



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea POLITEHNICA din București
Școala Doctorală de
Inginerie Industrială și Robotică

Ing. Tudor George D. ALEXANDRU

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător științific,
Prof.dr.ing. Cristina PUPĂZĂ

- 2021 -



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
Universitatea POLITEHNICA din București
Școala Doctorală de
Inginerie Industrială și Robotică

Tudor George D. ALEXANDRU

TEZĂ DE DOCTORAT

**Generalizarea algoritmilor de învățare
automată pentru fluxurile de răcire ale
sistemelor înglobate din unitățile de
comandă-control utilizate în ingineria
industrială pentru facilitarea procesului
de modernizare inteligentă**

REZUMAT

Conducător științific,
Prof.dr.ing. Cristina PUPĂZĂ

- 2021 -



Universitatea POLITEHNICA din București

Decizie CSUD UPB nr. din

Ing. Tudor George D. ALEXANDRU

TEZĂ DE DOCTORAT

Generalizarea algoritmilor de învățare automată pentru fluxurile de răcire ale sistemelor înglobate din unitățile de comandă-control utilizate în ingineria industrială pentru facilitarea procesului de modernizare inteligentă

Machine learning generalization of the embedded systems cooling workflows for facilitating the smart retrofitting of computer control units employed in industrial engineering environments/

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof.dr.ing. Irina SEVERIN	Universitatea POLITEHNICA din București, România
Conducător științific	Prof.dr.ing. Cristina PUPĂZĂ	
Referent	Prof.dr.ing. Athanasios MIHAILIDIS	Universitatea Aristotel din Salonic, Grecia
Referent	Prof.dr.ing. Roland Iosif MORARU	Universitatea din Petroșani, România
Referent	Prof.dr.ing. Cătălin Gheorghe AMZA	Universitatea POLITEHNICA din București, România

Cuprins

<i>Prefață.....</i>	4	5
Listă de abrevieri.....	5	7
<i>Capitolul I. Limitările abordărilor existente în proiectarea sistemelor de răcire în contextul modernizării inteligente</i>	6	9
<i>Secțiunea 1. Introducere.....</i>	6	11
1.1. Proiectarea sistemelor de răcire	7	12
1.2. Regulate de temperatură	8	14
<i>Secțiunea 2. Limitările abordărilor existente</i>	9	15
1.3. Limitările procesului de proiectare a sistemelor de răcire	10	17
1.4. Limitările procesului de dezvoltare a regulatelor de temperatură	11	18
<i>Secțiunea 3. Concluzii.....</i>	12	20
<i>Capitolul II. Model cu parametri concentrați pentru evaluarea căldurii disipate de componente active</i>	14	23
<i>Secțiunea I. Abordarea bazată pe parametri concentrați</i>	14	26
2.1. Aspecte generale.....	14	26
2.2. Considerente teoretice.....	14	26
2.3. Implementarea software.....	17	31
2.4. Ipotezele abordării.....	18	32
<i>Secțiunea 2. Verificarea conceptelor propuse.....</i>	19	37
<i>Secțiunea 3. Concluzii.....</i>	21	45
<i>Capitolul III. Extinderea și generalizarea abordării cu parametri concentrați pentru surse de căldură multicip.....</i>	22	47
<i>Secțiunea 1. Generalizarea surselor de căldură autonome.....</i>	22	50
3.1. Aspecte generale.....	22	50
3.2. Considerații teoretice.....	22	50
3.3. Modelul de regresie bazat pe învățare profundă.....	25	54
3.3.1. Definirea setului de date.....	26	55
3.3.2. Parametrii rețelei profunde.....	26	57
3.3.3. Convergența modelului.....	27	57
<i>Secțiunea 2. Extensia metodologiei pentru surse de căldură multicip.....</i>	27	59
3.4. Stratul experimental.....	27	61

3.5. Stratul ÎA.....	28	63
3.6. Stratul de simulare.....	28	64
3.7. Studiu de caz.....	29	66
<i>Secțiunea 3. Concluzii.....</i>	30	69
<i>Capitolul IV. Dezvoltarea unui regulator de temperatură FEM PID și generalizarea metodologiei utilizând rețele neuronale.....</i>	31	71
<i>Secțiunea 1. Reglatoare de temperatură FEM PID.....</i>	31	74
4.1. Aspecte generale.....	31	75
4.2. Considerații teoretice.....	31	66
<i>Secțiunea 2. Abordarea propusă.....</i>	32	77
4.3. Simplificarea modelului.....	33	78
4.4. Definirea elementelor unidirecționale.....	33	79
4.5. Matricea reacțiunilor nodale echivalente.....	34	81
4.6. Metoda activării și dezactivării elementelor pentru evitarea lichidării integratorului.....	34	82
4.7 Metoda de reglaj Ziegler-Nichols.....	35	83
4.8. Generalizare LSTM.....	36	85
<i>Secțiunea 3. Studiu de caz.....</i>	37	86
4.9 Procedura de test.....	38	89
4.10 Simplificarea modelului.....	38	89
4.11 Definirea elementelor unidirecționale.....	38	90
4.12 Metoda reacțiunilor nodale echivalente.....	38	94
4.13 Metoda activării și dezactivării elementelor pentru evitarea lichidării integratorului.....	39	95
4.14 Metoda de reglaj Ziegler-Nichols	39	97
4.15 Generalizare LSTM.....	39	98
4.16 Evaluarea performanțelor regulatorului.....	40	99
<i>Secțiunea 4. Concluzii.....</i>	42	102
<i>Capitolul V. Proiectarea sustenabilă a sistemelor de răcire prin integrarea materialelor alternativ în concepția radiatoarelor</i>	43	105
<i>Secțiunea 1. Proiectarea sustenabilă a sistemelor de răcire.....</i>	43	108
5.1 Aspecte generale.....	43	108
5.2 Considerații teoretice.....	44	109
<i>Secțiunea 2. Abordarea propusă.....</i>	45	112
5.3 Aspecte mineralogice și geologice.....	45	112
5.4 Reprezentarea schematică a metodologiei.....	45	113
<i>Secțiunea 3. Studiu de caz.....</i>	46	114

5.5 Evaluarea pericolului de toxicitate.....	46	115
5.6 Caracteristici termice.....	47	116
5.7 Dezvoltarea sistemului de răcire.....	48	119
5.8 Studiu de optimizare.....	49	120
5.9 Implementarea conceptelor date.....	49	121
5.10. Reducerea amprente de carbon.....	51	124
<i>Secțiunea 4. Concluzii.....</i>	52	128
<i>Capitolul VI. Concluzii finale.....</i>	54	131
<i>Bibliografie</i>	58	137

Prefață

Răcirea sistemelor înglobate reprezintă un aspect limitativ al dezvoltării unităților de control computerizate. Astfel de dispozitive constituie nucleul oricărui mediu de inginerie industrială, acționând ca un liant între mișcarea fizică a elementelor de execuție și inteligența computațională a automatizării industriale. Aspectele interdisciplinare ale proiectării sistemelor de răcire și cunoștințele necesare pentru a aborda fluxurile de lucru ale procesului aduc în discuție perspective ingineriești provocatoare. Experiența mea inițială referitoare la dimensionarea software a sistemelor de răcire s-a concretizat în timpul studiilor de masterat. În această perioadă, am dobândit cunoștințe valoroase în inginerie asistată de calculator și în proceduri experimentale. În acest sens, aș dori să-mi exprim recunoștința față de Profesorii Cristina Pupăză și Adrian Florin Nicolescu pentru împărtășirea expertizei lor în cele două domenii. Ulterior, am câștigat premiul I la Sesiunea Națională Științifică Studentească găzduită de Universitatea din Petroșani în 2016. În același timp, am fost coautor a două lucrări de cercetare în domeniul sistemelor de răcire. Importanța din ce în ce mai mare a subiectului în contextul industrial actual mi-a stârnit interesul pentru dezvoltarea unui proiect de disertație referitor la acest subiect. Experiența mea de lucru ca inginer în domeniul structurilor aerospațiale și provocările simulărilor interdisciplinare au fost factorii care au contribuit la această decizie. Studiul literaturii în domeniu, care a fost realizat în teza de masterat, a evidențiat un deficit semnificativ de abordare a acestei teme în contextul Industriei 4.0, în special în cazul modernizării inteligente. Interesul meu pentru subiect a deschis calea către studiile doctorale. În prima etapă, am reușit să dezvolt un model cu parametri concentrați pentru estimarea disipării energiei surselor de căldură activă, combinând filozofiile proiectării structurale din ingineria aerospațială cu cunoștințele mele generale despre transferul de căldură. Concluziile cercetării au fost diseminate în cadrul Conferinței Internaționale Electronics, Computers and Artificial Intelligence din 2019. Aș dori să adresez în acest fel recunoștința mea către Assystem Technologies România și echipa departamentului de calcul pentru că mi-au împărtășit cunoștințele și mi-au acordat acces la solverul LMS Samtech. În timp ce abordarea cu parametri concentrați s-a dovedit utilă pentru sursele de căldură independente, aplicabilitatea sa în cazul surselor de căldură multicip a fost limitată. În acest sens, am studiat algoritmii de învățare automată, ca o modalitate convenabilă de generalizare a datelor experimentale. Concluziile cercetării mele au fost diseminate la un seminar care a avut loc la Universitatea din Edinburgh – Artificial Intelligence and its Applications Institute în 2019. În acest fel, aș dori să mulțumesc profesorului Jacques Fleuriot pentru toate comentariile și sugestiile sale valoroase, care au contribuit la îmbunătățirea calității lucrării. Rezultatele au fost publicate în Jurnalul Studies in Informatics and Control – Q2 în 2020. Un alt aspect important al sistemelor de răcire a fost identificat ca fiind procesul de dezvoltare a reguletoarelor de temperatură. În acest sens, am dezvoltat un regulator PID utilizând metoda elementelor finite, incluzând considerații din lumea reală. Generalizarea ieșirilor regulatorului a fost realizată prin utilizarea rețelelor neuronale recurente. Acest subiect este de asemenea de interes pentru cariera mea actuală ca asistent universitar al Departamentului de Roboți și Sisteme de Producție, Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică. În acest sens, apreciez efortul Profesorilor Tiberiu Dobrescu și Adrian Olaru care au participat ca membrii în comisiile științifice ale rapoartelor de cercetare, oferindu-mi în același timp sfaturile adecvate. De asemenea, aș dori să mulțumesc expertului în managementul deșeurilor solide Dr.ing Mihai Șolea pentru că a subliniat problemele de sustenabilitate asociate sistemelor de răcire și pentru că mi-a oferit instrumentele adecvate pentru evaluarea amprenteii de carbon a procesului. Un radiator cu aripioare lipite a fost dezvoltat ca o modalitate alternativă de a reduce emisiile de CO₂. Alabandina a fost folosită pentru fabricarea aripioarelor de răcire. Acest obiectiv a fost atins datorită colaborării cu Dr. George Dincă, cercetător științific la Institutul Geologic al României. Nu în ultimul rând, aș dori să mulțumesc familiei mele pentru că m-a susținut în toți acești ani, în special surorii mele pentru că m-a inspirat cu entuziasmul și curajul ei.

