sunt realizate orificii prin care intră cei trei electrozi.

Orificiul de evacuare (8) permite evacuarea metalului care se află în stare lichidă.

Electrozii (7) trebuie să îndeplinească următoarele condiții principale: conductivitate termică redusă, conductivitate electrică ridicată, temperatură de înmuiere ridicată, rezistență mare la acțiunea agenților chimici (în primul rând în cazul oxigenului), posibilitatea de a putea fi prelucrat mecanic, costul redus, rezistență mecanică corespunzătoare pe durata de lucru. De regulă sunt utilizați electrozi din grafit cu diametrul exterior de 600 mm, pentru o coloană utilizându-se 3 electrozi, așezați unul în continuarea celuilalt.

Portelectrozii (5) au rolul de a susține și de a modifica poziția electrozilor cât și de a fixa conductoarele rețelei scurte de alimentare. Electrocului trebuie să fie strâns în suportul său cât mai sigur, cu o rezistență electrică de contact cât mai redusă, iar presiunea pe electrod trebuie să rămână constantă, independent de temperatură, fiind necesară răcirea cu apă a suportului electrocului.

Mecanismul de deplasare pe verticală a electrozilor are rolul de a modifica lungimea arcului electric (cu o viteză de 1...9 m/min) și de a scoate electrozii din cuptor. În cazul cuptorului cu arc electric de la OE3, acționarea este hidraulică.

Mecanismul de basculare a cuvei cuptorului este plasat sub cuptor și este utilizat pentru înclinarea cuptorului (2,5 °) cu scopul de a elimina zgura formată pe ușa de zgură, dar și pentru înclinarea cuptorului către orificiul de evacuare în timpul evacuării metalului topit prin orificiul de pe excentricul cuptorului (12,5 °). În cazul cuptorului cu arc electric de la OE3, acționarea este hidraulică.

Mecanismul de ridicare și rotire a bolții cuptorului, implicit a electrozilor, are rolul de a ridica bolta cu aproximativ 150...250 mm și de a o roti cu aproximativ 80° pentru a permite încărcarea cuptorului prin partea superioară. În cazul cuptorului cu arc electric de la OE3, acest mecanism conține o coloană de pivotare acționată hidraulic.

2.3.2 Regimurile de funcționare ale cuptoarelor cu arc electric pentru topirea oțelului

Procesul tehnologic pentru prepararea metalului cuprinde în esență următoarele faze: încărcarea cuptorului, topirea metalelor, oxidarea (afânarea) și reducerea (dezoxidarea).

Faza de topire durează din momentul în care se conectează cuptorul cu arc electric la rețeaua electrică de putere până în momentul în care metalele conținute în cuva cuptorului sunt topite integral.

Lungimea arcului electric se modifică în funcție de modul în care are loc surparea, respectiv modificarea poziției încărcăturii (de la apariția scurtcircuitului și

până la întreruperea arcului electric). Faza de topire este caracterizată printr-o funcționare instabilă a arcului electric în care au loc variații mari ale intensității curentului electric din circuit. Scurtcircuitele care apar pot să fie eliminate prin introducerea unui sistem automat de acționare al electrozilor.

Pentru a crește productivitatea cuptorului, trebuie să se reducă durata procesului de topire. Astfel, cuptorul trebuie să funcționeze cu puterea maximă din cea disponibilă (se utilizează puterea nominală și tensiunea nominală), în acest fel limitându-se procesele de oxidare și de acumulare a gazelor în metalul aflat în stare lichidă.

La finalul perioadei de topire se reduce puterea din cuptor, temperatura medie a materialului fiind de aproximativ 1500°C .

După faza de topire, urmează faza de afânare, în cadrul căreia se reduce cantitatea de carbon din metalul topit, se elimină fosforul și parțial sulfurul și se asigură degazarea și rafinarea materialului prin eliminarea elementelor nemetalice. Arderea arcului este stabilă, iar temperatura metalului este păstrată la o valoare care să permită realizarea reacțiilor chimice din proces. Lungimea arcului electric este de $5...10\text{ cm}$, astfel are loc creșterea energiei radiate, implicit o solicitare termică intensă a pereților cuptorului. În concluzie, trebuie reduse intensitatea curentului arcului electric, dar și puterea absorbită de cuptor [***_2].

După faza de afânare urmează faza de reducere, în cadrul căreia se obține compoziția dorită a materialului prin dezoxidare și desulfurare. Arcul electric este stabil, dar are o lungime relativ mare ($16...30\text{ cm}$), astfel apare o solicitare termică maximă a pereților cuptorului. În acest context, este necesar să se reducă încă o dată puterea dezvoltată în arcul electric. La finalul acestei faze, temperatura metalului trebuie să corespundă procesului de turnare (aproximativ 1700°C).

Pe durata proceselor de oxidare și de reducere, trebuie ca puterea disipată în arcul electric să se reducă deoarece arcul electric nu este ecranat (materialul este în stare lichidă), iar pereții cuptorului vor fi solicitați termic dacă puterea disipată în arcul electric este mare.

Dacă se reduce lungimea arcului, puterea disipată în arcul electric crește, iar dacă se crește lungimea arcului electric, puterea disipată în arc scade.

2.3.3 Echipamentul electric al cuptorului cu arc electric cu acțiune directă

Echipamentul electric al cuptorului trebuie să permită desfășurarea în condiții optime a unor procese care au mari influențe asupra rețelei electrice de putere, acestea fiind procese tehnologice complexe.

Principalele probleme ce nu trebuie neglijate la alegerea schemei de alimentare a unui cuptor cu arc electric sunt [Gol97]:

- necesitatea de a se stabiliza arcul electric, acest fapt implicând utilizarea unei bobine conectată în serie cu circuitul de alimentare în cazul cuptoarelor de mică și medie putere, iar în cazul cuptoarelor de putere mare inductivitatea proprie a circuitului de alimentare este suficientă;
- posibilitatea de a varia puterea activă absorbită pe parcursul procesului tehnologic în limite largi;
- posibilitatea de a varia în limite largi a puterii reactive absorbite, cu apariția fenomenului de *flicker*, astfel fiind necesară utilizarea instalațiilor de urmărire în timp real a puterii reactive;
- existența unei puternice distorsiuni a curentului, fapt care impune utilizarea unor filtre de armonici;

- prezența unui regim nesimetric important determinat de inegalitatea reactanțelor pe cele trei faze ale cuptorului;
- la cuptoarele de capacitate mare se impune utilizarea de agitatoare inductive, datorită agitației reduse a băii cu metal lichid.

În cazul cuptorului cu arc electric trifazat cu acțiune directă de la OE3 Hunedoara, se pot preciza următoarele:

- cuptorul este alimentat prin intermediul stației de medie tensiune a întreprinderii (30 kV);
- frecvența rețelei electrice de alimentare este de 50 Hz;
- inductivitatea proprie a circuitului de alimentare asigură stabilitatea arcului electric (inductivitatea este suficientă pentru limitarea curentului de scurtcircuit), deoarece capacitatea cuptorului este de 120 de tone și este de mare putere.
- transformatorul cuptorului are primarul și secundarul conectat în conexiune triunghi (Δ). În funcție de treapta de conexiune din primar, în secundar există o tensiune cuprinsă între 560 V...960 V.
- transformatorul cuptorului are 18 trepte de conexiune în primar și are puterea de 105 MVA; în tabelul 2.1 sunt prezentate valorile curenților și ale tensiunilor în primar și secundar, în funcție de cele 18 trepte de conexiune din primarul transformatorului;
- curentul arcului electric este măsurat prin intermediul a trei transformatoare de curent;
- transformatoarele de curent, respectiv de tensiune oferă informațiile necesare conducerii procesului, dar și a protecției circuitelor la defectele care pot să apară.

Tabelul 2.1 – Valorile curenților și ale tensiunilor în primarul și secundarul transformatorului

Primarul transformatorului				Secundarul transformatorului		
Conexiune	Tensiune [V]	Curent [A]	Treapta	Conexiune	Tensiune [V]	Curent [A]
Δ	30000	2021	18	Δ	960	63148
			17		925	65529
			16		894	67839
			15		864	70148
			14		837	72457
		1966	13		808	73038
		1901	12		781	
		1839	11		755	
		1781	10		732	
		1727	9		709	
		1671	8		686	
		1618	7		665	
		1564	6		642	
		1513	5		621	
		1465	4		602	
		1420	3		583	
		1378	2		566	
		1338	1		550	

2.3.4 Caracteristici de funcționare ale cuptoarelor cu arc electric cu acțiune directă

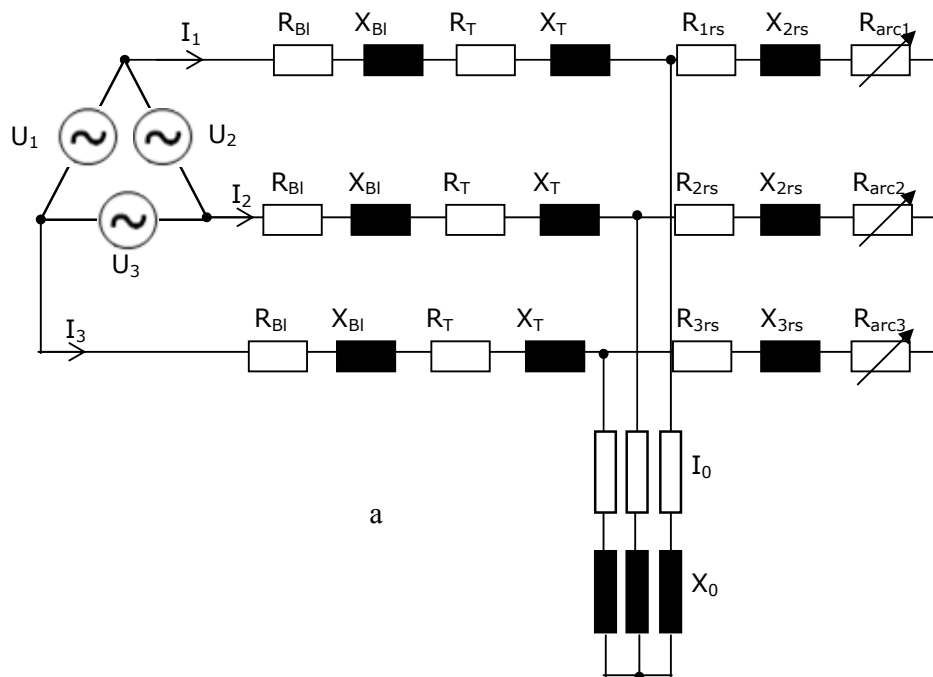
În cazul cuptorului cu arc electric, regimul de funcționare poate fi definit de următorii parametrii electrici [Gol97]:

- tensiunea din secundarul transformatorului cuptorului;
- intensitatea curentului arcului electric;
- rezistența electrică și reactanța circuitului de alimentare al cuptorului.

În timpul funcționării cuptorului cu arc electric se modifică atât intensitatea curentului arcului, cât și tensiunea la bornele lui. Este necesar să se cunoască pentru fiecare treaptă a tensiunii de alimentare următoarele caracteristici de funcționare ale cuptorului: variația puterii active absorbite, P_t , puterea degajată în arcul electric, P_{arc} , pierderile de putere ΔP_p , factorul de putere și randamentul cuptorului în funcție de intensitatea curentului arcului electric.

În fig.2.8.a), este prezentată schema electrică trifazată echivalentă a circuitului de alimentare a cuptorului cu arc electric. În cazul în care se neglijează curentul de magnetizare I_0 , al transformatorului în raport cu curentul nominal de sarcină, I_{Tn} , se obține schema echivalentă din fig.2.8.b). Curentul I_0 este calculat cu relația (2.5).

$$I_0 = 0,02...0,03 \cdot I_{Tn} \quad (2.5)$$



În fig.2.8.c), este prezentată schema electrică redusă a circuitului de alimentare a cuptorului cu arc electric, iar în fig.2.8.d), este ilustrată schema monofazată a circuitului de alimentare a cuptorului, aceasta schemă fiind cea utilizată în calculele practice. În schemele echivalente din fig.2.8, variația curentului arcului electric este considerată de formă sinusoidală cu frecvența de 50 Hz.

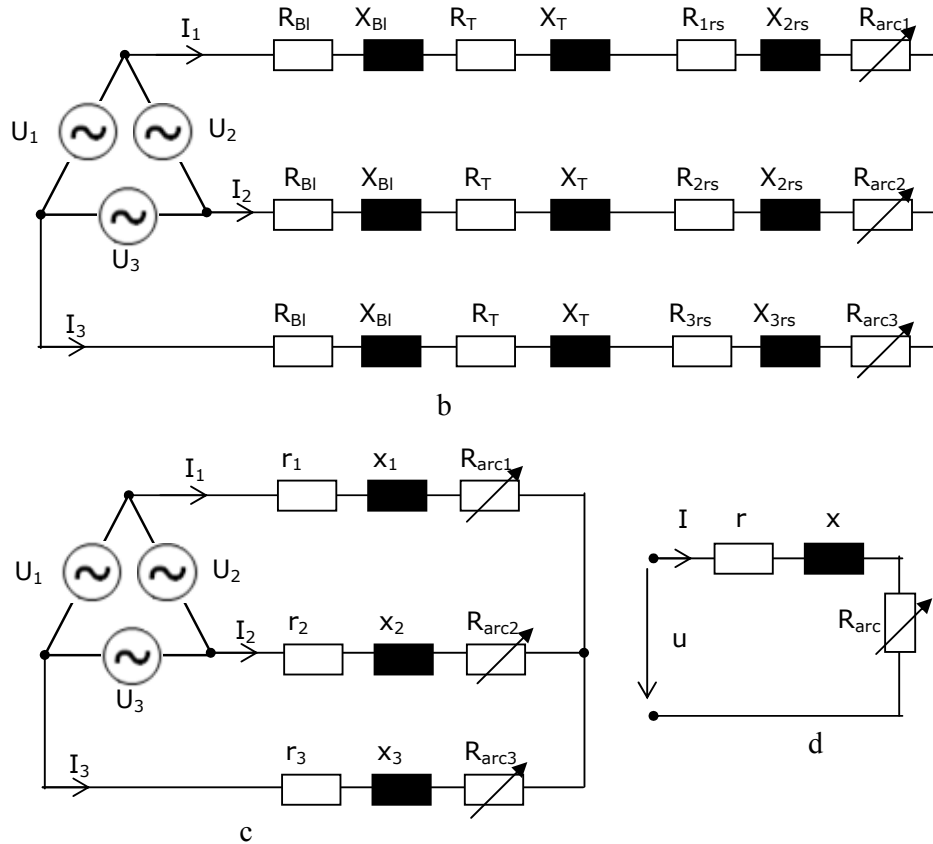


Fig.2.8. Schemele electrice echivalente ale cuptorului cu arc electric.

În fig.2.8 s-au utilizat următoarele notații:

- R_{BI}, X_{BI} - rezistența electrică, respectiv reactanța bobinei de limitare din circuitului de alimentare (această reactanță este utilizată doar în cazul cuptoarelor de mică putere);
- R_T, X_T - rezistența electrică, respectiv reactanța echivalentă ale transformatorului cuptorului, mărimile fiind raportate la tensiunea din primarul transformatorului;
- $R_{1rs}, R_{2rs}, R_{3rs}, X_{1rs}, X_{2rs}, X_{3rs}$ - rezistența electrică, respectiv reactanța aferentă celor trei faze ale rețelei scurte, mărimile fiind raportate la tensiunea din primarul transformatorului cuptorului;

- R_{arc} - rezistența arcului electric raportată la tensiunea din primarul transformatorului;
- I_0 - curentul de magnetizare al transformatorului;
- R_0, X_0 - rezistența electrică, respectiv reactanța de magnetizare;
- $r_1, r_2, r_3, x_1, x_2, x_3$ - rezistența electrică totală pe faze, respectiv reactanța totală pe faze ale circuitului de alimentare a cuptorului raportate la tensiunea din primarul transformatorului;
- I_1, I_2, I_3 - intensitatea curentului electric pe cele trei faze din secundarul transformatorului;
- r, x - rezistența electrică totală pe o fază, respectiv reactanța totală pe o fază a circuitului de alimentare a cuptorului;
- I - intensitatea curentului electric pe o fază din secundarul transformatorului;
- u - tensiunea pentru o fază din secundarul transformatorului cuptorului.

$$r_1 = R_{Bl} + R_T + R_{1rs} \quad (2.6a)$$

$$r_2 = R_{Bl} + R_T + R_{2rs} \quad (2.6b)$$

$$r_3 = R_{Bl} + R_T + R_{3rs} \quad (2.6c)$$

$$x_1 = X_{Bl} + X_{1rs} \quad (2.7a)$$

$$x_2 = X_{Bl} + X_{2rs} \quad (2.7b)$$

$$x_3 = X_{Bl} + X_{3rs} \quad (2.7c)$$

Ecuatiile de funcționare scrise pentru o sigură fază (fig2.8.d)) permit obținerea caracteristicilor de funcționare ale cuptorului cu arc electric, dar și a condițiilor în care are loc transferul maxim al puterii în arcul electric. Aceste ecuații sunt scrise în ipoteza în care arcul electric este considerat un circuit liniar, iar tensiunea de alimentare este perfect sinusoidală. Rezultatele obținute pe baza acestor ipoteze simplificatoare sunt apropiate de rezultatele obținute din analiza cazului real [Gol97].

Impedanța Z a schemei echivalente din fig.2.8.d) este determinată cu relația (2.8).

$$Z = \sqrt{(R_{arc} + r)^2 + x^2} \quad (2.8)$$

În cazul în care rezistența arcului electric prezintă anumite variații, impedanța tinde spre infinit atunci când se întrerupe arcul electric, iar atunci când apare scurtcircuitul în cuptor ($R_{arc}=0$), impedanța are o valoare mică dar nu este nulă. Curentul de scurtcircuit I_{sc} ideal se obține când impedanța schemei echivalente este nulă. Curentul I_{sc} se determină cu relația (2.9).

$$I_{sc} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}} \quad (2.9)$$

Pentru a se analiza modul de comportare al arcului electric se consideră că tensiunea de alimentare este constantă, fiind corespunzătoare treptelor de setare ale transformatorului cuptorului.

Puterea P_{arc} dezvoltată în arcul electric se poate determina cu relația (2.10). Transferul maxim de putere în arcul electric se obține în situația în care tensiunea la bornele arcului electric este egală cu tensiunea pe circuitul de alimentare până la arcul electric [Gol97].

$$P_{arc} = R_{arc} \cdot I^2 = R_{arc} \cdot \frac{U^2}{Z^2} \quad (2.10)$$

2.4 Operații și faze tehnologice pentru procesul de elaborare al oțelului în cuptorul cu arc electric

La S.C. ArcelorMittal Hunedoara S.A. cuptorul cu arc electric nr. 3 de tip EBT a fost pus în funcțiune în anul 2002 și este un cuptor performant, greutatea șarjei fiind de 120 t, iar oțelul evacuat dintr-o șarjă este de cca 100 t. Durata de elaborare a unei șarje este în prezent de 75 minute, elaborarea fiind asistată de calculator.

Materia primă a încărcăturii este fierul vechi, iar principalele materiale auxiliare sunt: minereuri de fier, var, dolomită, feroaliaje, cocs, fluorina.

Indiferent de materia primă utilizată, pentru ca oțelul să fie transformat din stare solidă în stare lichidă este necesară o sursă de căldură, care să asigure metalului ce trebuie topit o temperatură mai mare de 1600 °C.

În fig.2.9 sunt prezentate procesele și fazele tehnologice care au loc în cuptorul cu arc electric, legate în principal de transferul de masă și de energie.

Principalele operații și faze tehnologice ale procesului de elaborare al oțelului în cuptorul cu arc electric sunt [Jon97], [Wie08]:

- încărcarea materialului în benă;
- descărcarea benelor în cuptor;
- topirea materialului;
- afânarea materialului;
- evacuarea șarjei de oțel din cuptor.

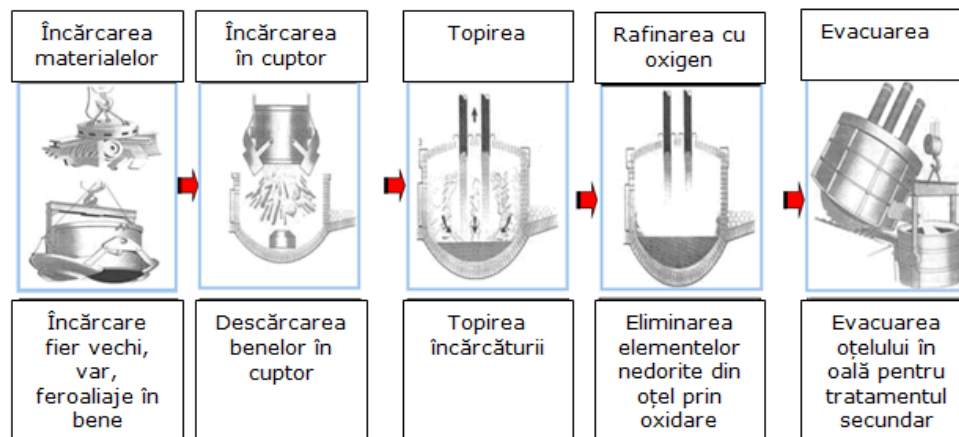


Fig.2.9. Operații și faze tehnologice ale procesului de elaborare al oțelului în cuptorul cu arc electric.

Încărcarea benei și a cuptorului se realizează în mod mecanizat. Fiecare benă este încărcată în funcție de o anumită "rețetă" de fier (o anumită cantitate din fiecare compartiment cu fier), proporțiile de materiale din întreaga componență a încărcăturii fiind stabilite pe baza ecuațiilor de bilanț ale elementelor oxigen și carbon.

Topirea încărcăturii constă din rabatarea bolții peste cuptor, coborârea electrozilor și pornirea arcului electric, operația reprezentând mai mult de jumătate din durata totală de elaborare și consumă 60-80% din cantitatea de energie electrică necesară elaborării unei șarje.

Încărcarea cuptorului și topirea materialului se realizează în mai multe etape, alternând după cum urmează:

- se încarcă prima benă;
- se începe topirea;
- se insuflă prin lance oxigen și când apare lichid sub vârful lăncii se insuflă oxigen și praf de grafit;
- se adaugă var în cuptor;
- se oprește topirea primei bene;
- se încarcă a doua benă;
- se începe topirea;
- se insuflă prin lance oxigen;
- se adaugă var în cuptor;
- se oprește topirea celei de-a doua bene;
- dacă încărcătura șarjei este compusă din 3 sau 4 bene se reia procedeu.

Prin insuflarea de oxid-carbon în această fază se reduce consumul de energie, reducerea datorată arderii prafului de grafit și a reacțiilor exoterme dintre oxigen și celelalte elemente ce sunt prezente în fierul vechi.

Timpul necesar topirii materialului este determinat de gradul de pregătire al încărcăturii, de compactarea încărcăturii, de puterea transformatorului și de strategia de conducere a procesului de topire. În paralel cu procesul fizic al trecerii încărcăturii în stare lichidă, în timpul topirii au loc procese fizico-chimice de oxidare a elementelor și de formare a zgurii.

Afânarea (fierberea) sau oxidarea este faza principală pentru calitatea oțelului, operație care este inițiată în timpul topirii. În timpul acestei faze, pe lângă reducerea conținutului de carbon, are loc și o defosforare și desulfurare. Afânarea are drept scop principal îndepărtarea gazelor (H și N) și a incluziunilor nemetalice din baia de oțel prin intermediul oxigenului care este insuflat în baia metalică.

În timpul topirii ultimei bene de fier vechi și în timpul afânării se procedează la spumarea zgurii prin insuflarea de oxigen (continuu) și de grafit (discontinuu).

În cazul în care se lucrează cu zgură spumantă se identifică următoarele avantaje:

- temperatura crește rapid astfel încât crește și productivitatea oțelului;
- consumul specific de energie electrică scade datorită măririi eficienței transferului de căldură de la arcul electric la baia metalică;
- consumul specific de electrozi este redus datorită lucrului cu intensități mai mici ale curentului electric;
- consumul de materiale refractare este redus datorită scăderii nivelului radiației termice către pereți și către bolta cuptorului.

Evacuarea este operația prin care metalul din cuptor aflat în stare lichidă, este transferat în oala de transport sau de tratament.

2.4 – Operații și faze tehnologice pentru procesul de elaborare al oțelului 45

În procesul de elaborare al oțelului se pot identifica două mari categorii de probleme: unele privind modul de pregătire și de alcătuire al încărcăturii, iar altele privind regimul termic. Aceste două probleme principale se adaptează în funcție de compoziția chimică și de calitatea oțelului, se condiționează reciproc și se subordonează necesității de a realiza oțeluri de calitate superioară.

În fig.2.10 este ilustrat procesul de elaborare al oțelului în cuptorul cu arc electric de la S.C. ArcelorMittal Hunedoara S.A [***_2].

Întregul proces de elaborare al oțelului este controlat cu ajutorul a 4 calculatoare de proces, acestea fiind amplasate în cabina de comandă a cuptorului.

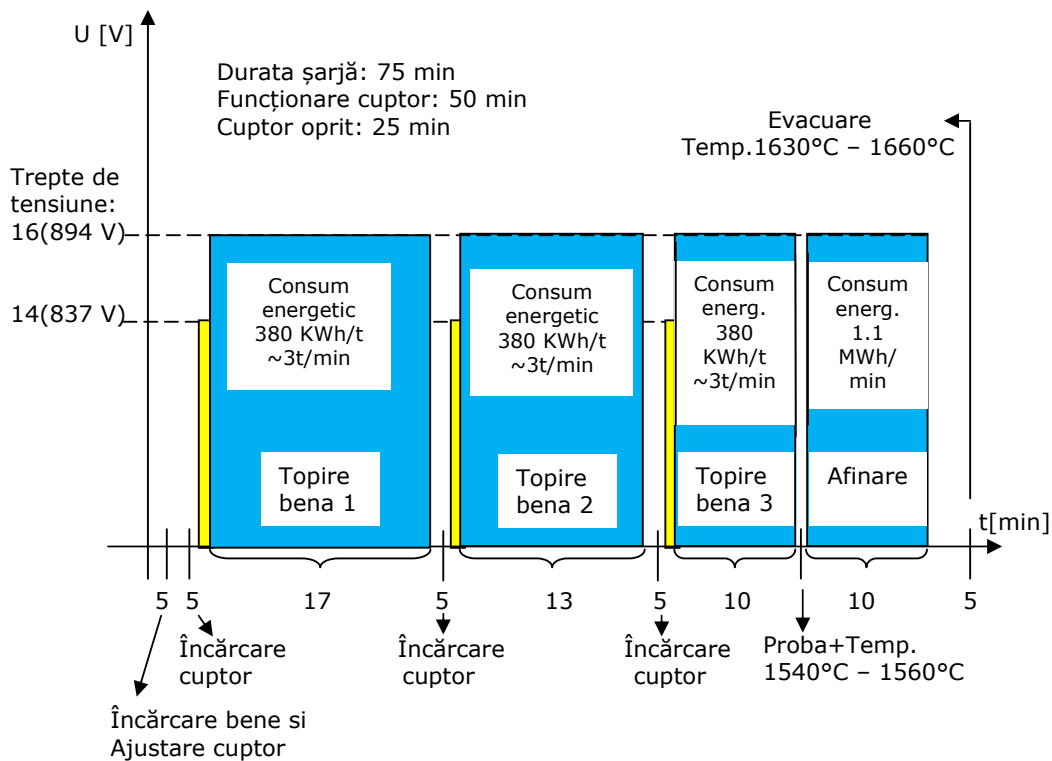


Fig.2.10. Procesul tehnologic de elaborare al oțelului.

2.5 Parametrii energetici și tehnologici ai procesului de elaborare al oțelului

Mărimile care caracterizează cuptoarele cu arc electric din punct de vedere energetic sunt [GoI97], [***_7], [And11]:

- intensitatea curentului arcului electric [kA];
- tensiunea arcului electric [V];
- rezistența arcului [$m\Omega$];
- puterea activă a arcului [MW];
- puterea aparentă [MVA];
- puterea reactivă [MVAR];

- puterea deformantă [MVAD];
- rezistența și impedanța circuitului [$m\Omega$];
- puterea aparentă a cuptorului (a transformatorului de alimentare a cuptorului) [MVA];
- puterea specifică a cuptorului [kVA/t];
- consumul specific de energie electrică pe durata topirii [kWh/t];
- factorul de putere al circuitului;
- randamentul cuptorului.

Mărimile care caracterizează cuptoarele cu arc electric din punct de vedere tehnologic sunt:

- productivitatea cuptorului [t/h];
- productivitatea cuptorului pe durata topirii [t/min];
- capacitatea cuptorului [t];
- lungimea arcului electric [cm].

În continuare se vor prezenta principalele mărimi electrice care caracterizează cuptorul cu arc electric.

Puterile în regim deformant

Cuptorul cu arc electric este una dintre cele mai importante surse ale regimului deformant (nesinusoidal) deoarece atât tensiunea cât și curentul arcului nu prezintă variații sinusoidale, arcul electric fiind un element neliniar de circuit.

Puterile în regim deformant sunt următoarele [Bud27]:

- **Puterea aparentă** poate fi definită ca și în regim sinusoidal cu relația (2.11).

$$S = U \cdot I \quad (2.11)$$

Valorile efective ale **curentului** și **tensiunii** se calculează cu relațiile (2.12) și (2.13). U_0 și I_0 reprezintă componentele continue ale tensiunii și curentului, iar U_k și I_k reprezintă valorile efective ale armonicilor de tensiune și de curent.

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2} \quad (2.12)$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad (2.13)$$

- **Puterea activă** se poate calcula cu relația (2.14), fiind media pe o perioadă a puterii instantanee absorbite de acesta.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt \quad (2.14)$$

De asemenea puterea activă poate fi determinată ca suma dintre produsul termenilor constanți (puterea de curent continuu) și suma puterilor active corespunzătoare armonicilor, conform relației (2.15). În această relație termenul

2.5 – Parametrii energetici și tehnologici ai procesului de elaborare al oțelului 47

$\cos \varphi_k$ reprezintă factorul de putere al circuitului determinat în funcție de rangul armonicilor.

$$P = U_0 \cdot I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k \quad (2.15)$$

- **Puterea reactivă** se poate calcula cu relația (2.16) fiind egală cu suma puterilor reactive aferente armonicilor.

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k \quad (2.16)$$

- **Puterea deformantă** este specifică regimului deformant, fiind determinată prin relația (2.17).

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (2.17)$$

și are expresia

$$D = \sqrt{\sum_{j>k=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} [U_j^2 \cdot I_k^2 + U_k^2 \cdot I_j^2 - 2U_j U_k I_j I_k \cdot \cos(\varphi_j - \varphi_k)]} \quad (2.18)$$

În funcție de puterile prezentate anterior poate fi definit factorul de putere în regim deformant:

- **Factorul de putere în regim deformant** este calculat ca raportul dintre puterea activă și cea aparentă, conform relației (2.19).

$$K_P = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (2.19)$$

- **Factorul reactiv**

$$\rho = \frac{Q}{P} = \operatorname{tg} \varphi \quad (2.20)$$

- **Factorul deformant**

$$\sigma = \frac{D}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \operatorname{tg} \xi \quad (2.21)$$

Alți parametri importanți:

- **Lungimea arcului electric** este dată de diferența dintre tensiunea de stingere a arcului electric și constanta A (este egală cu suma căderilor de tensiune anodică și catodică, cca 40 V) raportată la căderea de tensiune pe unitatea de lungime a arcului electric B , având valori uzuale de 10V/cm [Mon94].

$$L_{arc} = \frac{U_{st} - A}{B} \quad (2.22)$$

- **Randamentul cuptorului** poate fi determinat prin relația (2.23) în care P_{arc} reprezintă puterea utilă disipată în cuptor (obținută după ce se scad pierderile din puterea totală), r este rezistența echivalentă a circuitului de alimentare, iar P_t reprezintă puterea totală.

$$\eta = \frac{P_{arc}}{P_t} = \frac{R_{arc}}{R_{arc} + r} \quad (2.23)$$

În majoritatea cazurilor cuptoarele cu arc electric funcționează pe parcursul fazei de topire cu un factor de putere natural de 0,85, iar randamentul de cca 0,6.

Tensiunea din secundarul transformatorului cuptorului depinde de puterea transformatorului, de dimensiunile materialului ce urmează să fie topit, de calitatea materialelor refractare utilizate și de caracterul procesului metalurgic [Gol97]. În cazul în care se utilizează tensiuni mai mari în secundarul transformatorului se obține un randament și un factor de putere al cuptorului mai bun, dar scade durata de viață a căptușelii refractare deoarece arcul electric are o lungime mai mare. În cazul în care se reduce lungimea arcului electric are loc creșterea căldurii materialului din cuptor și reducerea cantității de căldură din pereții cuptorului, crescând durata de viață a căptușelii refractare.

Regimul de funcționare al cuptorului cu arc electric poate fi descris de: tensiunea din secundarul transformatorului cuptorului, intensitatea curentului din arcul electric, rezistența electrică a acestuia și reactanța circuitului electric de alimentare al cuptorului.

Probleme ale procesului de elaborare al oțelului în cuptoarele cu arc electric trifazate de tip EBT

Procesul de elaborare al oțelului în cuptorul cu arc electric este unul complex, existând un număr important de parametri care influențează decisiv calitatea energiei electrice, calitatea produsului și cantitatea de oțel produs.

Principalele problemele care pot să apară în cadrul procesului de elaborare al oțelului sunt următoarele:

- introducerea armonicilor în rețeaua electrică de putere, așadar apariția efectului de fluctuație a tensiunii în rețeaua electrică de putere;
- ruperea electrozilor pe durata topirii deoarece lungimea arcului electric se modifică în funcție de modul în care are loc surparea, respectiv modificarea poziției încărcăturii (de la apariția scurtcircuitului și până la întreruperea arcului electric). În acest caz, trebuie ca procesul de elaborare al oțelului să se întrerupă, urmând apoi să se înlocuiască electrozii care s-au rupt.

Printr-o modelare corespunzătoare a procesului de elaborare al oțelului pot fi determinate valorile optime ale mărimilor care influențează funcționarea procesului tehnologic, valori care pot fi utilizate în sinteza sistemelor de conducere realizate în vederea reducerii injectării armonicilor în rețeaua electrică de putere, respectiv eliminării avariilor ce pot să apară.

2.6 Probleme ale conducerii procesului de elaborare al oțelului în cuptorul cu arc electric

2.6.1 Regimurile de funcționare ale cuptorului

Una dintre cele mai importante condiții privitoare la funcționarea cuptorului cu arc electric la parametrii tehnologici și energetici impuși este aceea de a se menține constantă lungimea arcului electric.

Lungimea arcului electric se modifică la schimbarea temperaturii din cuptor (temperatura șarjei crește), la surparea materialului din cuva cuptorului în faza de topire a metalului (apar scurtcircuite și întreruperi ale arcului electric), la fluctuații ale arcului electric la acțiunea forțelor electrodinamice, datorită consumului de electrozi, etc [Gol97], **[Ghi15_2]**.

Puterea disipată în arcul electric poate fi reglată prin modificarea tensiunii prin care se alimentează cuptorul sau prin modificarea distanței dintre electrozi și metalul de topit.

De obicei primul tip de reglare este utilizat când se trece de la o fază tehnologică la alta în procesul de elaborare al oțelului, iar al doilea tip de reglare este utilizat în cadrul aceleiași faze tehnologice, cu scopul de a se înlătura scurtcircuitele, de a reporni arcul electric sau pentru a compensa consumul de electrozi.

În cazul cuptorului cu arc electric trifazat fiecare electrod deține propriul său sistem de conducere. Sistemul trebuie realizat cu scopul de a menține constant unul din următorii parametrii electrici: intensitatea curentului arcului electric, tensiunea arcului electric, rezistența arcului electric, puterea disipată în arcul electric sau factorul de putere.

În cazul sistemelor de conducere în care se menține constantă intensitatea curentului electric, răspunsul sistemului este rapid datorită legăturii directe a curentului cu lungimea arcului electric. În cazul în care lungimea arcului se reduce curentul electric din circuit crește, iar dacă lungimea arcului crește curentul electric din circuit scade.

În cazul sistemelor în care se menține constantă tensiunea arcului electric apare dezavantajul unei sensibilități scăzute, deoarece în cazul în care intensitatea curentului arcului electric are variații în limite mari, tensiunea la bornele arcului se modifică foarte puțin.

În cazul sistemelor de conducere în care se menține constant factorul de putere, reglarea se reduce la reglarea rezistenței electrice a arcului electric, deoarece rezistența echivalentă și reactanța echivalentă sunt practic constante. Dacă se trece de la un factor de putere de 0,8 la unul de 0,7 se reduce uzura zidăriei cuptorului, deoarece arcul electric este mai scurt, iar puterea disipată în arcul electric este mare [Gol97].

În relația (2.24) este definit factorul de putere în funcție de rezistența electrică a arcului electric R_{arc} , rezistența electrică echivalentă pe fază r , respectiv reactanța echivalentă pe fază X , ale circuitului de alimentare al cuptorului. Rezistența echivalentă pe fază, dar și reactanța echivalentă pe fază sunt raportate la tensiunea din primarul transformatorului.

$$\cos \varphi = \frac{R_{arc} + r}{\sqrt{(R_{arc} + r)^2 + X^2}} \quad (2.24)$$

În cazul sistemelor de conducere în care se menține constantă rezistența arcului electric se identifică practic aceleași caracteristici ca și în cazul în care se controlează factorul de putere.

În cazul sistemelor de reglare în care se menține constantă puterea disipată în arcul electric, se vor obține două puncte de funcționare distincte între ele pentru aceeași putere a arcului.

Mărimile electrice din circuitul arcului electric pot să varieze lent, rapid sau foarte rapid. În cazul variației lente, mărimile electrice sunt influențate de consumul electrozilor sau de ridicarea nivelului băii lichide. În cazul variațiilor rapide, mărimile electrice sunt influențate de surparea încărcăturii și de apariția scurtcircuitelor sau a întreruperilor arcului electric. În ultimul caz, mărimile electrice pot să varieze foarte rapid și să fie oscilatorii, datorită fierberii metalului în baie, datorită fluctuațiilor arcului electric din cauza forțelor electrodinamice, etc.

2.6.2 Sisteme de reglare automată a instalației cuptorului cu arc electric

Sistemele de conducere actuale ale instalației cuptorului cu arc electric permit reglarea poziției electrozilor astfel încât arcul electric să fie menținut pe cât posibil constant sau permit controlul insuflării de oxigen și reducerea/injectarea de carbon cu scopul de a se obține o anumită calitate a oțelului.

În fig.2.11 este prezentat sistemul de conducere al poziției electrozilor (E) în cuptoarele cu arc electric trifazate. Deoarece fiecare electrod deține propriul său sistem de reglare, se va considera sistemul de reglare pentru o singură fază [Gol97].

Transformatoarele de curent TC și de tensiune TT permit măsurarea curentului electric din circuit I , care este și curentul arcului, respectiv măsurarea căderii de tensiune la bornele arcului electric U_{arc} . În funcție de valorile acestora blocul de calcul BC determină valoarea rezistenței arcului electric R_{arc} , pe baza căreia se poate regla poziția electrozilor din cuptorul cu arc electric.

Valoarea rezistenței electrice reale R_{arc} este comparată cu valoarea prescrisă a rezistenței R_{arcP} generată de blocul de prescriere BP , eroarea dintre ele $\epsilon_{R_{arc}}$ fiind preluată de regulatorului RG . Semnalul de comandă este aplicat sistemului cu acționare hidraulică SAH (reprezentând elementul de execuție EE) care modifică poziția electrozilor. SAH -ul conține trei distribuitoare hidraulice proporționale.

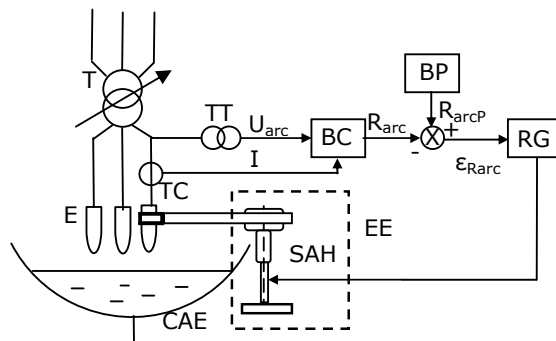


Fig.2.11. Sistemul de conducere al poziției electrozilor în cuptorul cu arc electric.

Sistemul de conducere trebuie să asigure funcționarea cuptorului cu arc electric, CAE, la parametrii prescriși și să prezinte următoarele caracteristici principale:

- *rapiditate* - pentru a înlătura perturbațiile extreme (scurtcircuite și întreruperi ale arcului electric) într-un interval de timp cât mai scurt;
- *precizie* - pentru ca abaterile de la valorile prescrise să fie cât mai mici;
- *reducere la minim* a mișcărilor electrozilor la apariția perturbațiilor aleatorii;
- *aprindere automată* a arcului electric;
- *posibilitatea de a modifica puterea disipată* în arcul electric cu o abatere de $\pm 5\%$;
- *blocare* a electrozilor atunci când se întrerupe tensiunea de alimentare.

Sistemele actuale de conducere a procesului de elaborare al oțelului în cuptoarele cu arc electric utilizează calculatoare de proces, cu ajutorul cărora se pot urmări și modifica parametrii astfel încât să fie respectată întreaga tehnologie de elaborare, iar consumul de energie să fie unul minimal.

În fig.2.12 este ilustrată schema de principiu a unui sistem de conducere cu calculator de proces a cuptorului cu arc electric [Gol97].

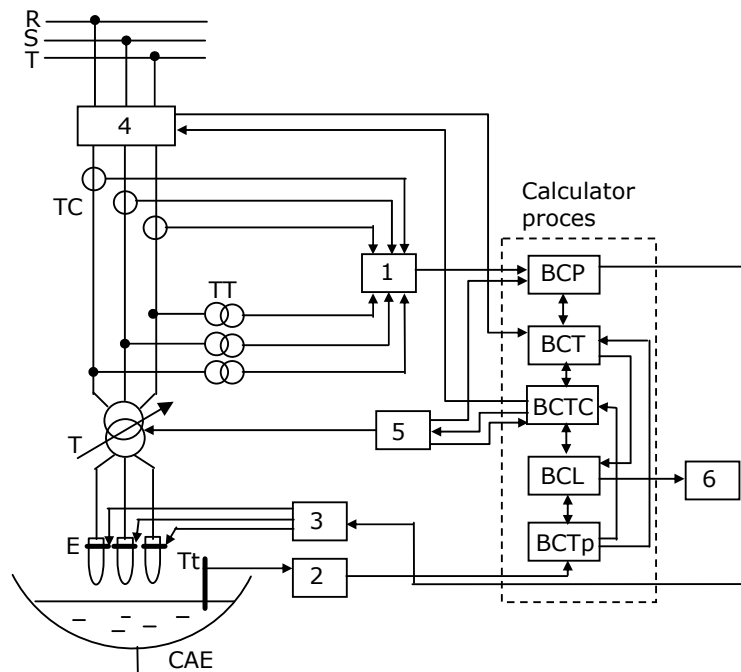


Fig.2.12. Schema de principiu a unui sistem de conducere cu calculator de proces a cuptorului cu arc electric.

Blocul de calcul (1) pe baza măsurărilor tensiunii (prin intermediul transformatorului de tensiune TT) și a măsurărilor curenilor (prin intermediul transformatorului de curent TC) are rolul de a determina puterea activă absorbită de

la rețea și rezistența electrică de pe fiecare fază de alimentare și de a transmite date către blocul de control al puterii *BCP*.

Blocul *BCP* are rolul de a transmite comenzi necesare către elementul de execuție pentru modificarea poziției electrozilor (3), cu scopul de a se obține o nouă lungime a arcului electric.

Semnalul provenit de la traductorul de temperatură T_t este amplificat de blocul (2) și transmis blocului de control al temperaturii din cuptor *BCTp*. Acest bloc are rolul de a determina puterea ce poate să fie disipată în arcul electric în funcție de valorile măsurate și de mărimile de consemn provenite de la alte sisteme de control.

Blocul (4) reprezintă un întreruptor tripolar prin intermediul căruia se poate cupla sau decupla cuptorul de la rețeaua de alimentare.

Blocul (5) reprezintă elementul de execuție prin intermediul căruia se modifică ploturile (treptele) transformatorului cuptorului cu arc electric (T).

Blocului (6) are rolul de a afișa valorile mărimilor, a anumitor informații sau a avertizărilor.

Calculatorul de proces mai conține pe lângă blocurile *BCP* și *BCTp* următoarele blocuri:

- blocul de control al procesului de topire *BCT* care conține programele tehnologice pentru obținerea de oțeluri cu proprietăți diferite;
- blocul de comandă al întreruptorului tripolar pentru cuptorul cu arc electric *BCTC* care asigură controlul poziției ploturilor transformatorului cuptorului;
- blocul de comandă logică *BCL* care are rolul de a afișa mărimilor necesare gestionării informațiilor privitoare șarjei și a operațiilor de avertizare.

În funcție de programele specializate dar și de informațiile primite se stabilește calculatorul de proces (7) stabilește momentele în care se execută anumite operații: modificarea regimului de lucru al cuptorului (schimbarea parametrului controlat), încărcarea cuptorului, bascularea cuptorului pentru evacuarea zgurii și evacuarea metalului aflat în stare lichidă. În același timp se afișează mai multe informații care sunt utile operatorului: puterea disipată în fiecare fază tehnologică (topire, afânare), consumul de energie electrică, gradul de utilizare al zidăriei refractare, etc. În plus, calculatorul de proces (7) stabilește care sunt treptele de lucru ale transformatorului cuptorului pentru fiecare fază tehnologică de elaborare a oțelului.

În cazul în care are loc creșterea temperaturii metalului din cuptorul cu arc electric, calculatorul de proces (7) va asigura reducerea puterii disipată în arcul electric. Această reducere este obținută prin modificarea plotului transformatorului și prin modificarea poziției electrozilor într-un mod corespunzător.

Sistemele de conducere actuale ce conțin calculatoare de proces oferă posibilitatea de a controla în timp real procesul tehnologic în funcție de parametri prescriși pentru materialul care trebuie topit.

2.6.3 Structura sistemului de conducere a procesului de elaborare al oțelului de la AM HD

Sistemul de conducere al poziției electrozilor de la cuptorul cu arc electric cu acțiune directă de tip EBT de la AM HD are rolul de a comanda instalația hidraulică a grinzilor portelectrod ale cuptorului pentru a se obține deplasarea pe verticală a electrozilor. Sistemul conține un calculator de proces care are o serie de plăci de

achiziție de date necesare desfășurării procesului tehnologic ce are loc în cadrul cuptorului cu arc electric.

În fig.2.13 este ilustrată structura sistemului de conducere al cuptorului cu arc electric cu acțiune directă de la AM HD. În cadrul acestei figuri blocurile 2, 3, 4 și 5 au aceeași semnificație ca și în fig.2.12.

Blocul 1 prelucrează curenții proveniți de la transformatoarele de curent *TC* conectate în primarul transformatorului cuptorului.

Blocul 6 are rolul de a măsura armonicile de curent de pe faza 2 din secundarul transformatorului cuptorului *T*. În funcție de valorile măsurate se pot da valori, la momente instantanee, asupra nivelului zgurii spumante din cuptor.

Regulatorul electrozi SPIE are rolul de a modifica poziția electrozilor sau a ploturilor transformatorului cuptorului. Pe baza informațiilor despre curenții de fază obținuți de la *TC* (care sunt conectate în primarul transformatorului cuptorului) dar și de raportul de transformare al transformatorului regulatorul calculează curenții din secundarul transformatorului [***_7].

Rețeaua ARCNET (Attached Resource Computer Network) realizează conexiunea dintre *regulatorul electrozi SPIE* și automatul programabil *PLC SIMATIC S5*.

Pentru a se interveni asupra procesului de elaborare al oțelului se utilizează computer-ul *PC*, respectiv *pupitrul de comandă*.

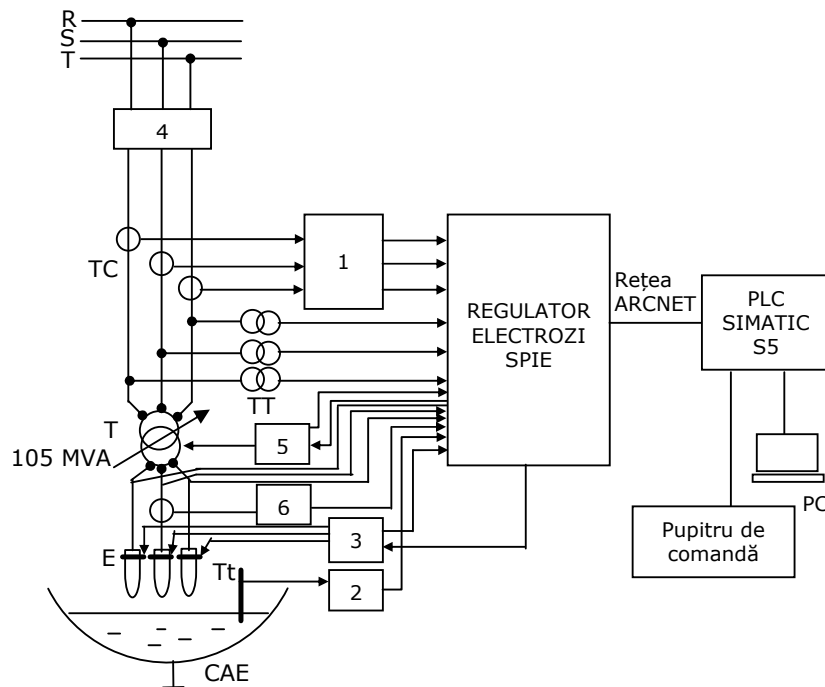


Fig.2.13. Structura instalației de comandă a proceselor în cuptorul cu arc electric cu acțiune directă de la AM HD.

2.6.4 Sisteme de conducere bazate pe tehnici inteligente

În [Sha10] este prezentat un sistem de conducere bazat pe logica fuzzy (fig.2.14), cu două mărimi de intrare și o mărime de ieșire. Cele două mărimi de intrare sunt abaterea impedenței sistemului și respectiv derivata acestei abateri (care reprezintă rata de modificare a erorii), mărimea de ieșire este comanda care se dă sistemului cu acționare hidraulică care are rolul de a modifica poziția electrodului. Universul discursului pentru variabilele sistemului fuzzy a fost normalizat astfel încât variabilele au valori între -1 și 1 . Sistemul fuzzy este un sistem de tip Mamdani.

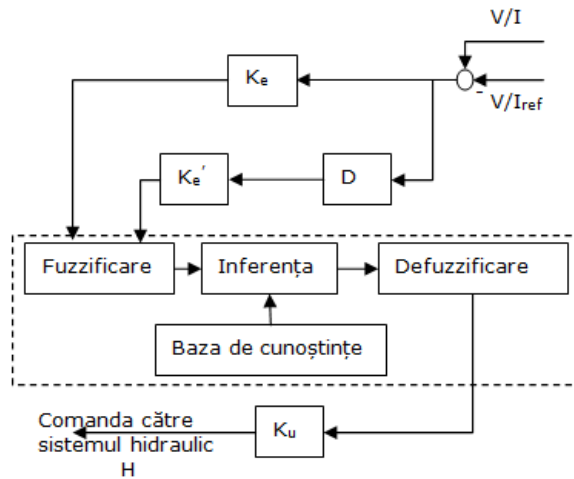


Fig.2.14. Sistem de conducere bazat pe regulator fuzzy.

În [Mog11] este prezentat un sistem de conducere bazat pe utilizarea regulatorului fuzzy PI (fig.2.15). Sistemul fuzzy are două mărimi de intrare (eroarea dintre curentul impus și curentul obținut, respectiv derivata erorii) și o mărime de ieșire (comanda dată instalației hidraulice). Regulatorul fuzzy este similar unui regulator de tip P. Mărimea de la ieșirea regulatorului fuzzy este integrată astfel obținându-se regulatorul PI. Pentru variabilele sistemului fuzzy, universul discuției este normalizat. Sistemul fuzzy este un sistem de tip Takagi-Sugeno. Mărimile de intrare și de ieșire sunt multiplicare cu niște constante care sunt acordate utilizând un sistem off-line bazat pe algoritmi genetici.

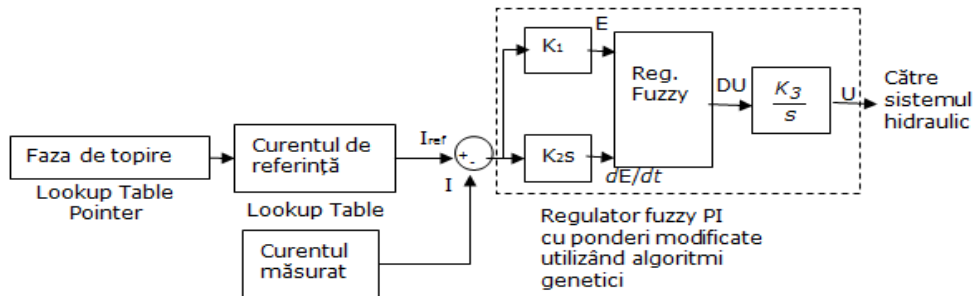


Fig.2.15. Schema bloc de reglare a curentului arcului pentru o fază.

În [Zha14] este prezentat un sistem de conducere bazat pe logica fuzzy (fig.2.17), care utilizează un algoritm de interpolare pentru a îmbunătăți acuratețea reglajului, dar fără să crească complexitatea controlerului. Regulatorul fuzzy are trei mărimi de intrare (eroarea dintre curentul impus și cel obținut, pentru fiecare dintre cele trei faze ale sistemului electric) și trei mărimi de ieșire (comenzi pentru modificarea poziției electrozilor). Mărimile de ieșire sunt obținute printr-un algoritm de interpolare al valorilor obținute anterior. Universul discuției pentru variabilele sistemului fuzzy este normalizat. Pentru realizarea inferenței s-a utilizat metoda *min-max*, iar pentru defuzificare s-a utilizat metoda celui mai mare maxim.

În [Li10] este prezentat un sistem de conducere bazat pe logica fuzzy care are rolul de a adapta parametrii unui regulator *PID* (fig.2.18). Regulatorul fuzzy are două mărimi de intrare (eroarea și derivata erorii) și trei mărimi de ieșire (K_P , K_I , K_D). Mărimile de ieșire sunt de fapt parametrii regulatorului PID. Mărimea de referință este curentul arcului.

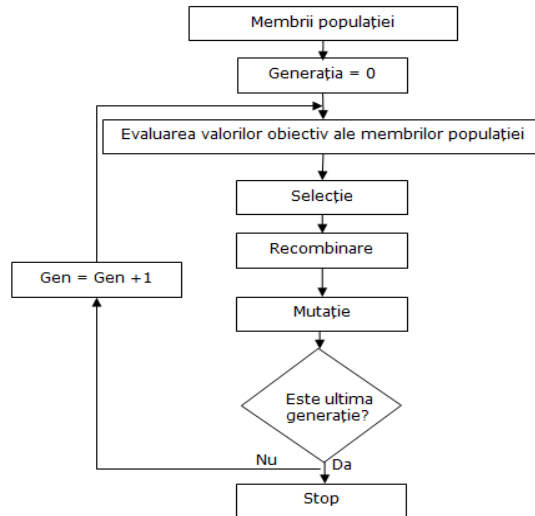


Fig.2.16. Organigrama pentru algoritmi genetici.

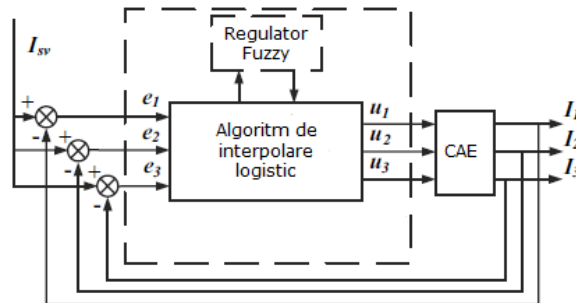


Fig.2.17. Sistem de conducere bazat pe regulator fuzzy și pe un algoritm de interpolare.

În [Bab12] sunt prezentate trei sisteme de conducere: se utilizează regulator *PID*, regulator *fuzzy*, respectiv regulator *PID* cu acordare *fuzzy*. În cazul regulatorului *fuzzy*, universul discuției este normalizat, iar mulțimile *fuzzy* alese pentru variabilele sistemului *fuzzy* sunt de tip triunghiular. În cazul regulatorului *PID* cu acordare *fuzzy*, sunt alese două mărimi de intrare și trei mărimi de ieșire. Mărimile de intrare sunt eroarea și derivata erorii, iar mărimile de ieșire sunt parametrii regulatorului *PID* care sunt adaptați în funcție de eroare.

În [Wan11] este propus un sistem de conducere care constă dintr-un regulator *PID* acordat printr-o rețea neuronală de tip *backpropagation* ai cărei parametri sunt optimizați prin algoritmi genetici (fig.2.19).

În [Băl07] este prezentat un sistem de conducere adaptiv bazat pe modele predictive (fig.2.21) utilizat pentru menținerea constantă a curenților arcului electric de pe fiecare fază.

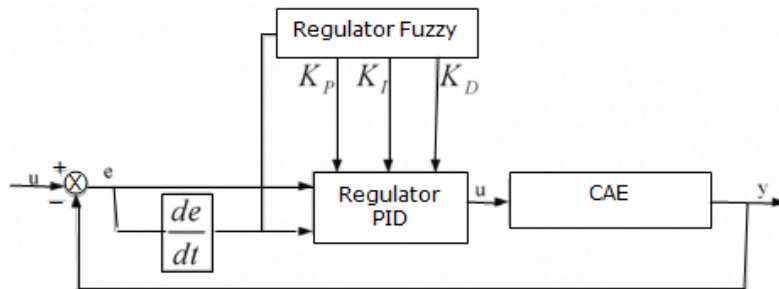


Fig.2.18. Sistem de conducere bazat pe regulator *PID* acordat de regulator *fuzzy*.

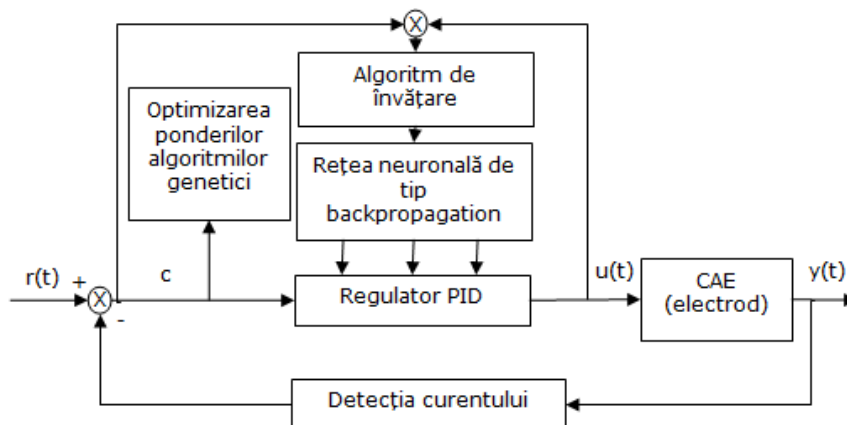


Fig.2.19. Sistemul de conducere bazat pe regulator *PID* acordat o rețea neuronală ai cărei parametri sunt obținuți prin algoritmi genetici.

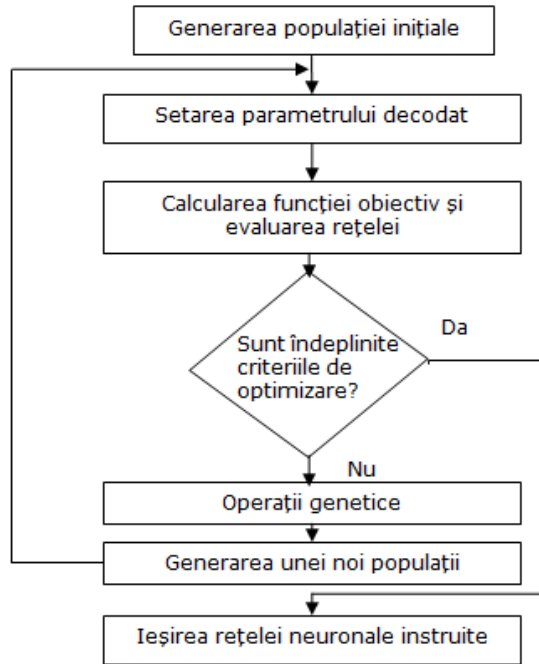


Fig.2.20. Organigrama algoritmului genetic.

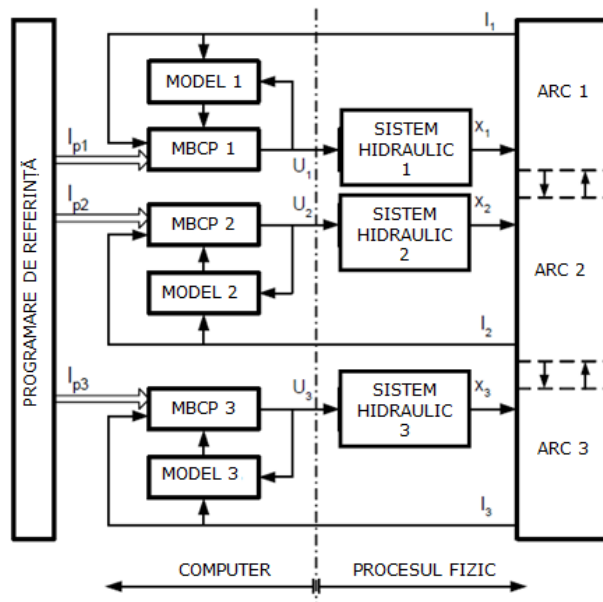


Fig.2.21. Sistemul de conducere adaptiv.

2.7 Concluzii

Cele două mari categorii de probleme care pot să apară în cadrul procesului de elaborare al oțelului sunt injectarea armonicilor în rețeaua electrică de putere, respectiv ruperea electrozilor. Aceste probleme pot fi soluționate prin menținerea constantă (pe cât posibil) a lungimii arcului pe parcursul celor două faze tehnologice aferente procesului de elaborare al oțelului.

Din cele prezentate se pot sintetiza câteva dintre concluziile următoare:

- procesul de elaborare al oțelului este un proces complex care nu poate lipsi din industria metalurgică viitoare;
- principalele direcții ale dezvoltării tehnologice determinate nemijlocit de exigențele de competitivitate ale producătorilor sunt legate de calitatea energiei electrice, creșterea productivității oțelului în cuptorul cu arc electric, respectiv obținerea unei calități superioare a oțelului;
- soluțiile adoptate pentru automatizarea procesului de elaborare al oțelului sunt determinante pentru performanțele obținute, fiind necesare metode avansate de modelare și conducere.

3. MODELAREA FUNCȚIONĂRII CUPTORULUI CU ARC ELECTRIC

În acest capitol sunt propuse cinci modele matematice bazate pe reprezentarea caracteristicii curent-tensiune a arcului care simulează comportamentul arcului electric, respectiv un model care simulează funcționarea întregii instalații a cuptorului cu arc electric trifazat. Pentru fiecare model al arcului sunt realizate analize comparative privitoare la influența parametrilor modelelor arcului, dar și a tensiunii din secundarul transformatorului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric. Modelele propuse sunt validate prin compararea datelor obținute prin simulare cu cele achiziționate de la cuptorul real, pentru fiecare validare fiind ilustrate caracteristicile curent-tensiune a arcului, respectiv a cuptorului, dar și forma de undă a tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului, respectiv a curentului arcului.

De asemenea, sunt dezvoltate modele bazate pe rețele neuronale artificiale de tip *perceptron multi-strat* (MLP) sau rețele cu funcții de bază radiale (RNA RBF) care au capacitatea de a învăța comportamentul sistemului. Un alt tip de rețea neuronală dezvoltată este cea de tip *ANFIS* (adaptive neuro-fuzzy inference system) care permite prescrierea valorilor curenților și ale tensiunilor arcului electric în funcție de datele achiziționate de la instalația tehnologică reală, luând în considerare un anumit pas de eșantionare.

3.1. Noțiuni generale

În vederea analizei modului de funcționare al cuptorului cu arc electric este necesar să se modeleze arcul electric astfel încât să fie reflectată cât mai fidel comportarea arcului electric real [Pan07_1], [Golk07], [Pan12]. Pentru simularea modelului s-a utilizat mediul de programare *Matlab* [***_4], versiunea 2012, mediu care are integrat toolkit-ul *Simulink* prin intermediul căruia se pot utiliza diferite blocuri specifice circuitelor electrice, dar și definirea de funcții de către utilizator.

În cadrul acestei lucrări este analizat cuptorul cu arc electric trifazat cu acțiune directă de tip EBT (Excentric Bottom Tap-hole) [Tho01], cuptor care a fost detaliat în capitolul 2.

Printre principalele avantaje ale cuptorului cu arc electric pot fi menționate următoarele: eficiență termică bună, durată mică de elaborare a oțelului, putere reală disipată bună și eventual, rată mică de rupere a electrozilor [Ghi13_1]. În același timp, cuptorul cu arc electric trifazat este o sarcină dezechilibrată, neliniară și care variază în timp, instalația putând cauza multe probleme în rețeaua electrică de putere [Mok02], dintre care se pot menționa următoarele: generarea de curenți armonici, dezechilibru mare al puterii pe cele trei faze de alimentare și consum mare de putere reactivă [And11]. Astfel este necesar să se dezvolte un model matematic (**MM**) care să surprindă modul de funcționare al cuptorului cu arc electric, respectiv modul de comportare al arcului electric de la această instalație [And11].

Factorii care influențează modul de operare al cuptorului sunt: faza tehnologică de elaborare a oțelului (topire sau afânare), poziția electrozilor, schema de control a sistemului care poziționează electrozii, respectiv tensiunea și impedanța

sursei de alimentare a cuptorului [Cha08]. Astfel, modul de funcționare al cuptorului cu arc electric depinde de tensiunea arcului, curentul arcului și lungimea arcului, lungime care este influențată de poziția electrozilor [Jon97], [Wie08].

În capitolul 2 au fost prezentate diferite modele matematice ale arcului electric, care sunt abordate în literatura de specialitate. În general, aceste modele pot fi clasificate în domeniul timp și în domeniul frecvență [Golk07], [And11].

Cea mai utilizată metodă pentru modelarea statică și dinamică a comportării arcului electric de la cuptorul cu arc electric trifazat este metoda bazată pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric [Golk07], [Cha08], [Cha10], [Pan12], [Cha14], deoarece această metodă este simplă și directă, respectiv furnizează suficiente informații privitoare la modul de funcționare al instalației tehnologice avută în vedere.

Metoda bazată pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric utilizează o procedură de analiză numerică, care are rolul de a rezolva ecuația diferențială ce descrie modul de comportare al arcului electric din cadrul cuptorului [And11]. Caracteristica curent-tensiune este neliniară per ansamblu și liniarizată pe anumite porțiuni, descriind comportarea arcului electric pe parcursul funcționării cuptorului [Var96], [Cha08], [Pan08_3], [And11]. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric poate fi reprezentată în mai multe moduri (liniarizată, exponențială, hiperbolică, etc), fiecare reprezentare a caracteristicii conducând la modele diferite ale arcului electric.

3.2. Analiza datelor achiziționate de la instalația reală

Valorile achiziționate de la cuptorul real au fost preluate pe toată durata de elaborare a șarjei utilizând placa de achiziție *National Instruments 6221 [***_5]*. În acest context se poate efectua o analiză a modului de variație al mărimilor electrice pe parcursul întregului proces de elaborare al oțelului. Principiul de achiziție al datelor este prezentat în [Pan08] și este caracterizat de natura mărimilor electrice care sunt măsurate, de caracteristicile tehnice ale sistemului de achiziție de date, respectiv de calculatorul pe care sunt rulate programele de achiziție sau pe care sunt prelucrate datele. Astfel, s-au dedus următoarele:

- în vederea studierii caracteristicilor spectrale ale undelor de curent și de tensiune de pe fiecare fază de alimentare, frecvența de achiziție pe un canal trebuie să fie de 5 kHz , incluzând armonica 50, aferentă frecvenței de $2,5 \text{ kHz}$;
- datele achiziționate sunt memorate în calculator deoarece este mai dificil să fie prelucrate în timp real, dar și pentru a putea fi folosite și în regim off-line.

Achiziția datelor s-a efectuat simultan pe 6 canale (3 canale pentru curenți și 3 pentru tensiuni) luând în considerare recomandările privitoare la modul de achiziționare al semnalelor prezentate în [Ars96], [Ion98] astfel:

- frecvența de achiziție impusă a fost de 5 kHz , iar pe durata a 250 ms s-au prelevat datele simultan de pe cele 6 canale. În acest context, semnalele au fost achiziționate pe durata a $12,5 \text{ perioade}$. Astfel, dacă frecvența de alimentare este diferită de 50 Hz , semnalele vor conține $12 \text{ perioade întregi}$, care pot fi selectate prin programul soft;
- achiziția datelor pe durata de 250 ms a fost reluată la un interval de $9,75 \text{ s}$, interval în care au fost stocate în memorie datele prelevate anterior. Astfel, datele au fost achiziționate pe întreaga perioadă de elaborare a oțelului, în

ferestre de timp având lungimea de 250 ms , intervalul dintre două ferestre de date consecutive fiind de 10 sec [Pan08].

În timpul procesului de elaborare al oțelului apar anumite intervale de timp în care cuptorul electric este deconectat de la rețeaua electrică de putere [Jon97], [Wie08]. În aceste intervale personalul uman intervine în scopul de a efectua anumite analize chimice asupra compoziției șarjei ce se elaborează, de a adăuga diferite elemente chimice în scopul obținerii compoziției dorite, de a se evacua zgura formată, dar și de a efectua alte intervenții care necesită deconectarea cuptorului de la rețeaua de alimentare [***_2]. În acest context, dar ținând cont și de faptul că achiziția datelor se face automat la un interval de 10 s , rezultă că apar intervale în care măsurările achiziționate sunt nule.

Măsurătorile de pe linia de joasă tensiune au fost efectuate pe întreaga perioadă de elaborare a trei șarje și au constat în achiziționarea și memorarea eșantioanelor curbelor de curent și de tensiune de pe cele trei faze de alimentare.

În funcție de datele care au fost memorate, de constantele traductoarelor de curent și a transformatoarelor de tensiune, dar și de caracteristicile blocului de adaptare, respectiv a plăcii de achiziție de date s-au putut obține formele de variație ale mărimilor electrice care caracterizează modul de operare al cuptorului cu arc electric pe întreaga perioadă de elaborare a unei șarje [Pan08].

În cadrul procesului de elaborare al oțelului în cuptorul cu arc electric sunt identificate două faze tehnologice importante: topirea și afânarea [***_2]. Topirea încărcăturii reprezintă mai mult de jumătate din întreaga durată de elaborare. În această fază tehnologică se consumă 60-80% din cantitatea de energie electrică care este necesară unei șarje. Aceasta constă din rabatarea bolții peste cuptor, coborârea electrozilor și pornirea arcului electric [***_2]. În cea mai mare parte a timpului transformatorului cuptorului în faza de topire este setat pe treapta 16 de tensiune, căreia îi corespund 894 V în secundar.

Afânarea (fierberea) sau oxidarea este faza principală pentru calitatea oțelului, operație care este inițiată în timpul topirii. Pe parcursul celor două faze tehnologice principale, pe lângă reducerea conținutului de carbon, are loc și o defosforare și desulfurare. Afânarea are drept scop principal îndepărtarea gazelor (H și N) și a incluziunilor nemetalice din baia de oțel cu ajutorul oxigenului insuflat în baia metalică [***_2]. În faza de afânare, în cea mai mare parte a timpului, transformatorul este setat pe treapta 14, căreia îi corespunde o tensiune trifazată de alimentare a cuptorului de 837 V .

În fig.3.1 sunt prezentate formele de undă ale curenților și tensiunilor de pe linia de alimentare de joasă tensiune achiziționate în faza de topire a oțelului. Pentru o vizualizare mai detaliată a semnalului sunt prezentate primele cinci perioade din semnalul achiziționat. Se poate constata că măsurările electrice achiziționate sunt foarte distorsionate în această fază tehnologică, și de asemenea că amplitudinile mărimilor electrice de pe cele trei faze ale tensiunii de alimentare sunt inegale, ceea ce poate duce la concluzia că sarcina este puternic dezechilibrată.

În faza de ardere stabilă a arcului electric, care apare spre finalul elaborării șarjei, în special în timpul proceselor de oxidare și reducere (dezoxidare) [Cha10], se constată că distorsiunile care apar în formele de undă ale curenților și tensiunii sunt mult mai reduse, așa cum rezultă din fig.3.2, în care sunt prezentate formele de undă obținute în faza de afânare. Pentru reprezentare sunt ilustrate primele cinci perioade din semnalul achiziționat. În această fază, amplitudinile curenților și tensiunilor sunt mult mai apropiate ca valoare, fapt care arată că impedanța de sarcină este mai echilibrată.

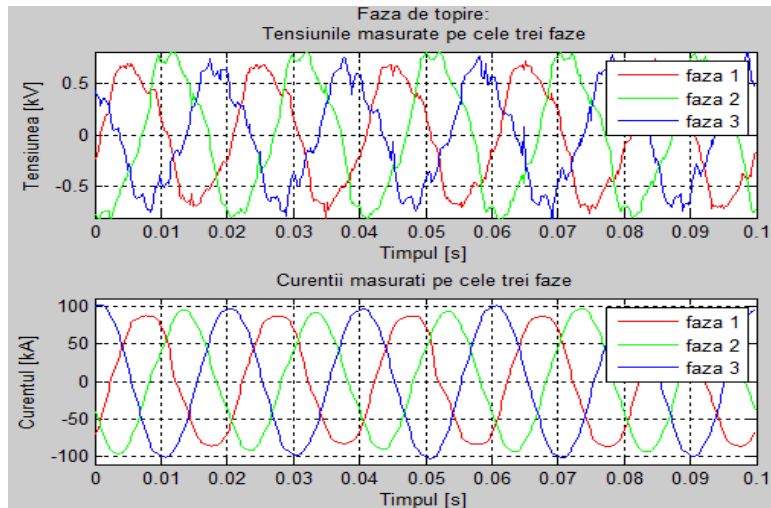


Fig.3.1. Forme de undă pentru tensiunile și curenții achiziționați de la instalația reală în faza de topire.

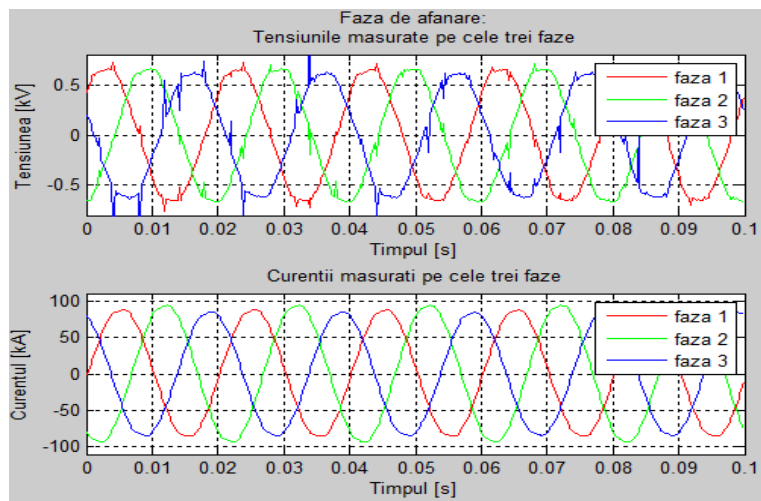


Fig.3.2. Forme de undă pentru tensiunile și curenții achiziționați de la instalația reală în faza de afânare.

3.3. Schema electrică de funcționare a cuptorului cu arc electric ca și consumator trifazat simetric

Regimul de funcționare al cuptorului cu arc electric poate fi definit prin: intensitatea curentului arcului electric, tensiunea arcului electric, tensiunea din secundarul transformatorului cuptorului, rezistența electrică și reactanța circuitului prin care se alimentează cuptorul cu arc electric [Cha08].

În vederea implementării modelelor matematice ale arcului electric s-a utilizat schema electrică de alimentare a cuptorului cu arc electric pentru o singură

fază, din fig.3.3 [Pee06], [Pan12], [Ghi13_1], [Ghi13_4]. Toate modelele au fost implementate pe aceeași schemă electrică cu scopul de a obține concluzii comparative privitoare la performanțele modelelor analizate sau dezvoltate de autor.

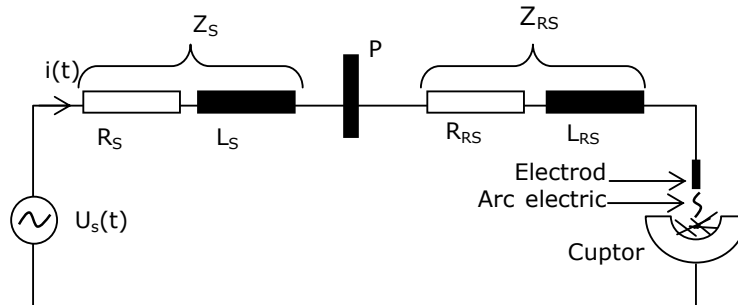


Fig.3.3. Schema electrică de alimentare a cuptorului cu arc electric pentru o fază.

Notățiile aferente fig.3.3 au următoarele semnificații:

- $U_s(t)$ – tensiunea de alimentare a cuptorului cu arc electric, care este alimentat în curent alternativ;
- Z_S – este impedanța sursei de alimentare (a transformatorului cuptorului), definită prin relația (3.1);
- P – este punctul de măsură din secundarul transformatorului;
- Z_{RS} – este impedanța rețelei scurte de alimentare a cuptorului, definită prin relația (3.2);
- *Electrod* – este unul dintre cei trei electrozi din grafit ai cuptorului;
- *Arc electric* – este arcul electric ce apare între electrod și metalul ce urmează să fie topit;
- *Cuptor* – este instalația cuptorului care este utilizat pentru elaborarea oțelului.

$$Z_S = R_S + j \cdot X_S \quad (3.1)$$

$$Z_{RS} = R_{RS} + j \cdot X_{RS} \quad (3.2)$$

în care X_S este reactanța sursei de alimentare (a transformatorului), iar X_{RS} este reactanța rețelei scurte de alimentare a cuptorului.

$$X_S = \omega \cdot L_S = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_S \quad (3.3)$$

$$\text{si} \quad X_{RS} = \omega \cdot L_{RS} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{RS} \quad (3.4)$$

unde,

- ω, f – pulsația, respectiv frecvența rețelei de alimentare;
- L_S, L_{RS} – inductanța bobinei sursei de alimentare, respectiv a rețelei scurte de alimentare.

