

Universitatea Politehnica din București
Facultatea de Electronică, Telecomunicații și
Tehnologia Informației

REZUMAT

Teză de Doctorat

**Sisteme electronice de control automat
al proceselor tehnologice din industria cimentului**

Doctorand: Dipl. Ing. Florin George Bernea

Conducător de doctorat: Prof.dr.ing. Gheorghe Brezeanu

CUPRINS Rezumat:

Cuprins teză doctorat.....	3
Prefață.....	5
Structură teză doctorat.....	6
Contribuția originală – Partea a II-a	
Capitolul 5 Nucleul unui sistem expert de tip fuzzy dedicat conducerii în industria cimentului; aplicație pentru răcitorul grătar din cadrul secției de ardere clincher	
5.1. Structura generală a unui sistem expert.....	8
5.2. Baza de cunoștințe a sistemului expert.....	10
5.3. Realizarea interfețelor de fuzzificare și defuzzificare.....	12
5.4. Algoritmul de lucru al controlerului fuzzy.....	14
Capitolul 6 Valoarea economică adăugată prin utilizarea SE – studiu de caz răcitor grătar	
6.1. Prezentarea studiului de caz.....	15
6.2. Rezultate economice obținute prin utilizarea SE la controlul răcitorului grătar.....	16
Capitolul 7 Aplicații ale utilizării senzorilor în procesul de conducere a fluxului tehnologic în industria cimentului – aplicație specială “senzorii pe diamant”	
7.1. Senzori de temperatură.....	18
7.2. Condițiile de funcționare a senzorilor de temperatură într-o fabrică de ciment și transpunerea în date de proiectare.....	19
7.3. Proiectarea diodelor Schottky pe SiC pentru funcționarea ca senzori de temperatură..	21
7.4. Studii și experimentări preliminare pe structuri Schottky pe SiC.....	22
7.5. Măsurători electrice pe diode sensor pe SiC.....	23
7.6. Senzor de temperatură cu diode Schottky pe SiC.....	24
7.7. Senzor inteligent de temperatură. Circuitul de prelucrare a semnalului.....	25
8. Concluzii generale.....	26
8.1 Direcții pentru continuarea cercetării.....	29
8.2 Disiminarea rezultatelor obținute	
8.2.1 Articole publicate.....	29
8.2.2 Comunicări la conferințe și sesiuni științifice.....	30
Bibliografie selectivă.....	31

Cuprins teză doctorat

Prefață.....	5
Capitolul 1 Fundamente ale sistemelor în procese din industria cimentului	
1.1 Prezentare generală a industriei de ciment în România	10
1.2 Descrierea fluxului de fabricație.....	12
1.3 Direcții de dezvoltare a sistemelor	15
1.4 Concluzii.....	21
Capitolul 2 Controlul procesului de fabricație în industria cimentului	
2.1 Situația actuală a sistemelor de automatizare.....	22
2.2 Sisteme noi de automatizare în industrie.....	26
2.3 Concluzii.....	32
Capitolul 3 Necesitatea și utilitatea folosirii tehnicilor de inteligență artificială în conducerea fabricației în industria cimentului	
3.1 Cerințele actuale în industria de ciment.....	33
3.2 Criterii specifice pentru implementarea unui sistem expert în industrie.....	36
3.3 Concluzii.....	38
Capitolul 4 Conducerea procesului folosind un sistem bazat pe cunoștințe	
4.1 Componentele sistemului și rolul acestora.....	39
4.2 Funcționarea unui sistem expert.....	45
4.3 Concluzii.....	55
Capitolul 5 Nucleul unui sistem expert de tip fuzzy dedicat conducerii în industria cimentului; aplicație pentru răcitorul grătar din cadrul secției de ardere clincher	
5.1 Structura generală a unui sistem expert.....	56
5.2 Baza de cunoștințe a sistemului expert.....	59
5.3 Realizarea interfețelor de fuzzificare și defuzzificare.....	62
5.4 Algoritmul de lucru al controlerului fuzzy.....	69
5.5 Concluzii.....	70
Capitolul 6 Valoarea economică adăugată prin utilizarea SE – studiu de caz răcitor grătar	
6.1 Prezentarea studiului de caz.....	71
6.2 Rezultate economice obținute prin utilizarea SE la controlul răcitorului grătar.....	75
6.3 Concluzii.....	76

Capitolul 7 Aplicații ale utilizării senzorilor în procesul de conducere a fluxului tehnologic în industria cimentului – aplicație specială “senzorii pe diamant”

7.1 Senzori de temperatură.....	77
7.2 Condițiile de funcționare a senzorilor de temperatură într-o fabrică de ciment și transpunerea în date de proiectare.....	80
7.3 Proiectarea diodelor Schottky pe SiC pentru funcționarea ca senzori de temperatură	84
7.4 Studii si experimentari preliminare pe structuri Schottky pe SiC.....	88
7.5. Măsurători electrice pe diode sensor pe SiC.....	95
7.6. Senzor de temperatură cu diode Schottky pe SiC.....	102
7.7 Senzor inteligent de temperatură. Circuitul de prelucrare a semnalului.....	105
7.5 Concluzii.....	106

Capitolul 8

Concluzii generale.....	108
8.1 Elemente de continuare a aplicației.....	111
8.2 Disiminarea rezultatelor obținute	
Articole publicate.....	112
Comunicări la conferințe și sesiuni științifice.....	113
Bibliografie.....	114

Anexe:

A.1. Aspecte teoretice ale realizării unui sistem expert de tip fuzzy.....	120
Mulțimi fuzzy	120
Variabile lingvistice	125
Logica fuzzy	125
Controlul fuzzy.....	127
A.2 Studiu de caz răcitor grătar- fișe calcul valoare economică adăugată.....	142

Teza de doctorat își propune prezentarea actuală a condițiilor de monitorizare și conducere a fluxului tehnologic dintr-o fabrică de ciment și posibilitățile implementării unui sistem inteligent, denumit aici **sistem expert de automatizare integrată (S.E)**. Un sistem expert face schimbări în pași mici și mai frecvente decât pot face operatorii clasici, crescând astfel constanta producției, făcând posibilă funcționarea mai aproape de limitele de operare impuse. Creșterea de producție este cea mai benefică în situațiile în care fabricile trebuie să vândă la capacitatea instalată, dar se realizează și îmbunătățiri calitative a produsului, constanța parametrilor de calitate în paralel cu reducerea costurilor de exploatare și mentenanță în fabricile funcționând sub capacitate.

În cadrul lucrării s-a căutat să se demonstreze pe de-o parte compatibilitatea proceselor de fabricație a cimentului cu cele mai noi tehnici de control și conducere automată a acestora, iar pe de altă parte s-a experimentat într-o fabrică de ciment din România cel mai modern sistem inteligent din domeniu, denumit aici **sistem expert de automatizare integrată (SE)**, coroborat cu **realizarea unui senzor inteligent de temperaturi ridicate cu diode pe carbură de siliciu (SIC)**, un instrument necesar în acest sistem, dar și în alte puncte ale fluxului de fabricare a cimentului.

Într-o fabrică de ciment cuptorul este zona unde impactul în costurile de producție este cel mai mare, **datorită consumului de combustibil**, iar controlul de proces este de importanță maximă putând conduce la reduceri semnificative ale acestui consum. Pur și simplu, într-o fabrică modernă, nu sunt suficienți doar operatorii pentru a realiza o reală optimizare a procesului tehnologic prin metode convenționale de control și monitorizare. Doar în cazul situațiilor deosebit de complexe, care apar ocazional și sunt greu de parametrizat, acestea pot fi abordate mai bine de operatori și specialiști tehnologi. Un sistem de automatizare expert de conducere și control colectează semnale de la miile de senzori din controlul de proces, semnalele lor fiind supuse testelor de valabilitate și soliditate; semnalele care pică testul mai pot fi supuse unor filtre mai riguroase sau eliminate definitiv. Valorile valabile ale senzorilor sunt procesate matematic pentru a genera măsuri pe termen scurt pe baza obiectivelor de creștere a ratelor producției, de îmbunătățire a calității și reducere a consumurilor energetice. Măsurile pe termen scurt sunt modelate în baza expertizei celor mai experimentați operatori și tehnologi.

Funcțiile de raționament, care aplică expertiza sub forma unei tehnici de raționament sunt cunoscute sub numele de **fuzzy logic/logică aproximativă** și evaluează care sunt condițiile de proces în timp real [1, 2].

Deoarece întregul proces tehnologic este prea vast pentru a fi tratat într-o singură lucrare, în actuala cercetare s-a avut în vedere doar un segment din fluxul tehnologic și anume secția ardere clincher, cu focalizare pe răcitorului grătar. Sunt prezentate soluțiile de implementare a unui sistem expert la răcitorul grătar, conceptul realizării unui sistem expert de automatizare, fiind expuse atât elementele teoretice care asigură suportul implementării cât și elementele auxiliare care concură la realizarea și funcționarea acestui sistem. De asemenea, sunt prezentate datele experimentale obținute în urma introducerii acestui sistem expert de automatizare în fluxul tehnologic al unei fabrici de ciment.

În a doua parte a contribuției originale a Tezei este prezentată în detaliu, proiectarea, fabricarea, modelarea și caracterizarea de diode pe carbură de siliciu (SiC), folosite ca senzori la temperaturi înalte și demonstrarea utilizării acestor senzori în echipamentele pentru controlul proceselor tehnologice din industria cimentului.

Teza de doctorat este structurată pe două părți principale:

Partea I: Industria de ciment pretabilă la conducerea automată a proceselor tehnologice, în cadrul căreia s-au prezentat, pe baza literaturii de specialitate dar și a documentației tehnice uzinale, pe de o parte necesitatea trecerii proceselor tehnologice industriale pe conducere automată, utilizându-se ultimele realizări în domeniu – respectiv sistemele expert – iar pe de altă parte s-a demonstrat că fluxul de fabricație al cimentului este pretabil la acest lucru. Această parte conține următoarele capitole:

Capitolul 1 - Fundamente ale sistemelor de comandă și control în industria cimentului prezintă importanța cimentului, unul dintre cele mai folosite materiale de pe Pământ trecând în revistă atât situația acestei industrii pe plan mondial cât și din România. Pentru a înțelege procesul tehnologic de producere a cimentului, proces la care se face referire pe parcursul lucrării, capitolul se continuă cu o succintă descriere a fluxului tehnologic de fabricare

a acestuia. În încheierea capitolului sunt prezentate câteva informații despre direcțiile principale de dezvoltare ale sistemelor industriale.

Capitolul 2 - Controlul procesului de fabricație în industria cimentului prezintă situația actuală a sistemelor de automatizare a procesului tehnologic, arhitectura unui sistem de **colectare date și procesare comenzi, cât și modul integrat de conducere a procesului** din camera de comandă centrală. Sunt enumerate avantajele folosirii unui sistem centralizat de automatizare și este prezentat rolul operatorului uman în actuala schemă de conducere automată a fluxului tehnologic.