Listă de abrevieri

Nr. crt.	Abrev.	Semnificație	
1	BC	Condiție la Limită	Boundary Condition (BC)
2	CPS	Sisteme Cyber-Physical	Cyber Physical Systems (CPS)
3	DOF	Grad de libertate	Degrees of Freedom (DOF)
4	EOL	Strategii de scoatere din uz	End-of-Life (EOL)
5	FEM	Metoda Elementelor Finite	Finite Element Method (FEM)
6	IAC	Inginerie Asistată de Calculator	Computer Aided Engineering (CAE)
7	ÎA	Învățare Automată	Machine Learning (ML)
8	LSTM	Rețea Neuronală Recurentă cu Memorie pe Termen Scurt	Long short-term memory (LSTM)
9	PCB	Placă de Circuite Imprimare	Printed Circuit Board (PCB)
10	PID	Proportional-Integral-Derivativ	Proportional-Integral-Derivative (PID)
11	PWM	Modularea Lățimii Pulsurilor	Pulse Width Modulation (PWM)
12	ReLu	Funcția de activare Rectified Linear Unit	Rectified Linear Unit (ReLu)
13	RMSProp	Funcția de activare Root Mean Square Propagation	Root Mean Square Propagation (RMSProp)
14	RNN	Rețea Neuronală Recurentă	Recurrent Neural Network (RNN)
15	TC	Temperatura de echilibru a unui nucleu	Temperature gain of core i (TC)
16	TCP	Temperatura de echilibru a întregului pachet	Temperature gain of the entire package (TCP)
17	TTC	Timpul de echilibru pentru un nucleu	Time constant of core i (TTC)
18	TTP	Timpul de echilibru pentru întregul pachet	Time constant of the entire package (TTP)
19	UC	Unitate Centrală	Central Processing Unit (CPU)

Secțiunea 1. Introducere

Industria 4.0 reprezintă o îmbunătățire continuă a produselor și serviciilor care vizează dezvoltarea sistemelor de producție interconectate [C02,D02]. Tehnologiile inovative și disruptive au apărut în ultimele decenii pentru a sprijini procesul de transformare industrială [B10]. În acest sens, dispozitivele industriale dezvoltate recent dispun de o identitate online, putând face schimb de informații în timp real cu ecosisteme industriale [Z01]. Acest proces este realizat cu suportul platformelor rețelistice interconectate (Internetul obiectelor sau cloud computing) [W01]. Pe de altă parte, sarcinile de luare a deciziilor beneficiază de utilizarea pe scară largă a algoritmilor de Învățare Automată (ÎA) [R05, L12]. Sistemele Cyber-Physical (CPS) se află în centrul Industriei 4.0, fiind considerate o sinergie între mecatronică și rețele în timp real [P10]. Contopirea hardware-și software folosită pentru dezvoltarea unor astfel de soluții se distinge în literatura de specialitate ca sistem înglobat [D04, L07]. Astfel de circuite integrate reunesc elemente de calcul, protocoale de rețea și interfețe grafice, acționând ca un liant între inteligența descentralizată a întreprinderii și mișcarea fizică a actuatorilor [S02]. Cererea din ce în ce mai pronunțată pentru resurse virtuale, combinată cu cerințele energetice și constrângerile de spațiu ale dispozitivelor autonome, aduc în discuție perspective hardware provocatoare [A02]. În acest sens, companiile specializate în dezvoltarea de sisteme înglobate își îmbunătățesc în mod continuu portofoliul de produse pentru a satisface cerințele clienților [L16]. Astfel, următoarele generații de microcontrolere sau unități de control computerizate încorporează o gamă largă de porturi de expansiune, resurse de calcul extinse și multiple capacități de stocare a datelor [S04]. Mașinile-unelte sau dispozitivele industriale recent dezvoltate beneficiază de astfel de inovații, fiind considerate soluții la cheie pentru Industria 4.0 [S08]. În marile întreprinderi, procesul de transformare industrială are loc treptat prin casarea unităților de control computerizate învechite și înlocuirea acestora cu CPS [S15]. În acest fel, beneficiarii pot profita pe deplin de tehnologiile de ultimă oră ale rețelelor în timp real [R03]. Chiar și așa, costurile și cunoștințele necesare pentru finalizarea procesului sunt ridicate în cazul întreprinderilor mici și mijlocii [M04]. În acest sens, modernizarea inteligentă a apărut ca o abordare alternativă de transformare industrială care vizează actualizarea hardware-ului sau software-ului existent din cadrul unităților de control computerizate pentru ca acestea să îndeplinească cerințele Industriei 4.0 [A13]. Procesul se desfășoară de cele mai multe ori cu suportul unor sisteme înglobate intern sau extern care fac schimb de informații cu interfețele existente [L14]. Din punct de vedere economic, modernizarea inteligentă favorizează implementarea CPS în companiile emergente [G01]. Chiar și așa, lipsa formalizării procedurilor de dezvoltare a produselor în domeniu aduce în discuție fluxuri de lucru personalizate [G08]. Acest aspect se datorează faptului că nu toate unitățile de control computerizate sunt destinate să faciliteze viitoarele actualizări. În plus, fiecare sistem de producție și dispozitiv industrial are propriile cerințe operaționale care ar putea constrânge excesiv procesul de modernizare [C05]. În consecință, constrângerile spațiale, energetice și de mediu care sunt aplicabile proiectelor de modernizare inteligentă sunt caracterizate prin limite rigide. Astfel de limitări pot fi abordate prin divizarea problemei în discipline discrete care să fie studiate de echipe interdisciplinare (dezvoltarea schemei electronice, programarea secvențelor de lucru sau îmbunătățirea ergonomiei dispozitivului). Cu toate acestea, scopul modernizării inteligente este acela de a facilita tranziția automatizării existente către Industria 4.0 prin minimizarea costurilor și a resurselor [D06]. În acest sens, pe piață a apărut o gamă largă de instrumente pentru a reduce complexitatea etapelor de prototipare virtuală (proiectare asistată de calculator, inginerie asistată de calculator sau automatizarea proiectării în electronică) [M03]. Pe de altă parte, interfețele de programare de tip “high-level” facilitează dezvoltarea mediilor de rețea în timp real [S12]. Chiar și așa, o gamă limitată de fluxuri de lucru nu sunt acoperite pe deplin de abordările software existente. În particular, răcirea circuitelor electronice

din cadrul sistemelor înglobate a devenit un aspect limitativ al modernizării inteligente [A11]. Din punct de vedere holistic, acest flux de lucru cuprinde două etape distincte: proiectarea sistemelor de răcire și dezvoltarea reguletoarelor de temperatură. În secțiunea următoare este prezentată o scurtă descriere a metodologiei de proiectare a sistemelor de răcire.