Dacă se aplică a doua lege a lui Kirchhoff pentru schema electrică din fig.3.3, se poate scrie relația (3.5).

$$u_S(t) = R_S \cdot i(t) + L_S \cdot di/dt + R_{RS} \cdot i(t) + L_{RS} \cdot di/dt + u_{arc} \quad (3.5)$$

Notând:

$$R_{ech} = R_S + R_{RS} \quad (3.6)$$

și

$$L_{ech} = L_S + L_{RS} \quad (3.7)$$

rezultă că:

$$u_S(t) = R_{ech} \cdot i(t) + L_{ech} \cdot \frac{di}{dt} + u_{arc} \quad (3.8)$$

sau

$$L_{ech} \cdot \frac{di}{dt} = u_S(t) - R_{ech} \cdot i(t) - u_{arc}$$

(3.9)

Tensiunea indusă într-o bobină de inductivitate L [***_6] este dată prin relația (3.10a).

$$U_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.10a)$$

care conduce la:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_L}{L} \quad (3.10b)$$

Integrând relația (3.10b) se obține (3.10c).

$$i(t) = \frac{1}{L} \int U_L dt = \frac{\omega}{X} \int U_L dt \quad (3.10c)$$

Pentru a se determina tensiunea din punctul de măsură, P , se aplică a doua lege a lui Kirchhoff pentru schema electrică din fig.3.3, până la punctul P . Astfel rezultă relația (3.11).

$$u_S(t) = R_S \cdot i(t) + L_S \cdot di/dt + u_P \quad (3.11)$$

$$\text{de unde,} \quad u_P = u_S(t) - R_S \cdot i(t) - L_S \cdot di/dt \quad (3.12)$$

Utilizând relațiile (3.8), (3.10c) și (3.12) se obține *schema Simulink*, prezentată în fig.3.4 **[Ghi12]** care este echivalentă schemei electrice de funcționare a cuptorului cu arc electric din fig.3.3. În această schemă Simulink *Funcția Matlab* reprezintă modelul matematic propus de autor, utilizat pentru simularea comportamentului arcului electric. Pentru a se procesa semnalele din fig.3.4 s-a ales timpul de eșantionare de $1/10000$ s. Valorile parametrilor electrice (rezistența totală și reactanța totală) ai schemei echivalente a cuptorului cu arc electric au fost setate cu valori reale ale instalației tehnologice vizate. Pentru a se obține o nouă putere dorită a arcului electric se poate modifica tensiunea din secundarul transformatorului cuptorului sau se pot modifica parametrii modelului arcului electric [Pan08].

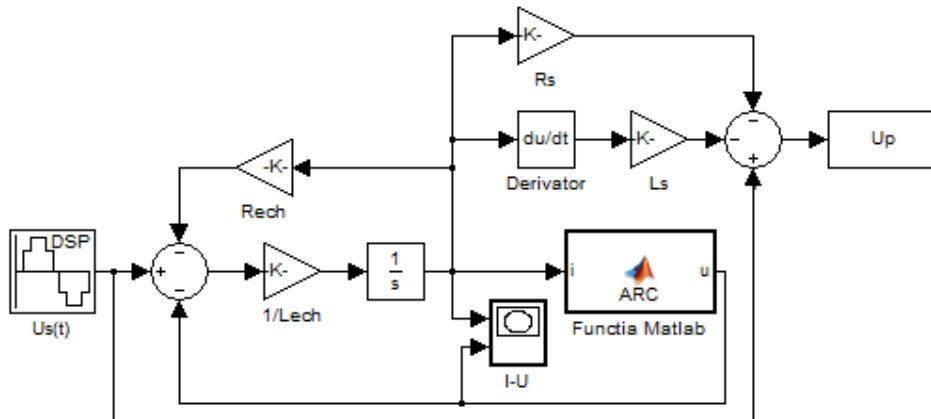


Fig.3.4. Schema Simulink implementată în Matlab/Simulink pentru simularea schemei electrice de funcționare a cuptorului cu arc electric.

În continuare vor fi descrise modelele matematice utilizate pentru a studia comportarea arcului electric de la cuptorul cu arc electric trifazat. Aceste modele sunt bazate pe diferite reprezentări ale caracteristicii curent-tensiune a arcului electric.

Modelele matematice trebuie să permită ajustarea valorilor anumitor parametri care pot fi supervizați și în cadrul instalației tehnologice reale [Pan08]. Acești parametri sunt: distanța dintre electrozii din grafit și metalul din cuptor, respectiv treapta pe care este setat transformatorul la un moment dat. În funcție de treapta de lucru a transformatorului se cunosc valorile tensiunilor din secundar, respectiv valorile maxime ale curenților din circuit (conform plăcii timbru a transformatorului). În funcție de distanța dintre electrozi și metal se obține o anumită lungime a arcului electric, aceasta influențând curentul arcului, care este același cu cel din circuit [Ghi13_3]. De asemenea, modificându-se lungimea arcului sau treapta de lucru a transformatorului cuptorului se obțin puteri diferite disipate în arcul electric.

Fiecare dintre modelele ce vor fi prezentate depind de puterea activă a sarcinii, astfel parametrii modelului depind de condițiile de lucru. În acest context, caracteristica curent-tensiune a arcului electric se poate modifica obținându-se puterea dorită [Ghi16_2]. Pentru a obține această putere, caracteristica curent-tensiune se împarte în mai multe suprafețe, fiecare având o anumită arie (în funcție de fiecare secțiune a caracteristicii) [Esf12].

3.4. Modelul liniarizat bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric

În vederea dezvoltării unor noi modele matematice s-au analizat mai multe modele matematice ce descriu comportarea arcului electric existente în literatura de specialitate. Modelul considerat în continuare stă la baza dezvoltării celorlalte modele propuse de autor.

Acest model (**MM-0**), utilizat pentru modelarea comportării arcului electric, este dat de aproximarea liniară a caracteristicii curent-tensiune a arcului electric prin trei ecuații liniare, fiecare porțiune definită de către o ecuație fiind descrisă de o

dreaptă ce are o anumită pantă. Modelul este formalizat prin relațiile (3.13), fiind descris în [Golk07] și în [Sar10].

Caracteristica curent-tensiune reală a arcului electric ilustrată în [Gol97], [Golk07], [Sar10] este prezentată în fig.3.5, fiind aproximată prin liniarizarea caracteristicii de către modelul *MM-0*. Modelul matematic descrie dependența dintre tensiunea și curentul arcului electric, $u=f(i)$.

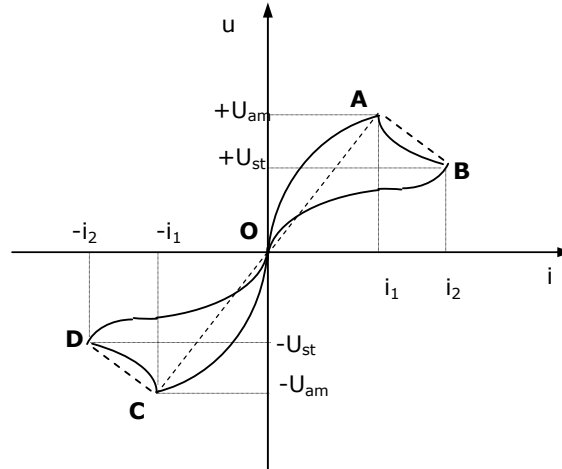


Fig.3.5. Caracteristica reală și liniarizată a arcului electric.

$$u = \begin{cases} R_1 \cdot i, & i \in [-i_1, i_1] \quad (a) \\ R_2 \cdot i + U_{am} \cdot (1 - R_2 / R_1), & i \in (i_1, i_2] \quad (b) \\ R_2 \cdot i - U_{am} \cdot (1 - R_2 / R_1), & i \in [-i_2, -i_1) \quad (c) \end{cases} \quad (3.13)$$

unde:

$$i_1 = U_{am} / R_1 \quad (3.14)$$

$$i_2 = U_{st} / R_2 - U_{am} \cdot (1 / R_2 - 1 / R_1) \quad (3.15)$$

Notățiile au următoarele semnificații:

- R_1 – panta dreptei rezultată în urma trasării liniare a caracteristicii curent-tensiune în intervalul $[-i_1, i_1]$;
- R_2 – panta dreptei rezultate în urma trasării liniare a caracteristicii curent-tensiune în intervalul $[-i_2, -i_1)$ sau $(i_1, i_2]$;
- U_{am} – tensiunea de amorsare a arcului electric;
- U_{st} – tensiunea de stingere a arcului electric;
- i_1 – valoarea curentului aferentă tensiunii U_{am} ;
- i_2 – valoarea curentului aferentă tensiunii U_{st} ;
- u – tensiunea arcului electric la un moment dat;
- i – curentul arcului electric la un moment dat.

În cadrul acestui model se disting două zone de funcționare ale arcului electric în procesul de elaborare al oțelului.

3.4 – Modelul liniarizat bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric 67

Prima zonă este cea dată de panta R_1 , în care amplitudinea tensiunii arcului electric ajunge de la $-U_{am}$ la U_{am} . În această porțiune arcul electric al cuptorului se comportă ca un rezistor, iar curentul își schimbă polaritatea de la $-i_1$ la $+i_1$.

A doua zonă este cea în care panta dreptei este dată de R_2 , zonă care corespunde procesului de topire al metalelor, iar tensiunea arcului scade de la tensiunea de amorsare la tensiunea de stingere. Astfel, curentul crește de la i_1 la i_2 pentru semialternața pozitivă a tensiunii de alimentare, respectiv scade de la $-i_1$ la $-i_2$ pentru semialternața negativă a tensiunii de alimentare [Sar10].

Valorile considerate în simulare sunt [Golk07], [Sar10]:

$$\begin{aligned} &\text{frecvența tensiunii de alimentare, } f=60 \text{ Hz,} \\ &\text{valoarea amplitudinii tensiunii de alimentare, } U_s=566 \text{ V} \\ &\text{valoarea tensiunii de amorsare a arcului electric, } U_{am}=350,75 \text{ V} \quad (3.16) \\ &\text{valoarea tensiunii de stingere a arcului electric, } U_{st}=289,75 \text{ V} \\ &\text{panta dreptei } R_1=0,05 \Omega \\ &\text{panta dreptei } R_2= -0,00076 \Omega \end{aligned}$$

Impedanțele sursei de alimentare (Z_S), respectiv a rețelei scurte (Z_{RS}) sunt date de relațiile (3.17a) și (3.17b).

$$Z_S = 0,0528 + j \cdot 0,468 \text{ m}\Omega \quad (3.17a)$$

$$Z_{RS} = 0,3366 + j \cdot 3,22 \text{ m}\Omega \quad (3.17b)$$

Relația (3.18) prezintă dependența dintre parametrul R_1 și puterea disipată în arcul electric [Var96], [Pan08]. Se observă că la creșterea valorii parametrului R_1 , puterea disipată în arcul electric scade, iar la scăderea valorii acestui parametru, puterea disipată în arcul electric crește.

$$R_1 = \frac{U_{am}^2}{(P_{arc} + \frac{U_{am}^2}{R_2} - \frac{U_{st}^2}{R_2})} \quad (3.18)$$

În fig.3.6 este prezentată caracteristica curent-tensiune a arcului electric corespunzătoare modelului [Golk07] și [Sar10], (3.13).

Se observă că tensiunea arcului electric este încadrată în intervalul $[-350, 350] \text{ V}$ și curentul arcului electric este încadrat în intervalul $[-80, 80] \text{ kA}$, caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric fiind liniară pe porțiuni și neliniară per ansamblu.

Pornind de la modelul *MM-0* s-a dezvoltat un model matematic liniarizat extins al arcului electric (**MM-LIN**) care extinde zona de funcționare [Pan12], [Ghi12], [Ghi15_1], [Ghi16_2]. În fig.3.7 este prezentată caracteristica curent-tensiune a arcului electric corespunzătoare *MM-LIN*. Culoarea verde corespunde modelului *MM-0*, iar culoarea roșie reprezintă îmbunătățirea adusă prin modelul propus.

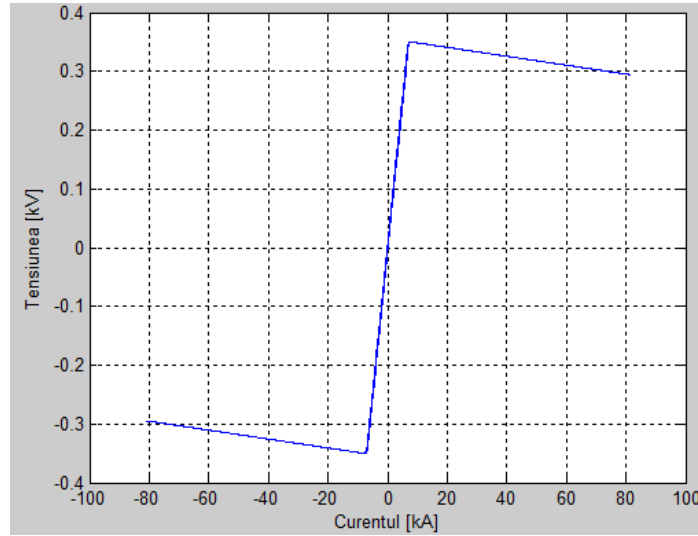


Fig.3.6. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric pentru modelul *MM-0*.

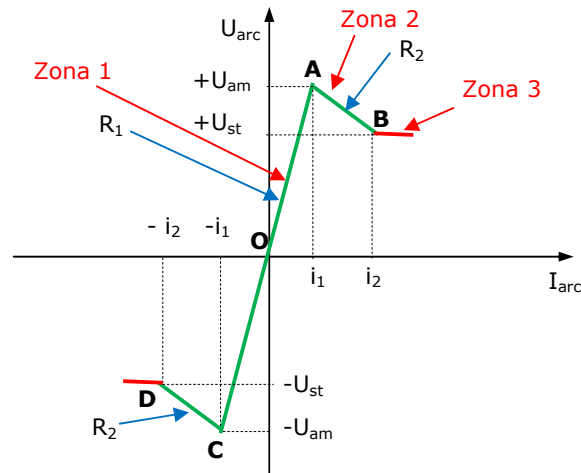


Fig.3.7. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric corespunzătoare *MM-LIN*.

În **[Pan12]** s-a prezentat o comparație între *MM-0*, respectiv modelul propus *MM-LIN*, model formalizat prin relațiile (3.19).

$$u = \begin{cases} R_1 \cdot i, & i \in [-i_1, i_1] & (a) \\ R_2 \cdot i + U_{am} \cdot (1 - R_2 / R_1), & i \in (i_1, i_2] & (b) \\ R_2 \cdot i_2 + U_{am} \cdot (1 - R_2 / R_1), & i > i_2 & (c) \\ R_2 \cdot i - U_{am} \cdot (1 - R_2 / R_1), & i \in [-i_2, -i_1] & (d) \\ R_2 \cdot (-i_2) - U_{am} \cdot (1 - R_2 / R_1), & i < -i_2 & (e) \end{cases} \quad (3.19)$$

În cadrul acestui model se disting trei zone de funcționare ale arcului electric: cele două prezentate la *MM-0*, iar cea de-a treia zonă este cea corespunzătoare valorilor curenților mai mari decât limita i_2 , respectiv mai mici decât limita $-i_2$, corespunzătoare *MM-LIN*. În această ultimă zonă se observă că tensiunea arcului electric este menținută constantă la valoarea calculată cu relația (3.19,c), dacă $i < -i_2$, expresia tensiunii arcului este calculată cu relația (3.19,e).

Pentru a se putea compara modelele *MM-0* și *MM-LIN* s-au utilizat valorile numerice (3.16). În urma simulării în *Matlab/Simulink* au rezultat caracteristicile curent-tensiune ale arcului electric prezentate în fig.3.8. Culoarea verde corespunde modelului *MM-0*, iar culoarea roșie corespunde modelului *MM-LIN*. Se observă că pentru *MM-LIN* tensiunea este menținută constantă după aproximativ 80 kA.

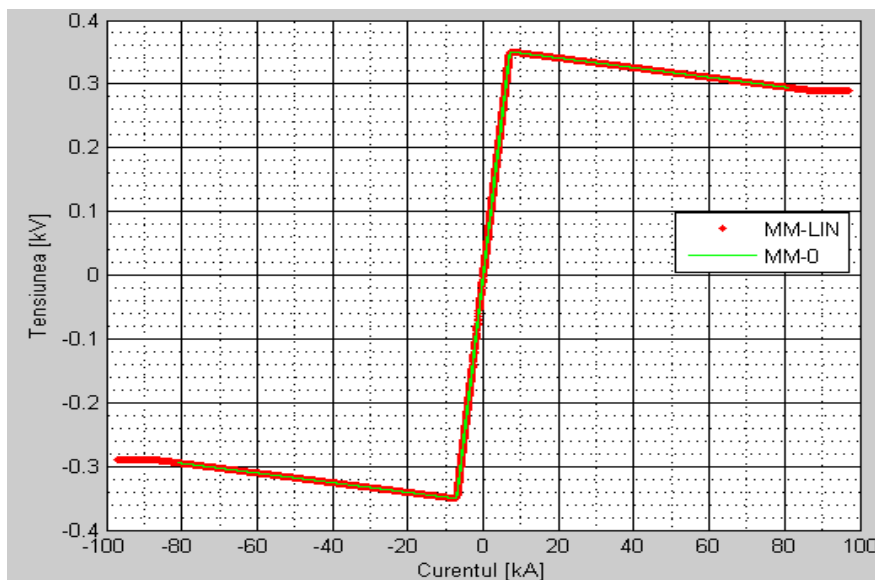


Fig.3.8. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric pentru *MM-0* și *MM-LIN*.

În fig.3.9 sunt prezentate formele de undă pentru curentul și tensiunea arcului, obținute pentru cele două modele matematice pe durata a patru perioade. Este evidențiată zona în care curentul arcului depășește limita i_2 , respectiv care este variația tensiunii arcului în această zonă.

Comparativ cu modelul *MM-0* apar următoarele diferențe:

- apare încă o zonă de funcționare a arcului electric pe fiecare semialternanță (peste valoarea i_2 , respectiv sub valoarea $-i_2$);
- în cazul în care curentul are valoarea mai mică decât $-i_2$ sau mai mare decât i_2 se observă că variația tensiunii este constantă;
- domeniul în care poate să varieze caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric este mai mare comparativ cu domeniul de variație existent la modelul *MM-0*;
- în ambele cazuri tensiunile arcului au aceeași amplitudine, diferind doar amplitudinile curenților;
- curenții și tensiunile sunt în fază în ambele cazuri.

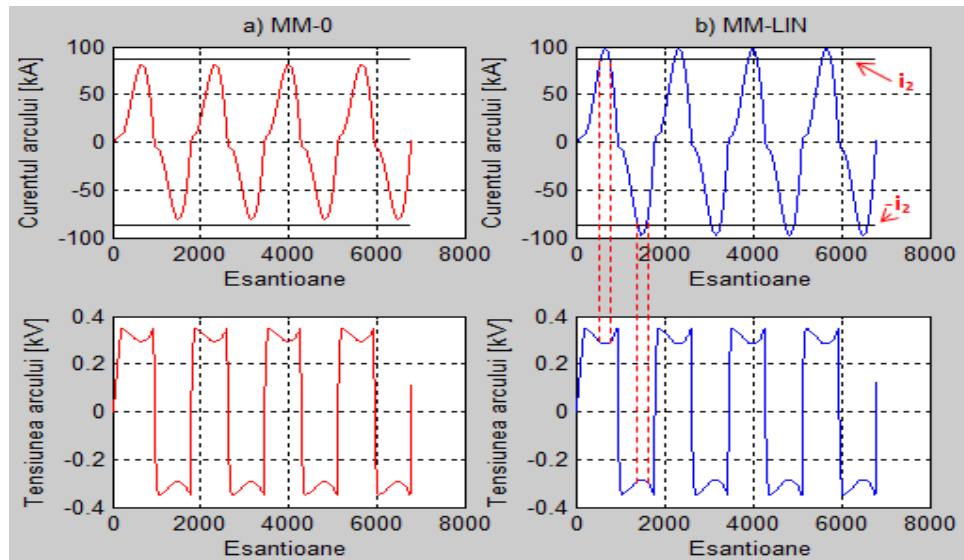


Fig.3.9. Forme de undă pentru curentul și tensiunea arcului: a) MM-0, b) MM-LIN.

3.4.1. Simularea MM-LIN cu valori reale ale instalației tehnologice

Instalația tehnologică considerată este alimentată de la un transformator care are primarul și secundarul în conexiune triunghi, având 18 trepte de conexiune în primar și puterea de 105 MVA.

Pentru a putea efectua o comparație între modelele dezvoltate de autor s-a ales valoarea 894 V ca referință pentru tensiunea de linie din secundarul transformatorului cuptorului, valoare ce corespunde treptei 16 aferentă plot-urilor transformatorului, aceasta fiind o valoare ce este utilizată în cea mai mare parte în faza tehnologică de topire a metalelor. De asemenea, pentru faza tehnologică de afânare s-a ales valoarea tensiunii de linie din secundarul transformatorului de 837 V, adică treapta 14 aferentă plăcii timbru a transformatorului cuptorului [Ghi13_3].

Relația (2.2) prezintă condiția care trebuie îndeplinită astfel încât arderea arcului să fie în regim de curent neîntrerupt [Pan08]. Conform documentației tehnice a instalației avută în vedere, valoarea medie a tensiunii arcului electric este de 340 V [***_2]. Luând în considerare relația (2.2), dar și faptul că tensiunea arcului electric are o formă de undă dreptunghiulară (fig.2.5), valoarea efectivă a tensiunii arcului electric va fi egală cu amplitudinea acesteia potrivit relației (3.20).

$$U_{arcEfectiv} = U_{arc} = 340 V \quad (3.20)$$

Analizând relația (2.3) reiese că pentru a avea curent neîntrerupt factorul de putere al instalației cuptorului trebuie să fie mai mic de 0,85. Considerând în plus și relațiile (2.2) și (3.20) rezultă că valoarea minimă a amplitudinii tensiunii de fază pentru care este obținut un curent neîntrerupt al arcului electric trebuie să fie mai mare sau egală cu 629,62 V. Această valoare corespunde unei tensiuni minime de linie în secundarul transformatorului de medie tensiune de 771,12 V, valoare regăsită în placa timbru a transformatorului cuptorului, care a fost prezentată în

3.4 – Modelul liniarizat bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric 71

tabelul 2.1. De asemenea, în funcție de puterea disipată în arcul electric, valoarea medie a rezistenței arcului electric pe o fază [Pan07_1] este obținută cu relația (3.21).

$$R_{arc} = R_{medie} = \frac{3 \cdot U_{arc}^2}{P_{arc}} \quad (3.21)$$

Pentru a dezvolta modele matematice care să poată fi utilizate ulterior în strategii de conducere este necesar ca aceste modele să ofere posibilitatea de a regla puterea disipată în arcul electric. Analizând relația (3.21) se poate deduce că puterea arcului este influențată de amplitudinea tensiunii arcului electric, respectiv de valoarea rezistenței medii echivalente a arcului [Pan08], acestea însă nefiind singurele variante de reglare a puterii arcului.

Validarea modelelor matematice este realizată prin compararea valorilor tensiunii din punctul de măsură P din secundarul transformatorului și al curentului arcului (fig.3.3) obținute prin simulare cu valorile achiziționate de la instalația tehnologică reală, cuptorul cu arc electric de tip EBT de 120 de tone de la SC ArcelorMittal Hunedoara SA. În simulare s-au utilizat valorile parametrilor de circuit corespunzătoare cuptorului cu arc electric avut în vedere, (3.22a). Măsurătorile din cadrul instalației cuptorului cu arc electric trifazat au fost prezentate în paragraful 3.2.

Parametrii de circuit ai schemei de alimentare a cuptorului real sunt următorii [***_0]:

frecvența rețelei de alimentare, $f=50$ Hz;
rezistența electrică echivalentă pe fiecare fază a rețelei scurte, $R_{ech}=0,47$ mΩ;
reactanța electrică echivalentă pe fiecare fază a rețelei scurte, $X_{ech}=5,5$ mΩ;
tensiunea din secundarul transformatorului, U_s , poate varia în domeniul [550; 960] V (tabelul 2.1).
(3.22a)

Observație: Aceste valori ale parametrilor de circuit ai schemei de alimentare a cuptorului real sunt utilizate în cadrul tuturor simulărilor referitoare la modelele matematice propuse. Pentru analiza influenței parametrilor modelelor asupra parametrilor electrici ai arcului este utilizată valoarea tensiunii de linie $U_{sLinie}=894$ V în secundarul transformatorului, corespunzătoare unei amplitudini a tensiunii de fază, $U_{sFAZA}=729,94$ V, relația 3.22b).

$$U_{sFAZA} = \frac{U_{sLINIE}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \quad (3.22b)$$

În [Mon94] este prezentată dependența dintre lungimea arcului și tensiunea de stingere a arcului electric, relația (3.23).

$$U_{st} = A + B \cdot L_{arc} \quad (3.23)$$

În care: A este o constantă ce are valoarea egală cu suma căderilor de tensiune anodică și catodică, $A \cong 40$ V, iar B este căderea de tensiune pe unitatea de lungime a arcului, $B \cong 10$ V/cm.

În cadrul simulărilor efectuate pe diversele modele propuse s-au ales aceleași valori ale tensiunilor de amorsare și de stingere pentru cele două semiperioade ale tensiunii de alimentare. Valorile inițiale ale parametrilor R_1 și R_2 , au fost alese pe baza datelor din literatură [Golk07], [Sar10], R_2 fiind negativă datorită faptului că segmentul AB (fig.3.5) are pantă negativă [Pan08].

3.4.2. Analiza influenței parametrilor modelului MM-LIN asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric

În cadrul analizei efectuate, amplitudinea tensiunii din secundarul transformatorului, respectiv valorile parametrilor schemei electrice de alimentare a cuptorului cu arc electric sunt menținute practic constante, modificându-se doar valorile parametrilor modelului matematic.

Pentru o implementare mai eficientă a scenariilor de simulare s-a conceput în *Matlab* o interfață grafică utilizator ilustrată în fig.3.10, [Pan12]. Parametrii modelului au fost setați cu valori regăsite în literatura de specialitate respectiv cu cei din documentația tehnică a cuptorului, ulterior fiind modificați pe rând într-un anumit domeniu stabilit astfel încât să se obțină o caracteristică curent-tensiune care să urmărească caracteristica reală.

În cazul tuturor modelelor propuse, tensiunea de amorsare a arcului electric este obținută utilizând relația (3.24), conform documentației tehnice [***_2] a instalației tehnologice avută în vedere.

$$U_{am} = U_{st} + 50 \quad (3.24)$$

Parametrii modelului MM-LIN sunt: panta R_1 , panta R_2 , respectiv lungimea arcului, L_{arc} . Așadar, interfața grafică conține 3 butoane de tip *slider* care îi permit utilizatorului să modifice în orice moment valoarea parametrilor modelului, aceștia putând varia pe anumite intervale: $R_1 \in [0; 0,1] \Omega$, $R_2 \in [-0,002; -0,00001] \Omega$ și $L_{arc} \in [0; 60] \text{ cm}$.

De asemenea, interfața mai conține 6 butoane care îi permit utilizatorului aplicației să interacționeze în desfășurarea simulării modelului. Butonul *Incarca modelul* are rolul de a deschide fișierul ce conține modelul matematic implementat în *Matlab/Simulink*. Butonul *Simulare* lansează în execuție aplicația și poate fi acționat doar după ce s-a încărcat fișierul în memoria programului. Butonul *Pauza* are rolul de a opri pentru un interval de timp aplicația ce este în stare de rulare, iar butonul *Continua* are rolul de a permite reluarea execuției aplicației ce a fost oprită temporar. Butonul *Stop Simulare* permite oprirea din execuție a aplicației, iar butonul *Exit* închide interfața *Matlab* care este lansată în execuție.

Fig.3.11 prezintă schema *Simulink* echivalentă schemei electrice de funcționare a cuptorului cu arc electric, utilizată pentru a realiza conexiunea dintre modelul arcului și interfața grafică. În această diagramă *Functia Matlab* reprezintă implementarea de către autor a modelului matematic ce simulează comportamentul arcului electric.

În fig.3.12 este ilustrată caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric pentru modelul MM-LIN (3.19), caracteristică obținută prin utilizarea următoarelor valori: panta segmentului OA (fig 3.7), $R_1=0,05$, lungimea arcului, $L_{arc}=30 \text{ cm}$, panta segmentului AB , $R_2=-0,00076$.

3.4 – Modelul liniarizat bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric 73

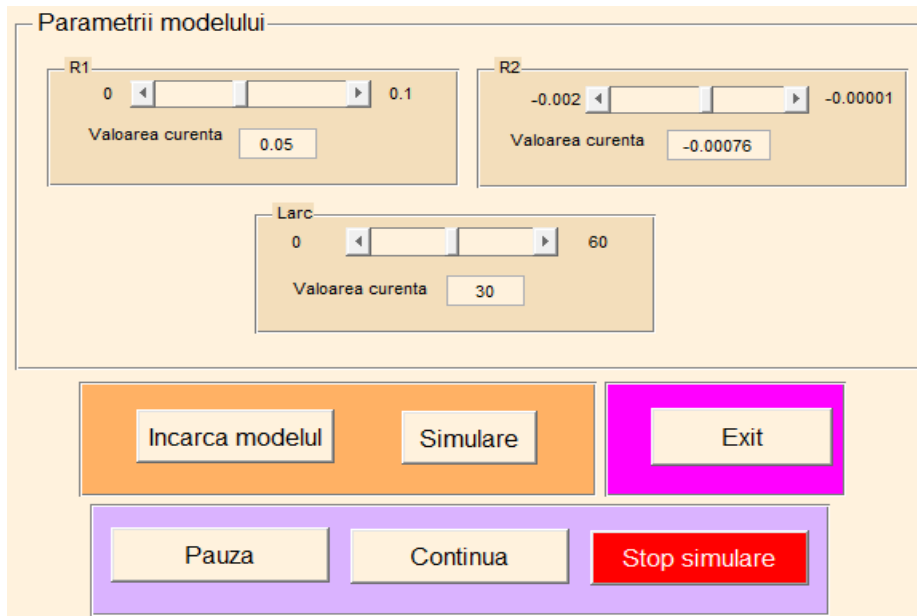


Fig.3.10. Interfața grafică utilizator pentru simularea MM-LIN.

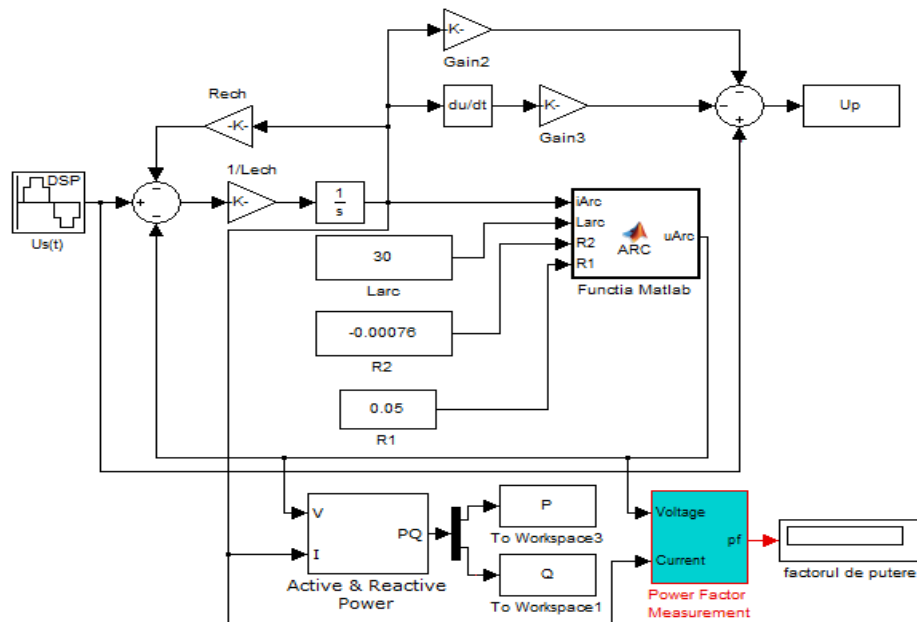


Fig.3.11. Schema Simulink corespunzătoare implementării MM-LIN.

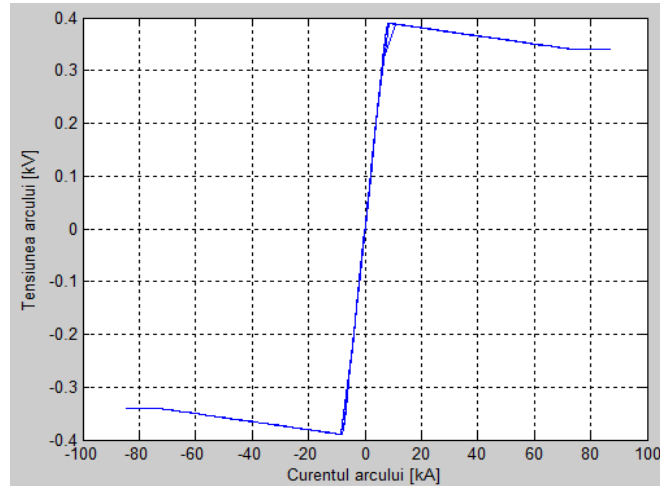


Fig.3.12. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric.

În vederea studierii influenței fiecărui parametru al modelului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului, valorile fiecărui parametru au fost modificate într-un anumit domeniu prestabilit (obținut în funcție de numeroase teste). Toate variațiile parametrilor sunt efectuate pentru o tensiune constantă în secundarul transformatorului cuptorului. De asemenea, la modificarea unuia dintre parametrii modelului, ceilalți sunt menținuți constanți, pentru a analiza influența fiecăruia dintre aceștia asupra parametrilor electrici ai arcului. Valorile parametrilor sunt modificate astfel încât pe parcursul a 2000 de eșantioane să fie regăsite valori aferente întregului domeniu de variație al parametrilor.

3.4.2.1. Modificarea parametrului R_1

În fig.3.13a) este ilustrată variația parametrului R_1 , între valorile $0,01 \Omega$ și $0,09 \Omega$, valori rezultate în urma necesității de a reda corect caracteristica curent-tensiune a arcului și formele de undă pentru curentul și tensiunea arcului. În fig.3.13b) sunt prezentate variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului electric în funcție de valorile parametrului R_1 . Se constată că la creșterea valorii acestui parametru, are loc scăderea puterii active a arcului, respectiv creșterea puterii reactive, ceea ce corespunde și relației (3.18).

În fig.3.14a) este reprezentată caracteristica curent-tensiune a arcului pentru variații ale parametrului R_1 . La scăderea valorii parametrului R_1 se obține o înclinație mai mare a pantei drepte, respectiv un curent mai mare, iar în cazul în care valoarea parametrului crește, se obține o înclinație mai mică a pantei drepte.

În fig.3.14b) este reprezentată caracteristica curent-tensiune a cuptorului obținută prin reprezentarea tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului, U_p , în funcție de curentul arcului electric, pentru aceeași variație a parametrului R_1 .

În fig.3.15 sunt prezentate variațiile curentului și tensiunii arcului în funcție de variația parametrului R_1 prezentată în fig.3.13a). Se poate observa că amplitudinea curentului arcului electric scade în cazul în care parametrul R_1 crește. În același timp, se poate observa că acest parametru nu are o influență sesizabilă asupra tensiunii arcului electric.

3.4 – Modelul liniarizat bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric 75

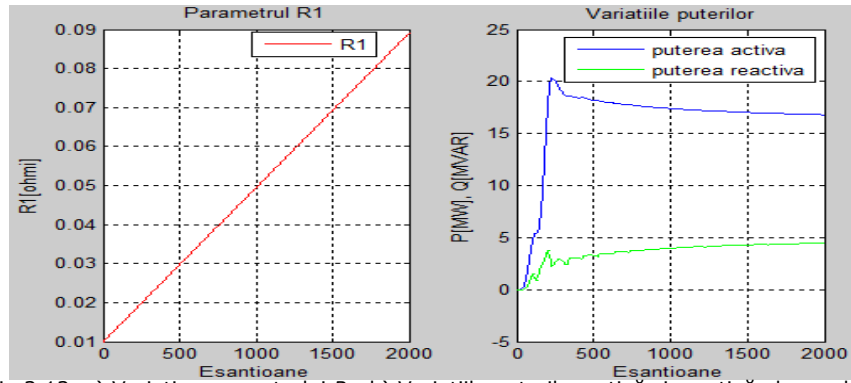


Fig.3.13. a) Variația parametrului R_1 , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.

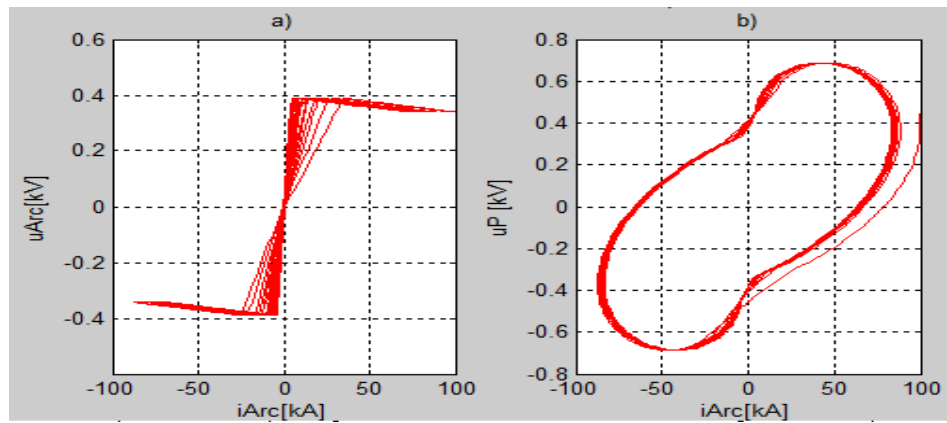


Fig.3.14. Caracteristica curent-tensiune: a) a arcului electric, b) a cuptorului.

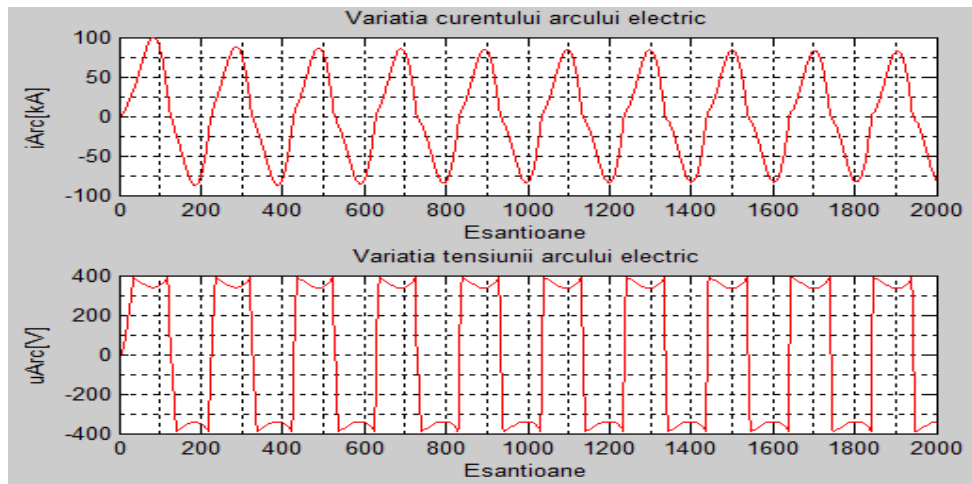


Fig.3.15. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

Modificarea parametrului R_2

În fig.3.16a) este ilustrată variația parametrului R_2 în mod similar cazului precedent (cu o variație între valorile $-0,001 \Omega$ și $-0,0001 \Omega$). În fig.3.16b) sunt prezentate variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului electric în funcție de variația parametrului R_2 , constatându-se că acest parametru nu are o influență semnificativă asupra puterilor activă și reactivă ale arcului electric.

Fig.3.17 prezintă caracteristicile curent-tensiune ale arcului. Se observă că și în acest caz la o valoare mai mare a parametrului R_2 se obține o înclinație mai mică a pantei dreptei, iar în cazul în care valoarea parametrului R_2 scade, se obține o înclinație mai mare a pantei dreptei. Fig.3.17b) prezintă caracteristica curent-tensiune a cuptorului pentru variația parametrului R_2 .

În fig.3.18 sunt prezentate variațiile curentului și tensiunii arcului în funcție de valorile parametrului R_2 . Se poate observa că în cazul unei valori mai mari ale acestui parametru, amplitudinea curentului este mai mică, iar tensiunea arcului electric are o formă de undă dreptunghiulară, dar nu se mai identifică tensiunea de amorsare a arcului. În cazul scăderii valorii lui R_2 se obține un curent mai mare, tensiunea arcului având aceeași amplitudine.

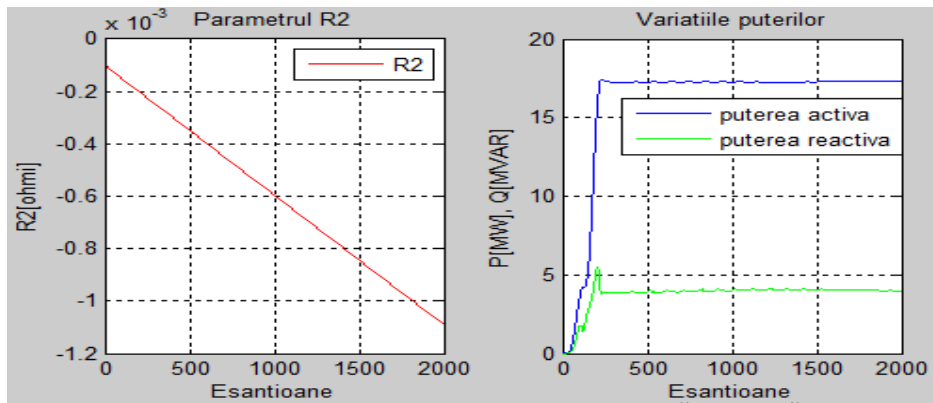


Fig.3.16. a) Variația parametrului R_2 , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.

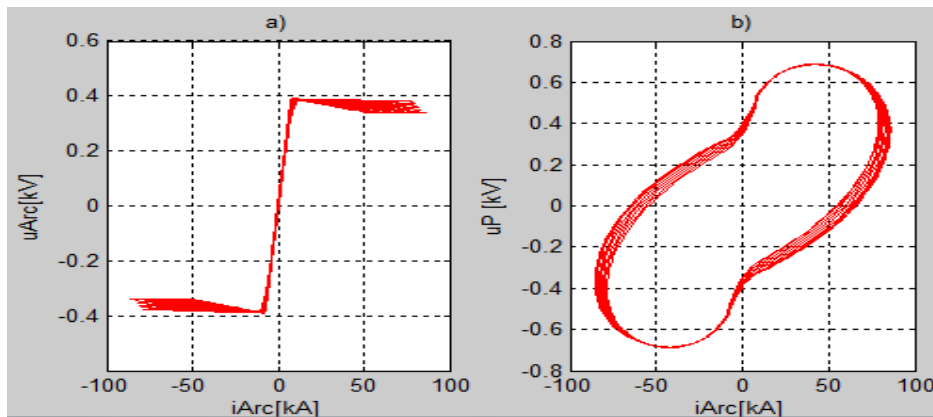


Fig.3.17. Caracteristica curent-tensiune: a) a arcului electric, b) a cuptorului.

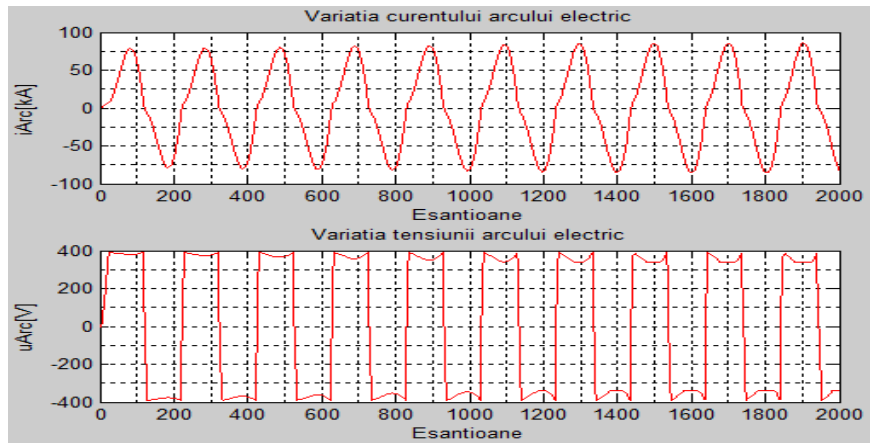


Fig.3.18. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

3.4.2.2. Modificarea lungimii arcului electric, L_{arc}

Pentru a analiza influența lungimii arcului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric, s-a ales un domeniu de variație între 0 și 60 cm (fig.3.19a)). În fig.3.19b) sunt prezentate variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului în funcție de lungimea arcului. Se observă că la creșterea lungimii de arc are loc o creștere a ambelor puteri disipate în arcul electric până la o valoare maximă (la 1000 de eșantioane), apoi are loc o scădere a puterilor arcului. În cazul unei lungimi de arc care este prea mică, arcul electric nu este format, astfel puterea este mică. De asemenea, în cazul în care lungimea arcului este prea mare, se constată că puterea arcului scade deoarece are loc o funcționare a arcului în zona de curent întrerupt, deci apare o funcționare instabilă a cuptorului, puterea maximă a arcului obținându-se pentru o lungime de arc optimă de 30 cm. De asemenea, o anumită putere a arcului care este sub valoarea maximă, se poate obține în două cazuri: la o valoare a arcului sub 30 cm, respectiv la o valoare peste 30 cm. Este indicat să se lucreze cu primul caz deoarece în al doilea caz arcul electric se poate întrerupe și ar trebui reamorsat.

În fig.3.20 sunt ilustrate caracteristicile obținute în urma variațiilor lungimii de arc și anume: caracteristica curent-tensiune a arcului electric și cea a cuptorului.

Fig.3.21 prezintă formele de variație ale curentului și tensiunii arcului electric în funcție de variația lui L_{arc} . Se poate constata că în cazul creșterii lungimii de arc (o distanță mai mare între electrozi și metalul de topit) are loc o scădere a curentului arcului, respectiv o creștere a tensiunii. În caz de scurtcircuit, când electrozii sunt atinși de masa metalică, curentul este maxim iar tensiunea de pe arc este foarte mică. Pentru $L_{arc}=35$ de cm se poate constata că tensiunea nu mai are o formă de undă dreptunghiulară, iar curentul se regăsește în regimul de curent întrerupt, situație care trebuie evitată. De asemenea se poate observa că odată cu modificarea lui L_{arc} tensiunea și curentul arcului sunt în continuare în fază.

La modificarea lungimii arcului se modifică în mod corespunzător și tensiunea de stingere a arcului conform relației (3.23).

În funcție de variațiile tensiunii, curentului și puterii active ale arcului electric s-au ales valorile $R_1=0,05 \Omega$, $R_2=-0,00076 \Omega$ și $L_{arc}=30$ cm, deoarece curentul se regăsește în regimul de curent neîntrerupt, tensiunea are o formă de undă care poate fi aproximată cu o formă dreptunghiulară, este evidențiată

tensiunea de amorsare a arcului, iar puterea activă disipată în arcul electric este maximă.

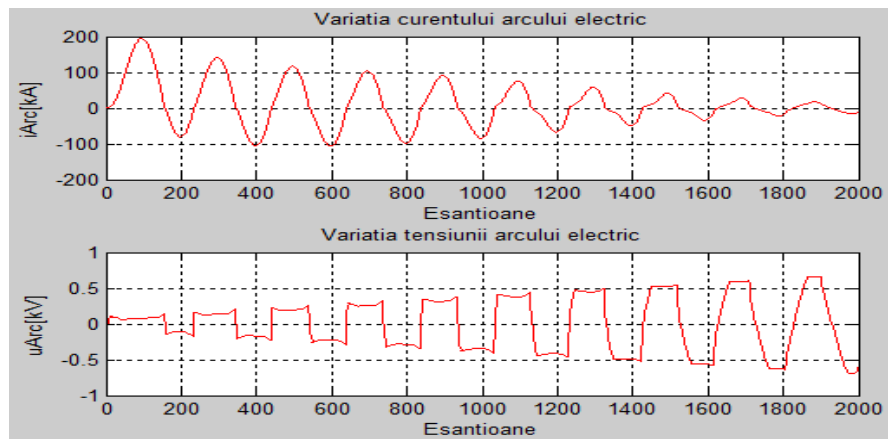
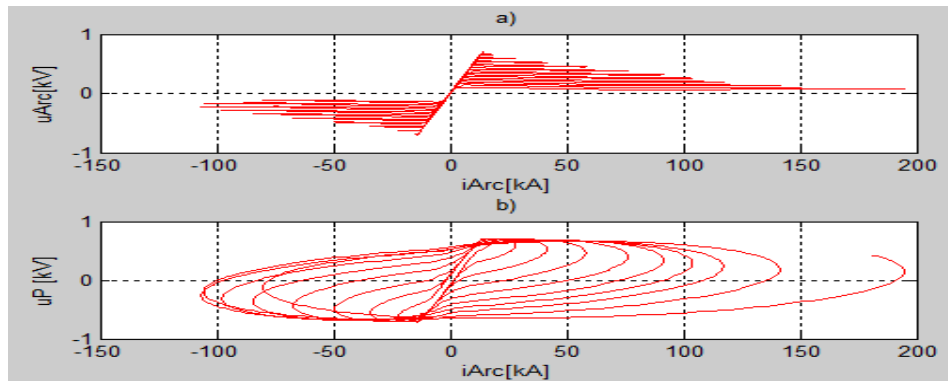
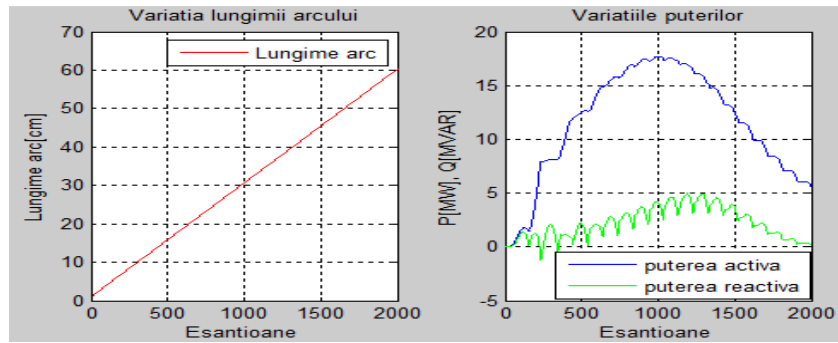


Fig.3.21. Formele de undă ale curentului și tensiunii arcului electric la modificarea lungimii arcului.

3.4.3. Influența tensiunii din secundarul transformatorului, U_s , asupra tensiunii, curentului și puterii arcului

În fig.3.22 sunt prezentate formele de undă pentru o fază ale tensiunilor din punctul de măsură din secundarul transformatorului (vezi fig.3.3), în funcție de cinci trepte de tensiune din secundarul transformatorului: 960 V (treapta 18), 925 V (treapta 17), 894 V (treapta 16), 864 V (treapta 15) și 837 V (treapta 14). S-au ales aceste valori având în vedere că acestea sunt utilizate în cazul instalației reale pentru a se realiza topirea metalelor din cuptor. În vederea obținerii acestor forme de undă este utilizat MM-LIN în care parametrii modelului sunt menținuți constanți la valorile: $R_1=0,05 \Omega$, $R_2=-0,00076 \Omega$ și $L_{arc}=30 \text{ cm}$. De obicei se utilizează trecerea de pe o treaptă de tensiune pe alta când se trece de la o fază tehnologică la alta, cu scopul de a se obține o altă putere a arcului. În cadrul aceleiași faze tehnologice se utilizează modificarea poziției electrozilor pentru a se obține o altă putere a arcului [***_2].

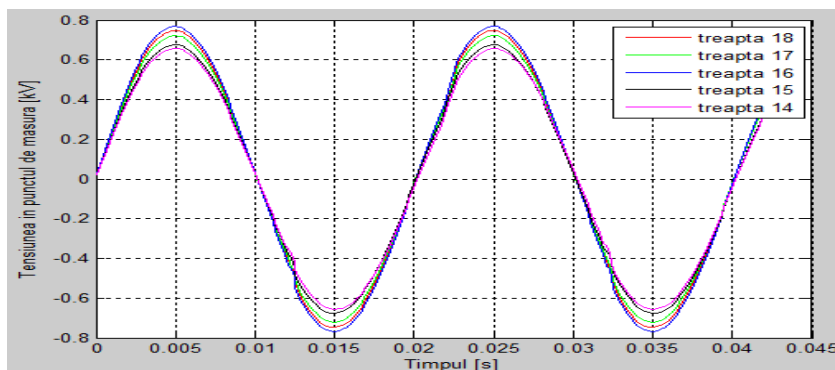


Fig.3.22. Forme de undă ale tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului la valori diferite în secundarul transformatorului.

În fig.3.23a) sunt prezentate formele de undă pentru curentul arcului utilizând MM-LIN, obținute în funcție de cele cinci trepte de tensiune menționate din secundarul transformatorului. Atât parametrii de circuit cât și parametrii MM rămân nemodificați pe parcursul schimbării treptei de tensiune pe care operează transformatorul cuptorului. Se poate constata că în cazul unei valori mari ale lui U_s se obține un curent mai mare, iar dacă U_s este mai mică și curentul este mai mic. Aceste observații sunt valabile în cazul în care U_{st} are aceeași valoare pentru toate treptele ale lui U_s . Forma de variație a curentilor este aproximativ sinusoidală. În fig.3.23b) sunt prezentate variațiile tensiunii arcului, U_{arc} , obținute în funcție de cele cinci trepte de tensiune ale lui U_s . Se constată că indiferent de treapta de tensiune pe care lucrează transformatorul se obține aceeași variație a tensiunii arcului, deoarece s-a ales aceeași tensiune de stingere pentru toate valorile tensiunii din secundar. Forma tensiunilor arcului este aproximativ dreptunghiulară.

În fig.3.24a) sunt ilustrate caracteristicile curent-tensiune ale arcului electric obținute în funcție de cele cinci trepte de tensiune ale transformatorului cuptorului. Aceste caracteristici au fost obținute prin reprezentarea tensiunii arcului în funcție de curent. Caracteristicile sunt neliniare per ansamblu, dar liniare pe anumite porțiuni. Fig.3.24b) prezintă caracteristica curent-tensiune a cuptorului, obținută prin reprezentarea tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului în funcție de curentul din circuit.

În fig.3.25a) este prezentată puterea activă a arcului obținută în funcție de treapta de tensiune pe care poate opera transformatorul cuptorului. Se poate constata că în cazul unei tensiuni mai mari din secundar, se obține o putere activă mai mare a arcului. În fig.3.25b) sunt prezentate puterile reactive ale arcului obținute în funcție de treapta de tensiune pe care poate opera transformatorul. Se poate constata că în cazul unei tensiuni mai mari din secundar, se obține o putere reactivă mai mare a arcului, dar diferențele dintre acestea sunt relativ mici. Puterea activă maximă disipată în arcul electric obținută pentru MM-LIN este de 21 MW.

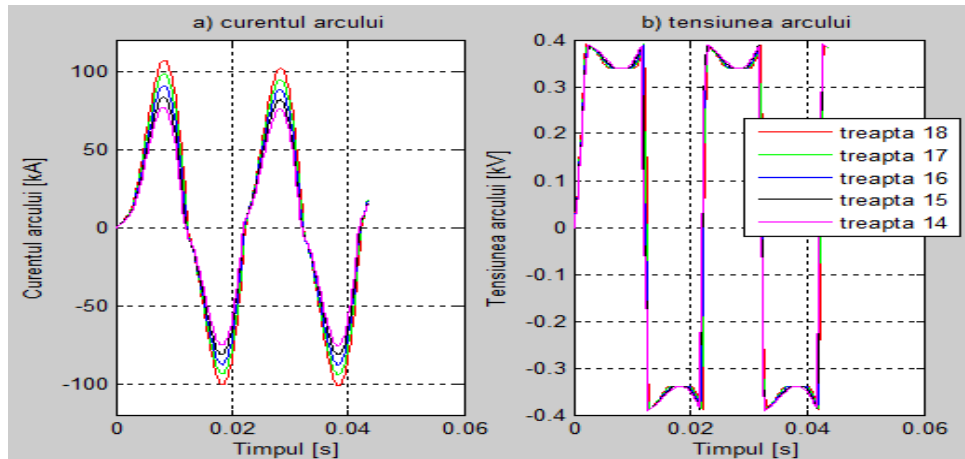


Fig.3.23. Forme de undă la modificarea tensiunii de alimentare pentru a) curentul arcului electric, b) tensiunea arcului electric.

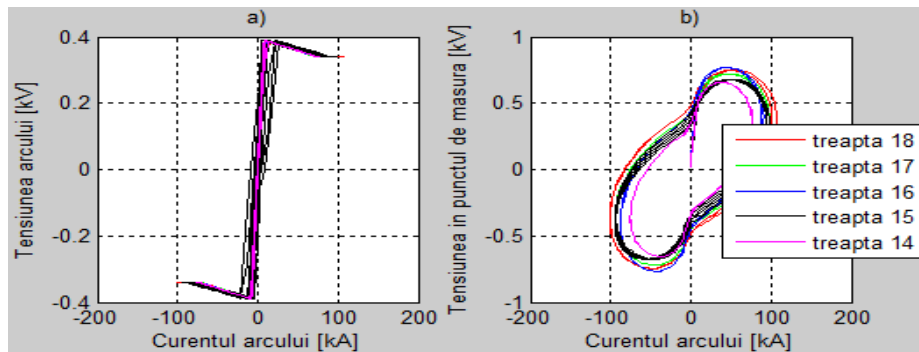


Fig.3.24. Caracteristica curent-tensiune la modificarea tensiunii de alimentare a) arcului, b) a cuptorului.

3.4.4. Validarea MM-LIN

Pentru a se valida MM-LIN, se compară rezultatele obținute din simulare cu cele achiziționate de la instalația tehnologică reală. În cazul simulărilor se consideră că lungimea medie a arcului este aceeași atât în faza de topire cât și în faza de afânare. În acest context, curenții arcului electric aferenți celor două faze tehnologice vor avea amplitudini diferite, iar tensiunea arcului va avea aceeași amplitudine pentru tensiuni diferite din secundarul transformatorului cuptorului.

Astfel se obțin puteri diferite cu care poate opera cuptorul în funcție de faza tehnologică de elaborare a metalelor.

În fig.3.26a) este ilustrată forma de undă a tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului utilizată în cele două faze tehnologice din cadrul simulărilor. În faza de topire este necesară o tensiune mai mare în secundarul transformatorului, deoarece este necesară obținerea unei puteri mai mari cu care să funcționeze sarcina. Conform documentației tehnice a instalației considerate, tensiunea de linie din secundarul transformatorului are valoarea (în cea mai mare parte a timpului) de 894 V în faza de topire și 837 V în faza de afânare. Așadar, amplitudinea tensiunii pentru o fază a tensiunii de alimentare este de 729,9 V în faza de topire și de 683,4 V în faza de afânare. În fig. 3.26b) sunt prezentate formele de undă ale tensiunii arcului obținute în cadrul simulărilor [Ghi12] pentru cele două faze tehnologice.

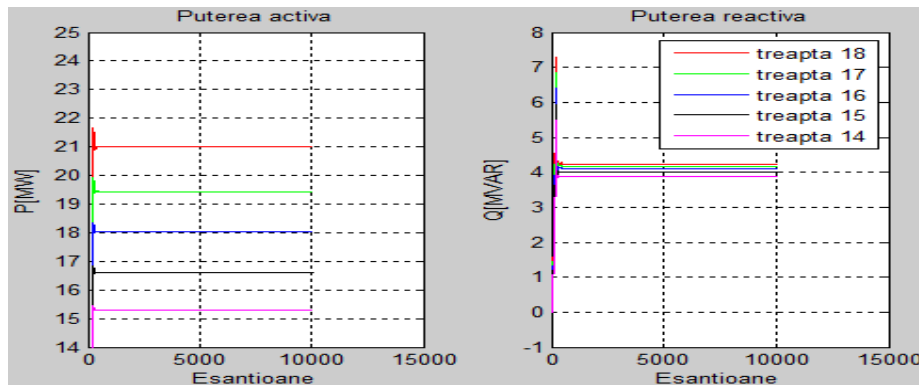


Fig.3.25. Variația puterilor în funcție de treptele de tensiune din secundarul transformatorului.

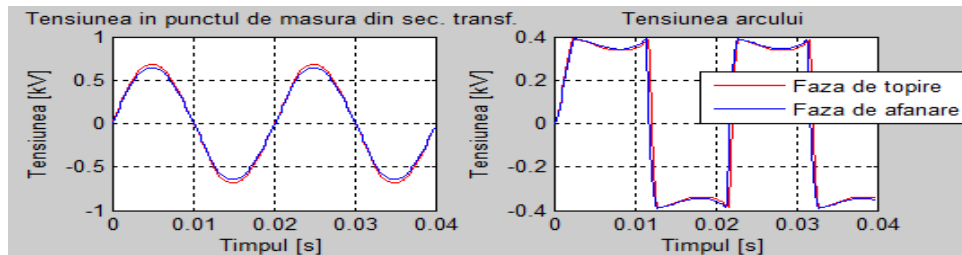


Fig.3.26. Forme de undă obținute pentru faza de topire și cea de afânare pentru: a) tensiunea din punctul de măsură din secundarul transformatorului, b) tensiunea arcului electric.

În fig.3.27 sunt prezentate variațiile tensiunilor obținute prin simulare, respectiv prin achiziționare de la cuptorul cu arc electric trifazat real pentru cele două faze tehnologice. Se observă că formele graficelor sunt apropiate ca valoare și ca variație, dar cea măsurată de la instalația reală este deformată în faza de topire a metalelor deoarece există diferite perturbații care apar în proces, rezultând lungimi de arc diferite. În cazul real apare fenomenul de surpare a metalelor în timpul apariției masei lichide a metalului, ceea ce conduce la configurații diferite ale metalelor în cuva cuptorului. În faza tehnologică de afânare se poate constata că

tensiunea măsurată nu mai este atât de deformată, deșeurile metalice fiind transformate în lichid.

În fig.3.28 sunt prezentate variațiile curenților măsurați de la instalația reală și cei simulați pentru ambele faze tehnologice de elaborare ale oțelului. Se poate constata că valorile sunt apropiate ca amplitudine, dar și ca formă de undă.

În fig.3.29 sunt prezentate caracteristicile curent-tensiune ale cuptorului care sunt obținute în fazele tehnologice de topire și de afânare, luând în considerare tensiunea din punctul de măsură din secundarul transformatorului și curentul arcului [Cha08], [Cha10]. Se poate constata că aceste caracteristici sunt apropiate ca formă de variație, obținându-se în același timp și fenomenul de histerază. În prima fază tehnologică se obține o caracteristică mai apropiată de cea reală.

În fig.3.30 sunt prezentate caracteristicile curent-tensiune ale arcului electric. Din această reprezentare se poate concluda că amplitudinea curentului arcului este mai mare în faza tehnologică de topire, comparativ cu faza de afânare, tensiunile au aceeași amplitudine, iar caracteristica are o variație puternic neliniară, putând fi liniarizată doar pe porțiuni.

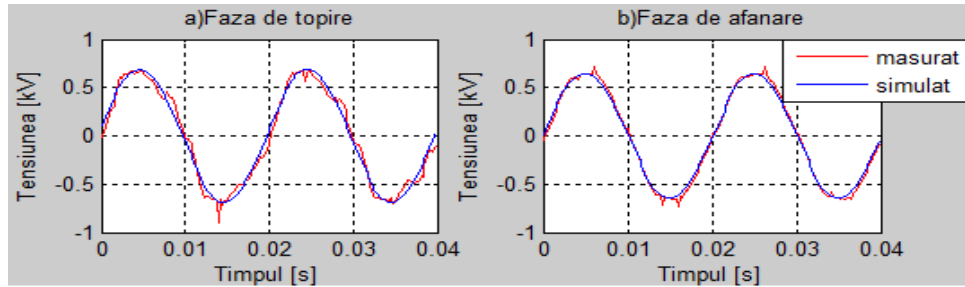


Fig.3.27. Forme de undă pentru tensiunea măsurată și simulată în cele două faze tehnologice.

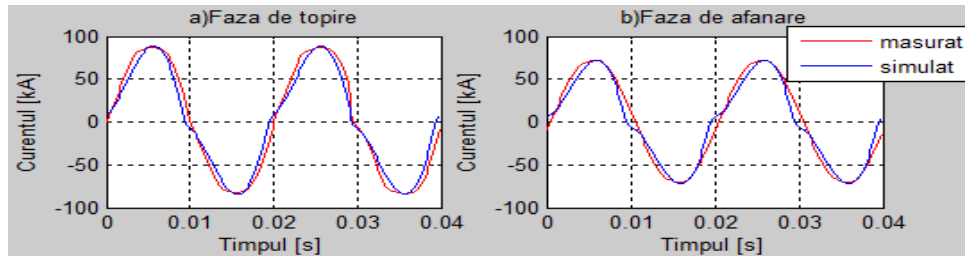


Fig.3.28. Forme de undă pentru curentul măsurat și simulat în cele două faze tehnologice.

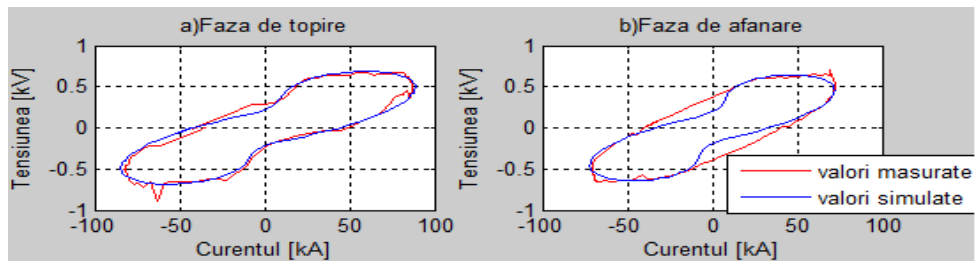


Fig.3.29. Caracteristica curent-tensiune pentru cele două faze tehnologice (tensiune din punctul de măsură din secundarul transformatorului).

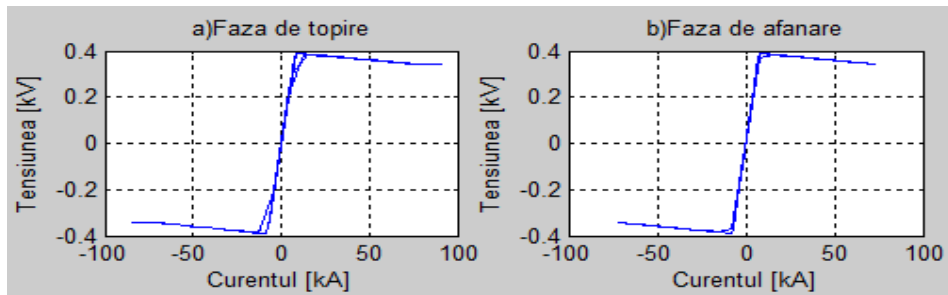


Fig.3.30. Caracteristica curent-tensiune pentru cele două faze tehnologice (tensiunea arcului electric).

Concluzii:

În urma simulărilor se pot formula următoarele concluzii referitoare la modelul MM-LIN propus:

- permite obținerea unei caracteristici curent-tensiune a cărei formă este echivalentă cu cea regăsită în literatura de specialitate;
- permite obținerea de puteri diferite necesare diverselor faze tehnologice;
- permite introducerea de perturbații care să reproducă cazul real (la lungimea arcului);
- permite obținerea fenomenului de histereză;
- permite evidențierea parametrilor care sunt supervizați în cazul instalației tehnologice reale;
- permite lucrul cu lungimi de arc diferite;
- modelul poate fi folosit în simularea ambelor faze tehnologice de elaborare ale deșeurilor metalice;
- puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime de arc de 30 cm;
- poate fi utilizat în sinteza structurilor de conducere.

3.5. Modelul exponențial bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului electric (*MM-EXP1*)

Modelul exponențial *MM-EXP1* aproximează mai corect caracteristica curent-tensiune a arcului electric deoarece aceasta este descrisă mai detaliat, existând mai multe zone de funcționare printre care și o zonă ce are o variație exponențială. *MM-EXP1* propus, relațiile (3.25), reprezintă o dezvoltare a modelului prezentat în [Gol07], [Sar10], putându-se distinge cinci zone de funcționare ale arcului electric, regăsite în fig.3.31 în care este ilustrată caracteristica curent-tensiune a arcului electric [Ghi13_2], [Ghi16_1], [Ghi16_4].

Notațiile au următoarele semnificații:

- U_{am} este tensiunea de amorsare a arcului electric;
- U_{st} este tensiunea de stingere a arcului electric;
- U_m este tensiunea ce se obține ca medie aritmetică între tensiunea de amorsare și cea de stingere;
- i_1 și $-i_1$ sunt valori ale curenților ce corespund valorilor tensiunilor de stingere ale arcului electric pe fiecare semialternanță;
- i_2 și $-i_2$ sunt valori ale curenților ce corespund valorilor tensiunilor de amorsare ale arcului electric pe fiecare semialternanță;

- i_3 și $-i_3$ sunt valori ale curenților ce corespund valorilor tensiunilor U_m ale arcului electric pe fiecare semialternanță;
- i_4 și $-i_4$ – valoarea curentului arcului regăsită la intersecția celor două drepte date de pantele R_2 și R_3 , din reprezentarea caracteristicii curent-tensiune;
- R_1 este panta dreptei cuprinsă între $-i_2$ și i_2 ;
- R_2 este panta dreptei pentru valori ale curentului mai mari decât i_3 , respectiv mai mici decât $-i_3$;
- R_3 este panta dreptei pentru valori ale curentului mai mari decât i_1 , panta descendentă, respectiv mai mici decât $-i_1$, panta ascendentă;
- u – tensiunea arcului electric la un moment dat;
- i – curentul arcului electric la un moment dat.

$$u = \begin{cases} -U_{st} + (i_1 - i_4) \cdot R_3, & i < -i_4 \text{ si } di/dt \geq 0 \\ & \text{sau } i < -i_4 \text{ si } di/dt < 0 \\ -U_{st} + (i + i_1) \cdot R_3, & i \in [-i_4, -i_1) \text{ si } di/dt \geq 0 \\ R_1 \cdot i, & i \in [-i_1, i_2) \text{ si } di/dt \geq 0 \\ & \text{sau } i \in [-i_3, i_1) \text{ si } di/dt < 0 \\ U_{st} + (U_{am} - U_{st}) \cdot e^{(i_2 - i)/i_3} & i \in [i_2, i_3) \text{ si } di/dt \geq 0 \\ U_m + (i - i_3) \cdot R_2 & i \in [i_3, i_4] \text{ si } di/dt \geq 0 \\ U_{st} + (i_4 - i_1) \cdot R_3 & i > i_4 \text{ si } di/dt \geq 0 \\ & \text{sau } i > i_4 \text{ si } di/dt < 0 \\ U_{st} + (i - i_1) \cdot R_3 & i \in [i_1, i_4] \text{ si } di/dt < 0 \\ -U_{st} + (U_{st} - U_{am}) \cdot e^{(i_2 + i)/i_3} & i \in [-i_3, -i_2] \text{ si } di/dt < 0 \\ -U_m + (i + i_3) \cdot R_2 & i \in [-i_4, -i_3] \text{ si } di/dt < 0 \end{cases} \quad (3.25)$$

unde:

$$i_1 = U_{st} / R_1 \quad (3.26)$$

$$i_2 = U_{am} / R_1 \quad (3.27)$$

$$i_3 = 2 \cdot i_2 \quad (3.28)$$

$$U_m = (U_{am} + U_{st}) / 2 \quad (3.29)$$

$$i_4 = (U_m - U_{st} + i_1 \cdot R_3 - i_3 \cdot R_2) / (R_3 - R_2) \quad (3.30)$$

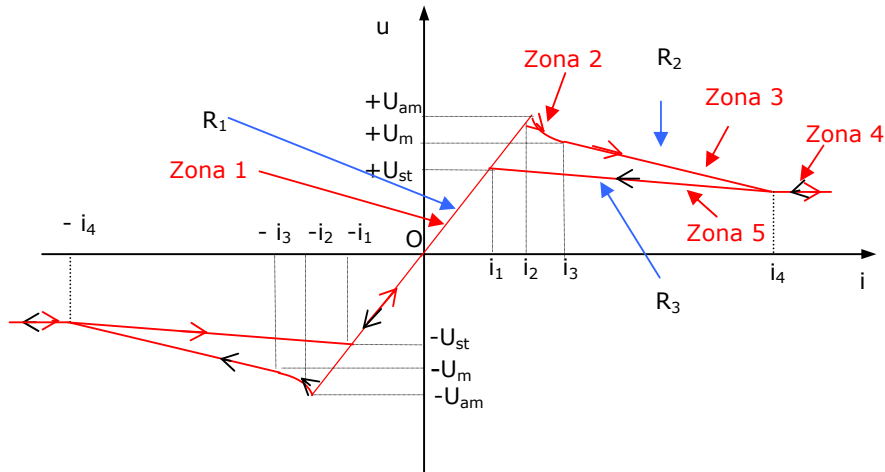


Fig.3.31. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric pentru modelul MM-EXP1.

Valorile parametrilor R_1 și R_2 au fost alese pe baza datelor din literatură [Golk07], [Sar10].

Semnificația celor cinci zone de funcționare ale arcului electric în procesul de elaborare al metalelor este următoarea:

- Zona 1: valoarea curentului arcului electric se modifică de la $-i_1$ la i_2 . Deoarece în această zonă caracteristica curent-tensiune a arcului electric este liniară, panta acesteia fiind R_1 , valoarea tensiunii este calculată utilizând relația (3.31), i fiind valoarea curentului arcului electric la un moment dat, iar u tensiunea arcului. Relația (3.31) este utilizată și pentru a calcula valoarea tensiunii când aceasta scade de la i_1 la $-i_2$. În această zonă arcul electric se comportă ca un rezistor.

$$u = R_1 \cdot i \quad (3.31)$$

- Zona 2: corespunde porțiunii în care curentul poate lua valori în intervalul (i_2, i_3) , zonă în care se demarează procesul de topire al metalelor. Se observă că, caracteristica curent-tensiune are formă exponențială, tensiunea scăzând de la valoarea U_{am} la U_m .
- Zona 3: corespunde porțiunii în care curentul se modifică de la valoarea i_3 la i_4 , observându-se liniaritatea caracteristicii curent-tensiune, panta acesteia fiind R_2 . În această zonă tensiunea arcului electric scade de la valoarea U_m la U_{st} .
- Zona 4: corespunde domeniului în care curentul arcului electric crește peste valoarea i_4 (calculată cu relația (3.30)), valoarea tensiunii rămânând constantă;
- Zona 5: corespunde porțiunii în care valoarea curentului arcului electric scade de la i_4 la i_1 .

Aceste zone se respectă și pentru semialternanța negativă a curentului arcului.

3.5.1. Analiza influenței parametrilor modelului MM-EXP1 asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric

Pentru o implementare mai eficientă a scenariilor de simulare s-a conceput în *Matlab* o interfață grafică utilizator ilustrată în fig.3.32. Parametrii modelului au fost setați cu valori regăsite în literatura de specialitate respectiv cu cei din documentația tehnică a cuptorului, ulterior fiind modificați pe rând într-un anumit domeniu stabilit astfel încât să se obțină o caracteristică curent-tensiune care să urmărească caracteristica reală.

Parametrii modelului MM-EXP1 sunt: panta R_1 , panta R_2 , panta R_3 , respectiv lungimea arcului, L_{arc} . Interfața grafică, în consecință, conține 4 butoane de tip *slider* care îi permit utilizatorului să modifice în orice moment valoarea parametrilor modelului. Acești parametri sunt setați la anumite valori regăsite în literatura de specialitate, respectiv în funcție de numeroase teste efectuate de autor, sau conform documentației tehnice a instalației vizate, apoi sunt modificați pe rând cu scopul de a analiza influența fiecăruia (se modifică un parametru, iar ceilalți sunt menținuți constanți).

Parametrii modelului au fost variați în anumite intervale și anume: $R_1 \in [0; 0,1] \Omega$, $R_2 \in [-0,0002; -0,00001] \Omega$, $R_3 \in [-0,006; -0,00001] \Omega$ și $L_{arc} \in [0; 60] cm$.

Tensiunea de amorsare a arcului electric este obținută utilizând relația (3.24).

În fig.3.33 este prezentată schema *Simulink* care implementează schema electrică de funcționare a cuptorului cu arc electric, *Functia Matlab* reprezentând MM-EXP1 ce simulează comportamentul arcului electric, parametrii de circuit (rezistența totală și reactanța totală) fiind setați cu valorile reale ale instalației tehnologice vizate.

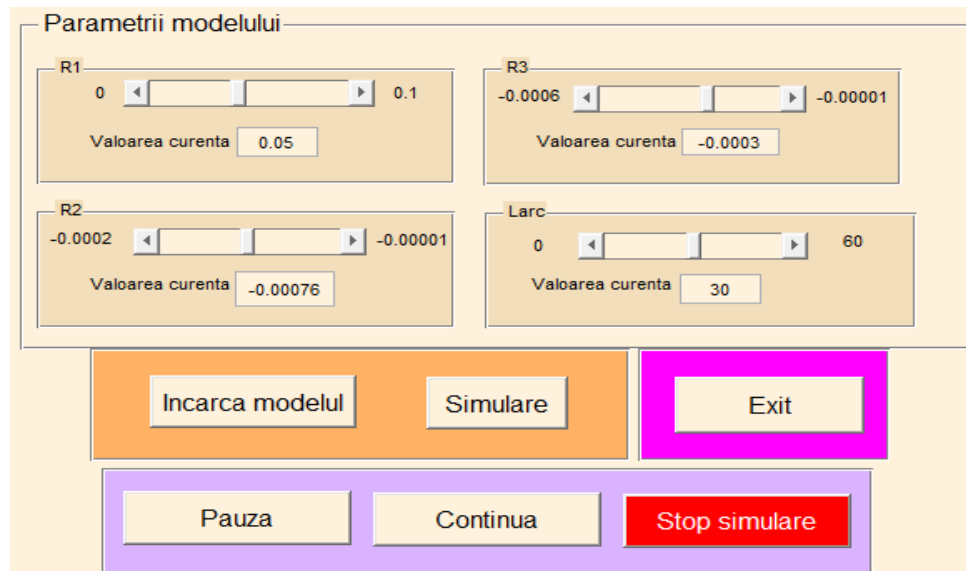


Fig.3.32. Interfața grafică utilizator pentru simularea modelului MM-EXP1.