Capitolul 3: Necesitatea și utilitatea folosirii tehnicilor de inteligență artificială face o analiză a acestora în antiteză cu metodele convenționale prezentând și considerentele care stau la baza acestui nou sistem de conducere a procesului tehnologic. Se prezintă utilitatea folosirii unei conduceri de tip sistem bazat pe cunoștințe care să înglobeze tehnici de inteligență artificială - reprezentarea cunoașterii, sisteme expert (SE), sisteme fuzzy, programare orientată pe obiecte.

Capitolul 4: Conducerea procesului folosind un sistem bazat pe cunoștințe cuprinde descrierea amănunțită a componentelor sistemului, rolul acestora în cadrul său, insistându-se pe partea sa principală care este sistemul expert. Este prezentată detaliat structura acestuia precum și modul său de funcționare.

Partea a II-a – Aplicarea sistemului expert la conducerea răcitorului grătar. Realizarea unui senzor inteligent de temperaturi ridicate cu diode pe carbură de siliciu (SIC). În această parte a Tezei de doctorat sunt prezentate la început modul de realizare și rezultatele obținute prin introducerea sistemului expert la conducerea răcitorului grătar dintr-o linie de fabricație a cimentului cu o capacitate de 3000 t clincher/zi. Sunt evidențiate de asemenea efectele economice obținute. În a doua parte este prezentat modul și etapele parcurse pentru realizarea unui senzor inteligent de temperaturi ridicate cu diode pe carbură de siliciu.

Capitolul 5: Nucleul unui sistem expert de tip fuzzy; în acest capitol se aplică pentru un sector din fluxul tehnologic și anume răcitorul grătar, teoria sistemelor expert prezentată în partea I. Aplicația SE pentru acest segment de producție conține schema de principiu a sistemului de conducere, fiind explicate pe baza mărimilor principale măsurate din aria

răcitorului grătar, mediul de utilizare, realizarea interfețelor fuzzy, bazele de reguli, funcțiile caracteristice și algoritmul de lucru.

Capitolul 6: Valoarea economică adăugată prin utilizarea SE – studiu de caz; sunt prezentate avantajele din punct de vedere economic obținute prin utilizarea sistemului expert în locul sistemelor clasice de automatizare, calculele economice fiind făcute în cazul utilizării SE la conducerea și controlul unui răcitor grătar din cadrul secției de clincherizare.

Capitolul 7: Senzor inteligent de temperaturi ridicate cu diode pe carbură de siliciu (SiC) pentru aplicații într-o fabrică de ciment. În acest capitol s-a prezentat modul în care s-a realizat proiectarea, fabricarea, modelarea și caracterizarea de diode pe carbură de siliciu, folosite ca senzori la temperaturi înalte și folosirea acestor senzori în echipamente pentru controlul proceselor tehnologice din fluxul de fabricare a cimentului. Sunt evidențiate totodată direcțiile deschise pentru continuarea cercetărilor în acest domeniu și este redat modul în care s-a făcut diseminarea rezultatelor obținute.

Capitolul 8: Concluzii: Sunt prezentate sintetic rezultatele cercetării întreprinse atât în ceea ce privește sistemul expert de conducere a răcitorului grătar cât și cele legate de realizarea senzorului de temperaturi ridicate cu diode pe carbură de siliciu.

Bibliografia – cuprinde 72 de indicații de materiale din literatura de specialitate, din care 12 la care doctorandul este coautor.

Anexe:

A1: În această anexă este prezentată teoria specifică realizării unui sistem expert utilizând logica fuzzy. Sunt trecute în revistă noțiuni despre mulțimile fuzzy, variabile lingvistice, logica și controlul fuzzy.

A2: Conține toate fișele de calcul a indicatorilor economici din studiu de caz răcitor grătar

În continuare prezentarea din rezumatul tezei este axată doar pe cea de-a doua parte a tezei și anume **Contribuția originală:**

Partea a II-a – Aplicarea sistemului expert la conducerea răcitorului grătar. Realizarea unui senzor inteligent de temperaturi ridicate cu diode pe carbură de siliciu (SiC).

Capitolul 5 – Nucleul unui sistem expert de tip fuzzy dedicat conducerii în industria cimentului.

5.1. Structura generală

Pentru testarea noii metode de conducere folosind SBC, s-a ales un subproces din structura sistemului de fabricație a cimentului, anume răcitorul grătar. Alegerea este justificată din următoarele două considerente:

- acest subproces face parte din instalațiile care implică cele mai mari dificultăți în conducerea clasică și pentru optimizarea funcționării sale se justifică utilitatea folosirii sistemelor expert;
- acest subproces este deja dotat cu partea convențională necesară cuplării cu SBC (senzori, automate programabile pentru comanda mărimilor de execuție bucle de reglare PID);

Totuși este de subliniat că numai includerea și a cuptorului în strategia de conducere folosind SBC va putea conduce la optimizarea funcționării întregului proces de fabricație a cimentului.

Față de arhitectura generală dată în fig. 3.1, nucleul realizat materializează o parte din componentele preconizate: sistemul expert, sistemul de manipulare a informațiilor vagi, o parte a sistemului de generare a explicațiilor, o parte a sistemului de achiziție a cunoștințelor și a interfeței utilizatorului. Pe baza aspectelor prezentate la controlul fuzzy, poate fi evidențiată o structură de conducere cu sistem expert de tip fuzzy, așa cum se vede în fig. 5.1.

Mărimile măsurate din proces (de intrare în controlerul fuzzy), în cazul răcitorului de tip grătar (RG) sunt: temperatura aerului secundar, grosimea stratului de pe grila nr. 1, presiunea aerului secundar, presiunea în camera 2, granulația materialului ce iese din cuptor (informație care se introduce manual), deschiderea jaluzelelor VRA,VRB, turația cuptorului, curentul motorului de acționare a grilei 1, starea mecanismului de acționare a grilei 1.

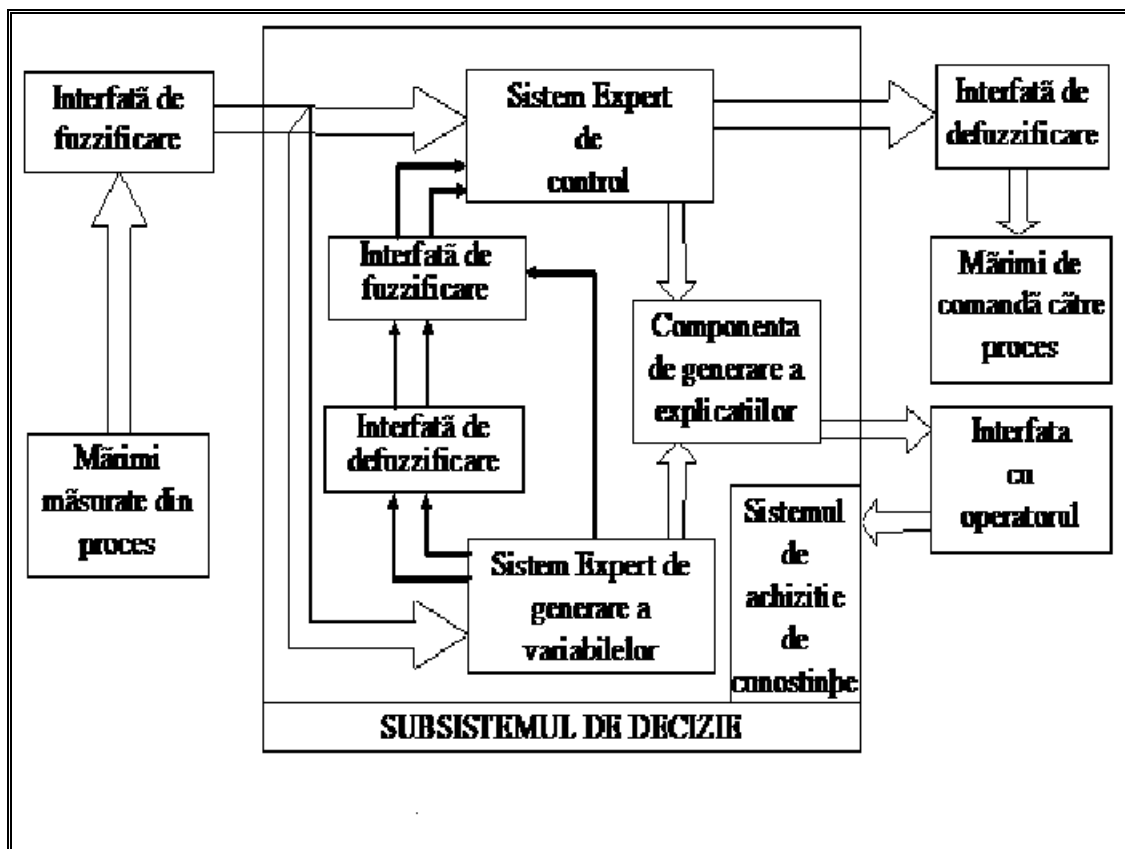


Fig.5.1- Structura de principiu a sistemului de conducere

Sistemul expert de control este cel care, utilizând atât mărimile măsurate din proces (denumite variabile directe) cât și mărimile nemăsurabile furnizate de componenta de generare a variabilelor indirecte, generează comenzile pentru proces. Prezența interfeței de defuzificare și succesiv a celei de fuzificare pentru variabilele indirecte, deși nu pare necesară la prima vedere, permite implementarea unor dependențe între diferite mărimi indirecte; în plus, este mai convenabil de manevrat în acest fel o dependență între mărimi care sunt prelucrate prin mecanisme de raționament fuzzy. De exemplu, există o asemenea dependență între granulația clincherului de pe grila răcitorului și presiunea în camera 2. Astfel, prin folosirea succesivă a defuzificării și fuzificării, în funcție de granulație diferite valori precise ale grosimii stratului vor putea fi interpretate ca fiind normale sau nu (pentru o granulație mare, o presiune mai mică ca fiind normală, în comparație cu cazul când granulația este mică).

Deoarece sistemul expert de control utilizează și variabilele indirecte în luarea deciziilor, apare necesitatea unei succesiuni de lucru în care, la fiecare iterație, sistemul de control să se activeze după ce sistemul de generare a variabilelor indirecte a efectuat raționamentele și a generat valorile acestor variabile. Componenta de generare a explicațiilor are rolul de a informa operatorul asupra modului de luare a deciziilor, furnizând raționamentele pe baza cărora sistemul de control acționează asupra procesului. Interfața de defuzzificare este necesară pentru furnizarea valorilor precise ale comenzilor. Mărimile de ieșire din controler, adică cele care acționează asupra procesului sunt următoarele: deschiderea clapetelor ventilator desprăfuire; deschiderea clapetelor ventilatoarelor grilei fixe IKN și/sau ventilatoarelor răcitorului grătar; turația grilei.