1.1. Proiectarea sistemelor de răcire

Proiectarea sistemelor de răcire reprezintă o ramură a ingineriei care are ca scop alegerea componentelor optime pentru menținerea temperaturii surselor active de căldură din cadrul ansamblurilor electronice sub limita operațională a acestora [G09]. O reprezentare schematică a procesului este evidențiată în figura 1.1.

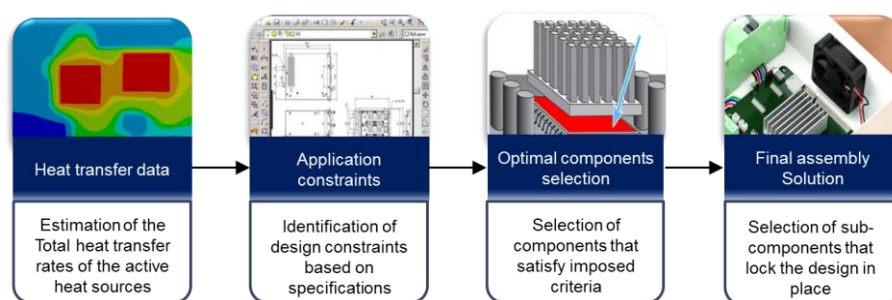


Fig. 1.1 Etapele procesului de proiectare a sistemelor de răcire

Metodologia are la bază 4 etape:

1. **Estimarea caracteristicilor de transfer termic:** semiconductorii utilizați în proiectarea circuitelor integrate au capacitatea de a se opune fluxului de curent electric [J02]. Energia rezultată este eliberată la joncțiunile principale ale pachetului sub formă de căldură [L05]. Procedurile pentru estimarea acestei cantități sunt descrise în fișele tehnice ale oricărei surse de căldură [D05]. Pe de altă parte, o definire mai precisă a energiei disipate poate fi realizată prin intermediul programelor de Inginerie Asistată de Calculator (IAC) [M02]. În acest sens, inginerii pot capta domeniul electromagnetic, electric, de curgere a fluidelor și termic pentru orice sursă de căldură prin intermediul simulărilor numerice [J01]. Alternativ, procedurile experimentale pot fi folosite pentru a identifica temperatura pachetului sub diferite scenarii operaționale [A15].
2. **Constrângerile de aplicare:** componentele de răcire active sau pasive (ventilatoare, radiatoare sau suflante) au la bază specificații geometrice care sunt decise în conformitate cu transferul termic. În acest sens, fiecare sistem înglobat dispune de un spațiu limitat pentru a facilita implementarea unor astfel de soluții. Prin urmare, inginerii trebuie să examineze cu atenție limitele incintei, capacitățile de expansiune existente și modul de dirijare a curenților de aer. Trebuie luate în considerare constrângeri suplimentare, cum ar fi puterea necesară pentru antrenarea componentelor active.
3. **Selectarea optimă a componentelor:** pe baza constrângerilor aplicației, se decide o soluție de răcire care conține cel puțin un radiator pentru a permite schimbul de căldură dintre circuitele integrate și mediul înconjurător [A06]. Dispozitivele de convecție forțată sunt adăugate de cele mai multe ori pentru a îmbunătăți rezistența termică a radiatoarelor, dat fiind faptul că marea majoritate a sistemelor înglobate sunt răcite cu aer [M09].
4. **Soluția de asamblare finală:** performanțele de catalog ale componentelor de răcire pot fi satisfăcute în practică numai atunci când soluția propusă este montată corect.

În acest sens, sunt necesare suporturi standardizate, elemente de asamblare sau repere personalizate pentru a asigura conductanța optimă de contact între elementele care fac schimb de căldură [G07].

1.2. Regatoare de temperatură

Ciclul de lucru al majorității surselor de căldură utilizate în cadrul sistemelor înglobate este caracterizat printr-un proces tranzitoriu de disipare a puterii care are loc în principal datorită utilizării resurselor de calcul [S14]. În timp ce sistemele de răcire dispun de capacitatea de a menține temperatura componentelor electronice sub valorile limită de funcționare, creșterea sau scăderea bruscă a temperaturilor în zonele principale de joncțiune poate avea efecte secundare severe asupra ciclului de viață al circuitelor integrate [S01]. În plus, antrenarea ventilatoarelor sau suflantelor la 100% capacitate în orice moment se poate dovedi inefficientă atunci când utilizarea resurselor de calcul este scăzută sau când sistemul înglobat se află în stare de repaus [I03]. Din această perspectivă, regatoarele de temperatură sunt folosite ca dispozitive cu buclă de reacție în circuit închis sau deschis (Fig. 1.2) care au ca scop menținerea temperaturii surselor de căldură la o valoare dorită [A17].

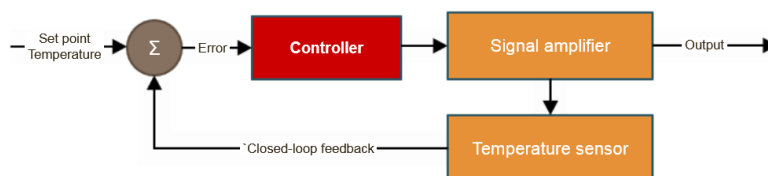


Fig. 1.2. Un model generic de regulator în buclă închisă

Acest obiectiv este îndeplinit prin achiziția de date de la senzori de temperatură pe tot parcursul ciclului de funcționare al sistemului. Amplitudinea semnalului măsurat este comparată cu o valoare de referință. Eroarea rezultată este trecută printr-o lege de reglare. La ieșire este generată o variabilă de proces. Un amplificator operațional este implementat de cele mai multe ori pentru a converti acest semnal într-unul cu lățime de impuls modulată (PWM).

În funcție de variabila de răspuns, pot fi generate două tipuri de semnale de acționare:

1. **Reglarea parametrilor sistemului de răcire:** reprezintă de cele mai multe ori semnale PWM care reglează dinamic curentul de aer generat de ventilatoare sau suflante. Astfel, transferul de căldură prin convecție poate fi îmbunătățit sau diminuat.
2. **Reglarea utilizării resurselor:** temperatura sursei de căldură poate fi reglată dinamic prin controlul energiei disipate. Acest caz este comun sistemelor de răcire pasivă. Astfel, alocarea resurselor de calcul ale sistemelor înglobate poate fi decisă în conformitate cu temperatura componentelor electronice.

Figura 1.3 prezintă etapele procesului de implementare a unui regulator de temperatură:

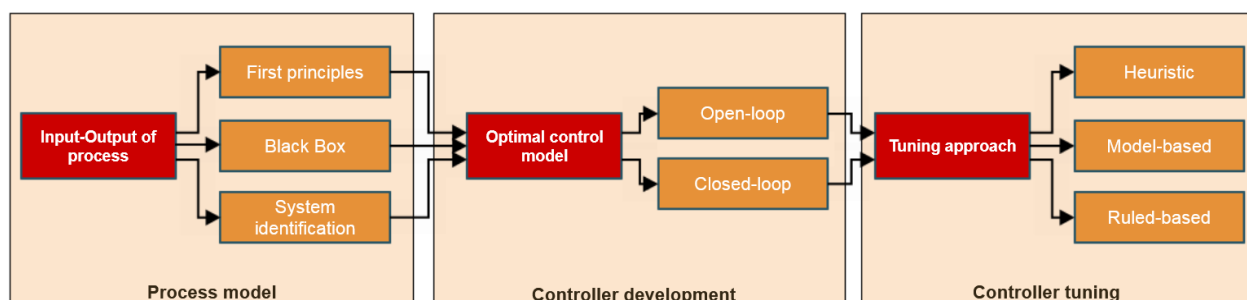


Fig. 1.3. Dezvoltarea regatoarelor de temperatură

În prima etapă, este dezvoltat un model de proces pentru a descrie relația dintre intrarea și ieșirea sistemului fizic [S11]. În cazul componentelor electronice simple (rezistențe sau diode), sunt folosite modele din principii de bază pentru a obține o reprezentare matematică a comportamentului dinamic al procesului de transfer termic [P04]. Sursele de căldură cu configurație complexă necesită proceduri alternative, cum ar fi modelele de tip cutie neagră [L01]. În acest caz, se efectuează studii experimentale pentru a identifica răspunsul tranzitoriu al sistemului fără a necesita cunoștințe avansate în domeniu. Alternativ, se poate folosi ca abordare identificarea sistemelor pentru aproximarea funcțiilor de transfer pe baza unor metode statistice [S13].

În etapa următoare, legea de reglare optimă este decisă luând în considerare cerințele și configurația sistemului. În acest sens, strategiile de control în buclă deschisă pot fi implementate în cazul elementelor de încălzire sau al termostatelor [S10]. Pe de altă parte, perturbațiile care apar în sistemele înglobate necesită de cele mai multe ori comanda în circuit închis. Cel mai răspândit exemplu în acest caz este regulatorul de temperatură Proporțional-Integral-Derivat (PID) [M13]. Alte exemple includ logica fuzzy sau regulatoare adaptive [S19].