În fig.3.34 este ilustrată caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric pentru acest model exponențial propus. Pentru a se obține această caracteristica s-au utilizat următoarele valori pentru parametrii modelului matematic din (3.25): panta $R_1=0,05$, panta $R_2=-0,00076$, panta $R_3=-0,0003$ și $L_{arc}=30$ cm.

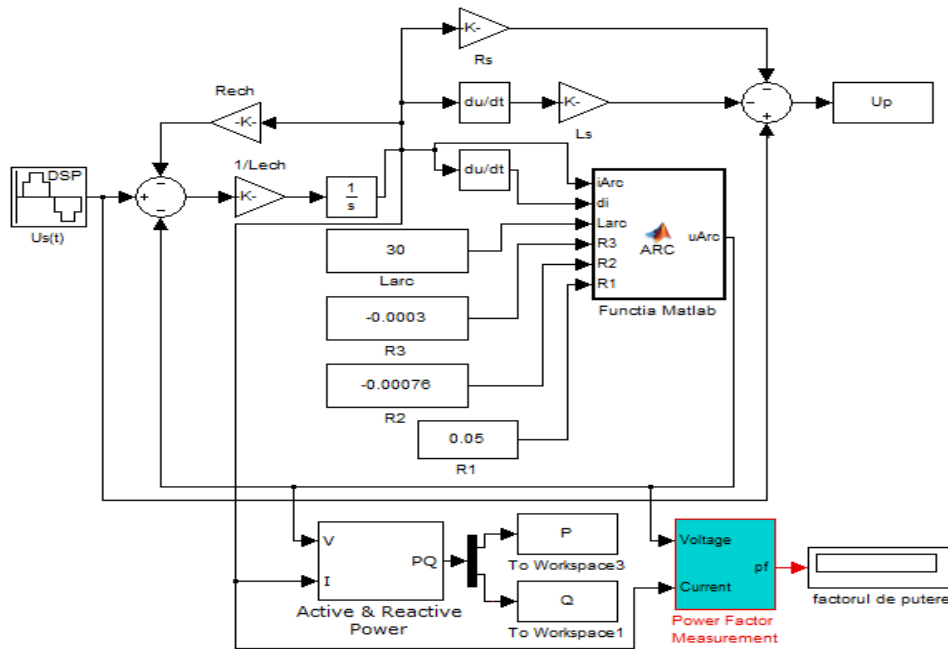


Fig.3.33. Schema Simulink corespunzătoare implementării MM-EXP1.

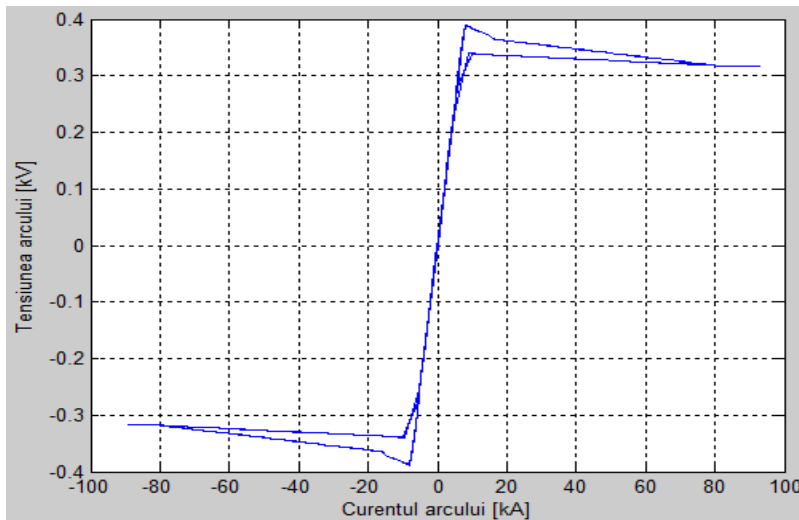


Fig.3.34. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric.

În continuare se analizează influența fiecărui parametru al modelului matematic asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric, scenariul de modificare al valorilor parametrilor modelului fiind același cu cel prezentat în cazul MM-LIN.

3.5.1.1. Modificarea parametrului R_1

În fig.3.35a) este ilustrată variația parametrului R_1 , între valorile $0,01 \Omega$ și $0,09 \Omega$ din considerentele prezentate în paragraful 3.4.2.1. În fig.3.35b) sunt prezentate variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului electric în funcție de valorile parametrului R_1 . Se poate constata că la creșterea valorii acestui parametru, are loc scăderea puterii active a arcului, respectiv creșterea puterii reactive, ceea ce corespunde relației (3.18).

Fig.3.36 prezintă caracteristica curent-tensiune a arcului, respectiv a cuptorului obținute în urma variațiilor parametrului modelului R_1 .

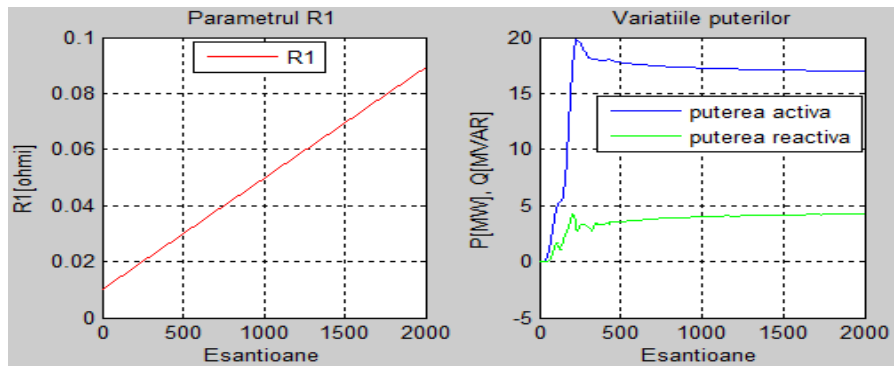


Fig.3.35. a) Variația parametrului R_1 , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.

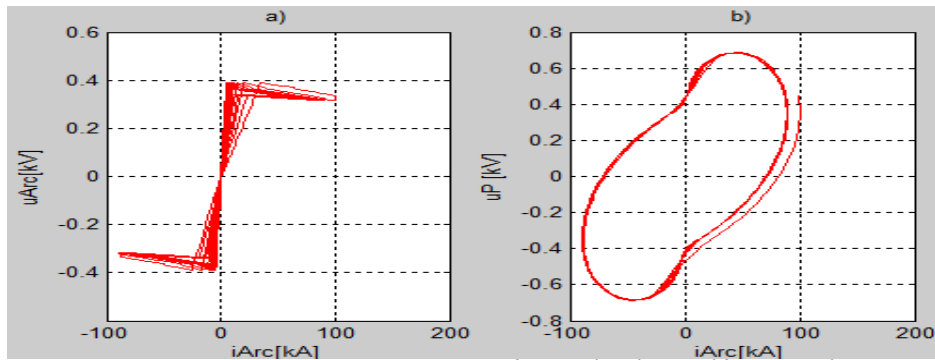


Fig.3.36. Caracteristica curent-tensiune: a) a arcului electric, b) a cuptorului.

În fig.3.37 sunt prezentate variațiile curentului și tensiunii arcului în funcție de variațiile parametrului R_1 prezentate în fig.3.35a). Se poate observa că amplitudinea curentului arcului electric scade în cazul în care parametru R_1 crește, dar variația este mică. În același timp, se poate observa că acest parametru nu are o influență sesizabilă asupra amplitudinii tensiunii arcului electric, dar în cazul în care parametru are o valoare mică, forma de variație a tensiunii arcului este

deformată. S-a ales valoarea $R_1=0,05$ din aceleași considerente prezentate la paragraful 3.4.2.1.

3.5.1.2. Modificarea parametrului R_2

În fig.3.38a) este ilustrată variația parametrului R_2 în domeniul $[-0,001; -0,0003 \Omega]$. În fig.3.38b) sunt prezentate variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului electric în funcție de valorile lui R_2 . Se poate constata că modificările lui R_2 nu au o influență semnificativă asupra puterilor activă și reactivă, existând o ușoară creștere a puterii active a arcului în cazul în care valoarea lui R_2 scade.

Fig.3.39 prezintă caracteristica curent-tensiune a arcului, respectiv a cuptorului obținute în urma variațiilor parametrului modelului R_2 .

În fig.3.40 sunt prezentate variațiile curentului și tensiunii arcului în funcție de variațiile lui R_2 . Se constată că acest parametru nu influențează amplitudinea curentului arcului electric pe cele două semialternanțe, dar se poate distinge o ușoară deformare a tensiunii pentru valori mai mari ale lui R_2 . Variația tensiunii arcului în acest caz este mai apropiată de forma reală prezentată în literatura de specialitate [Pan08] (se poate identifica tensiunea de amorsare, apoi tensiunea arcului este constantă). Valoarea considerată pentru R_2 este cea obținută după 1000 de eșantioane, și anume $R_2=-0,00076 \Omega$.

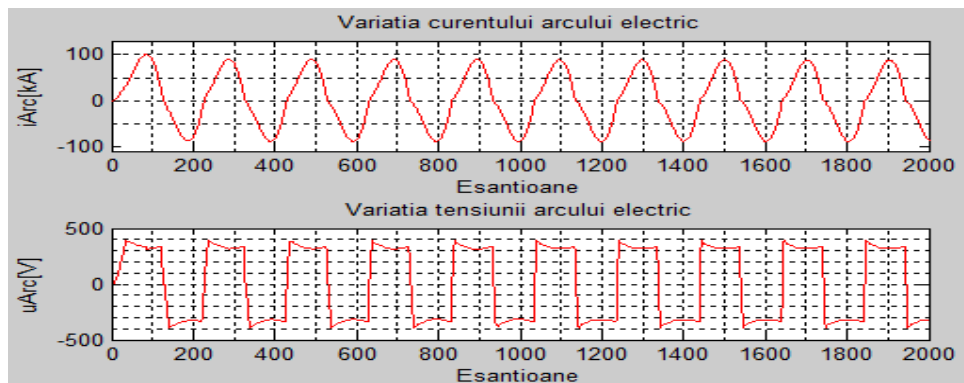


Fig.3.37. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

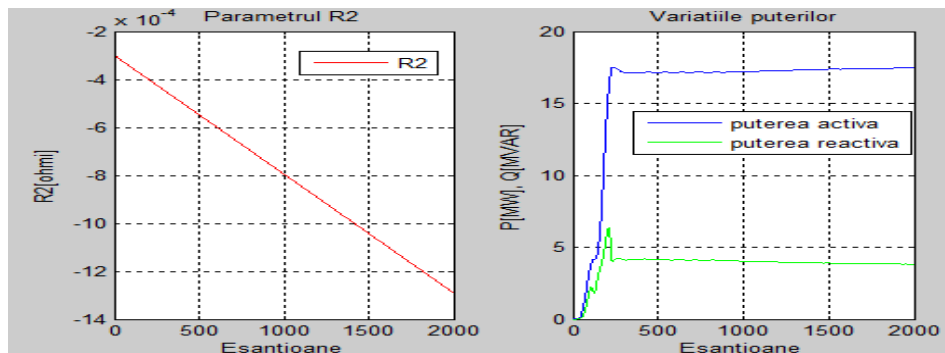


Fig.3.38. a) Variația parametrului R_2 , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.

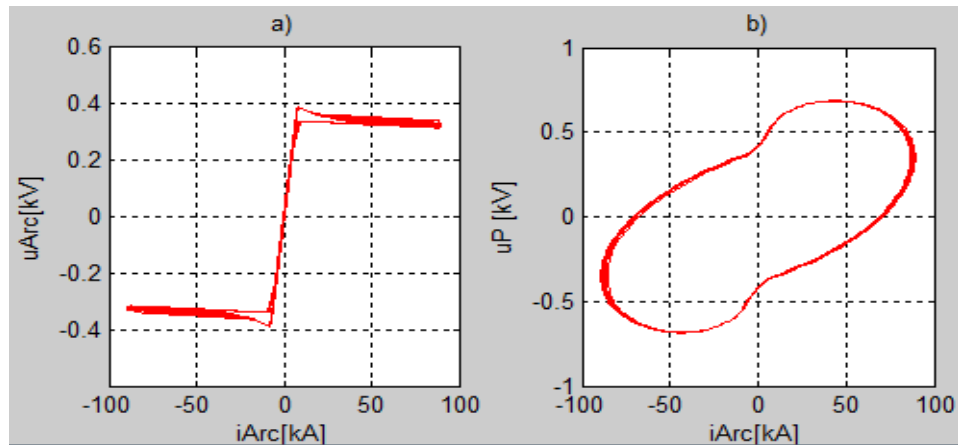


Fig.3.39. Caracteristica curent-tensiune: a) a arcului electric, b) a cuptorului.

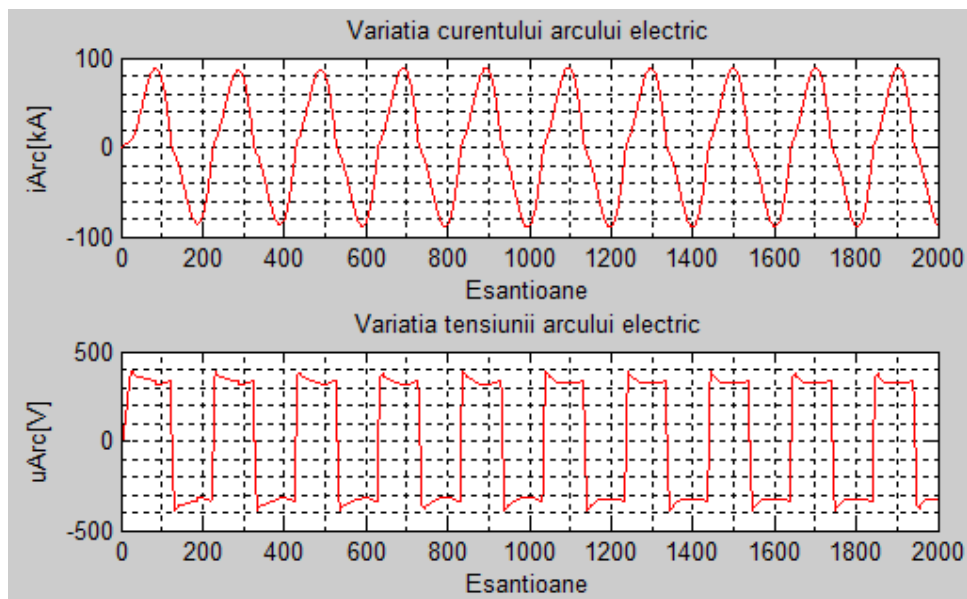


Fig.3.40. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

3.5.1.3. Modificarea parametrului R_3

Pentru parametrul R_3 s-a ales un domeniu de variație de $[-0.0006 \Omega; -0.00001 \Omega]$, fig.3.41a). Asemănător cazurilor precedente s-au obținut variațiile și caracteristicile din fig. 3.41b), fig.3.42, fig.3.43.

Se observă că parametrul R_3 nu influențează amplitudinea curentului arcului electric pe cele două semialternanțe și pentru a obține o formă corectă de variație a tensiunii arcului [Pan08] se alege valoarea pentru R_3 obținută după 300 de eșantioane $R_3 = -0,0001$.

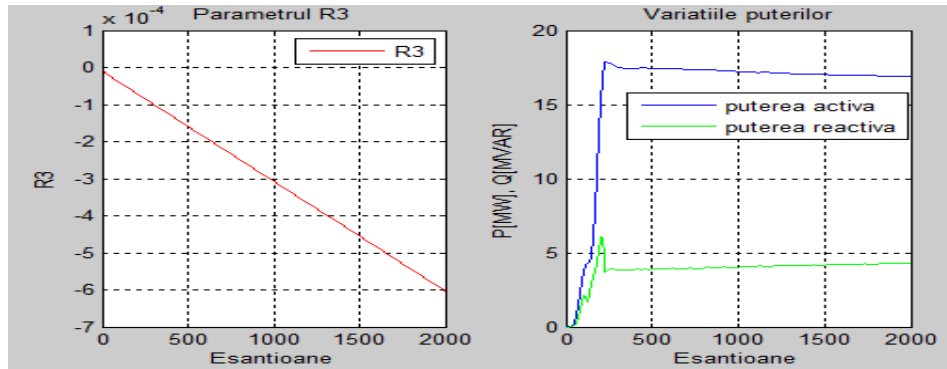


Fig.3.41. a) Variația parametrului R_3 , b) Variația puterilor arcului.

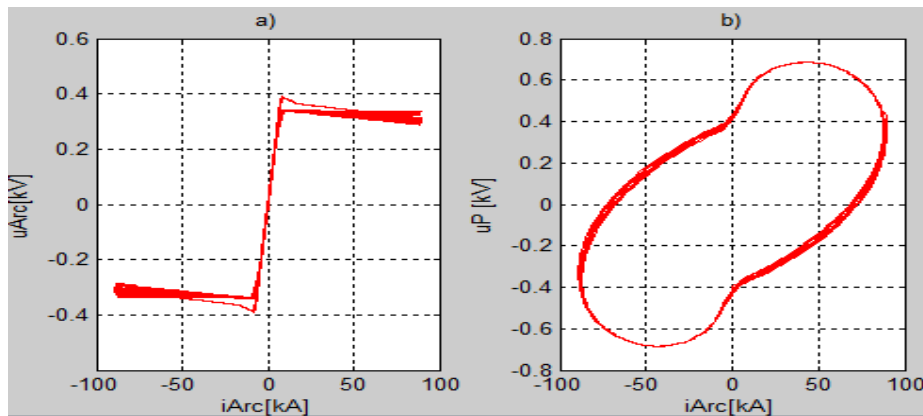


Fig.3.42. Caracteristica curent-tensiune: a) a arcului electric, b) a cuptorului.

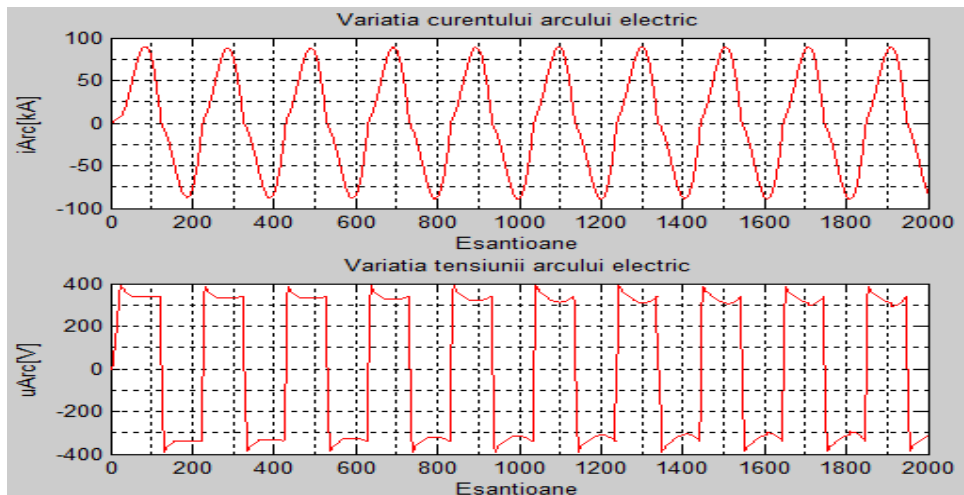


Fig.3.43. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

3.5.1.4. Modificarea lungimii arcului electric, L_{arc}

În vederea studierii influenței lungimii arcului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric, s-a ales un domeniu de variație a lui L_{arc} între 0 și 60 cm, (fig.3.44a)). Se constată că variația puterii prezentate în fig.3.44b) corespunde situației existente în realitate și anume în caz de scurtcircuit puterea activă a arcului este zero, de asemenea, în cazul în care lungimea arcului este prea mare, se constată că puterea arcului scade deoarece are loc o funcționare în zona de curent întrerupt, deci apare o funcționare instabilă a acestuia, puterea maximă a arcului obținându-se pentru o lungime de arc optimă de 31 cm. Este indicat ca instalația să lucreze cu o lungime de arc până la lungimea optimă.

În fig.3.45 sunt ilustrate caracteristicile curent-tensiune a arcului și respectiv a cuptorului la modificarea lungimii arcului. Caracteristicile sunt utilizabile în faza de validare a modelului.

Fig.3.46 prezintă formele de variație ale curentului și tensiunii arcului electric în funcție de lungimile de arc prezentate anterior. La o lungime de arc prea mare se poate constata că tensiunea nu mai are o formă de undă dreptunghiulară, iar curentul se regăsește în regimul de curent întrerupt, situație care trebuie evitată. De asemenea, se poate observa că odată cu modificarea lungimii arcului, tensiunea și curentul arcului sunt în continuare în fază.

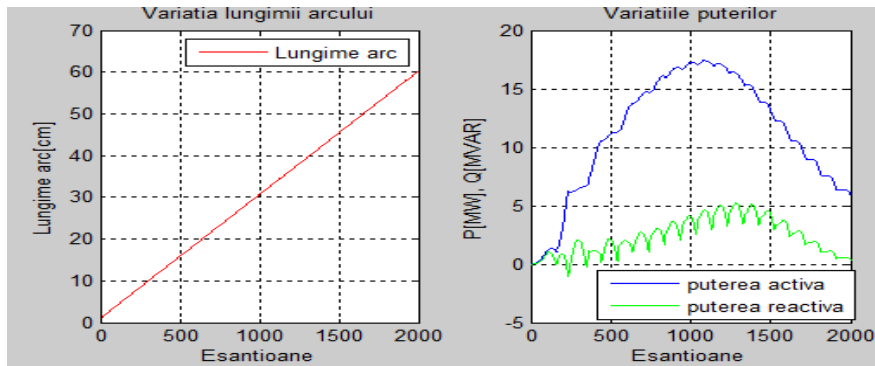


Fig.3.44. a) Variația lungimii arcului, b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.

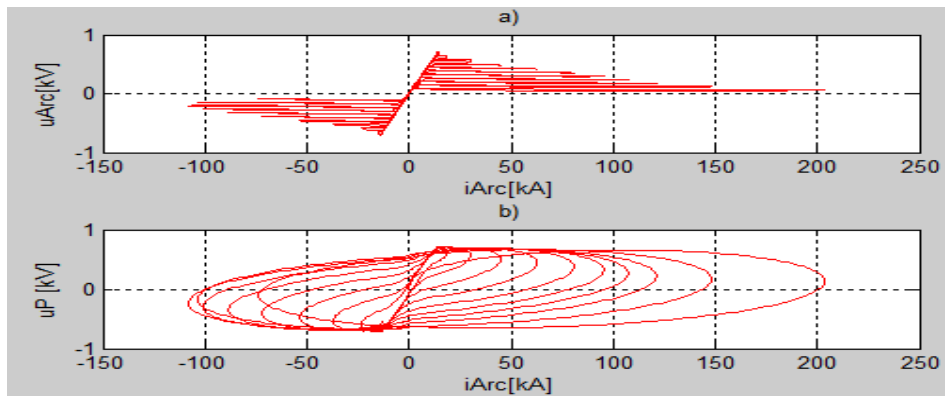


Fig.3.45. Caracteristica curent-tensiune la modificarea lungimii arcului a) a arcului, b) a cuptorului.

În funcție de variațiile tensiunii, curentului și puterii active ale arcului electric s-au ales valorile $R_1=0,05 \Omega$, $R_2=-0,00076 \Omega$, $R_3=-0,0001 \Omega$ și $L_{arc}=31 \text{ cm}$, deoarece curentul se regăsește în regimul de curent neîntrerupt, tensiunea are o formă de undă care poate fi aproximată cu o formă dreptunghiulară, se distinge tensiunea de amorsare a arcului, iar puterea activă disipată în arcul electric este maximă.

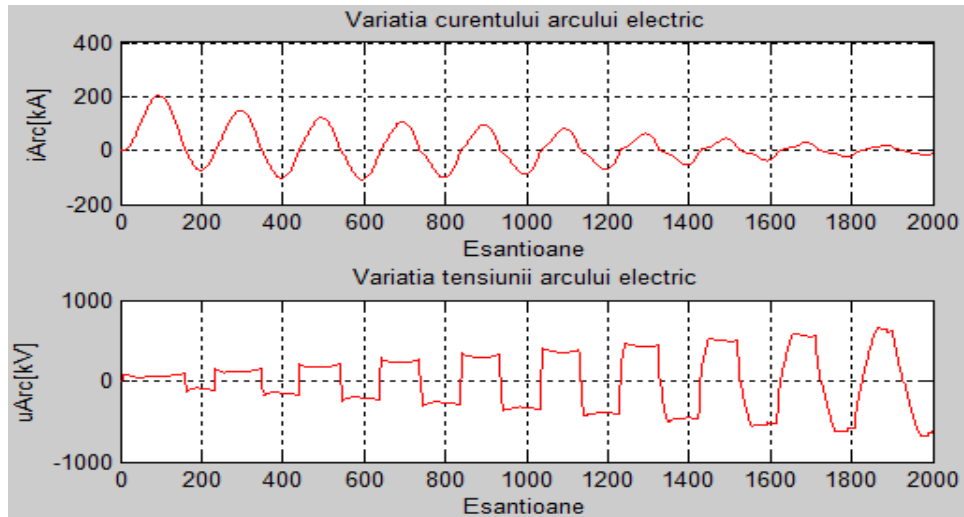


Fig.3.46. Formele de undă ale curentului și tensiunii arcului electric la modificarea lungimii arcului.

3.5.2. Influența tensiunii din secundarul transformatorului, U_s , asupra tensiunii, curentului și puterii arcului

Pentru acest model se utilizează aceleași valori ale tensiunii din secundarul transformatorului care au fost utilizate la modelul MM-LIN. Forma de variație a tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului este aceeași cu cea de la modelul MM-LIN, fig.3.22 și în consecință nu mai sunt ilustrate. Cele cinci trepte de tensiune utilizate sunt: 960 V (treapta 18), 925 V (treapta 17), 894 V (treapta 16), 864 V (treapta 15) și 837 V (treapta 14). În funcție de treapta de tensiune pe care este setat transformatorul se obține o anumită tensiune cu care va fi alimentat cuptorul.

În fig.3.47a) sunt prezentate formele de variație ale curentului arcului (utilizând MM-EXP1) obținute în funcție de cele cinci trepte de tensiune din secundarul transformatorului. Se poate constata că în cazul unei tensiuni mai mari din secundar se obține un curent mai mare, iar dacă tensiunea este mai mică, curentul este mai mic. Aceste afirmații sunt valabile în cazul în care tensiunea de stingere a arcului electric este aceeași pentru toate treptele de tensiune din secundarul transformatorului. Forma de undă a curentilor este aproximativ sinusoidală. În fig.3.47b) sunt prezentate formele de variație ale tensiunii arcului obținute în funcție de aceleași cinci trepte de tensiune din secundarul transformatorului. Se poate constata că indiferent de treapta de tensiune pe care lucrează transformatorul se obține aceeași variație a tensiunii arcului, deoarece s-a

ales aceeași lungime a arcului pentru toate valorile din secundarul transformatorului. Forma de undă a tensiunilor este aproximativ dreptunghiulară.

Fig.3.48a) prezintă caracteristicile curent-tensiune ale arcului electric obținute în funcție de aceleași trepte de tensiune. În fig.3.48b) sunt ilustrate caracteristicile curent-tensiune ale cuptorului care sunt obținute prin reprezentarea tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului în funcție de curentul arcului.

Fig.3.49a) și fig.3.49b) prezintă puterea activă, respectiv reactivă ale arcului electric, obținute în funcție de cele cinci valori setate ale tensiunii din secundarul transformatorului. Trecerea de pe o treaptă de tensiune a transformatorului pe alta, care conduce la modificarea corespunzătoare a puterii disipate în arcul electric, se face automat prin sistemul de reglare care stabilește trecerea de pe o fază tehnologică pe alta în cadrul procesului de elaborare al oțelului. Puterea activă maximă care se poate obține cu MM-EXP1 este de aproximativ 20,95 MW.

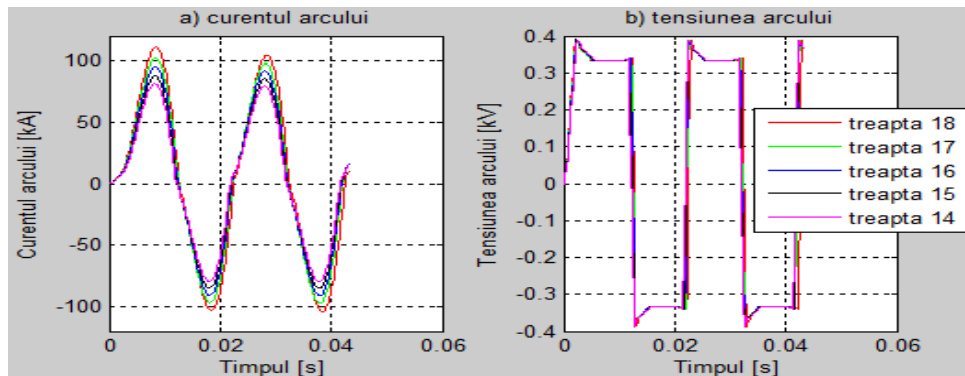


Fig.3.47. Forme de undă la modificarea tensiunii de alimentare pentru a) curentul arcului electric, b) tensiunea arcului electric.

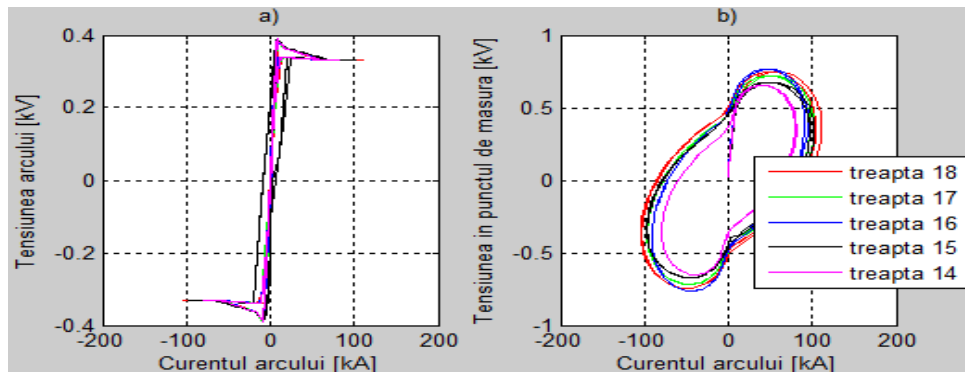


Fig.3.48. Caracteristica curent-tensiune la modificarea tensiunii de alimentare a) a arcului electric, b) a cuptorului.

3.5.3. Validarea modelului MM-EXP1

Validarea modelului MM-EXP1 se face prin compararea rezultatelor obținute prin simulare cu cele achiziționate de la instalația tehnologică reală. În cazul simulărilor se consideră că lungimea arcului este aceeași atât în faza de topire cât și

în faza de afânare. Curenții arcului electric aferenți celor două faze tehnologice au amplitudini diferite, iar tensiunea arcului este aceeași.

În fig.3.50a) sunt prezentate variațiile tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului pentru cele două faze tehnologice principale. În faza de topire se operează pe o treaptă de tensiune mai mare, comparativ cu faza tehnologică de afânare. În fig.3.50b) sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea arcului obținute pentru tensiunile de linie de 894 V și 837 V din secundarul transformatorului. Întrucât se consideră că se lucrează cu aceeași lungime de arc, tensiunea arcului are aceeași amplitudine pentru cele două valori din secundar, forma de undă pentru tensiunea arcului putând fi aproximată cu o formă dreptunghiulară, ceea ce corespunde cu realitatea.

În fig.3.51 sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea obținută prin simulare, respectiv cea achiziționată de la cuptorul cu arc electric trifazat real, pentru cele două faze tehnologice. Se observă că formele de undă sunt apropiate ca valoare și ca variație, dar cea măsurată de la instalația reală este deformată în faza de topire a metalelor deoarece există diferite perturbații care apar în procesul real, deci lungimile de arc vor fi ușor diferite.

În fig.3.52 sunt prezentate variațiile curenților mășurați de la instalația reală și cei simulați pentru ambele faze tehnologice de elaborare ale oțelului. Se poate observa că variațiile sunt apropiate atât ca amplitudine, cât și ca formă de undă, în faza de topire fiind necesar un curent mai mare deoarece materialul este în stare solidă sau parțial solidă.

În fig.3.53 sunt ilustrate caracteristicile curent-tensiune ale cuptorului în fazele tehnologice de topire și de afânare. Se poate constata că aceste caracteristici sunt apropiate ca variație.

În fig.3.54 sunt prezentate caracteristicile curent-tensiune ale arcului electric, putându-se identifica zona exponențială din cadrul caracteristicii, dar și faptul că această caracteristica este puternic neliniară, fiind liniarizată doar pe anumite porțiuni.

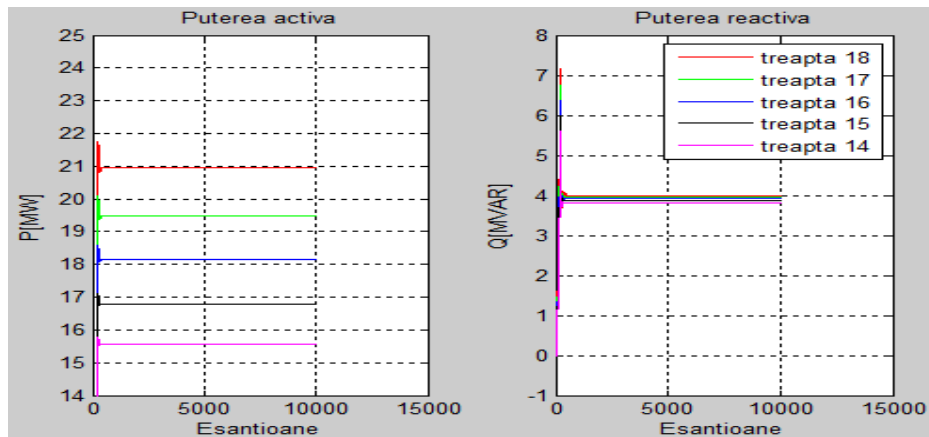


Fig.3.49. Variația puterilor în funcție de treptele de tensiune din secundarul transformatorului.

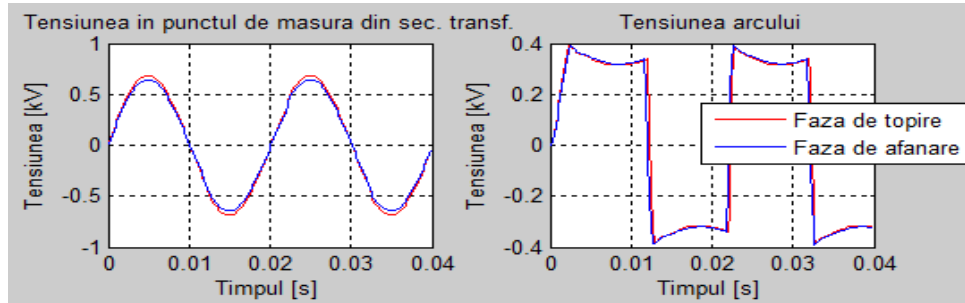


Fig.3.50. Forme de undă obținute în cele două faze tehnologice pentru:
 a) tensiunea din punctul de măsură din secundarul transformatorului, b) tensiunea arcului electric.

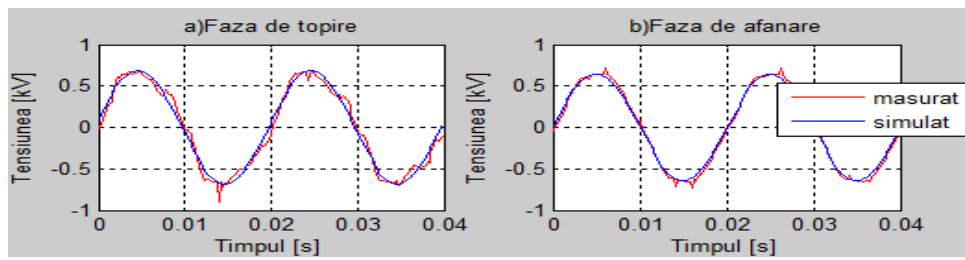


Fig.3.51. Forme de undă pentru tensiunea măsurată și simulată în cele două faze tehnologice.

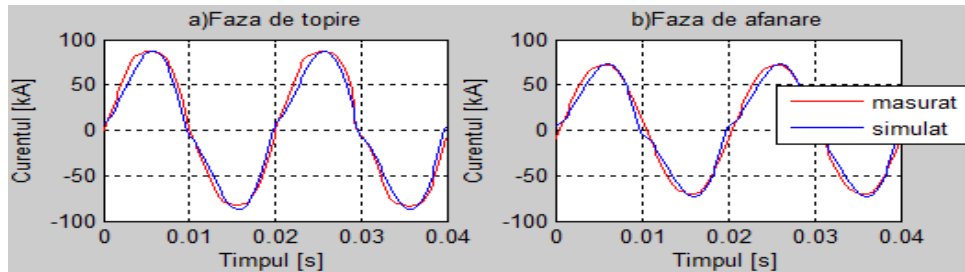


Fig.3.52. Forme de undă pentru curentul măsurat și simulat în cele două faze tehnologice.

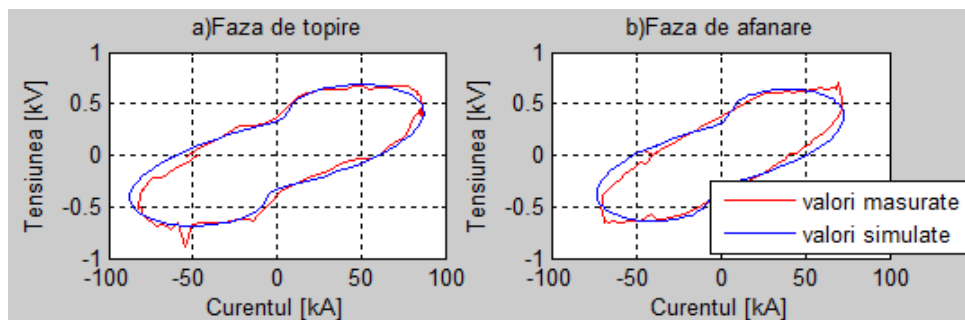


Fig.3.53. Caracteristica curent-tensiune a cuptorului pentru cele două faze tehnologice (tensiune din punctul de măsură din secundarul transformatorului).

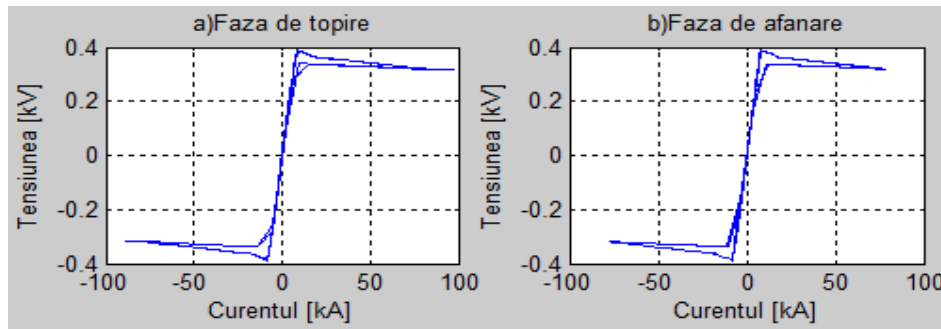


Fig.3.54. Caracteristica curent-tensiune a arcului pentru cele două faze tehnologice.

Concluzii:

În urma simulărilor se pot formula următoarele concluzii referitoare la modelul MM-EXP1 propus:

- permite obținerea unei caracteristici curent-tensiune a cărei formă este echivalentă cu cea regăsită în literatura de specialitate;
- permite obținerea de puteri diferite necesare diverselor faze tehnologice;
- permite introducerea de perturbații în proces (la lungimea arcului);
- permite obținerea fenomenului de histereză;
- permite evidențierea parametrilor care sunt supervizați în cazul instalației tehnologice reale;
- permite lucrul cu lungimi de arc diferite;
- urmărește formele de undă ale curentului și tensiunii, obținute de la instalația reală, în ambele faze tehnologice;
- puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime de arc de 31 cm;
- poate fi folosit în sinteza structurilor de conducere.

3.6. Modelul MM-EXP2 bazat pe caracteristica curent-tensiune

Modelul MM-EXP2 prezintă o zonă ce are o variație exponențială, putându-se distinge patru zone de funcționare ale arcului electric (fig.3.55) **[Ghi13_1]**:

- Zona 1 corespunde creșterii tensiunii arcului electric de la tensiunea de stingere, $-U_{str}$ la tensiunea de amorsare a arcului electric, U_{am} (se reamorsează arcul electric);
- Zona 2 (care are loc după parcurgerea zonei 1) corespunde scăderii rapide a tensiunii arcului de la U_{am} la o tensiune, U_c obținută în funcție de o anumită constantă, c . Această zonă coincide cu începerea procesului de topire.
- Zona 3 (care are loc după parcurgerea zonei 2) în care tensiunea arcului este menținută constantă. Această zonă indică procesul efectiv de topire al metalelor în care arcul electric este stabil;
- Zona 4 (care are loc după parcurgerea zonei 3) corespunde stingerii arcului și reaprinderii acestuia pentru cealaltă semialternanță a tensiunii de alimentare. În această zonă tensiunea prezintă o variație exponențială.

În fig.3.55 i_l reprezintă curentul aferent tensiunii de amorsare a arcului electric pentru fiecare semialternanță a tensiunii de alimentare a cuptorului.

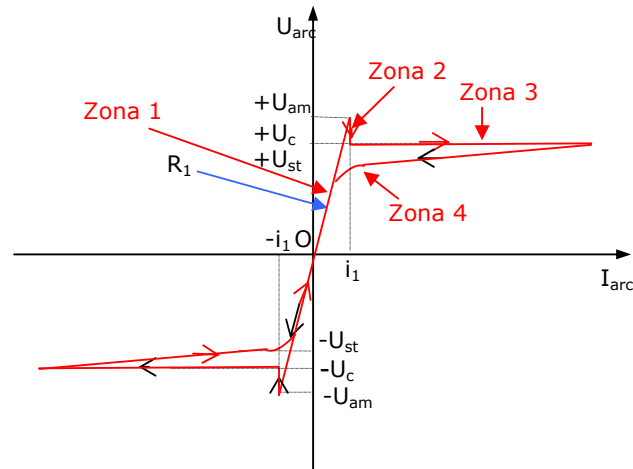


Fig.3.55. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric corespunzătoare MM-EXP2.

În momentul în care tensiunea arcului electric ajunge la valoarea de amorsare a acestuia, curentul arcului este zero sau are valoare foarte mică și începe de fapt procesul de topire al metalelor.

Când tensiunea de la rețea trece prin zero pentru a ajunge la semialternanța negativă, tensiunea arcului electric se apropie de tensiunea de stingere, curentul arcului electric având valoarea maximă, iar când tensiunea arcului electric atinge valoarea $-U_{am}$, curentul ajunge din nou la valoarea zero.

Parametrul $c=1,2$ care apare în relația de calcul al lui U_c (relația 3.32) determină cât de mare să fie trecerea de la tensiunea de amorsare a arcului la tensiunea cu care funcționează arcul electric în faza de ardere stabilă.

$$U_c = \frac{U_{am}}{c} \quad (3.32)$$

În a doua fază a funcționării arcului este stabil și tensiunea arcului electric scade rapid de la valoarea U_{am} la valoarea U_c .

În a treia fază arcul electric este stabil, caracteristica având formă liniară, și coincide în cazul real cu topirea efectivă a metalelor.

În a patra fază a funcționării arcului electric, arcul începe să se stingă, iar tensiunea acestuia continuă să scadă încet, având o variație exponențială.

MM-EXP2 este prezentat de relațiile (3.33) cu următoarele notații:

- R_1 - panta dreptei rezultate în urma trasării liniare a caracteristicii curent-tensiune în intervalul $[-i_1, i_1]$;
- i_1 - valoarea curentului atinsă la tensiunea de amorsare a arcului electric (U_{am});
- U_{am} - tensiunea de amorsare a arcului electric;
- U_c - valoarea constantă a tensiunii arcului electric care se calculează cu (3.32) și care corespunde zonei doi din cadrul procesului de topire;

- c – parametrul ce influențează variația bruscă a tensiunii arcului după ce se atinge tensiunea de amorsare a acestuia;
- I – este valoarea absolută a curentului arcului electric, i_{arc} .

$$u = \begin{cases} R_1 \cdot i & I < i_1 \text{ și } \frac{di}{dt} \geq 0 \\ \frac{[U_c + (U_{am} - U_c) \cdot e^{i_1 - I}]}{I} \cdot i & I \geq i_1 \text{ și } \frac{di}{dt} \geq 0 \\ \frac{[U_c + (U_{am} - U_c) \cdot e^{-I}]}{I + i_1} \cdot i & \frac{di}{dt} < 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

cu:

$$I = |i(t)| \quad (3.34)$$

$$i_1 = \frac{U_{am}}{R_1} \quad (3.35)$$

3.6.1. Analiza influenței parametrilor modelului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric

În scopul de a putea realiza o analiză comparativă a MM-EXP2 se utilizează aceleași măsurători achiziționate de la instalația reală considerată.

Și în acest caz a fost implementată o interfață grafică în Matlab prezentată în fig.3.56, parametrul modelului fiind: R_1 , c , L_{arc} în consecință interfața conține 3 butoane de tip *slider* care îi permit utilizatorului să modifice în orice moment valoarea parametrilor modelului.

Parametrii modelului pot fi modificați într-un anumit interval: $R_1 \in [0; 0,1] \Omega$, $c \in [0,1; 2,5] \Omega$ și $L_{arc} \in [0; 60] \Omega$, U_{am} fiind obținută utilizând relația (3.24).

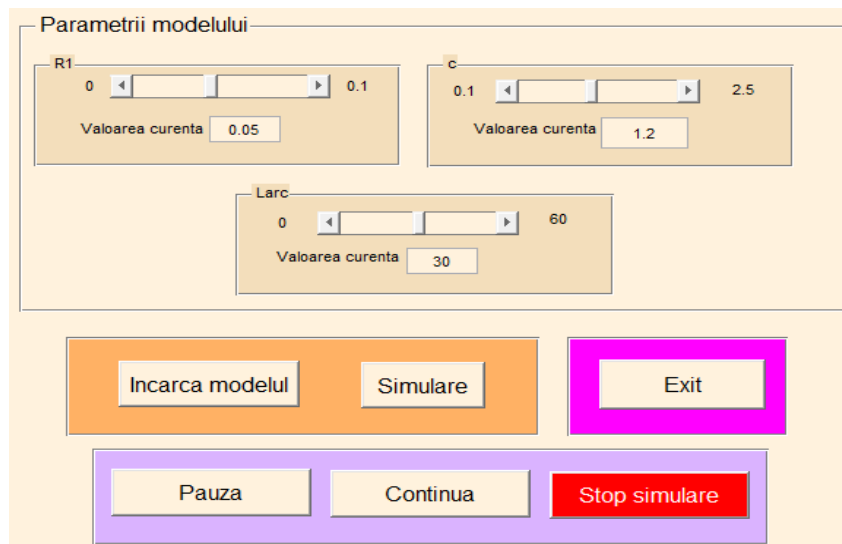


Fig.3.56. Interfața grafică utilizator pentru simularea modelului MM-EXP2.

În fig.3.57 este prezentată schema *Simulink* echivalentă schemei electrice de funcționare a cuptorului cu arc electric.

În fig.3.58 este ilustrată caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric pentru MM-EXP2 în care s-au utilizat următoarele valori pentru parametrii MM-EXP2 (3.33): $U_{am}=390\text{ V}$, $U_{st}=340\text{ V}$, $R_1=0,05$, $L_{arc}=30\text{ cm}$ și $c=1,2$.

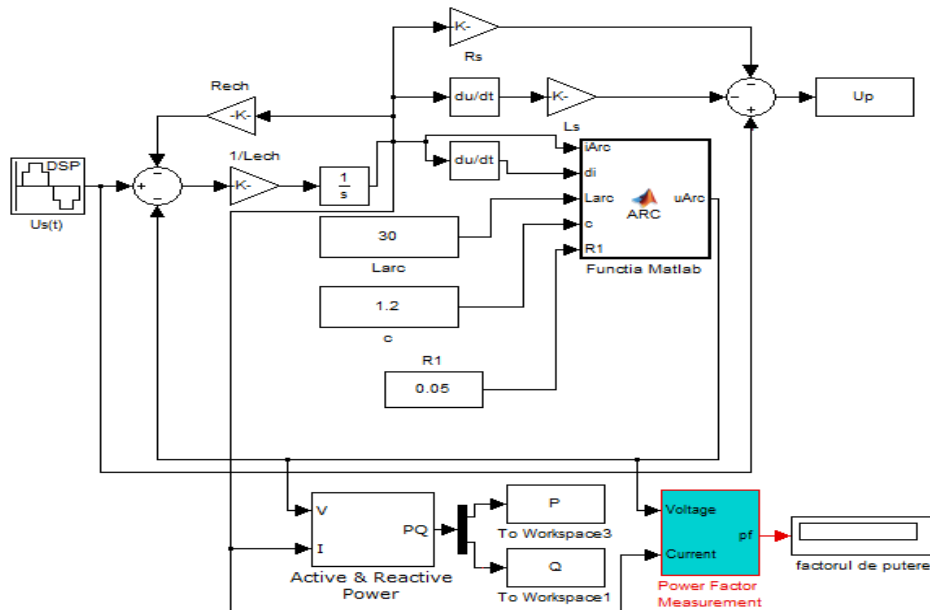


Fig.3.57. Schema Simulink aferentă implementării MM-EXP2.

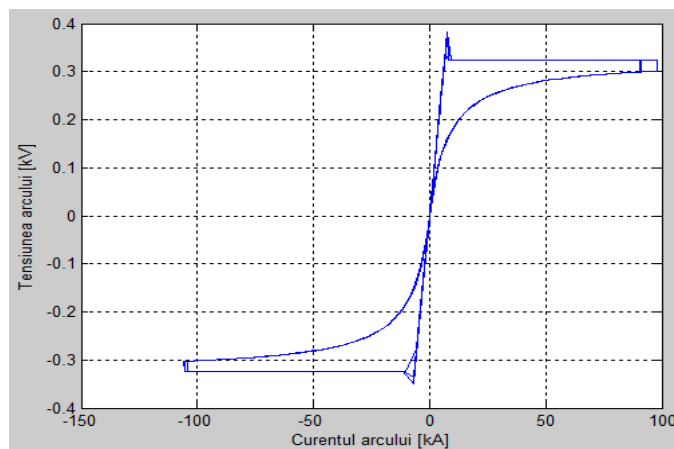


Fig.3.58. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric.

S-a analizat influența fiecărui parametru al modelului MM-EXP2 asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric, scenariul de simulare și principiul de

modificare al valorilor parametrilor modelului fiind aceleași cu cele utilizate la MM-LIN și MM-EXP1. În consecință se prezintă sintetic doar rezultatele simulărilor fără a se intra în detalii.

Modificarea parametrului R_1

În fig.3.59a) este ilustrată variația parametrului R_1 . În funcție de aceste variații au fost obținute următoarele grafice: în fig.3.59b) se prezintă variația puterilor activă și reactivă ale arcului, în fig.3.60 este reprezentată caracteristica curent-tensiune a arcului și a cuptorului, iar în fig.3.61 sunt prezentate variațiile curentului și tensiunii arcului.

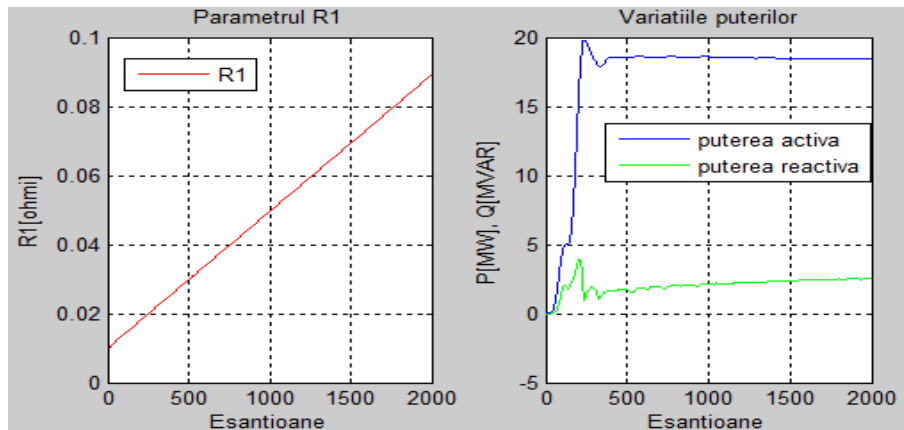


Fig.3.59. a) Variația parametrului R_1 , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.

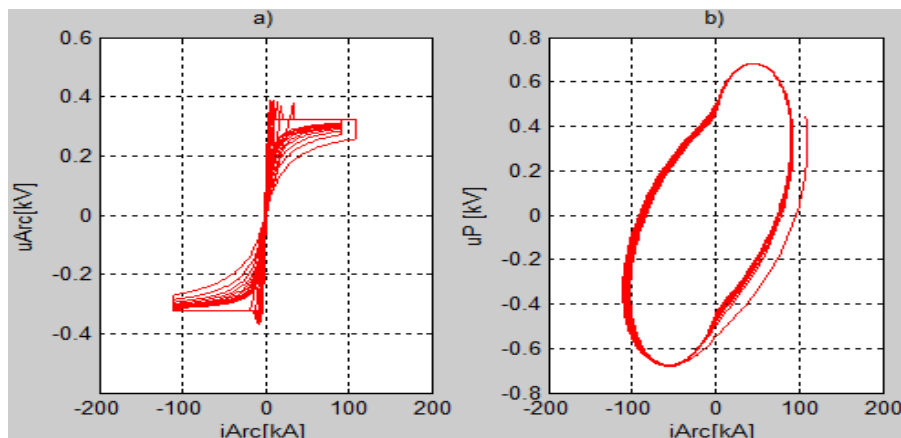


Fig.3.60. Caracteristica curent-tensiune a) a arcului electric, b) a cuptorului.

Modificarea parametrului c

În fig.3.62a) este ilustrată variația parametrului c în domeniul $0,8$ și $2,5$. Și în acest caz s-a ales un domeniu de variație astfel încât să se obțină o caracteristică curent-tensiune asemănătoare celei din literatura de specialitate. Analiza variației

parametrului c asupra principalelor mărimi electrice care caracterizează funcționarea cuptorului a condus la obținerea graficelor prezentate în fig.3.62b, fig.3.63, fig.3.64.

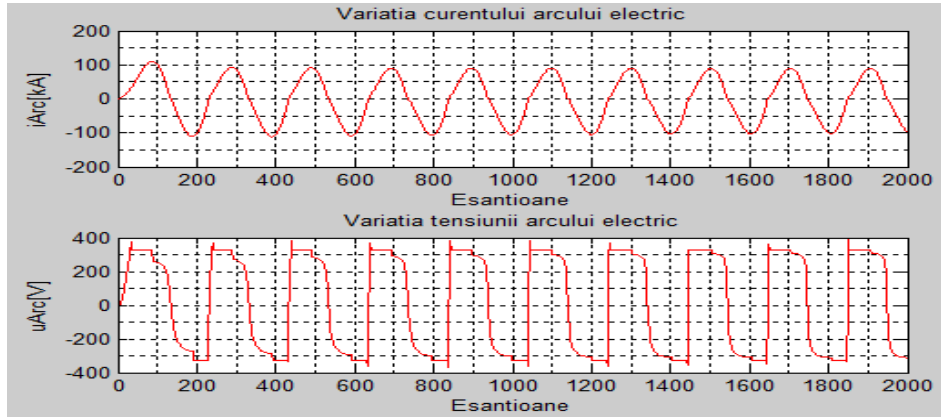


Fig.3.61. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

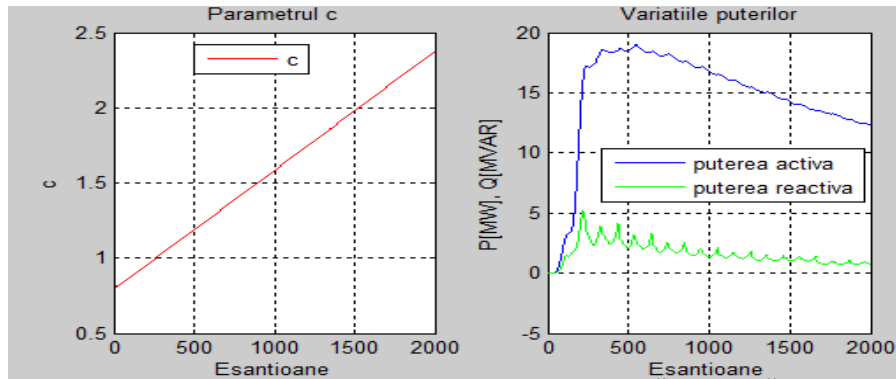


Fig.3.62. a) Variația coeficientului c , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.

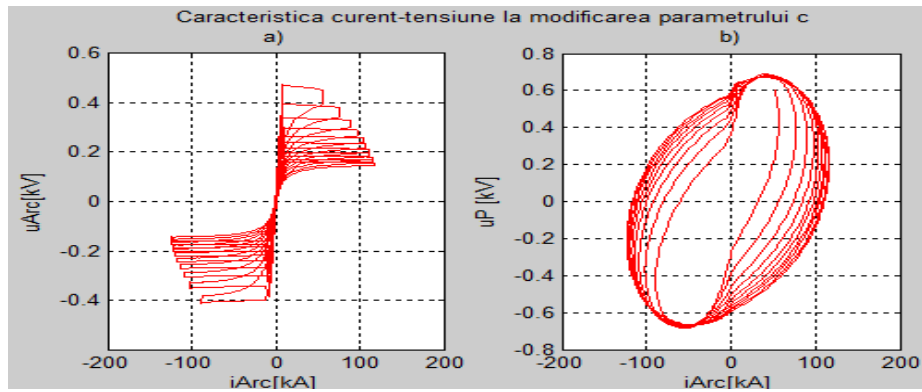


Fig.3.63. a) Caracteristica curent-tensiune a arcului electric, b) Caracteristica curent-tensiune a cuptorului.

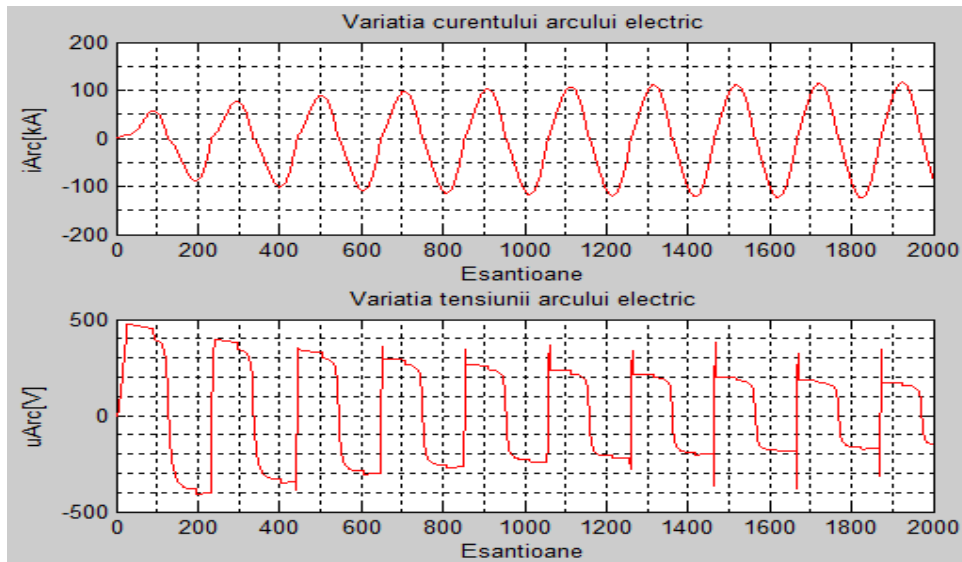


Fig.3.64. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

Modificarea lungimii arcului electric, L_{arc}

Analiza influenței lui L_{arc} asupra mărimilor electrice ce caracterizează funcționarea cuptorului a condus la obținerea rezultatelor prezentate sintetizate în fig.3.65b)-fig.3.67.

Puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime de arc optimă de aproximativ 31 cm .

În funcție de variațiile tensiunii, curentului și puterii active ale arcului electric s-au ales valorile $R_l=0,05\ \Omega$, $c=1,2$ și $L_{arc}=31\text{ cm}$, din aceleași considerente prezentate la MM-LIN și MM-EXP1.

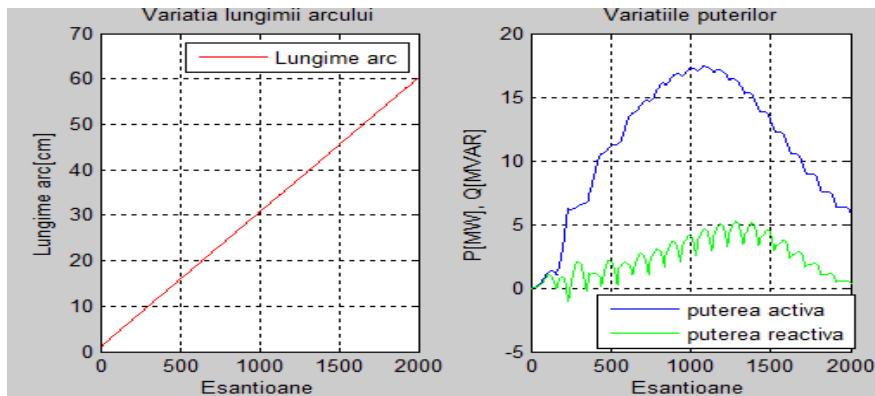


Fig.3.65. a) Variația lungimii arcului, b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.

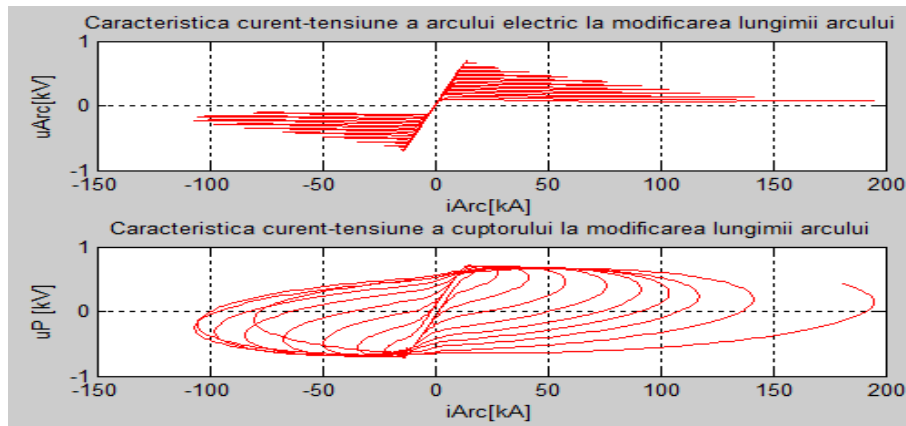


Fig.3.66. Caracteristica curent-tensiune a arcului la modificarea lungimii arcului.

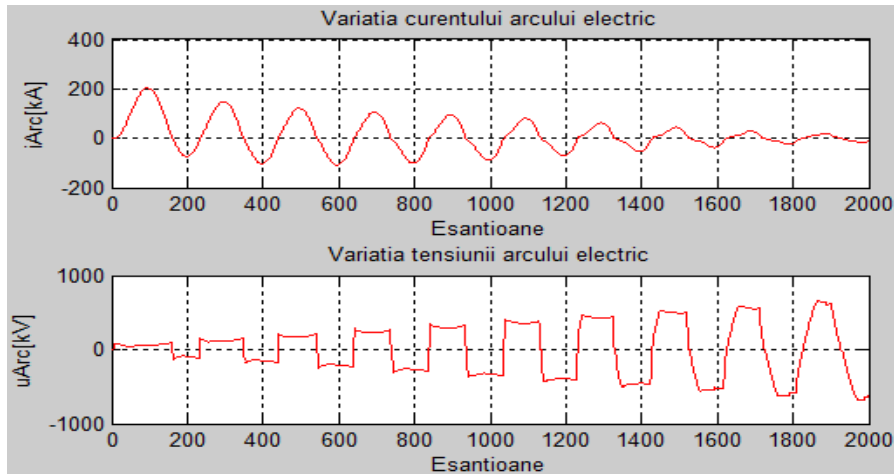


Fig.3.67. Formele de undă ale curentului și tensiunii arcului electric la modificarea lungimii arcului.

3.6.2. Influența tensiunii din secundarul transformatorului, U_s , asupra tensiunii, curentului și puterii arcului

Și în acest caz se utilizează aceleași valori ale tensiunii din secundarul transformatorului care au fost utilizate la modelul MM-LIN. În acest context, formele de undă pentru tensiunea din punctul de măsură din secundarul transformatorului au aceeași variație ca și în cazul MM-LIN, în consecință nu vor mai fi ilustrate. Cele cinci trepte de tensiune utilizate sunt: 960 V (treapta 18), 925 V (treapta 17), 894 V (treapta 16), 864 V (treapta 15) și 837 V (treapta 14).

În fig.3.68a) sunt prezentate formele de undă pentru curentul arcului, utilizând modelul MM-EXP2, obținute în funcție de cele cinci trepte de tensiune din secundarul transformatorului. Se poate constata că în cazul unei tensiuni mai mari din secundar se obține un curent mai mare, iar dacă tensiunea este mai mică, curentul este mai mic. Aceste afirmații sunt valabile în cazul în care tensiunea de

stingere a arcului electric este aceeași pentru toate treptele de tensiune din secundarul transformatorului. Forma de undă a curenților este aproximativ sinusoidală. În fig.3.68b) sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea arcului, utilizând MM-EXP2, obținute în funcție de aceleași cinci trepte de tensiune din secundarul transformatorului. Se poate constata că indiferent de treapta de tensiune pe care lucrează transformatorul cuptorului se obține aceeași variație a tensiunii arcului deoarece s-a ales aceeași lungime a arcului pentru toate valorile din secundar. Forma de undă a tensiunilor este aproximativ dreptunghiulară.

Fig.3.69a) și fig.3.69b) prezintă caracteristicile curent-tensiune ale arcului electric, respectiv ale cuptorului obținute în funcție de cele cinci valori care pot fi setate pentru tensiunea din secundarul transformatorului.

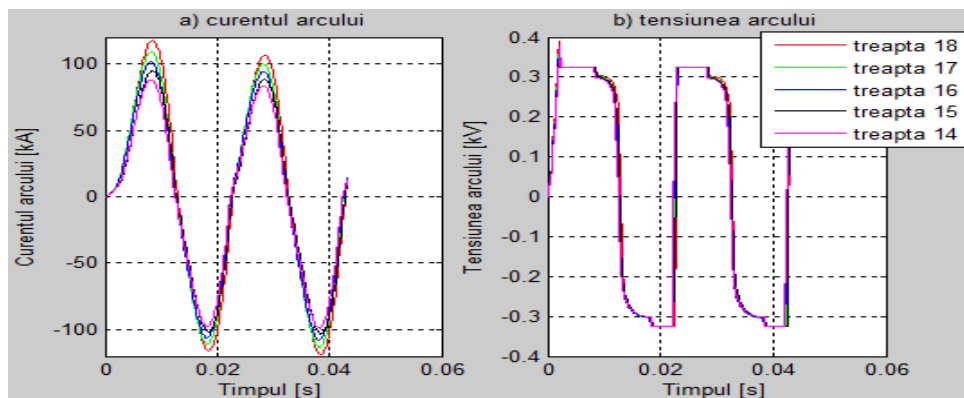


Fig.3.68. Forme de undă la modificarea tensiunii de alimentare pentru a) curentul arcului electric, b) tensiunea arcului electric.

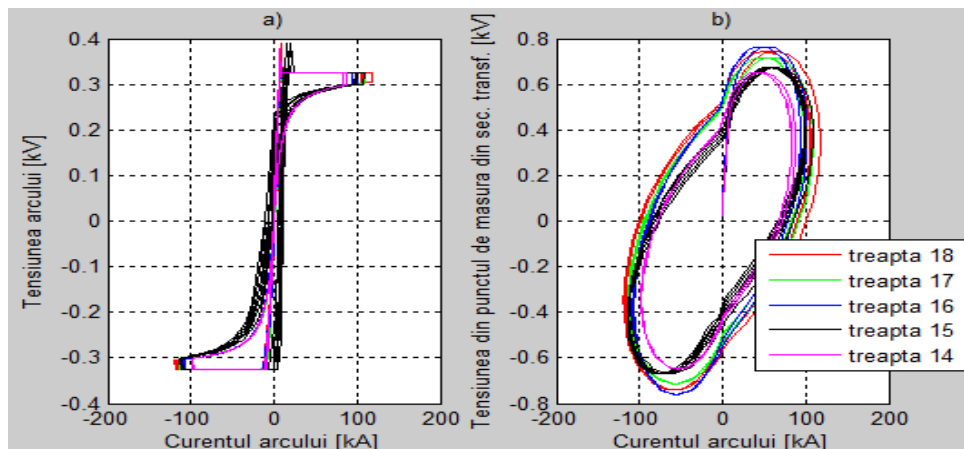


Fig.3.69. Caracteristica curent-tensiune la modificarea tensiunii de alimentare a) a arcului electric, b) a cuptorului.

Fig.3.70a) prezintă puterea activă disipată în arcul electric, iar fig.3.70b) prezintă puterea reactivă a arcului obținute pentru aceleași trepte de tensiune din

secundarul transformatorului. Puterea activă maximă disipată în arcul electric este de 21,5 MW.

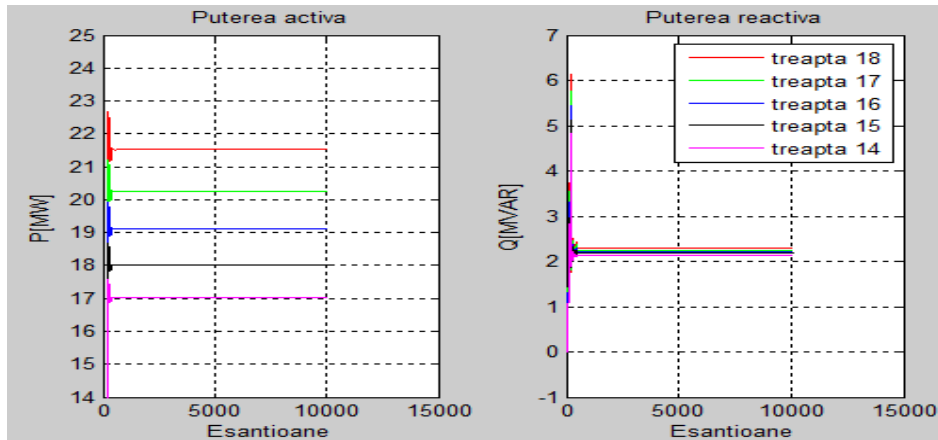


Fig.3.70. Variația puterilor în funcție de treptele de tensiune din secundarul transformatorului.

3.6.3. Validarea modelului MM-EXP2

În vederea validării modelului propus se compară rezultatele obținute din simulare cu cele achiziționate de la instalația tehnologică reală. În cazul simulărilor se consideră că lungimea arcului este aceeași atât în faza tehnologică de topire cât și în cea de afânare. Astfel, curenții arcului electric corespunzători celor două faze tehnologice au amplitudini diferite, iar tensiunea de pe arcul electric are aceeași amplitudine.

În fig.3.71a) sunt ilustrate formele de undă pentru tensiunea în punctul de măsură din secundarul transformatorului în cazul celor două faze tehnologice. În faza de topire se operează pe o treaptă mai mare din secundarul transformatorului, iar în faza de afânare se operează cu o putere mai mică, deci o tensiune mai mică în secundar. În fig.3.71b) sunt prezentate variațiile tensiunii arcului în funcție de cele două valori ale tensiunii din secundarul transformatorului (894 V și 837 V). Se poate constata că tensiunea arcului are o formă de undă ce poate fi aproximată cu o formă dreptunghiulară.

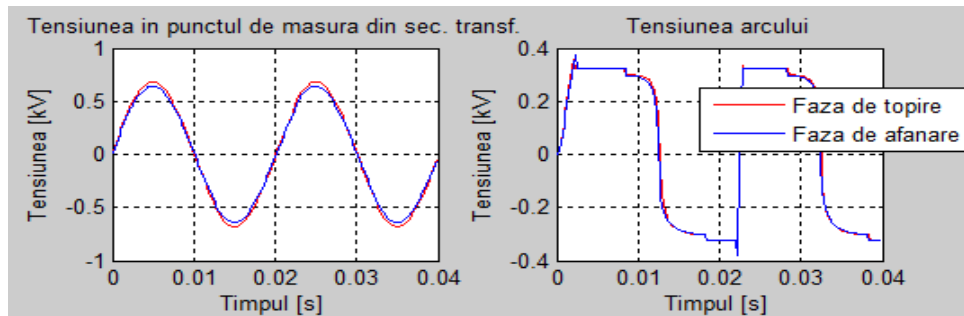


Fig.3.71. Forme de undă obținute în cele două faze tehnologice pentru:
a) tensiunea din punctul de măsură din secundarul transformatorului, b) tensiunea arcului electric.

În fig.3.72 sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea obținută prin simulare, respectiv cea achiziționată de la cuptorul cu arc electric trifazat real, pentru cele două faze tehnologice. Se observă că formele de undă sunt apropiate ca valoare și ca variație, dar cea măsurată de la instalația reală este foarte deformată în faza de topire a metalelor deoarece există diferite perturbații care apar în cadrul procesului, așadar există diferite lungimi de arc.

În fig.3.73 sunt prezentate variațiile curenților achiziționați de la instalația reală și cei simulați pentru ambele faze tehnologice de elaborare ale oțelului. Se poate observa că valorile sunt apropiate ca amplitudine, dar și ca formă de undă, modelul MM-EXP2 fiind mai fidel pentru faza tehnologică de topire, în faza de afânare curenții obținuți din simulare au o amplitudine ceva mai mare comparativ cu cei reali.

În fig.3.74 este ilustrată caracteristica curent-tensiune a cuptorului, iar în fig.3.75 este ilustrată cea a arcului obținute în cele două faze tehnologice.

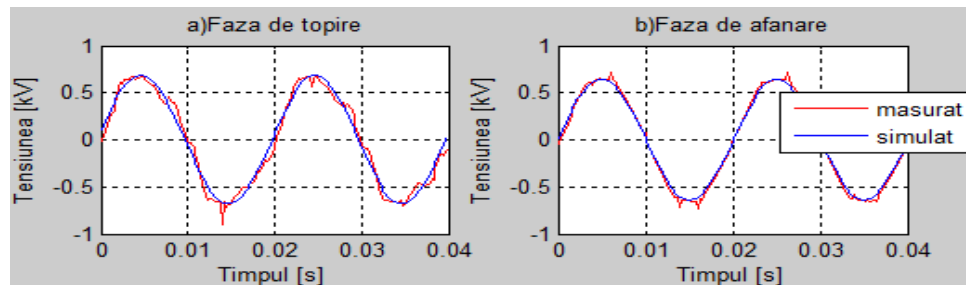


Fig.3.72. Forme de undă pentru tensiunea măsurată și simulată în cele două faze tehnologice.

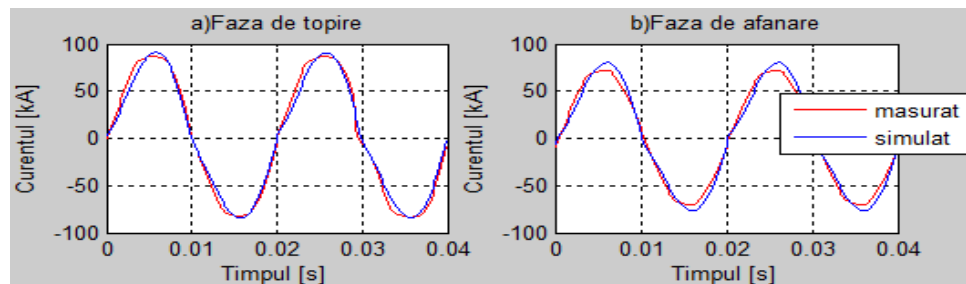


Fig.3.73. Forme de undă pentru curentul măsurat și simulat în cele două faze tehnologice.

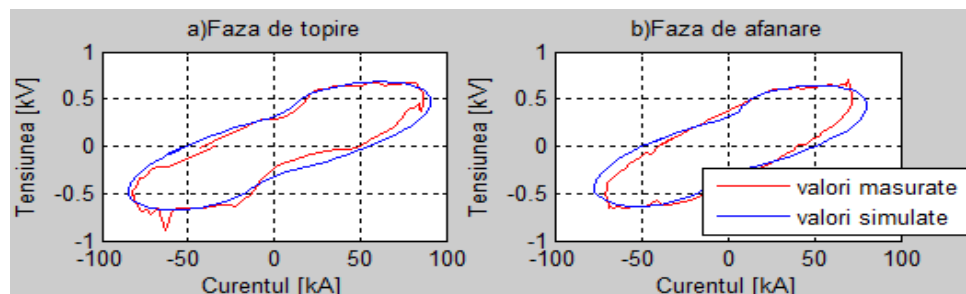


Fig.3.74. Caracteristica curent-tensiune a cuptorului pentru cele două faze tehnologice.