5.2. Baza de cunoștințe a sistemului expert de tip fuzzy

Cuprinde următoarele subcapitole:

5.2.1. Baza de fapte

În baza de fapte a sistemului expert realizat există mai multe tipuri de fapte:

-fapte care conțin informație de tip fuzzy și care sunt de forma:

(fapt_fuzzy<nume_var_lingvistică><nume_termen_lingvistic><valoare_funcție_caracteristică>)

- fapte care conțin valori precise rezultate din defuzzificare și care sunt de forma:

(fapt_precis <nume_variabila_lingvistică> <valoare_precisă>)

- fapte care descriu starea unor componente binare, cum ar fi: (mecanism_grila1 ON)

- fapte de control intern, cum ar fi cele cu ajutorul cărora se obține bucla cuasi-infinită de rulare.

5.2.2. Baza de reguli

În baza de reguli există mai multe tipuri de reguli, grupate în trei clase:

1. Regulile de control a execuției programului și de comunicare cu interfața operator.
2. Regulile care realizează raționamentul fuzzy.

3. Regulile care implementează componentele subsistemului de decizie:

- a) Regulile sistemului expert de control;
- b) Regulile sistemului expert de generare a variabilelor indirecte;
- c) Regulile sistemului de generare a explicațiilor.

În continuare se prezintă regulile din ultima categorie (este precizată forma principală a regulilor, pe baza căreia se face transpunerea în program CLIPS):

a) **Regulile sistemului expert de control.** Partea de acțiune a acestor reguli se referă la mărimile de ieșire din controler. • Dacă temperatura aerului secundar este mare, atunci deschide clapetele ventilatorului de desprăfuire și deschide clapetele ventilatoarelor răcitorului grătar; • Dacă temperatura aerului secundar este normală, atunci nu se întreprinde nimic; • Dacă temperatura aerului secundar este mică, atunci închide clapetele ventilatorului de desprăfuire și închide clapetele ventilatoarelor răcitorului grătar; • Dacă presiunea aerului secundar este mică atunci închide clapetele ventilatorului de desprăfuire și deschide clapetele ventilatoarelor răcitorului grătar; • Dacă presiunea aerului secundar este normală, atunci nu se întreprinde nimic; • Dacă presiunea aerului secundar este mare atunci deschide clapetele ventilatorului de desprăfuire și închide clapetele ventilatoarelor răcitorului grătar; • Dacă presiunea în camera 2 este mare, atunci trebuie crescută viteza grilei; • Dacă presiunea în camera 2 este normală, atunci nu se întreprinde nimic; • Dacă presiunea în camera 2 este mică, atunci trebuie scăzută viteza grilei. • Dacă grosimea stratului este mică, viteza grilei trebuie să fie mică; • Dacă grosimea stratului este normală, atunci nu se întreprinde nimic; • Dacă grosimea stratului este mare, atunci viteza grilei trebuie să fie mare.

b) **Regulile prin care se deduc valorile variabilelor indirecte.** Partea de acțiune a acestor reguli se referă la mărimile nemăsurabile din proces, dar care trebuie luate în calcul la generarea comenzilor către proces. • Dacă presiunea în camera 2 este mare, atunci grosimea stratului este mare; • Dacă presiunea în camera 2 este normală, atunci grosimea stratului este normală; • Dacă presiunea în camera 2 este mică, atunci grosimea stratului este mică; • Dacă viteza grilei 1 este mare, atunci grosimea stratului este mică; • Dacă viteza grilei 1 este normală, atunci grosimea stratului este normală; • Dacă viteza grilei 1 este mică, atunci grosimea stratului este mare; • Dacă

turația cuptorului este mare, atunci grosimea stratului este mare;• Dacă turația cuptorului este normală, atunci grosimea stratului este normală;• Dacă turația cuptorului este mică, atunci grosimea stratului este mică;• Dacă presiunea în camera 2 este mare, atunci granulația este mică;• Dacă presiunea în camera 2 este normală, granulația este normală;• Dacă presiunea în camera 2 este mică, atunci granulația este mare;• Dacă curentul prin motorul grilei 1 este mic și mecanismul grilei 1 funcționează, atunci grosimea stratului este mică;• Dacă curentul prin motorul grilei 1 este normal și mecanismul grilei 1 funcționează, atunci grosimea stratului este normală;• Dacă curentul prin motorul grilei 1 este mare și mecanismul grilei 1 funcționează, atunci grosimea stratului este mare;• Dacă granulația este mare și curentul motorului grilei 1 este mare și mecanismul grilei 1 funcționează, atunci grosimea stratului este mare;• Dacă granulația este normală și curentul motorului grilei 1 este normal și mecanismul grilei 1 funcționează, atunci grosimea stratului este normală;• Dacă granulația este mică și curentul motorului grilei 1 este mic și mecanismul grilei 1 funcționează, atunci grosimea stratului este mică.

c) **Regulile de generare a explicațiilor** exprimă celelalte interdependențe între mărimile implicate și au fost introduse numai în scopul explicării către operator a raționamentelor efectuate. În același scop se folosesc și regulile din celelalte categorii, aplicându-se o strategie de tip backward chaining. • Dacă grosimea stratului este mare, atunci temperatura aerului secundar este mare;• Dacă grosimea stratului este normală, atunci temperatura aerului secundar este normală; • Dacă grosimea stratului este mică, atunci temperatura aerului secundar este mică;• Dacă se deschid jaluzelele (crește turația) exhaustoarelor schimbătorului de căldură, atunci crește depresiunea aerului secundar;• Dacă deschiderea jaluzelelor (crește turația) exhaustoarelor schimbătorului de căldură este normală, atunci depresiunea aerului secundar este normală;• Dacă se închid jaluzelele (micșorează turația) exhaustoarelor schimbătorului de căldură atunci scade depresiunea aerului secundar.

5.3. Realizarea interfețelor de fuzzificare și defuzzificare

5.3.1. Definirea funcțiilor caracteristice

Se înscriu informațiile în fișier, numele variabilei lingvistice și cel al fișierului asociat sunt scrise într-un alt fișier, care va fi utilizat la inițializarea sistemului expert de tip fuzzy. Informația din fișierul de variabile este de forma:

nume_variabilă₁>nume_fișier_descriere

nume_variabilă_n>nume_fișier_descriere_n

Un avantaj al acestei organizări a datelor este acela că, atunci când două variabile diferite au exact aceiași termeni asociați și termenii au aceleași funcții caracteristice, este suficient să se genereze un singur fișier de descriere pentru una din variabile. În fișierul de variabile se va adăuga apoi o linie prin care fișierul de descriere respectiv să fie asociat și celei de-a doua variabile. Avantajul este cu atât mai mare cu cât crește numărul de variabile aflate în această situație. Funcțiile caracteristice utilizate sunt de formă trapezoidală (v.ex. din fig. 5.2).

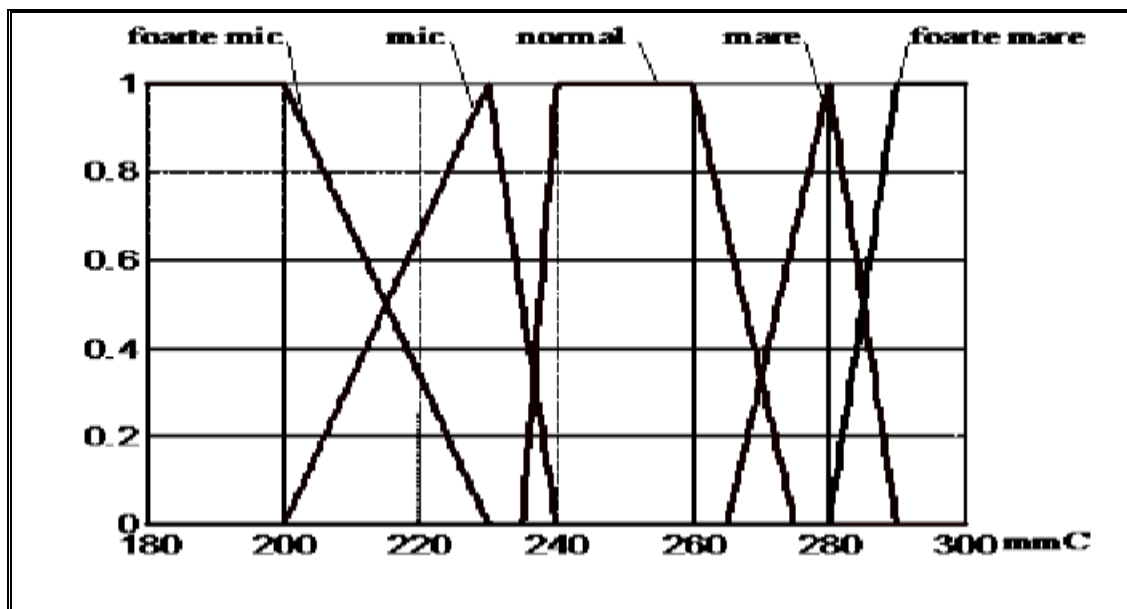


Fig.5.2 – Variabila “presiune in camera 2”

5.3.2. Funcțiile de fuzzificare

Sunt prevăzute două funcții de fuzzificare:

- **fuzzyf_var_directe**: această funcție are rolul de a citi datele mărimilor măsurate din proces și de a introduce în baza de fapte a sistemului expert faptele cu informații de tip fuzzy referitoare la toate mărimile de intrare în controler.

(fapt_fuzzy presiune-camera-2 foarte_mic 0.8)

(fapt_fuzzy presiune-camera-2 mic 0.2)
(fapt_fuzzy presiune-camera-2 normal 0)
(fapt_fuzzy presiune-camera-2 mare 0)
(fapt_fuzzy presiune-camera-2 foarte_mare 0)

În acest mod este populată baza de fapte necesară funcționării sistemului expert de control. Într-un mod similar se produce fuzzificarea pentru toate celelalte mărimi măsurate de la proces.

- **fuzzyf_var_indirecte**: se apelează după fiecare raționament efectuat de sistemul de generare a variabilelor indirecte, având ca parametri numele variabilei și valoarea precisă furnizată de sistemul respectiv; rezultatul apelului este introducerea în baza de fapte a faptelor de tip fuzzy referitoare la variabilele indirecte.

(fapt_fuzzy grosime-strat foarte_mic 0)
(fapt_fuzzy grosime-strat mic 0)
(fapt_fuzzy grosime-strat normal 0.5)
(fapt_fuzzy grosime-strat foarte_mare 0.5)

5.3.3. Funcția de defuzzificare

Apelul acestei funcții este de forma:

(defuzzyf fapt_fuzzy <nume_variabilă> <nume_termen> <grad_aplicabilitate> <keep|go>

Execuția rutinei are loc în funcție de valoarea ultimului argument: dacă acesta este “keep”, are loc doar o memorare a celorlalte argumente, valoarea de retur fiind TRUE în cazul în care apelul s-a făcut în mod corect, sau FALSE în cazul unei erori.

În baza de reguli s-au definit două reguli:

Regula **R1_defuzzificare** care intervine dacă în baza de fapte există două fapte ce se referă la aceeași variabilă, cu termeni lingvistici diferiți, cu gradele respective de aplicabilitate;

Regula **R2_defuzzificare** intervine dacă în baza de fapte există doar un singur fapt care se referă la o anumită variabilă lingvistică.