În ultima etapă se decid parametrii optimi de reglaj care satisfac cerințele aplicației. În acest scop, metodele euristice sunt utilizate atunci când valoarea inițială a amplificării regulatorului este cunoscută sau poate fi estimată [J03]. Metodele bazate pe reguli sunt utilizate atunci când relația dintre parametrii de control și răspunsul modelului de proces poate fi evaluată prin modele matematice [P01]. Pe de altă parte, reglajul bazat pe modele poate fi efectuat prin identificarea relației dintre parametrii de control și de ieșire ai sistemului pe hardware-ul fizic.

Secțiunea 2. Limitările abordărilor existente

Procesul de modernizare inteligentă aduce în discuție problemele termice emergente. Acest lucru se datorează constrângerilor de proiectare aplicate, cerințelor de economisire a energiei în cazul dispozitivelor alimentate cu baterii precum și coexistenței mai multor interfețe de rețea (Fig. 1.4):

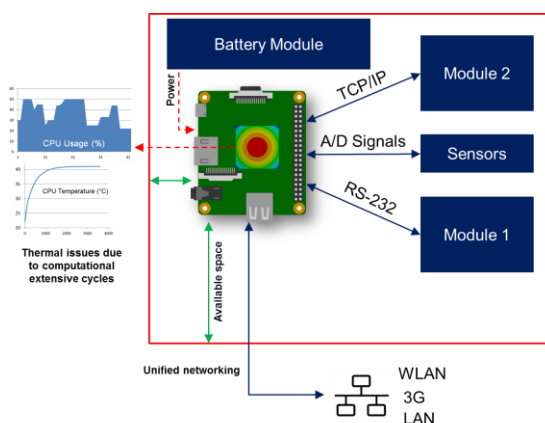


Fig. 1.4. Aspecte termice emergente în contextul modernizării inteligente

O descriere detaliată a acestor probleme este discutată mai jos:

- **Constrângeri de spațiu:** atunci când se efectuează modernizarea inteligentă, spațiul disponibil pentru implementarea sistemelor înglobate interne sau externe este limitat, având în vedere că nu toate sistemele de control computerizate utilizate în mediile de inginerie industrială sunt destinate actualizărilor viitoare. Din acest punct de vedere, soluția de răcire adoptată trebuie să conducă la randament maximă în spațiu minim.
- **Constrângeri de putere:** proliferarea dispozitivelor alimentate cu baterii (cum ar fi roboții

autonomi) au ca cerință constructivă minimizarea consumului de energie, astfel încât timpul de funcționare al dispozitivului să poată fi extins. Prin urmare, este necesar un compromis între eficiența sistemului de răcire și consumul de energie al acestuia.

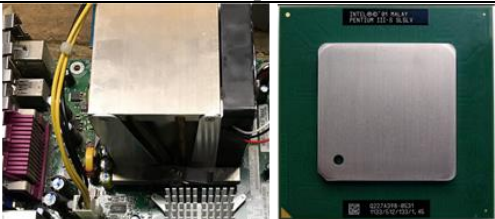
- **Cerințe de calcul extinse:** sistemele inteligente și alte tehnologii inovative necesită resurse de calcul extinse. Prin urmare, energia disipată de sursele de căldură este direct proporțională cu gradul de utilizare al acestora.
- **Diverse interfețe:** Industria 4.0 are la bază schimbul de informații. Acest obiectiv este satisfăcut prin existența unei game largi de interfețe hardware ca parte a CPS. Rețelistica, procesarea semnalelor sau protocoalele de transfer de date au ca rezultat module hardware suplimentare care reprezintă surse de disipare suplimentară a căldurii.
- **Învechire imprevizibilă:** Industria 4.0 este în stadiul de acceptare pe piață. Dezvoltarea continuă a sistemelor înglobate și a software-ului pentru dispozitive inteligente are ca rezultat învechirea imprevizibilă a soluțiilor implementate anterior. Din acest punct de vedere, proiectarea sistemelor de răcire ar trebui să fie abordată cu accent pe reutilizarea soluției sau implementarea unor strategii adecvate pentru scoaterea din uz a acesteia.
- **Constrângeri de mediu emergente:** Majoritatea sistemelor de răcire necesită o cantitate semnificativă de materiale care să dispună de o conductivitate termică ridicată (aluminiiu sau cupru). Tehnologiile necesare pentru fabricarea radiatoarelor au ca rezultat o amprentă mare de carbon. În timp ce soluțiile de eco-design sunt adoptate de marile companii [K02], abordările de inginerie de mediu pentru modernizarea inteligentă nu sunt bine documentate.

Procesul de modernizare inteligentă aplică constrângeri suplimentare asupra fluxului de dezvoltare a sistemelor de răcire. Aceste aspecte sunt evidențiate pe baza unor studii practice în secțiunile următoare.

1.3. Limitările procesului de proiectare a sistemelor de răcire

Un procesor Intel Micro FC-BGA este supus procesului de dimensionare a sistemelor de răcire. Acest model este răspândit în cadrul unităților de control numeric ale centrelor de prelucrare. Obiectivul studiului constă în alegerea unei configurații de radiator cu convecție forțată care să poată satisface cerințele de rezistență termică ale unității centrale (UC). Conform fișei tehnice a produsului, microprocesorul considerat are următoarele caracteristici termice [I02]:

Table 1.2: Specificații termice ale microprocesorului FC-BGA Intel Pentium III

	Parametrul	Valoare
	Temperatura de joncțiune (T_j)	100°C
	Puterea disipată (P_{max})	16.12 W
	Temperatura admisibilă a mediului ambiant ($T_{Max-Ambient}$)	50°C

Un model analitic este furnizat în [L08] pentru dimensionarea unui radiator cu aripioare verticale supus convecției forțate. În acest scop, este definit numărul Prandtl (Pr) împreună cu coeficientul de dilatare al aerului β .

În cazul studiului de față, soluția propusă are o lățime a profilului de 30 mm, o grosime a aripioarelor de 1 mm și o masă totală de 77 g de Aluminiiu.

În practică, puterea disipată specificată de producător reprezintă cel mai critic scenariu de operare al sursei de căldură. Acesta este identificat pe baza standardelor de testare de laborator. Astfel de condiții de funcționare apar rar în exploatarea sistemelor înglobate.

O evaluare experimentală a fost realizată pentru configurația menționată mai sus. Rezultatele obținute indică faptul că disiparea maximă de putere care are loc la utilizarea 100% a

resurselor este evaluată la 9.85 W, ceea ce este cu aproximativ 40% mai puțin în comparație cu valorile din fișa tehnică a produsului.

Radiatorul inițial a fost modificat prin debitarea progresivă a aripioarelor. Analiza termică în regim staționar a fost folosită pentru dezvoltarea acestui studiu utilizând interfața ANSYS Workbench [M10]. Analiza ține cont de variația valorilor temperaturii mediului ambiant și a coeficienților de convecție datorită actualizării geometriei. Rezultatele indică faptul că volumul radiatorului poate fi redus cu 11% prin evaluarea adecvată a comportării sursei active de căldură (Fig. 1.5 – a și b).

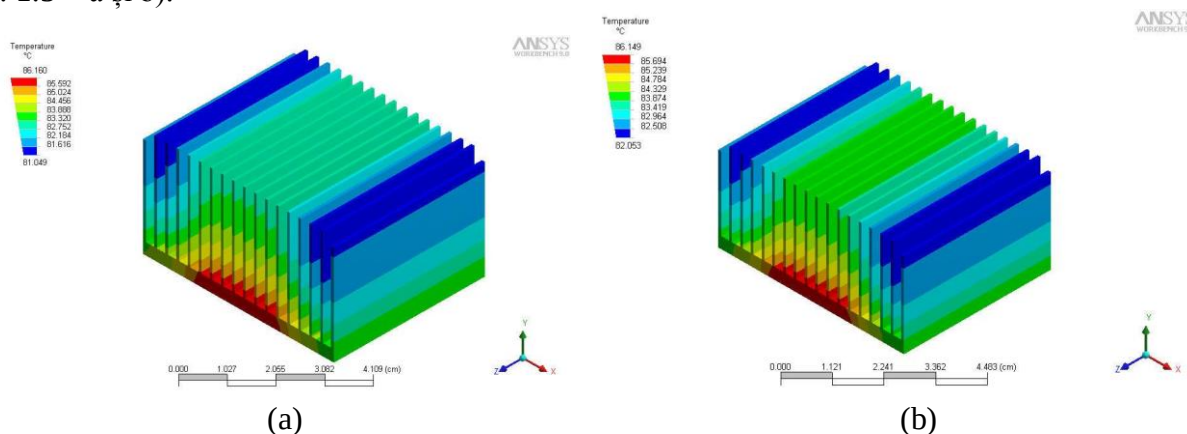


Fig. 1.5. Studiu privind reducerea volumului de material (a) soluția inițială (b) configurația cu lungime redusă a profilului

Rezultatele studiului subliniază impactul semnificativ al utilizării unor abordări conservative pentru evaluarea disipării de putere a surselor de căldură. Pe de altă parte, obținerea unor rezultate foarte precise necesită proceduri experimentale care se caracterizează prin cerințe extinse de resurse și timp. În plus, acestea pot fi efectuate numai pe hardware disponibil fizic.