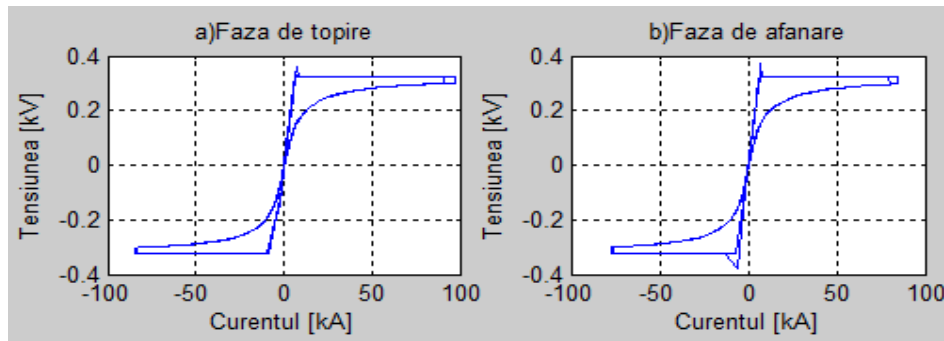


Fig.3.75. Caracteristica curent-tensiune a arcului pentru cele două faze tehnologice.

Concluzii:

În urma simulărilor se pot formula următoarele concluzii referitoare la modelul MM-EXP2 propus:

- permite obținerea unei caracteristici curent-tensiune a cărei formă este similară celei regăsită în literatura de specialitate;
- permite obținerea unei anumite puteri impuse necesare diverselor faze tehnologice
- permite introducerea de perturbații în proces (la lungimea arcului);
- permite obținerea fenomenului de histereză;
- permite evidențierea parametrilor care sunt supervizați în cazul instalației tehnologice reale;
- permite lucrul cu lungimi de arc diferite;
- modelul este mai fidel pentru faza tehnologică de topire a deșeurilor metalice;
- puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime de arc de 31 cm;
- poate fi folosit în sinteza structurilor de conducere.

3.7. Modelul bazat pe relații între lungimea arcului, tensiunea și curentul prin arc (MM-HL)

În cadrul modelului propus MM-HL se pot distinge trei zone de funcționare ale arcului electric reprezentate în fig.3.76 [Ghi13_1], [Ghi13_3], [Ghi16_1], [Ghi16_3]:

- Zona 1 corespunde creșterii tensiunii arcului electric de la tensiunea de stingere, $-U_{str}$ la tensiunea de amorsare a arcului electric, U_{am} , adică se reamorsează arcul electric;
- Zona 2 (care are loc după parcurgerea zonei 1) în care tensiunea arcului scade de la U_{am} la U_{str} zona indicând procesul efectiv de topire al metalelor în care arcul electric este stabil;
- Zona 3 (care are loc după parcurgerea zonei 2) corespunde stingerii arcului și reaprinderii acestuia pentru cealaltă semialternanță a tensiunii de alimentare.

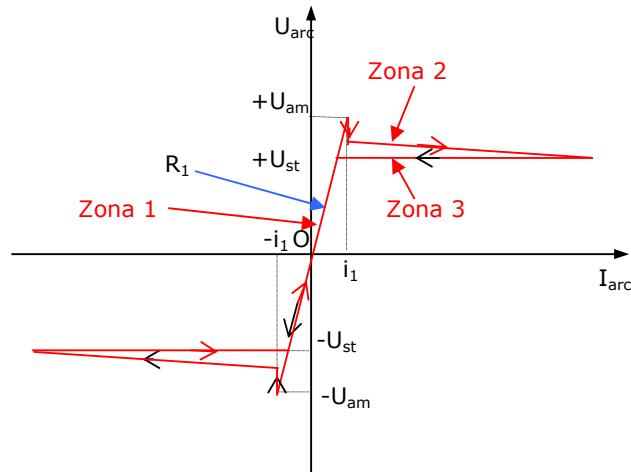


Fig.3.76. Caracteristica curent-tensiune a arcului corespunzătoare MM-HL.

MM-HL (hiperbolic-liniarizat) al arcului electric este prezentat în relațiile (3.36), relațiile (3.36b și 3.36c) pot fi asociate cu ecuația unei hiperbole, iar relația (3.36a) prezintă variația liniarizată din reprezentarea caracteristicii curent-tensiune a arcului.

$$u = \begin{cases} i \cdot R_1, & i < i_1 \text{ si } di \geq 0 \text{ sau } i > -i_1 \text{ si } di < 0, & (a) \\ -U_{st} + \frac{C}{D + |i|}, & i < -i_1 \text{ si } di < 0 \text{ sau } di \geq 0, & (b) \\ U_{st} + \frac{C}{D + |i|}, & i > i_1 \text{ si } di < 0 \text{ sau } di \geq 0, & (c) \end{cases} \quad (3.36)$$

unde:

$$U_{am} = U_{st} + C / D \quad (3.37)$$

$$i_1 = \frac{U_{am}}{R_1} \quad (3.38)$$

Notățiile au următoarele semnificații:

- R_1 - panta dreptei rezultate în urma trasării liniare a caracteristicii curent-tensiune în intervalul $[-i_1, i_1]$;
- i_1 - valoarea curentului atinsă la tensiunea de amorsare a arcului electric (U_{am});
- U_{am} - tensiunea de amorsare a arcului electric;
- U_{st} - tensiunea de stingere a arcului electric;
- C și D - constante ce determină diferența dintre secțiunile caracteristicii curent-tensiune când curentul crește respectiv scade [Pan08].

3.7.1. Analiza influenței parametrilor modelului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric

Și în acest caz a fost implementată o interfață grafică în Matlab prezentată în fig.3.77, parametrii modelului fiind: R_1 , C , D și L_{arc} , în consecință interfața conține 4 butoane de tip *slider* care îi permit utilizatorului să modifice în orice moment valoarea parametrilor modelului.

Parametrii modelului pot fi modificați într-un anumit interval: $R_1 \in [0; 0,1]$ Ω , $C \in [15000; 230000]$ W , $D \in [1000; 8000]$ A , $L_{arc} \in [0; 60]$ Ω , U_{am} fiind obținută utilizând relația (3.24).

În fig.3.78 este prezentată schema Simulink echivalentă schemei electrice de funcționare a cuptorului cu arc electric.

În fig.3.79 este ilustrată caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric pentru MM-HL (3.36), în care s-au utilizat următoarele valori pentru parametrii modelului: $U_{am}=390$ V , $U_{st}=340$ V , $R_1=0,05$, $C=190000$ W , $D=5000$ A și $L_{arc}=30$ cm .

S-a analizat influența fiecărui parametru al modelului MM-HL asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric, scenariul de simulare și principiul de modificare al valorilor parametrilor modelului fiind aceleași cu cele utilizate la MM-LIN și MM-EXP1. În consecință se prezintă sintetic doar rezultatele obținute prin simulare.

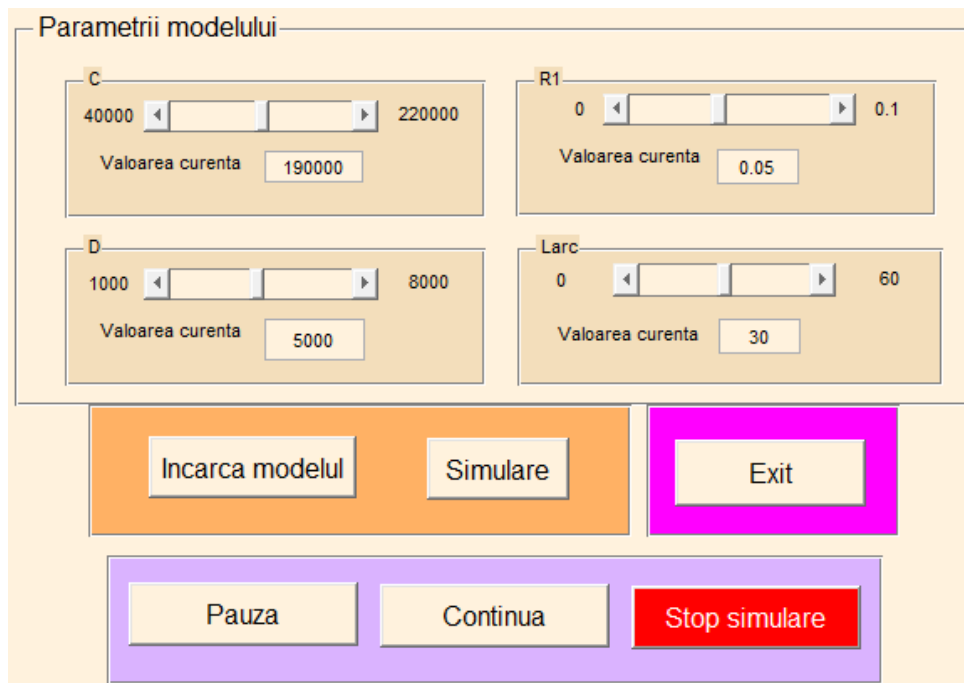


Fig.3.77. Interfața grafică utilizator pentru simularea MM-HL.

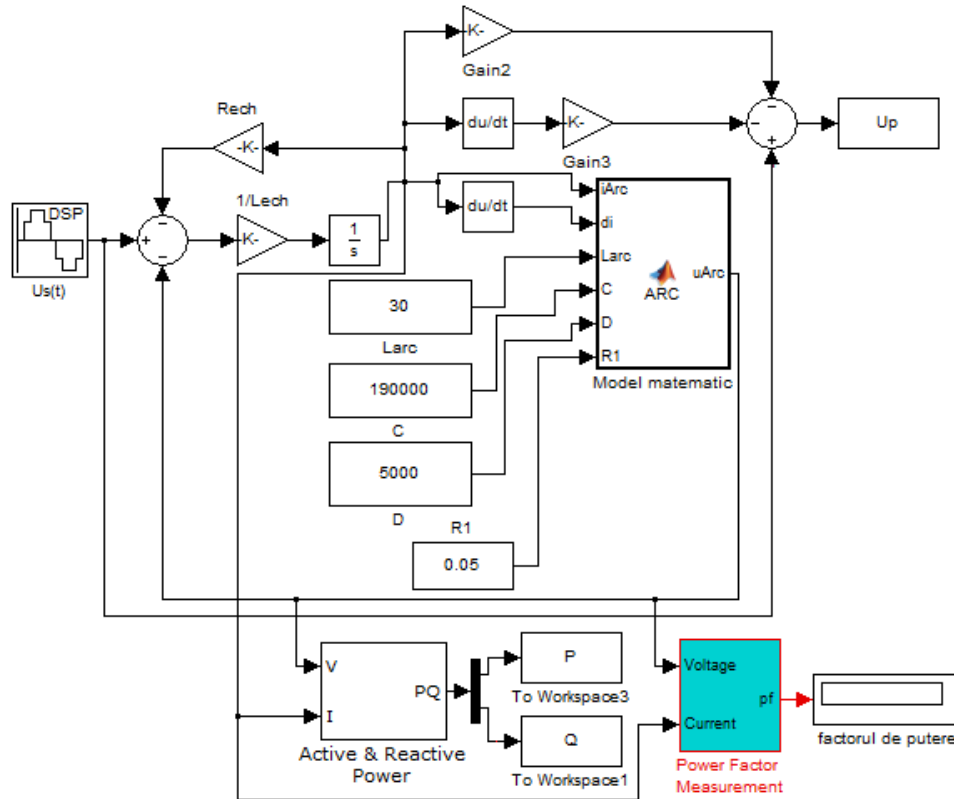


Fig.3.78. Schema Simulink aferentă implementării MM-HL.

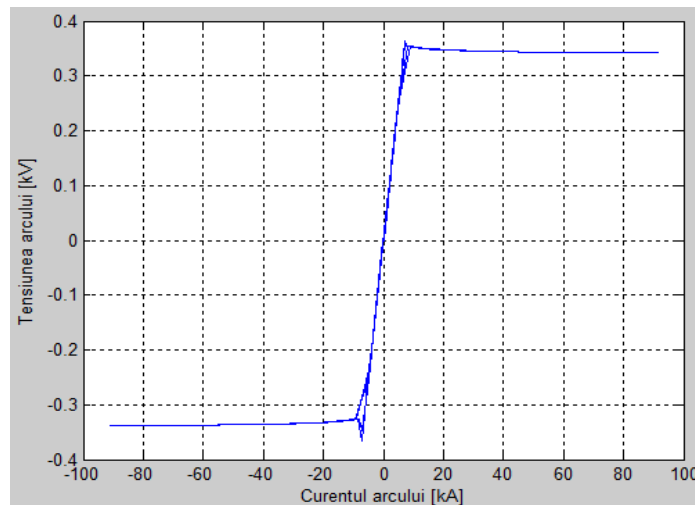


Fig.3.79. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric.

Modificarea parametrului R_1

În fig.3.80a) este ilustrată variația parametrului R_1 în domeniul $0,01$ și $0,09 \Omega$. În funcție de aceste variații au fost obținute următoarele grafice: în fig.3.80b) se prezintă variația puterilor activă și reactivă ale arcului, în fig.3.81 este reprezentată caracteristica curent-tensiune a arcului și a cuptorului, iar în fig.3.82 sunt prezentate variațiile curentului și tensiunii arcului.

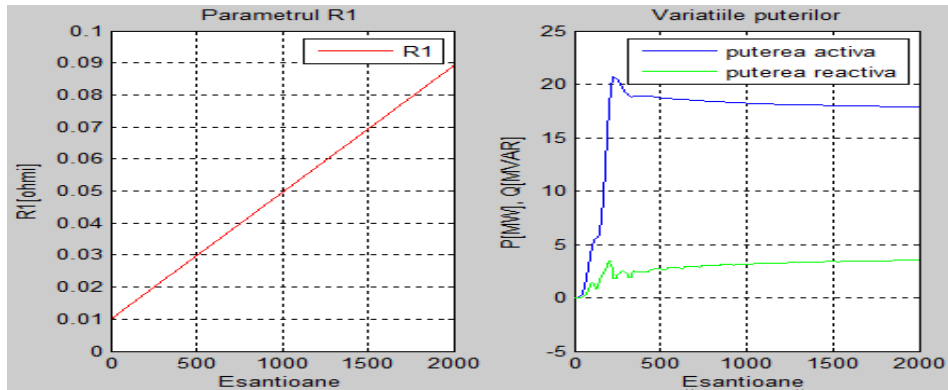


Fig.3.80. a) Variația parametrului R_1 , b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.

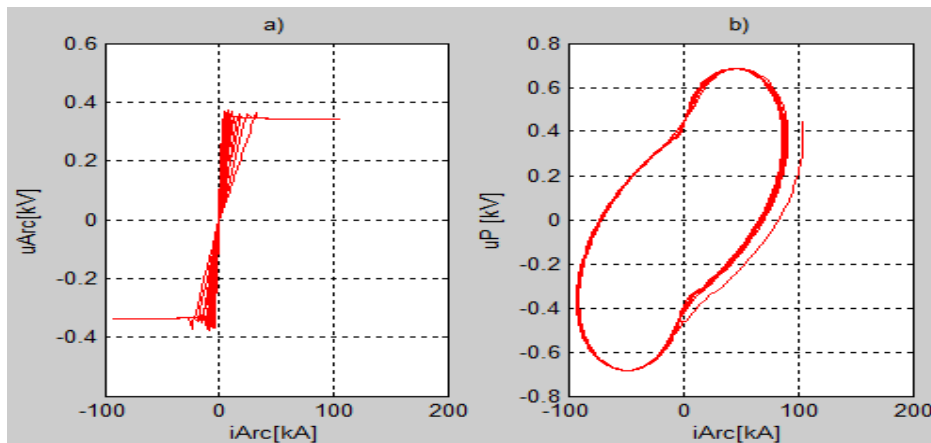


Fig.3.81. a) Caracteristica curent-tensiune a) a arcului electric, b) a cuptorului.

Modificarea parametrului C

În fig.3.83a) este ilustrată variația parametrului C în domeniul $40000 W$ și $220000 W$. Și în acest caz s-a ales un domeniu de variație astfel încât să se obțină o caracteristică curent-tensiune asemănătoare celei din literatura de specialitate. Analiza variației parametrului C asupra principalelor mărimi electrice care caracterizează funcționarea cuptorului a condus la obținerea graficelor prezentate în fig.3.83b), fig.3.84 și fig.3.85.

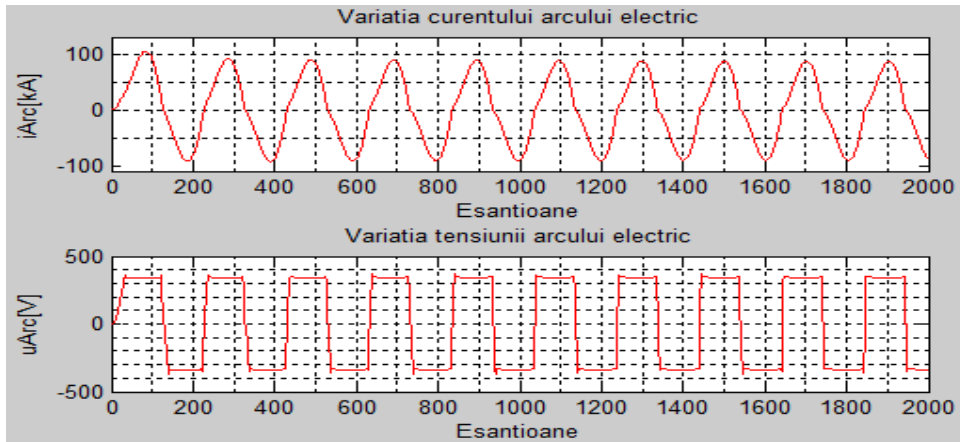


Fig.3.82. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

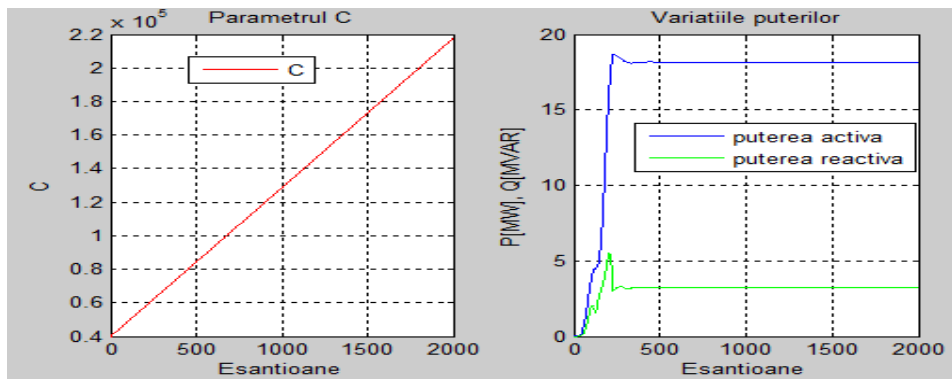


Fig.3.83. a) Variația parametrului C, b) Variațiile puterilor arcului.

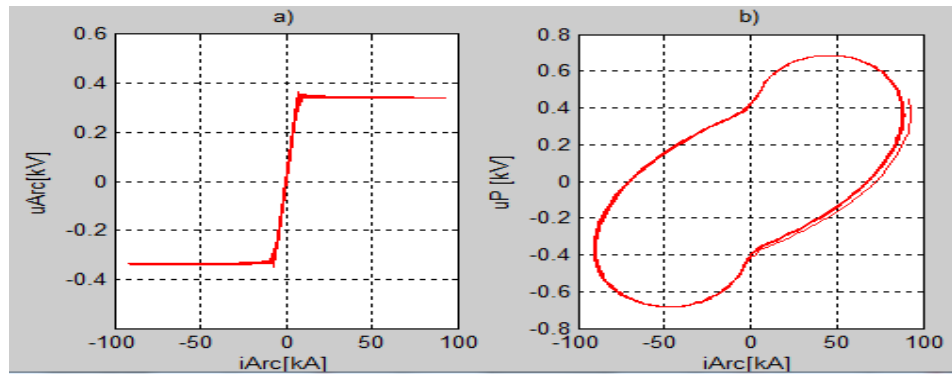


Fig.3.84. a) Caracteristica curent-tensiune a arcului electric, b) Caracteristica curent-tensiune a cuptorului.

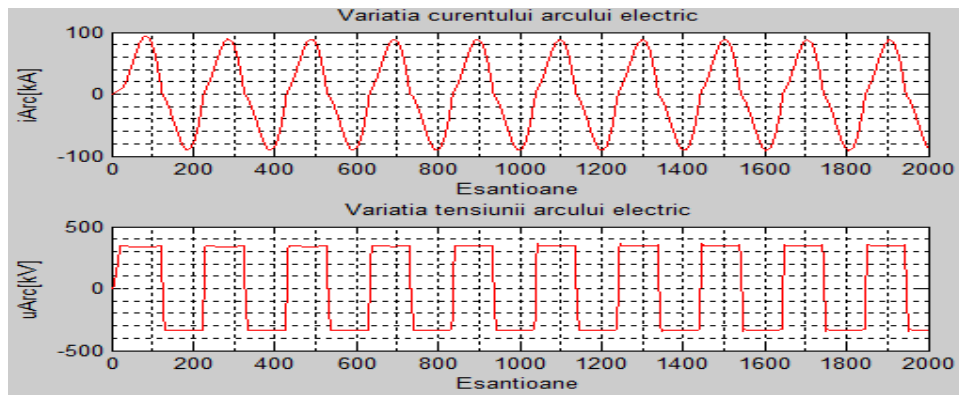


Fig.3.85. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

Modificarea parametrului D

În fig.3.86a) este ilustrată variația parametrului D în domeniul 1000 A și 8000 A . Și în acest caz s-a ales un domeniu de variație astfel încât să se obțină o caracteristică curent-tensiune de forma celei prezentate în fig.3.5. Analiza variației parametrului D asupra principalelor mărimi electrice care caracterizează funcționarea cuptorului a condus la obținerea graficelor prezentate în fig.3.86b), fig.3.87, fig.3.88.

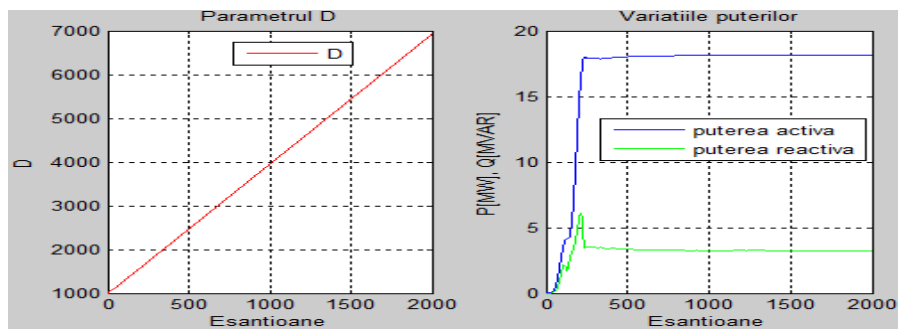
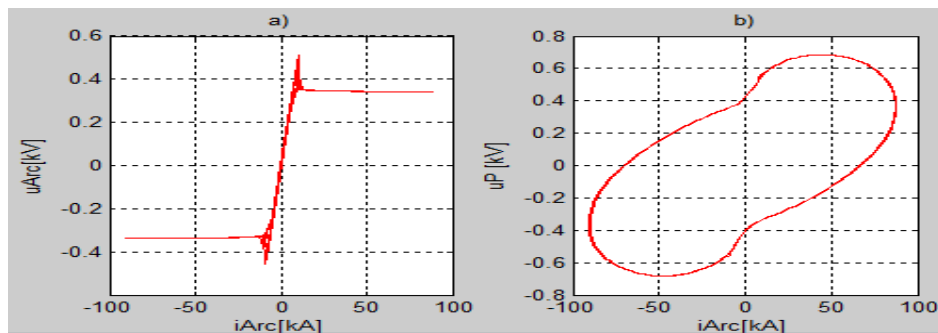
Fig.3.86. a) Variația parametrului D , b) Variația puterilor arcului.

Fig.3.87. Caracteristica curent-tensiune a) a arcului electric, b) a cuptorului.

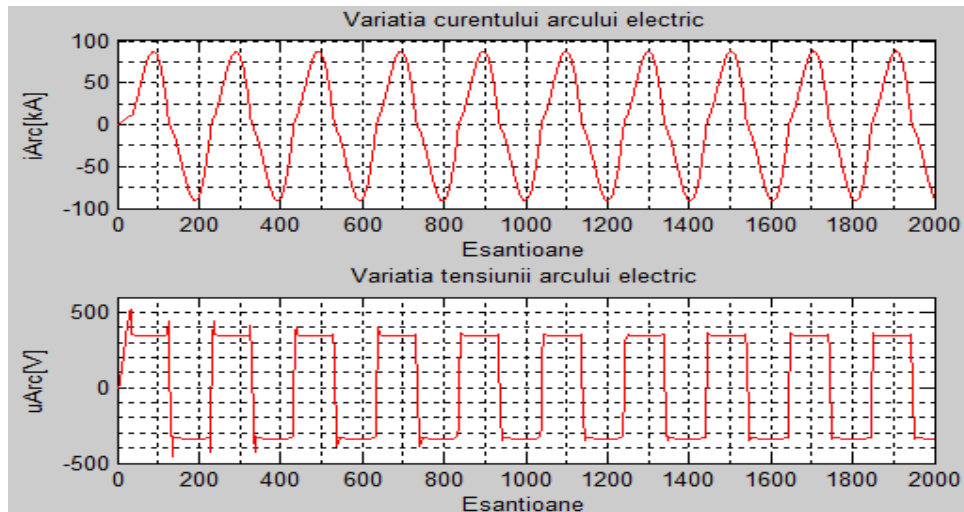


Fig.3.88. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

Modificarea lungimii arcului electric, L_{arc}

Pentru a analiza influența lungimii arcului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric, s-a ales un domeniu de variație între 0 și 60 cm, aceste fig.3.89a).

Analiza influenței lui L_{arc} asupra mărimilor electrice ce caracterizează funcționarea cuptorului a condus la obținerea rezultatelor prezentate în fig.3.89b)-fig.3.91.

Puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime de arc optimă de 31 cm.

În funcție de variațiile tensiunii, curentului și puterii active ale arcului electric s-au ales valorile $R_f=0,045 \Omega$, $C=190000 \text{ W}$, $D=5000 \text{ A}$ și $L_{arc}=31 \text{ cm}$, din aceleași considerente prezentate la MM-LIN și MM-EXP1.

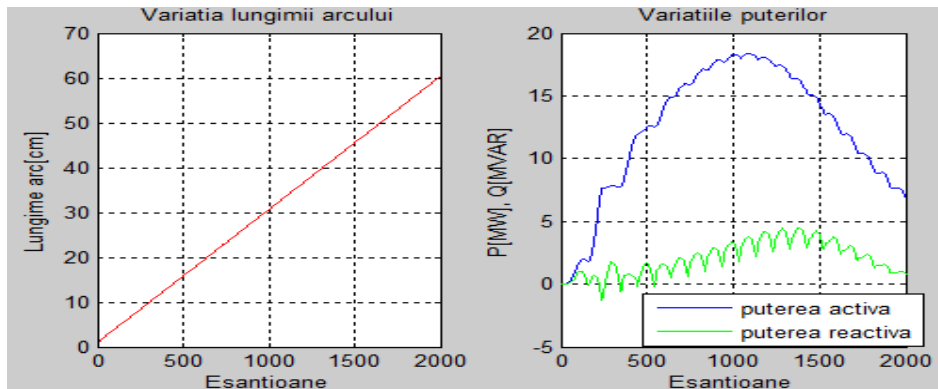


Fig.3.89. a) Variația lungimii arcului, b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.

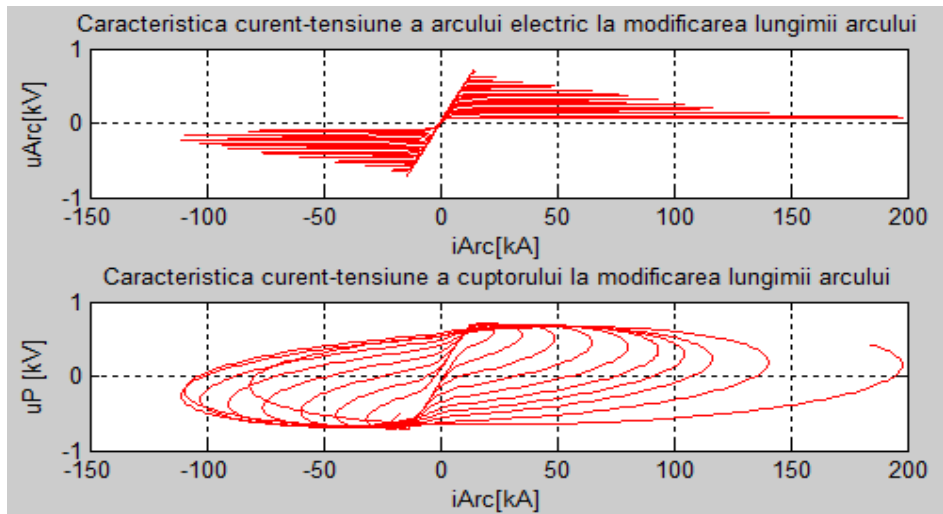


Fig.3.90. Caracteristica curent-tensiune a arcului la modificarea lungimii arcului.

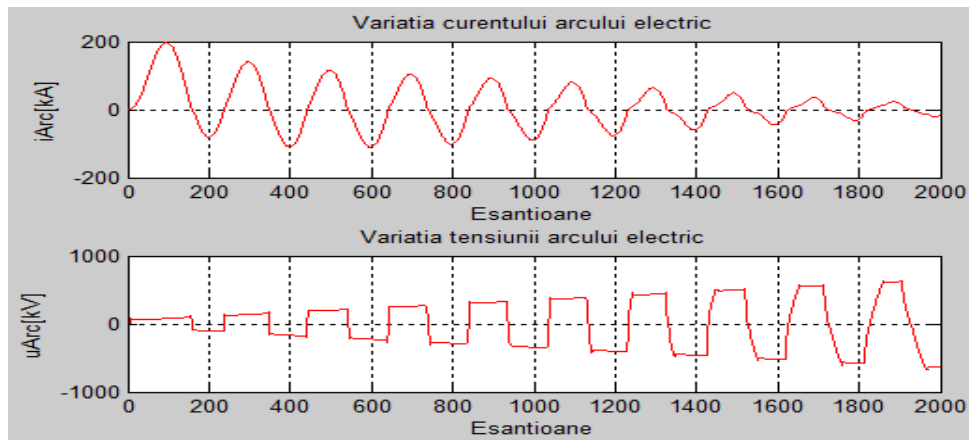


Fig.3.91. Formele de undă ale curentului și tensiunii arcului electric la modificarea lungimii arcului.

3.7.2. Influența tensiunii din secundarul transformatorului, U_s , asupra tensiunii, curentului și puterii arcului

Și în acest caz se utilizează aceleași valori ale tensiunii din secundarul transformatorului care au fost utilizate la modelul MM-LIN. În acest context, formele de undă pentru tensiunea din punctul de măsură din secundarul transformatorului au aceeași variație ca și în cazul MM-LIN, în consecință nu vor mai fi ilustrate. Cele cinci trepte de tensiune utilizate sunt: 960 V (treapta 18), 925 V (treapta 17), 894 V (treapta 16), 864 V (treapta 15) și 837 V (treapta 14).

În fig.3.92a) sunt prezentate formele de undă pentru curentul arcului, utilizând MM-HL, obținute în funcție de cele cinci trepte de tensiune din secundarul transformatorului. Se poate constata că în cazul unei tensiuni mai mari din

secundarul transformatorului se obține un curent mai mare, iar dacă tensiunea este mai mică, atunci și curentul este mai mic. Aceste afirmații sunt valabile în cazul în care tensiunea de stingere a arcului electric este aceeași pentru toate treptele de tensiune din secundarul transformatorului. Forma de undă a curentilor este aproximativ sinusoidală. În fig.3.92b) sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea arcului, utilizând MM-HL obținute în funcție de aceleași cinci trepte de tensiune din secundarul transformatorului. Se poate constata că indiferent de treapta de tensiune pe care lucrează transformatorul cuptorului se obține aceeași variație a tensiunii arcului. Forma de undă a tensiunilor este aproximativ dreptunghiulară.

Fig.3.93a) și fig.3.93b) prezintă caracteristicile curent-tensiune ale arcului electric, respectiv ale cuptorului obținute în funcție de cele cinci valori care pot fi setate pentru tensiunea din secundarul transformatorului.

Fig.3.94a) prezintă puterea activă disipată în arcul electric, iar fig.3.94b) prezintă puterea reactivă a arcului obținute pentru aceleași trepte de tensiune din secundarul transformatorului. Puterea activă maximă a arcului electric este de 21,6 MW obținută pentru treapta 18 de tensiune a transformatorului.

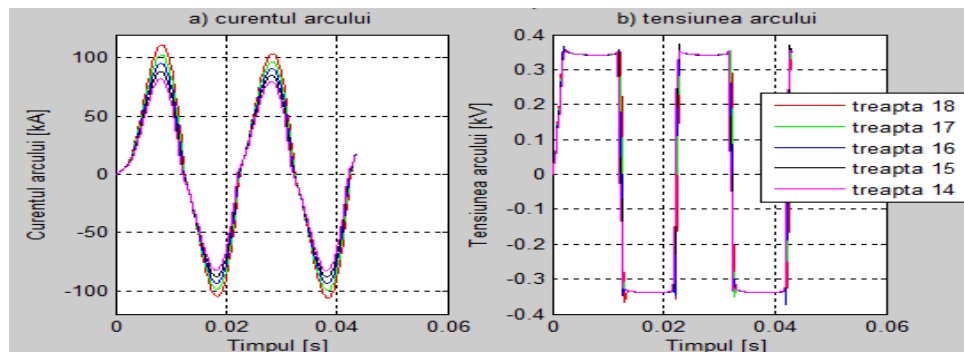


Fig.3.92. Forme de undă la modificarea tensiunii de alimentare pentru a) curentul arcului electric, b) tensiunea arcului electric.

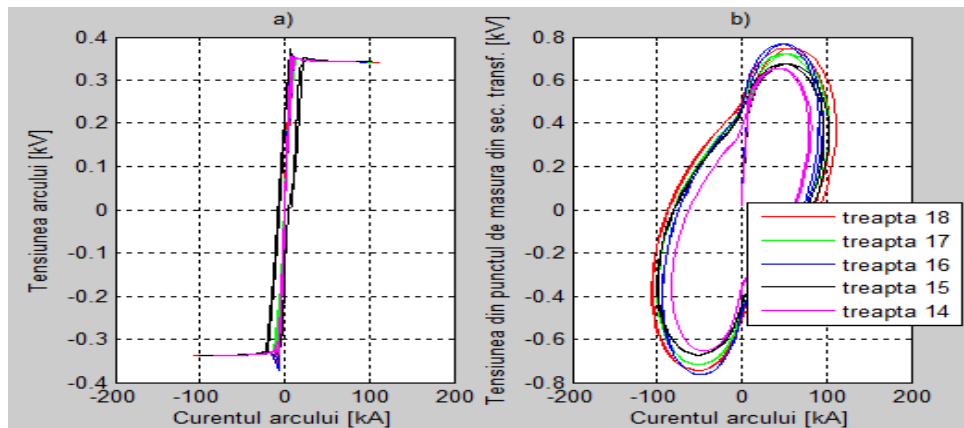


Fig.3.93. Caracteristica curent-tensiune la modificarea tensiunii de alimentare a) a arcului electric, b) a cuptorului.

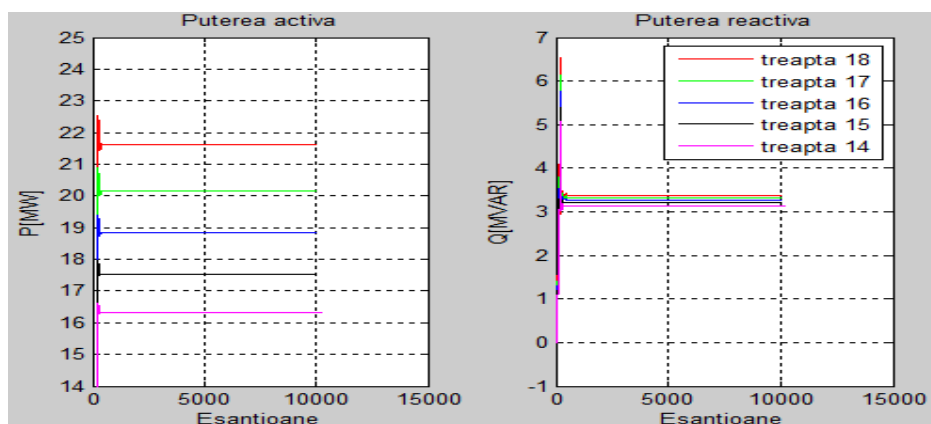


Fig.3.94. Variația puterilor în funcție de treptele de tensiune din secundarul transformatorului.

3.7.3. Validarea modelului MM-HL

Pentru validarea MM-HL propus se compară rezultatele obținute din simulare cu cele achiziționate de la instalația tehnologică reală. În simulare se consideră că lungimea arcului este aceeași atât în faza de topire cât și în faza de afânare. În acest context curenții arcului electric aferenți celor două faze tehnologice au amplitudini diferite, iar tensiunea arcului are aceeași amplitudine.

În fig.3.95a) sunt prezentate formele de undă ale tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului pentru cele două faze tehnologice de elaborare ale oțelului. În faza de topire se operează pe o treaptă mai mare, comparativ cu faza tehnologică de afânare. În fig.3.95b) sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea arcului obținute pentru două tensiuni de linie din secundarul transformatorului (894 V și 837 V). Se poate constata că tensiunea arcului are o formă de undă ce poate fi aproximată cu o formă dreptunghiulară.

În fig.3.96 sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea obținută prin simulare, respectiv cea achiziționată de la cuptorul cu arc electric trifazat real, pentru cele două faze tehnologice. Se observă că formele de undă sunt apropiate ca valoare și ca variație.

În fig.3.97 sunt prezentate variațiile curentului măsurat de la instalația reală și cel simulat pentru ambele faze tehnologice de elaborare ale oțelului. Se poate observa că valorile sunt apropiate ca amplitudine și ca formă de undă, modelul MM-HL fiind mai fidel pentru faza tehnologică de afânare.

În fig.3.98 și fig.3.99 sunt ilustrate caracteristicile curent-tensiune ale cuptorului, respectiv cea a arcului în fazele tehnologice de topire și de afânare. Se poate constata că aceste caracteristici sunt apropiate ca variație în special în faza de topire. Din fig.3.99 se poate identifica faptul că această caracteristică este puternic neliniară, fiind liniarizată doar pe anumite porțiuni.

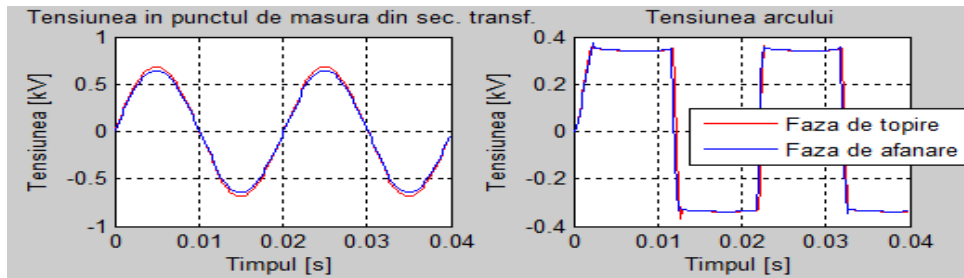


Fig.3.95. Forme de undă obținute în cele două faze tehnologice pentru:
 a) tensiunea din punctul de măsură din secundarul transformatorului, b) tensiunea arcului electric.

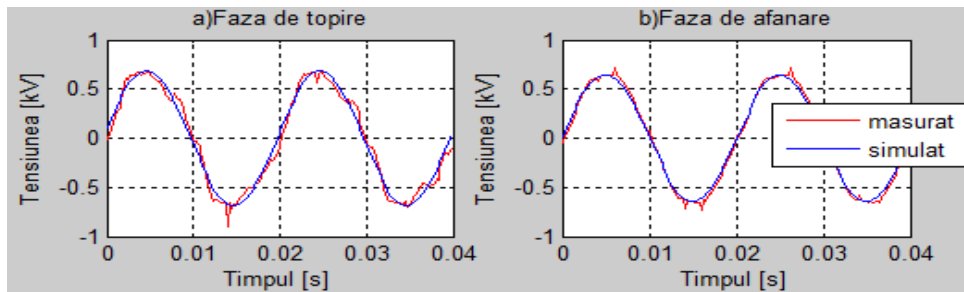


Fig.3.96. Forme de undă pentru tensiunea măsurată și simulată în cele două faze tehnologice.

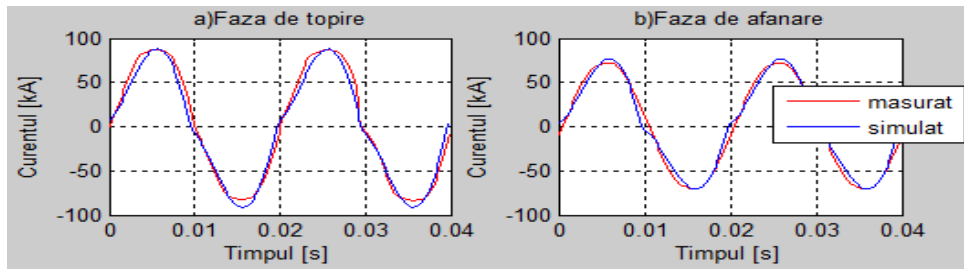


Fig.3.97. Forme de undă pentru curentul măsurat și simulat în cele două faze tehnologice.

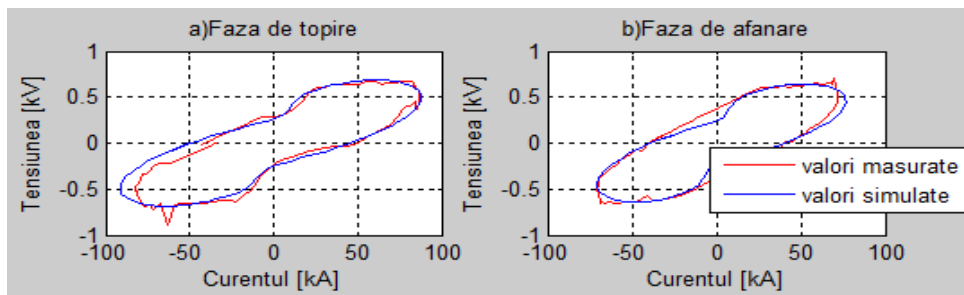


Fig.3.98. Caracteristica curent-tensiune pentru cele două faze tehnologice (tensiune din punctul de măsură din secundarul transformatorului).

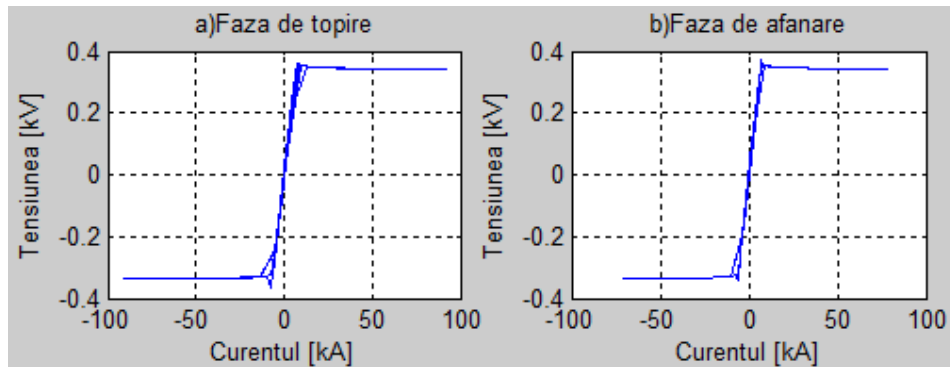


Fig.3.99. Caracteristica curent-tensiune pentru cele două faze tehnologice (tensiunea arcului electric).

Concluzii:

În urma simulărilor se pot formula următoarele concluzii referitoare la modelul MM-HL propus:

- permite obținerea unei caracteristici curent-tensiune a cărei formă este similară celei regăsită în literatura de specialitate;
- permite obținerea unei anumite puteri impuse necesare diverselor faze tehnologice;
- permite introducerea de perturbații în proces (la lungimea arcului);
- permite obținerea fenomenului de histereză;
- permite evidențierea parametrilor care sunt supervizați în cazul instalației tehnologice reale;
- permite lucrul cu lungimi de arc diferite;
- modelul este mai fidel pentru faza tehnologică de afânare a deșeurilor metalice;
- puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime de arc de 31 cm;
- poate fi folosit în sinteza structurilor de conducere.

3.8. Modelul dual-exponențial bazat pe caracteristica curent-tensiune (MM-DE)

Modelul MM-DE propus (relațiile 3.39) este obținut luând în considerare modelele MM-EXP1 și MM-EXP2, putându-se distinge patru zone de funcționare, două dintre acestea prezentând variație exponențială (fig.3.100) [Ghi13_4]:

- Zona 1 corespunde creșterii tensiunii arcului electric de la tensiunea de stingere, U_{st} , la tensiunea de amorsare a arcului electric, U_{am} (se reamorsează arcul electric);
- Zona 2 (care are loc după parcurgerea zonei 1) corespunde scăderii tensiunii arcului de la U_{am} la o tensiune, U_c obținută în funcție de o anumită constantă, c . Această zonă coincide cu începerea procesului de topire, iar tensiunea are o variație exponențială.
- Zona 3 (care are loc după parcurgerea zonei 2) în care tensiunea arcului este menținută constantă. Această zonă indică procesul efectiv de topire al metalelor în care arcul electric este stabil;

3.8 – Modelul dual-exponențial bazat pe caracteristica curent-tensiune (MM-DE) 121

- Zona 4 (care are loc după parcurgerea zonei 3) corespunde stingerii arcului și reaprinderii acestuia pentru cealaltă semialternanță a tensiunii de alimentare. În această zonă tensiunea prezintă o variație exponențială.
În fig.3.100 i_1 reprezintă curentul aferent tensiunii U_{am} a arcului electric, pentru fiecare semialternanță a tensiunii de alimentare a cuptorului.

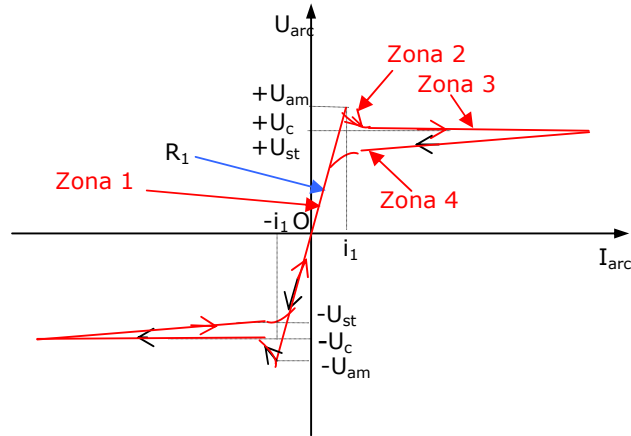


Fig.3.100. Caracteristica curent-tensiune a arcului electric corespunzătoare modelului MM-DE.

Având în vedere că MM-DE este o combinație a modelelor MM-EXP1 și MM-EXP2(paragrafele 3.5 și 3.6) aspectele și notațiile prezentate referitoare la cele două modele rămân valabile și nu au mai fost reluate și în acest caz.

$$u = \begin{cases} -U_c + (U_c - U_{am}) \cdot e^{\frac{i_1+i}{i_1}} & i \leq -i_1 \text{ și } \frac{di}{dt} \geq 0 \\ R_1 \cdot i & i < i_1 \text{ și } \frac{di}{dt} \geq 0 \\ \frac{U_c + (U_{am} - U_c) \cdot e^{\frac{i_1-i}{i_1}}}{I} \cdot i & i \geq i_1 \text{ și } \frac{di}{dt} \geq 0 \\ \frac{[U_c + (U_{am} - U_c) \cdot e^{-I}]}{I + i_1} \cdot i & \frac{di}{dt} < 0 \end{cases} \quad (3.39)$$

cu:

$$I = |i(t)| \quad (3.40)$$

$$i_1 = \frac{U_{am}}{R_1} \quad (3.41)$$

$$U_c = \frac{U_{am}}{c} \quad (3.32)$$

Notațiile având următoarele semnificații :

- R_I - panta dreptei rezultate în urma trasării liniare a caracteristicii curent-tensiune în intervalul $[-i_1, i_1]$;
- i_1 - valoarea curentului atinsă la tensiunea de amorsare a arcului electric (U_{am});
- U_{am} - tensiunea de amorsare a arcului electric;
- U_c - valoarea constantă a tensiunii arcului electric care se calculează cu (3.32) și care corespunde fazei doi din cadrul procesului de topire;
- c - o constantă ce are valoarea 1,2;
- I - este valoarea absolută a curentului arcului electric;
- u - tensiunea arcului electric;
- i - curentul arcului electric.

3.8.1. Analiza influenței parametrilor modelului asupra tensiunii și curentului arcului electric

În vederea realizării unei analize comparative a MM-DE se utilizează aceleași măsurători achiziționate de la instalația reală considerată.

Și în acest caz a fost implementată o interfață grafică în Matlab prezentată în fig.3.101, parametrii modelului fiind: R_I , c , L_{arc} în consecință interfața conține 3 butoane de tip *slider* care îi permit utilizatorului să modifice în orice moment valoarea parametrilor modelului.

Parametrii modelului pot fi modificați într-un anumit interval: $R_I \in [0; 0,1]$ Ω , $c \in [0,1; 2,5]$ Ω și $L_{arc} \in [0; 60]$ Ω , U_{am} fiind obținută utilizând relația (3.24).

În fig.3.102 este prezentată schema Simulink echivalentă schemei electrice de funcționare a cuptorului cu arc electric.

În fig.3.103 este ilustrată caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric pentru MM-DE (relația 3.39), în care s-au utilizat următoarele valori pentru parametrii modelului: $U_{am}=390$ V, $U_{st}=340$ V, $R_I=0,05$, $L_{arc}=30$ cm și $c=1,2$.

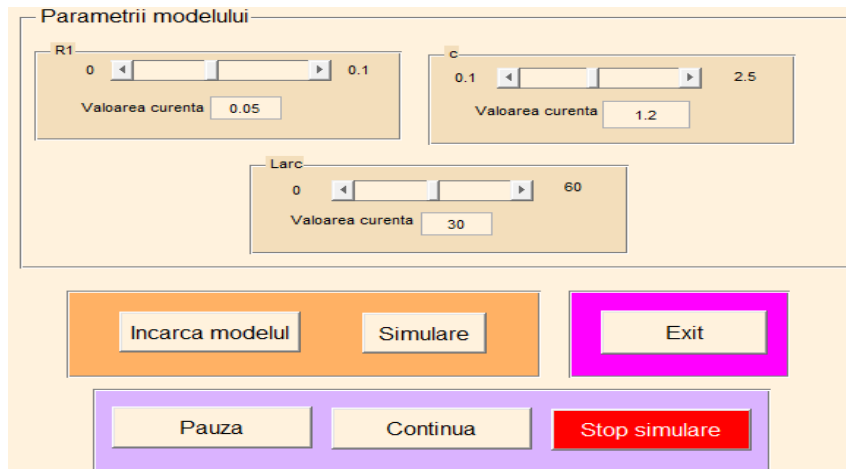


Fig.3.101. Interfața grafică utilizator pentru simularea modelului MM-DE.

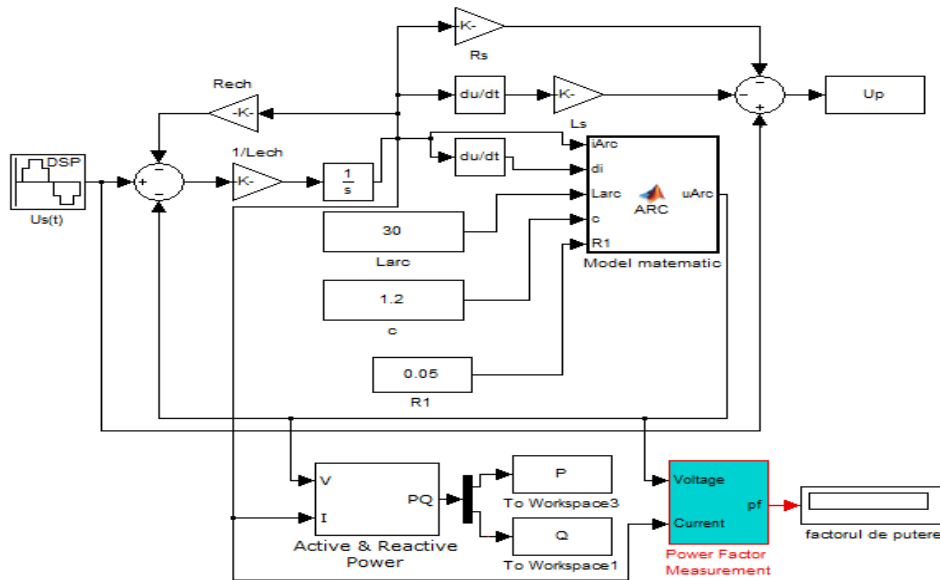


Fig.3.102. Schema Simulink aferentă implementării MM-DE.

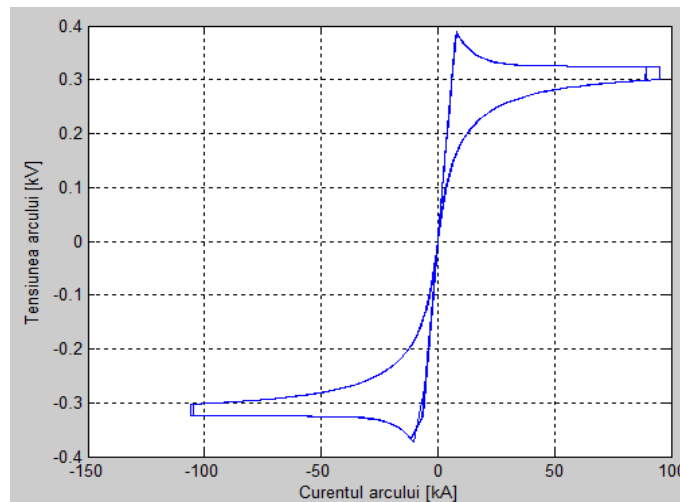


Fig.3.103. Caracteristica statică curent-tensiune a arcului electric.

S-a analizat influența fiecărui parametru al modelului MM-DE asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric, scenariul de simulare și principiul de modificare al valorilor parametrilor modelului fiind aceleași cu cele utilizate la MM-LIN și MM-EXP1. În consecință se prezintă sintetic doar rezultatele simulărilor.

Modificarea parametrului R_1

În fig.3.104a) este ilustrată variația parametrului R_1 . În funcție de aceste variații au fost obținute următoarele grafice: în fig.3.104b) se prezintă variația

puterilor activă și reactivă ale arcului, în fig.3.105 este reprezentată caracteristica curent-tensiune a arcului și a cuptorului, iar în fig.3.106 sunt prezentate variațiile curentului și tensiunii arcului.

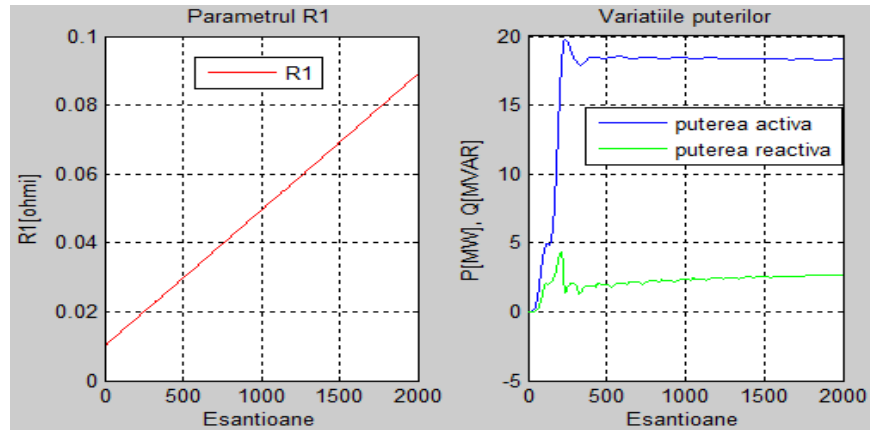


Fig.3.104. a) Variația parametrului R_1 , b) Variațiile puterilor arcului.

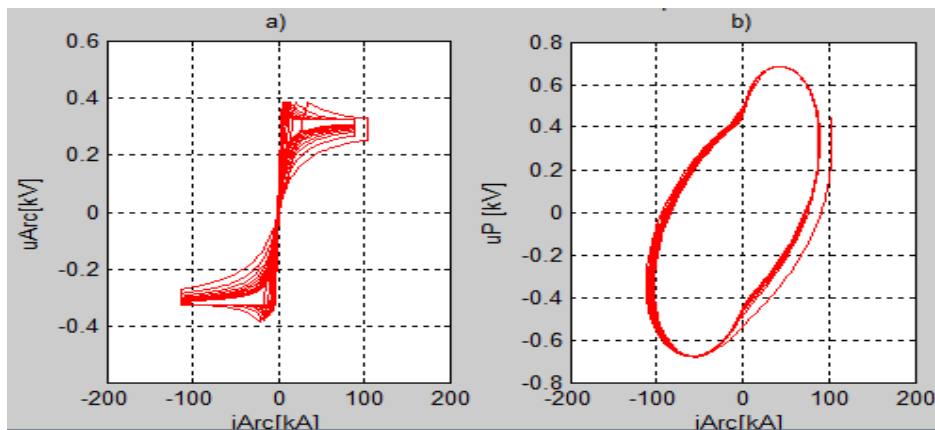


Fig.3.105. Caracteristica curent-tensiune a) a arcului electric, b) a cuptorului.

Modificarea parametrului c

În fig.3.107a) este ilustrată variația parametrului c în domeniul $0,8$ și $2,4$. Și în acest caz s-a ales un domeniu de variație astfel încât să se obțină o caracteristică curent-tensiune asemănătoare celei din literatura de specialitate. Analiza variației parametrului c asupra principalelor mărimi electrice care caracterizează funcționarea cuptorului a condus la obținerea graficelor prezentate în fig.3.107b), fig.3.108 și fig.3.109.

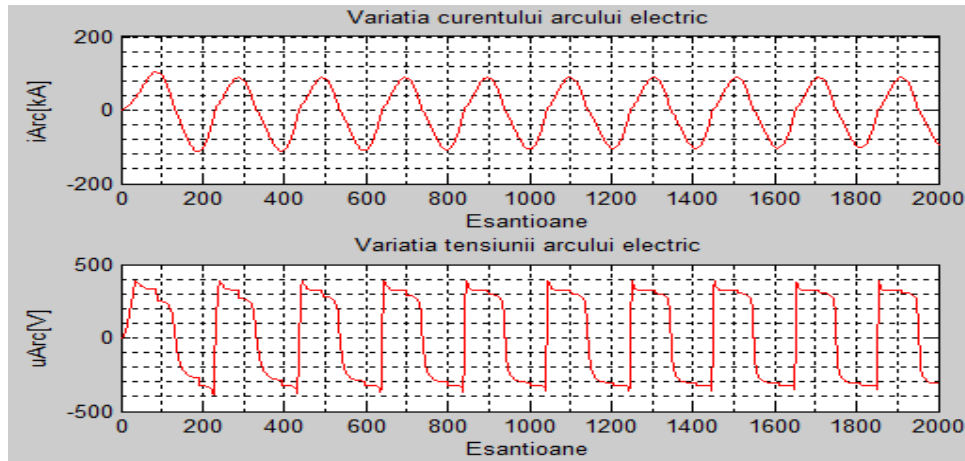


Fig.3.106. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

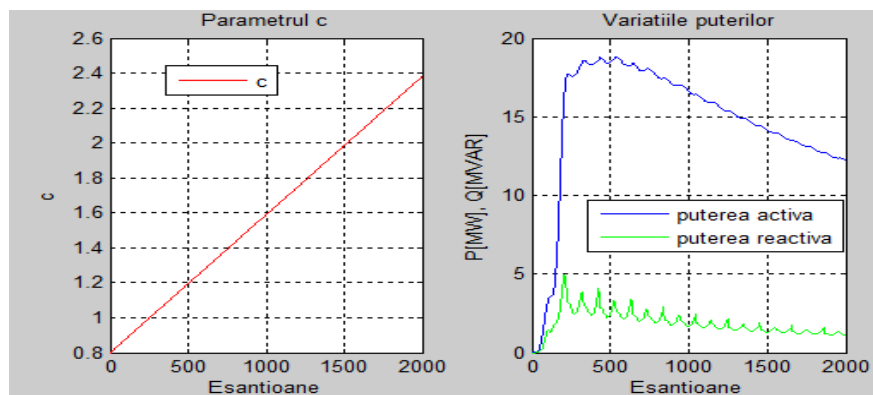


Fig.3.107. a) Variația coeficientului c , b) Variațiile puterilor arcului.

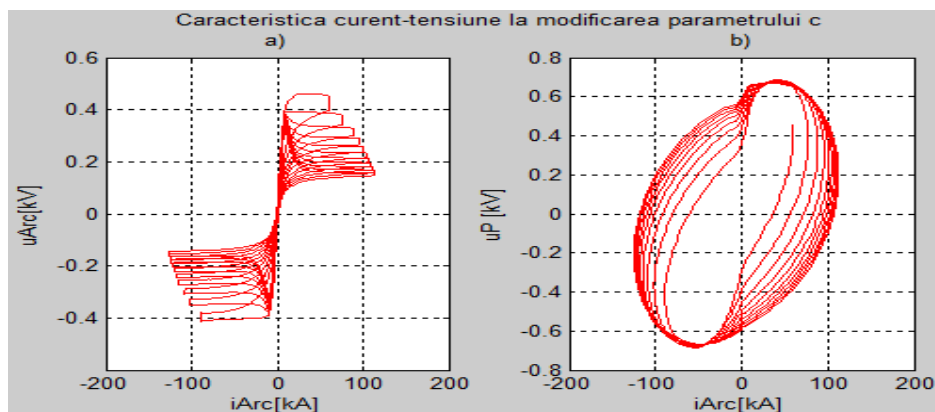


Fig.3.108. a) Caracteristica curent-tensiune a arcului electric, b) Caracteristica curent-tensiune a arcului electric măsurată în punctul de măsură din secundarul transformatorului cuptorului.

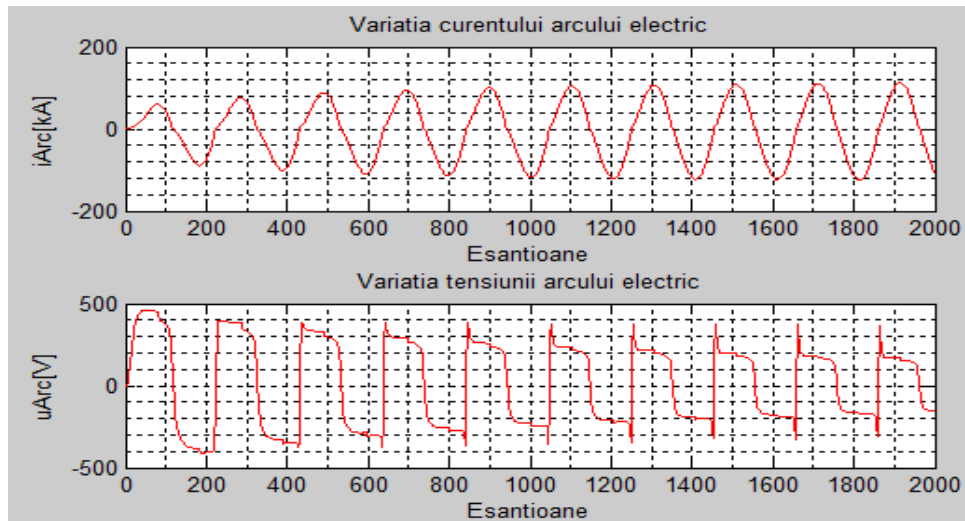


Fig.3.109. a) Variația curentului arcului electric, b) Variația tensiunii arcului electric.

Modificarea lungimii arcului electric, L_{arc}

Analiza influenței lui L_{arc} asupra mărimilor electrice ce caracterizează funcționarea cuptorului a condus la obținerea rezultatelor prezentate în fig.3.110b)-fig.3.112.

Puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime de arc optimă de aproximativ 37 cm .

În funcție de variațiile tensiunii, curentului și puterii active ale arcului electric s-au ales valorile $R_1=0,05\ \Omega$, $c=1,2$ și $L_{arc}=37\text{ cm}$, deoarece curentul se regăsește în regimul de curent neîntrerupt, tensiunea are o formă de undă care poate fi aproximată cu o formă dreptunghiulară, iar puterea activă disipată în arcul electric este maximă.

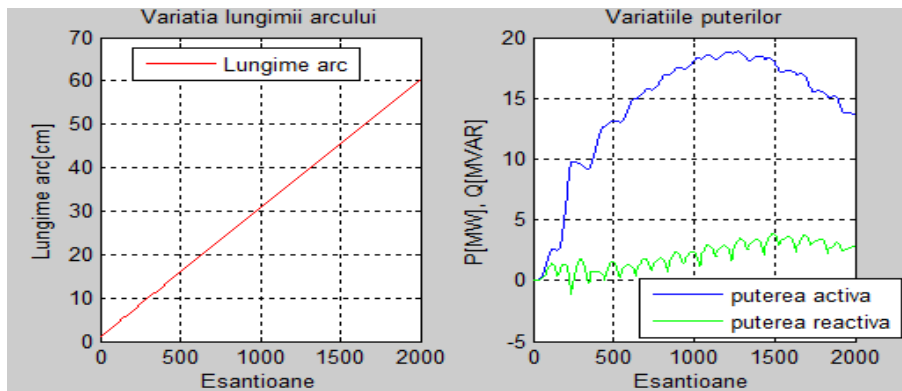


Fig.3.110. a) Variația lungimii arcului, b) Variațiile puterilor activă și reactivă ale arcului.

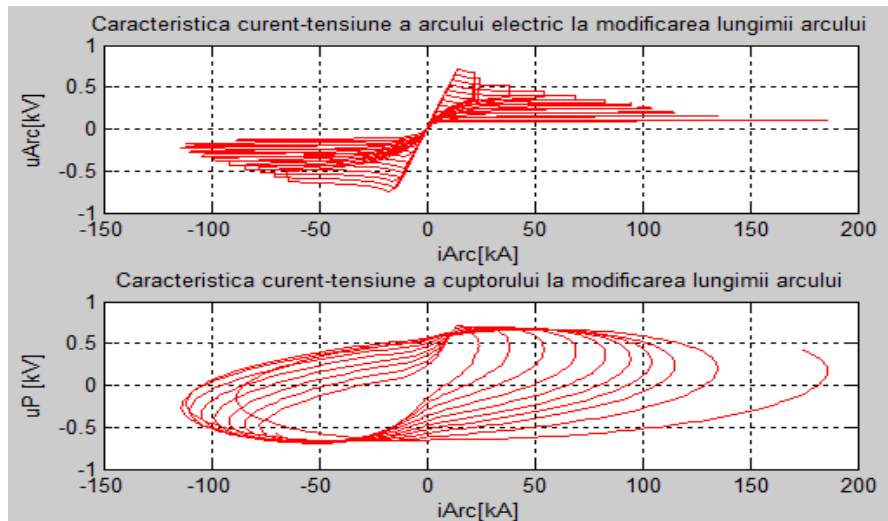


Fig.3.111. Caracteristica curent-tensiune la modificarea lungimii arcului.

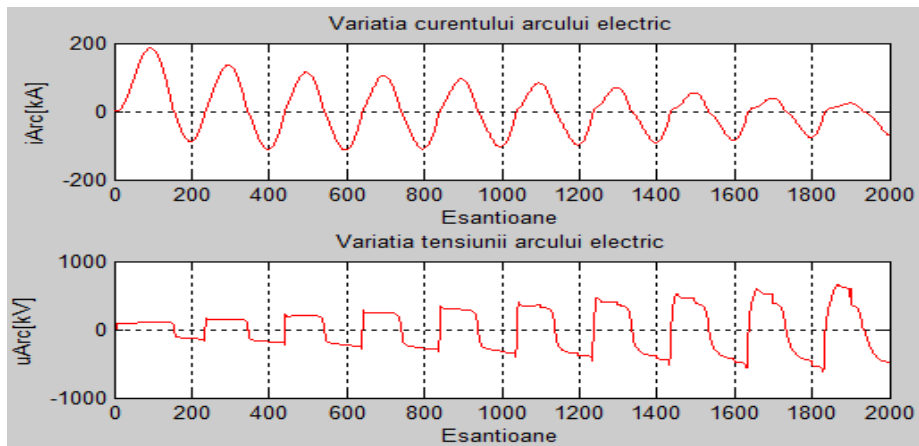


Fig.3.112. Formele de undă ale curentului și tensiunii arcului electric la modificarea lungimii arcului.

3.8.2. Influența tensiunii din secundarul transformatorului, U_s , asupra tensiunii, curentului și puterii arcului

Și în acest caz se utilizează aceleași valori ale tensiunii din secundarul transformatorului care au fost utilizate la modelul MM-LIN. În acest context, formele de undă pentru tensiunea din punctul de măsură din secundarul transformatorului au aceeași variație ca și în cazul MM-LIN, în consecință nu vor mai fi ilustrate. Cele cinci trepte de tensiune utilizate sunt: 960 V (treapta 18), 925 V (treapta 17), 894 V (treapta 16), 864 V (treapta 15) și 837 V (treapta 14).

În fig.3.113a) sunt prezentate formele de undă pentru curentul arcului, utilizând modelul MM-DE, forme obținute în funcție de cele cinci trepte de tensiune

din secundarul transformatorului. Se poate constata că în cazul unei tensiuni mai mari din secundarul transformatorului se obține un curent mai mare, iar dacă tensiunea este mai mică, atunci și curentul este mai mic. Aceste afirmații sunt valabile în cazul în care tensiunea de stingere a arcului electric este aceeași pentru toate treptele de tensiune din secundar. Forma de undă a curentilor este aproximativ sinusoidală. În fig.3.113b) sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea arcului, utilizând modelul MM-DE al arcului electric, obținute în funcție de aceleași cinci trepte de tensiune din secundarul transformatorului. Se poate constata că indiferent de treapta de tensiune pe care lucrează transformatorul cuptorului se obține aceeași variație a tensiunii arcului, deoarece s-a ales aceeași lungime a arcului pentru toate valorile din secundarul transformatorului. Forma de undă a tensiunilor este aproximativ dreptunghiulară.

Fig.3.114a) și fig.3.114b) prezintă caracteristicile curent-tensiune ale arcului electric, respectiv ale cuptorului obținute în funcție de cele cinci valori care pot fi setate pentru tensiunea din secundarul transformatorului.

Fig.3.115a) prezintă puterea activă disipată în arcul electric, iar fig.3.115b) prezintă puterea reactivă a arcului obținute pentru aceleași trepte de tensiune din secundarul transformatorului. Puterea activă maximă disipată în arcul electric este de $21,4 \text{ MW}$.

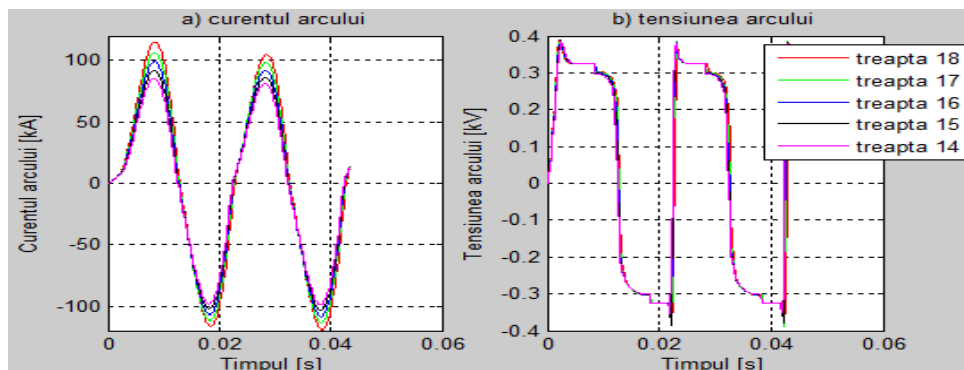


Fig.3.113. Forme de undă la modificarea tensiunii de alimentare pentru a) curentul arcului electric, b) tensiunea arcului electric.

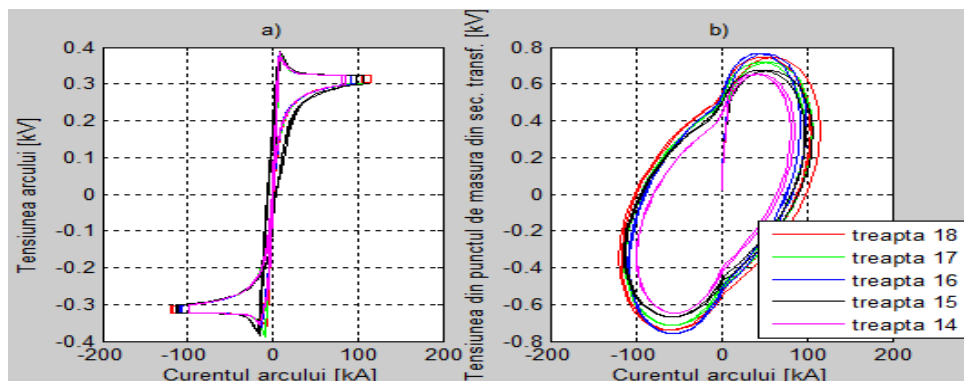


Fig.3.114. Caracteristica curent-tensiune la modificarea tensiunii de alimentare a) a arcului electric, b) a cuptorului.

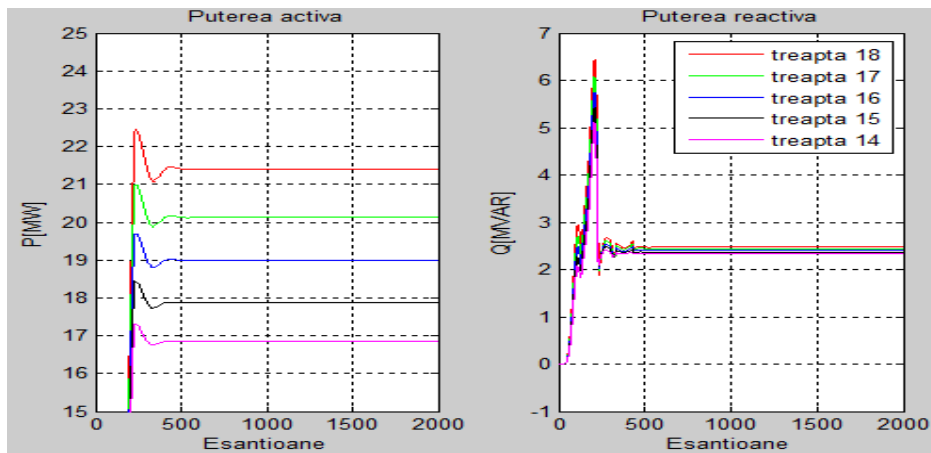


Fig.3.115. Variația puterilor în funcție de treptele de tensiune din secundarul transformatorului.

3.8.3. Validarea modelului MM-DE

Pentru a se valida modelul propus se compară rezultatele obținute prin simulare cu cele achiziționate de la instalația tehnologică reală. În simulare se consideră că lungimea arcului este aceeași atât în faza de topire cât și în faza de afânare, astfel, curentul arcului electric aferent celor două faze tehnologice are amplitudini diferite.

În fig.3.116a) sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea din punctul de măsură din secundarul transformatorului cuptorului pentru fazele tehnologice de topire și de afânare a metalelor, forme de undă obținute în cadrul simulărilor. Se observă că tensiunea din secundarul transformatorului are formă sinusoidală. În fig.3.116b) este ilustrată forma de variație a tensiunii arcului obținută din simulare pentru cele două faze tehnologice utilizate în procesul de elaborare al oțelului.

În fig.3.117 sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea obținută prin simulare, respectiv cea achiziționată de la cuptorul cu arc electric trifazat real, pentru cele două faze tehnologice. Se observă că formele de undă sunt apropiate ca valoare și ca variație, dar cea măsurată de la instalația reală este deformată în faza de topire a metalelor.

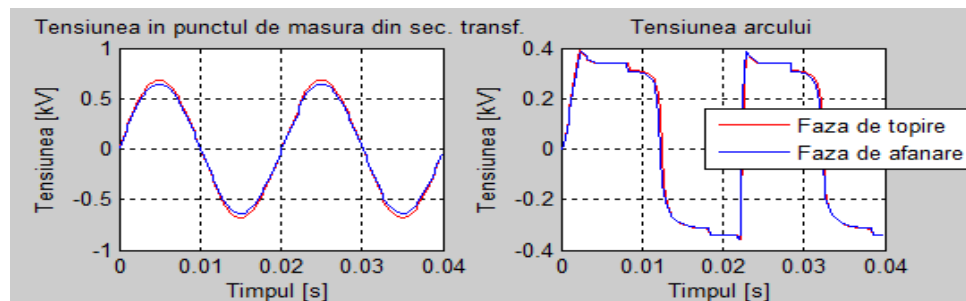


Fig.3.116. Forme de undă obținute în cele două faze tehnologice pentru:
a) tensiunea din punctul de măsură din secundarul transformatorului, b) tensiunea arcului electric.

În fig.3.118 sunt prezentate variațiile curenților măsurați de la instalația reală și cei simulați pentru ambele faze tehnologice de elaborare ale oțelului. Se poate observa că valorile sunt apropiate ca amplitudine, dar și ca formă de undă.

În fig.3.119 este ilustrată caracteristica curent-tensiune a cuptorului, iar în fig.3.120 este ilustrată cea a arcului obținute în cele două faze tehnologice.

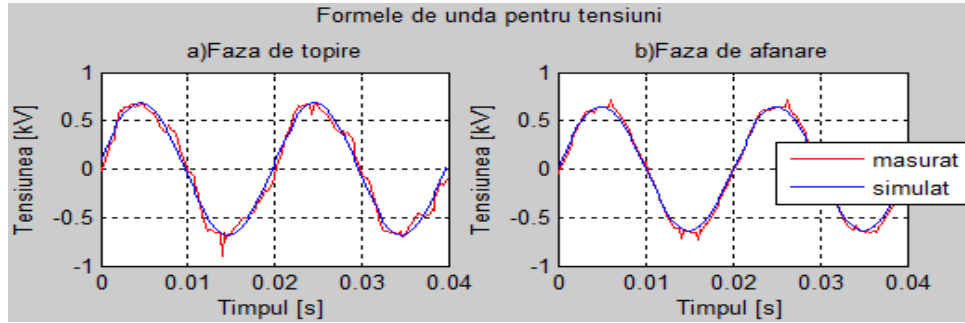


Fig.3.117. Forme de undă pentru tensiunea măsurată și simulată în cele două faze tehnologice.