5.4 Algoritmul de lucru al controlerului fuzzy

Sunt prezentate etapele de lucru ale controlerului:

Etapa 1. Citirea valorilor mărimilor măsurate din proces și fuzzificarea - prin apelul funcției *fuzzyf_var_directe*. Se introduc astfel în baza de fapte informații de tip fuzzy cu privire la mărimile de intrare în controler.

Etapa 2. Activarea sistemului expert de generare a variabilelor indirecte. Această etapă este declanșată după citirea valorilor mărimilor măsurate din proces, deoarece raționamentele efectuate de sistemul expert respectiv se bazează tot pe mărimile măsurate din proces.

Etapa 3. Furnizarea valorilor precise ale mărimilor indirecte - prin funcția *defuzzyf* și apoi fuzzificarea acestora pentru a putea fi utilizate de către sistemul expert de tip fuzzy de control. Pentru fuzzificarea acestor variabile care nu sunt măsurate din proces ci sunt furnizate de un sistem expert se folosește funcția *fuzzyf_var_indirecte*.

Etapa 4. Activarea sistemului expert de control. Această etapă succede pe aceea de lucru a sistemului expert de generare a variabilelor indirecte; conform celor explicate și anterior, sistemul expert de control este cel care ia deciziile pe baza ambelor tipuri de informații: cele măsurate de la proces, respectiv cele deduse indirect.

Etapa 5. Defuzzificarea - prin apelarea funcției *defuzzif* care are ca rezultat eliminarea din baza de fapte a oricărui fapt cu o informație de tip fuzzy și introducerea faptelor ce conțin valorile precise ale mărimilor de ieșire din controlerul fuzzy. Această etapă este necesară pentru a ajunge la forma informațiilor necesare a fi transmise operatorului și/sau procesului condus.

Etapa 6. Afișarea informațiilor către operator, după care se reia execuția de la etapa 1. Mărimile care sunt afișate sunt cele de ieșire din controler, precizate în subcapitolul 5.1.

Capitolul 6 Valoarea economică adăugată prin utilizarea sistemului expert – studiu de caz

6.1 Prezentarea studiului de caz

Răcitorul grătar este una din componentele cele mai importante în fluxul de producere a clincherului, servește la răcirea clincherului rezultat în urma procesului de ardere din cuptor de la

temperatura de 1200 °C la mai puțin de 100 °C, prin schimbarea căldurii cu aerul ambiental, aer care este folosit, parțial pentru aerul de combustie pre-încălzit. Schimbul eficient de căldură este cerut de asigurarea răcirii optime a clincherului cât și de temperatura maximă a aerului secundar necesar asigurării arderii în cuptor.

Pentru studiul de caz a fost considerat răcitorul grătar, deoarece aici a fost implementată aplicația care utilizează SE (v. fig.6.1):

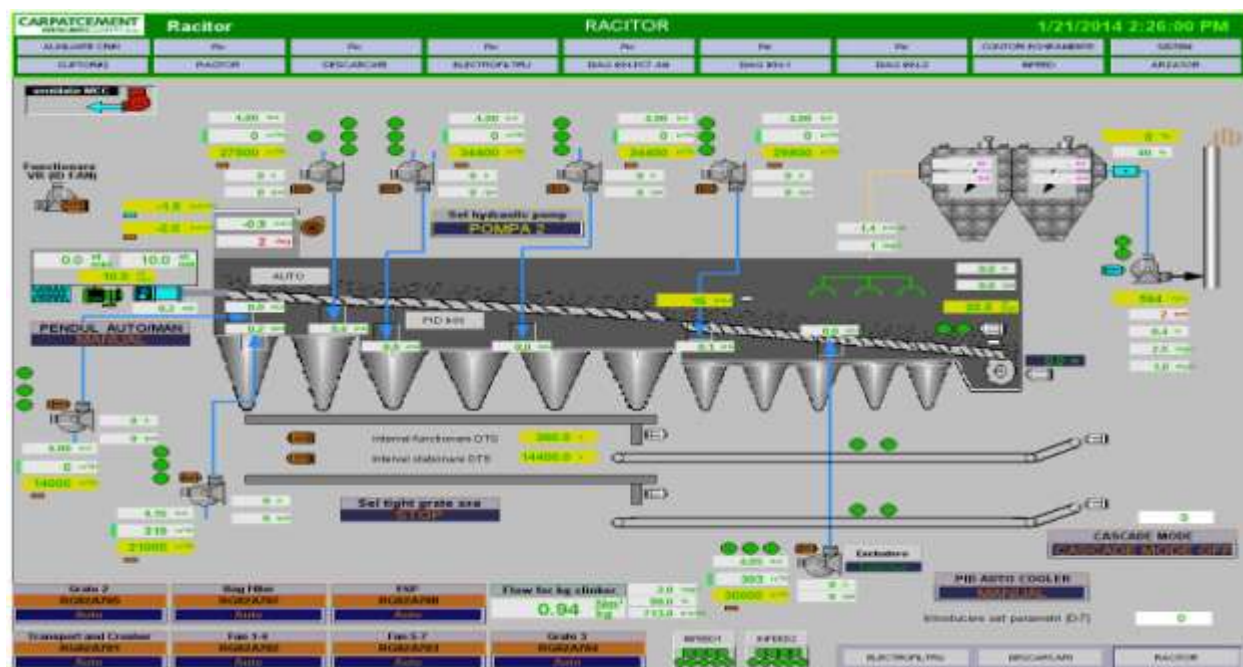


Fig.6.1. Pictograma răcitorului grătar la care s-a aplicat sistemul expert

Eficiența funcționării răcitorului grătar are un impact însemnat atât în costurile de operare a cuptorului cât și în calitatea măcinării clincherului pentru producerea produsului finit, cimentul. In cadrul studiului de caz a fost analizată situația economică a instalării unui sistem expert de control al răcitorului grătar versus actualul sistem de automatizare.

Pentru a face o analiză comparativă au fost considerate date statistice din ultimii 5 ani pentru principalii indicatori de eficiență a răcitorului grătar. In primul rând, pentru a avea o înregistrare cât mai corectă a parametrilor cuptorului și a răcitorului grătar, a fost implementată la nivel de cameră de comandă centrală, o fișă tehnologică. Aceasta fișă electronică, colectează cele mai importante date de funcționare a sistemului cuptor- răcitor.

Au fost analizate statistic defecțiunile care apar datorită controlului deficitar în funcționarea răcitorului grătar, în comparație cu un sistem expert de control. Operativitatea și/sau expertiza operatorului este de multe ori mult mai redusă decât expertiza conducerii răcitorului grătar înglobată într-un sistem expert. În această analiză s-au monitorizat următoarele procese:

- Funcționarea în parametri a răcitorului grătar, fără implicații în procesul tehnologic al cuptorului,
- Calitatea clincherului rezultat în urma procesului de răcire controlată,
- Media cheltuielilor de reparații și întreținere în decursul unui an.

Următoarele defecțiuni au fost constatate statistic la funcționarea răcitorului grătar, în comparație cu utilizarea sistemului expert de control: - oprirea sistemului cuptor-răcitor grătar datorită blocării concasorului cu aglomerări de clincher; acestea sunt datorate reacției lente a operatorului în momentul în care apare o descărcare de material din cuptor și se aglomerează prea mult material în răcitor; - reducerea calității clincherului cauzată de o răcire necontrolată la trecerea acestuia prin răcitorul grătar- conducând ulterior la creșterea rezistenței la macinare a clincherului, cu implicații directe asupra consumului de energie electrică; - uzuri avansate ale elementelor în mișcare la răcitorul grătar cum ar fi plăcuțele răcitorului grătar, grilele de ghidare sau suportii de susținere- strat mare de clincher fierbinte care conduce atât la distrugeri datorită temperaturilor ridicate cât și presiunii statice mari pe elementele în mișcare.

Au fost analizate pentru calculul valorii economice adăugate următoarele aspecte:

1. Oprirea sistemului cuptor- răcitor grătar 30 ore/an.
2. Creșterea rezistenței la măcinare a unei cantități de clincher rezultat în urma automatizării clasice (din analizele statistice, aproximativ 50 mii tone de clincher / an sunt afectate).
3. Creșterea cheltuielilor de reparații și întreținere.

6.2 Rezultatele obținute prin utilizarea SE

Funcționând cu vechiul sistem de automatizare față de sistemul expert, se generează anual opriri ale cuptorului din cauza răcitorului grătar, cuantificându-se următoarele situații:

1. Oprirea cuptorului 30 ore/an datorită blocării răcitorului grătar / concasor:
 - (a) Cheltuieli generate de consumul combustibilului la cuptor
C căldură = 228 mii lei/an.

- (b) Cheltuieli generate de costul energiei electrice consumate la cuptor
C energie electrică= 48 mii lei/an.
- (c) Cheltuieli cu manopera pentru deblocarea unui răcitor
C manoperă = 2 mii lei/an.

2. Producerea unei cantități de clincher de calitate inferioară datorită controlului deficitar al gradientului de răcire în răcitorul grătar.

Din analizele statistice, rezultă o cantitate anuală de 50 mii tone de clincher de calitate redusă. Pentru utilizarea acestui clincher la producerea cimentului, este necesară o măcinare la o finețe superioară cu cel puțin 400 unități Blaine. Această măcinare superioară în morile de ciment generează un consum energetic de aproximativ 4,5 kWh/t ciment în plus față de o măcinare normală. Această măcinare conduce la un cost energetic:

- (d) C măcinare= 160 mii lei/an

Pentru implementarea sistemului expert, doar la nivel de răcitor grătar, costurile generate de elementele de măsură, configurație hard, soft, licențe și ore manoperă de implementare, a fost de:

- (e) C investiție = 660 mii lei/an

Introducând toate aceste date de investiție (e), cheltuieli eliminate în cazul utilizării unui sistem expert (a)+(b)+(c)+(d) într-un program financiar de calcul al valorii economice adăugate vor rezulta următoarele valori economice:

Perioada de recuperare a investiției (PaybackPeriod)= 1,2 ani

Valoarea netă prezentă a investiției(NPV) = 1 861 mii lei

Rata internă de recuperare a investiției (IRR) = 641 %

Capitolul 7 Senzor inteligent de temperaturi ridicate cu diode pe carbură de siliciu (SiC) pentru aplicații într-o fabrică de ciment

Obiectivul acestui capitol a fost proiectarea, fabricarea, modelarea și caracterizarea de diode pe SiC, folosite ca senzori la temperaturi înalte și demonstrarea utilizării acestor senzori în echipamente pentru controlul proceselor tehnologice din industria cimentului.

7.1. Senzori de temperatură

Temperatura este mărimea ambientală măsurată cel mai des în aplicații. Acest fapt este de așteptat deoarece majoritatea fenomenelor de natură fizică, electrică, chimică, mecanică și biologică sunt afectate de temperatură.