1.4. Limitările procesului de dezvoltare a reguletoarelor de temperatură

Un regulator de temperatură este dezvoltat prin folosirea instrumentelor MATLAB Simulink și System Identification Toolbox fără cunoștințe explicite în domeniul sistemelor de control [S18]. Scopul metodologiei este de a regla utilizarea resurselor UC (ca semnal de acționare) astfel încât să se atingă o temperatură de referință de 28°C. În acest scop, relația dintre semnalele de intrare și de ieșire ale procesului în buclă deschisă este modelată prin intermediul unei funcții de transfer în domeniul Laplace. În acest sens, procesorul care a fost analizat anterior este supus unui semnal treaptă care corespunde cu utilizarea 100% a resurselor. Relația dintre variabilele de intrare și de ieșire este măsurată prin mijloace experimentale (Fig. 1.6).

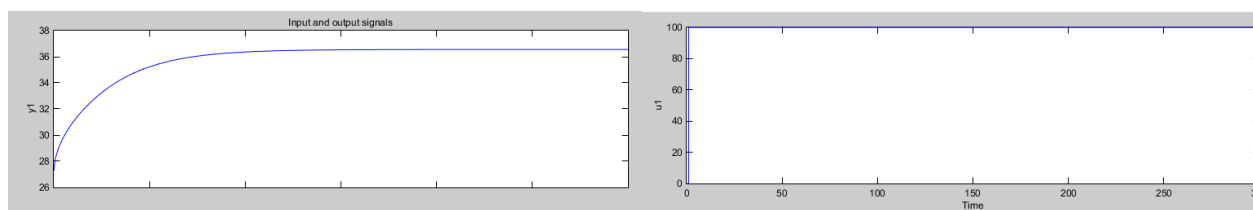


Fig. 1.6. Relația dintre intrarea și ieșirea din sistem

Procedura de identificare a sistemului este utilizată pentru a deriva o funcție de transfer cu 2 poli și un zero (setările standard ale programului). Modelul de intrare-ieșire rezultat este transferat în mediul Simulink pentru dezvoltarea unui regulator de temperatură PID. Figura 1.7 reprezintă schema modelului de simulare.

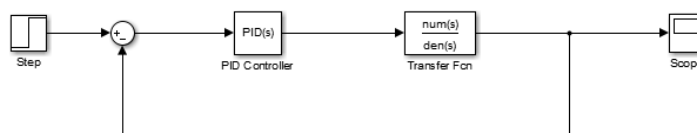


Fig. 1.7. Reprezentarea schematică a modelului de simulare

Parametrii de reglaj sunt identificați prin utilizarea metodei bazate pe model care este integrată în instrumentele Simulink Control. Această procedură evaluează în mod interactiv răspunsul sistemului considerând diferiți factori de proporționalitate și constante de timp. Pentru a verifica comportarea regulatorului este folosit un semnal de tip treaptă la intrarea modelului.

În etapa următoare, variabila de proces este exportată pentru alocarea resurselor procesorului. Se realizează o comparație între curbele de temperatură experimentală și cea obținută în urma simulării (Fig. 1.8)

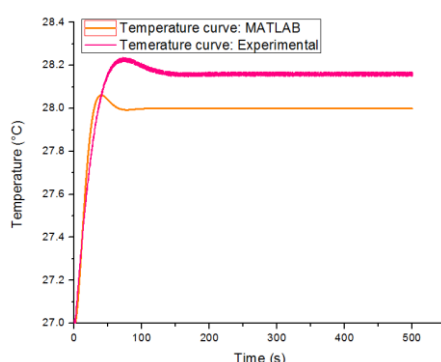


Fig. 1.8 Relația dintre intrarea și ieșirea din sistem

Caracteristicile celor două rezultate sunt prezentate în tabelul 1.3:

Table 1.3 Caracteristicile semnalelor de ieșire experimentale și simulate.

Caracteristică	Semnal simulat	Semnal real
Timp de creștere	19 secunde	34.5 secunde
Timp de stabilizare	55.2 secunde	111 secunde
Depășire	7.19%	5.77%

Rezultatele obținute indică diferențe în robustețea și performanța celor două semnale de ieșire. Acest lucru se datorează anumitor aspecte ale sistemelor de control care sunt neglijate în identificarea sistemelor. În acest sens, nu se iau în considerare întârzierile procesului sau timpul de răspuns al semnalelor de intrare-ieșire [H06]. În plus, regulatorul simulat poate regla amplitudinea semnalului de acționare între limite infinite. Pe de altă parte, limitările hardware-ului fizic, cum ar fi saturația, nu sunt luate în considerare [B09]. În consecință, procesul de dezvoltare a reguletoarelor de temperatură poate fi abordat numai cu cunoștințe satisfăcătoare în sisteme de control, precum și cu software și instrumente experimentale adecvate.

Secțiunea 3. Concluzii

Modernizarea inteligentă reprezintă o abordare alternativă de transformare industrială care vizează modernizarea unităților de control computerizate învechite ale dispozitivelor industriale. În acest fel, automatizarea convențională poate fi convertită în CPS cu suportul unor platforme hardware suplimentare. Acest proces beneficiază de o mare varietate de programe de calculator, precum și de interfețe de programare “high-level”. Chiar și așa, o serie de fluxuri de lucru aduc în discuție necesitatea dezvoltării unor soluții particulare, având în vedere diversitatea unităților de

control computerizate existente în ingineria industrială. În acest sens, răcirea sistemelor înglobate reprezintă un aspect fundamental al proiectelor de modernizare inteligentă. Capitolul de față realizează o defalcare a disciplinelor care stau la baza procesului. Un exemplu practic este oferit pentru a sublinia lipsa literaturii de specialitate în domeniu. În acest sens, pot fi propuse următoarele direcții de cercetare:

1. **Dezvoltarea unei metodologii pentru evaluarea adecvată a căldurii cedate în sistemele înglobate:** atât disciplinele de proiectare a sistemelor de răcire, cât și cele aferente sistemelor de control necesită o evaluare precisă a comportării termice a circuitelor integrate. Din această perspectivă, abordările conservative pot dovedi un nivel scăzut de acuratețe, în timp ce procedurile de simulare numerică necesită resurse extinse, fiind mai puțin atractive în cazul proiectelor de modernizare inteligentă.
2. **Generalizarea procesului de dezvoltare a reguletoarelor de temperatură:** mediile de calcul numeric pun la dispoziție instrumentele necesare pentru dezvoltarea reguletoarelor de temperatură. Chiar și așa, implementarea cu succes a unor astfel de concepte necesită cunoștințe adecvate în domeniul sistemelor de control. În acest sens, trebuie efectuată generalizarea procedurilor existente de simulare, reglaj și implementare pentru a facilita dezvoltarea reguletoarelor de temperatură în cazul modernizării inteligente.
3. **Analiza aspectelor de sustenabilitate:** componentele de răcire și funcționarea acestora constituie o sursă de poluare pe tot parcursul ciclului de viață al sistemelor înglobate. În cazul modernizării inteligente, actualizările frecvente ale unităților de control computerizat pot provoca efecte secundare asupra mediului. Acest lucru se datorează în principal faptului că marea majoritate a radiatoarelor folosesc materiale neferoase. Astfel de aspecte trebuie luate în considerare pentru a asigura o politică de dezvoltare durabilă în cazul modernizării inteligente.

Obiectivele tezei de doctorat sunt reprezentate de trei teme de cercetare. În acest sens, următoarele capitolele oferă metodologii pentru rezolvarea problemelor menționate mai sus, după cum urmează:

- **Capitolul 2:** propune o abordare bazată pe parametri concentrați pentru estimarea energiei disipate de componentele electronice active. Metodologia are la bază aspectele teoretice ale sistemelor de ordinul întâi. Datele de intrare sunt obținute utilizând modele experimentale și principiile joncțiunilor termice.
- **Capitolul 3:** abordarea cu parametri concentrați dezvoltată în capitolul 2 oferă un nivel scăzut de flexibilitate datorită dependenței mari de datele experimentale. Regresia pe baza învățării automate este folosită pentru a elimina o astfel de problemă. În plus, conceptele prezentate sunt extinse pentru a îndeplini cerințele componentelor electronice care cuprind mai multe surse de căldură în același pachet.
- **Capitolul 4:** abordează aspectele limitative ale procesului de dezvoltare a reguletoarelor de temperatură propunând un model PID care se bazează pe analiza termică prin metoda elementelor finite (FEM). Generalizarea procedurii ține cont de mecanismele de transfer a căldurii și de saturația din lumea reală. Implementarea reguletorului într-un mediu real se realizează prin utilizarea unei rețele neuronale recurente (RNN) care poate identifica relația dintre variabilele de intrare și de ieșire pentru orice scenariu operațional dat.
- **Capitolul 5:** problemele de mediu ale tehnologiilor de fabricare a radiatoarelor sunt abordate prin intermediul procedurilor de dezvoltare durabilă. Metodologia investighează integrarea alabandinei ca material alternativ pentru proiectarea aripioarelor de răcire în medii cu răcire prin convecție forțată. Sunt efectuate studii comparative pentru a evidenția impactul abordării asupra amprente de carbon.