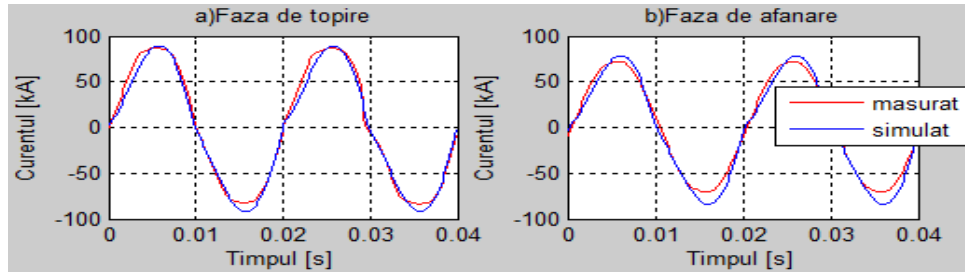


Fig.3.118. Forme de undă pentru curentul măsurat și simulat în cele două faze tehnologice.

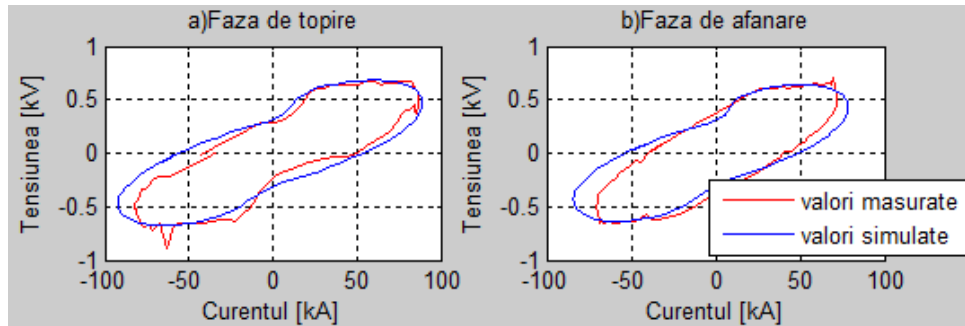


Fig.3.119. Caracteristica curent-tensiune a cuptorului pentru cele două faze tehnologice.

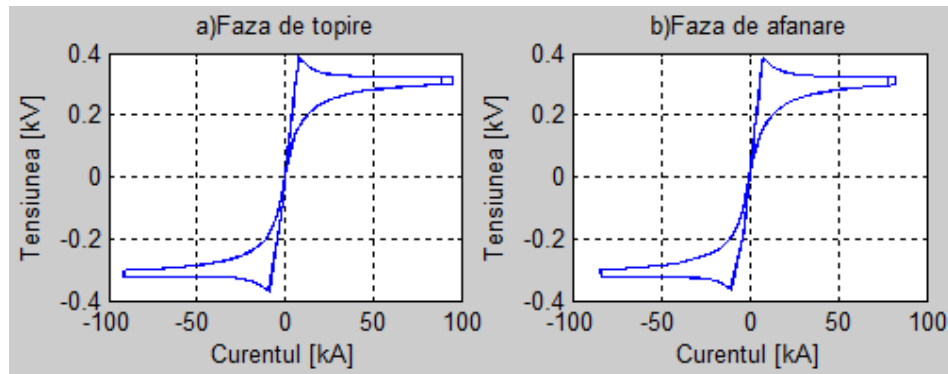


Fig.3.120. Caracteristica curent-tensiune a arcului pentru cele două faze tehnologice.

Concluzii:

În urma simulărilor se pot formula următoarele concluzii referitoare la modelul MM-DE propus:

- permite obținerea unei caracteristici curent-tensiune a cărei formă este similară celei regăsită în literatura de specialitate;
- permite obținerea unei anumite puteri impuse necesare diverselor faze tehnologice;
- permite introducerea de perturbații în proces (la lungimea arcului);
- permite obținerea fenomenului de histereză;
- permite evidențierea parametrilor care sunt supervizați în cazul instalației tehnologice reale;
- permite lucrul cu lungimi de arc diferite;
- puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime de arc de 37 cm.
- poate fi folosit în sinteza structurilor de conducere.

Analiza comparativă a modelelor bazate pe reprezentarea caracteristicii curent-tensiune a arcului electric

Analiza comparativă a rezultatelor obținute în urma simulărilor în aceleași condiții experimentale, utilizând modelele MM-LIN, MM-EXP1, MM-EXP2, MM-HL, MM-DE este prezentată în tabelul 3.1. În urma acestei analize comparative pentru implementarea sistemelor de conducere a fost selectat modelul MM-EXP1 care oferă cele mai bune performanțe pentru ambele faze tehnologice ale procesului de elaborare al oțelului.

Tabelul 3.1 Analiza comparativă a modelelor

	MM-LIN	MM-EXP1	MM-EXP2	MM-HL	MM-DE
Variație caracteristică curent-tensiune a arcului	Liniarizată	Prezintă o variație exponențială	Prezintă o variație exponențială	Prezintă o variație liniară și o variație de forma unei hiperbole	Prezintă două variații exponențiale
Împărțire caracteristică	3 zone de funcționare	5 zone de funcționare	4 zone de funcționare	3 zone de funcționare	4 zone de funcționare

Puterea maximă a arcului	21 MW	20,95 MW	21,5 MW	21,6 MW	21,4 MW
Lungimea arcului la care se obține putere maximă	30 cm	31 cm	31 cm	31 cm	37 cm
Complexitate la implementare	Simplu	Complex	Complex	Simplu	Complex
Urmărirea formelor de undă (curent, tensiune) în fazele procesului tehnologic	Fidel în ambele faze tehnologice	Fidel în ambele faze tehnologice	Fidel în faza tehnologică de topire	Fidel în faza tehnologică de afânare	Mai fidel în faza tehnologică de topire, dar prezintă o abatere pe semialternanț a negativă a tensiunii de alimentare

3.9. Modele bazate pe rețele neuronale artificiale

În ultimii ani rețelele neuronale artificiale (**RNA**) au fost utilizate tot mai mult ca alternativă la modelarea sistemelor complexe, ele având capacitatea de a învăța comportamentul sistemelor, iar unele chiar de a prezice evoluția acestora. Cuptorul cu arc electric reprezintă un sistem complex, care își modifică comportarea în funcție de variația unor parametri funcționali (lungimea arcului, temperatura din cuptor, consumarea electrozilor) care se pretează la modelarea cu rețelele neuronale [**Pan13_1**]. Pentru a putea implementa un astfel de model este necesar să existe câteva date prelevate de la instalația tehnologică reală, care sunt utilizate pentru a antrena rețeaua și pentru a o testa. Validarea modelului se efectuează prin utilizarea unui alt set de măsurători pentru aceiași parametri ai RNA (curent și tensiune).

Dintre tehnicile inteligente existente în literatura de specialitate pentru a modela arcul electric pot fi menționate:

- Modele bazate pe rețele neuronale de tip perceptron [O’Neill01], [Hui09], [Maz06], [Sad00_1];
- Modele bazate pe rețele neuronale cu funcții de bază radiale: [Sad99_3];
- Modele bazate pe logica fuzzy: [Sad99_1];
- Modele bazate pe rețele neuro-fuzzy adaptive: [Sad11], [Har10], [Wan05], [Wie08].

Aceste tehnici sunt bazate pe valori reale achiziționate de la instalația tehnologică vizată cu scopul de a prezice valorile curentului/tensiunii arcului electric.

Predicția comportamentului arcului electric permite prevenirea efectelor negative care pot să apară (armonici de curent, energie reactivă, dezechilibru pe

cele trei faze, etc), respectiv minimizarea efectului acestora asupra rețelei de putere.

3.9.1. Modelul bazat pe rețele de tip perceptron multi-strat (MLP)

În [Pan13_1] s-a realizat un studiu pentru testarea rețelelor de tip MLP în vederea simulării comportamentului arcului electric.

RNA de tip MLP este o rețea cu propagare înainte care are un strat de intrare, un strat de ieșire și un strat ascuns, prezentate în fig.3.121. Aceste straturi oferă rețelei capacitatea de a învăța, arhitectura RNA de tip MLP (numărul de neuroni de pe stratul ascuns) influențând performanța modelării arcului electric. Pentru a se antrena o RNA MLP este necesar un set de date (variabile de intrare și de ieșire), testarea rețelei fiind realizată prin compararea datelor măsurate de la instalația reală și ieșirea rețelei de tip MLP.

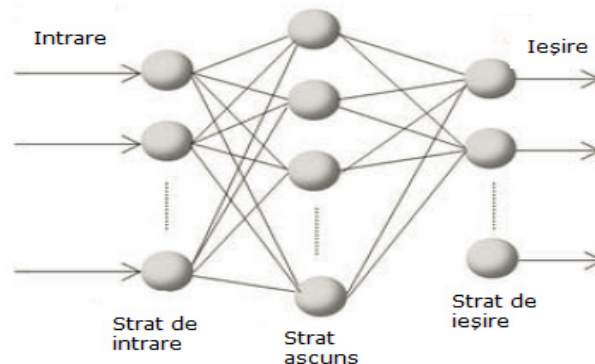


Fig.3.121. Arhitectura unei RNA de tip MLP cu propagare înainte.

În vederea creării rețelei neuronale de tip MLP s-au utilizat 600 de eșantioane pentru curentul măsurat, respectiv pentru tensiunea măsurată de la instalația reală. Funcția Matlab utilizată pentru a crea rețeaua este *feedforwardnet*, iar funcția de antrenare este *trainlm*. Pentru crearea rețelei s-au utilizat 50 de neuroni pe stratul ascuns. Mărimea de intrare a rețelei este timpul de eșantionare, iar mărimea de ieșire este variația tensiunii sau a curentului arcului pe parcursul celor n eșantioane din semnal. Antrenarea rețelei este realizată utilizând funcția *train* care primește ca argumente intrarea și ieșirea de la rețeaua MLP. Pentru a testa dacă rețeaua reușește să învețe comportamentul sistemului pentru cele 600 eșantioane, se utilizează funcția *sim* care primește ca argumente rețeaua creată și timpul de eșantionare.

În fig.3.122a) sunt prezentate variațiile curentului de pe o fază a tensiunii de alimentare, respectiv a curentului măsurate de la instalația reală, respectiv obținute prin simularea rețelei de tip MLP. În fig.3.122b) sunt ilustrate formele de variație ale tensiunii achiziționate și cea obținută prin simulare. Analizând aceste figuri, se poate constata că rețeaua de tip MLP are capacitatea de a învăța comportamentul sistemului. Acest tip de rețea nu poate fi utilizat pentru testarea rețelei pe un alt set de date diferit de cel învățat.

În fig.3.123 este ilustrată o comparație între caracteristica curent-tensiune a cuptorului obținută cu un set de valori din datele achiziționate, respectiv cea

obținută în urma simulării rețelei de tip MLP. În urma analizei figurii se poate constata că rețeaua reușește să învețe foarte bine comportamentul sistemului.

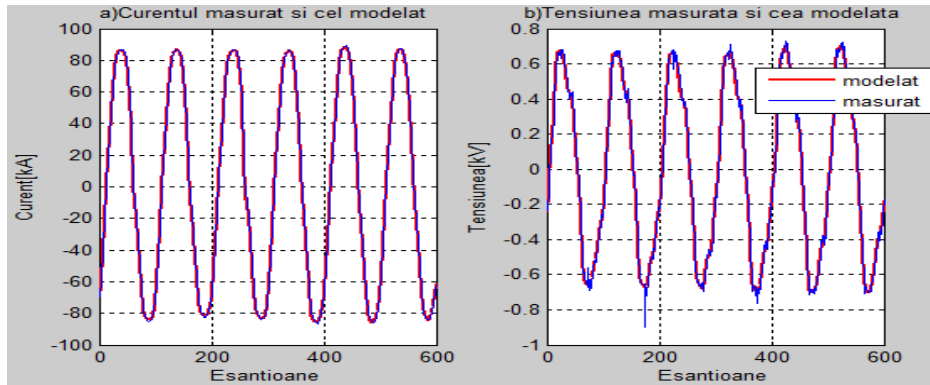


Fig.3.122. a) Variația curentului măsurat și cel simulat, b) Variația tensiunii măsurate și cea simulate utilizând RNA MLP.

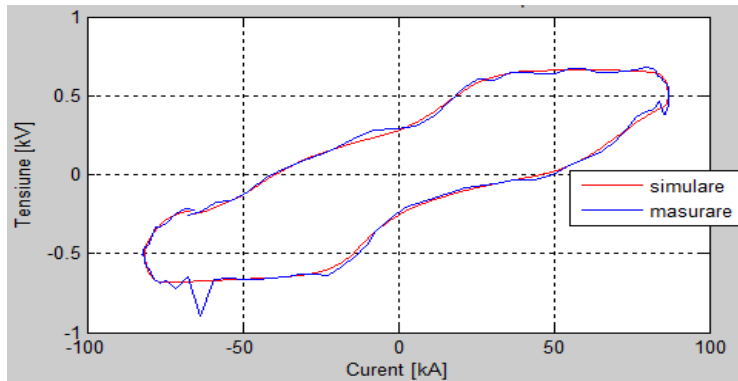


Fig.3.123. Caracteristica curent-tensiune a cuptorului pentru valori măsurate și simulate.

3.9.2. Modelul bazat pe rețele neuronale cu funcții de bază radiale (RBF)

Rețeaua neuronală bazată pe funcții de bază radiale (**RBF**) este o alternativă pentru rețelele neuronale de tip MLP și are o structură mai simplă comparativ cu MLP [Cha08], [Cha10_2]. În fig.3.124 este ilustrată structura unei rețele de tip RBF [Pan14_1]. Aceasta conține stratul de intrare, stratul ascuns și stratul de ieșire. Legătura dintre intrare și ieșire constă în două transformări: transformarea neliniară între stratul de intrare și stratul ascuns și o transformare liniară între stratul ascuns și stratul de ieșire. Aceste rețele se bazează pe învățare supervizată și pot fi utilizate pentru aproximări de funcții. Spre deosebire de MLP care poate avea mai multe straturi ascunse, RNA RBF nu poate avea mai mult de un strat ascuns.

Funcția Matlab utilizată pentru crearea acestui tip de rețea este *newrb*. Mărimea de intrare este timpul de eșantionare, iar ieșirea rețelei este tensiunea sau curentul arcului. În urma testării rețelei se poate observa din fig.3.125 și fig.3.126

că răspunsul rețelei urmărește variația mărimilor învățate. Acest tip de rețea nu poate fi folosit pentru predicția datelor.

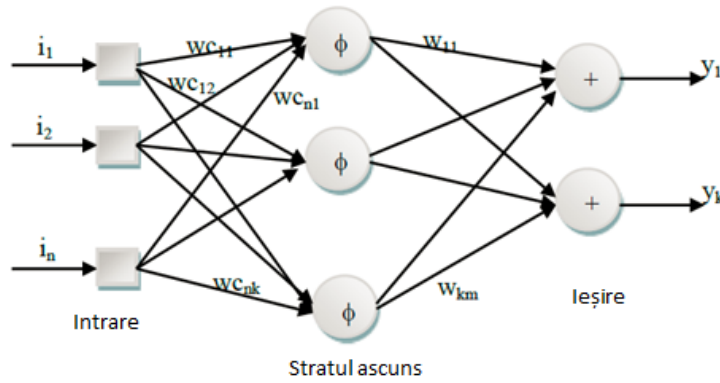


Fig.3.124. Arhitectura unei rețele neuronale de tip RBF.

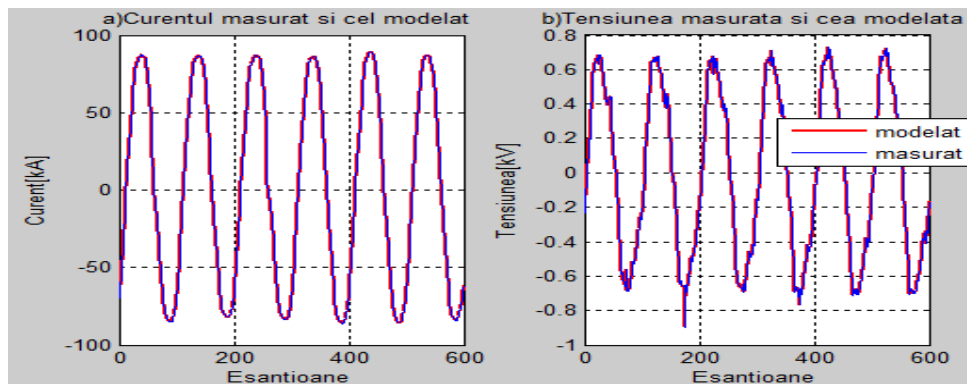


Fig.3.125. a)Curentul măsurat și modelat, b)Tensiunea măsurată și modelată.

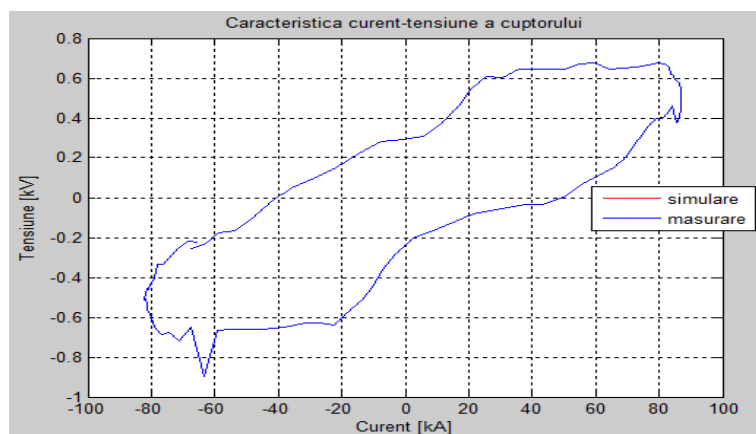


Fig.3.126. Caracteristica curent-tensiune a cuptorului obținută din măsurare și simulare

3.9.3. Modelul bazat pe rețele neuro-fuzzy adaptive (ANFIS)

Modelarea bazată pe rețele neuro-fuzzy adaptive, **ANFIS** (adaptive neuro-fuzzy inference system) este utilizată în predicția curentului și a tensiunii arcului electric și ține cont de fundamentele rețelelor neuronale artificiale și de mecanismul de inferență *fuzzy*. De asemenea, rețeaua permite obținerea caracteristicii curent-tensiune a arcului electric. Valorile măsurate de la instalația tehnologică reală sunt utilizate pentru a antrena rețeaua neuro-fuzzy adaptivă **[Pan14_2]**.

Problemele majore care pot să apară pe parcursul procesului de elaborare al oțelului sunt identificate în faza tehnologică de topire, deoarece materialele încărcate în cuva cuptorului au o dispunere aleatoare, iar atunci când începe topirea acestor metale se obțin configurații diferite în cuva cuptorului, așadar apar lungimi de arc diferite **[Pan14_2]**.

Sistemele de tip ANFIS sunt echivalente din punct de vedere funcțional cu sistemele fuzzy de tip Takagi-Sugeno [Jan93]. Spre deosebire de sistemele fuzzy clasice aceste tip de sisteme au capacitatea de adaptare în timpul procesului de învățare. Astfel, aplicând o metodă de optimizare, pot fi adaptate atât funcțiile de apartenență ale mulțimilor fuzzy ce apar în partea de premiză a regulilor cât și parametrii părților de consecință ale regulilor fuzzy. Metoda de optimizare poate fi hibridă sau cu propagare înapoi și are rolul de a antrena parametrii mulțimilor fuzzy în funcție de valorile alese pentru antrenarea rețelei. Metoda de optimizare hibridă este o combinație între metoda celor mai mici pătrate și metoda gradientului descendent cu propagare înapoi. Funcția criteriu de minimizat poate fi de tipul erorii medii pătratice dintre ieșirea actuală a sistemului neuro-fuzzy și ieșirea dorită a acestuia **[***_1]**. Pentru a explica structura unui sistem hybrid neuro-fuzzy de tip ANFIS se consideră un sistem fuzzy de tipul Takagi-Sugeno de ordinul 1, ce are două mărimi de intrare x și y și o mărime de ieșire f . Baza de reguli a sistemului fuzzy se consideră că este formată din 2 reguli:

Regula 1: dacă x este A_1 și y este B_1 atunci z este $f_1 = p_1 \cdot x + q_1 \cdot y + r_1$

Regula 2: dacă x este A_2 și y este B_2 atunci z este $f_2 = p_2 \cdot x + q_2 \cdot y + r_2$

În fig.3.127a) este ilustrat modul în care se realizează comportamentul în cadrul unui sistem fuzzy de tip Takagi-Sugeno de ordinul 1, pentru care ieșirea se calculează pe baza relației 3.42. Fig.3.127b) prezintă structura sistemului adaptiv neuro-fuzzy considerat în care rețeaua își modifică ponderea și pragul pentru a se adapta noilor valori. Structura ANFIS echivalentă sistemului fuzzy de ordinul 1 este alcătuită din 5 straturi [Jan93], parametrii primului strat sunt numiți parametrii premizei. În stratul 2 fiecare nod reprezintă funcția de activare a unei reguli, stratul 3 are noduri fixe, stratul 4 are noduri adaptive, iar stratul 5 este format dintr-un nod fix care calculează ieșirea sistemului ANFIS.

$$f = \frac{w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2}{w_1 + w_2} = \overline{w_1} f_1 + \overline{w_2} f_2 \quad (3.42)$$

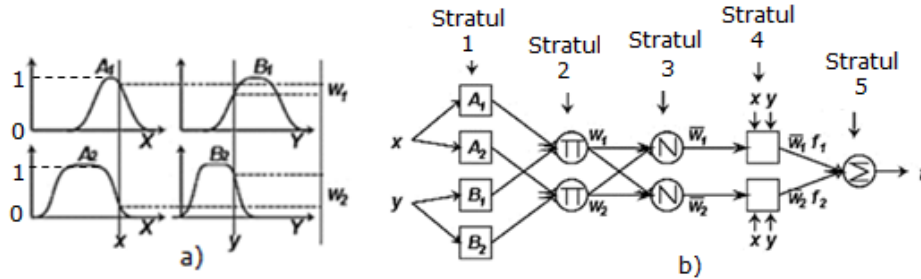


Fig.3.127. a) Sistem fuzzy de tip Sugeno de ordinul 1cu 2 intrări și 2 reguli, b) Structura echivalentă ANFIS (Jan93).

Predicția curentului

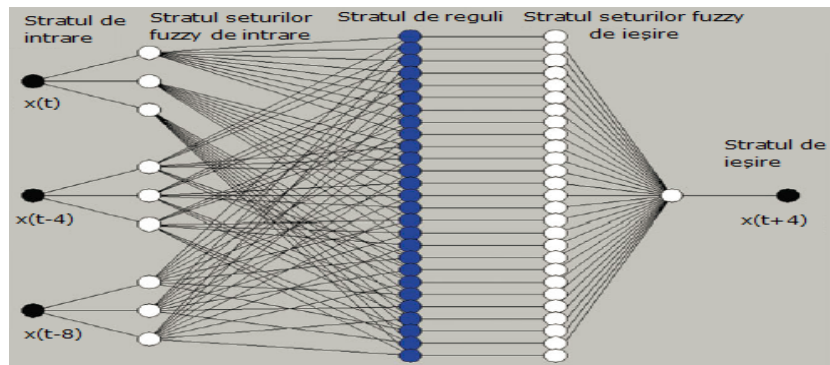
În vederea implementării modelului ANFIS se utilizează valori măsurate de la instalația reală pentru curentul arcului și pentru tensiunea din punctul de măsură din secundarul transformatorului. Deoarece în faza tehnologică de topire curenții sunt mai distorsionați comparativ cu faza tehnologică de afânare, se va utiliza acest model doar pentru prima fază tehnologică. Pentru modelul considerat se utilizează n eșantioane: primele $n/2$ eșantioane sunt utilizate pentru antrenarea rețelei neuronale, iar celelalte $n/2$ eșantioane sunt utilizate pentru validarea modelului. Testarea modelului se face pe întregul domeniu de n eșantioane.

În [Jan93] s-a demonstrat că rețelele de tip ANFIS pot fi utilizate pentru a prezice valorile viitoare ale unui semnal ce variază haotic în timp. Pentru a realiza predicția în timp a curentului sau a tensiunii arcului se utilizează valorile măsurate ale curenților și tensiunilor până la un moment t , urmând apoi să se prezică valoarea curentului sau a tensiunii la momentul $t+p$ (p este pasul de eșantionare). Astfel este necesar să se împartă eșantioanele până la momentul t în d eșantioane (fiind eșantioane precedente momentului $t+p$), luând în considerare perioada de eșantionare s utilizată în predicția valorii curentului la momentul $t+p$, adică $i(t+p)$, relația (3.43), x este vectorul de intrare, i este curentul arcului, iar u este tensiunea.

$$x = [i(t - (d - 1) \cdot s), u(t - (d - 1) \cdot s) \dots, i(t - s), u(t - s), i(t), u(t)] \quad (3.43)$$

În fig.3.128 este ilustrată structura sistemului ANFIS în care se consideră predicția la momentul $t+4$, utilizându-se $d=3$ eșantioane precedente, perioada de eșantioane $s=4$, vectorul de intrare trebuind să conțină seturile $x(t-8)$, $x(t-4)$ și $x(t)$.

În fig.3.129 sunt ilustrate valorile achiziționate de la instalația reală cu scopul de a le utiliza în vederea testării performanței rețelei ANFIS. Jumătate din setul de date este utilizat pentru antrenarea rețelei, iar cealaltă jumătate este utilizată pentru validarea ei. Testarea rețelei se face utilizând întregul set de date. În cazul antrenării, sistemul ANFIS utilizează mecanismul de inferență Sugeno și o metodă de antrenare bazată pe algoritmi hibridi. Pentru a genera sistemul de inferență fuzzy este utilizată opțiunea *Grid partition*, care generează un sistem fuzzy cu o singură ieșire de tip Sugeno. Astfel, pentru generarea sistemului cu inferență fuzzy s-au utilizat câte două mulțimi fuzzy de tip triunghiular pentru fiecare eșantion cunoscut pentru curent și tensiune, iar ieșirea este aleasă de tip constantă.

Fig.3.128. Structura sistemului ANFIS pentru $s=4$, $d=3$ și $p=4$.

În vederea analizei performanței rețelei este luată în considerare eroarea obținută de la antrenare, validare și testare utilizând valori achiziționate.

În fig.3.130 este ilustrată variația în timp a curentului măsurat și a celui obținut de la ieșirea sistemului ANFIS. Atât ieșirea dorită cât și ieșirea obținută de la sistemul neuro-fuzzy sunt afișate în kA . Pentru învățarea rețelei s-au utilizat 100 de epoci, sistemul fuzzy utilizează 2 eșantioane precedente, iar pasul de eșantionare este 2. Mărimile de intrare ale sistemului sunt $i(t-2)$, $u(t-2)$, $i(t)$ și $u(t)$, iar mărimea de ieșire este $i(t+2)$, aferent curentului dorit a se obține la pasul $p=2$. În exemplul prezentat s-au utilizat 300 de eșantioane pentru antrenarea rețelei. Analizând rezultatul obținut se poate concluziona că eroarea obținută este de $1,35 A$ între ieșirea dorită și ieșirea sistemului ANFIS, așadar sistemul fuzzy s-a antrenat corect.

După ce a fost antrenată rețeaua pentru un set de date, se trece la validarea acesteia, fig.3.131. Astfel, se utilizează un alt set de date pentru a analiza dacă rețeaua a fost antrenată corect și poate fi testată pe un alt set de date. Se poate constata că eroarea obținută în urma validării rețelei este de $2,41 A$. Așadar rețeaua are capacitatea de a prezice date utilizând seturi noi de valori.

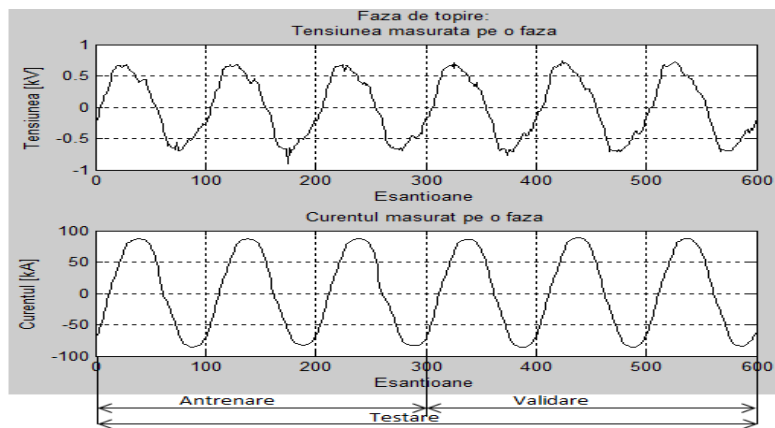


Fig.3.129. Formele de undă pentru a) tensiunea măsurată pe o fază, b) curentul măsurat pe o fază.

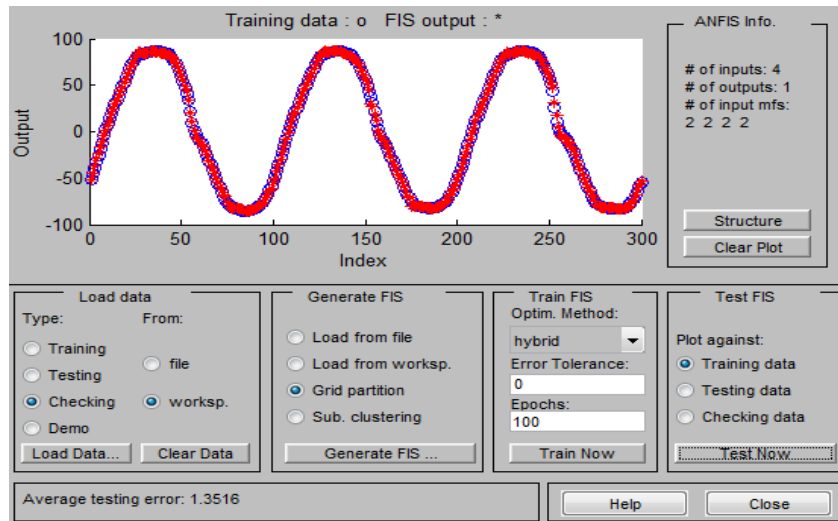


Fig.3.130. Variația curentului măsurat (albastru) și a curentului prezis (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la antrenarea rețelei.

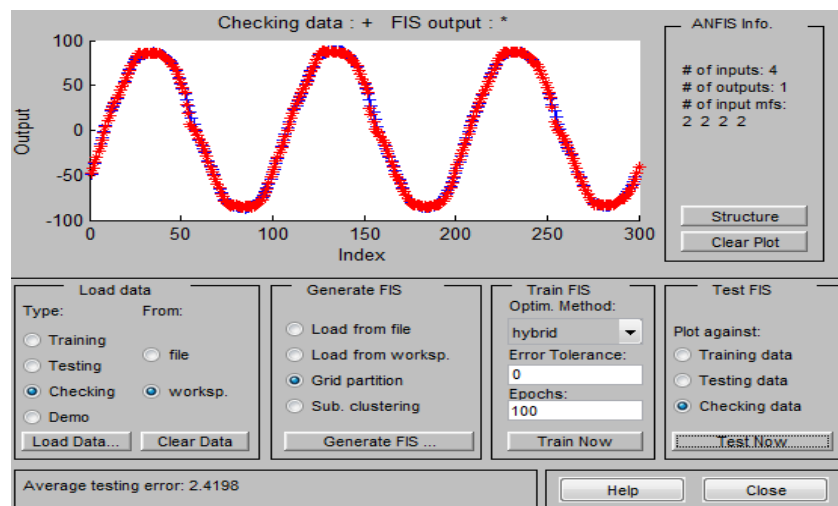


Fig.3.131. Variația curentului măsurat (albastru) și a curentului prezis (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la validarea rețelei.

Pentru a analiza dacă rețeaua are capacitatea de generalizare în cazul unor noi seturi de date, se efectuează testarea rețelei utilizând întregul set de valori de 600 de eșantioane (antrenare+testare). Rezultatul obținut este ilustrat în fig.3.132 din care se poate constata că eroarea obținută este de 1,96 A. Concluzionând se poate afirma că acest tip de rețea neuronală are capacitatea de generalizare la apariția noilor situații care pot să apară.

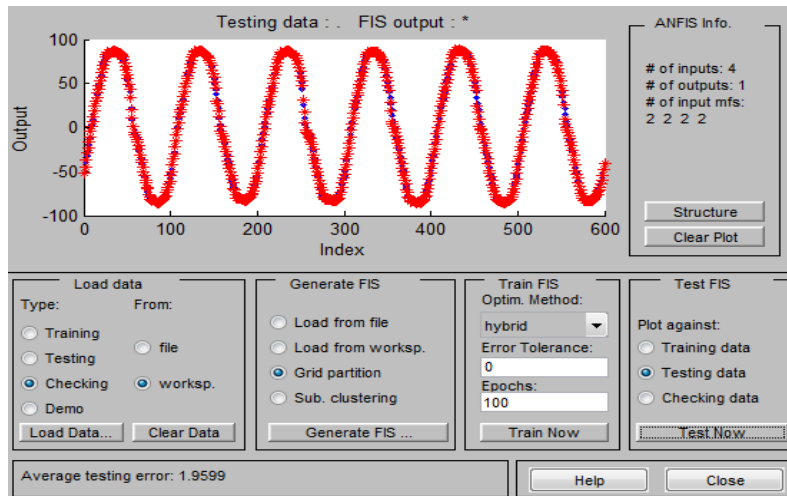


Fig.3.132. Variația curentului măsurat (albastru) și a curentului prezis (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la testarea rețelei.

Predicția tensiunii

În fig.3.133 sunt prezentate variația tensiunii măsurată de la cuptorul real și variația tensiunii obținută în urma antrenării rețelei neuro-fuzzy pentru 100 de epoci (tensiunile sunt reprezentate în kV). Pentru antrenare s-au utilizat 4 intrări (2 pentru curenți și 2 pentru tensiuni), rețeaua utilizând câte 2 eșantioane precedente pentru învățarea comportamentului sistemului și prezice variația tensiunii pentru următorul eșantion de la pasul $p=2$. În urma antrenării rețelei s-a obținut o eroare medie de $0,04$ kV

În fig.3.134 sunt prezentate variațiile tensiunii în cazul validării rețelei. În urma simulării s-a obținut o eroare medie de $0,03$ kV.

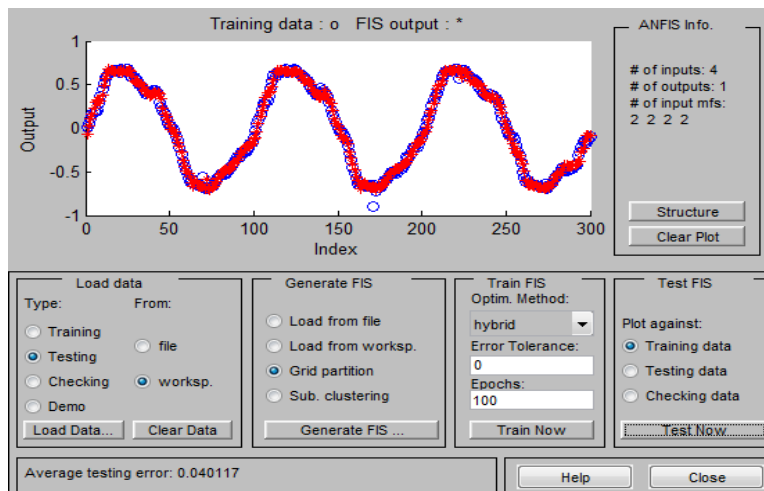


Fig.3.133. Variația tensiunii măsurată (albastru) și a tensiunii prezisă (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la antrenarea rețelei.

În fig.3.135 sunt prezentate variațiile tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului în cazul testării rețelei. Pentru testare s-a utilizat întregul set de valori de 600 de eşantioane (antrenare+testare). În urma simulării s-a obținut o eroare medie de aproximativ $0,04$ kV. În urma rezultatelor obținute se poate concluziona că rețeaua neuro-fuzzy adaptivă are capacitatea de generalizare în funcție de ceea ce a învățat în urma antrenării rețelei.

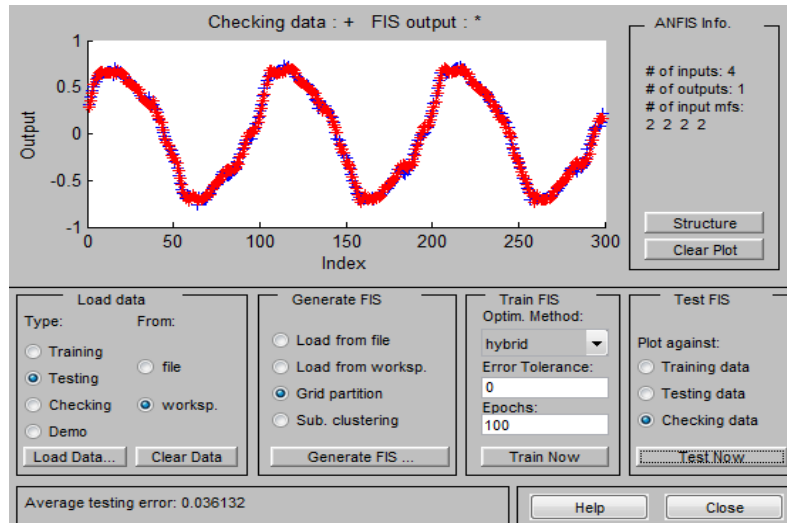


Fig.3.134. Variația tensiunii măsurată (albastru) și a tensiunii prezisă (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la validarea rețelei.

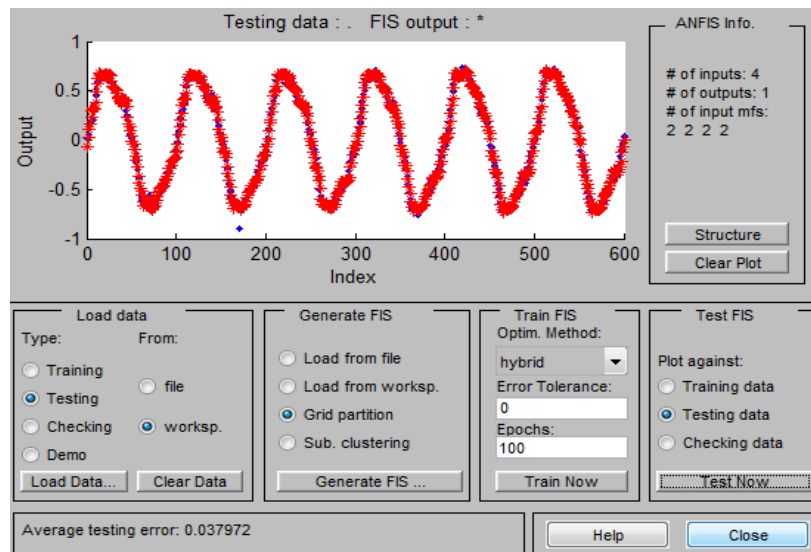


Fig.3.135. Variația tensiunii măsurată (albastru) și a tensiunii prezisă (roșu) pentru $d=2$, $p=2$ la testarea rețelei.

3.10. Concluzii

În prezentul capitol au fost propuse cinci modele bazate pe diferite reprezentări ale caracteristicii curent-tensiune a arcului electric, dar și un model al întregii instalații a cuptorului cu arc. De asemenea au fost dezvoltate modele bazate pe rețele neuronale artificiale de tip perceptron multi-strat sau rețele cu funcții de bază radiale care au capacitatea de a învăța comportamentul sistemului. Un alt tip de rețea neuronală dezvoltată este cea de tip *ANFIS* care permite prescrierea valorilor curenților și ale tensiunilor arcului electric în funcție de datele achiziționate de la instalația tehnologică reală, luând în considerare un anumit pas de eșantionare și un anumit număr de eșantioane precedente.

În urma analizei fiecărui model matematic bazat pe caracteristica curent-tensiune a arcului se pot menționa următoarele concluzii:

- cea mai mare influență asupra tensiunii, curentului și puterii arcului o are lungimea arcului, respectiv tensiunea de stingere;
- fiecare model matematic permite obținerea formelor de undă ale curentului și tensiunii arcului similare celor din literatură;
- în cazul în care se dorește obținerea unei anumite puteri se poate identifica valoarea fiecăruia dintre parametrii modelului;
- tensiunea din secundarul transformatorului influențează puterea arcului;
- deoarece toate modelele fac legătura dintre tensiunea și curentului arcului electric, acestea pot fi utilizate în cadrul sistemelor de conducere;
- în urma testelor efectuate se alege modelul MM-EXP1 pentru a fi utilizat în cadrul sistemelor de conducere propuse, deoarece atât caracteristica curent-tensiune a arcului cât și formele de undă pentru tensiunea și curentul arcului sunt similare celor din literatură, curentul arcului se regăsește în regimul de curent neîntrerupt, se distinge tensiunea de amorsare a arcului în cadrul tensiunii arcului și modelul poate fi utilizat pentru simularea ambelor faze tehnologice ale procesului de elaborare al oțelului;
- modelele matematice bazate pe caracteristica curent-tensiune nu pot prezice valorile viitoare ale curentului și tensiunii.

Privitor la modelele bazate pe rețele neuronale artificiale se pot concluziona următoarele:

- rețelele dezvoltate de tip perceptron, dar și cele care utilizează funcții de bază radiale au capacitatea de a învăța comportamentul unui sistem, dar nu pot fi utilizate pentru predicția valorilor;
- rețelele neuro-fuzzy adaptive pot să învețe comportamentul unui sistem dar și să prezică valorile viitoare ale unei mărimi ținând cont de valorile precedente ale aceleiași mărimi.

4. SISTEME DE CONDUCERE ÎN VEDEREA REGLĂRII PUTERII ARCULUI ELECTRIC

4.1. Preliminarii

În prezentul capitol se propun sisteme de conducere (**SC**) utilizate în vederea obținerii puterii maxime sau a unei puteri impuse a arcului electric prin modificarea vitezei și a sensului de deplasare al electrozilor de la cuptorul cu arc electric trifazat.

Sistemele de conducere dezvoltate și analizate în cadrul acestui capitol sunt:

- SC cu regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire;
- SC cu un regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire;
- SC bazate pe regulatoare clasice de tip proporțional (**P**), proporțional-integrator (**PI**), proporțional-derivativ (**PD**), proporțional-integrator-derivativ (**PID**);
- SC bazate pe strategii de conducere adaptivă în care se utilizează un regulator fuzzy pentru a seta parametrii reguletoarelor clasice.

SC propuse sunt analizate și comparate între ele pentru a evidenția care dintre acestea oferă performanțe mai bune referitoare la timpul de răspuns, suprareglajul obținut, respectiv la stabilitatea sistemului.

În urma concluziilor obținute în cap.3, pentru sinteza SC-urilor dezvoltate s-a utilizat modelul *MM-EXP1* cu următoarele valori ale parametrilor modelului: $R_1=0,05$, $R_2=-0,00076$, $R_3=-0,0001$, iar $L_{arc}=31$ cm. Tensiunea de stingere este de 350 V, iar tensiunea de amorsare este de 400 V, conform relației (3.24).

SC al electrozilor de la cuptorul cu arc electric trebuie să asigure un regim de funcționare corespunzător din punctul de vedere al procesului metalurgic și o productivitate ridicată.

Așa cum a fost precizat în cap.2, puterea arcului poate fi obținută prin modificarea tensiunii de alimentare, respectiv prin modificarea poziției electrozilor. Primul mod de reglare este utilizat în cazul în care se trece de la o fază tehnologică la alta, iar în cadrul aceleiași faze, reglarea puterii arcului se face prin modificarea poziției electrozilor. În cazul cuptorului cu arc electric trifazat considerat, fiecare electrod deține propriul său SC. Pentru a se obține o nouă lungime a arcului, respectiv o nouă putere, se utilizează o instalație hidraulică care are rolul de a modifica pe verticală poziția electrozilor cu o anumită viteză [***_2], [Ghi15_1].

Pintre acțiunile care modifică lungimea arcului, deci puterea arcului pot fi menționate: creșterea temperaturii în cuptor (temperatura șarjei), surparea încărcăturii care conduce la scurtcircuit sau la întreruperea arcului, deplasarea arcului sub influența forțelor electrodinamice, respectiv scurtarea electrozilor.

În cadrul prezentei lucrări, puterea arcului este obținută în două cazuri: menținând constant curentul de referință al arcului sau menținând constantă puterea de referință a arcului. Primul caz poate fi utilizat în situația în care pentru fiecare treaptă de setare a transformatorului cuptorului se cunoaște valoarea curentului de referință, astfel încât instalația să lucreze cu puterea maximă. Al doilea caz este utilizat atunci când se cunoaște puterea cu care se dorește să se lucreze.

În cazul instalației reale, elementul de execuție este un dispozitiv cu acționare hidraulică. În simulările efectuate s-a considerat că sistemul cu acționare hidraulică reprezintă un sistem de tip *PT1* adică având o funcție de transfer $H(s)$, ilustrată în relația (4.1), cu constanta de timp de $T=0,75$ sec [Ghi16_4].

$$H(s) = \frac{1}{Ts + 1} \quad (4.1)$$

4.2. Reglarea curentului arcului electric

Cuptorul cu arc electric nu poate funcționa fără un sistem de conducere automată (reglare automată), având în vedere că arcul electric are o dinamică aleatoare. În timpul procesului de elaborare al oțelului se pot distinge două faze tehnologice principale: topire și afânare. În faza tehnologică de topire pot să apară des scurtcircuite sau variații ale lungimii arcului din cauza schimbării poziției metalelor din cuva cuptorului pe măsură ce se topesc metalele din cuptor. Aceste schimbări de lungime cauzează fluctuații de tensiune și de asemenea electrozii se pot rupe sau se pot distruge alte componente. În faza de afânare, metalele sunt transformate în stare lichidă, arcul electric putându-se menține constant [Ghi15_1].

Cuptorul cu arc electric avut în vedere are ca principală sursă de energie un transformator trifazat având conexiune delta atât în primar cât și în secundar. Transformatorul este conectat la linia de 30 kV, iar tensiunea din secundar poate varia între 550 V și 960 V. Tensiunea din secundar este obținută prin schimbarea treptelor de setare din primarul transformatorului, modificându-se numărul de spire din primar, deoarece în secundarul transformatorului curenții sunt de valoare mare.

În fig.4.1 este ilustrată schema bloc a sistemului de conducere (reglare) automată în cazul în care curentul de referință, I_{ref} , este menținut constant. Mărimea de comandă sv reprezintă sensul și viteza de deplasare a electrozilor, mărimea de execuție x este deplasarea electrozilor care determină modificarea lungimii arcului, mărimea reglată fiind curentul I obținut la ieșirea din proces. *Arcul electric* care reprezintă procesul în sistemul de conducere este un element nelinier de circuit.

Pentru fiecare valoare a curentului de referință se admite o abatere a curentului (mărime reglată) de 500 A.

În cazul în care eroarea este negativă electrozii trebuie ridicați cu o anumită viteză pentru a se evita scurtcircuitul, iar în cazul în care eroarea este pozitivă, electrozii trebuie coborâți pentru a se evita apariția regimului de curent întrerupt.

În continuare sunt prezentate și analizate sistemele de conducere propuse.

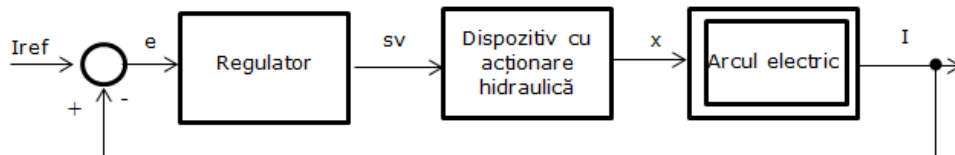


Fig.4.1. Schema bloc a sistemului de conducere.

4.2.1. Sistem de conducere bazat pe regulatoare fuzzy

Logica fuzzy este recomandată pentru sistemele care prezintă neliniarități și perturbații aleatoare semnificative [Yan11].

Metodele bazate pe logica fuzzy utilizează experiența personalului uman în domeniul în care se aplică și nu au algoritmi definiți într-un mod foarte strict [Vol07]. Reglatoarele bazate pe logica fuzzy sunt tot mai utilizate în domeniul metalurgic [Par10], [Deh11], [Sad11].

Pentru dezvoltarea sistemelor de conducere bazate pe logica fuzzy s-au utilizat informațiile obținute de la experți tehnologi din domeniu. S-a luat în considerare faptul că la un moment dat, dacă se lucrează pe o anumită treaptă de setare a transformatorului cuptorului, tensiunea din secundar este aproximativ constantă, iar curentul maxim pentru fiecare treaptă a transformatorului este cunoscut. În acest context în sistemele de conducere dezvoltate curentul din circuit (curentul arcului) s-a considerat ca mărime de referință.

În cadrul acestei lucrări sunt propuse două tipuri de regulatoare fuzzy pentru reglarea curentului arcului: unul cu o mărime de intrare și o mărime de ieșire, iar al doilea cu două mărimi de intrare și una de ieșire.

La modificarea poziției electrozilor se obțin lungimi de arc diferite, implicit valori diferite pentru curentul și tensiunea arcului electric. În cazul în care lungimea arcului crește, curentul arcului scade, iar în cazul în care lungimea arcului scade, curentul crește [Zhe00].

4.2.1.1. Regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire

Regulatorul fuzzy conceput primește ca mărime de intrare eroarea dintre curentul de referință al sistemului și cel obținut la ieșirea din proces. Mărimea de ieșire este o valoare ce reprezintă viteza și sensul de deplasare al electrozilor. Universul discuției pentru aceste variabile și baza de reguli au fost stabilite în funcție de informațiile obținute de la experți tehnologi, dar și în funcție de numeroase teste efectuate de autor prin simulări. Valorile mărimilor de intrare și de ieșire nu sunt normate, ele fiind utilizate în starea lor reală.

Baza de reguli asigură modificarea vitezei și a sensului de deplasare al electrozilor cu scopul de a asigura o funcționare a cuptorului fără întreruperi, respectiv de a elimina introducerea armonicilor în rețeaua de alimentare, dar și de a elimina avariile care pot să apară în timpul procesului de elaborare a oțelului (ex: ruperea electrozilor). Valorile curenților arcului electric, respectiv ale tensiunilor din punctul de măsură din secundarul transformatorului pentru instalația reală au fost prezentate în capitolul 3.

4.2.1.1.1. Proiectarea regulatorului fuzzy

Sistemul fuzzy a fost proiectat în Matlab, utilizând toolbox-ul fuzzy [***_3], [***_4]. Mărimea de intrare a regulatorului fuzzy este eroarea curentului care este obținută prin diferența dintre curentul de referință și curentul care este obținut din proces. Mărimea de ieșire a regulatorului fuzzy este viteza și sensul de deplasare al electrozilor având în vedere că materialele din cuva cuptorului au o configurație aleatoare, fiind imposibil de precizat poziția pe care trebuie să o dețină electrozii în funcție de dispunerea materialelor din cuptor [Pai96].

Ținând cont de caracteristicile arcului electric precum și de cele ale procesului de elaborare al oțelului s-au ales funcții de apartenență de tip triunghiular, trapezoidal sau o combinație între cele două funcții, atât pentru mărimea de intrare cât și pentru mărimea de ieșire. Pentru fiecare variabilă lingvistică s-au utilizat 7 mulțimi fuzzy. Valorile acestor mulțimi nu sunt normate ci se lucrează în domeniul real.

În cadrul simulărilor s-au considerat următoarele:

- mulțimile fuzzy pentru mărimea de intrare sunt simetrice;

- regulatorul nu trebuie să acționeze la o variație a mărimii de abatere în limita a ± 500 A;
- mulțimile fuzzy pentru mărimea de ieșire sunt asimetrice.

Funcții de apartenență de tip triunghiular

În fig.4.2 sunt ilustrate funcțiile de apartenență de tip triunghiular pentru mărimea de intrare (abaterea curentului), iar în fig.4.3 sunt prezentate funcțiile de apartenență de tip triunghiular pentru mărimea de ieșire (viteza și sensul de deplasare al electrozilor). Domeniului mulțimilor fuzzy pentru mărimea de ieșire s-a ales conform studiului realizat în [Pai96] care dezvoltă un sistem de conducere al cuptorului cu arc electric în care mărimea de referință este o impedanță de valoare constantă.

Mulțimile fuzzy pentru mărimea de intrare sunt:

- NMare – reprezintă cazul în care eroarea este negativă mare;
- NMedie – reprezintă cazul în care eroarea este negativă medie;
- NMică – reprezintă cazul în care eroarea este negativă mică;
- Zero – reprezintă cazul în care eroarea este considerată în limitele normale;
- PMică – reprezintă cazul în care eroarea este pozitivă mică;
- PMedie – reprezintă cazul în care eroarea este pozitivă medie;
- PMare – reprezintă cazul în care eroarea este pozitivă mare.

Mulțimile fuzzy pentru mărimea de ieșire sunt:

- NMare – reprezintă cazul în care electrozii trebuie să coboare cu o viteză mare;
- NMedie – reprezintă cazul în care electrozii trebuie să coboare cu o viteză medie;
- NMică – reprezintă cazul în care electrozii trebuie să coboare cu o viteză mică;
- Zero – reprezintă cazul în care electrozii nu trebuie mișcați;
- PMică – reprezintă cazul în care electrozii trebuie să urce cu o viteză mică;
- PMedie – reprezintă cazul în care electrozii trebuie să urce cu o viteză medie;
- PMare – reprezintă cazul în care electrozii trebuie să urce cu o viteză mare.

Universul discuției pentru mărimea de intrare este $[-1700, 1700]$ A, iar pentru mărimea de ieșire este $[-40, 40]$. Pentru mărimea de ieșire s-a ales acest univers al discuției deoarece s-a luat în considerare faptul că lungimea arcului poate varia între 0 și 40 cm.

Metoda de inferență utilizată este de tip *Mamdani*, deoarece pentru mărimea de ieșire au fost folosite seturi fuzzy distribuite. Motorul de inferență este de tip *min-max* [Pre97], iar procesul de defuzzificare utilizat este de tip *centroid*, acesta returnând *centrul de greutate al unei suprafețe delimitată de o curbă* [Ghi15_1].

În fig.4.4 este ilustrată baza de reguli pentru acest sistem fuzzy, care poate fi considerat ca un regulator de tip proporțional, deoarece sistemul fuzzy are o singură intrare [Pai96].

Funcții de apartenență de tip trapezoidal

În fig.4.5 sunt ilustrate funcțiile de apartenență de tip trapezoidal pentru mărimea de intrare, iar în fig.4.6 sunt prezentate funcțiile de apartenență de tip trapezoidal pentru mărimea de ieșire.

Mulțimile fuzzy cât și universul discuției pentru mărimile de intrare și de ieșire, metoda și motorul de inferență utilizate precum și procesul de defuzzificare utilizat sunt aceleași cu cele prezentate în cazul precedent.

Baza de reguli în acest caz este aceeași cu cea prezentată în fig.4.4.

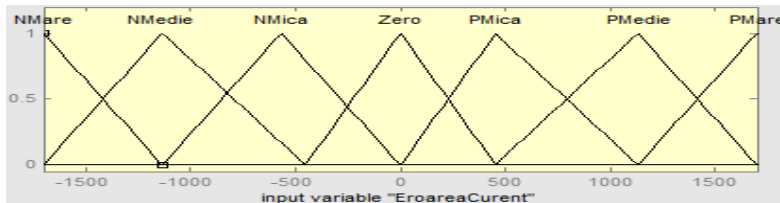


Fig.4.2. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "EroareaCurent".

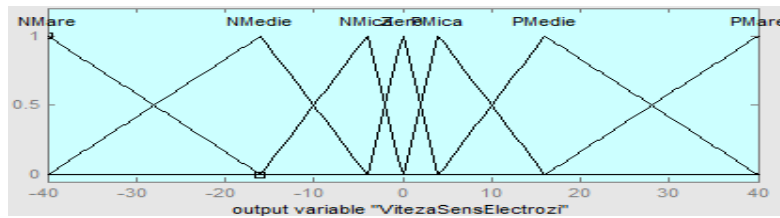


Fig.4.3. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire "VitezaSensElectrozi".

```

1. If (EroareaCurent is NMare) then (VitezaSensElectrozi is PMare) (1)
2. If (EroareaCurent is NMedie) then (VitezaSensElectrozi is PMedie) (1)
3. If (EroareaCurent is NMica) then (VitezaSensElectrozi is PMica) (1)
4. If (EroareaCurent is Zero) then (VitezaSensElectrozi is Zero) (1)
5. If (EroareaCurent is PMica) then (VitezaSensElectrozi is NMica) (1)
6. If (EroareaCurent is PMedie) then (VitezaSensElectrozi is NMedie) (1)
7. If (EroareaCurent is PMare) then (VitezaSensElectrozi is NMare) (1)
    
```

Fig.4.4. Baza de reguli pentru sistemul fuzzy propus.

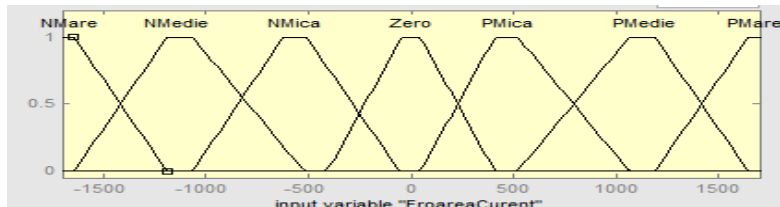


Fig.4.5. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "EroareaCurent".

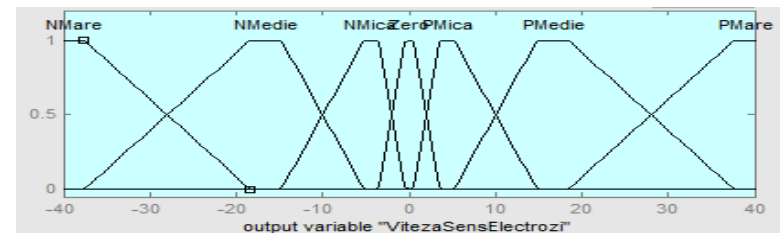


Fig.4.6. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire "VitezaSensElectrozi".

Funcții de apartenență de tip trapezoidal la capete și triunghiular în rest

În fig.4.7 sunt ilustrate funcțiile de apartenență de tip trapezoidal pentru mulțimile fuzzy *NMare* și *PMare* și triunghiular în rest pentru mărimea de intrare, iar în fig.4.8 sunt prezentate funcțiile de apartenență de tip trapezoidal pentru mulțimile fuzzy *NMare* și *PMare* și triunghiular în rest pentru mărimea de ieșire.

Și în acest caz mulțimile fuzzy și universul discuției pentru mărimile de intrare și de ieșire, metoda și motorul de inferență utilizate precum și procesul de defuzzificare utilizat sunt aceleași ca și în cazurile precedente.

Baza de reguli pentru acest sistem fuzzy este aceeași cu cea prezentată în fig.4.4.

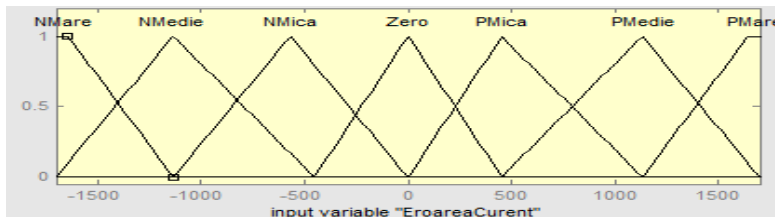


Fig.4.7. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "EroareaCurent".

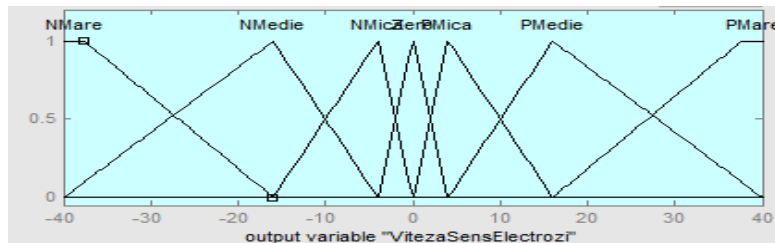


Fig.4.8. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire "VitezaSensElectroz".

4.2.1.1.2. Simularea funcționării sistemului de conducere cu regulator fuzzy

În vederea simulării funcționării sistemelor de conducere cu regulator fuzzy propuse se utilizează schema bloc din fig.4.9, respectiv modelul *MM-EXP1*. În scopul de a testa performanța sistemului sunt utilizate cele trei tipuri de mulțimi fuzzy prezentate anterior. În cazul simulărilor se consideră că mărimea de referință este de $56,5 \text{ kA}$, valoare aleasă conform documentației tehnice a cuptorului real considerat pentru treapta 16 de setare a transformatorului [***_2]. Timpul de eșantionare setat este de $1/10000 \text{ sec}$. Pentru a putea compara valoarea mărimii de referință cu ieșirea din proces se utilizează blocul *RMS* care permite obținerea valorii efective a curentului.

În fig.4.10 sunt reprezentate mărimile de referință, respectiv de ieșire din sistemele fuzzy considerate corespunzătoare celor trei tipuri de mulțimi fuzzy. Analizând figura se poate constata că în cazul mulțimilor fuzzy de tip triunghiular se obține un suprareglaj mai mare comparativ cu celelalte mulțimi fuzzy. Timpul de răspuns este aproximativ același pentru toate funcțiile de apartenență, dar după $0,1 \text{ sec}$ se observă că în cazul funcțiilor de apartenență de tip trapezoidal răspunsul este stabil și nu mai oscilează, dar nu reproduce fidel valoarea mărimii de referință. În cazul celorlalte mulțimi fuzzy, răspunsul sistemelor prezintă o oarecare oscilație în

jurul mărimii de referință după 0,1 sec până la aproximativ 0,18 sec, apoi răspunsul sistemelor devine stabil, reproducând fidel valoarea mărimii de referință.

MF mixte prezintă o performanță mai bună ținând cont că MF triunghiulare prezintă un suprareglaj mai mare, iar MF trapezoidale nu urmărește fidel valoarea mărimii de referință.

Fig.4.11 prezintă formele de variație ale curentului și ale tensiunii arcului obținute în urma simulării sistemului de conducere bazat pe reglatoare fuzzy cu diferite forme ale funcțiilor de apartenență. Se poate constata că forma de undă a tensiunii arcului este similară celei prezentată în literatura de specialitate [Pan08], iar curentului operează în regimul de curent neîntrerupt. Amplitudinea curentului este de aproximativ 85 kA în domeniul prezentat.

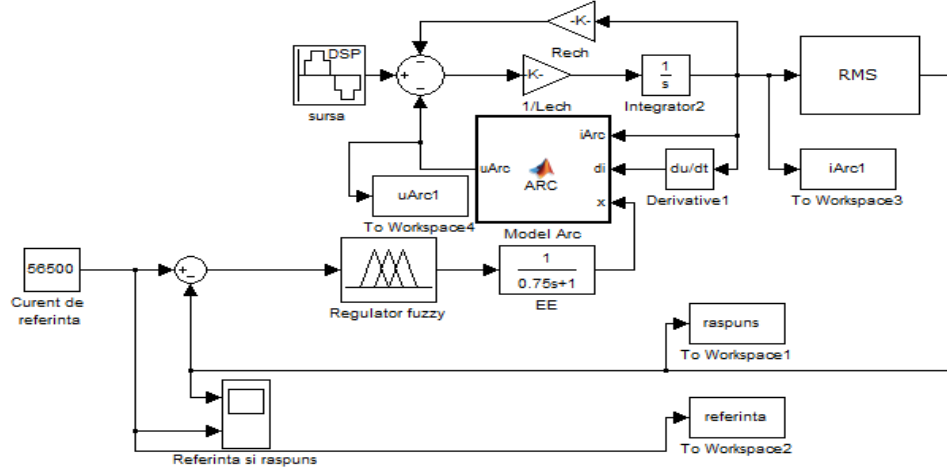


Fig.4.9. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe logica fuzzy.

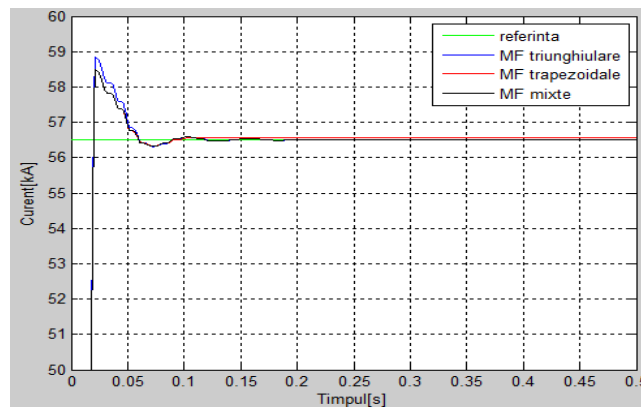


Fig.4.10. Referința și răspunsurile sistemelor cu regulator fuzzy utilizând MF triunghiulare, trapezoidale respectiv mixte.

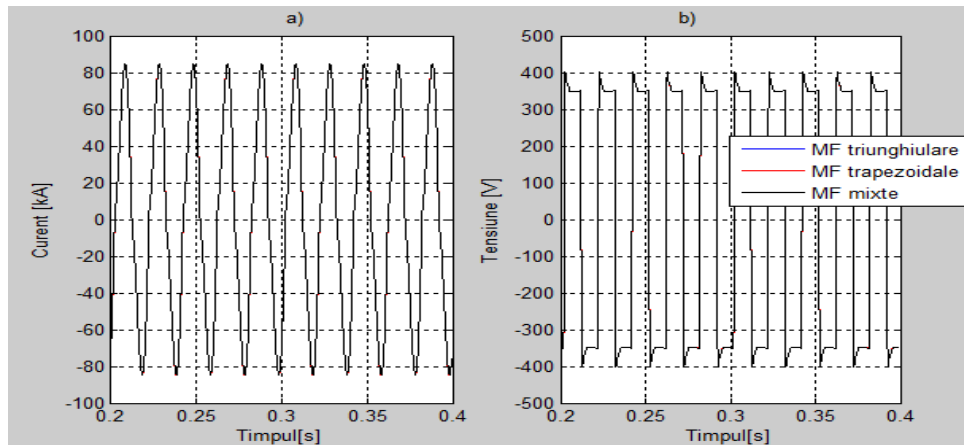


Fig.4.11. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului.

4.2.1.1.3. Variația treaptă a mării de referință

Conform documentației tehnice a cuptorului [***_2], pentru o anumită treaptă de setare a transformatorului se poate opera cu 6 valori ale curentului arcului. Ținând cont de acest aspect, s-a implementat un sistem de conducere care permite modificarea valorii mării de referință într-un anumit domeniu. În fig.4.12 este ilustrată schema bloc a sistemului de conducere bazat pe regulator fuzzy, care utilizează diferite funcții de apartenență, modificarea valorii mării de referință având loc la momentul $t=0,5$ sec.

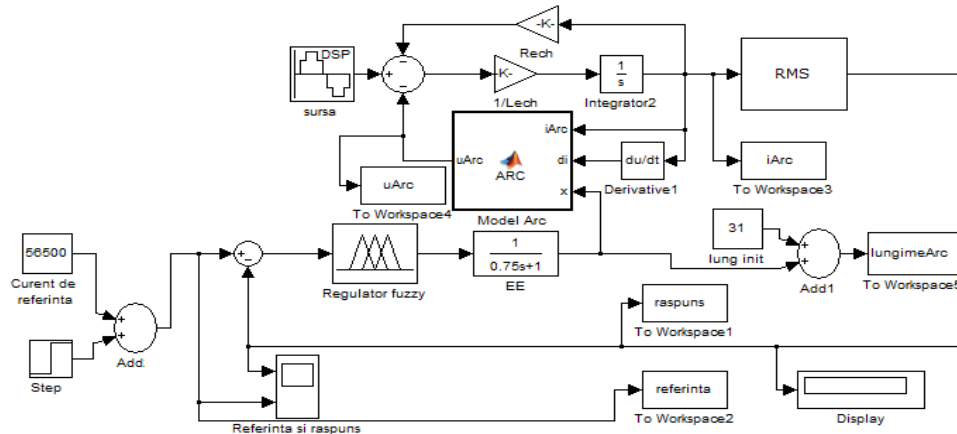


Fig.4.12. Schema bloc pentru regulatorul fuzzy pentru o variație treaptă a referinței.

Răspunsurile sistemelor în urma modificării curentului de referință sunt ilustrate în fig.4.13a). La momentul $t=0,5$ sec valoarea curentului de referință a crescut de la 56,5 kA la 59,5 kA, utilizând un semnal de tip treaptă în referință. Se poate observa că după aproximativ 0,2 sec curentul arcului reușește să urmărească valoarea referinței, în toate cele trei cazuri (MF triunghiulare, trapezoidale și mixte). Răspunsurile obținute pentru funcțiile de apartenență de tip triunghiular și mixte sunt mai rapide și mai fidele referinței comparativ cu cel obținut pentru funcții de

apartenență de tip trapezoidal. Fig.4.13b) prezintă variația lungimii arcului în urma comenzii transmisă de regulator. Se observă că la creșterea valorii curentului de referință scade lungimea arcului, aceasta devenind stabilă după 0,15 sec de la schimbarea valorii.

Variațiile curentului și tensiunii arcului pentru cazul în care este modificată referința sunt prezentate în fig.4.14. Se poate constata că la creșterea valorii curentului de referință are loc o creștere a curentului.

Pe baza rezultatelor obținute în §4.2.1.1.2 și §4.2.1.1.3 s-a ales varianta cu MF mixte pentru efectuarea simulărilor în cazul regulatorului fuzzy cu o intrare și o ieșire.

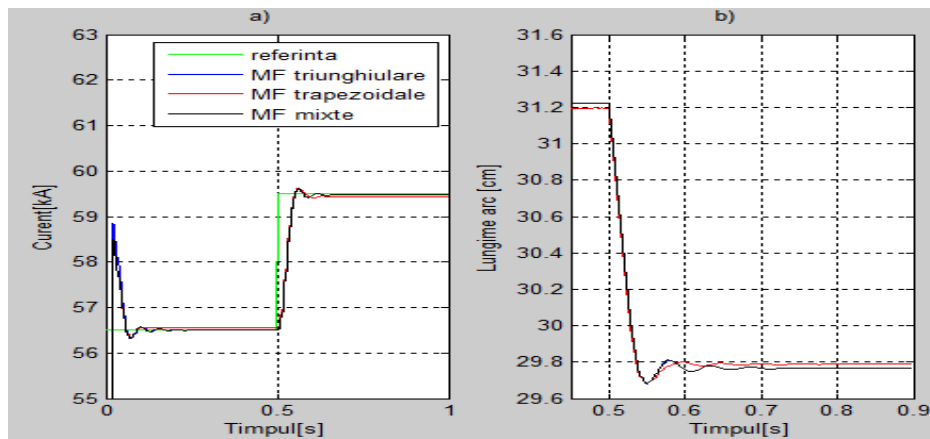


Fig.4.13. a) Referința și răspunsurile sistemelor cu MF triunghiulare, trapezoidale și mixte, b) Variația lungimii arcului la modificarea treaptă a referinței.

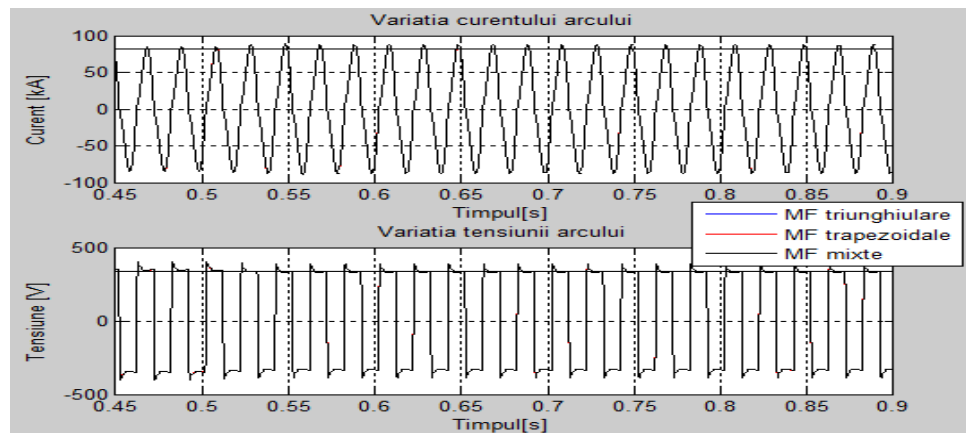


Fig.4.14. Variația curentului și a tensiunii arcului la modificarea treaptă a referinței.

4.2.1.1.4. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte

În fig.4.15 este prezentat sistemul de conducere implementat în Simulink-Matlab în cazul în care variația mărimii de referință are forma unor succesiuni de trepte (fig.4.16a)). Rolul regulatorului fuzzy este acela de a modifica lungimea

arcului electric astfel încât curentul să urmărească variațiile mărimii de referință. Așa cum s-a menționat elementul de execuție este de tip *PT1* cu constanta $T=0,75$ sec. Mărimea de referință este modificată prin utilizarea unei componente de tip *Slider Gain*, modificările valorilor referinței fiind efectuate la momente aleatoare de timp.

În fig.4.16a) sunt ilustrate 4 variații ale mărimii de referință, între 48 kA și 64 kA. La momentul $t=0,6$ sec valoarea mărimii de referință scade de la 56,5 kA la 52,5 kA, la $t=1,4$ sec scade la 48 kA, la $t=2,6$ sec crește la 63,8 kA, iar la $t=4$ sec scade din nou la 57 kA.

Se observă că pentru fiecare variație treaptă a mărimii de referință, curentul arcului (răspunsul sistemului) reușește să urmărească referința. În fig.4.16b) sunt prezentate variațiile lungimii arcului în funcție de comenzilor trimise de regulator. Se observă că la scăderea valorii mărimii de referință are loc o creștere a lungimii arcului, iar la o creștere a valorii referinței are loc o scădere a lungimii arcului.

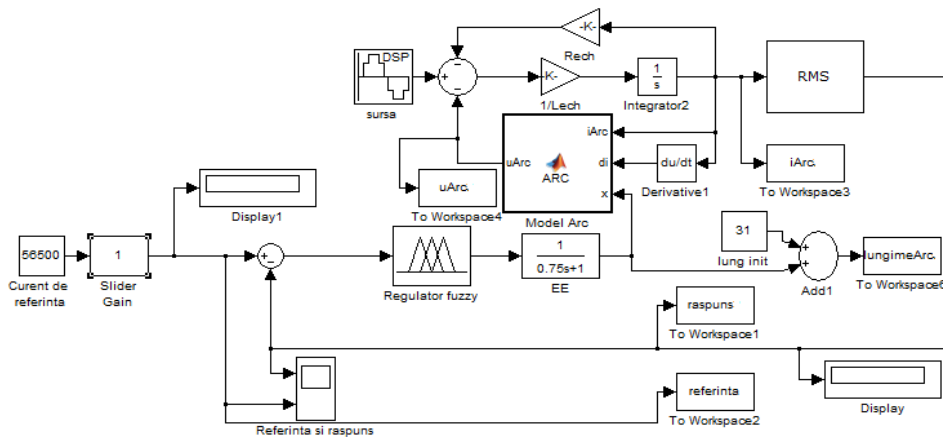


Fig.4.15. Schema bloc a sistemului de conducere cu regulator fuzzy pentru variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte.

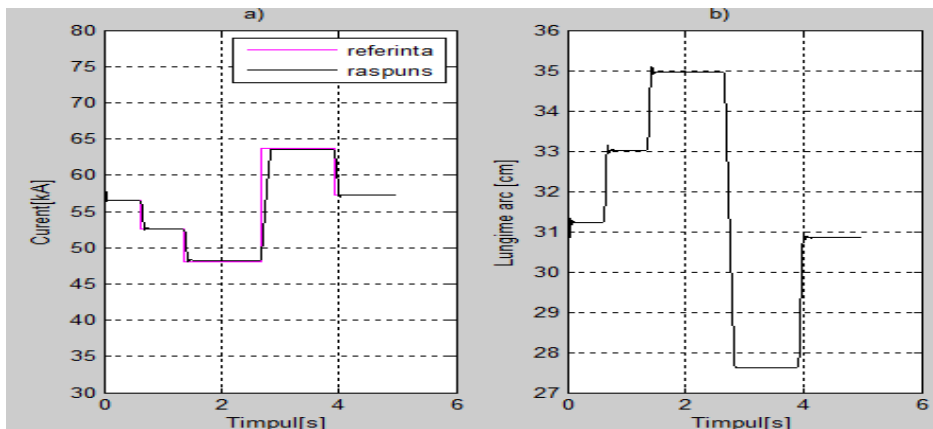


Fig.4.16. a) Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte și respectiv variația răspunsului sistemului (curentul arcului), b) Variația lungimii arcului.

4.2.1.1.5. Introducerea unei perturbații de tip treaptă în proces în cazul unei referințe constante

În vederea testării sistemului de conducere propus pentru diferite forme ale funcțiilor de apartenență se introduce o perturbație în proces la momentul $t=0,5$ sec, care constă în scăderea lungimii de arc cu 10 cm (practic un semnal de tip treaptă), obținându-se astfel o lungime de arc de 21 cm (fig.4.18a)). Schema bloc aferentă este ilustrată în fig.4.17.

Fig.4.18b) prezintă răspunsurile sistemelor de conducere bazate pe regulator fuzzy cu acțiunea perturbației asupra procesului. Se poate constata că în cazul celor trei funcții de apartenență utilizate, răspunsul este practic același. La scăderea lungimii arcului are loc o creștere a curentului arcului, perturbația fiind compensată de regulatorul fuzzy care furnizează o mărime de comandă astfel încât după aproximativ $0,25$ sec, curentul arcului este readus la valoarea inițială.