Au fost analizați cei mai folosiți senzori în mediile industriale: termocuple, termorezistențe, senzori pe semiconductori. Senzori utilizați în industria cimentului sunt:

- **Termocuplul** este un element sensibil de tip generator. Principiul de funcționare al termocuplului se bazează pe efectul termoelectric (Seebeck) și anume apariția unei tensiuni electromotoare într-un circuit format din două metale diferite, atunci când între acestea apare o diferență de temperatură.

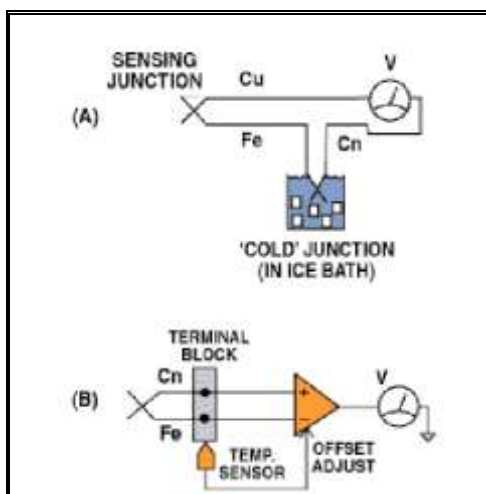


Fig. 7.1 Termocuple [40].

- **Senzorii rezistivi de temperatură** sunt dispozitive din fire bobinate sau straturi subțiri cu coeficient pozitiv de variație cu temperatura al rezistenței electrice [46-50]. De asemenea, precizia acestora este printre cele mai bune, având rezoluții de măsură de ordinul a $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

- **Senzorii de temperatură cu semiconductori** sunt realizați în variantă integrată, au deci dimensiuni foarte reduse, sunt simpli de fabricat, cu comportament liniar, precis, iar costul de fabricație este redus. Se bazează pe dependența de temperatură a caracteristicii curent-

tensiune. În fig. 7.2 este prezentat un senzor cu diodă din alături de circuitul de măsură și control asociat.

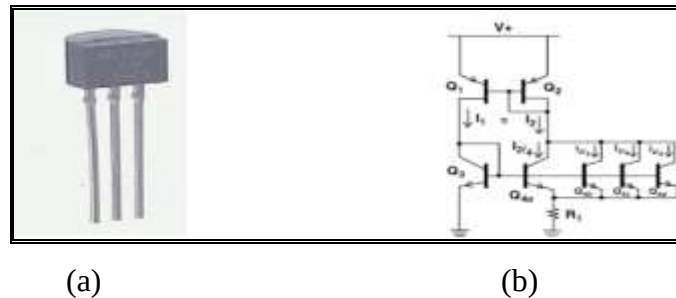


Fig. 7.2 Senzor cu diode din și (a) capsula și (b) circuit asociat [40].

Tehnologia senzorilor a înregistrat o migrare către semiconductori de bandă largă ce produc dispozitive cu o mare toleranță la temperatură [40,51-70]. De aceea, conductivitatea termică ridicată a carburii de siliciu – SiC (de trei ori mai mare decât a siliciului pur) permite atât o disipare mai bună a căldurii cât și o gestionare mai bună a temperaturii.

7.2. Condițiile de funcționare a senzorilor de temperatură într-o fabrică de ciment și transpunerea în date de proiectare

Au fost trecute în revistă caracteristicile și modul de plasare a sondelor de temperatură în fabrica de ciment de la Fieni.

Având în vedere condițiile dintr-o fabrică de ciment (mediu coroziv, gazele toxice, umezeala, temperaturi uzuale peste 100°C), timpul de viață al senzorilor prezenți nu depășește 3 luni de zile (fig. 7.6) [59,60].



Fig. 7.6 Sonde de temperatură înainte și după utilizarea pe linia de producție [59, 60].

Tabelul 7.1

Nr. crt.	Loc de măsură	Caracteristici			Valori	Observații
		Denumire/ tip aparat	Domeniu de măsură	Clasa de precizie	înregistrate în camera de comandă °C	
1	Temperatură gaze intrare moară	Pt 100/adaptor	0...400°C	0,1	250-360	Concentrații mari de praf în mediul de măsurare. Nu au fost stabilite nivelele de vibrații în punctele de măsurare.
		Termorez. Pt. 100 Adaptor R-I 1ARE 192	0...600°C 4...20mA	0,5 1 1		
2	Temperatură gaze ieșire moară	Pt 100/adaptor	0...400°C	0,1	80-120	
		Termorez. Pt. 100 Adaptor R-I Miliamp. Al-144	0...300°C 4...20mA	0,5 1 1,5		
3	Temperatură gaze intrare turn uscare	TIP K/adaptor	0...1200°C	0,1	220-380	
		Termorez. Pt. 100 Adaptor R-I Miliamp. Al-144	0...600°C 4...20mA	0,5 1 1,5		
4	Temperatură gaze ieșire turn uscare	TIP K	0...1200°C	0,1	60-150	
		Termorez. Pt. 100 Adaptor R-I Miliamp. Al-144	0...300°C 4...20mA	0,5 1 1,5		

S-au inventariat tipurile de senzori folosiți, gama de temperatură care se măsoară, viteza de variație în timp a temperaturii, condițiile de funcționare.

Toate aceste informații au permis stabilirea următoarelor date principale de proiectare pentru sonda cu diodă-senzor:

- Afișarea temperaturii în timp real;
- Domeniul de temperatură de funcționare al senzorului: 25 - 400°C;
- Viteza medie de variație a temperaturii: 5-8°C/min;
- Mediul de lucru: abraziv/coroziv, vibrații;
- Tensiunea de alimentare: 24V;
- Senzorul trebuie să fie izolat din punct de vedere electric față de carcasa sondei;
- Mărimea electrică la ieșire: curent în gama 4-20mA;
- Dioda senzor compatibilă cu termocuplu folosit în prezent pentru evaluarea temperaturii
- Achiziția/controlul automat pe echipamentele existente;

Acești senzori vor fi înglobați în sondele de temperatură.

7.3. Proiectarea diodelor Schottky pe SiC pentru funcționarea ca senzori de temperatură

Analiza atentă a caracteristicilor senzorilor a permis stabilirea datelor de proiectare pentru senzorii din SiC și sondele de temperatură ce urmează a fi proiectate și testate în funcționare. Este de notat gama extinsă de temperaturi la care va funcționa sonda: 25-400°C și mediul ostil dintr-o fabrică de ciment.

Senzorii sunt în multiple situații diode Schottky sau *pn* planare [40, 59-62].

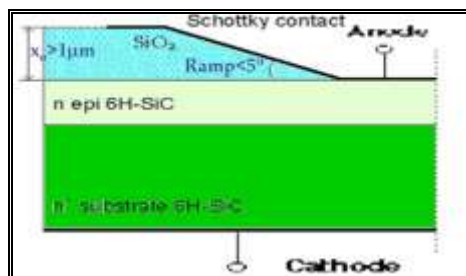


Fig. 7.11 Structura diodei Schottky cu profil rampă de oxid (din motive de simetrie s-a reprezentat numai o jumătate de structură).

S-au realizat simulări ale distribuției de câmp și potențial caracteristice structurii cu profil rampă de oxid cu zona activă (stratul epitaxial) de tip n și substratul, de același tip și puternic dopat.

În fig. 7.12 se prezintă distribuția câmpului electric pentru trei valori ale unghiului rampei și pentru două grosimi ale oxidului (x_0). În zona de contact, câmpul electric este uniform și egal cu câmpul Schottky.

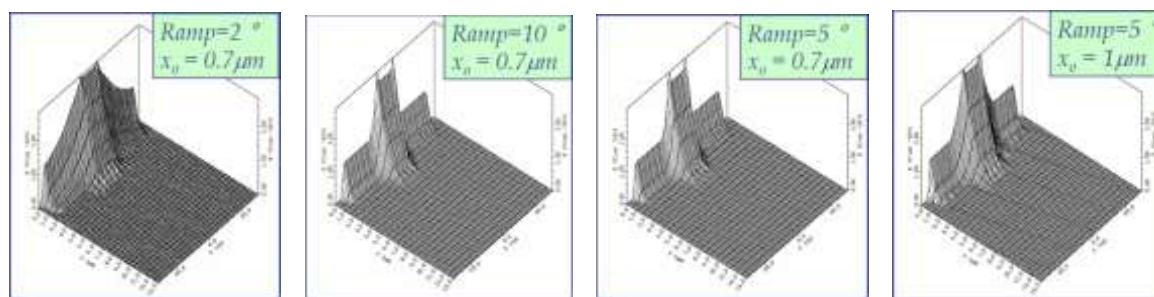


Fig. 7.12 Distribuția câmpului electric în structura Schottky cu profil rampă de oxid pentru diferite grosimi ale oxidului și diferite unghiuri ale rampei [20, 21].

7.4. Studii și experimentări preliminare pe structuri Schottky pe SiC. Caracterizări și investigații microfizice.

Sunt prezentate experimentele realizate pe structuri de diode senzor fabricate cu o mască eficientă și un proces tehnologic testat în diverse variante. Masca propune o variantă optimizată pentru structura Schottky care realizează o economie semnificativă de arie și, în același timp, permite obținerea unui randament bun de fabricație.

S-au realizat două variante de măști: cu contacte Schottky circulare și respectiv rectangulare [59]. În proiectul SiC-SET s-a propus o variantă optimizată de mască ce poate fi folosită și în situația în care substratul de SiC se livrează cu un număr mare de defecte (o plachetă cu pret mai redus) [60].

În descrierea tehnologiei de fabricație s-a insistat pe etapele de realizare a terminației cu rampă de oxid și pe depunerea și tratamentul postmetalizare al contactului Schottky (Ni de 200nm sinterizat câteva minute la temperaturi în gama 600-800 °C). Prin investigații microfizice

s-a determinat un unghi al rampei de 5° optim pentru realizarea unei terminații care asigură o distribuție uniformă a curentului prin diodă.

Inconvenientul acestei metode îl constituie în primul rând temperatura mare de depunere și apoi slaba uniformitate a filmului de SiO₂ depus pe plachete.

Depunerea prin metoda PECVD are avantajul temperaturilor mici de depunere, între 200 și 300°C, și o foarte bună uniformitate a filmului depus.

În cadrul experimentărilor preliminare de fabricație s-au făcut depuneri de Ni pe SiC. Pentru o sinterizare mai bună a contactului Schottky (Ni/4H-SiC), este nevoie de un tratament termic într-o atmosfera inertă. Pentru tratamentul post metalizare s-a folosit instalația RTP AS One. S-au testat mai multe temperaturi între 400°C și 800°C. Diagrama după care s-a desfășurat tratarea termică a contactului Schottky la 500°C/ 2 minute în atmosfera de Ar este dată în fig. 7.19.