Secțiunea 1. Abordarea bazată pe parametri concentrați

2.1. Aspecte generale

Informațiile prezentate în capitolul anterior evidențiază necesitatea de a sprijini metodologiile de dimensionare a sistemelor de răcire din cadrul proiectelor de modernizare inteligentă cu informații precise referitoare la căldura disipată de componentele active. În acest fel se pot obține soluții compacte și economice care satisfac tendințele actuale în domeniu [F01, A10]. Chiar și așa, complexitatea metodelor existente aduce în discuție constrângeri de timp, necesitatea unor cunoștințe ingineresti avansate și costuri ridicate. Prin urmare, astfel de proceduri sunt atractive doar pentru dezvoltatorii de sisteme înglobate, mai degrabă decât pentru utilizatorii din industrie. Din această perspectivă, modernizarea inteligentă se bazează pe soluții rapide și precise pentru dimensionarea sistemelor de răcire.

Modelele cu parametri concentrați reprezintă o alternativă la metodele existente de estimare a transferului de căldură [W03, R01]. Metodologia implică utilizarea unor entități discrete care împart domeniul termic în blocuri constitutive. Fiecare bloc descrie interacțiunea dintre mai multe discipline (Fig. 2.1).

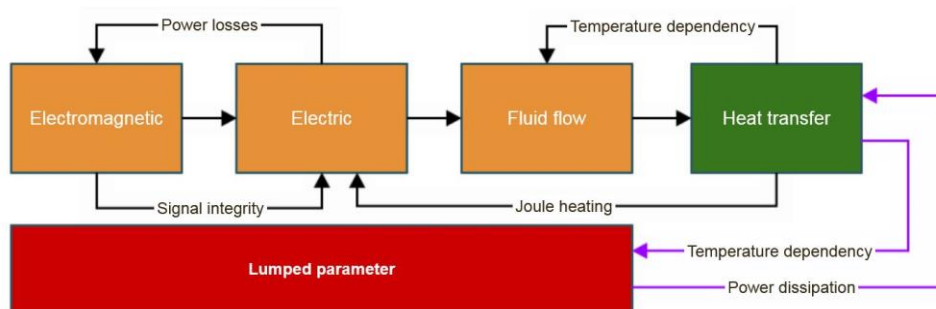


Fig. 2.1 Entitățile constitutive din cadrul modelelor cu parametri concentrați

În acest fel, domeniile electromagnetice, electrice și de curgere a fluidului sunt cuprinse în caracteristici dependente de timp sau temperatură care pot fi evaluate prin experimente [W08]. Astfel, perspectivele multifizice ale problemei pot fi captate prin intermediul unor variabile indirecte.

2.2. Considerente teoretice

Transferul de căldură în componentele electronice poate fi descris cu ușurință prin intermediul unui model de rețea termică (Fig. 2.2) [A16].

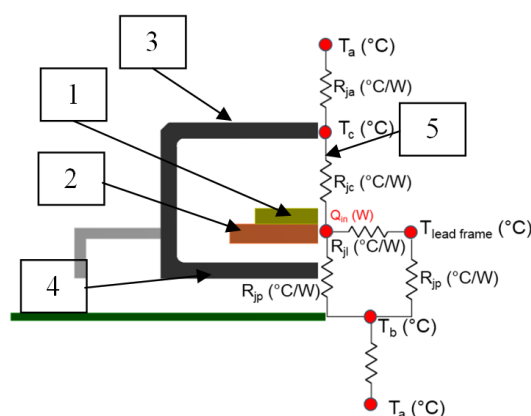


Fig. 2.2. Rețeaua termică echivalentă pentru o componentă electronică

Cipul (1) care este încorporat într-o pastilă (2) care transferă căldura prin conducție (pentru capsule concepute din materiale solide) sau radiație (pentru capsule umplute cu gaze de protecție) către carcasa (3). Se pot distinge două joncțiuni principale [S09]:

- Joncțiunea dintre capsulă și placa de circuite imprimate (PCB) (4)
- Joncțiunea dintre capsulă și mediul înconjurător sau o soluție de răcire (5)

Din punct de vedere al regimului staționar, fiecare joncțiune este caracterizată printr-o rezistență termică (R); reprezentând diferența dintre temperaturile a două noduri (n_i) împărțită la fluxul de căldură care apare datorită rezistenței electrice a cipului (Q_{in}) [S07]:

$$R = \frac{T_{n_i} - T_{n_i+1}}{Q_{in}} \quad (2.1)$$

Din punct de vedere tranzitoriu, abilitatea componentei electronice de a stoca sau ceda căldura este caracterizată de capacitatea termică (C), definită ca raportul dintre modificarea căldurii stocate (kcal) și modificarea temperaturii ($^{\circ}\text{C}$). Luând în considerare masa pastilei electronice (M – kg) și căldura specifică a materialului utilizat pentru realizarea îmbinărilor (C_p – Kcal/Kg $^{\circ}\text{C}$), capacitatea termică poate fi descrisă ca [H03]:

$$C = M \cdot C_p \quad (2.2)$$

Pe baza ecuațiilor 2.1 și 2.2, relația dintre intrarea (R) și ieșirea (S) a unui sistem termic liniar simplu poate fi reprodusă utilizând o ecuație diferențială de ordinul întâi sub forma [B07]:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{T \cdot S + 1} \quad (2.3)$$

Unde K este amplificarea și T constanta de timp a sistemului.

Ecuația 2.3 poate fi folosită pentru a aproxima comportarea dinamică a sistemelor termice cu un grad de precizie rezonabil [M11]. Chiar și așa, materialele neliniare utilizate în proiectarea componentelor electronice limitează utilizarea practică a unor astfel de funcții de transfer, fiind necesară implementarea unor modele de intrare-ieșire mai complexe.

În acest sens este realizat un studiu luând în considerare un modul RAM care este supus unui semnal treaptă. Platforma de testare este prezentată în figura 2.3.

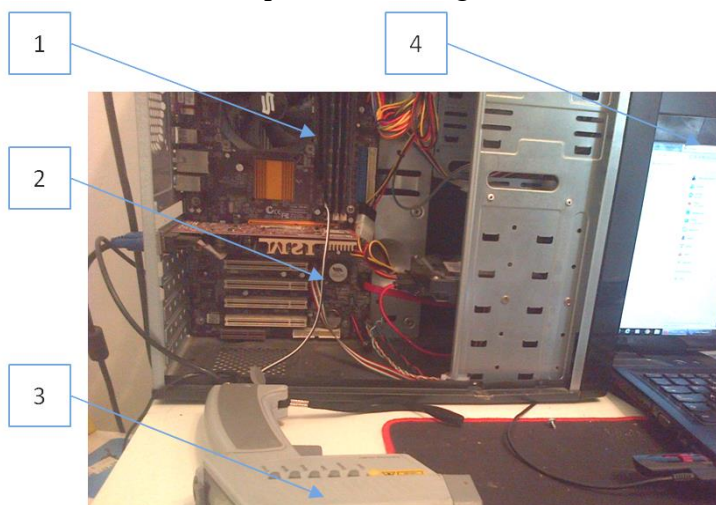


Fig.2.3. Detalii privind platforma de testare și poziționarea instrumentelor de achiziție

Un modul de memorie DDR (1) funcționează la o frecvență de 400 MHz cu o tensiune de alimentare de 2,6 V. Un termocuplu de înaltă fidelitate Omega TC-PVC-K24-180 este atașat la suprafața de joncțiune dintre capsula unui cip și mediul ambiant (2). Pentru achiziția de date este

utilizată interfața serială a unui pirometru (3). Software-ul MATLAB este folosit pentru a înregistra curbele timp vs. temperatură pe un PC (4). La sarcină maximă, puterea disipată de modulul memorie este de 5,408 W. Condițiile de testare cuprind două etape: ciclul inactiv – 1 secundă; 72 de secunde – ciclul 100% umplere cu zerouri. Pe baza ecuației 2.3 și a relației dintre intrarea și ieșirea sistemului termic, funcția de transfer a modelului poate fi scrisă cu ajutorul transformatei Laplace ca:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{28.55}{6s+1} \quad (2.4)$$

Numitorul din ecuația 2.4 reprezintă un factor de amplificare static de 28,55°C care se obține prin scăderea temperaturii maxime a modulului de memorie din temperatura ambientală. Pe de altă parte, constanta de timp a funcției de ordinul întâi este de 6 secunde, reprezentând cât de repede reacționează sistemul la o modificare a intrării sale.