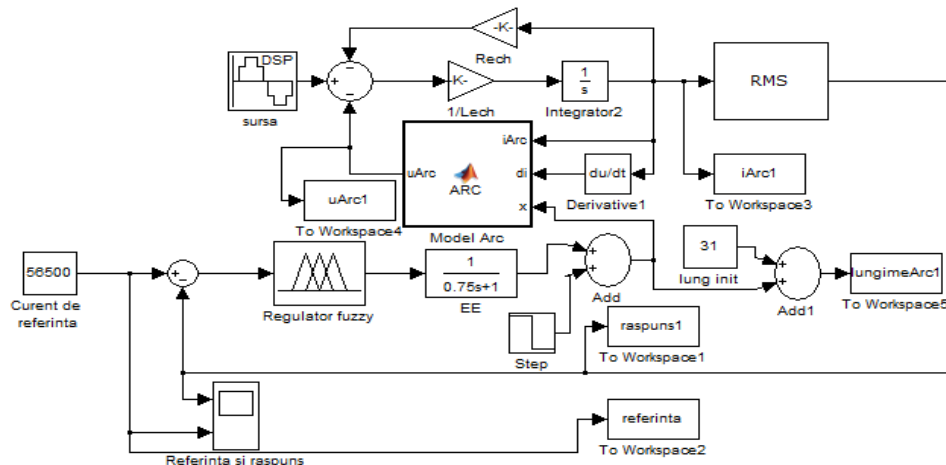


Fig.4.17. Schema bloc pentru regulator fuzzy la acțiunea unei perturbații de tip treaptă.

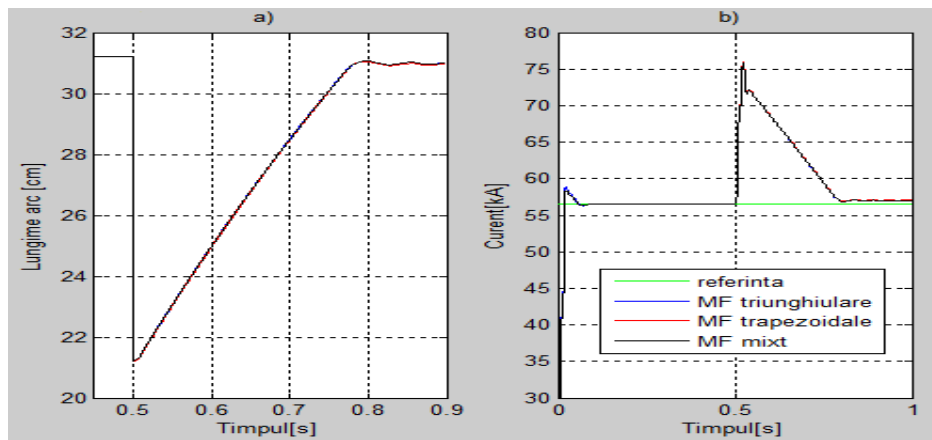


Fig.4.18 a) Variația lungimii arcului la acțiunea unei perturbații de tip treaptă, b) Referința și răspunsuri sisteme cu MF triunghiulare, trapezoidale respectiv mixte.

Variațiile curentului și tensiunii arcului electric, în urma introducerii unei perturbații în proces (la $t=0,5$ sec), sunt prezentate în fig.4.19, la scăderea lungimii arcului obținându-se un curent mai mare și o tensiune a arcului mai mică. Se observă că efectul reglării apare la circa $t=0,78$ sec la care pentru toate cele trei cazuri ale mulțimilor fuzzy (MF triunghiulare, trapezoidale sau mixte) curentul și tensiunea revin la valorile inițiale.

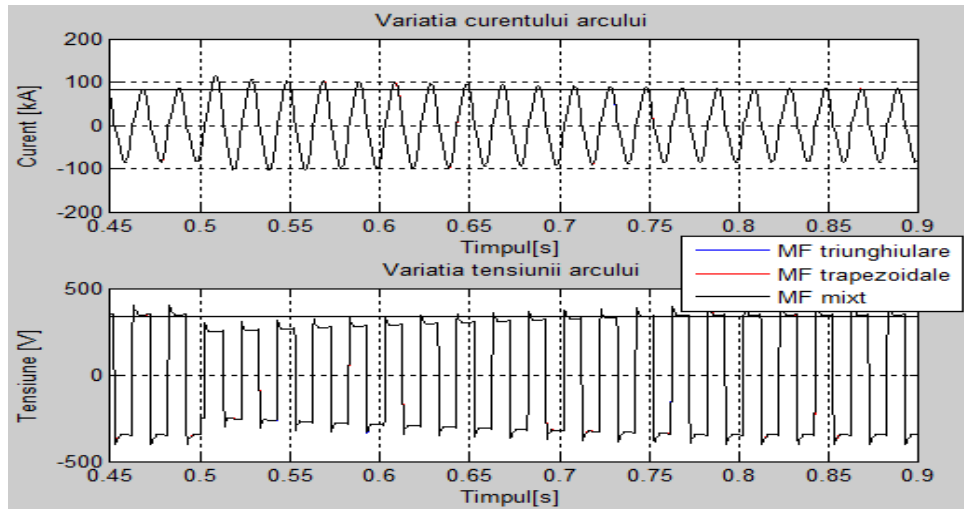


Fig.4.19. Variația curentului și tensiunii arcului la introducerea unei perturbații în proces.

4.2.1.1.6. Introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces în cazul unei referințe constante

În fig.4.20 este prezentată structura sistemului de conducere implementat în Simulink-Matlab, în cazul în care acționează perturbații de tip succesiuni de trepte asupra procesului, rolul regulatorului fuzzy fiind de a trimite comenzi către elementul de execuție astfel încât să se readucă lungimea arcului la lungimea setată inițial, pentru a se obține valoarea curentului de referință. Perturbațiile sunt introduse la momente aleatoare de timp prin intermediul unei componente de tip *Slider Gain*. Lungimea considerată inițială a arcului este de 31 cm, iar perturbațiile care acționează asupra procesului pot varia între ± 10 cm față de lungimea inițială respectiv actuală a arcului.

Fig.4.21a) prezintă 5 momente aleatoare de timp la care se introduc perturbațiile sub forma de succesiuni de trepte. La momentul $t=0,6$ sec se aplică o primă treaptă (negativă) de $1,3$ cm ajungându-se la o lungime a arcului de $29,7$ cm. A doua treaptă se aplică la momentul $t=1,6$ sec obținându-se o lungime de arc de $36,6$ cm, la momentul $t=2,5$ sec se aplică a treia treaptă (negativă) ajungându-se la o lungime de arc de $21,2$ cm, la momentul $t=3,5$ sec se aplică a patra treaptă (negativă) ajungându-se la o lungime de arc de 29 de cm, iar la momentul $t=4,3$ sec se aplică a cincea treaptă ajungându-se la o lungime de arc de 40 cm. Se observă că sistemul de conducere compensează efectul acestor perturbații, sistemul revenind de fiecare dată la lungimea inițială a arcului de 31 cm (fig.4.21a)), respectiv la valoarea curentului de referință de $56,5$ kA (fig.4.21b)). Se constată că răspunsul sistemului este stabil și nu prezintă oscilații.

În fig.4.22 se prezintă cazul în care se aplică o a doua perturbație de tip treaptă înainte ca sistemul să revină la lungimea inițială a arcului. Sunt considerate trei cazuri: peste o treaptă negativă se aplică încă o treaptă negativă, peste o treaptă pozitivă se aplică încă o treaptă pozitivă, peste o treaptă negativă se aplică încă o treaptă pozitivă înainte de epuizarea regimurilor tranzitorii. Se observă că și în acest caz sistemul de conducere asigură compensarea efectului perturbațiilor.

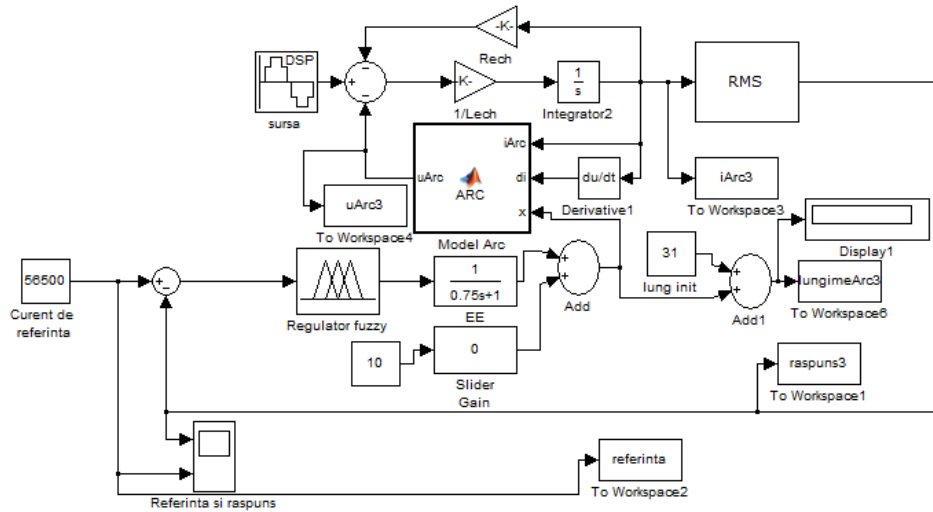


Fig.4.20. Schema bloc a sistemului de conducere în cazul unei perturbații de tip succesiuni de trepte.

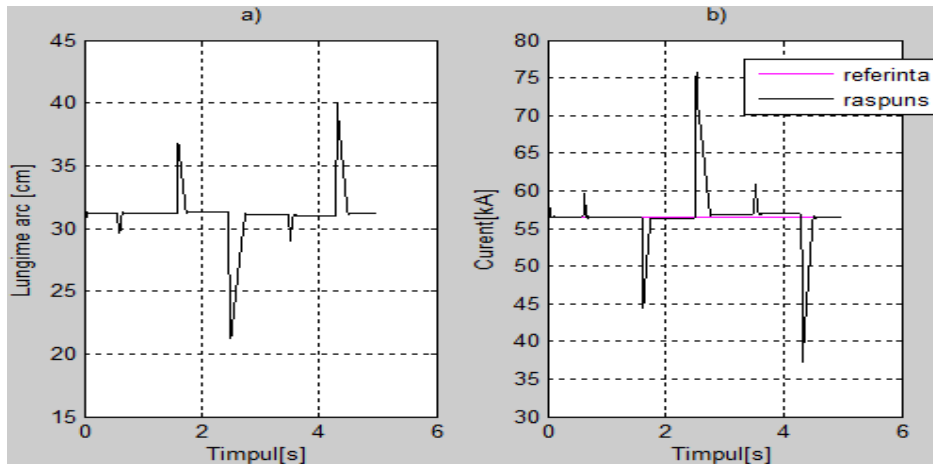


Fig.4.21. a) Variația lungimii arcului, b) Curentul de referință respectiv variația curentului arcului.

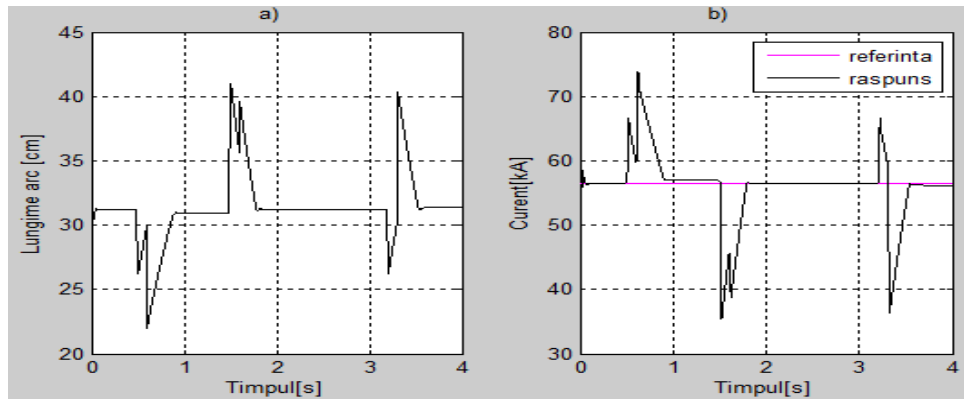


Fig.4.22. a) Variația lungimii arcului, b) Curentul de referință respectiv variația curentului arcului.

4.2.1.2. Regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire

Regulatorul fuzzy conceput primește două mărimi de intrare: eroarea și derivata erorii, iar mărimea de ieșire este o valoare ce reprezintă viteza și sensul de deplasare al electrozilor. Universul discuției pentru aceste variabile a fost stabilit în funcție de informațiile obținute de la experți tehnologi, dar și în funcție de numeroase teste efectuate de autor prin simulări. Valorile mărimilor de intrare și de ieșire nu sunt normate, ele fiind utilizate în starea lor reală.

Baza de reguli a sistemului fuzzy a fost concepută în funcție de informațiile furnizate de la experți tehnologi, respectiv în funcție de studiul elaborat în [Bab12]. Aceasta asigură modificarea vitezei și sensului de deplasare al electrozilor cu scopul de a asigura o funcționare a cuptorului fără întreruperi, respectiv de a elimina introducerea armonicilor în rețeaua de alimentare, dar și de a elimina avariile care pot să apară în timpul procesului de elaborare al oțelului (ex: ruperea electrozilor prin contactul cu bucăți de metal aflate în stare solidă).

4.2.1.2.1. Proiectarea regulatorului fuzzy

Sistemul fuzzy a fost proiectat în Matlab, utilizând toolbox-ul fuzzy [***_3], [***_4]. Mărimile de intrare sunt abaterea curentului și derivata erorii, iar mărimea de ieșire este sensul și viteza de deplasare al unui electrod. Universul discuției pentru aceste variabile a fost ales în funcție de informațiile obținute de la experți tehnologi, dar și în funcție de numeroase teste efectuate de autor prin simulare.

Ținând cont de caracteristicile arcului electric precum și de cele ale procesului de elaborare al oțelului s-au ales funcții de apartenență de tip triunghiular, trapezoidal sau o combinație între cele două funcții atât pentru mărimile de intrare cât și pentru mărimea de ieșire. Pentru fiecare variabilă lingvistică s-au utilizat 7 mulțimi fuzzy: *NMare*, *NMedie*, *NMică*, *Zero*, *PMică*, *PMedie* și *PMare*.

În cadrul simulărilor s-au ținut cont de următoarele ipoteze în concordanță cu cerințele tehnologice reale:

- mulțimile fuzzy pentru mărimile de intrare sunt simetrice;
- regulatorul nu trebuie să acționeze la o variație a mărimii de abatere în limita a ± 500 A;
- mulțimile fuzzy pentru mărimea de ieșire sunt asimetrice.

Funcții de apartenență de tip triunghiular

Domeniului mulțimilor fuzzy pentru mărimea de intrare *eroarea curent* și pentru mărimea de ieșire *sensul și viteza de deplasare al electrozilor* sunt aceleași care au fost prezentate și la sistemul fuzzy cu o intrare și o ieșire cu MF de tip triunghiular și anume: $[-1700, 1700]$ A pentru *eroarea curent* (fig.4.2) și $[-40, 40]$ pentru mărimea de ieșire (fig.4.3).

În fig.4.23 sunt ilustrate funcțiile de apartenență de tip triunghiular pentru mărimea de intrare *derivata erorii*, universul discuției fiind ales în domeniul $[-3000000, 3000000]$ în funcție de numeroase teste efectuate prin simulare.

Metoda de inferență utilizată este de tip *Mamdani* deoarece pentru mărimea de ieșire au fost folosite seturi fuzzy distribuite, motorul de inferență este de tip *min-max* [Pre97], iar procesul de defuzzificare utilizat este de tip *centroid*, acesta returnând *centrul de greutate al unei suprafețe delimitată de o curbă* [Ghi15_1].

În tabelul 4.1 este ilustrată baza de reguli pentru sistemul fuzzy propus, care poate fi considerat ca un regulator de tip proporțional derivativ [God00]. Pentru toate cele trei MF (triunghiulare, trapezoidale sau mixte) sunt utilizate aceeași bază de reguli precum și același univers al discuției.

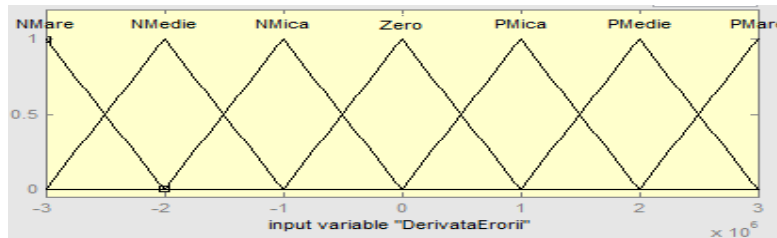


Fig.4.23. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "DerivataErorii"

Tabelul 4.1 – Baza de reguli pentru sistemul fuzzy propus

comanda		Δe						
		NMare	NMedie	NMică	Zero	PMică	PMedie	PMare
e	NMare	PMare	PMare	PMare	PMare	PMedie	PMică	Zero
	NMedie	PMare	PMare	PMare	PMedie	PMică	Zero	NMică
	NMică	PMare	PMare	PMedie	PMică	Zero	NMică	NMedie
	Zero	PMare	PMedie	PMică	Zero	NMică	NMedie	NMare
	PMică	PMedie	PMică	Zero	NMică	NMedie	NMare	NMare
	PMedie	PMică	Zero	NMică	NMedie	NMare	NMare	NMare
	PMare	Zero	NMică	NMedie	NMare	NMare	NMare	NMare

Funcții de apartenență de tip trapezoidal

Domeniului mulțimilor fuzzy pentru mărimea de intrare *eroarea curent* și pentru mărimea de ieșire *sensul și viteza de deplasare al electrozilor* sunt aceleași care au fost prezentate la sistemul fuzzy cu o intrare și o ieșire cu MF de tip trapezoidal și anume: $[-1700, 1700]$ A pentru *eroarea curent* (fig.4.5) și $[-40, 40]$ pentru mărimea de ieșire (fig.4.6).

În fig.4.24 sunt ilustrate funcțiile de apartenență de tip trapezoidal pentru mărimea de intrare *derivata erorii*, universul discuției fiind ales și în acest caz în domeniul $[-3000000, 3000000]$.

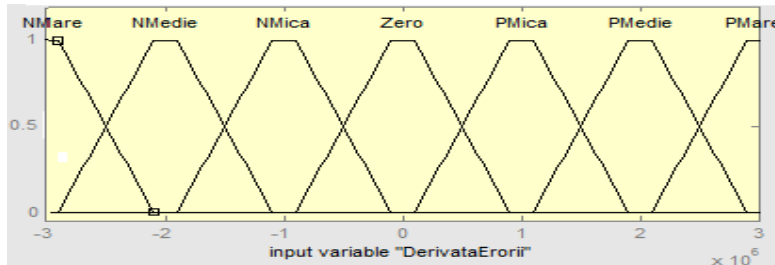


Fig.4.24. Multimi fuzzy pentru mărimea de intrare "DerivataErrorii".

Funcții de apartenență de tip trapezoidal la capete și triunghiular în rest

Și în acest caz domeniului multimirilor fuzzy pentru mărimea de intrare *eroarea curent* și pentru mărimea de ieșire *sensul și viteza de deplasare al electrozilor* sunt aceleași care au fost prezentate la sistemul fuzzy cu o intrare și o ieșire cu MF de tip mixt și anume: $[-1700, 1700]$ A (fig.4.7), respectiv $[-40, 40]$ (fig.4.8).

În fig.4.25 sunt ilustrate funcțiile de apartenență de tip mixt pentru mărimea de intrare *derivata erorii*, universul discuției fiind ales și în acest caz în domeniul $[-3000000, 3000000]$.

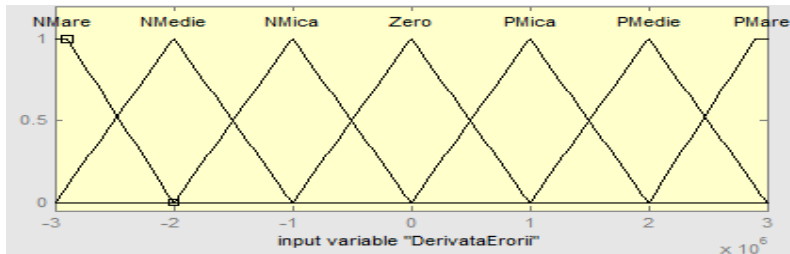


Fig.4.25. Multimi fuzzy pentru mărimea de intrare "DerivataErrorii".

4.2.1.2.2. Simularea funcționării sistemelor de conducere cu regulator fuzzy

În vederea simulării sistemelor de conducere cu regulator fuzzy propuse se utilizează schema bloc din fig.4.26, respectiv modelul *MM-EXP1*. În scopul testării performanței sistemului sunt utilizate cele trei tipuri de MF prezentate anterior. În cazul simulărilor se consideră că mărimea de referință este de $56,5$ kA, valoare aleasă conform documentației tehnice a cuptorului considerat pentru *treapta 16* de setare a transformatorului [***_2]. Timpul de eșantionare setat este de $1/10000$ sec, iar indicii de calitate considerați pentru obținerea performanței sistemelor sunt suprareglajul și timpul de reglare (durata regimului tranzitoriu).

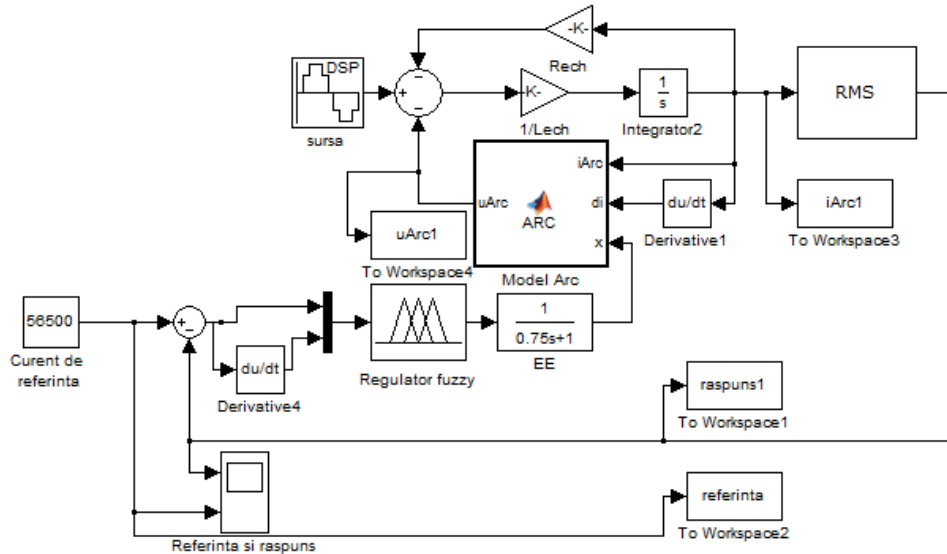


Fig.4.26. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe logica fuzzy.

În fig.4.27 sunt ilustrate răspunsurile sistemelor obținute pentru cele trei tipuri de mulțimi fuzzy. Se observă că răspunsurile prezintă același suprareglaj, iar la aproximativ $t=0,08$ sec răspunsul sistemelor se stabilizează, dar răspunsul dat de sistemul care utilizează mulțimi fuzzy trapezoidale prezintă o abatere mică față de mărimea de referință.

În cazul celor trei mulțimi fuzzy formele de undă ale tensiunii și curentului arcului (fig.4.28) prezintă aceleași variații, fiind obținute pentru un regim staționar (nu se introduc perturbații în proces) și corespund celor din literatura de specialitate [Pan08].

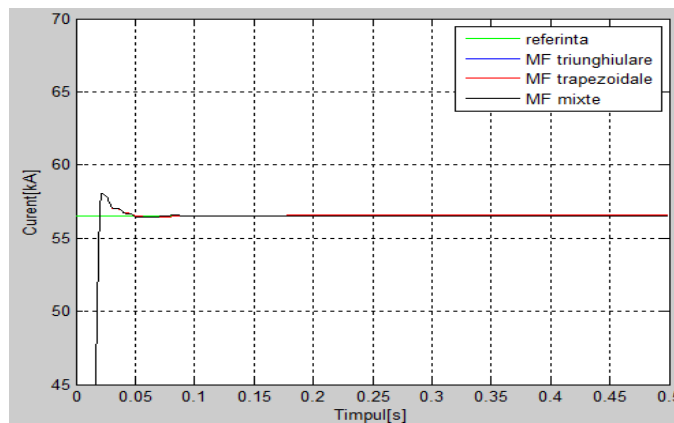


Fig.4.27. Referința și răspunsurile sistemelor cu regulator fuzzy utilizând MF triunghiulare, trapezoidale și mixte.

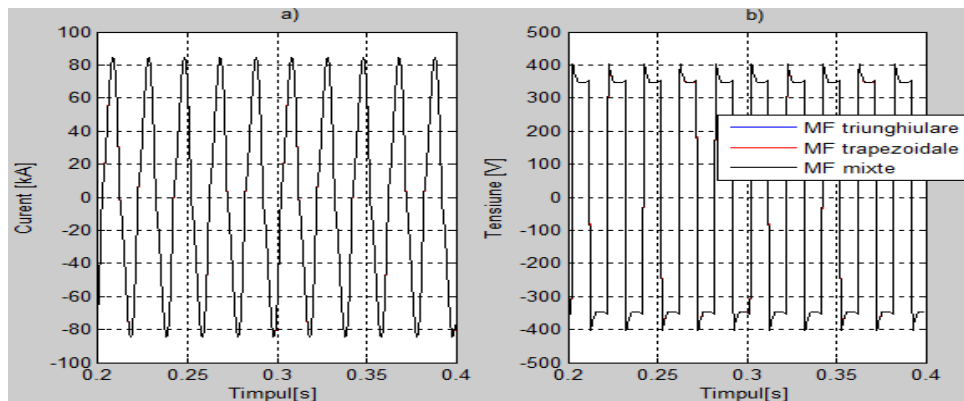


Fig.4.28. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului.

4.2.1.2.3. Variația treaptă a mării de referință

Ținând cont de aceleași considerente prezentate la regulatorul fuzzy cu o intrare și o ieșire s-a implementat un sistem de conducere bazat pe regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire care permite modificarea valorii mării de referință într-un anumit domeniu (fig.4.29). Modificarea valorii referinței este obținută prin introducerea unui semnal de tip treaptă la momentul $t=0,5$ sec, conducând la o creștere a curentului de referință de la valoarea $56,5$ kA la $59,5$ kA (fig.4.30a)).

Se poate observa că după aproximativ $0,2$ sec curentul arcului reușește să urmărească valoarea referinței, în toate cele trei cazuri (MF triunghiulare, trapezoidale și mixte). Răspunsurile obținute pentru funcțiile de apartenență de tip triunghiular și mixt sunt mai rapide și mai fidele referinței comparativ cu cel obținut pentru funcții de apartenență de tip trapezoidal. Fig.4.30b) prezintă variația lungimii arcului în urma comenzii transmise de regulator. Se observă că la creșterea valorii curentului de referință scade lungimea arcului, aceasta devenind stabilă după $0,15$ sec de la schimbarea valorii.

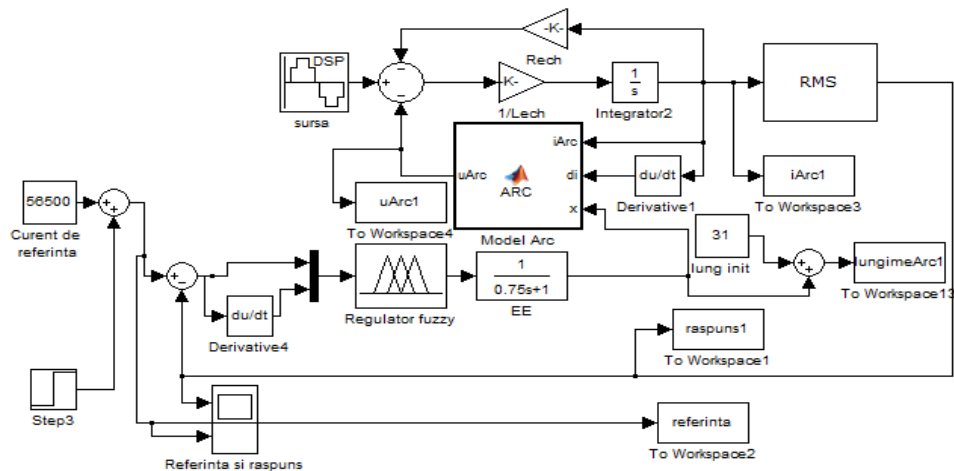


Fig.4.29. Schema bloc pentru regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire la modificarea treaptă a valorii referinței.

Variațiile curentului și tensiunii arcului pentru cazul în care este modificată valoarea referinței sunt prezentate în fig.4.31. Se poate constata că la creșterea valorii curentului de referință are loc o creștere a curentului.

În continuare pentru efectuarea simulărilor în cazul regulatorului fuzzy cu o intrare și o ieșire s-a ales varianta cu MF mixte.

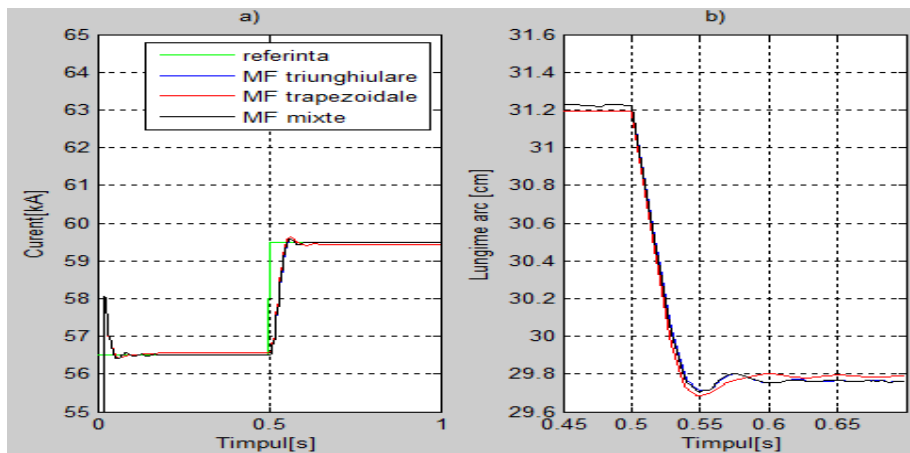


Fig.4.30. a) Referința și răspunsurile sistemelor cu MF triunghiulare, trapezoidale și mixte, b) Variația lungimii arcului la modificarea treaptă a referinței pentru regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire.

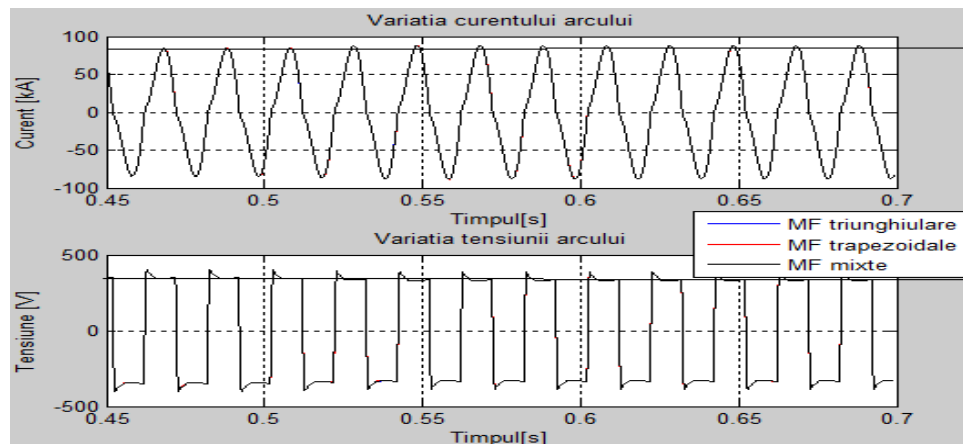


Fig.4.31. Variația curentului și a tensiunii arcului la o modificare a valorii referinței – regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire.

4.2.1.2.4. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte

În fig.4.32 este prezentat sistemul de conducere implementat în Simulink-Matlab în cazul în care variația mărimii de referință are forma unor succesiuni de trepte (fig.4.33a)). Rolul regulatorului fuzzy este acela de a modifica lungimea arcului electric astfel încât curentul să urmărească variațiile mărimii de referință. Așa cum s-a menționat elementul de execuție este de tip $PT1$ cu constanta $T=0,75$

sec. Valoarea mărimii de referință este modificată la momente aleatoare de timp prin utilizarea unei componente de tip *Slider Gain*. Lungimea inițială a arcului este de 31 cm.

Fig.4.33a) prezintă 5 variații ale mărimii de referință, iar fig.4.33b) ilustrează variațiile lungimii arcului astfel încât să fie obținută noua valoare a referinței. La momentul $t=0,3$ sec valoarea mărimii de referință scade de la 56,5 kA la 53,5 kA, observându-se că lungimea arcului crește de la valoarea inițială de 31 cm la 32,8 cm. La momentul $t=0,6$ sec valoarea mărimii de referință crește de la 53,5 kA la 62 kA, astfel lungimea arcului scade de la valoarea de 32,8 cm la 28,4 cm. La momentul 1,1 sec valoarea mărimii de referință este din nou modificată obținându-se o valoare de 49,5 kA, corespunzătoare unei lungimi a arcului de 34,5 cm. La momentul $t=1,8$ sec valoarea referinței este 57 kA, lungimea arcului fiind scăzută la 31 cm. La momentul $t=2,15$ sec noua valoare a referinței este de 62 kA conducând la o lungime a arcului de 29,2 cm.

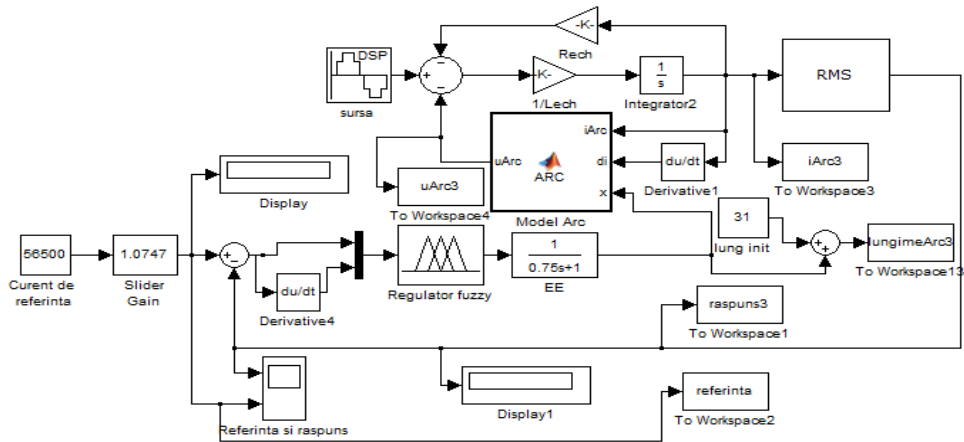


Fig.4.32. Schema bloc a sistemului de conducere cu regulator fuzzy pentru variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte.

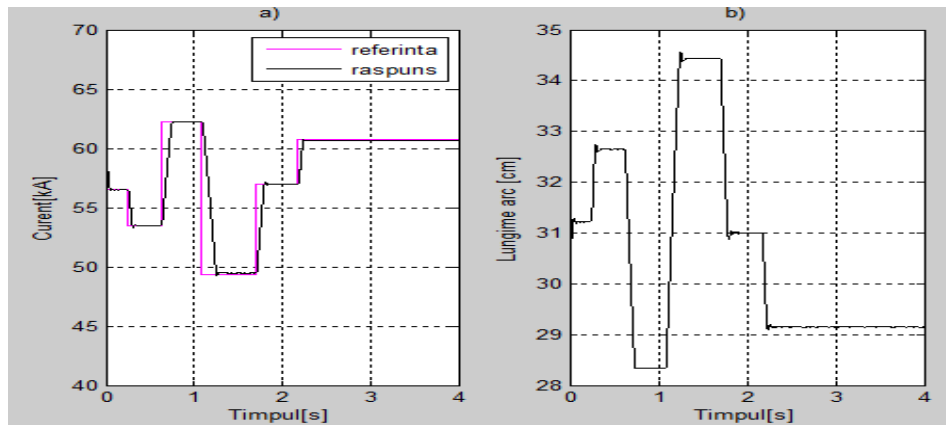


Fig.4.33. a) Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte și respectiv variația răspunsului sistemului (curentul arcului), b) Variația lungimii arcului.

4.2.1.2.5. Introducerea unei perturbații de tip treaptă în proces în cazul unei referințe constante

Pentru a testa sistemul de conducere bazat pe regulatorul fuzzy cu două intrări și o ieșire pentru diferite forme ale funcțiilor de apartenență se introduce o perturbație în proces la momentul $t=0,5$ sec care constă în scăderea lungimii arcului cu 10 cm (practic un semnal de tip treaptă), obținându-se astfel o lungime de arc de 21 cm (fig.4.35a)). Schema bloc aferentă este ilustrată în fig.4.34.

În fig.4.35b) sunt ilustrate răspunsurile sistemelor de conducere bazate pe regulator fuzzy cu acțiunea perturbației asupra procesului. Se poate constata că răspunsul este practic același în cazul celor trei funcții de apartenență utilizate.

Variațiile curentului și tensiunii arcului electric, în urma introducerii unei perturbații în proces (la $t=0,5$ sec), sunt prezentate în fig.4.36, la scăderea lungimii arcului obținându-se un curent mai mare și o tensiune a arcului mai mică. Se observă că efectul reglării apare la circa $0,8$ sec la care pentru toate cele trei cazuri ale mulțimilor fuzzy (**MF** triunghiulare, trapezoidale sau mixte) curentul și tensiunea revin la valorile inițiale.

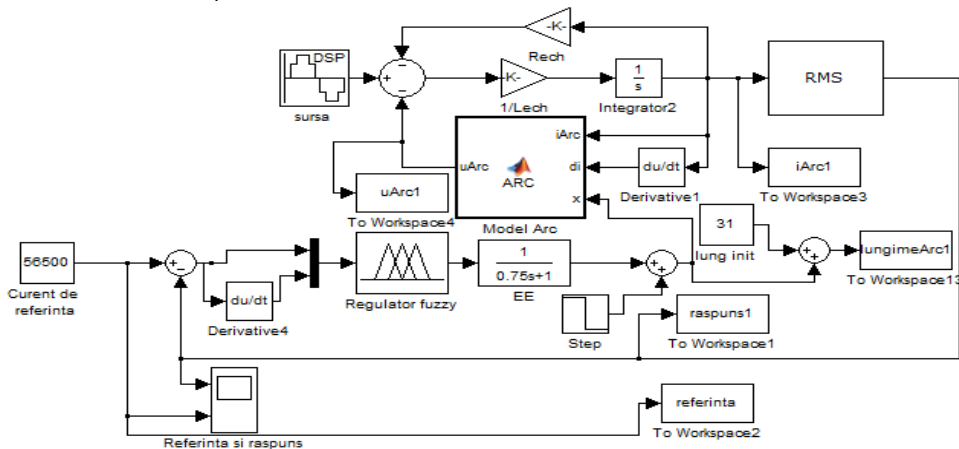


Fig.4.34. Schema bloc pentru simularea sistemului de conducere bazat pe regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire la introducerea unei perturbații de tip treaptă în proces.

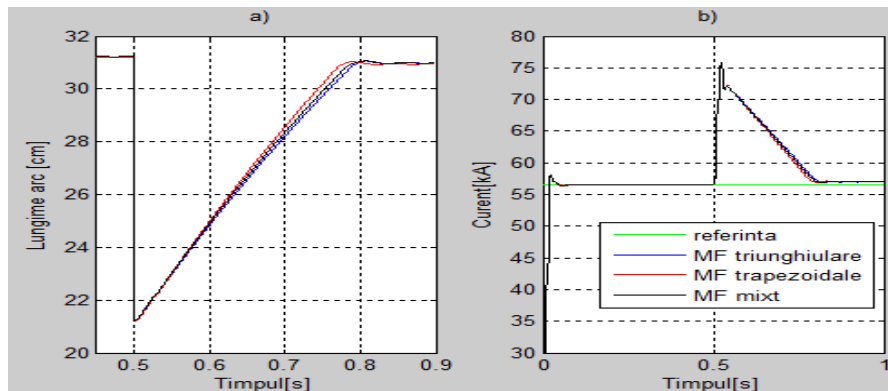


Fig.4.35. a) Variația lungimii arcului la apariția unei perturbații, b) Referința și răspunsuri sisteme utilizând regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire.

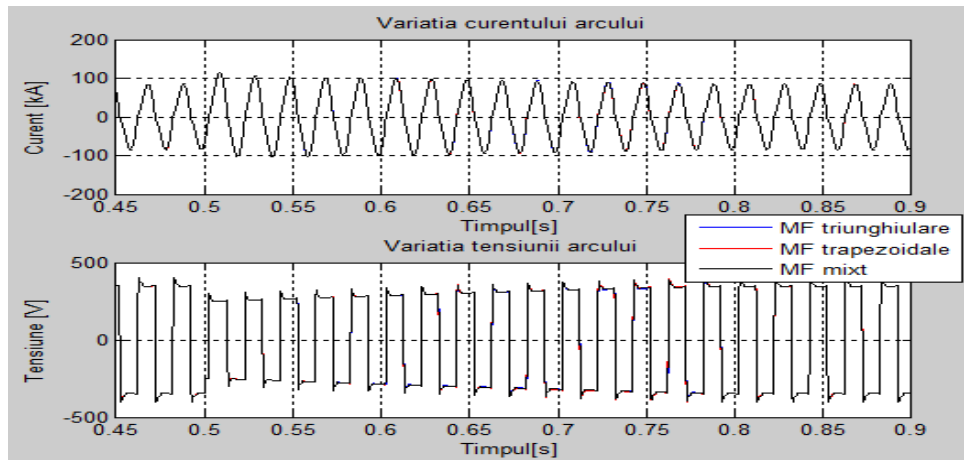


Fig.4.36. Variația curentului și tensiunii arcului la introducerea unei perturbații în proces în cazul regulatorului fuzzy cu două intrări și o ieșire.

4.2.1.2.6. Introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces în cazul unei referințe constante

Fig.4.37 ilustrează schema bloc Simulink pentru simularea sistemului de conducere bazat pe regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire în cazul în care acționează perturbații de tip succesiuni de trepte asupra procesului, rolul regulatorului fuzzy fiind de a trimite comenzi către elementul de execuție astfel încât să se readucă lungimea arcului la lungimea setată inițial, pentru a se obține valoarea curentului de referință. Perturbațiile sunt introduse la momente aleatoare de timp prin intermediul unei componente de tip *Slider Gain*. Lungimea considerată inițială a arcului este de 31 cm , iar perturbațiile care acționează asupra procesului pot varia între $\pm 12\text{ cm}$ față de lungimea inițială respectiv actuală a arcului.

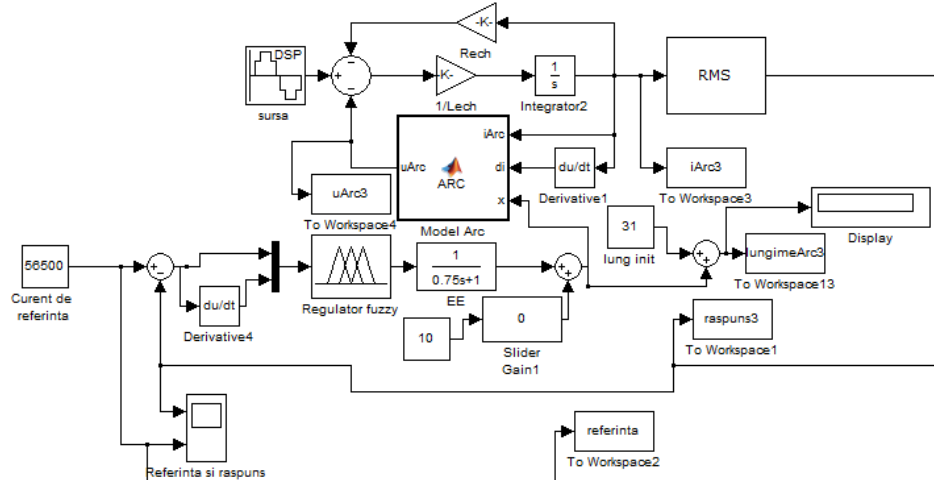


Fig.4.37. Schema bloc pentru regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire la acțiunea perturbațiilor de tip succesiuni de trepte.

În fig.4.38a) este prezentată variația lungimii arcului la introducerea perturbațiilor sub forma de succesiuni de trepte la momente aleatoare de timp. Se observă că sistemul de conducere compensează efectul acestor perturbații, sistemul revenind de fiecare dată la lungimea inițială a arcului de 31 cm (fig.4.38a)), respectiv la valoarea curentului de referință de 56,5 kA (fig.4.38b)). Se constată că răspunsul sistemului este stabil și nu prezintă oscilații.

În fig.4.39 se prezintă cazul în care se aplică o a doua perturbație de tip treaptă înainte ca sistemul să revină la lungimea inițială a arcului. Sunt considerate trei cazuri: peste o treaptă negativă se aplică o treaptă negativă, peste o treaptă pozitivă se aplică o treaptă pozitivă și peste o treaptă negativă se aplică o treaptă pozitivă înainte de epuizarea regimurilor tranzitorii. Se observă că și în acest caz sistemul de conducere asigură compensarea efectului perturbațiilor.

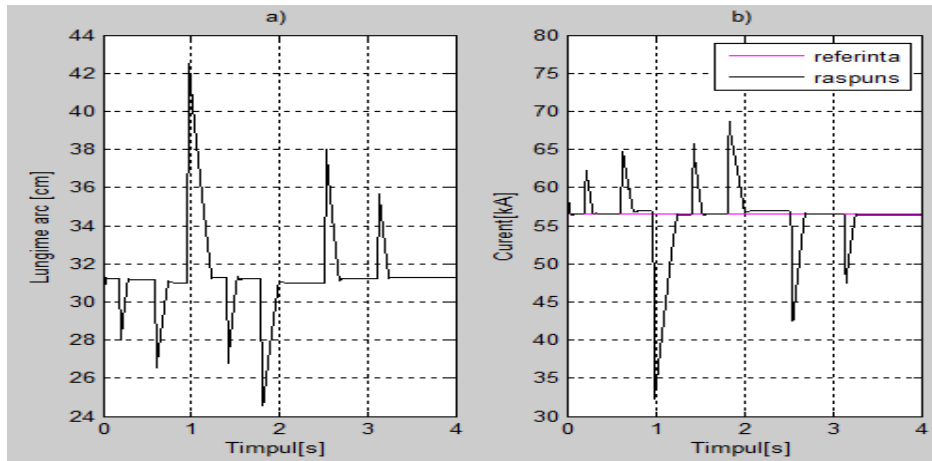


Fig.4.38. a) Variația lungimii arcului la acțiunea perturbațiilor de tip succesiuni de trepte, b) Referința și răspunsul sistemului fuzzy cu două intrări și o ieșire.

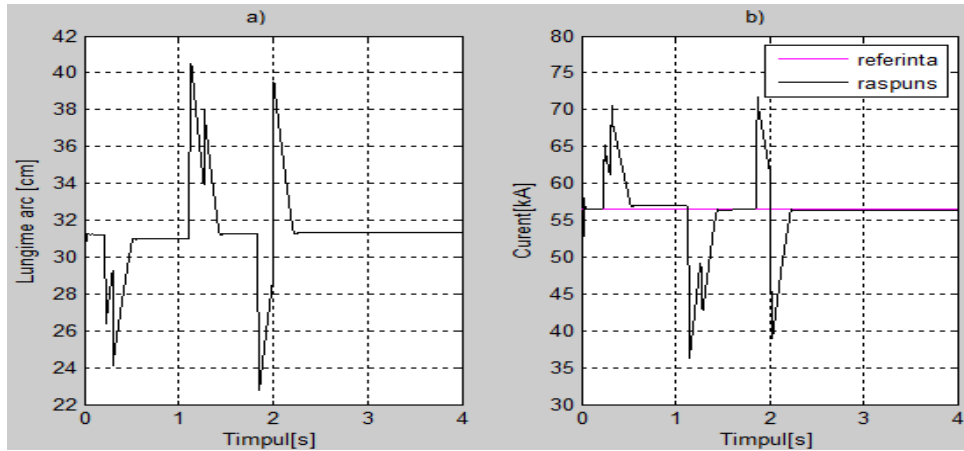


Fig.4.39. a) Variația lungimii arcului, b) Curentul de referință respectiv variația curentului arcului.

4.2.2. Sistem de conducere bazat pe regulator de tip P

Legea de reglare în acest caz este redată de relația (4.2) în care K_p reprezintă factorul de amplificare al regulatorului, $e(t)$ mărimea de eroare și $u_c(t)$ mărimea de comandă. Funcția de transfer corespunzătoare este (4.3).

Creșterea factorului de amplificare K_p determină scăderea erorii staționare a sistemului având un rol important și în asigurarea unei amortizări corespunzătoare, implicit asupra stabilității sistemului.

$$u_c(t) = K_p \cdot e(t) \quad (4.2)$$

$$H(s) = K_p \quad (4.3)$$

Simularea funcționării sistemului de conducere cu regulator de tip proporțional a fost efectuată utilizând schema de implementare reprezentată în fig.4.40. Valoarea factorului K_p a fost aleasă în funcție de numeroase teste efectuate de autor. Testele au fost efectuate pentru valori negative cât și pozitive ale lui K_p .

În fig.4.41 sunt prezentate câteva dintre rezultatele testelor efectuate pentru valori negative ale K_p . În cazul în care $K_p = -5$ se observă că răspunsul obținut la ieșirea din proces prezintă un suprareglaj mare și o oscilație remanentă în jurul referinței. De asemenea răspunsul nu se stabilizează pentru $K_p = -5e-01$. Pentru valoarea $K_p = -5e-02$, suprareglajul rămâne mare, dar răspunsul se stabilizează după 0,4 sec. Pentru valoarea $K_p = -5e-03$ suprareglajul devine acceptabil și răspunsul se stabilizează după aproximativ 0,25 sec. Pentru $K_p = -5e-04$ se observă că suprareglajul este mic, dar răspunsul se stabilizează doar după aproximativ 0,75 sec.

În urma analizei rezultatelor prezentate s-a mai efectuat un set de teste pentru valori ale lui K_p în jurul valorii de $-5e-03$, rezultatele fiind prezentate în fig.4.42. Analiza rezultatelor a condus la o alegere a valorii factorului de amplificare de $K_p = -5e-03$, luându-se în considerare suprareglajul și timpul de răspuns.

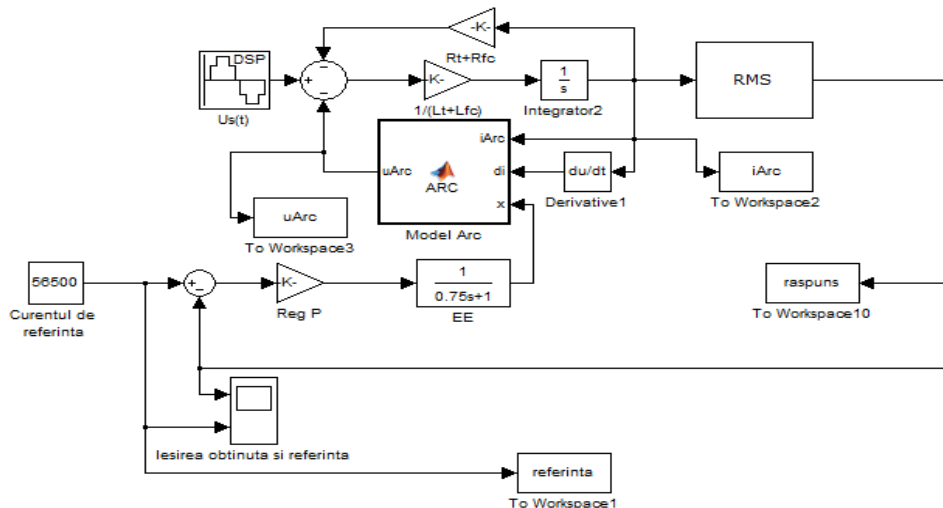


Fig.4.40. Schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere cu regulator de tip P.

În vederea alegerii unei valori pozitive pentru K_p s-a realizat un alt set de teste pentru valori ale lui K_p . Câteva dintre rezultatele obținute, sunt prezentate în fig.4.43. Analiza tuturor rezultatelor a condus la concluzia că nu se pot alege pentru K_p valori pozitive.

Pentru valori ale lui $K_p = -5e-03$ formele de variație ale curentului și tensiunii arcului sunt ilustrate în fig.4.44.

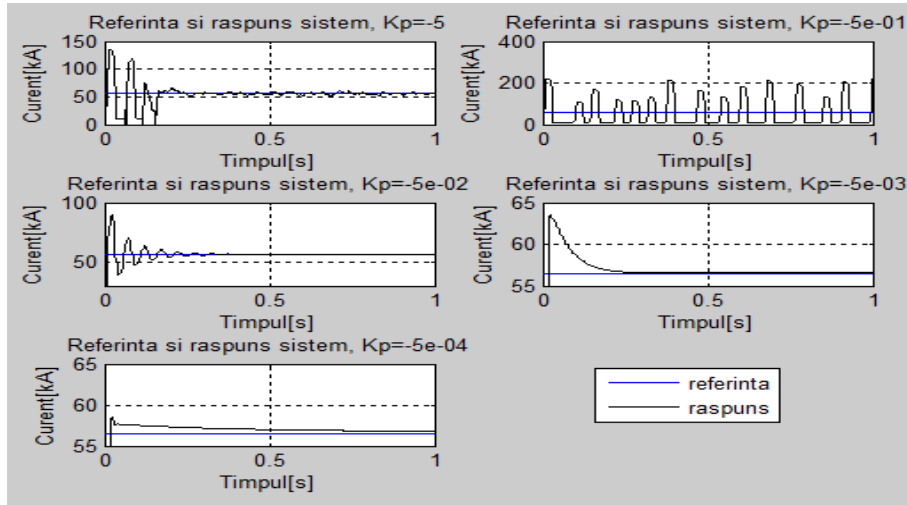


Fig.4.41. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip P , cu diferite valori negative ale lui K_p .

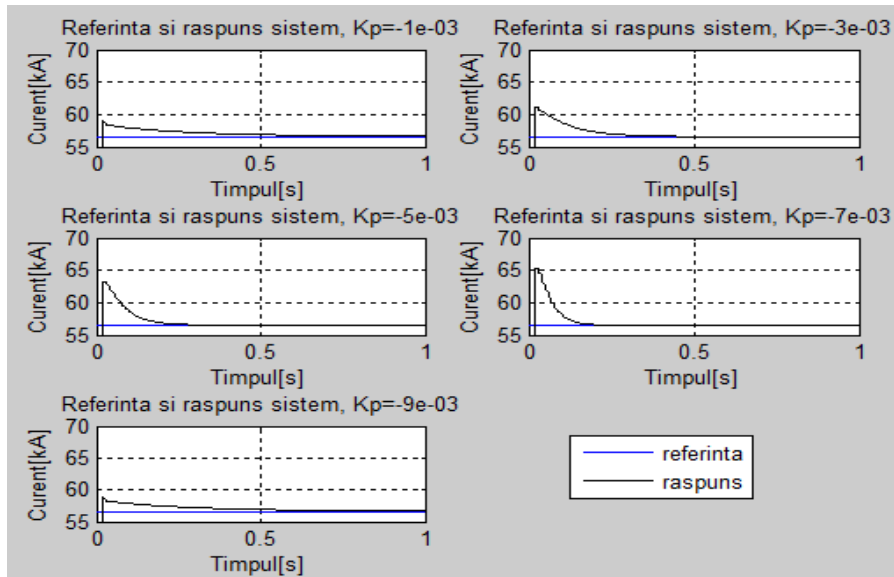


Fig.4.42. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip P , cu valori negative ale K_p în jurul valorii de $-5e-03$.

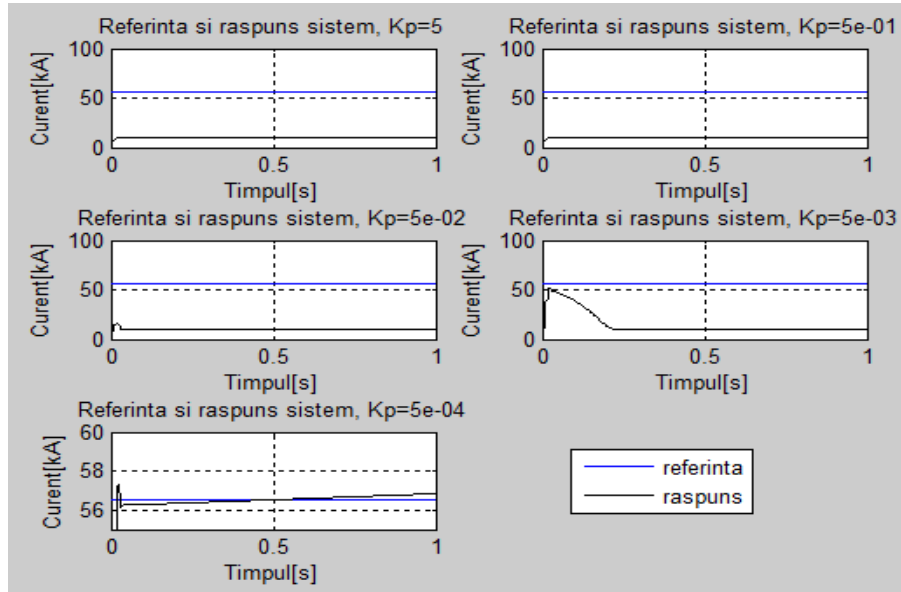


Fig.4.43. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip P , cu diferite valori pozitive ale lui K_p .

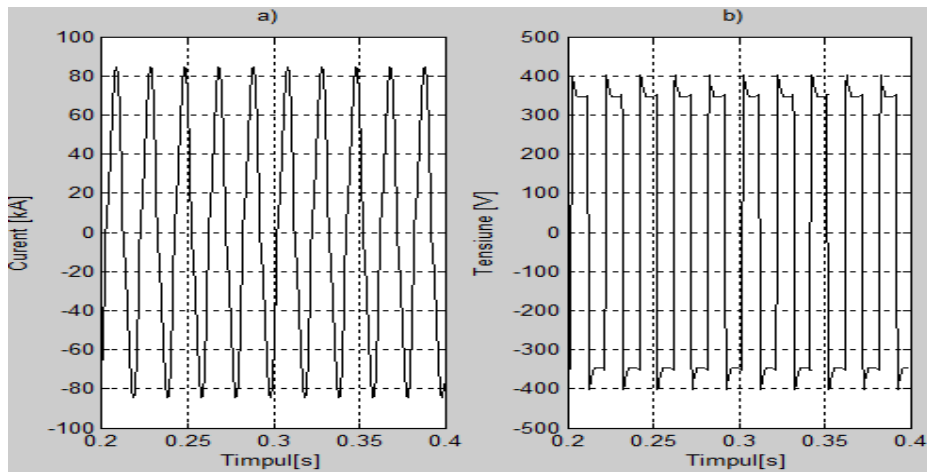


Fig.4.44. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului - regulator de tip P .

4.2.2.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte

În fig.4.45 este prezentată schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere cu regulator proporțional având factorul de amplificare $K_p = -5e-03$. Componenta de tip *Slider Gain* permite modificarea valorii referinței sub forma unor succesiuni de trepte aplicate la momente aleatoare de timp. Valoarea inițială a mărimii de referință este de 56000 A , valoare utilizată în cadrul fazei tehnologice de topire pentru treapta 16 de setare a transformatorului.

Fig.4.46a) prezintă variațiile referinței și răspunsul sistemului, iar fig.4.46b) ilustrează variația corespunzătoare a lungimii arcului. S-au considerat trei variații ale mărimii de referință, care sunt modificate în formă de treaptă. Se observă că răspunsul sistemului urmărește valoarea mărimii de referință. La scăderea valorii mărimii de referință se constată o creștere a lungimii arcului cu 2 cm (de la 31,2 cm la 33,2 cm), existând o abatere de aproximativ 300 A care se încadrează în limita admisibilă. În cazul creșterii valorii mărimii de referință se constată că lungimea arcului scade până la valoarea de 27,7 cm, abaterea în acest caz fiind de 700 A. La o nouă modificare a referinței (aceasta scade de la 64,5 kA, la 51 kA), lungimea arcului este modificată de la 27,7 cm la 33,6 cm abaterea încadrându-se în limita admisă.

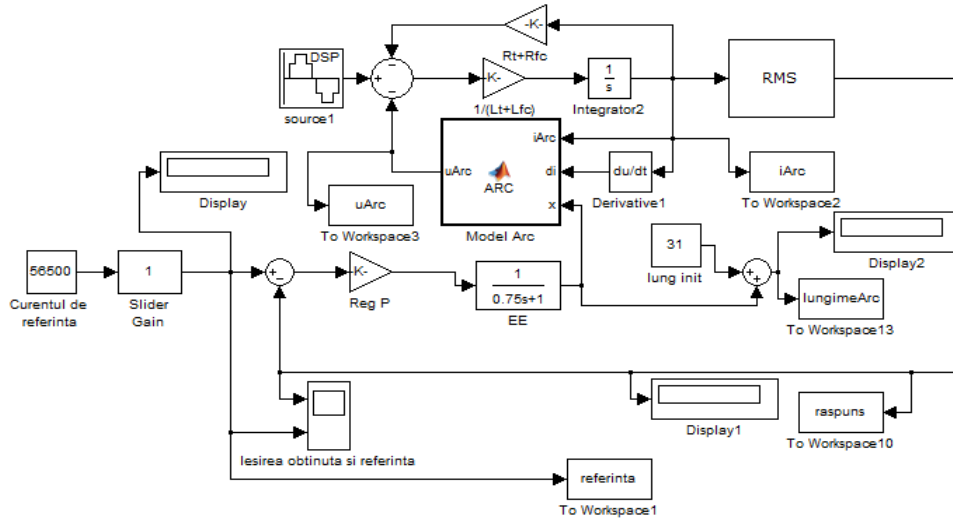


Fig.4.45. Schema bloc a sistemului de conducere cu regulator P la variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte.

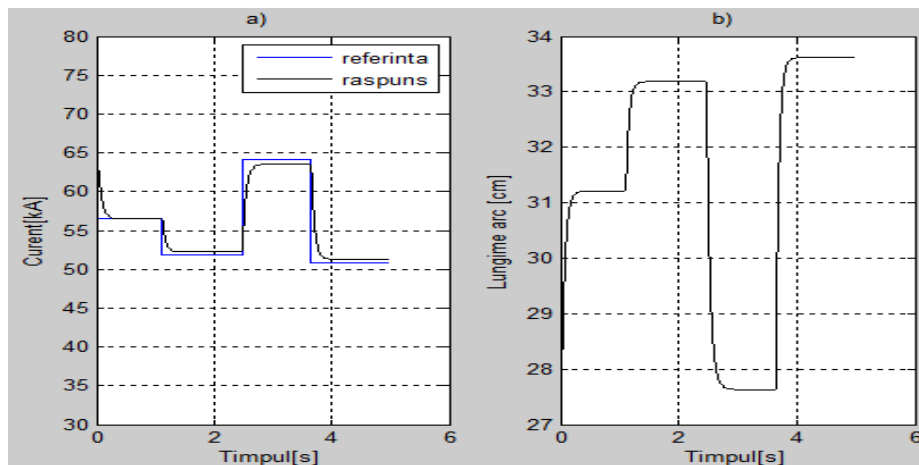


Fig.4.46. a) Referința și răspunsul sistemului de conducere cu regulator P, b) Variația lungimii arcului.

4.2.2.2. Introducerea unor perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante

În vederea testării sistemului de conducere cu regulator de tip P în cazul unor perturbații de tip succesiuni de trepte s-a utilizat schema de implementare reprezentată în fig.4.47. Perturbațiile care acționează asupra procesului sunt simulate prin utilizarea unei componente de tip *Slider Gain*, care permite modificarea lungimii arcului la momente de timp aleatoare stabilite de utilizatorul aplicației, lungimea inițială a arcului fiind de 31 cm.

În fig.4.48a) sunt prezentate variațiile lungimii arcului în urma acțiunii perturbațiilor asupra procesului, iar în fig.4.48b) este reprezentat răspunsul corespunzător al sistemului. Se observă că sistemul de conducere compensează în totalitate efectul perturbațiilor, lungimea arcului revenind la valoarea inițială.

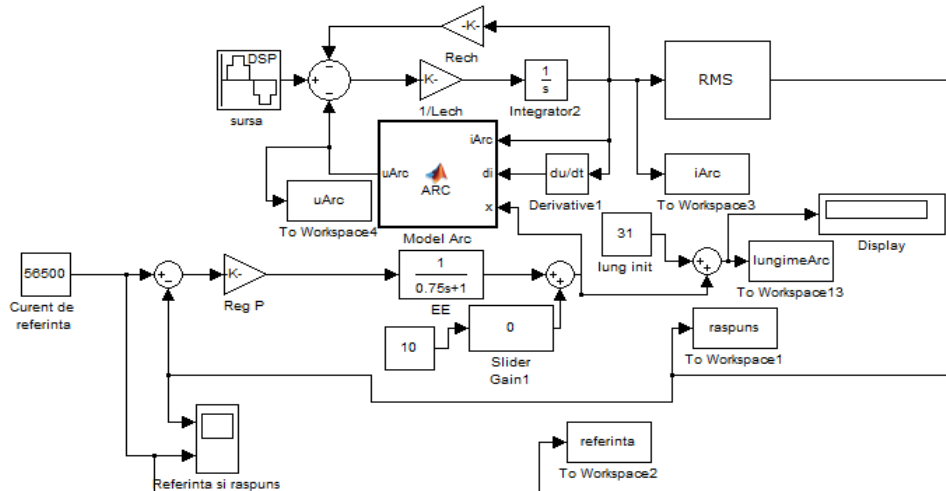


Fig.4.47. Schema bloc a sistemului de conducere cu regulator P cu perturbații de tip succesiuni de trepte.

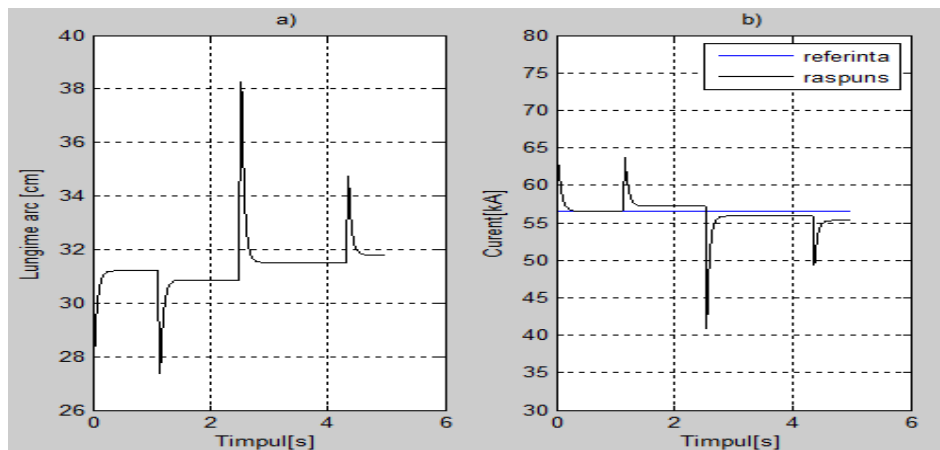


Fig.4.48. a) Variațiile lungimii arcului pentru perturbații de tip succesiuni de trepte, b) Variațiile curentului arcului.

4.2.3. Analiza comparativă a unor sisteme de conducere cu regulator fuzzy și cu regulator P

În cadrul analizei comparative s-a considerat cazul referinței constante cu acțiunea perturbațiilor de tip succesiuni de trepte, respectiv cazul referinței variabile. S-a ales un regulator fuzzy cu MF mixte, cu o intrare și o ieșire, respectiv un regulator P cu $K_p = -5e-03$. Schemele bloc Simulink de implementare corespunzătoare sunt reprezentate în fig.4.15 și fig.4.45, respectiv fig.4.20 și fig.4.47. Atât referința cât și perturbațiile sunt aceleași în ambele cazuri analizate.

4.2.3.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte

În fig.4.49a) se prezintă atât variația referinței cât și răspunsul sistemului, iar fig.4.49b) ilustrează variația corespunzătoare a lungimii arcului. Analizând timpul de răspuns și abaterea sistemului se constată că sistemul cu regulator fuzzy prezintă performanțe mai bune. Ambele sisteme de conducere oferă răspunsuri stabile care nu prezintă oscilații.

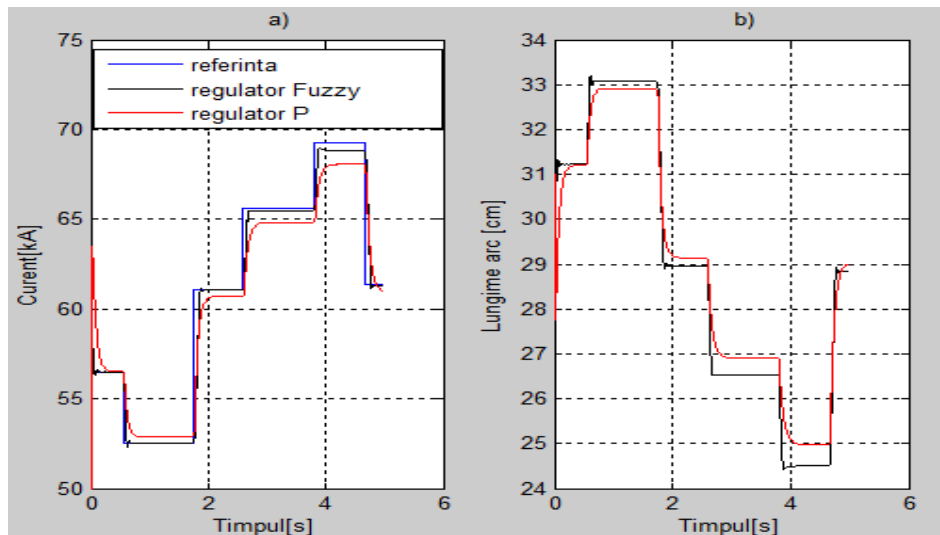


Fig.4.49. a) Răspunsurile sistemelor de conducere cu regulator fuzzy și regulator P la referință variabilă, b) Variația lungimii arcului.

4.2.3.2. Introducerea unor perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante

Se consideră cazul introducerii unor perturbații de tip succesiuni de trepte la momente aleatoare de timp, prin modificarea corespunzătoare a lungimii arcului.

În fig.4.50a) sunt ilustrate variațiile lungimii arcului în urma acțiunii perturbațiilor, pentru ambele tipuri de regulatoare considerate. Analizând aceiași indicatori de calitate ca și în cazul precedent se constată că sistemul cu regulator fuzzy prezintă performanțe mai bune.

În fig.4.50b) sunt reprezentate atât valoarea referinței cât variațiile curentului arcului ca efect al acțiunii perturbațiilor pentru ambele regulatoare utilizate.

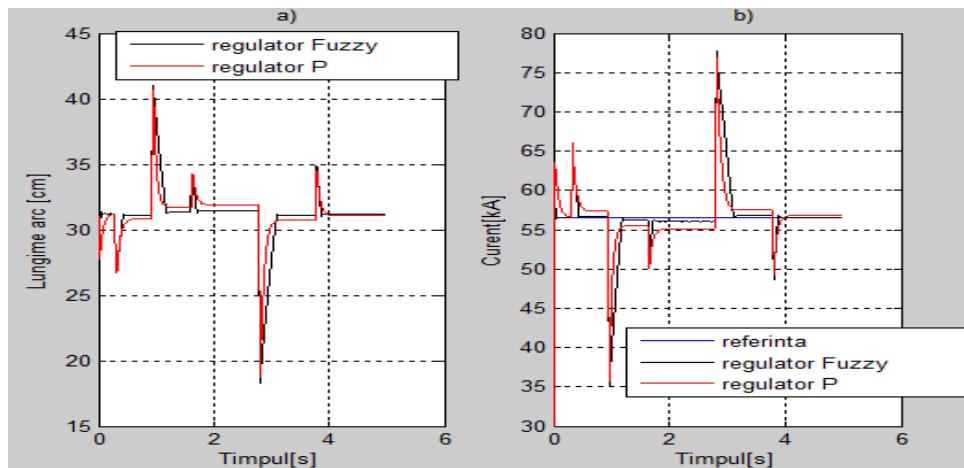


Fig.4.50. a) Variația lungimii arcului pentru perturbații de tip succesiuni de trepte, b) Variațiile curentului arcului în cazul sistemelor cu regulator fuzzy și regulator P.

4.2.4. Sistem de conducere bazat pe regulator de tip PD

Legea de reglare în acest caz este redată de relația (4.4) în care K_P reprezintă factorul de amplificare al regulatorului, K_D reprezintă constanta de derivare, T_D este constanta de timp de derivare, $e(t)$ mărimea de eroare și $u_c(t)$ este mărimea de comandă (legea de reglare). Funcția de transfer corespunzătoare este (4.5).

$$u_c(t) = K_P \cdot e(t) + K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} = K_P \cdot \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4.4)$$

$$H(s) = K_P + K_D \cdot s \quad (4.5)$$

Schema bloc Simulink utilizată pentru implementarea sistemului de conducere bazat pe regulator de tip PD este ilustrată în fig.4.51. Valoarea constantei de proporționalitate a fost aleasă în funcție de rezultatele simulărilor precedente realizate pentru regulatorul de tip P (§4.2.2), iar valoarea constantei de derivare a fost aleasă în funcție de rezultatele obținute în urma a numeroase teste.

Fig.4.52 prezintă câteva dintre testele efectuate pentru valori negative ale K_D . În cazul în care de exemplu $K_D = -5$ sau $K_D = -5e-02$, ieșirea sistemului nu reușește să urmărească referința. Pentru $K_D = -5e-04$ se observă că sistemul nu prezintă suprareglaj și timpul de răspuns este mai mare comparativ cu celelalte două cazuri în care s-au ales valorile $K_D = -5e-05$ și $K_D = -5e-06$, în care există suprareglaj și timpul de răspuns este mai mic.

În urma analizei rezultatelor prezentate s-a mai efectuat un set de teste pentru valori ale lui K_D în jurul valorii de $-5e-05$, rezultatele fiind prezentate în fig.4.53. Analiza rezultatelor a condus la o alegere a valorii constantei de derivare de $K_D = -5e-05$, luându-se în considerare suprareglajul și timpul de răspuns.

Fig.4.54 prezintă un alt set de teste efectuate pentru valori pozitive ale lui K_D . Se poate constata că pot fi luate în considerare doar valorile de $K_D = 5e-05$ sau $K_D = 5e-06$.

Se poate concluziona că performanțele sistemului sunt mai bune în cazul în care K_D are valori negative.

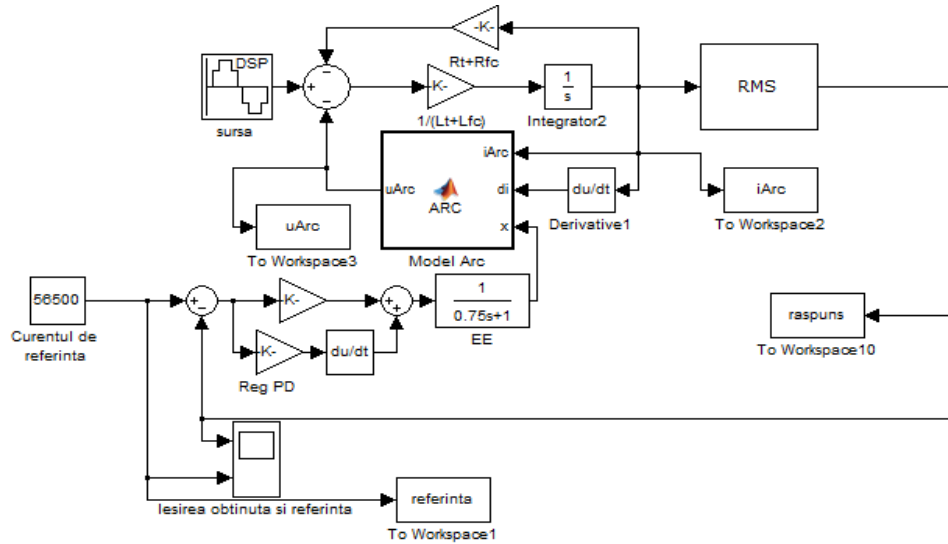


Fig.4.51. Schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere bazat pe regulator de tip PD .

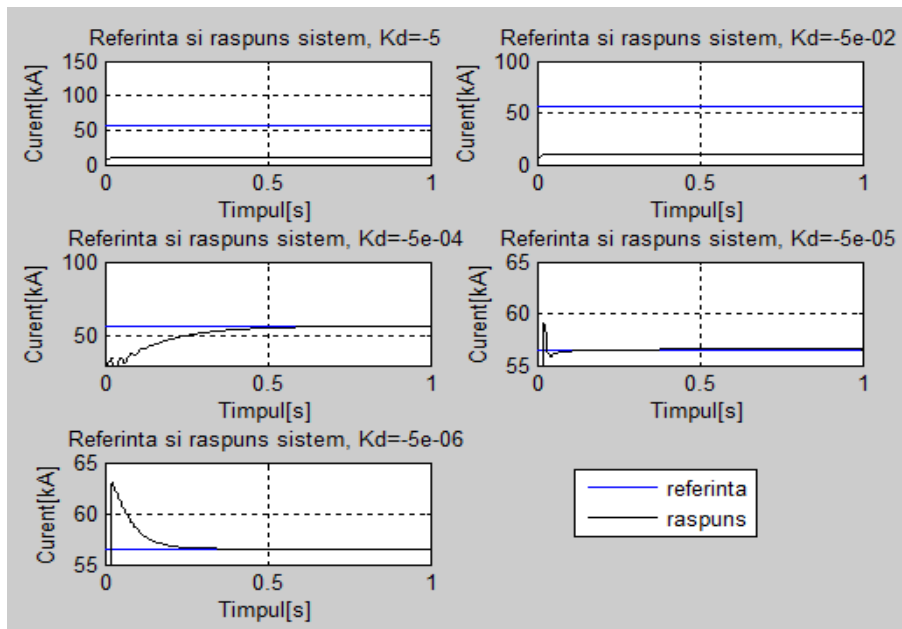


Fig.4.52. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip PD pentru diferite valori negative ale lui K_D .