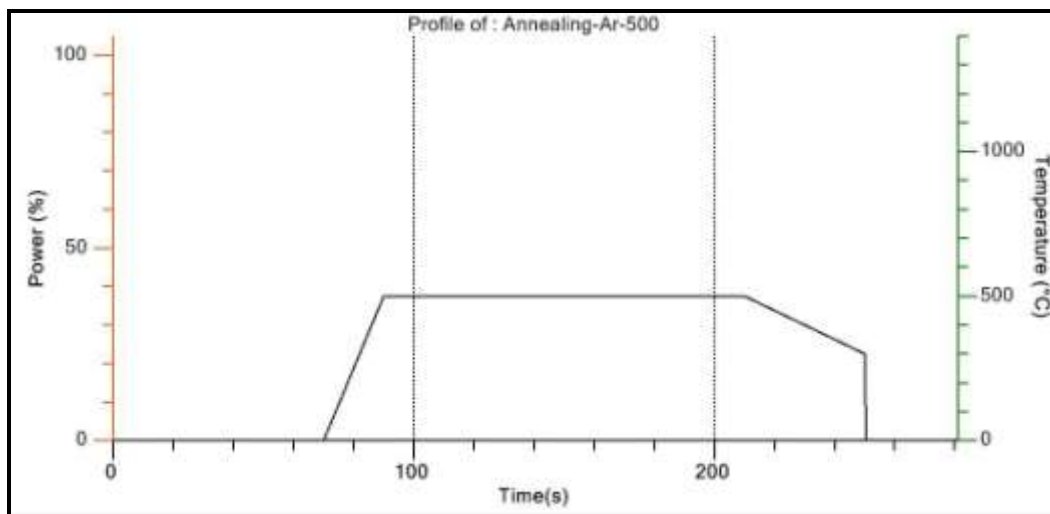


Fig. 7.19 Diagrama tratamentului termic a Ni la 500° [21].

7.5. Măsurători electrice pe diode sensor pe SiC

S-au dat măsurători electrice pe diodele sensor din SiC. S-a prezentat montajul de măsură, apoi toate datele noi obținute pe diode Schottky. Măsurătorile s-au efectuat la temperatura camerei pe 19 diode pe plachetă. S-au măsurat și dispozitive încapsulate folosind două tehnici diferite.

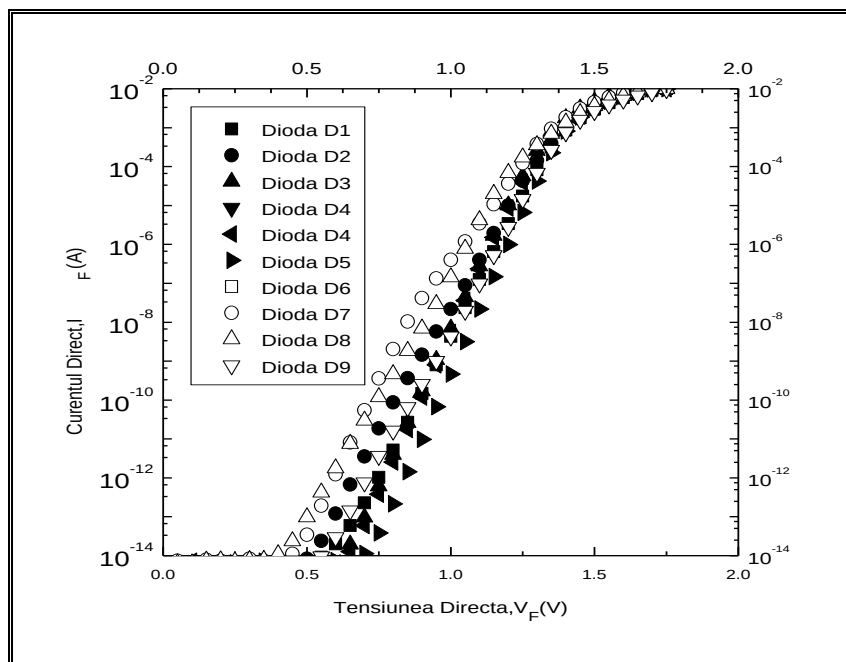


Fig. 7.23 Comparație a caracteristicilor măsurate la temperatura camerei pe 9 diode [59].

S-au reprezentat caracteristici directe și inverse măsurate la temperatura camerei și la temperaturi ridicate până la 450°C. Din analiza și prelucrarea acestor grafice s-au extras parametri electrici ai diodelor pe SiC: factorul de idealitate, curentul de saturație, bariera Schottky, rezistența serie. Factorul de idealitate are valori apropiate de unitate, în domeniul 1,03-1,20. Bariera Schottky are valori cuprinse între 1,35-1,66V. Ambii parametri au valori relativ constante cu temperatura și de la o diodă la alta.

În fig. 7.24 se prezintă histogramme cu factorul de idealitate, bariera Schottky și rezistența serie pentru cele 19 diode.

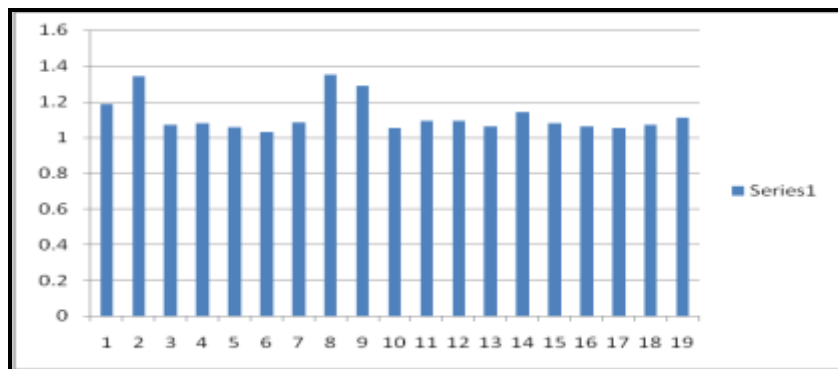


Fig. 7.24 Factorul de idealitate (adimensional) pentru cele 19 diode măsurate la temperatura camerei [59].

7.6. Senzor de temperatură cu diode Schottky pe SiC

S-a investigat comportarea diodei din SiC ca senzor. Dispozitivul trebuie polarizat în conducție la curent constant. În acest caz semnalul care variază cu temperatura este tensiunea directă la bornele diodei. Experimentele au arătat o variație liniară a tensiunii cu temperatura în gama de 25...400°C. Panta de variație este sensibilitatea senzorului pentru care s-au obținut valori în gama 1.3 mV/K to 2.8 mV/K. O atenție specială s-a acordat senzorului bazat pe un J-FET din SiC. S-a evidențiat dependența de temperatură a rezistenței specifice în conducție a tranzistorului dar și a curentului de drenă în saturație și posibilitatea măsurării temperaturii până la valori ridicate (500K).

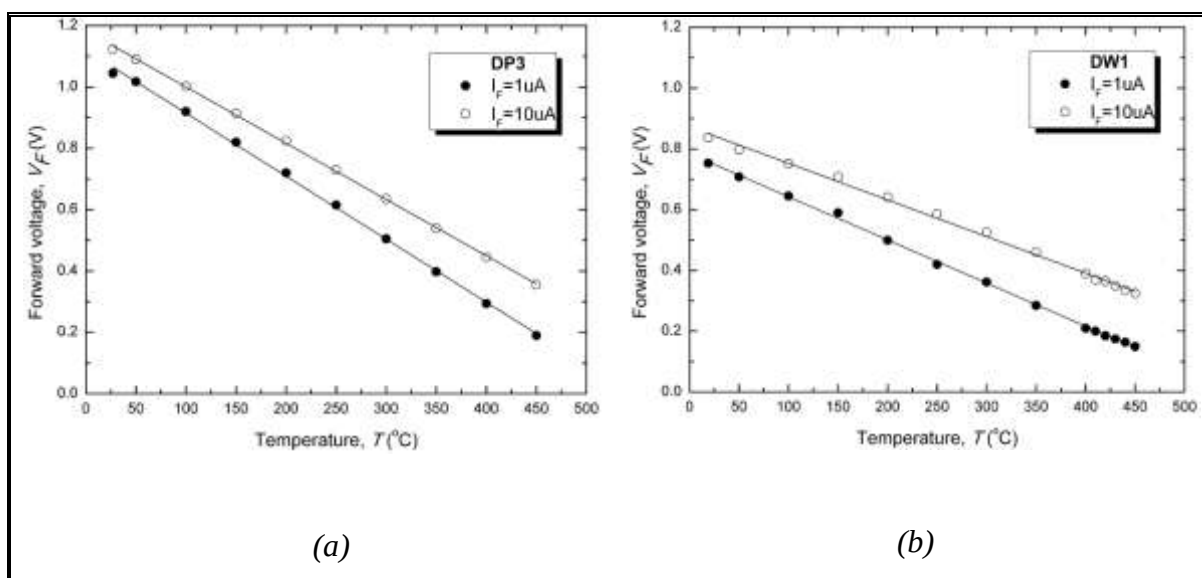


Fig. 7.32 Tensiunea directă, la curent constant, funcție de temperatură măsurată pe diode senzor încapsulate [70].

Scăderea tensiunii directe, determinată pe diode încapsulate este ilustrată pe fig. 7.32. Se constată o variație liniară a tensiunii până la temperaturi ridicate (450°C). Sensibilitatea cu temperatura a diodelor senzor are valorile date în tabelul 7.9. În tabel sunt listate valorile experimentale ale sensibilității, deduse prin panta dreptelor din fig. 7.32, și respectiv valorile calculate. O bună concordanță între datele experimentale și calculele teoretice poate fi observată. Sensibilitatea are valori în gama 1.2-2.05 mV/°C.

Se probează astfel că diodele Schottky pe SiC sunt senzori de înaltă temperatură (până la 450°C) cu o sensibilitate ridicată.

Tabelul 7.9 Sensibilitatea cu temperatura a diodelor senzor

I_F	Sensibilitatea diodei [mV/°C]			
	DP3	DP3	DW1	DW1
	Exp.	Calc.	Exp.	Calc.
1μA	2.05	1.81	1.42	1.57
10μA	1.83	1.62	1.2	1.26

7.7 Senzor inteligent de temperatură. Circuitul de prelucrare a semnalului

Atributul de senzor inteligent al senzorului de temperatură este justificat prin folosirea unui circuit specializat de prelucrare a semnalului electric de la ieșirea diodei senzor pe SiC.

Acești senzori vor fi înglobați în sonde de temperatură și, se estimează, că vor avea o durată de viață de cel puțin 6 luni, dublă în raport cu termometrele ce funcționează în prezent în zonele de ardere.

S-a analizat și o schemă electrică pentru prelucrarea semnalului de la ieșirea senzorului diodă și s-a descris rolul componentelor cu accent pe circuitul amplificator al semnalului dat de diodă și pe convertorul tensiune-curent care asigură la ieșire un curent în gama industrială standard (4-20mA), proporțional cu temperatura măsurată.

În fig. 7.33 este prezentată schema bloc a circuitului de amplificare și conversie în curent (4-20mA) a semnalului (tensiune) furnizat de dioda senzor [59, 60]. Circuitul conține mai multe subcircuite.