Starea inițială a sistemului studiat (z_s) poate fi descrisă ca:

$$C_{z_s}(s) = H(s) \cdot R(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1} \cdot \left(\frac{1}{s}\right) = \frac{28.55}{s \cdot (6s + 1)} \quad (2.5)$$

Inversa transformatei Laplace a ecuației 2.5 este descrisă în ecuația 2.6:

$$L^{-1} = \frac{571}{20} - \frac{571 \cdot e^{-\frac{t}{6}}}{20} \quad (2.6)$$

Figura 2.4 –a prezintă graficul ecuației 2.6 în comparație cu starea inițială a sistemului din lumea reală sub semnal treaptă (se ia în considerare temperatura mediului ambiant de 22°C), în timp ce figura 2.4 – b evidențiază comportarea sistemului când se aplică un semnal de intrare dreptunghiular.

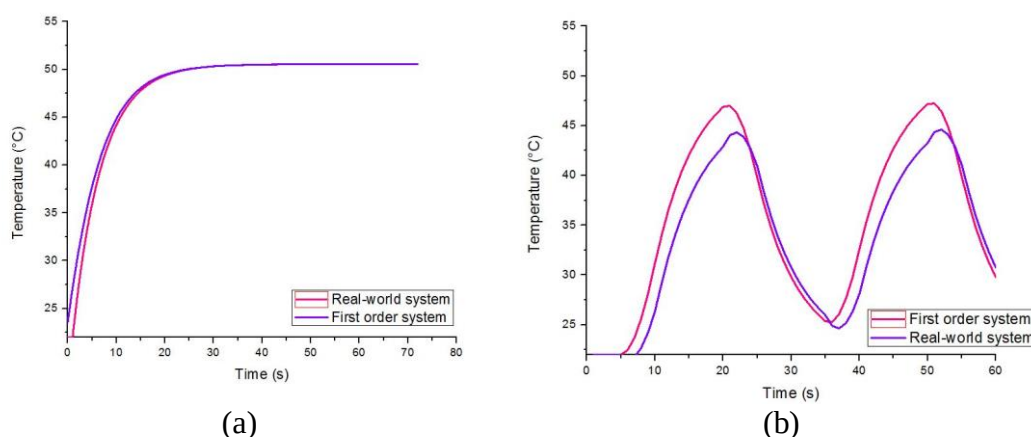


Fig. 2.4. Răspunsul treaptă al sistemului de ordinul 1 (a) și răspunsul sistemului real (b)

Răspunsul funcției de transfer de ordinul întâi este mai puțin precisă atunci când semnalul de intrare este unul tranzitoriu. Eroarea dintre rezultatele prezentate în figura 2.4 poate fi explicată prin comportarea neliniară a materialelor care sunt înglobate în cip, pastilă și terminalele de legătură ale sursei de căldură [L13, L11].

Luând în considerare comportarea neliniară a surselor de căldură din cadrul sistemelor înglobate, utilizarea funcțiilor de transfer de ordinul întâi pentru a aproxima comportarea lor poate oferi doar o descriere grosieră a mecanismului de transfer termic.

O soluție pentru rezolvarea unor astfel de probleme constituie împărțirea sistemului studiat în stări discrete care sunt materializate prin sisteme de ordinul întâi. Pentru exemplul prezentat, se

pot distinge 5 stări corespunzătoare intervalelor de temperatură ambiantă 20-40°C. Fiecare stare are propriile constante de amplificarea temperaturii și de timp (Tabelul 2.1).

Table 2.1. Coeficienți de amplificare identificați experimental

Temperatura ambiantă (°C)	Amplificare (°C)	Constantă de timp (s)	Funcție transfer
20	24.72	7.11	$\frac{24.72}{7.11s + 1}$
25	24.95	7.11	$\frac{24.95}{7.11s + 1}$
30	25.19	7.04	$\frac{25.19}{7.04s + 1}$
35	25.42	7.04	$\frac{25.42}{7.04s + 1}$
40	25.66	7.04	$\frac{25.66}{7.04s + 1}$

Diferențele dintre funcțiile de transfer ale fiecărei stări de funcționare subliniază abilitatea de modelare a comportării neliniare a transferului de căldură din cadrul componentelor active prin intermediul sistemelor de ordinul întâi cu amplificarea temperaturii și constante de timp variabile, în conformitate cu temperatura de funcționare a pachetului. În continuare este propus un algoritm pentru implementarea conceptelor date într-un limbaj de programare:

Algorithm for variable transfer function

Procedure lumped (substeps, t, tf, K, Ts, T, signal, state)

for each substeps **do**

if t = 0 **then** output = tf (K, Ts) for
 signal (t=0) + T₀

else

 K, Ts = state (t=i)

 output = tf (K, Ts) for signal (t=i)
 + T_{i-1}

end if

end procedure

Procedura este derulată pentru un domeniu de timp specific care este împărțit într-un număr de subpași. Aceștia dispun de o dimensiune constantă sau variabilă (t). Pentru fiecare subpas, un semnal de intrare (signal) este trecut printr-o funcție de transfer de ordinul întâi (tf) care este caracterizată printr-un factor de amplificarea (K) și o constantă de timp (Ts). Se consideră o stare inițială când t=0. Ulterior, creșterea temperaturii pachetului electronic determină starea prezentă și viitoare în care funcționează (state) sistemul și, ulterior, valorile K și Ts.

2.3. Implementarea software

Analiza transferului de căldură FEM reprezintă un sistem de ordinul întâi care este guvernat de ecuația 2.7 [P12]:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q^a\} \quad (2.7)$$

Unde: C reprezintă matricea de căldură specifică, K matricea de conductivitate, T vectorul temperaturilor nodale și Q^a vectorul fluxului de căldură aplicat. Procedura de rezolvare a ecuației 2.7 este regula trapezoidală generalizată [S20]:

$$\{T_{n+1}\} = \{T_n\} + (1-\theta)\Delta t\{\dot{T}_n\} + \theta\Delta t\{\dot{T}_{n+1}\} \quad (2.8)$$

Unde: θ reprezintă un parametru de integrare tranzitorie, $\Delta t = t_{n+1} - t_n$, T_n temperatura nodală la un pas de timp dat. Deoarece majoritatea simulărilor termice în regim tranzitoriu sunt neliniare, este implementată procedura Newton-Raphson [B05]. Se realizează astfel o analogie între modelul teoretic și cel de simulare:

- **Sistemul de ordinul întâi:** înlocuit cu elemente 2D/3D supuse disipării puterii și transferului de căldură prin conducție și/sau convecție
- **Amplificare variabilă:** conductanță dependentă de temperatură impusă prin intermediul elementelor 1D
- **Constanta de timp variabilă:** capacitatea nodală dependentă de temperatură modelată cu ajutorul elementelor 0D.

2.4. Ipotezele abordării

Utilizarea practică a elementului este prezentată în figura 2.5.

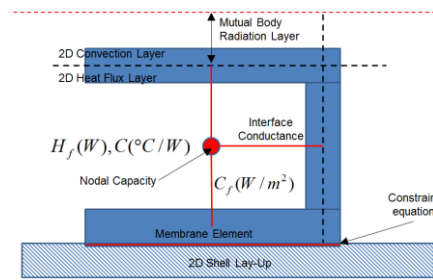


Fig. 2.5 Reprezentare grafică a abordării cu parametri concentrați

Configurația ilustrată cuprinde un circuit electronic care este încorporat într-o capsulă dreptunghiulară. Suprafețele capsulei sunt incluse în simulare pentru a modela joncțiunile exterioare componente. Se utilizează elemente de tip membrană cu grosime neglijabilă și, prin urmare, cu capacitate neglijabilă. Mai mult, fiecare suprafață are margini independente care nu sunt cuplate la pe contur [H04]:

$$T = \frac{1}{2} [T_i(-s + s^2) + T_j(s + s^2) + T_k(1 - s^2)] \quad (2.9)$$

Unde: T reprezintă gradul de libertate al elementului; i , j și k sunt nodurile constitutive și s vectorul fluxului de căldură. Nu se consideră gradientii de temperatură datorită topologiei și funcției de formă a elementului.

Locația de disipare a puterii este materializată de un nod poziționat central. Barele de conductanță la interfață sunt incluse pentru a transfera căldura către fața negativă a elementelor de tip membrană [B01]:

$$q = k_x \cdot \frac{(T_i - T_j)}{L} \quad (2.10)$$

Unde: q reprezintă fluxul termic, k_x conductivitatea și L distanța dintre nodurile i și j . Fiecare element este conectat cu elementele din jur prin utilizarea constrângerilor nodale. Capacitatea termică a componente electronice este modelată cu ajutorul unui element 0D, poziționat în aceeași locație cu nodul central [G04]:

$$[C_e^t] = [C_a] \quad (2.11)$$

Unde: C_e^t reprezintă matricele căldurii specifice și C_a matricele de capacitate. Acest element este utilizat pentru modelarea unui corp fără gradienti termici semnificativi, permițând atingerea condiției de echilibru pentru analizele în regim tranzitoriu pe baza unui singur parametru – capacitatea corpului ($J/^\circ C$).