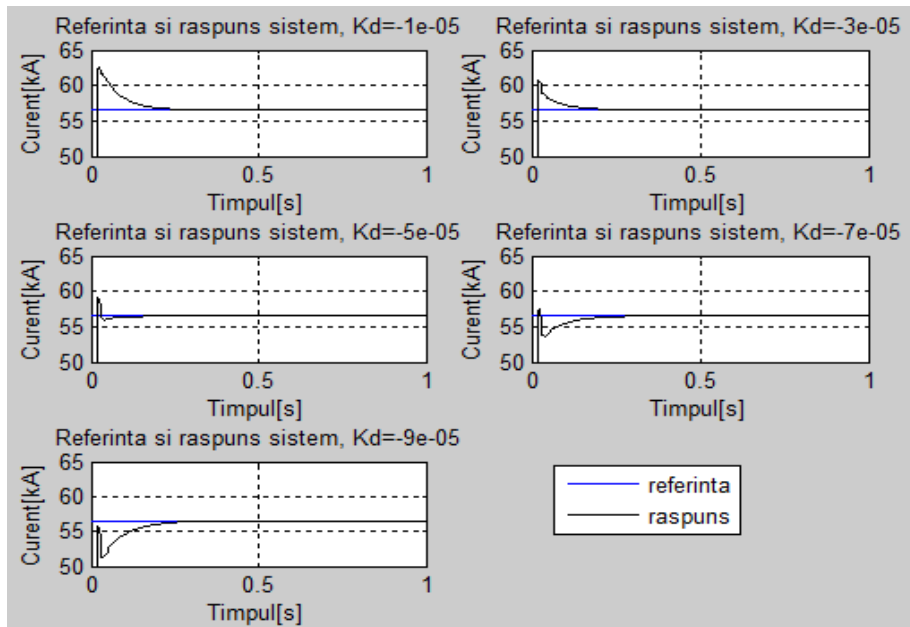


Fig.4.53. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip *PD* pentru valori negative ale lui K_D în jurul valorii de $-5e-05$.

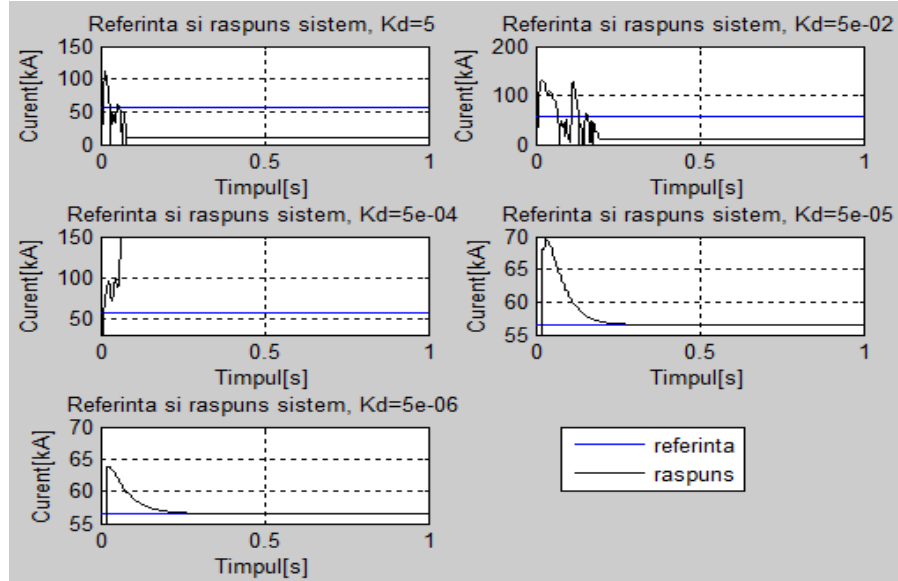


Fig.4.54. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip *PD* pentru diferite valori pozitive ale lui K_D .

Pentru valori ale lui $K_D = -5e-05$ formele de variație ale curentului și tensiunii arcului sunt ilustrate în fig.4.55, ele fiind conforme cu formele de undă din cadrul proceselor reale.

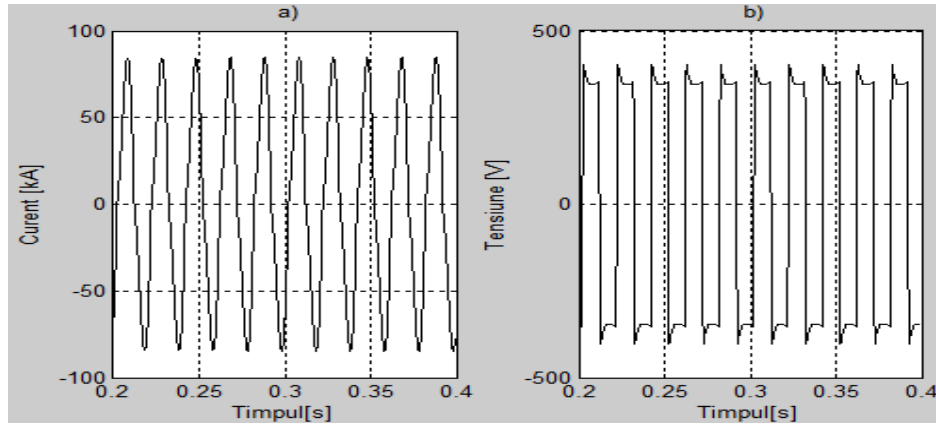


Fig.4.55. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului – regulator de tip PD.

4.2.4.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte

În fig.4.56 este prezentată schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere cu regulator de tip PD având factorul de amplificare $K_P = -5e-03$ și constanta de derivare $K_D = -5e-05$. Componenta de tip *Slider Gain* permite modificarea valorii referinței sub forma unor succesiuni de trepte aplicate la momente aleatoare de timp.

Valoarea inițială a mărimii de referință este de 56000 A , valoare utilizată în cadrul fazei tehnologice de topire, pentru treapta 16 de setare a transformatorului.

Fig.4.57a) prezintă variațiile referinței și răspunsul sistemului, iar fig.4.57b) prezintă variațiile corespunzătoare ale lungimii arcului electric.

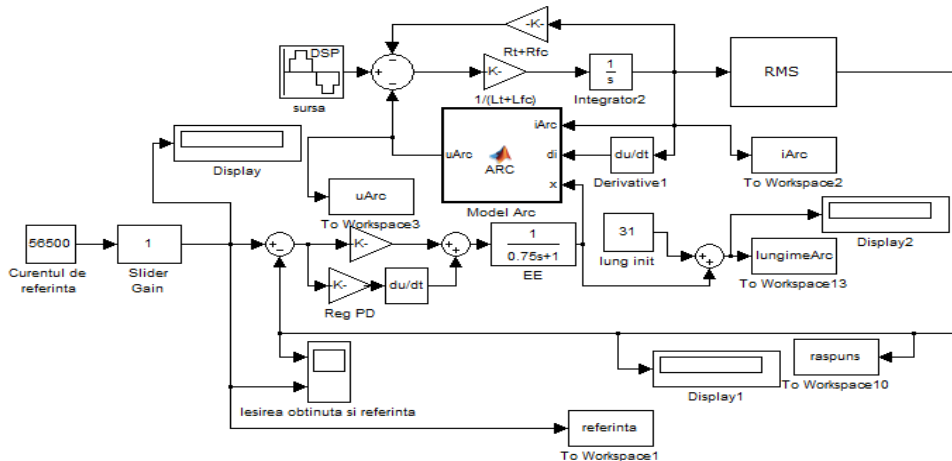


Fig.4.56. Schema bloc pentru regulator PD la modificarea referinței sub forma unor succesiuni de trepte.

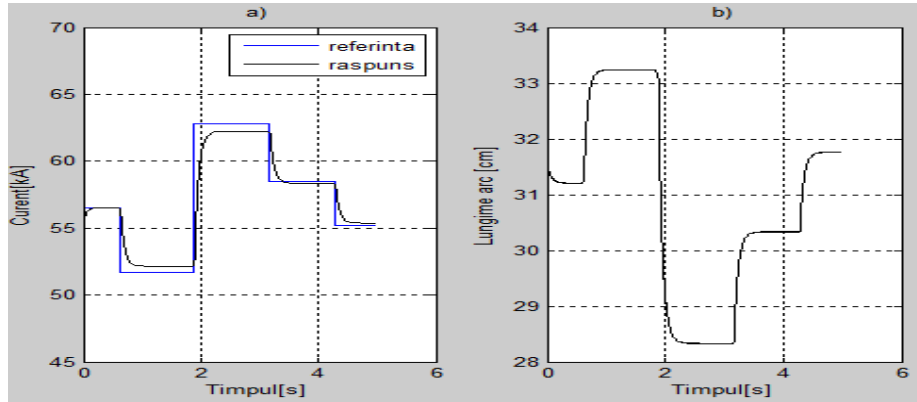


Fig.4.57. a) Variația referinței și răspunsul sistemului cu regulator PD, b) Variația lungimii arcului.

Pentru analiza efectuată s-a ales o succesiune de patru variații treaptă ale referinței cuprinse între 52 kA și 63 kA. Se constată o comportare corectă a sistemului prevăzut cu regulator PD; la scăderea valorii referinței, lungimea arcului crește, la creșterea valorii referinței, lungimea arcului scade, iar la o valoare constantă a referinței, lungimea arcului rămâne constantă și ea, răspunsul sistemului fiind unul stabil reprezentând oscilații.

4.2.4.2. Introducerea în proces a unei perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante

Regulatorul PD implementat este testat în urma aplicării la momente aleatoare de timp a unor perturbații sub forma de succesiuni de trepte. În fig.4.58 este ilustrată schema bloc Simulink utilizată în implementare. Sunt considerate variații ale perturbațiilor sub forma unor succesiuni de trei trepte negative și pozitive, răspunsul sistemului fiind ilustrat în fig.4.59a) și fig.4.59b). Se constată că sistemul prevăzut cu regulator PD asigură o bună compensare a perturbațiilor, restabilindu-se lungimea arcului la valoarea inițială.

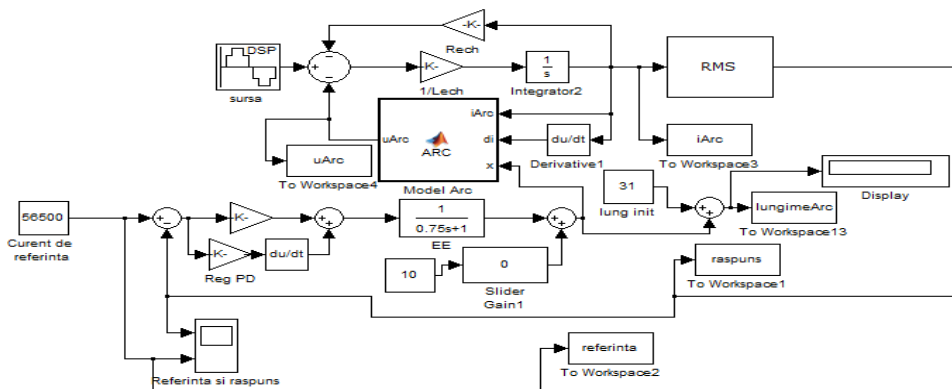


Fig.4.58. Schema bloc pentru regulator PD la introducerea unei perturbații sub forma unei succesiuni de trepte în proces.

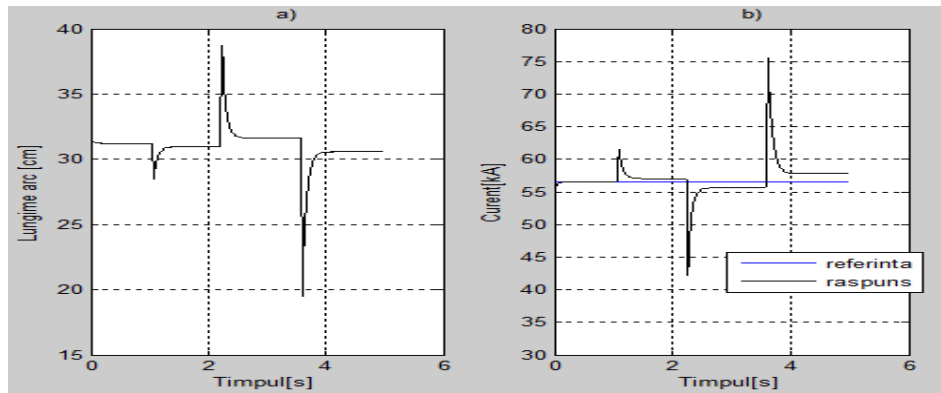


Fig.4.59. a) Variațiile lungimii arcului la acționarea perturbațiilor asupra sistemului prevăzut cu regulator PD, b) Răspunsul sistemului cu regulator PD.

4.2.5. Analiza comparativă a sistemului prevăzut cu regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire - MF mixte și respectiv cu regulator PD

Conform [God00], [Sha10], [Lon14] regulatorul fuzzy care are ca intrări, eroarea și derivata erorii se comportă ca un regulator convențional de tip *PD*. Astfel, în continuare, se efectuează o analiză comparativă a comportării sistemului prevăzut cu cele două tipuri de regulatoare considerându-se cazurile: cu și fără aplicarea unor perturbații. Schemele bloc Simulink sunt cele prezentate în fig.4.32 și fig.4.56, respectiv fig. 4.36 și fig.4.58 considerându-se în ambele cazuri aceeași variație a referinței, respectiv a perturbațiilor [Ghi16_3], [Ghi16_4].

4.2.5.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte

Pentru cazul ilustrat în fig.4.60a) s-au ales cinci variații ale referinței cuprinse între 52,5 kA, respectiv 60,5 kA. Se observă că utilizarea regulatorului fuzzy conduce la răspunsuri sensibil mai performante având în vedere că timpul de răspuns este mai mic și urmărirea referinței este mai fidelă. Pentru cazurile prezentate în fig.4.60a) se obțin variațiile lungimii arcului din fig.4.60b). Ambele cazuri conduc la răspunsuri stabile pentru fiecare modificare a referinței.

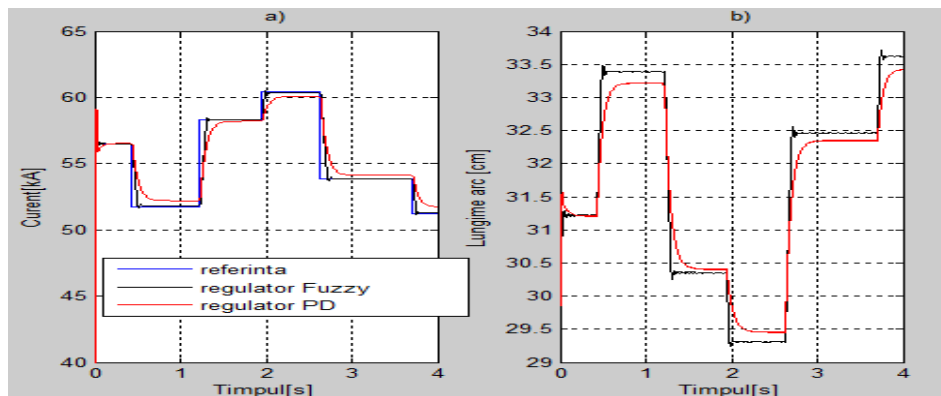


Fig.4.60. a) Răspunsurile sistemelor cu regulator fuzzy și regulator PD la variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte, b) Variația lungimii arcului.

4.2.5.2. Introducerea în proces unei perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante

Se consideră cazul introducerii în proces la momente aleatoare de timp a unei perturbații de tip succesiuni de trepte la o referință constantă.

Răspunsurile sistemelor sunt ilustrate în fig.4.61a) și fig.4.61b), constatându-se că utilizarea regulatorului fuzzy asigură o compensare mai bună a perturbațiilor, restabilindu-se lungimea arcului la valoarea inițială.

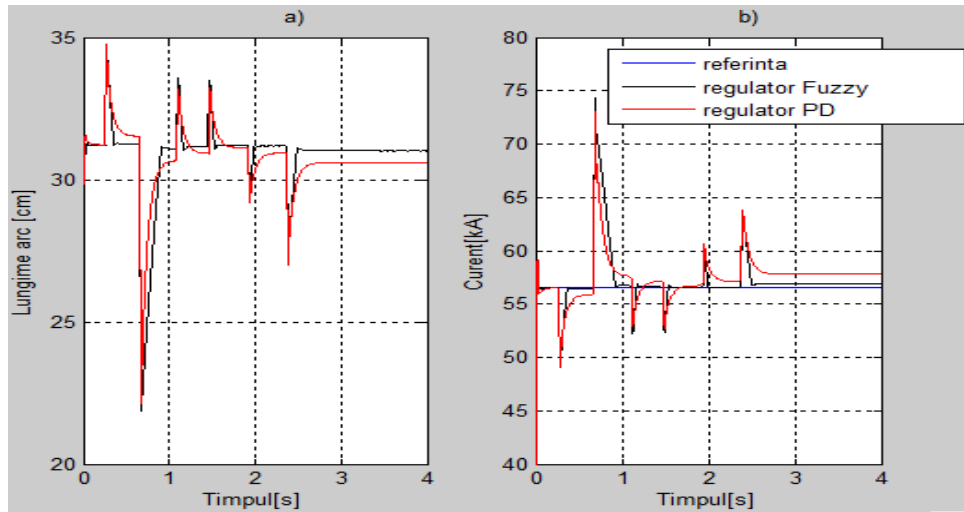


Fig.4.61. a) Variația lungimii arcului, b) Răspunsurile sistemelor cu regulator fuzzy și regulator PD în cazul aplicării perturbațiilor.

4.2.6. Sistem de conducere bazat pe regulator de tip PI

Legea de reglare în acest caz este redată de relația (4.6) în care K_P reprezintă factorul de amplificare al regulatorului, K_I reprezintă constanta de integrare (constanta de timp de integrare, T_I), $e(t)$ mărimea de eroare și $u_c(t)$ este mărimea de comandă (legea de reglare). Funcția de transfer corespunzătoare este (4.7).

$$u_c(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau = K_P(e(t) + \frac{1}{T_I} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau) \quad (4.6)$$

$$H(s) = K_P + K_I \cdot \frac{1}{s} \quad (4.7)$$

Schema bloc Simulink corespunzătoare sistemului de conducere bazat pe regulator de tip PI este prezentată în fig.4.62. Regulatorul este implementat prin utilizarea a două blocuri corespunzătoare lui K_P și K_I . Valoarea lui K_P a fost aleasă în funcție de testele efectuate la implementarea regulatorului de tip P (§4.2.2). Valoarea lui K_I este aleasă în funcție de rezultatele mai multor teste.

În fig.4.63 sunt prezentate cinci teste efectuate pentru valori negative ale lui K_I . Se constată că în cazul unei valori $K_I = -5$ răspunsul nu este unul corespunzător. Pentru $K_I = -5e-02$ răspunsul sistemului prezintă o mică oscilație, dar după momentul

$t=0,5$ sec răspunsul este stabil. În celelalte cazuri, pentru $K_I=-5e-04$, $K_I=-5e-05$ și $K_I=-5e-06$, se constată că timpii de răspuns sunt aproximativ aceiași și de asemenea răspunsurile sunt stabile.

În funcție de rezultatele obținute la acest pas s-a ales să se efectueze un alt test pentru a alege valori în jurul valorii de $-5e-04$, prezentat în fig.4.64, considerându-se că dintre valorile prezentate în fig.4.63, aceasta oferă performanța cea mai bună. Conform rezultatelor prezentate în această figură, valorile considerate nu au o influență semnificativă asupra răspunsului sistemului.

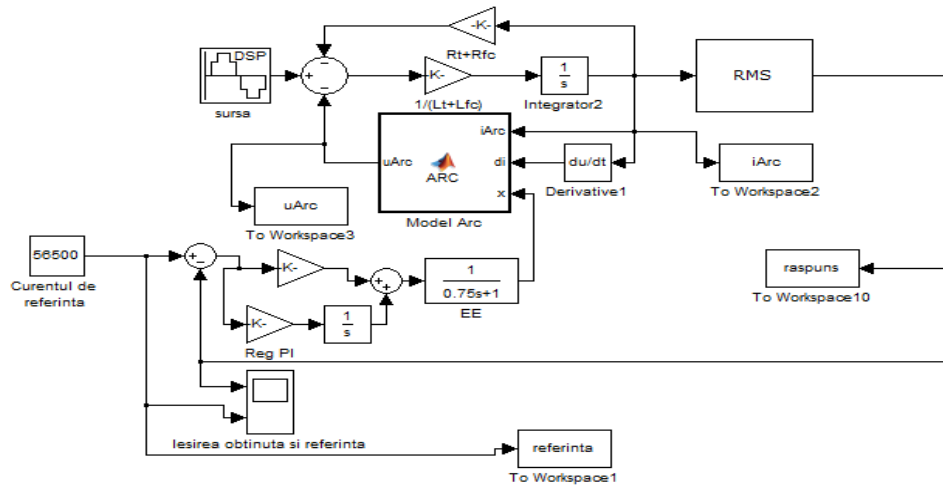


Fig.4.62. Schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere bazat pe regulator de tip PI .

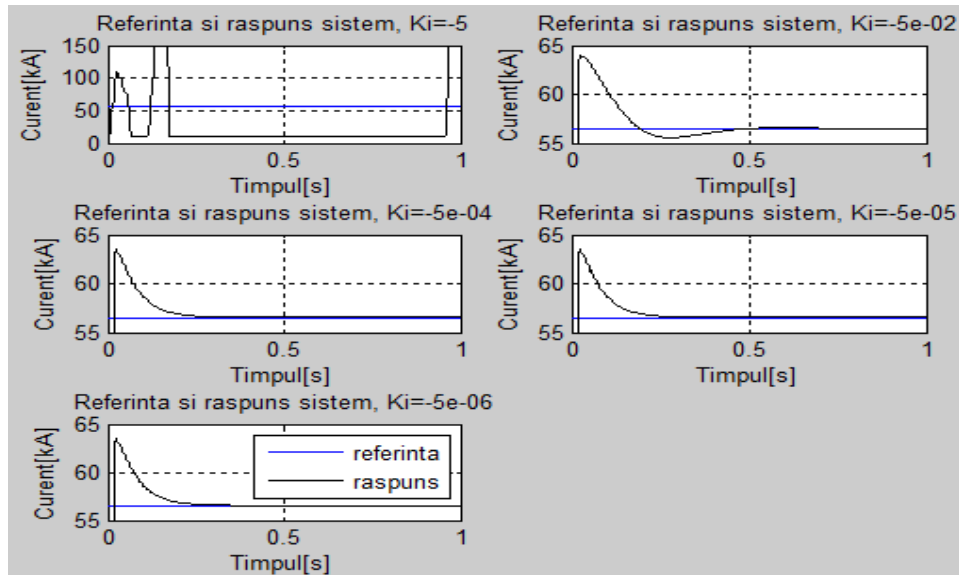


Fig.4.63. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip PI pentru diferite valori negative ale lui K_I .

În vederea alegerii unei valori pozitive pentru K_I s-a realizat un alt set de teste pentru valori ale lui K_I . Câteva dintre rezultatele obținute sunt prezentate în fig.4.65. Analiza rezultatelor a condus la concluzia că se obține un răspuns satisfăcător în cazul în care $K_I=5e-04$, $K_I=5e-05$ sau $K_I=5e-06$. În urma analizei rezultatelor prezentate s-a mai efectuat un set de teste pentru valori ale lui K_I în jurul valorii de $5e-04$, rezultatele fiind prezentate în fig.4.66.

Ținând cont de toate rezultatele prezentate s-a mai efectuat un set de teste prezentat în fig.4.67 pentru valorile $K_I=5e-04$, respectiv $K_I=-5e-04$. Practic se observă că pentru aceste valori se obține același rezultat. S-a ales pentru K_I valoarea $-5e-04$ deoarece și pentru K_P și K_D s-au ales în final tot valori negative.

Pentru valori ale lui $K_I=-5e-04$ formele de variație ale curentului și tensiunii arcului sunt ilustrate în fig.4.68.

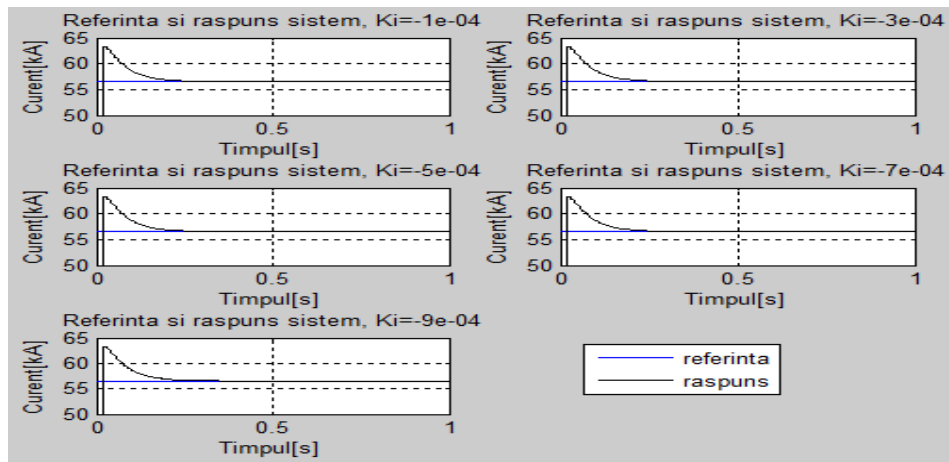


Fig.4.64. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip PI pentru valori negative ale lui K_I în jurul valorii de $-5e-04$.

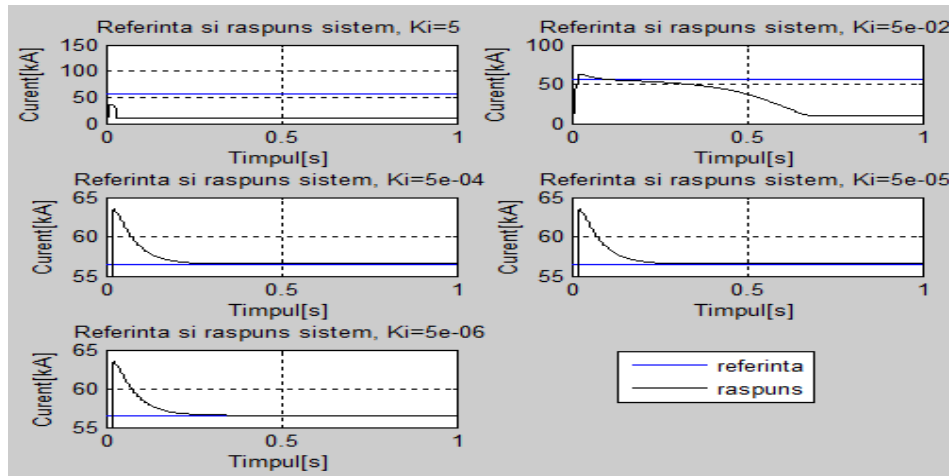


Fig.4.65. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip PI pentru diferite valori pozitive ale lui K_I .

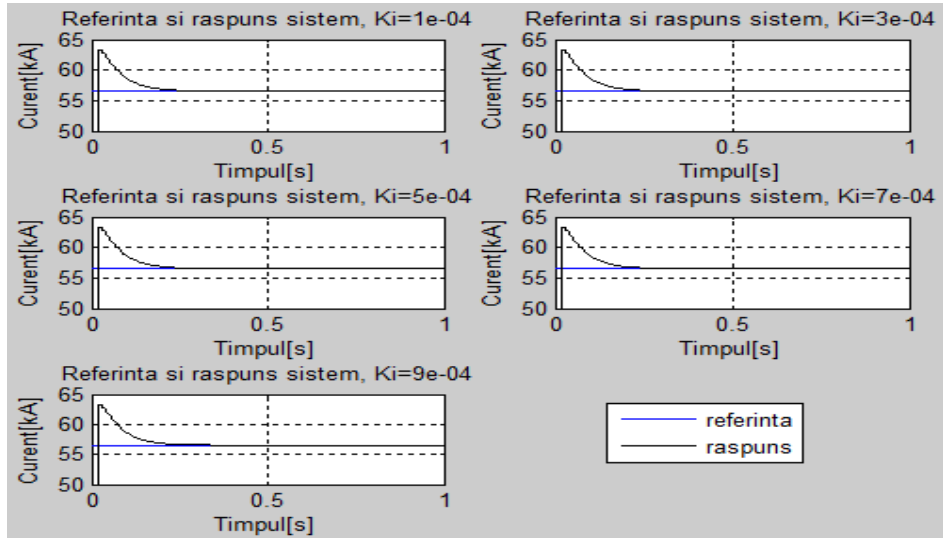


Fig.4.66. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip *PI* pentru valori pozitive ale lui K_i în jurul valorii de $5e-04$.

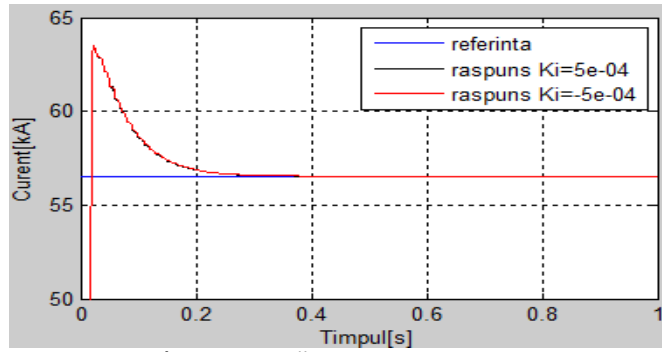


Fig.4.67. Răspunsuri obținute în urma utilizării unui regulator de tip *PI* pentru valorile $K_i = -5e-04$ respectiv $K_i = 5e-04$.

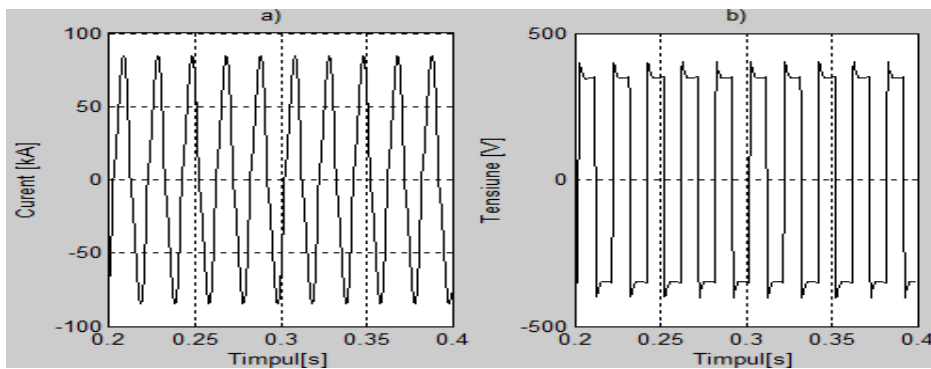


Fig.4.68. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului pentru $K_i = -5e-04$.

4.2.6.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte

În fig.4.69 este prezentată schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere bazat pe regulator de tip PI având factorul de amplificare $K_p = -5e-03$ și constanta de integrare $K_I = -5e-04$. Valoarea referinței este modificată sub forma unor succesiuni de trepte aplicate la momente aleatoare de timp.

Valoarea inițială a mărimii de referință este de 56000 A , valoare utilizată în cadrul fazei tehnologice de topire pentru treapta 16 de setare a transformatorului.

Fig.4.70a) prezintă variațiile referinței și răspunsul sistemului, iar fig.4.70b) prezintă variațiile corespunzătoare ale lungimii arcului.

Pentru analiza efectuată s-a ales o succesiune de trei variații treaptă ale referinței cuprinse între 52 kA și 68 kA . Se constată o comportare corectă a sistemului prevăzut cu regulator PI ; la scăderea valorii referinței, lungimea arcului crește, la creșterea valorii referinței, lungimea arcului scade, iar la o valoare constantă a referinței, lungimea arcului rămâne constantă și ea, răspunsul sistemului fiind unul stabil și care nu prezintă oscilații.

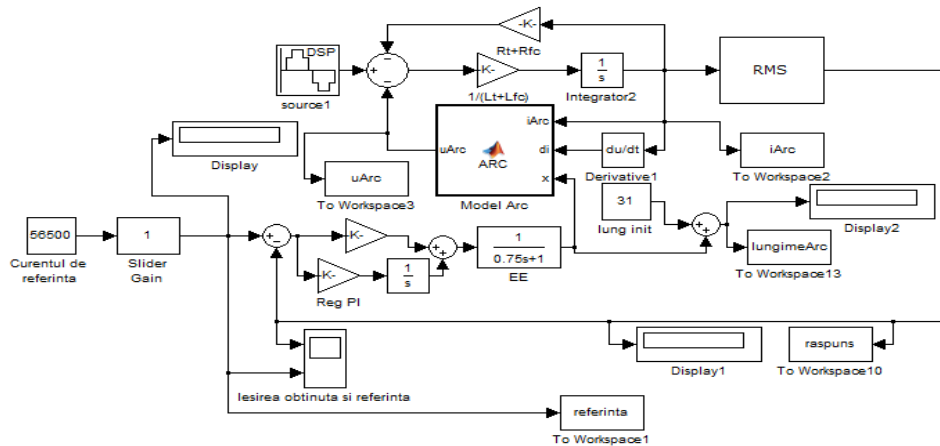


Fig.4.69. Schema bloc pentru regulator PI la modificarea referinței sub forma unor succesiuni de trepte.

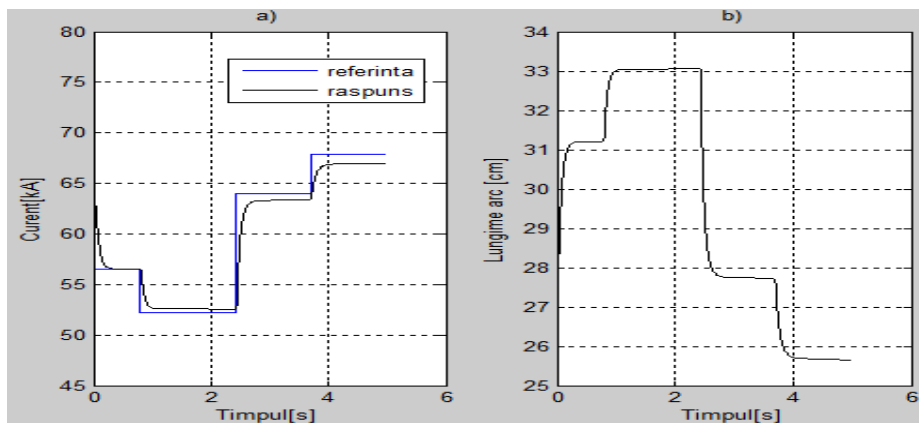


Fig.4.70. a) Variația referinței și răspunsul sistemului cu regulator PI , b) Variația lungimii arcului.

4.2.6.2. Introducerea în proces a unei perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante

Sistemul de conducere prevăzut cu regulatorul PI este testat în urma aplicării la momente aleatoare de timp a unor perturbații sub forma de succesiuni de trepte. În fig.4.71 este ilustrată schema bloc Simulink utilizată în implementare. Sunt considerate variații ale perturbațiilor sub forma unor succesiuni de trei trepte negative și pozitive, răspunsul sistemului fiind ilustrat în fig.4.72a) și fig.4.72b). Se constată că sistemul prevăzut cu regulator PI asigură o bună compensare a perturbațiilor, restabilindu-se lungimea arcului la valoarea inițială.

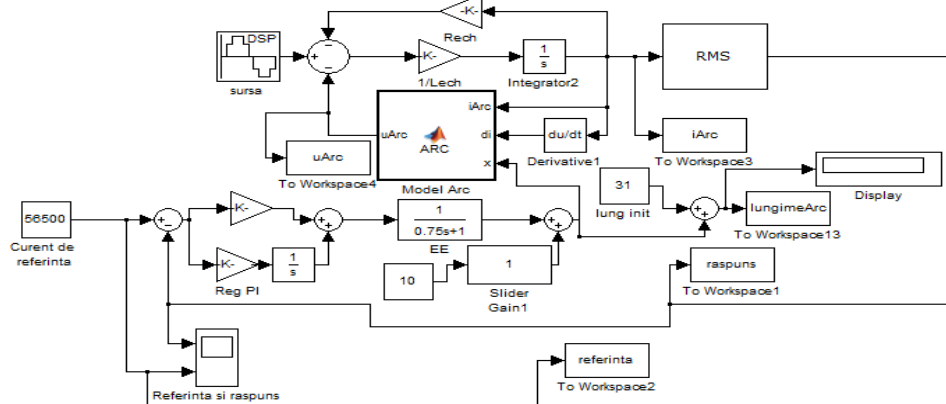


Fig.4.71. Schema bloc pentru regulator PI la introducerea unei perturbații sub forma unei succesiuni de trepte în proces.

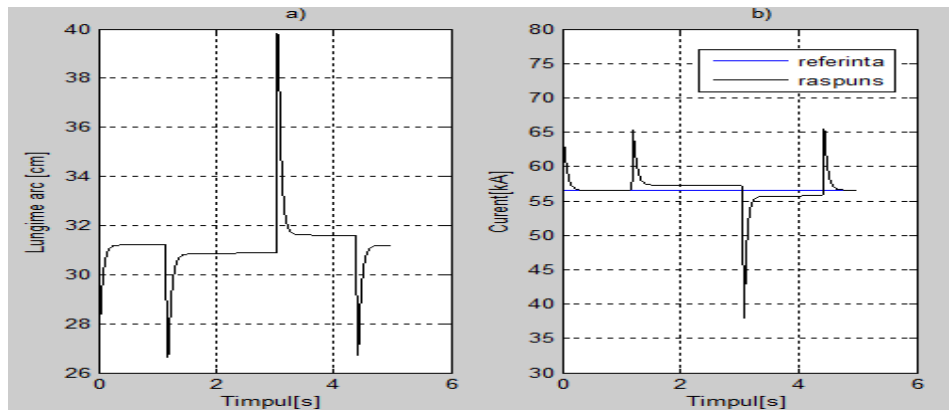


Fig.4.72. a) Variațiile lungimii arcului la acționarea perturbațiilor asupra sistemului prevăzut cu regulator PI , b) Răspunsul sistemului cu regulator PI .

4.2.7. Sistem de conducere bazat pe regulator de tip PID

Legea de reglare în acest caz este redată de relația (4.8) în care K_P reprezintă factorul de amplificare al regulatorului, K_I reprezintă constanta de integrare (T_I este constanta de timp de integrare), K_D reprezintă constanta de derivare, T_D este constanta de timp de derivare, $e(t)$ mărimea de eroare și $u_c(t)$ este

mărimea de comandă (legea de reglare). Funcția de transfer corespunzătoare este (4.9).

$$u_c(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} = K_P (e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt}) \quad (4.8)$$

$$H(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \quad (4.9)$$

Fig.4.73 prezintă schema bloc Simulink corespunzătoare sistemului de conducere bazat pe regulator de tip *PID*. În vederea implementării acestuia s-au ales următoarele valori ale constantelor: $K_P = -5e-03$, $K_I = -5e-04$, $K_D = -5e-05$, valori alese în funcție de rezultatele simulărilor precedente realizate pentru fiecare tip de regulator *P* (§4.2.2), *PI* (§4.2.6) și *PD* (§4.2.4).

În fig.4.74 este ilustrat răspunsul sistemului de conducere bazat pe regulator de tip *PID* pentru un regim staționar. Se poate constata că răspunsul este stabil după aproximativ 0,05 sec.

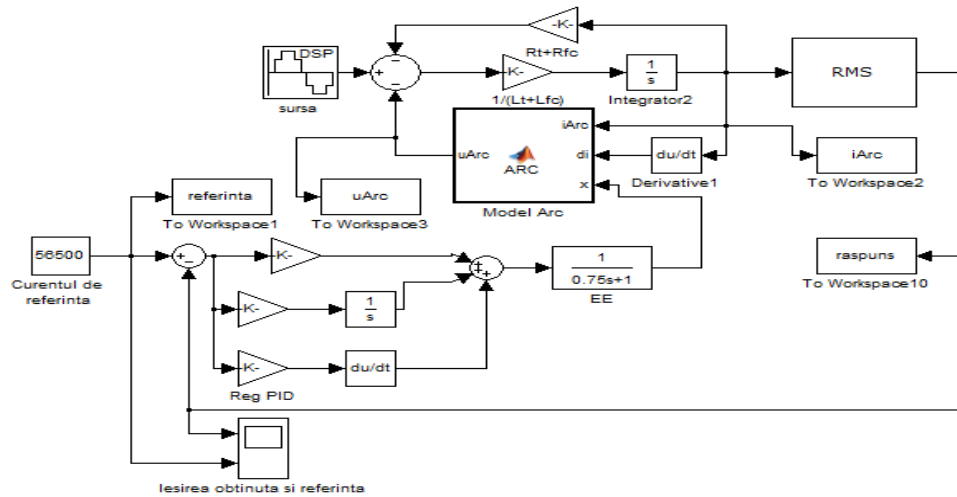


Fig.4.73. Schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere bazat pe regulator de tip *PID*.

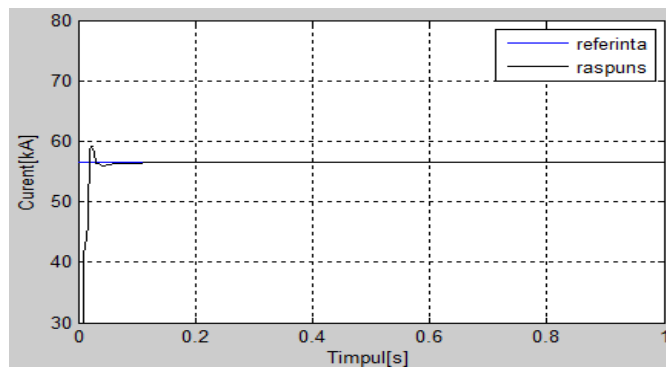


Fig.4.74. Referința și răspunsul sistemului cu regulator de tip *PID* obținut în regim staționar.

Fig.4.75 prezintă 9,5 perioade din curentul și tensiunea arcului obținute pentru cazul prezentat în fig.4.74. Se constată că variațiile acestora sunt similare celor regăsite în literatura de specialitate.

4.2.7.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte

Fig.4.76 prezintă schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere bazat pe regulator PID , având factorul de amplificare $K_p = -5e-03$, constanta de integrare $K_I = -5e-04$ și constanta de derivare $K_D = -5e-05$. Valoarea referinței este modificată sub forma unor succesiuni de trepte aplicate la momente aleatoare de timp.

Fig.4.77a) prezintă variațiile referinței și răspunsul sistemului, iar fig.4.77b) prezintă variațiile corespunzătoare ale lungimii arcului.

Pentru analiza efectuată s-a ales o succesiune de două variații treaptă ale referinței cuprinse între 53 kA și 61 kA. Se constată o comportare corectă a sistemului prevăzut cu regulator PID , răspunsul sistemului fiind unul stabil și care nu prezintă oscilații.

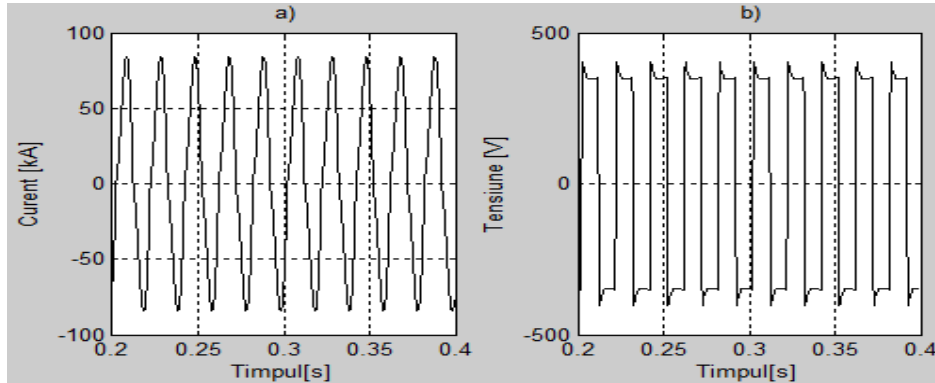


Fig.4.75. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului pentru regulator de tip PID .

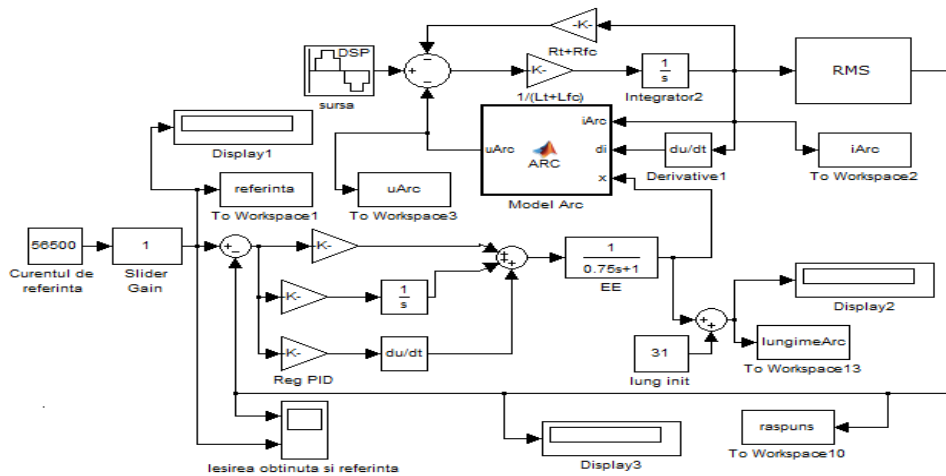


Fig.4.76. Schema bloc pentru regulator PID la modificarea referinței sub forma unor succesiuni de trepte.

fig.4.79b). Se constată că sistemul prevăzut cu regulator *PID* asigură o bună compensare a perturbațiilor, restabilindu-se lungimea arcului la valoarea inițială.

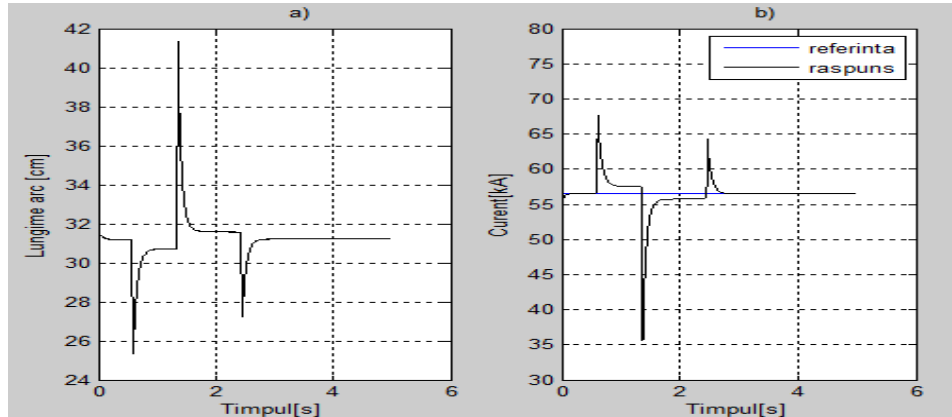


Fig.4.79. a) Variațiile lungimii arcului la acționarea perturbațiilor asupra sistemului prevăzut cu regulator *PID*, b) Răspunsul sistemului cu regulator *PID*.

4.2.8. Sistem de conducere adaptiv bazat pe regulator de tip *PI* acordat de un regulator fuzzy

De obicei, valorile parametrilor de acordare ai reglatoarelor clasice sunt obținute prin efectuarea mai multor teste. Acestea sunt consumatoare de timp și au o precizie scăzută. Astfel, în prezent sunt dezvoltate reglatoare clasice care sunt acordate utilizând tehnici inteligente, în special bazate pe logica fuzzy. Prin acest artificiu se combină avantajele oferite de reglatoarele clasice și a celor bazate pe logica fuzzy [Bab12].

În această secțiune este propus un sistem de conducere bazat pe control adaptiv. În acest context este utilizat un regulator de tip *PI* care este acordat de un regulator fuzzy. Regulatorul fuzzy are două intrări și două ieșiri. O mărime de intrare este dată de eroarea dintre curentul de referință și curentul obținut la ieșirea din proces, iar a doua mărime de intrare este derivata acestei erori. Cele două mărimi de ieșire reprezintă constantele de proporționalitate, respectiv de integrare ale regulatorului de tip *PI*.

În fig.4.80 este ilustrată schema bloc Simulink pentru sistemul de conducere bazat pe regulatorul *PI* acordat de un regulator fuzzy, mărimea de referință fiind curentul arcului, I_{ref} . Mărimea e este eroarea sistemului, d_e este derivata erorii, K_p este constanta de proporționalitate, K_i este constanta de integrare a regulatorului *PI*, sv este mărimea de comandă și reprezintă sensul și viteza de deplasare a electrozilor, x este mărimea de execuție care ilustrează sensul și viteza cu care se deplasează electrozii, iar I este mărimea reglată. Arcul electric reprezintă procesul în sistemul de conducere și este un element neliniar de circuit.

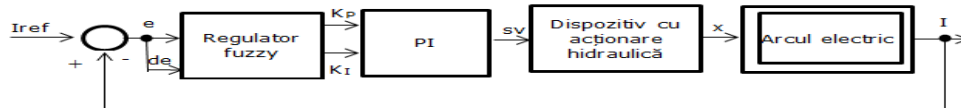


Fig.4.80. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe regulator *PI* acordat de regulator fuzzy.

4.2.8.1. Proiectarea regulatorului fuzzy utilizat la acordarea regulatorului PI

Regulatorul fuzzy utilizat pentru acordarea parametrilor regulatorului PI a fost proiectat în Matlab, utilizând interfața grafică *FIS Editor* și are două mărimi de intrare și două mărimi de ieșire. Universul discuției pentru fiecare dintre variabilele sistemului a fost ales în funcție de numeroase teste efectuate de autor prin simulări, dar și în funcție de informațiile furnizate de către experții tehnologi. Valorile mărimilor de intrare și de ieșire nu sunt normate, ele fiind utilizate în starea lor reală.

Pentru proiectarea regulatorului fuzzy s-au ales funcții de apartenență triunghiular, trapezoidal sau mixt cu 7 mulțimi fuzzy pentru fiecare dintre variabilele sistemului (NMare, NMedie, NMică, Zero, PMică, PMedie, PMare), semnificația acestora fiind prezentată în §4.2.1.1.1.

Funcțiile de apartenență de tip triunghiular, trapezoidal sau mixt pentru mărimile de intrare ale sistemului sunt cele prezentate la sistemul fuzzy cu două intrări și o ieșire (§4.2.1.2.1). Pentru cele trei funcții de apartenență se utilizează metoda de inferență de tip *Mamdani*, motorul de inferență este de tipul *min-max*, iar procesul de defuzificare este de tip *centroid*.

Funcții de apartenență de tip triunghiular

Fig.4.81 și fig.4.82 ilustrează funcțiile de apartenență de tip triunghiular corespunzătoare mărimilor de ieșire ale sistemului fuzzy. Universul discuției pentru K_p este cuprins între $[-50; 50]$, iar pentru K_i între $[-8,5; 8,5]$, domenii alese în funcție de numeroase teste efectuate prin simulări.

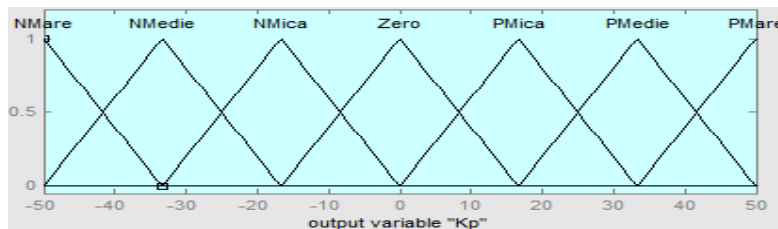


Fig.4.81. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire " K_p ".

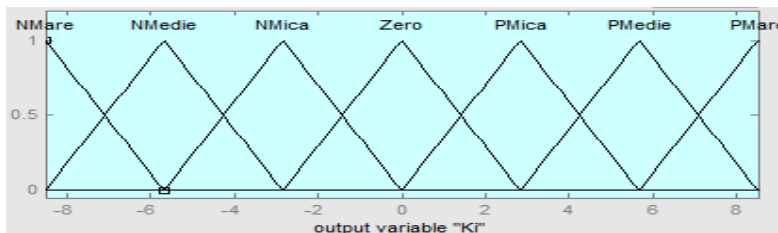


Fig.4.82. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire " K_i ".

Baza de reguli a sistemului fuzzy asigură valori corespunzătoare pentru contantele K_p și K_i . Analizând bazele de reguli prezentate în [Xin09], [Li10] [Bab12], [Tas12], dar și în funcție de numeroase teste efectuate prin simulări s-a stabilit o bază de reguli (tabelul 4.2) pentru care s-au obținut rezultatele cele mai bune privitoare la timpul de răspuns și la stabilitatea sistemului. Aceasta este utilizată pentru toate cazurile în care se utilizează regulator PI acordat de regulator fuzzy.

Tabelul 4.2 – Baza de reguli pentru regulatorul fuzzy care acordează regulatorul PI

K_p K_i		Δe						
		NMare	NMedie	NMică	Zero	PMică	PMedie	PMare
e	NMare	PMare PMare	PMare PMare	PMare PMare	PMare PMare	PMedie PMedie	PMică PMică	Zero Zero
	NMedie	PMare PMare	PMare PMare	PMare PMare	PMedie PMedie	PMică PMică	Zero Zero	NMică NMică
	NMică	PMare PMare	PMare PMare	PMedie PMedie	PMică PMică	Zero Zero	NMică NMică	NMedie NMedie
	Zero	PMare PMare	PMedie PMedie	PMică PMică	Zero Zero	NMică NMică	NMedie NMedie	NMare NMare
	PMică	PMedie PMedie	PMică PMică	Zero Zero	NMică NMică	NMedie NMedie	NMare NMare	NMare NMare
	PMedie	PMică PMică	Zero Zero	NMică NMică	NMedie NMedie	NMare NMare	NMare NMare	NMare NMare
	PMare	Zero Zero	NMică NMică	NMedie NMedie	NMare NMare	NMare NMare	NMare NMare	NMare NMare

Funcții de apartenență de tip trapezoidal

Fig.4.83 și fig.4.84 ilustrează funcțiile de apartenență de tip trapezoidal corespunzătoare mărimilor de ieșire din sistemul fuzzy.

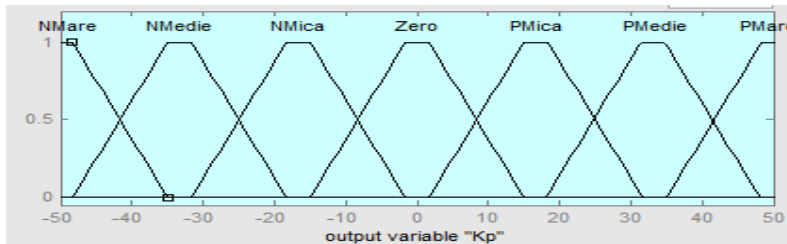


Fig.4.83. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire "Kp".

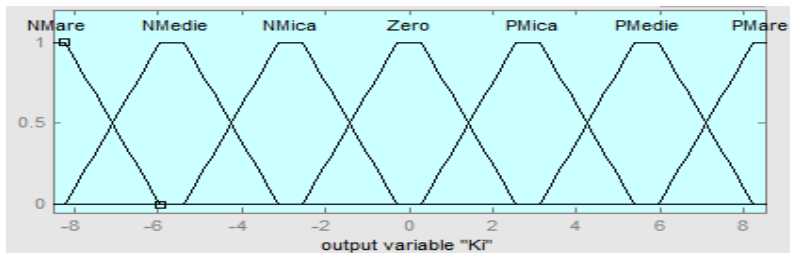
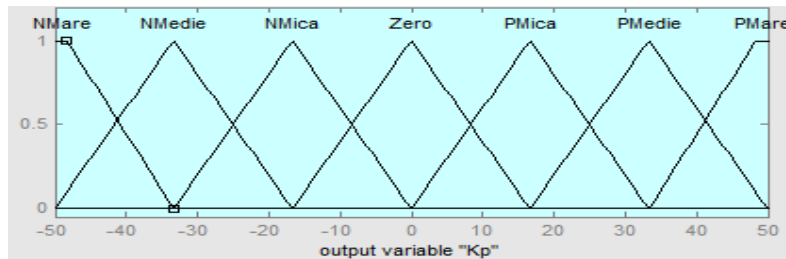
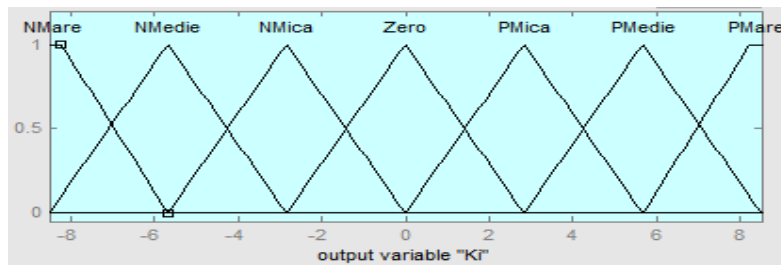


Fig.4.84. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire "Ki".

Funcții de apartenență de tip mixt

Fig.4.85 și fig.4.86 ilustrează funcțiile de apartenență de tip trapezoidal la capete și triunghiular în rest corespunzătoare mărimilor de ieșire din sistemul fuzzy.

Fig.4.85. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire "K_p".Fig.4.86. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire "K_i".

4.2.8.2. Simularea funcționării sistemului de conducere cu regulator fuzzy cu MF triunghiulare, trapezoidale și mixte

În vederea simulării funcționării sistemelor cu logică fuzzy propuse pentru a acorda regulatorul de tip *PI* se utilizează schema bloc din fig.4.87, respectiv modelul *MM-EXPI*. Pentru a obține performanța sistemelor sunt utilizate cele trei tipuri de mulțimi fuzzy prezentate anterior (MF triunghiulare, trapezoidale și mixte). În cazul simulărilor se consideră că mărimea de referință este de $56,5 \text{ kA}$, valoare aleasă conform documentației tehnice a cuptorului real considerat pentru treapta 16 de setare a transformatorului [***_2]. Timpul de eșantionare setat este de $1/10000 \text{ sec}$.

În fig.4.88 sunt reprezentate mărimea de referință, respectiv răspunsurile sistemelor corespunzătoare celor trei tipuri de MF. Se observă că răspunsul furnizat de regulatorul fuzzy ce utilizează MF triunghiulare prezintă un suprareglaj mai mare comparativ cu celelalte două cazuri. De asemenea se constată că răspunsul obținut pentru sistemul fuzzy cu MF trapezoidale prezintă o eroare în urma stabilizării răspunsului. În toate cazurile răspunsul sistemelor devine stabil la momentul $t=0,2 \text{ sec}$.

Fig.4.89 prezintă formele de variație ale curentului și ale tensiunii arcului obținute în urma simulării sistemului de conducere bazat pe regulator *PI* acordat de regulator fuzzy cu MF triunghiulare, trapezoidale și mixte. Se poate constata că forma de undă a tensiunii arcului este similară celei prezentată în literatura de specialitate [Pan08], iar curentul operează în regimul de curent neîntrerupt.

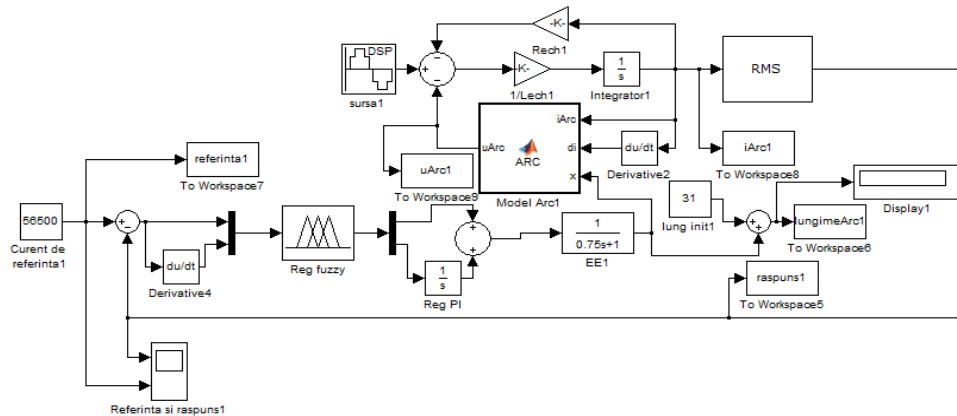


Fig.4.87. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe regulator PI acordat de regulator fuzzy.

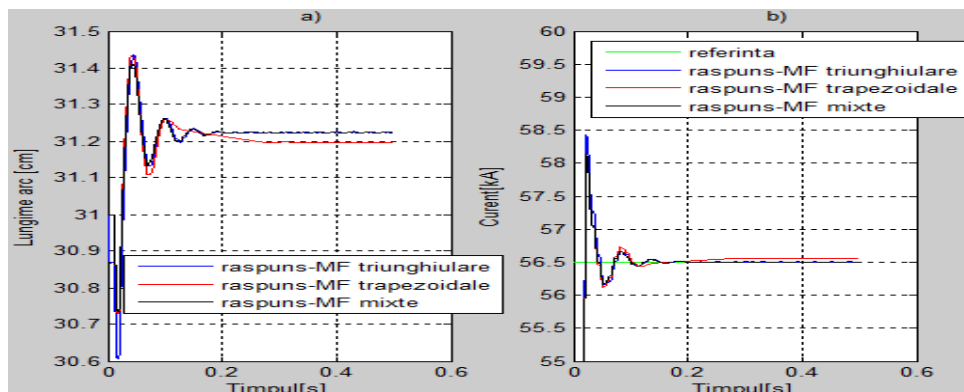


Fig.4.88. Răspunsul sistemelor cu regulator PI acordat de regulator fuzzy utilizând MF triunghiulare, trapezoidale și mixte.

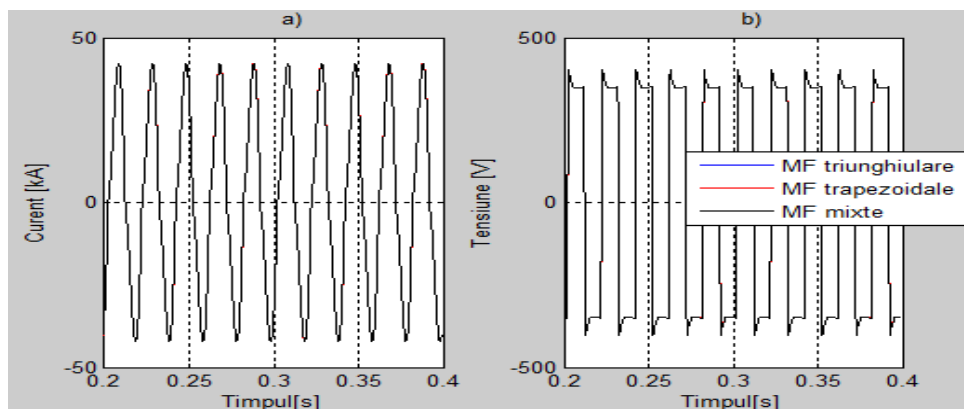


Fig.4.89. a) Variația curentului arcului, b) Variația tensiunii arcului.

4.2.8.3. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte

În fig.4.90 este prezentat sistemul de conducere implementat în Simulink-Matlab în cazul în care variația mărimii de referință are forma unor succesiuni de trepte (fig.4.91a)). Lungimea inițială a arcului este de 31 cm.

Fig.4.91a) prezintă șapte variații ale mărimii de referință, iar fig.4.91b) ilustrează variațiile corespunzătoare ale lungimii arcului. Se observă că pentru fiecare variație treaptă a mărimii de referință, curentul arcului (răspunsul sistemului) reușește să urmărească referința. În cazul celor trei MF se obține aceeași variație a răspunsului sistemului.

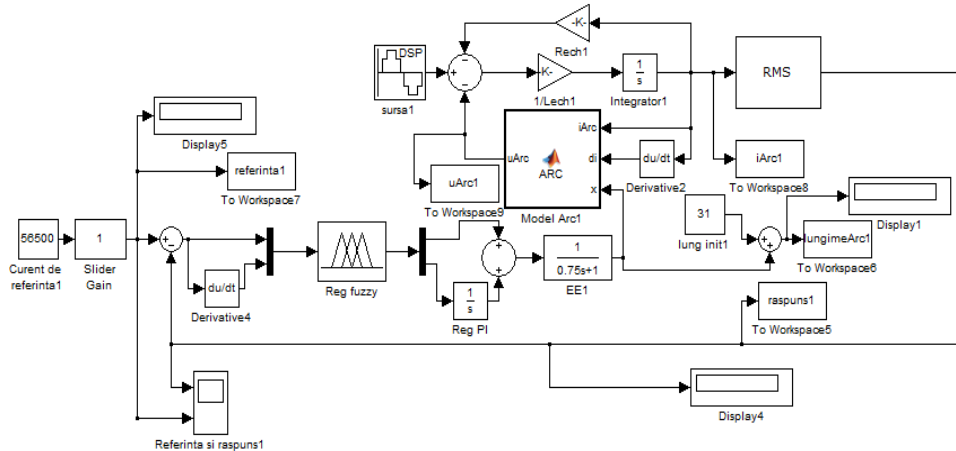


Fig.4.90. Schema bloc pentru regulator fuzzy PI acordat de regulator fuzzy pentru variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte.

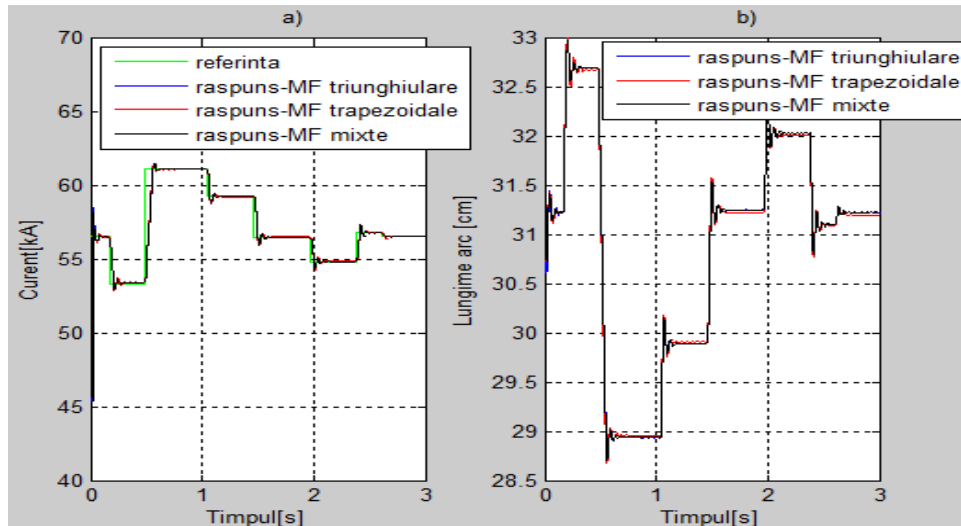


Fig.4.91. a) Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte și respectiv variația răspunsului sistemului (curentul arcului), b) Variația lungimii arcului.

4.2.8.4. Introducerea în proces a unei perturbații de tip succesiuni de trepte la o referință constantă

Fig.4.92 prezintă schema bloc Simulink pentru simularea sistemului de conducere bazat pe regulator PI acordat de un regulator fuzzy, în cazul în care acționează perturbații de tip succesiuni de trepte asupra procesului. Perturbațiile sunt introduse la momente aleatoare de timp prin intermediul unei componente de tip *Slider Gain*. Lungimea considerată inițială a arcului este de 31 cm , iar perturbațiile care acționează asupra procesului pot varia între $\pm 10\text{ cm}$ față de lungimea inițială respectiv actuală a arcului.

În fig.4.93a) este reprezentată variația corespunzătoare a lungimii arcului sub acțiunea perturbațiilor care sunt introduse la momente aleatoare de timp, iar fig.4.93b) prezintă variațiile referinței și a răspunsului sistemului. Se constată că răspunsul sistemului este același în cazul celor trei MF.

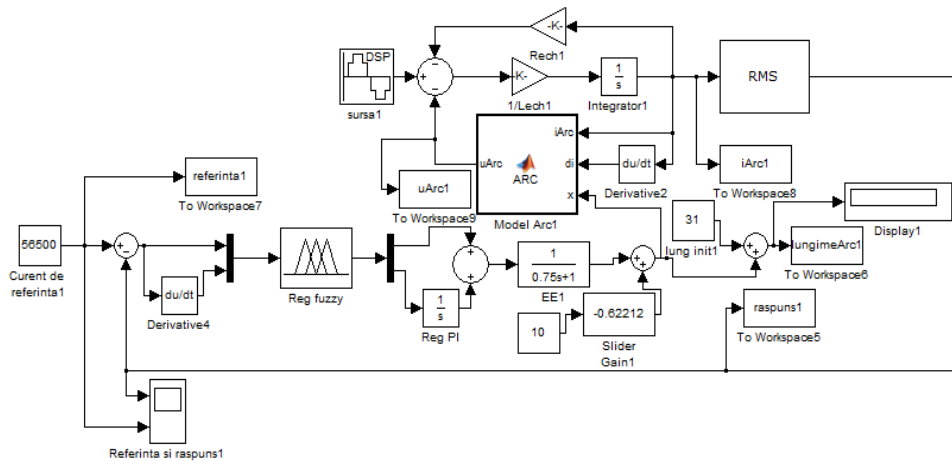


Fig.4.92. Schema bloc pentru regulator PI acordat de regulator fuzzy la acțiunea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces.

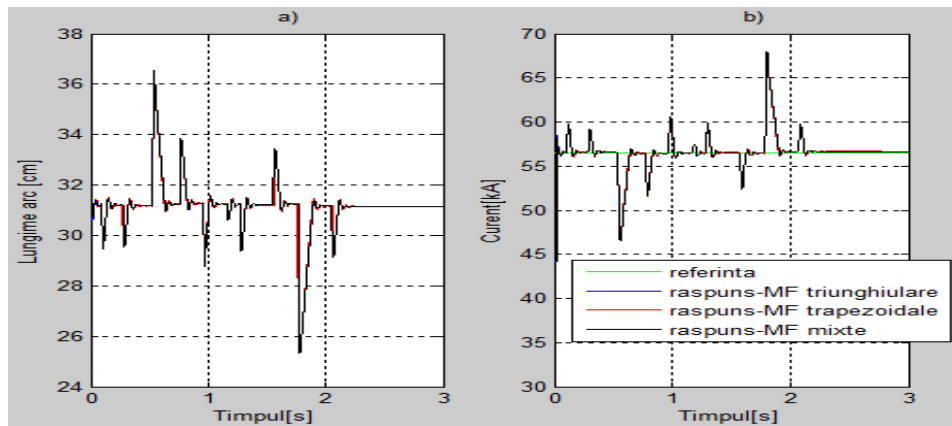


Fig.4.93. a) Variația lungimii arcului, b) Referința și răspunsul sistemului cu regulator PI acordat de regulator fuzzy.

4.2.9. Analiza comparativă a sistemului prevăzut cu regulator PI acordat de regulatorul fuzzy cu MF mixte și respectiv a sistemului cu regulator PI

Analiza comparativă a comportării sistemului prevăzut cu cele două tipuri de regulatoare este efectuată considerându-se cazurile: cu și fără aplicarea unor perturbații. Schemele bloc Simulink sunt cele prezentate în fig.4.69 și fig.4.90, respectiv fig.4.71 și fig.4.92 considerându-se în ambele cazuri aceeași variație a referinței, respectiv a perturbațiilor. De asemenea pentru implementarea regulatorului fuzzy sunt utilizate MF mixte.

4.2.9.1. Variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte

Fig.4.94a) prezintă o succesiune de șase variații ale referinței la momente aleatoare de timp, iar fig.4.94b) ilustrează variațiile corespunzătoare ale lungimii arcului.

Se observă că utilizarea regulatorului PI acordat de regulatorul fuzzy conduce la răspunsuri sensibil mai performante având în vedere că timpul de răspuns este mai mic și urmărirea referinței este mai fidelă. Ambele cazuri conduc la răspunsuri stabile pentru fiecare modificare a referinței.

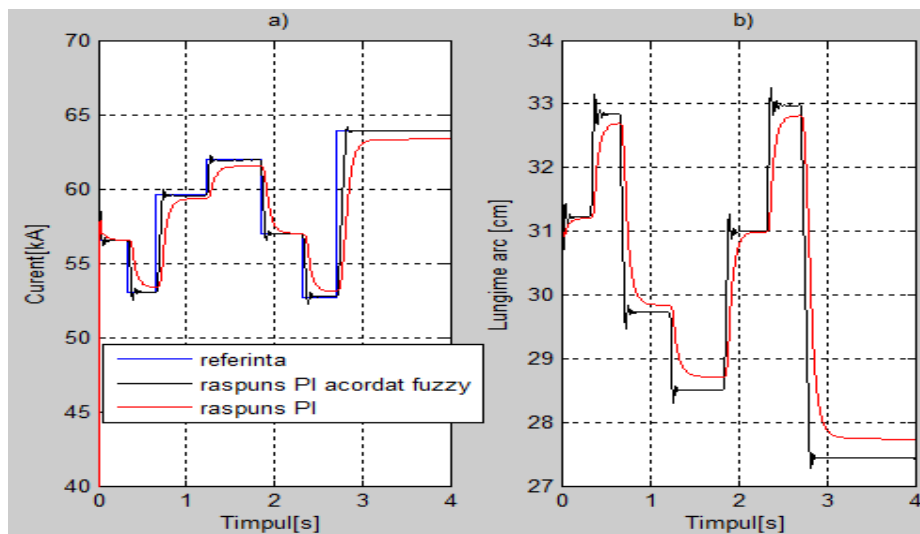


Fig.4.94. a) Răspunsurile sistemelor cu regulator PI acordat de regulator fuzzy și regulator PI la variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte, b) Variația lungimii arcului.

4.2.9.2. Introducerea în proces a unei perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe constante

Se consideră cazul introducerii în proces la momente aleatoare de timp a unei perturbații de tip succesiuni de trepte la o referință constantă.

Răspunsurile sistemelor sunt ilustrate în fig.4.95a) și fig.4.96b), constatându-se că utilizarea regulatorului PI acordat de regulatorul fuzzy asigură o compensare mai bună a perturbațiilor, restabilindu-se lungimea arcului la valoarea inițială.

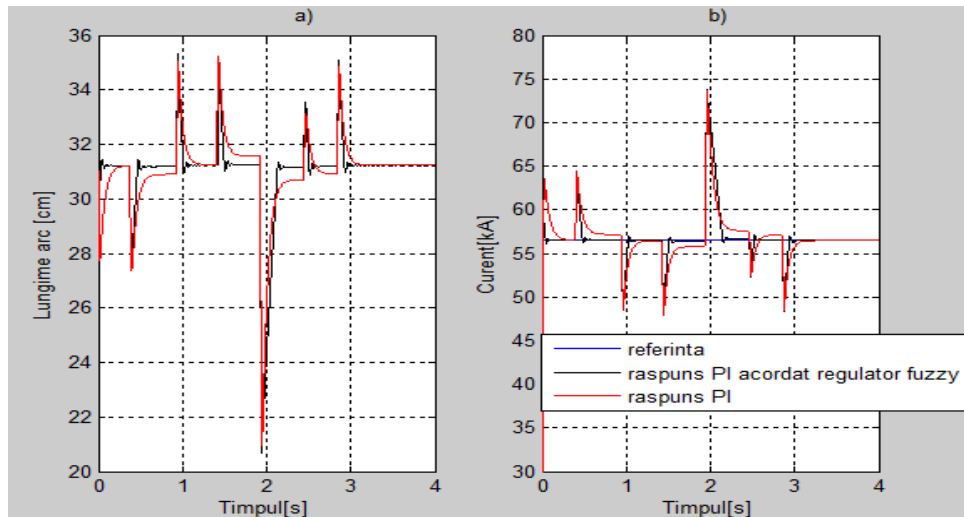


Fig.4.95. a) Variația lungimii arcului, b) Răspunsurile sistemelor cu regulator PI acordat de regulator fuzzy și regulator PI în cazul aplicării perturbațiilor.

4.3. Reglarea puterii arcului electric

Pe baza analizei rezultatelor obținute în §4.2, în prezentul paragraf sunt propuse sisteme de conducere automate bazate pe logica fuzzy dedicate reglării puterii arcului electric. Sunt luate în considerare funcții de apartenență de tip mixt (trapezoidale la capete și triunghiulare în rest), utilizându-se 7 mulțimi fuzzy pentru fiecare variabilă a sistemului fuzzy.

Se utilizează regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire, respectiv cu două intrări și o ieșire. Sunt prezentate răspunsurile sistemelor în regim staționar și în regim dinamic pentru situația în care transformatorul este setat pe *treapta 16* sau în cazul în care *treapta* de setare poate fi schimbată în timpul simulării funcționării sistemului. În primul caz inițial valoarea mărimii de referință este setată pe o valoare corespunzătoare puterii maxime a arcului obținută utilizând modelul *MM-EXP1*, în continuare utilizându-se alte valori pentru mărimea de referință care corespund unor puteri diferite de cea maximă. În al doilea caz se utilizează valori diferite ale mărimii de referință corespunzătoare puterilor maxime obținute pentru fiecare *treaptă* de setare a transformatorului. În ambele cazuri se consideră că asupra procesului acționează perturbații. În cazul unor mărimi de eroare (abatere) negative mărimea reglată trebuie să fie micșorată, implicând o ridicare a electrozilor cu o viteză corespunzătoare. Similar, în cazul unor mărimi de eroare pozitive se impune coborârea electrozilor.

Metoda de inferență utilizată este de tip *Mamdani*, deoarece pentru mărimea de ieșire sunt folosite seturi fuzzy distribuite. Motorul de inferență este de tip *min-max*, iar procesul de defuzificare utilizat este de tip *centroid*.

Baza de reguli utilizată pentru regulatoarele fuzzy considerate sunt cele care au fost prezentate în cazul reglării curentului arcului electric în vederea obținerii unei anumite puteri a arcului (tabelul 4.2).

Pentru fiecare valoare a puterii de referință se admite o abatere a puterii (mărime reglată) de *150 KW* ce reprezintă un procent de 8% din valoarea mărimii de referință.

4.3.1. Regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire

În fig.4.96 este ilustrată schema bloc a sistemului de conducere (reglare) automată în cazul în care puterea de referință a arcului, P_{ref} , este menținută constantă. Mărimea de comandă sv reprezintă sensul și viteza de deplasare a electrozilor, mărimea de execuție x este deplasarea electrozilor care determină modificarea lungimii arcului, mărimea reglată fiind puterea P obținută la ieșirea din proces. *Arcul electric* (procesul tehnic) este un element neliniar de circuit.