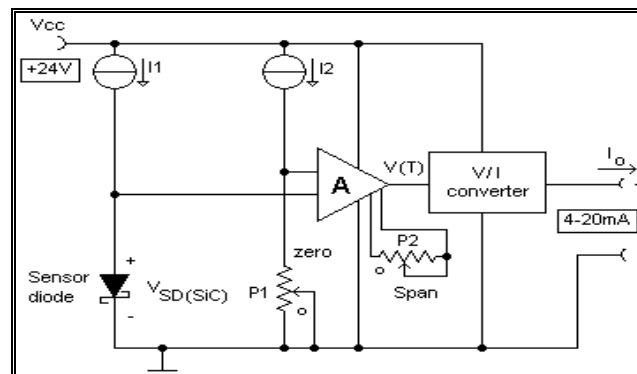


Fig. 7.33 Schema bloc a circuitului de amplificare și conversie în 4-20mA a semnalului furnizat de dioda senzor [21].

8. Concluzii generale

Lucrarea și-a propus aplicarea unor tehnici ale inteligenței artificiale pentru un segment din procesul de fabricație a cimentului. În acest sens au fost parcurse mai multe etape, de implementare a unui sistem expert, cât și o aplicație industrială a unui sensor de măsurare a temperaturilor, în medii ostile și anume un sensor pe diamant. Acesta este necesar pentru a înlocui actualele sonde de temperatură din sistem care nu sunt nici fiabile și nu au nici acuratețea cerută de sistemul expert.

Industria de ciment din România este una dintre cele mai active ramuri industriale de după 1989, complet privatizată, iar una din priorități, după privatizare, a fost trecerea la conducerea automată a fabricării cimentului; pe lângă aspectele pur tehnologice, trebuie luate în considerare și alte aspecte și anume **dezvoltarea necesităților, dezvoltarea abilităților** și nu în ultimul rând **complexitatea informațiilor**, toate conducând la necesitatea introducerii unui **sistem expert de control și conducere a proceselor tehnologice**. S-au prezentat limitările pe care le determină actualele metode de control și felul în care pot fi implicate noile metode de control inteligent, trecând în revistă argumentele practice și logice, necesitatea trecerii la conducere de tip sistem bazat pe cunoștințe care să înglobeze tehnici de inteligență artificială - reprezentarea cunoașterii, sisteme expert (SE), sisteme fuzzy, programare orientată pe obiecte.

Pentru sistemul expert sunt prezentate criteriile specifice față de care trebuie judecată aplicația și componentele sistemului bazat pe cunoștințe precum și rolul fiecărei componente. A fost prezentată structura unui sistem expert, evidențiindu-se componentele sale, modul în care funcționează acest sistem cât și strategiile de control și modul lor de alegere în implementarea unui sistem de comandă și control. S-a analizat aplicația sistemului expert pe un sector al procesului de producție și anume răcitorul grătar. S-au prezentat bazele de cunoștințe a sistemului expert de tip fuzzy, cu baza de fapte, cea de reguli, cât și realizarea interfețelor de fuzzificare și defuzzificare pentru cazul răcitorului grătar. Pentru răcitorul grătar din fluxul de fabricație al clincherului s-au prezentat funcțiile caracteristice utilizate pentru diferite variabile (presiune camera 2, grosime strat clincher, turație grilă) cât și algoritmul de lucru al controlerului.

În cazul studiului de caz pentru răcitorul grătar a fost analizată, din punct de vedere economic, varianta utilizării unui sistem expert de automatizare față de un sistem clasic. Proiecția economică a fost făcută pe o perioadă de zece ani, considerându-se costul capitalului de lucru de 11,3 % și inflația de 3,5%. Principalii indicatori economici obținuți au fost:

- Perioada de recuperare a investiției (PP) = 1,2 ani (o perioadă foarte avantajoasă pentru o așa investiție cu risc scăzut)
- Valoarea actualizată a investiției (NPV) = 1 861 mii lei
- Rata internă de recuperare (IRR) = 641 %

În privința aplicației specifice, **senzori la temperaturi înalte**, s-a prezentat proiectarea, fabricarea, modelarea și caracterizarea de diode pe SiC, cât și demonstrarea folosirii acestor senzori în echipamente pentru controlul proceselor tehnologice din industria cimentului.

Au fost analizați cei mai folosiți senzori în mediile industriale: termocuple, termorezistențe, senzori pe semiconductori. O atenție specială s-a acordat senzorului bazat pe un J-FET din SiC. În lucrare s-a evidențiat dependența de temperatură a rezistenței specifice în conducție a tranzistorului dar și a curentului de drenă în saturație și posibilitatea măsurării temperaturii până la valori ridicate (500K).

Au fost trecute în revistă caracteristicile și modul de amplasare a sondelor de temperatură în fluxul de producție la fabrica de ciment de la Fieni. Analiza atentă a caracteristicilor senzorilor a permis stabilirea datelor de proiectare pentru senzorii din SiC și sondele de temperatură ce urmează a fi proiectate și testate în funcționare. Este de notat gama extinsă de temperaturi la care va funcționa sonda: 25-400°C și mediul ostil dintr-o fabrică de ciment.

Acești senzori înglobați în sonde de temperatură, vor avea o durată de viață mult mai mare în raport cu termometrele ce funcționează în prezent în zonele de ardere.

Etapele deja parcurse și concluziile desprinse sunt:

- A fost efectuat un studiu al procesului tehnologic de fabricație a cimentului și s-a analizat stadiul actual al sistemelor de comandă folosite, ca și tendințele existente pe plan mondial. Concluziile obținute se referă la existența unei automatizări convenționale care este materializată într-o arhitectură distribuită; datorită unor condiții specifice (dificultăți privind obținerea unui model matematic complet privind măsurarea precisă a tuturor mărimilor din proces) schemele respective nu pot asigura un optim general, care să satisfacă mai multe

criterii: calitatea producției, consumurile reduse, durata de viață a instalațiilor. Astfel, studiul efectuat conduce la necesitatea completării automatizării actuale clasice cu o componentă bazată pe folosirea inteligenței artificiale. Concluzia aceasta este susținută și prin verificarea criteriilor privind rezolvarea unei probleme prin metode de inteligență artificială.

- S-a ajuns la o arhitectură principială, potrivită pentru conducerea procesului de fabricație a cimentului, care să folosească un sistem bazat pe cunoștințe. Arhitectura respectivă este motivată de posibilitatea de a fi cuplată cu sistemul de conducere existent, folosind în totalitate facilitățile de comunicație cu procesul tehnologic pe care sistemele actuale le posedă, dar și de cerințele pe care trebuie să le satisfacă noua componentă bazată pe tehnicile de inteligență artificială: efectuarea procesului de decizie pe care în prezent îl face operatorul sau inginerul tehnolog, manipularea unor informații aproximative, comunicarea cu un operator nespecialist în domeniul programării. De aici s-a ajuns la un sistem bazat pe cunoștințe care cuprinde un sistem expert pentru partea de luare a deciziilor și care este completat cu o parte de tip fuzzy pentru a putea manipula informații aproximative. Pe lângă acestea mai există o serie de sisteme (de generare a explicațiilor, achiziție de cunoștințe) care, împreună cu o interfață utilizator adecvată, creează posibilitatea de comunicare între tehnologii nespecialiști în domeniul programării și sistemul bazat pe cunoștințe. Este prevăzută astfel posibilitatea unei dezvoltări incrementale, absolut necesară aplicației industriale respective. Concluzia la care s-a ajuns este aceea că o asemenea arhitectură este realizabilă și că ea poate asigura depășirea limitelor la care automatizarea convențională a ajuns.
- S-a ales o componentă a sistemului de fabricație pentru care să se poată testa arhitectura propusă și care să fie cel mai ușor abordabilă pe procesele de fabricație existente. S-a optat pentru răcitorul grătar, cel pentru care s-a verificat folosirea cu succes a conducerii bazate pe sisteme expert. S-a studiat procesul respectiv, determinându-se cunoștințele necesare abordării folosind sistemul bazat pe cunoștințe: scop de atins, mărimi de intrare/ieșire, interacțiuni cu partea convențională, strategii de decizie pentru o conducere optimă a componentei respective. Concluzia obținută este aceea că subsistemul ales este abordabil prin tehnicile propuse, existând informațiile necesare pentru construirea bazei de cunoștințe, iar materializarea noii variante de conducere poate asigura asistarea operatorului și o funcționare cât mai apropiată de optim.

- Elementul central al sistemului bazat pe cunoștințe este sistemul expert cu componenta fuzzy, dezvoltarea aplicației plecând de la acesta.
- Conform cunoștințelor achiziționate s-a structurat un nucleu al subsistemului de generare a explicațiilor, identificându-se o serie de reguli care pot furniza explicații cu privire la ieșirile furnizate de sistemul de decizie.
- S-au efectuat teste privind cuplarea părții de decizie cu partea de logică fuzzy și teste privind simularea unor situații din timpul funcționării răcitorului grătar, care au dat rezultate corecte.
- S-a realizat proiectarea, fabricarea, modelarea și caracterizarea de diode pe SiC, cât și demonstrarea folosirii acestor senzori în echipamente pentru controlul proceselor tehnologice din industria cimentului.

8.1. Direcții pentru continuarea cercetării

- Optimizarea funcționării sistemului realizat pentru toate situațiile care se pot ivi în proces în cazul răcitorului grătar;
- Completarea bazei de reguli, fapte și a sistemului de generare a explicațiilor;
- Completarea sistemului cu componentele necesare conducerii celorlalte subsisteme ale procesului tehnologic. Aici trebuie avut în vedere în primul rând cuptorul, ca element esențial în procesul de fabricație a cimentului și pentru care trebuie să intervină partea de optimizare;
- Realizarea sistemului de achiziție a cunoștințelor și a interfeței utilizatorului, scopul final fiind acela ca tehnologul să poată actualiza continuu baza de cunoștințe. Aici se va avea în vedere și utilizarea unor medii de programare mai performante pentru folosirea în mediul industrial;
- Extinderea utilizării senzorilor inteligenți de temperatură și la alte subsisteme ale procesului de producție din industria de ciment.

8.2. Diseminarea rezultatelor obținute

8.2.1 Articole publicate

- 1) G. Brezeanu, F. Drăghici, F. Crăciunioiu, C. Boianceanu, **F. Bernea**, F. Udrea, D. Pușcașu, I. Rusu, *4H-SiC Schottky Diodes for Temperature Sensing Applications in Harsh Environment*, **Material Science Forum**, vols. **679-680** (2011), pp. 575-578.
- 2) G. Brezeanu, F. Drăghici, M. Bădilă, I. Rusu, **F. Bernea**, P. Godignon, *A Fully Electrically Isolated Package for High Temperature SiC Sensors*, **Materials Science Forum** Vols. 717-720 (2012), pp. 925-928.
- 3) F. Drăghici, G. Brezeanu, I. Rusu, **F. Bernea**, P. Godignon, *High temperature SiC sensor with an electrically isolated package*, **Materials Science Forum**, Vols. **740-742** (2013), pp. 1002-1005.
- 4) F. Drăghici, B. Ofrim, G. Brezeanu, F. Mitu, **F. Bernea**, *High Temperature Automatic Characterization System For Semiconductor Devices*, **Annals of the Academy of Romanian Scientists**, Vol. **4** (2011), pp. 51-64.
- 5) V. Ieremie, R. Pentiuc, C. Popa, **F. Bernea**, *Electric traction substation study of railway*, **Simpozionul Internațional de Inginerie Electrică și Convertoare Energetice – ELS 2011 Suceava**, Editura AGIR, 2011.
- 6) R. Pentiuc, C. Popa, **F. Bernea**, *Conferința internațională cu comitet științific internațional WESC 2010, Actuators of the electric traction equipped with a hybrid induction motor*, **The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, International Publication of Advanced Studies in Electrical Engineering, Valahia University of Târgoviște, Faculty of Electrical Engineering**,

8.2.2 Comunicări la Conferințe și sesiuni științifice

- 1) G. Brezeanu, F. Drăghici, F. Crăciunioiu, C. Boianceanu, **F. Bernea**, F. Udrea, D. Pușcașu, I. Rusu, *4H-SiC Schottky Diodes for Temperature Sensing Applications in Harsh Environments* in Proc. of 8th **European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 2010)**, 29 aug.-02 Sept, 2010, Oslo, Norvege, pp TP139 (2010).
- 2) G. Brezeanu, F. Drăghici, M. Bădilă, I. Rusu, **F. Bernea**, P. Godignon, *A Fully Electrically Isolated Package for High Temperature SiC Sensors* in Proc. of 14th **International Conference on Silicon Carbide and Related Materials-(ICSCRM2011)**, 11-16 Sept., 2011, Cleveland, Ohio, USA.
- 3) F. Drăghici, G. Brezeanu, I. Rusu, **F. Bernea**, P. Godignon “*High Temperature SiC Sensor with a Fully Isolated Package*”, **The 9th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 2012)**, 2-6 Septembrie 2012, Saint-Petersburg, Rusia.
- 4) G. Brezeanu, F. Drăghici, M. Bădilă, F. Crăciunioiu, G. Pristavu, R. Pascu, **F. Bernea** “*Two packaging solutions for high temperature SiC diode sensors*”, **International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2013)**, Myazaki, Japan, 29 Sept.-04 Oct. 2013, p.238
- 5) **F. Bernea**, D. Pușcașu, G. Brezeanu – Sisteme de automatizare de nivel IV în industria cimentului la Carpatciment Holding, Conferința Internațională de Inginerie Chimică, Timișoara, 27-29.05.2010
- 6) G. Brezeanu, **F. Bernea** ș.a. – Dielectrici cu conținut mare de potasiu pentru dispozitive pe bază de SiC și diamante, A X-a Conferință de Știința și Ingineria materialelor oxidice, CONSILOX, Timișoara, 2008

Bibliografie selectivă

- [1] Holmblad L. P., Ostergaard J. J., Control of a cement kiln by fuzzy logic, în FLS Review, Copenhagen, 1982.
- [2] Kruse R., Gebhardt J., Klawonn F., Foundations of Fuzzy Systems, John Wiley & Sons, 1994.
- [3] Y.Serov, M.Stanley – Global cement 2014 outlook , International Cement Review, p. 28-33, January 2014
- [4] Date statistice INS – CIROM
- [5] S.Opris si colab.- Manualul inginerului din industria cimentului, Ed.Tehnică, vol.1 – 1994, vol.2-1999
- [6] Philip A. Alsop & James W. Post – The cement plant operations handbook , I.C.R – 2013
- [7] Krings L., Haspel D., LINKman - In cement production: optimization beyond traditional control, ABB Review, 6/7 1995.
- [8] Lazăr C., Păstrăvanu O., Poli E., Schonberger F., - Conducerea asistată de calculator a proceselor tehnice, Matrix Rom, București, 1996.
- [9] Voicu M., Teoria sistemelor, Rotaprint Institutul Politehnic Iași, 1980.
- [13] Yager R., Filev D., Essentials of Fuzzy Modeling and Control, John Wiley & Sons, 1994.
- [14] David J. M., Krivine J. P., Simons R. (editori), Second Generation of Expert Systems, Springer Verlag, 1993.

- [17] Kiln and Mill Optimisation with LINKman Graphic, Prospect ABB, 1995.
- [18] Haspel D., LINKman - Kiln control system, International Cement Review, September 1988.
- [19] Flintham T.- Making the rules, IEE Review, June 1991.
- [20] O'Hare G M P, Jennings N R - Foundations of Distributed Artificial Intelligence, Sixth Generation Computer Technology Series, John Wiley & Sons, New York, 1996
- [21] Kang G, SHIN – Design of a Knowledge Based Controller for Intelligent Control System, IEEE Transactionon Systems
- [26] Livint G – Teoria Sistemelor, Universitatea Tehnica „ Gh Asachi” Iasi, 1994
- [27] Panescu D – Inteligența artificială, curs Iași 1990
- [28] Spiru C, Lopatan I – Analiza, proiectarea și programarea orientate spre obiecte, Ed.Teora, București, 1995
- [30] Davis R, Lenat D.B – Knowledge based systems in artificial intelligence, Mc Graw-Hill, New York, 1982
- [34] Ferber J – Reactive Distributed Artificial Intelligence, Foundations of Distributed Artificial Intelligence, John Wiley & Sons, 1996
- [35] Ferber J, Drogoul A – Using Reactive Multi-Agent Systems simulation and Problem Solving, Distributed Artificial Intelligence, Kluwer Academic Publisher, 1992
- [36] Stassinopoulos G, Lembessis E – Application of a Multiagent Cooperative Architecture to Process Control in the Cement Factory, Archon Technical Report, 1993
- [38] Pedrycz W – Fuzzy Control and Fuzzy Systems, Electonic & Electrical Engineering, Control Theory and Applications Series, Research Studies Press, 1989

- [40] B.C. Yadav, R. Srivastava, S. Singh, A. Kumar, A.K. Yadav, -Temperature Sensors based on Semiconducting Oxides: An Overview, Cornell University Library, 2012.
- [51] T. B. Salah, S. Khachroumi, H. Morel, “Characterization, Modeling and Design Parameters Identification of Silicon Carbide Junction Field Effect Transistor for Temperature Sensor Applications”, Sensors 2010, 10, 388-399, www.mdpi.com/journal/sensors.
- [55] Yu, J. Ippolito, S.J. Shafiei, M. Dhawan, D. Wlodarski, W. Kalantar-zadeh, K., "Reverse biased Pt/Nanostructured MoO₃/SiC Schottky Diode Based Hydrogen Gas Sensors". App. Phys. Lett. 2009, 94, 13504.
- [58] Burla, R. K. Chen, L. Zorman, C.A. Mehregany, M., "Development of Nickel Wire Bonding for High-Temperature Packaging of SiC Devices", IEEE Trans. Adv. Packag. 2009, 32, 564-574.
- [59] G. Brezeanu, **F. Bernea** et. al, Rapoarte științifice la proiectul DIASENZOR D11-062, 2007-2010
- [60] G. Brezeanu, **F. Bernea** et. al, Rapoarte științifice la proiectul SIC SET nr.021, 2012-2013.
- [61] L. Teodorescu, F. Drăghici, G. Brezeanu, I. Rusu, “High Temperature Characterization System for Silicon Carbide Devices”, in Proc. of the 35th International Semiconductor Conference, 15-17 Oct. 2012, Sinaia, Romania, vol. 2, IEEE Catalog Number: CFP12CAS-PRT, ISBN: 978-1-4673-0736-9, ISSN: 1545-827X, pp. 449-452.
- [62] R. Pascu, F. Craciunoiu, M. Kusko, F. Drăghici, A. Dinescu, M. Danila, “The Effect of the Post-Metallization Annealing of Ni/n-type 4H-SiC Schottky Contact”, in Proc. of the 35th International Semiconductor Conference, 15-17 Oct. 2012, Sinaia, Romania, vol. 2, IEEE Catalog Number: CFP12CAS-PRT, ISBN: 978-1-4673-0736-9, ISSN: 1545-827X, pp. 457-460.
- [63] G. Brezeanu, F. Drăghici, F. Craciunoiu, C. Boianceanu, **F. Bernea**, F. Udrea, D. Pușcașu, I. Rusu, “4H-SiC Schottky Diodes for Temperature Sensing Applications in Harsh Environments” Material Science Forum, vols. 679-680 (2011), pp. 575-578.

- [64] G. Brezeanu, F. Drăghici, M. Bădilă, I. Rusu, F. Bernea, P. Godignon, “A Fully Electrically Isolated Package for High Temperature SiC Sensors”, Materials Science Forum Vols. 717-720 (2012), pp. 925-928.
- [65] Drăghici, G. Brezeanu, I. Rusu, **F. Bernea**, P. Godignon , "[High temperature SiC sensor with an electrically isolated package](#)", [Materials Science Forum](#) vols.740-742 , pp. 1002-1005 (2013).
- [66] F. Drăghici, B. Ofrim, G. Brezeanu, F. Mitu, **F. Bernea**, "High Temperature Automatic Characterization System For Semiconductor Devices", Annals of the Academy of Romanian Scientists, Vol.4, 2011, pp. 51-64.
- [67] G. Brezeanu, F. Drăghici, F. Crăciunoiu, C. Boianceanu, **F. Bernea**, F. Udrea, D. Pușcașu, I. Rusu, “4H-SiC Schottky Diodes for Temperature Sensing Applications in Harsh Environments”, in Proc. of 8th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 2010), 29 aug.-02 Sept, 2010, Oslo, Norvege, pp. TP139 (2010).
- [68] G. Brezeanu, F. Drăghici, M. Bădilă, I. Rusu, **F. Bernea**, P. Godignon, "A Fully Electrically Isolated Package for High Temperature SiC Sensors", in Proc. of 14th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials-(ICSCRM2011), 11-16 Sept., 2011, Cleveland, Ohio, USA.
- [69] F. Drăghici, G. Brezeanu, I. Rusu, **F. Bernea**, P. Godignon, “High Temperature SiC Sensor with a Fully Isolated Package”, The 9th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM 2012), 2-6 Septembrie 2012, Saint-Petersburg, Rusia.
- [70] G. Brezeanu, F. Drăghici, M. Bădilă, F. Crăciunoiu, G. Pristavu, R. Pascu, **F. Bernea**, “Two packaging solutions for high temperature SiC diode sensors”, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2013), Myazaki, Japan, 29 Sept.-04 Oct. 2013, p.238.
- [71] **F. Bernea**, D. Pușcașu, G. Brezeanu – Sisteme de automatizare de nivel IV in industria cimentului la Carpatciment Holding, Conferința Internațională de inginerie chimică, Timișoara 27-29.05.2010

[72] G.Brezeanu, **F.Bernea**, ș.a. – Dielectrics cu conținut mare de potasiu pentru dispozitive pe bază de SiC și diamante, A X-a Conferință de Știința și Ingineria materialelor oxidice, CONSILOX, Timisoara , 2008