În fig.4.97 sunt ilustrate funcțiile de apartenență de tip mixt pentru mărimea de intrare (eroarea puterii), iar în fig.4.98 sunt prezentate funcțiile de apartenență de tip mixt pentru mărimea de ieșire (viteza și sensul de deplasare al electrozilor). În vederea alegerii domeniului mulțimilor fuzzy pentru variabilele sistemului s-au efectuat mai multe teste. Astfel, universul discuției pentru mărimea de intrare este $[-5,7e-05; 5,7e-05]$, iar pentru mărimea de ieșire s-a ales același domeniu ca și la sistemele precedente, $[-40, 40]$.

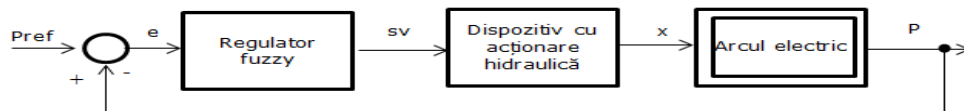


Fig.4.96. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire.

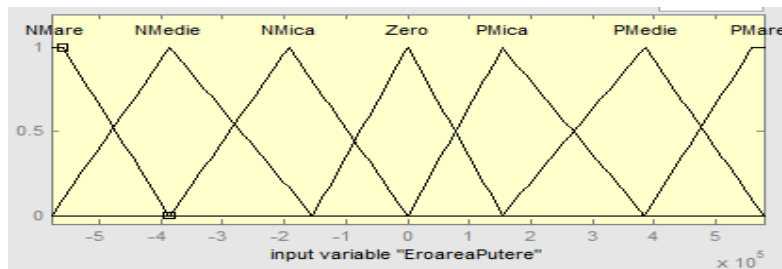


Fig.4.97. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "EroareaPutere".

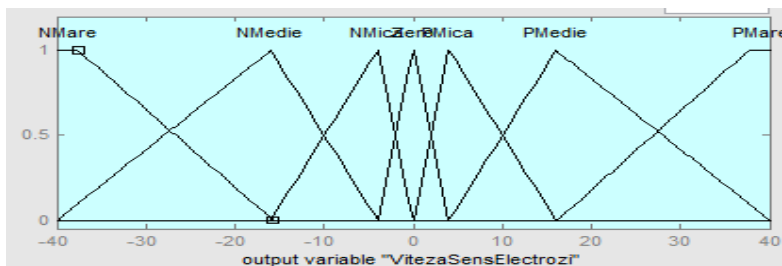


Fig.4.98. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de ieșire "VitezaSensElectrozi".

4.3.1.1. Simularea funcționării sistemului de conducere cu regulator fuzzy

În vederea simulării funcționării în regim staționar a sistemului de conducere propus se utilizează schema bloc din fig.4.99, respectiv modelul *MM-EXP1* prezentat în capitolul 3, §3.5.

Transformatorul cuptorului este setat în cea mai mare parte a timpului pe treapta 16 pe parcursul fazei tehnologice de topire a metalelor, în această fază tehnologică acționând perturbațiile asupra procesului. S-a considerat că valoarea mărimii de referință este de 18,1 MW care corespunde treptei 16 de setare a transformatorului, conform analizei efectuate în §3.5.2.

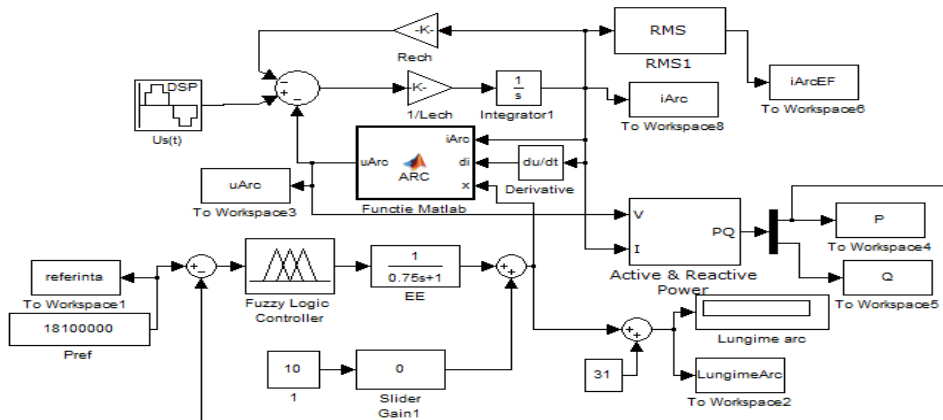


Fig.4.99. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire.

Răspunsul sistemului pentru o valoare a referinței de 18,1 MW, respectiv o tensiune de linie în secundar de 894 V aferentă treptei 16 de setare a transformatorului, este ilustrat în fig.4.100a), iar în fig.4.100b) este prezentată variația corespunzătoare a lungimii arcului. Se poate observa că răspunsul sistemului prezintă o abatere în faza inițială după care urmărește valoarea mărimii de referință, devenind stabil. Variația lungimii arcului nu prezintă oscilații, iar la valoarea de 31 cm valoarea mărimii reglată corespunde valorii mărimii de referință.

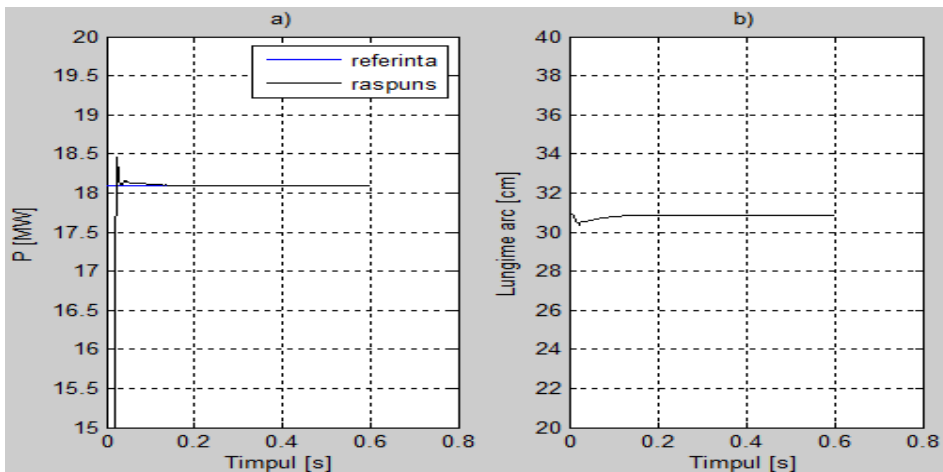


Fig.4.100. Răspunsul sistemului de conducere cu regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire în regim staționar.

4.3.1.2. Introducerea în proces a unei perturbații de tip succesiuni de trepte în cazul unei referințe variabile

În vederea simulării sistemului de conducere bazat pe regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire la variația referinței sub forma unor succesiuni de trepte, respectiv la acțiunea perturbațiilor asupra procesului, se utilizează schema bloc Simulink din fig.4.101. Modificarea valorii referinței, respectiv introducerea perturbațiilor sunt realizate prin utilizarea componentelor de tip *Slider Gain*. În acest caz tensiunea de alimentare a cuptorului este menținută constantă la valoarea tensiunii de linie de 894 V.

Fig.4.102a) prezintă variațiile referinței, respectiv răspunsului sistemului pentru cazul în care se modifică valoarea puterii de referință și acționează perturbațiile asupra procesului sub forma unor succesiuni de trepte, iar fig.4.102b) ilustrează variațiile corespunzătoare ale lungimii arcului.

Se observă că valoarea inițială a mărimii de referință este de 18,1 MW, aceasta fiind puterea maximă ce poate fi obținută cu modelul *MM-EXP1* pentru treapta 16 de setare a transformatorului. Puterea maximă se obține la o lungime a arcului de 31 cm. La momentul 4,8 sec valoarea setată a mărimii de referință este de 17,4 MW corespunzătoare unei lungimi de arc de 34 cm. Pentru ambele valori ale referinței se introduc perturbații în proces. Se poate constata că sistemul de conducere propus permite modificarea lungimii arcului astfel încât mărimea reglată să urmărească valoarea referinței și să compenseze efectele datorate perturbațiilor. Lungimea arcului nu prezintă oscilații după ce se stabilizează răspunsul sistemului.

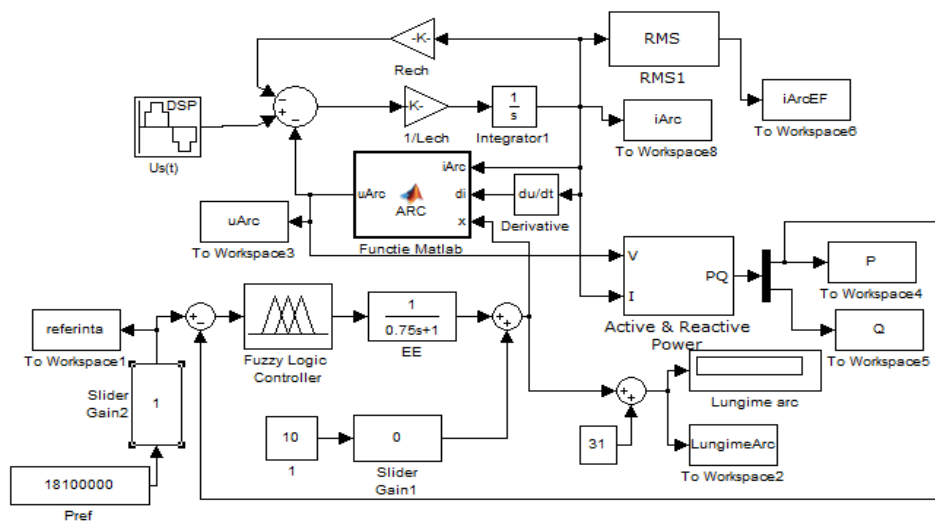


Fig.4.101. Schema bloc pentru sistemul de conducere bazat pe regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire la modificarea valorii referinței și la acțiunea perturbațiilor în proces pentru treapta 16 de setare a transformatorului.

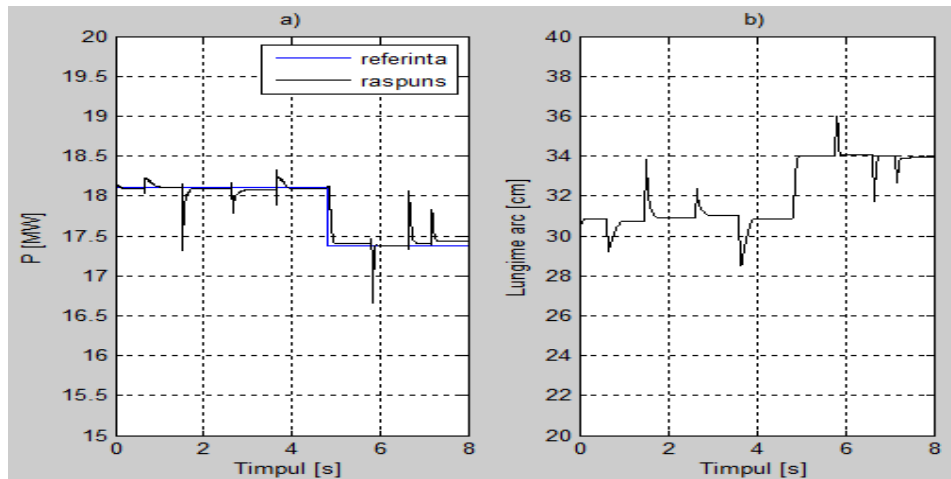


Fig.4.102. a) Referința și răspuns sistem la modificarea valorii referinței și la acțiunea perturbațiilor în proces pentru treapta 16 a transformatorului, b) Variația lungimii arcului.

4.3.1.3. Modificarea treptei de setare a transformatorului și variația treaptă a referinței, respectiv introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces

În fig.4.103 este prezentată schema bloc a sistemului de conducere propus în care se modifică treptele de setare ale transformatorului, pentru fiecare treaptă fiind modificată și puterea de referință a arcului în vederea obținerii puterilor maxime ale arcului pentru fiecare treaptă utilizând modelul *MM-EXP1*. Trecerea de pe o treaptă de setare pe alta este simulată prin utilizarea unor *switch-uri manuale* din Simulink. Și în acest caz sunt introduse perturbații în proces. În simulare sunt utilizate treptele 14, 15, 16, 17 și 18 de setare ale transformatorului, cărora le corespund valorile tensiunilor de linie de 837 V, 864 V, 894 V, 925 V și 960 V.

Fig.4.105 ilustrează variațiile corespunzătoare ale lungimii arcului electric, iar fig.4.104 prezintă răspunsul obținut pentru cazul în care sunt alese următoarele trepte de setare: 14, 18, 17, 16 și 15. Puterile de referință pentru aceste cazuri sunt următoarele: 15,5 MW, 20,9 MW, 19,4 MW, 18,1 MW, 16,7 MW.

Se poate concluziona că pentru treapta 14 puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime a arcului de 30,1 cm, pentru treapta 18 puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime a arcului de 33,8 cm, pentru treapta 17 puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime a arcului de 32 cm, pentru treapta 16 puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime a arcului de 31 cm, iar pentru treapta 15 puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime a arcului de 30,8 cm.

Pentru fiecare nouă valoare a referinței, aferentă unei noi trepte de setare a transformatorului, se introduc două sau mai multe perturbații care acționează asupra procesului. Se observă că urmărirea referinței este fidelă și se compensează efectele datorate perturbațiilor.

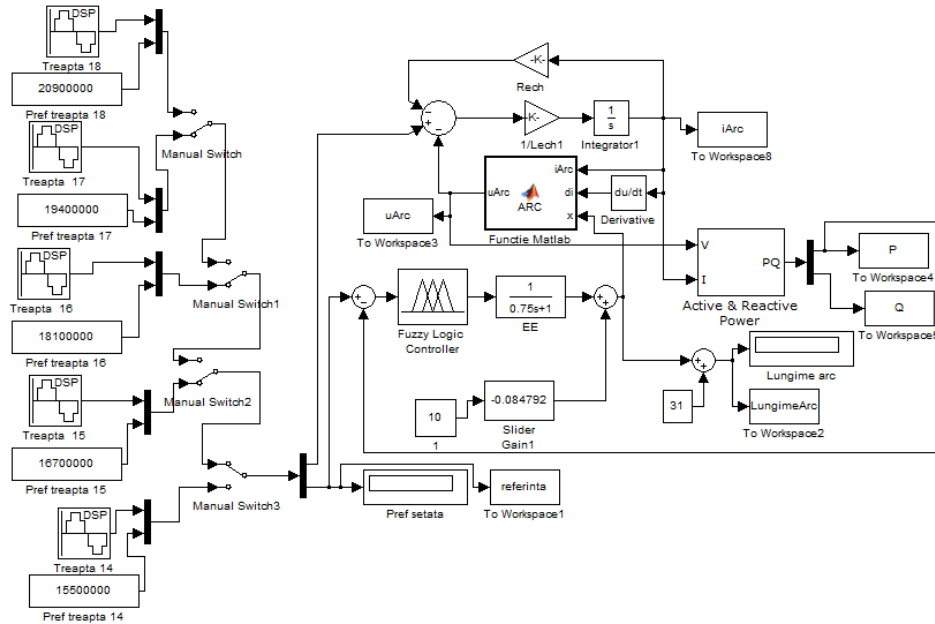


Fig.4.103. Schema bloc pentru sistemul de conducere bazat pe regulator fuzzy la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor în proces.

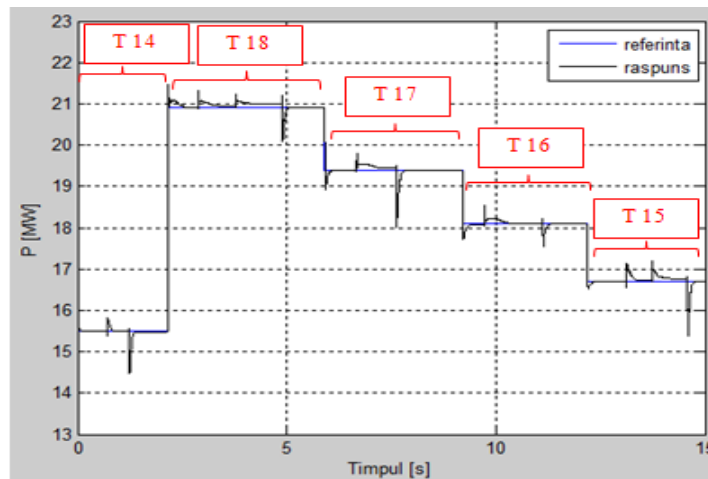


Fig.4.104. Variația referinței și răspunsul sistemului la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor în proces.

4.3.2. Regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire

Fig.4.106 prezintă schema bloc dezvoltată pentru simularea sistemului de conducere bazat pe regulatorul fuzzy cu două intrări și o ieșire la menținerea constantă a puterii de referință a arcului electric, P_{ref} . Notațiile din această figură sunt aceleași ca la regulatorul fuzzy cu o intrare și o ieșire, diferența constând în faptul că regulatorul fuzzy are încă o intrare, și anume derivata erorii.

Sistemul fuzzy a fost proiectat în Matlab, utilizând toolbox-ul fuzzy [***_3], [***_4]. Mărimile de intrare sunt eroarea puterii și derivata erorii, iar mărimea de ieșire este viteza și sensul de deplasare al electrozilor.

În fig.4.107 sunt ilustrate funcțiile de apartenență de tip mixt pentru mărimea de intrare, derivata erorii puterii. Universul discuției pentru această mărime este de $[-5e-09; 5,7e-09]$ rezultat în urma a numeroase teste.

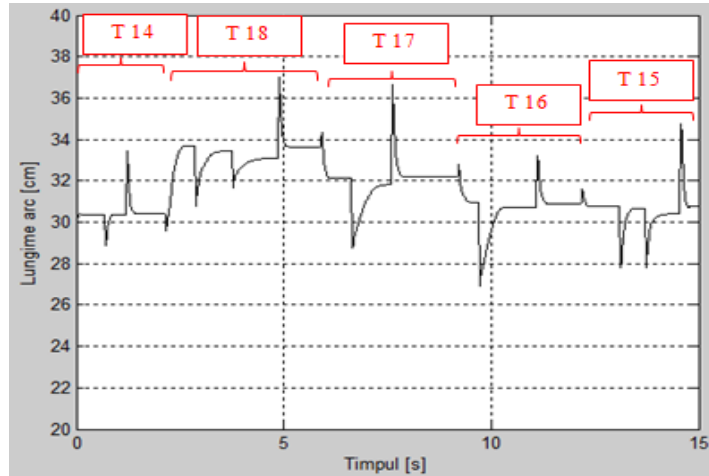


Fig.4.105. Variația lungimii arcului la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor în proces.

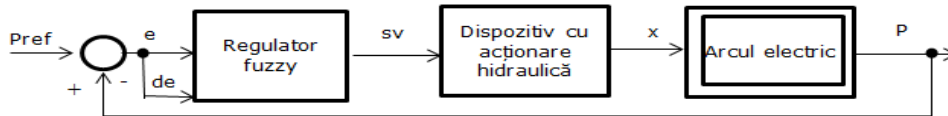


Fig.4.106. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire.

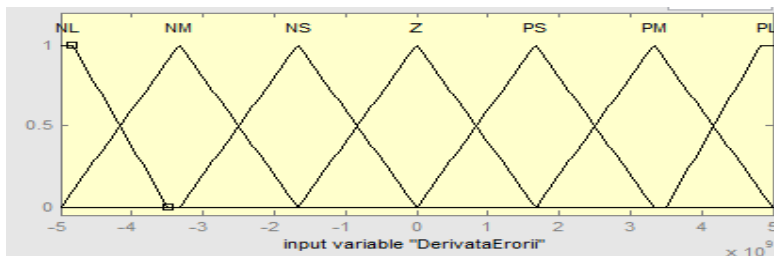


Fig.4.107. Mulțimi fuzzy pentru mărimea de intrare "DerivataErorii".

Funcțiile de apartenență, dar și universul discuției utilizate pentru eroarea puterii, respectiv pentru viteza și sensul de deplasare al electrozilor sunt cele prezentate la regulatorul fuzzy cu o intrare și o ieșire, fig.4.97 și fig.4.98.

4.3.2.1. Simularea funcționării sistemului de conducere cu regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire

Fig.4.108 prezintă schema bloc Simulink utilizată la simularea funcționării sistemului de conducere cu regulator fuzzy, modelul matematic utilizat fiind *MM-EXP1*. În cazul simulărilor se consideră că puterea de referință a arcului este de *18,1 MW* corespunzătoare treptei 16 de setare a transformatorului.

Variația referinței și răspunsul sistemului pentru o valoare a referinței de *18,1 MW*, respectiv o tensiune în secundar aferentă treptei 16 de setare a transformatorului, este ilustrat în fig.4.109a), iar în fig.4.109b) este prezentată variația corespunzătoare a lungimii arcului. Se poate constata că răspunsul prezintă o abatere în faza inițială, apoi acesta urmărește valoarea mărimii de referință, devenind stabil. Variația lungimii arcului nu prezintă oscilații, iar la valoarea de aproximativ *31 cm* valoarea mărimii reglate coincide cu valoarea mărimii de referință.

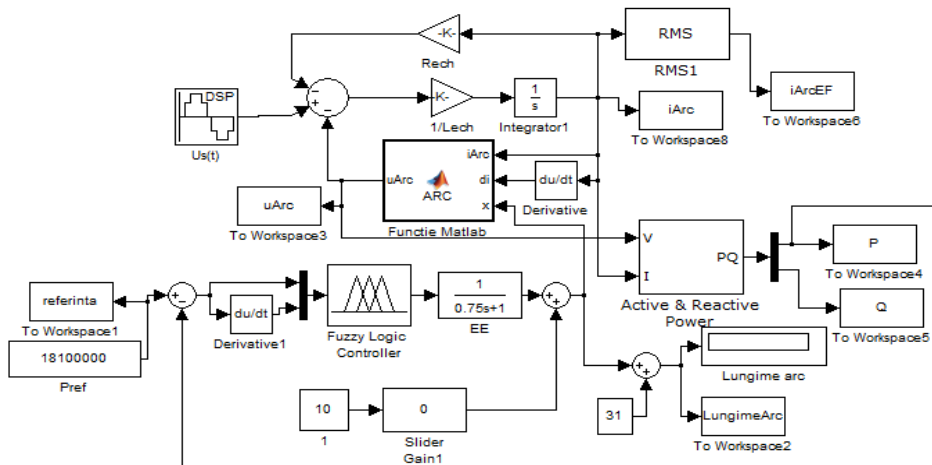


Fig.4.108. Schema bloc a sistemului de conducere bazat pe logica fuzzy.

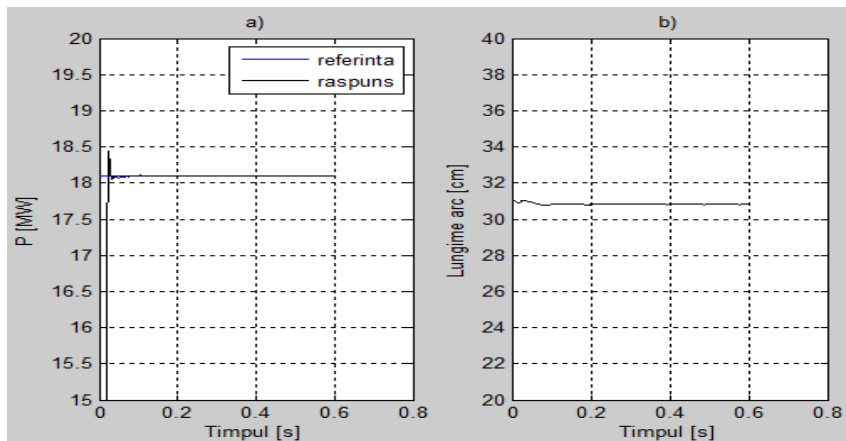


Fig.4.109. Răspunsul sistemului cu regulator fuzzy menținând constantă puterea de referință.

4.3.2.2. Introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces în cazul unei referințe variabile

Sistemul de conducere bazat pe regulatorul fuzzy cu două intrări și o ieșire este testat în cazul modificării valorii referinței, dar și la acțiunea perturbațiilor asupra procesului. Schema bloc Simulink aferentă este ilustrată în fig.4.110. În vederea modificării valorii referinței este utilizată o componentă de tip *Slider Gain*. În acest caz tensiunea de alimentare a cuptorului este menținută constantă la valoarea tensiunii de linie de 894 V.

Fig.4.111a) prezintă variațiile referinței și răspunsului sistemului la modificarea valorii puterii de referință și la acțiunea perturbațiilor asupra procesului, iar fig.4.111b) prezintă variația corespunzătoare a lungimii arcului.

Ca și în cazul precedent, valoarea inițială a mărimii de referință este de 18,1 MW, aceasta fiind puterea maximă ce poate fi obținută cu modelul MM-EXP1 pentru treapta 16 de setare a transformatorului. Puterea maximă se obține la o lungime a arcului de 31 cm. La momentul $t=3,3$ sec valoarea setată a mărimii de referință este de 17,4 MW corespunzătoare unei lungimi de arc de 34 cm. Pentru ambele valori ale referinței se introduc perturbații în proces.

Se poate concluziona că sistemul de conducere propus permite modificarea lungimii arcului astfel încât mărimea reglată să urmărească valoarea referinței și să compenseze efectele datorate perturbațiilor. După stabilizarea răspunsului sistemului, lungimea arcului nu prezintă oscilații.

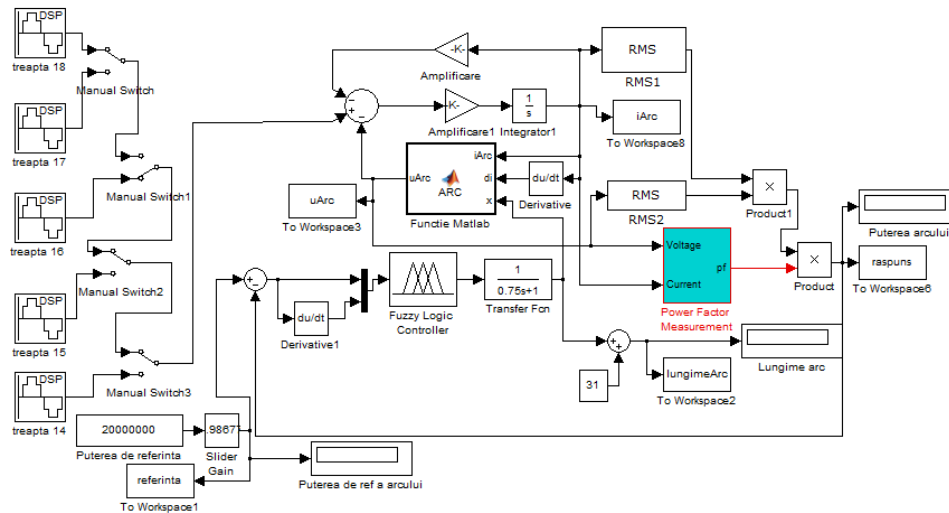


Fig.4.110. Schema bloc pentru sistemul de conducere bazat pe regulator fuzzy la modificarea valorii referinței și la acțiunea perturbațiilor în proces pentru treapta 16 de setare a transformatorului.

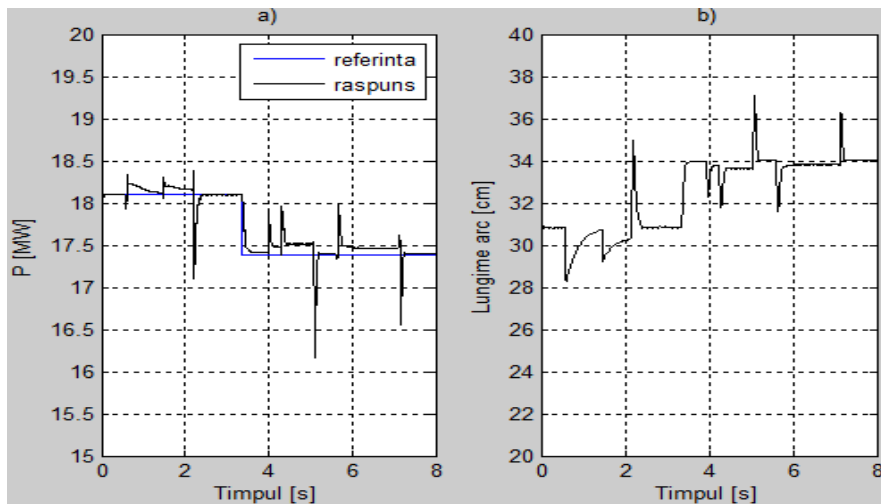


Fig.4.111. a) Variațiile referinței și răspunsului sistemului la modificarea valorii referinței și la acțiunea perturbațiilor asupra procesului pentru treapta 16 de setare a transformatorului, b) Variația lungimii arcului.

4.3.2.3. Modificarea treptei de setare a transformatorului și variația treaptă a referinței, respectiv introducerea unei perturbații de tip succesiuni de trepte în proces

În fig.4.112 este prezentată schema bloc a sistemului de conducere propus în care se modifică treptele de setare ale transformatorului, pentru fiecare treaptă fiind modificată și puterea de referință în vederea obținerii puterilor maxime ale arcului pentru fiecare treaptă. S-a utilizat modelul *MM-EXPI*. Trecerea de pe o treaptă de setare pe alta este simulată prin utilizarea unor *switch-uri manuale* din Simulink. Și în acest caz sunt introduse perturbații în proces. Sunt utilizate treptele 14, 15, 16, 17 și 18 de setare ale transformatorului, cărora le corespund valorile tensiunilor de linie de 837 V, 864 V, 894 V, 925 V și 960 V.

Fig.4.113 prezintă răspunsul obținut pentru cazul în care sunt alese următoarele trepte de setare: 14, 18, 17, 16 și 15, iar fig.4.119 ilustrează variațiile corespunzătoare ale lungimii arcului. Puterile de referință pentru aceste cazuri sunt următoarele: 15,5 MW, 20,9 MW, 19,4 MW, 18,1 MW, 16,7 MW.

Se poate concluziona că pentru treapta 14, puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime a arcului de 30,1 cm, pentru treapta 18 puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime a arcului de 33,8 cm, pentru treapta 17 puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime a arcului de 32 cm, pentru treapta 16 puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime a arcului de 31 cm, iar pentru treapta 15 puterea maximă a arcului se obține pentru o lungime a arcului de 30,8 cm.

Pentru fiecare valoare a referinței, corespunzătoare unei noi trepte de setare a transformatorului, se introduc două sau mai multe perturbații care acționează asupra procesului. Se observă că urmărirea referinței este fidelă și se compensează efectele datorate perturbațiilor.

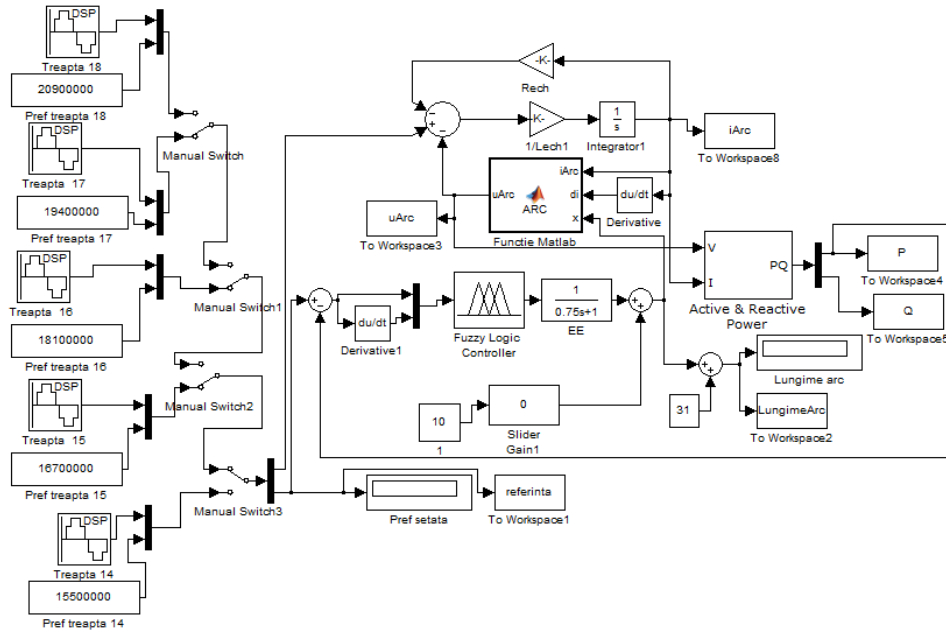


Fig.4.112. Schema bloc pentru sistemul de conducere bazat pe regulator fuzzy la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor asupra procesului.

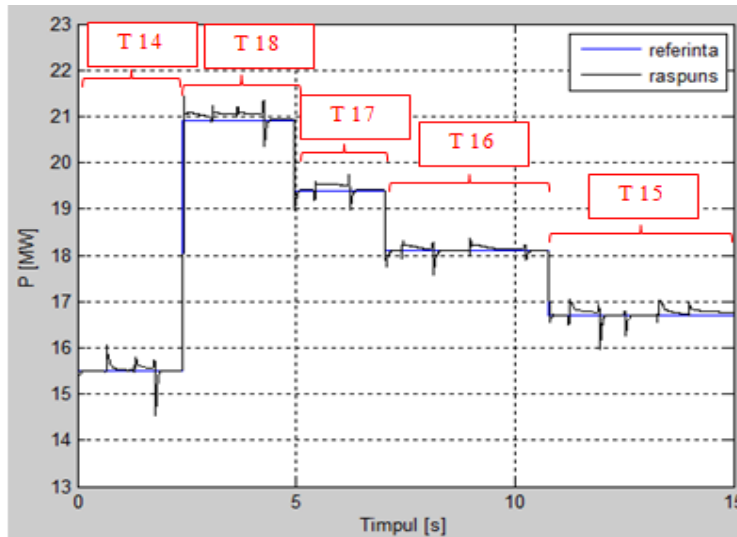


Fig.4.113. Variațiile referinței și răspunsul sistemului la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor în proces.

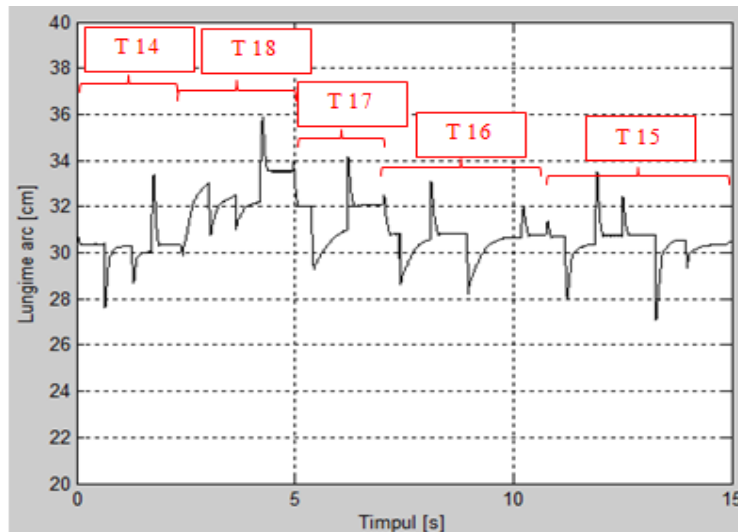


Fig.4.114. Variația lungimii arcului la modificarea treptelor de setare ale transformatorului și la acțiunea perturbațiilor în proces.

4.4. Concluzii

În capitolul de față s-au propus sisteme de conducere utilizate în vederea obținerii unei puterii impuse a arcului electric prin modificarea vitezei și a sensului de deplasare al electrozilor de la cuptorul cu arc electric trifazat. Această putere poate fi maximă sau o putere mai mică decât cea maximă.

Puterea impusă a arcului s-a obținut în două cazuri: menținând constant curentul de referință al arcului sau menținând constantă puterea de referință a arcului.

Toate sistemele de conducere propuse au fost implementate în Matlab/Simulink, iar rezultatele obținute confirmă evoluția bună a sistemului luând în considerare performanța sistemului dată de timpul de răspuns, suprareglajul și stabilitatea sistemelor.

În cazul în care mărimea reglată a fost curentul arcului sistemele de conducere dezvoltate și analizate au fost:

- SC cu regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire;
- SC cu un regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire;
- SC bazate pe regulatoare clasice de tip P, PI, PD, PID;
- SC bazate pe strategii de conducere adaptivă în care se utilizează un regulator fuzzy pentru a seta parametrii reglatoarelor clasice.

În acest caz testarea sistemelor de conducere s-a realizat pentru simularea sistemelor în regim staționar sau în regim dinamic, pentru cazurile în care s-a variat valoarea referinței, respectiv s-au introdus perturbații în proces.

Concluzia care poate fi desprinsă este că, regulatoarele bazate pe tehnici inteligente oferă performanțe mai bune comparativ cu regulatoarele clasice.

În cazul în care mărimea reglată a fost puterea arcului au fost dezvoltate și analizate sistemele de conducere bazate pe logica fuzzy. Testarea strategiilor de conducere s-a realizat pentru simularea sistemelor în regim staționar sau în regim

dinamic utilizându-se două cazuri: tensiunea din secundarul transformatorului s-a menținut constantă și s-a modificat valoarea mărimii de referință, respectiv s-a variat tensiunea de alimentare a cuptorului corespunzător anumitor trepte de setare ale transformatorului. În primul caz instalația lucrează cu puterea maximă sau cu o putere diferită de cea maximă, iar în al doilea caz instalația lucrează doar cu puterea maximă. În ambele cazuri perturbațiile acționează asupra procesului.

Sistemele de conducere implementate și validate prin simulare asigură performanțe bune pentru obținerea maximului de putere a instalației sau pentru obținerea unei puteri impuse diferită de cea maximă.

5. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII. PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE

5.1. Concluzii finale

Lucrarea de față abordează domeniul de actualitate al conducerii proceselor metalurgice folosind metode convenționale și neconvenționale (tehnici inteligente) cu particularizare la problematica modelării și conducerii procesului de elaborare al oțelului în cuptoarele cu arc electric trifazate cu acțiune directă.

Lucrarea este concepută ca o dezvoltare progresivă a problematicilor specifice cuptorului cu arc electric, sfârșitul fiecărui capitol evidențiind particularitățile și concluzii care sunt utilizate în etapele ulterioare.

Obiectivul principal al prezentei lucrări îl constituie modelarea, identificarea și implementarea unor structuri de conducere a sistemelor cu arc electric utilizate în procesul de elaborare al oțelului, cu scopul de a obține o anumită putere impusă pentru funcționarea cuptorului, reducându-se și efectele negative asupra rețelei electrice de putere, iar producția să fie optimă. În contextul acestui obiectiv sunt dezvoltate următoarele direcții de cercetare abordate în teză:

- modelarea matematică a procesului de elaborare al oțelului în vederea cunoașterii cât mai precise a fenomenelor care apar în cadrul cuptorului cu arc electric, respectiv în arcul electric;
- validarea modelelor dezvoltate prin compararea cu măsurători achiziționate de la instalația reală;
- modelarea matematică a sistemului cu acționare hidraulică utilizat pentru modificarea poziției electrozilor;
- modelarea matematică a întregii instalații a cuptorului cu arc electric;
- sinteza și dezvoltarea unor soluții de conducere a procesului de elaborare al oțelului bazate pe regulatoare clasice sau pe regulatoare fuzzy;
- sinteza și dezvoltarea unor soluții de conducere a procesului de elaborare al oțelului bazate control adaptiv;
- validarea și evaluarea performanțelor strategiilor de conducere elaborate.

În cadrul tezei s-a realizat modelarea matematică a arcului electric de la cuptorul cu arc electric trifazat prin reprezentarea caracteristicii curent-tensiune a arcului care simulează comportamentul acestuia, respectiv modelarea matematică a întregii instalații a cuptorului cu arc electric trifazat. Pentru fiecare model al arcului au fost realizate analize comparative privitoare la influența parametrilor modelelor arcului, dar și a tensiunii din secundarul transformatorului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric.

Modelele propuse au fost validate prin compararea datelor obținute prin simulare cu cele achiziționate de la cuptorul real, pentru fiecare validare fiind ilustrate caracteristicile curent-tensiune a arcului, respectiv a cuptorului, dar și forma de undă a tensiunii din punctul de măsură din secundarul transformatorului, respectiv a curentului arcului.

De asemenea au fost dezvoltate modele bazate pe rețele neuronale artificiale de tip *perceptron multi-strat* (MLP) sau rețele cu funcții de bază radiale (RNA RBF) care au capacitatea de a învăța comportamentul sistemului.

Un alt tip de rețea neuronală dezvoltată este cea de tip *ANFIS* (adaptive neuro-fuzzy inference system) care permite prescrierea valorilor curenților și ale tensiunilor arcului electric în funcție de datele achiziționate de la instalația tehnologică reală, luând în considerare un anumit pas de eșantionare.

S-au propus sisteme de conducere utilizate în vederea obținerii puterii maxime sau a unei puteri impuse a arcului electric prin modificarea vitezei și a sensului de deplasare al electrozilor de la cuptorul cu arc electric trifazat.

Au fost sintetizate și analizate mai multe tipuri de sisteme de conducere considerate reprezentative pentru procesul avut în vedere: sistem cu regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire; sistem cu un regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire; sisteme bazate pe regulatoare clasice de tip proporțional (P), proporțional-integrator (PI), proporțional-derivativ (PD), proporțional-integrator-derivativ (PID); sisteme bazate pe strategii de conducere adaptivă în care se utilizează un regulator fuzzy pentru a seta parametrii reguletoarelor clasice.

În cadrul sistemelor de conducere dezvoltate mărimea reglată a fost curentul arcului sau puterea arcului.

Sistemele de conducere propuse au fost analizate și comparate între ele pentru a evidenția care dintre acestea oferă performanțe mai bune referitoare la timpul de răspuns, suprareglajul obținut, respectiv la stabilitatea sistemului.

Concluzia care poate fi deprinsă în urma prezentei lucrări este că regulatoarele bazate pe logica fuzzy respectiv pe control adaptiv constituie soluții sigure, eficiente și performante pentru problemele care pot să apară în cadrul procesului de elaborare al oțelului prin intermediul cuptorului cu arc electric.

5.2. Contribuții personale

Pornind de la obiectivele declarate ale acestei lucrări se pot enumera următoarele contribuții:

- Elaborarea unui studiu critic asupra problematicilor de bază ale procesului de elaborare al oțelului în cuptoarele cu arc electric în vederea conducerii acestuia.
- Realizarea unei clasificări ale tendințelor actuale privitoare la modelarea și conducerea procesului de elaborare al oțelului.
- Analiza principalelor operații și faze tehnologice care influențează procesul de elaborare al oțelului în cuptorul cu arc electric prin prisma intereselor legate de validarea modelelor matematice propuse și respectiv de elaborarea strategiilor de conducere.
- Dezvoltarea și implementarea (în Matlab-Simulink) unor modele matematice (MM) ale arcului electric bazate pe caracteristica curent-tensiune a acestuia și anume: MM liniarizat – MM-LIN, MM exponențiale – MM-EXP1, respectiv MM-EXP2, MM hiperbolic liniarizat –MM-HL, MM dual exponențial – MM-DE.
- Validarea modelelor matematice propuse bazate pe caracteristica curent-tensiune a arcului prin comparare cu datele obținute în cadrul procesului de elaborare al oțelului (topire și afânare) din instalația reală.
- Analiza comparativă a rezultatelor obținute prin simularea celor două faze tehnologice principale din cadrul procesului de elaborare al oțelului (topire și afânare) utilizând cele cinci modele matematice propuse.
- Dezvoltarea și implementarea unor modele matematice bazate pe rețele neuronale artificiale pentru simularea comportamentului arcului electric: model bazat pe rețele de tip perceptron multi-strat (MLP), model bazat pe

- rețele neuronale cu funcții de bază radiale (RBF), modelul bazat pe rețele neuro-fuzzy adaptive (ANFIS).
- Dezvoltarea și implementarea (în Matlab-Simulink) unui model pentru simularea schemei electrice de funcționare a cuptorului cu arc electric ca și consumator trifazat simetric.
 - Sintetizarea și analizarea datelor achiziționate de la cuptorul cu arc electric de tip EBT de la S.C. ArcelorMittal Hunedoara S.A.
 - Analiza influenței parametrilor modelelor matematice dezvoltate, precum și a tensiunii din secundarul transformatorului cuptorului asupra tensiunii, curentului și puterii arcului electric.
 - Dezvoltarea în Matlab a unor interfețe grafice utilizator pentru implementarea diferitelor scenarii de simulare.
 - Realizarea unei analize critice asupra metodelor de conducere ale procesului de elaborare al oțelului.
 - Dezvoltarea unor sisteme de conducere (SC) destinate reglării curentului arcului în vederea obținerii unei puteri maxime sau a unei puteri impuse a arcului:
 - o SC cu regulator fuzzy cu o intrare și o ieșire;
 - o SC cu un regulator fuzzy cu două intrări și o ieșire;
 - o SC bazate pe regulatoare clasice de tip proporțional (P), proporțional-integrator (PI), proporțional-derivativ (PD), proporțional-integrator-derivativ (PID);
 - o SC bazate pe strategii de conducere adaptivă în care se utilizează un regulator fuzzy pentru a seta parametrii reguletoarelor clasice.
 - Realizarea unei analize comparative a performanțelor sistemelor de conducere propuse.
 - Dezvoltarea a două sisteme de conducere bazate pe regulatoare fuzzy destinate reglării puterii arcului în vederea obținerii unei puteri maxime sau a unei puteri impuse a arcului pentru fiecare treaptă de setare a transformatorului cuptorului.
 - Elaborarea unui set de programe și funcții Matlab destinate implementării atât a modelelor matematice cât și a sistemelor de conducere propuse utilizate în vederea obținerii puterii maxime sau a unei puteri impuse a arcului electric prin modificarea vitezei și a sensului de deplasare al electrozilor de la cuptorul cu arc electric trifazat.

Problematicile prezentate, rezultatele obținute în urma soluționării lor, precum și utilizarea unor seturi de date obținute de la instalația reală de la S.C. ArcelorMittal Hunedoara S.A conferă prezentei lucrări un real caracter de aplicabilitate practică, deschizând noi perspective ale cercetărilor în domeniul conversiei energiei electrice în energie termică.

5.3. Perspective de dezvoltare

Cercetările viitoare pot fi axate pe studiul unor noi sisteme de conducere bazate pe algoritmi de interpolare, algoritmi genetici, rețele neuronale respectiv pe control predictiv.

De asemenea se poate avea în vedere modificarea poziției electrozilor menținând constantă tensiunea pe arc, rezistența arcului, factorul de putere al circuitului, respectiv impedanța circuitului de alimentare.

LISTA DE LUCRĂRI PUBLICATE ÎN DOMENIUL TEZEI

A. Volumele unor conferințe indexate ISI

1. **L. Ghiormez**, O. Prostean, M. Panoiu și C. Panoiu, „GUI for Studying the Parameters Influence of the Electric Arc Model for a Three-Phase Electric Arc Furnace”, ICAS 2016, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 163, no. 1, p. 012026. IOP Publishing.
2. **L. Ghiormez**, M. Panoiu, C. Panoiu și R. Rob, „Electric Arc Model in PSCAD – EMTDC as embedded component and the dependency of the desired Active Power”, INDIN 2016, Poitiers, Franta, 2016, pp.351 – 356.
3. **L. Ghiormez**, O. Prostean, M. Panoiu și C. Panoiu, „Fuzzy Logic and PD Control Strategies of a Three-Phase Electric Arc Furnace”, International Conference on Computational Collective Intelligence, ICCCI 2016, Sithonia, Halkidiki, Grecia, pp. 509 – 517.
4. **L. Ghiormez** și O. Prostean, „Electric Arc Current Control for an Electric Arc Furnace Based on Fuzzy Logic”, 10th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timisoara, Romania, 2015, pp. 359 – 364.
5. M. Panoiu, C. Panoiu, A. Iordan și **L. Ghiormez**, „Artificial neural networks in predicting current in electric arc furnaces”, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2014, vol. 57, no. 1, pp. 012011, IOP Publishing.
6. **L. Ghiormez** și O. Prostean, „Parameters Influence in Electric Arc Modeling”, 8th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timisoara, Romania, 2013, pp. 209 – 213.
7. **L. Ghiormez**, O. Prostean, M. Panoiu și C. Panoiu, „Numerical modeling of some nonlinear processes in electric arc furnace operation”, In 11th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2013: ICNAAM 2013, vol. 1558, no. 1, pp. 1325-1328, AIP Publishing.
8. M. Panoiu, **L. Ghiormez**, C. Panoiu și A. Iordan, „A numerical modeling of nonlinear load behavior using artificial neural networks”, In 11th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2013: ICNAAM 2013, vol. 1558, no. 1, pp. 1337-1340, AIP Publishing.
9. M. Panoiu, C. Panoiu și **L. Ghiormez**, „Modeling of the Electric Arc Behaviour of the Electric Arc Furnace”, 5th International Workshop On Soft Computing Applications, Szeged, Ungaria, 2012, pp. 261 – 271.

B. Volumele unor conferințe indexate BDI

1. **L. Ghiormez**, O. Prostean, I. Filip, M. Panoiu, „Fuzzy Logic Control Strategy for a Three-Phase Electric Arc Furnace”, 7th International Workshop on Soft Computing Applications, SOFA 2016, Arad, Romania, pp. 1 – 12.
2. **L. Ghiormez** și M. Panoiu, „Current control of a 3-phase electric arc furnace using fuzzy logic”, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering, Hunedoara, Romania, 2015, pp. 237 – 242.
3. M. Panoiu, **L. Ghiormez**, C. Panoiu, „Adaptive neuro-fuzzy system for current and voltage prediction in EAF”, Proceedings of the 6th International Workshop Soft Computing Applications (SOFA 2014), Timisoara, Romania, pp. 423 - 437.
4. **L. Ghiormez**, O. Prostean, M. Panoiu și C. Panoiu, „Validation of an Electric Arc Model in the Two Technological Phases of an Electric Arc Furnace Process in Electric Power and Energy Systems Parameters”, 13th International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric machines, Creta, Grecia, 2013, 500, 5000, pp. 138 – 142.
5. **L. Ghiormez**, M. Panoiu și C. Panoiu, „Harmonics Analysis of the 3-Phase Electric Arc Furnace Using Models of the Electric Arc”, 3rd World Conference on Information Technology - WCIT-2012, Barcelon, Spain, 2012, pp. 424 – 430.

C. Reviste internaționale din străinătate

1. **L. Ghiormez** și O. Prostean, „Validation of a Model Used to Analyse the Electric Arc Behavior”, JOURNAL OF SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA, Bratislava, Slovacia, 2013, vol. VI, 2013, pp. 2 – 5, ISSN 1337-9089.

BIBLIOGRAFIE

- [Aga10] S. M. Agah, S. H. Hosseinian, H. A. Abyaneh și N. Moaddabi, „Parameter identification of arc furnace based on stochastic nature of arc length using two-step optimization technique”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2010, 25(4), pp. 2859-2867.
- [And11] H. Andrei, C. Cepisca și S. Grigorescu, „Power quality and electrical arc furnaces”, *INTECH Open Access Publisher*, 2011, pp. 77-100.
- [Anu08] K. Anuradha și B. P. Muni, „Electric Arc Furnace Modeling and Voltage Flicker Mitigation by DSTATCOM”, In *Industrial and Information Systems, 2008, ICIIS 2008, IEEE Region 10 and the Third international Conference on*, pp. 1-6.
- [Anu10] K. Anuradha, B. P. Muni și A. R. Kumar, „Modeling of electric arc furnace and control algorithms for voltage flicker mitigation using DSTATCOM”, In *Power Electronics and Motion Control Conference, 2009, IPEMC'09, IEEE 6th International, 2009*, pp. 1123-1129.
- [Anx04] M. Alonso și M. P. Donsión, „An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2004, 19(1), pp. 367-373.
- [Ars96] R. Arseneau, Y. Baghzouz, J. Belanger, K. Bowes, A. Braun, A. Chiaravallo, M. Cox et al., „Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11, no. 1, pp. 79-101.
- [Bab12] K. Babulu și D. Kranthi Kumar, „Fuzzy self-adaptive PID controller design for electric heating furnace”, *International Journal of Engineering Inventions* 1, 2012, no. 5, pp. 10-21.
- [Ban09] M. Banejad, R.A. Hooshmand, M.T. Esfahani, „Exponential-Hyperbolic Model for Actual Operating Conditions of Three Phase Arc Furnace”, *American Journal of Applied Sciences*, 2009, vol. 6, no. 8, pp. 1539 – 1547.
- [Bho11] D. C. Bhonsle și R. B. Kelkar, „Simulation of electric arc furnace characteristics for voltage flicker study using MATLAB”, In *Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering (ICONRAEeCE), 2011 International Conference on, IEEE*, pp. 174-181.
- [Bho13] D. C. Bhonsle și R. B. Kelkar, „Design and analysis of composite filter for power quality improvement of electric arc furnace”, In *Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2013 3rd International Conference on, IEEE*, pp. 1-10.
- [Bho14] D. C. Bhonsle și R. B. Kelkar, „New time domain electric arc furnace model for power quality study”, In *Power Electronics (IICPE), 2014 IEEE 6th India International Conference on, IEEE*, pp. 1-6.
- [Bud27] C.I. Budeanu, „Puissances reactives et fictives”, *Instytut Romain de l'Energie, București*, 1927.
- [Car04] G. Carpinelli, F. Iacovone, A. Russo și P. Varilone, „Chaos-based modeling of DC arc furnaces for power quality issues”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2004, 19(4), pp. 1869-1876.
- [Cha08] G. W. Chang, Y. J. Liu, și C. I. Chen, „Modeling Voltage-Current Characteristics of an Electric Arc Furnace Based on Actual Recorded Data: A

Comparison of Classic and Advanced Models”, Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, 2008, pp. 1 – 6.

[Cha10] G.W. Chang, Cheng-I Chen, Yu-Jen Liu, „A Neural-Network-Based Method of Modeling Electric Arc Furnace Load for Power Engineering Study”, Power Systems, IEEE Transactions, vol. 25 , 2010, pp. 138 – 146.

[Cha10_2] G. W. Chang, C. I. Chen și Y. F. Teng, „Radial-basis-function-based neural network for harmonic detection”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(6), pp. 2171-2179.

[Cha12] G. W. Chang, „Modeling highly nonlinear load dynamics for harmonic assessment”, In Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE, pp. 1-4.

[Cha14] G. W. Chang, M. F. Shih, Y. Y. Chen și Y. J. Liang, „A Hybrid Wavelet Transform and Neural-Network-Based Approach for Modelling Dynamic Voltage-Current Characteristics of Electric Arc Furnace”, IEEE transactions on power delivery, 2014, vol. 29, no.2, pp. 815-824.

[Col97] R. Collantes-Bellido și T. Gomez, „Identification and Modelling of a Three Phase Arc Furnace for Voltage Disturbance Simulation”, Power Delivery, IEEE Transactions on, 1997, vol. 12, No. 4, pp. 1812 – 1817.

[Deh11] B. M. Dehkordi, M. Moallem și A. Parsapour, „Predicting foaming slag quality in electric arc furnace using power quality indices and fuzzy method”. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2011, 60(12), pp. 3845-3852.

[Esf12] M.T. Esfahani și V. Behrooz, „A new stochastic model of electric arc furnace based on hidden markov model: A study of its effects on the power system”, IEEE Transactions on power delivery, 2012, vol.27, no. 4, pp. 1893-1901.

[Fru99] R.J. Fruehan, „The Making, Shaping, and Treating of Steel: Ironmaking”, 1999, vol. 2, AISE steel Foundation.

[Ghi12] **L. Ghiormez**, M. Panoiu și C. Panoiu, „Harmonics Analysis of the 3-Phase Electric Arc Furnace Using Models of the Electric Arc”, 3rd World Conference on Information Technology - WCIT-2012, Barcelon, Spain, 2012, pp. 424 – 430.

[Ghi13_1] **L. Ghiormez** și O. Prostean, „Parameters Influence in Electric Arc Modeling”, 8th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timisoara, Romania, 2013, pp. 209 – 213.

[Ghi13_2] **L. Ghiormez** și O. Prostean, „Validation of a Model Used to Analyse the Electric Arc Behavior”, JOURNAL OF SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA, Bratislava, Slovakia, 2013, vol. VI, 2013, pp. 2 – 5, ISSN 1337-9089.

[Ghi13_3] **L. Ghiormez**, O. Prostean, M. Panoiu și C. Panoiu, „Validation of an Electric Arc Model in the Two Technological Phases of an Electric Arc Furnace Process in Electric Power and Energy Systems Parameters”, 13th International Conference on Electric Power Systems, High Voltages, Electric machines, Creta, Grecia, 2013, 500, 5000, pp. 138 – 142.

[Ghi13_4] **L. Ghiormez**, O. Prostean, M. Panoiu și C. Panoiu, „Numerical modeling of some nonlinear processes in electric arc furnace operation”, In 11th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2013: ICNAAM 2013, vol. 1558, no. 1, pp. 1325-1328, AIP Publishing.

[Ghi15_1] **L. Ghiormez** și O. Prostean, „Electric Arc Current Control for an EAF Based on Fuzzy Logic”, 10th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timisoara, Romania, 2015, pp. 359 – 364.

- [Ghi15_2] **L. Ghiormez** și M. Panoiu, „Current control of a 3-phase electric arc furnace using fuzzy logic”, *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering*, Hunedoara, Romania, 2015, pp. 237 – 242.
- [Ghi16_1] **L. Ghiormez**, O. Prostean, M. Panoiu și C. Panoiu, „GUI for Studying the Parameters Influence of the Electric Arc Model for a Three-Phase Electric Arc Furnace”, *ICAS 2016*, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 163, no. 1, p. 012026. IOP Publishing.
- [Ghi16_2] **L. Ghiormez**, M. Panoiu, C. Panoiu și R. Rob, „Electric Arc Model in PSCAD – EMTDC as embedded component and the dependency of the desired Active Power”, *INDIN 2016*, Poitiers, Franta, 2016, pp.351 – 356.
- [Ghi16_3] **L. Ghiormez**, O. Prostean, I. Filip, M. Panoiu, „Fuzzy Logic Control Strategy for a Three-Phase Electric Arc Furnace”, *SOFA 2016*, Arad, Romania, pp. 1 – 12.
- [Ghi16_4] **L. Ghiormez**, O. Prostean, M. Panoiu și C. Panoiu, „Fuzzy Logic and PD Control Strategies of a Three-Phase Electric Arc Furnace”, *International Conference on Computational Collective Intelligence, ICCCI 2016*, Sithonia, Halkidiki, Grecia, pp. 509 – 517.
- [God00] J. Godjevac, „Comparison between PID and fuzzy control”, Source: <http://citeseer.nj.nec.com/godjevac93comparison.html> (2000).
- [Golk07] M.A. Golkar, M. Tavakoli Bina și S. Meschi, „A Novel Method of Electrical Arc Furnace Modeling for Flicker Study”, K.N.Toosi University of Technology, Electrical Engineering Department, Tehran - Iran, *INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY (ICREPO'07)*, Sevilla, March 2007.
- [Gol97] N. Golovanov, I. Șora și alții, „Electrotermie și electrotehnologii”, vol I, Editura Tehnică, București, 1997.
- [Gom10] A. A. Gomez, J. J. M. Durango și A. E. Mejia, „Electric arc furnace modeling for power quality analysis”. In *ANDESCON*, 2010 IEEE, pp. 1-6.
- [Gra11] D. Grabowski și J. Walczak, „Analysis of deterministic model of electric arc furnace”, In *Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2011 10th International Conference on, 2011 IEEE, pp. 1-4.
- [Har08] A. M. O. Haruni, M. Negnevitsky, M. E. Haque și K. M. Muttaqi, „Implementation of artificial intelligence technique to model arc furnace responses”, In *Power Engineering Conference, 2008 IEEE, AUPEC'08*, Australasian Universities, pp. 1-6.
- [Har10] A. M. O. Haruni și M. Negnevitsky, „An Artificial Intelligence Ap-proach to Develop a Time-Series Prediction Model of the Arc Furnace Resistance”, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 2010, vol.14, no.6, pp 722 – 728.
- [Har14] N. Hariyanto, M. Nurdin, P. Tanthio și G. Alvin, „Characteristic study of three-phase AC electric arc furnace model”, In *Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, 2014 International Conference on, 2014 IEEE, pp. 203-207.
- [Hon15] Hong HyokChan și Zhizhong Mao, „Controller design for electrode regulating system of electric arc furnace”, In *Control and Decision Conference (CCDC)*, 2015 27th Chinese, 2015, IEEE, pp. 864-867.
- [Hoo08_1] R. Hooshmand, M. Banejad și M. T. Esfahani, „A new time domain model for electric arc furnace”, *Journal of Electrical Engineering*, 2008, 59(4), pp. 195-202.
- [Hoo08_2] R. Hooshmand, M. T. Esfahani și A. Kiyomarsi, „Design of parallel tsc for reactive power compensation in Electric Arc Furnaces”, In *Electrical Machines*, 2008, *ICEM 2008*, 18th International Conference on, IEEE, pp. 1-5.

- [Hoo09] R. A. Hooshmand și M. T. Esfahani, „Optimal Design of TCR/FC in Electric Arc Furnaces for Power Quality Improvement in Power Systems”, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2009, vol. 8, no. 15, pp. 31-45.
- [Hui09] Z. Hui și X. Wang, „Prediction Model of Arc Furnace Based on Improved BP Neural Network”, In Environmental Science and Information Application Technology, 2009, ESIAT 2009, International Conference on IEEE, 2009, vol. 3, pp. 664-669.
- [Ion98] T. Ionescu, O. Pop, „Ingineria sistemelor de distribuție a energiei electrice”, Editura Tehnică, București, 1998.
- [Isl12] M. M. Islam, „Comparison of dynamic resistance arc furnace models for flicker study”, In Electrical & Computer Engineering (ICECE), 2012 7th International Conference on, 2012, IEEE, pp. 193-196.
- [Jan93] JSR Jang, „Adaptive—network—based fuzzy inference system”, IEEE Trans Syst ManCybern, 1993, 23(3), pp. 665-685.
- [Jan01] W. W. Jang, G.T. Heydt, S.S. Venkata, G. Byongjun Lee, „Development of enhanced electric arc furnace models for transient analysis”, Electric Power Components and Systems, 2001, 29(11), pp. 1060-1073.
- [Jon97] J. Jones, R. J. Schmitt, J. E. Goodwill și J. Kollar, „Understanding Electric Arc Furnace Operations”, RI enter for Materials Production, 1997.
- [Kas13] M. G. Kashani, S. Babaei și S. Bhattacharya, „SVC and STATCOM application in Electric Arc Furnace efficiency improvement”, In Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2013 4th IEEE International Symposium on, 2013, IEEE, pp. 1-7.
- [Kho08] H. Khoshkhou, S. H. H. Sadeghi și R. Moini, „On-line estimation of inductance of flexible cables and electrode arms in an electric arc furnace by artificial neural network”, In Electrical and Computer Engineering, 2008, CCECE 2008, Canadian Conference on, 2008, IEEE, pp. 001507-001512.
- [Kim12] K. H. Kim, J. J. Jeong, S. J. Lee, S. Moon și S. W. Kim, „Modeling of DC Electric Arc Furnace Using Chaos Theory and Neural Network”, In Control, Automation and Systems (ICCAS), 2012, 12th International Conference on IEEE, 2012, pp. 1675-1678.
- [Li10] X. Li, X. Lu și D. Wang, „Arc furnace electrode control system design”, In Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010 International Conference on, IEEE, 2010, vol. 4, pp. 364-366.
- [Li11] Y. Li, Z. Z. Mao, Y. Wang, P. Yuan și M. X. Jia, „Model Predictive Control Synthesis Approach of Electrode Regulator System for Electric Arc Furnace”, Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, vol.18, no. 11, pp. 20-25.
- [Lon14] P. S. Londhe, B. M. Patre și A. P. Tiwari, „Fuzzy-like PD controller for spatial control of advanced heavy water reactor”, Nuclear Engineering and Design 274 (2014), pp. 77-89.
- [Lu10] X. Lu și P. Xue, „The dual-loop control scheme of the electric arc furnace short circuit compensation implemented on the harmonic current soft survey”, In Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2010 Seventh International Conference on, 2010, IEEE, vol. 6, pp. 2688-2691.
- [Maz06] J. Mazumdar, R. G. Harley, F. Lambert și G. K. Venayagamoorthy, „Predicting load harmonics in three phase systems using neural networks”, In Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006, APEC'06, Twenty-First Annual IEEE, pp. 1738-1744.
- [Mel09] D. O. Melinte, „Control and Adjustment Methods for the Electric Parameters of Electric Arc Furnaces”, SISOM 2009 and Session of the Commission of Acoustics, Bucharest 28-29 May, 2009, pp. 453 - 458.

- [Mog11] M. Moghadasian și E. Alenasser, „Modelling and Artificial Intelligence-Based Control of Electrode System for an Electric Arc Furnace”, *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2011.
- [Mok02] H. Mokhtari și M. Hejri, „A new three phase time-domain model for electric arc furnaces using MATLAB”, In *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, IEEE/PES*, 2002, vol. 3, pp. 2078-2083.
- [One99] E. O'Neill-Carrillo, G. T. Heydt, E. J. Kostelich, S. S. Venkata și A. Sundaram, „Nonlinear deterministic modeling of highly varying loads”. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 1999, 14(2), pp. 537-542.
- [O'Neill01] E. O'Neill-Carrillo, B. Bánfai, G. T. Heydt, J. Si, „EMTP Implementation and Analysis of Nonlinear Load Models”, *Electric Power Components and Systems*, 2001, pp. 809-920.
- [Ozg02] O. Ozgun și A. Abur, „Flicker study using a novel arc furnace model”, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2002, 17(4), pp. 1158-1163.
- [Pai96] R.P. Paiva, „Modelling and Control of an Electric Arc Furnace”, *Lund Institute of Technology*, 1996.
- [Pan07_1] M. Panoiu, C. Panoiu, I. Sora și M. Osaci, „About the possibility of power controlling in the three-phase electric arc furnaces using PSCAD EMTDC simulation program”, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 2007, 7(1), pp. 38-43.
- [Pan07_2] M. Panoiu, C. Panoiu și I. Sora, „Modeling of three phase electric arc furnaces”, *Acta Electrotehnica*, 2007, vol. 48, no. 2, pp. 124 – 132.
- [Pan07_3] M. Panoiu, C. Panoiu, I. Sora, M. Osaci și I. Muscalagiu, „Modeling, Simulating and Experimental Validation of the AC Electric Arc in the Circuit of Three-Phase Electric Furnaces”, *EUROSIM 2007 Congress*, Ljubljana, Slovenia, 2007, pp.241 – 250.
- [Pan08] M. Panoiu, C. Panoiu, „Modelarea și simularea proceselor neliniare în electrotermie”, *Editura Mirton, Timișoara*, 2008.
- [Pan08_2] M. Panoiu, C. Panoiu, M. Osaci și I. Muscalagiu, „Simulation result about harmonics filtering using measurement of some electrical items in electrical installation on UHP EAF”, *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 2008, 7(1), pp. 22-31.
- [Pan08_3] M. Panoiu, C. Panoiu, I. Sora, R. Rob, „Simulation of the flicker phenomenon based on modeling the electric arc”, *WSEAS Transactions on Systems*, 2008, 7(10), pp. 1132-1142.
- [Pan09] M. Panoiu și C. Panoiu, „Modeling the Electromagnetic Pollution of the Electric Arc Furnace”, *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, Bucarest, Romania, 2009, vol. 54, no. 2, pp. 165-174.
- [Pan12] M. Panoiu, C. Panoiu și **L. Ghiormez**, „Modeling of the Electric Arc Behaviour of the Electric Arc Furnace”, *5th International Workshop On Soft Computing Applications*, Szeged, Ungaria, 2012, pp. 261 – 271.
- [Pan13_1] M. Panoiu, **L. Ghiormez**, C. Panoiu și A. Iordan, „A numerical modeling of nonlinear load behavior using artificial neural networks”, In *11th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2013: ICNAAM 2013*, vol. 1558, no. 1, pp. 1337-1340, AIP Publishing.
- [Pan14_1] M. Panoiu, C. Panoiu, A. Iordan și **L. Ghiormez**, „Artificial neural networks in predicting current in electric arc furnaces”, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 57, no. 1, pp. 012011, IOP Publishing.
- [Pan14_2] M. Panoiu, **L. Ghiormez**, C. Panoiu, „Adaptive neuro-fuzzy system for current and voltage prediction in EAF”, *Proceedings of the 6th International Workshop Soft Computing Applications (SOFA 2014)*, Timisoara, Romania, pp. 423 - 437.

- [Par07] A. Parsapoor, A. Mohamad și K. Arash, „Adaptive control of the electric arc furnace electrodes using Lyapunov design”, In Control, Automation and Systems, 2007, ICCAS'07, International Conference on, 2007, IEEE, pp. 1617-1622.
- [Par10] A. Parsapoor, B. M. Dehkordi și M. Moallem, „Predicting foaming slag quality in electric arc furnace using power quality indices and ANFIS”, In Electrical Engineering (ICEE), 2010 18th Iranian Conference on, 2010, IEEE, pp. 861-866.
- [Pla05] E. C. Plata și H. E. Tacca, „Arc furnace modeling in ATP-EMTP”, In The 6th International Conference on Power Systems Transients (IPST), 2005, pp. 19-23.
- [Pre97] Ș. Preitl, R. Precup, „Introducere în conducerea fuzzy a proceselor”, Editura Tehnică, București, 1997.
- [Raj11] M. N. Raju, K. Anuradha și G. R. K. Murthy, „Voltage flicker mitigation by DSTATCOM for voltage source Arc furnace model”, In Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS), 2011, IEEE, pp. 120-123.
- [Sad00_1] A. R. Sadeghian și J. D. Lavers, „Application of feedforward neuro-fuzzy networks for current prediction in electric arc furnaces”, In Neural Networks, 2000, IJCNN 2000, Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on, 2000, IEEE, vol. 4, pp. 420-425.
- [Sad00_2] A. R. Sadeghian și J. D. Lavers, „Neuro-fuzzy predictors for the approximate prediction of VI characteristic of electric arc furnaces”, In Fuzzy Information Processing Society, 2000, NAFIPS, 19th International Conference of the North American, 2000, IEEE, pp. 183-187.
- [Sad00_3] A. R. Sadeghian și J. D. Lavers, „Recurrent neuro-fuzzy predictors for multi-step prediction of vi characteristics of electric arc furnaces”, In Fuzzy Systems, 2000, FUZZ IEEE 2000, The Ninth IEEE International Conference on, 2000, IEEE, vol. 1, pp. 110-115.
- [Sad01] A. R. Sadeghian, „Nonlinear neuro-fuzzy prediction: methodology, design and applications”, In Fuzzy Systems, 2001, The 10th IEEE International Conference on, 2001, IEEE, vol. 2, pp. 1022-1026.
- [Sad11] A. Sadeghian și J. D. Lavers, „Dynamic reconstruction of nonlinear v-i characteristic in electric arc furnaces using adaptive neuro-fuzzy rule-based networks”, Applied Soft Computing, 2011, 11(1), pp. 1448-1456.
- [Sad99_1] A. R. Sadeghian și J. D. Lavers, „Application of adaptive fuzzy logic systems to model electric arc furnaces”, In Fuzzy Information Processing Society, 1999, NAFIPS, 18th International Conference of the North American, 1999, IEEE, pp. 854-858.
- [Sad99_2] A. R. Sadeghian și J. D. Lavers, „Nonlinear black-box modeling of electric arc furnace: an application of fuzzy logic systems”, In Fuzzy Systems Conference Proceedings, 1999, FUZZ-IEEE'99, 1999 IEEE International, vol. 1, pp. 234-239.
- [Sad99_3] A. R. Sadeghian și J. D. Lavers, „Application of radial basis function networks to model electric arc furnaces. In Neural Networks”, 1999. IJCNN'99, International Joint Conference on, 1999, IEEE, vol. 6, pp. 3996-4001.
- [Sar10] Y. N. Sarem, M. H. Amrollahi, M. Babanejad, S. Mounesirad, M. A. Layegh și D. Habibinia, „Electric arc furnace power modeling for STATCOM Controller Application”, Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on IEEE, 2010, pp. 1547-1552.
- [Sha04] C. Sharmeela, G. Uma, M. R. Mohan și K. Karthikeyan, „Voltage flicker analysis and mitigation-case study in ac electric arc furnace using PSCAD/EMTDC”, In Power System Technology, 2004, PowerCon 2004, 2004 International Conference on, IEEE, vol. 1, pp. 707-712.
- [Sha10] G. Shabib și K. Hassan, „Fuzzy Logic Control of Three Phase Submerged Arc Ferrosilicon Furnace”, dynamics 8, 2010: 9.

- [Sou09] J. Sousa, M. T. Correia de Barros, M. Covasand și A. Simoes, „Harmonics and flicker analysis in arc furnace power systems”, IEEE Trans Power Quality, 2009.
- [Tas12] M. Taslimian, F. Shabaninia, M. Vaziri și S Vadhva, „Fuzzy type-2 electrode position controls for an Electric Arc Furnace”, In Information Reuse and Integration (IRI), 2012 IEEE 13th International Conference on, 2012, IEEE, pp. 498-501.
- [Tav08] A. Tavakkoli, M. Ehsan, S. Batahiee și M. Marzband, „A SIMULINK study of electric arc furnace power quality improvement by using STATCOM”, In Industrial Technology, 2008, ICIT 2008, IEEE International Conference on, 2008, IEEE, pp. 1-6.
- [Tho01] A. M. Thomas, F. H. Miner și G. R. Roberts, „Integral side wall and tap hole cover for an eccentric bottom tap (EBT) electric furnace” U.S. Patent, 2001, no. 6, pp. 185-242.
- [Var96] S. Varadan, B. Elham Makram și A. A. Girgis, „A new time domain voltage source model for an arc furnace using EMTP”, IEEE Transactions on Power Delivery 11, 1996, no. 3, pp. 1685-1691.
- [Var12] M. Varan și Y. Uyarođlu, „Elimination of harmonic induced viable bifurcations with TCSC for ac-fed electric arc furnaces”, Journal of Electrical Engineering, 2012, 63(5), pp. 303-309.
- [Vol07] C. Voloșencu, „Sisteme fuzzy și neuronale”, Editura Politehnica, Timișoara, 2007.
- [Xin09] H. Xin, T. Huang, X. Liu, and X. Tang, „Temperature Control System Based on Fuzzy Self-Adaptive PID Controller”, In Genetic and Evolutionary Computing, 2009. WGECC'09. 3rd International Conference on, 2009, IEEE, pp. 537-540.
- [Wan05] F. Z. WangJin și Z. Zhu, „Modeling and prediction of electric arc furnace based on neural network and chaos theory”, In Advances in Neural Networks-ISNN 2005, pp. 819-826, Springer Berlin Heidelberg.
- [Wan05_2] F. Wang, Z. Jin, Z. Zhu și X. Wang, „Modeling the DC electric arc furnace based on chaos theory and neural network”, In Power Engineering Society General Meeting, 2005, IEEE, pp. 2503-2508.
- [Wan07] Y. F. Wang și J. G. Jiang, „A novel chaotic model of ac electric arc furnace for power quality studies”, In Electrical Machines and Systems, 2007, ICEMS, International Conference on, 2007, IEEE, pp. 1759-1762.
- [Wan10] Y. Wang, Z. Z. Mao, H. X. Tian, Y. Li și P. Yuan, „Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace”, Journal of Central South University of Technology, 2010, 17, pp. 560-565.
- [Wan11] H-J, Wang, Y-M Li Y-jun Yue, „Application of BP neural network intelligent PID controller based on GA in electrode regulator systems of electric arc furnace”, In Communication Software and Networks (ICCSN), 2011 IEEE 3rd International Conference on, 2011, IEEE, pp. 198-202.
- [Whi12] L. W. White și S. Bhattacharya, „A single phase PSCad electric arc furnace model”, In IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, IEEE, pp. 5352-5356.
- [Wie08] T. Wiczorek și K. Mączka, „Modelling of the AC-EAF process using computational intelligence methods”, Przegląd Elektrotechniczny, 2008. 84, pp. 184-188.
- [Xin14] L. Xin, N. Zhang, C. Guo și H. Li, „Research on arc stability control system for vacuum arc remelting furnace based on fuzzy-PID”, In Electronics, Computer and Applications, 2014 IEEE Workshop on, 2014, IEEE, pp. 23-26.
- [Xu12] Q. Xu, S. Tian, P. Zhang și G. Li, „Modeling Analysis for High Power Load with Voltage Source Harmonics”, In Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, 2012, IEEE, pp. 1-4.

- [Yan11] L. I. Yan, et al., „Model predictive control synthesis approach of electrode regulator system for electric arc furnace”, Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, vol. 18, no. 11, pp. 20-25.
- [Zha14] S. Zhang, C. Hui, L. Wanjun și Z. Yanbin, „A logistic-interpolation-based fuzzy controller for electrode regulation of submerged arc furnace”, In Control and Decision Conference (2014 CCDC), The 26th Chinese, 2014, IEEE, pp. 2388-2392.
- [Zhe00] T. Zheng și E. B. Makram, „An adaptive arc furnace model”, Power Delivery, IEEE Transactions on, 2000, 15(3), pp. 931-939.
- [Zhe98] T. Zheng, E. B. Makram și A. Girgis, „Effect of different arc furnace models on voltage distortion”, In Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998, Proceedings, 8th International Conference On, 1998, IEEE, vol. 2, pp. 1079-1085.
- [Wie08] T. Wiczorek, K. Macza, „Modeling of the AC-EAF process using computational intelligence methods”, Electrotech Rev, 2008, 11, pp. 184-188
- [***_91] ADA 3100/ ADA3100A, User's Manual, Real Time Devices Inc., USA, 1991
- [***_a] <https://ro.wikipedia.org/wiki/O%C8%9Bel>
- [***_0] Electric Arc Furnace Hunedoara, Measurement Report, 2010
- [***_1] Math Works Inc. – „Matlab”
- [***_2] Documentația tehnică a firmei *SC ArcelorMittal Hunedoara S.A.* , secția oțelărie.
- [***_3] Math Works Inc. – Matlab reference Guide, Math Works Inc., Natick, Massachussets, 1993.
- [***_4] Math Works Inc. – Matlab – The Language of Technical Computing, Math Works Inc., Natick, Massachussets, 1997.
- [***_5] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ro/nid/14132>, Documentatie National Instruments 6221
- [***_6] Barbu-Lucian, N. "Electrotehnica", 1995.
- [***_7] Manual regulator electrozi SPIE E.M.P.E.R.E – Franta 2008 – Jan Piere Sorok