În total, modelul cu parametri concentrați cuprinde 6 elemente de membrană cu câte 4 noduri independente și 6 bare de conductanță de interfață care comunică prin intermediul unui nod comun în centrul de greutate al capsulei. Celălalt capăt al barelor este legat de nodurile adiacente cu ajutorul ecuațiilor de constrângere.

Pe baza legii lui Fourier, între pereții interiori și exteriori ai capsulei se manifestă un gradient de temperatură. Suprafața rece este materializată printr-un coeficient de convecție 2D. Radiația reciprocă are loc între sursa de căldură și o suprafață exterioară a incintei. Interacțiunea dintre elementele de membrană și un PCB este modelată cu sprijinul ecuațiilor de constrângere.

Parametrizarea conductanței și capacității se realizează cu ajutorul datelor experimentale. Strategia este de a analiza stările de funcționare (descrise în secțiunea anterioară) ale sursei de căldură folosind o singură procedură experimentală.

Secțiunea 2. Verificarea conceptelor propuse

Pentru a demonstra conceptele propuse se efectuează un studiu privind comportarea termică a unui procesor Socket 478 Intel Pentium IV. Fiind larg răspândit în unitățile de comandă a roboților industriali, acest CPU va fi testat luând în considerare două platforme și cicluri de instrucțiuni diferite. Rețeaua termică a pachetului este modelată folosind o placă de bază AsRock P4I65g. Standul experimental este prezentată în Fig. 2.6.



Fig. 2.6 Standul experimental

Un pirometru cu infraroșu Raynger MX echipat cu un termocuplu TC-K (1) este conectat la un PC (2) prin intermediul unei conexiuni analogice. Achiziția datelor este realizată prin utilizarea software-ului de producător al pirometrului (3). O tavă din plastic (4) asigură poziția optimă a ansamblului placa de bază-CPU, astfel încât influențele termice exterioare să fie limitate. Ieșirea VGA a plăcii de bază este conectată la un monitor extern (5). Sursa de alimentare și unitatea de stocare a datelor (6) sunt poziționate în afara tăvii. Este inclus un radiator construit la comandă, prevăzut cu un alezaj central. La joncțiunea radiator-procesor este atașat un termocuplu de tip TC-K. Pentru a evita supraîncălzirea procesorului, pe partea laterală a radiatorului este montat un ventilator axial. Acesta este alimentat de la o sursă de externă pentru a obține un curent de aer constant. Pentru teste a fost instalată o versiune de bază a sistemului de operare Microsoft Windows. Toate tehnologiile de management energetic au fost blocate. Nu au fost inițializate drivere și majoritatea serviciilor sistemului de operare au fost dezactivate. În acest fel, utilizarea

resurselor suplimentare este minimizată. O procedură software este folosită pentru a aplica o sarcină constantă. Sunt testate 100 de stări operaționale, de la 1 la 100% utilizare.

Figura 2.7 prezintă rezultatele obținute experimental pentru diferite stări operaționale (40 până la 60% utilizare a resurselor).

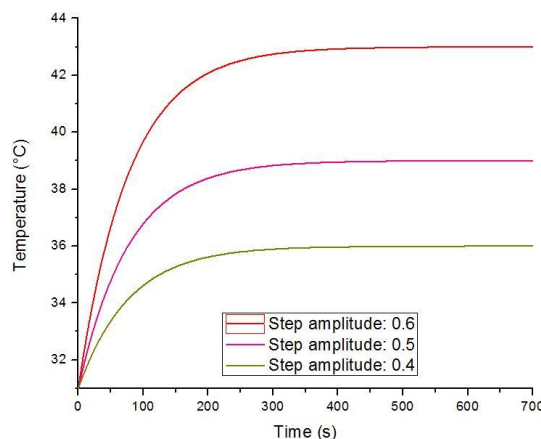
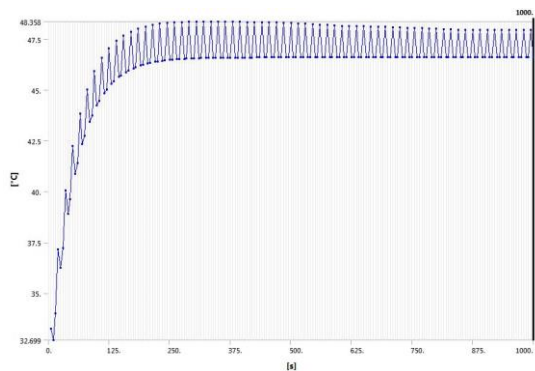


Fig.2.7. Stări operaționale ale UC determinate experimental

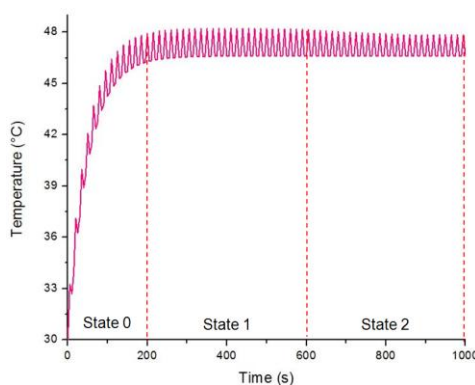
Rezultatele experimentale sunt folosite pentru a parametriza conductanța și capacitatea în modelul de simulare.

În etapa următoare, abordarea IAC este implementată în ANSYS Workbench 16.2 prin utilizarea interfeței dedicată SAMCEF pentru simulări termice în regim de echilibru sau tranzitoriu.

Acuratețea abordării este verificată pe baza unui ciclu de instrucțiuni tranzitoriu. Atât pentru compararea cât și pentru verificarea rezultatelor, figura 2.8 ilustrează două diagrame una lângă alta: (a) reprezintă rezultatele obținute prin simulare și (b) reprezintă rezultatele obținute în urma evaluării experimentale.



(a)



(b)

Fig. 2.8 Evoluția temperaturii în timp – (a) rezultate experimentale și (b) rezultate obținute în urma simulărilor

Erorile obținute între cele două rezultate sunt evaluate în tabelul 2.2 pentru primul punct de apariție a temperaturii maxime.

Table 2.2 Rezultate și procente de eroare

Rezultatele simulărilor		Rezultate experimentale		Erori	
Temperatură maximă (°C)	La incrementul de timp (s)	Temperatură maximă (°C)	La incrementul de timp (s)	Pentru temperatura maximă (%)	Pentru incrementul de timp (%)
48.358	205	48.15	200	0.43%	2.5%

Rezultatele obținute justifică utilizarea practică a modelului cu parametrii concentrați pentru evaluarea căldurii cedate de componentele active din cadrul sistemelor înglobate.

Secțiunea 3. Concluzii

Evaluarea energiei termice disipată de sursele de căldură din cadrul sistemelor înglobate reprezintă o etapă esențială a oricărui proces de dimensionare a sistemelor de răcire. Deși există abordări conservative pentru finalizarea acestei etape, utilizarea lor în modernizarea inteligentă este limitată, având în vedere constrângerile de proiectare. Pentru a depăși astfel de probleme, acest capitol propune o abordare cu parametrii concentrați care se bazează pe principiile teoretice ale sistemelor de ordinul întâi. Conceptele propuse sunt transpuse într-un mediu de simulare FEM cu ajutorul unor macroelemente care dispun de conductanță și capacitate variabilă. Parametrizarea analizei termice se realizează prin intermediul datelor experimentale. Pe parcursul lucrării sunt efectuate experimente pentru a demonstra utilitatea practică a abordării pentru evaluarea comportării termice a surselor din cadrul sistemelor înglobate. Metodologia poate fi reutilizată cu succes atunci când pachetul a fost studiat anterior.

Contribuțiile originale ale lucrării pot fi grupate în următoarele categorii:

1. **Contribuții teoretice:** utilizarea sistemelor de ordinul întâi cu amplificare de temperatură și constante de timp variabile pentru dezvoltarea unui model de intrare-ieșire cu parametrii concentrați.
2. **Contribuții metodologice:** dezvoltarea de proceduri experimentale originale în scopul identificării parametrilor sistemului și utilizarea ulterioară a rezultatelor obținute pentru parametrizarea analizei termice în regim tranzitoriu.
3. **Contribuții originale la modelarea FEM:** utilizarea practică a unui macroelement pentru modelarea parametrilor concentrați bazat pe conductanța și capacitatea dependente de temperatură.
4. **Implementarea IAC:** a fost realizată o implementare originală SAMCEF-ANSYS
5. **Procedura experimentală:** dezvoltarea unei noi proceduri pentru achiziția de temperaturi și prelucrarea rezultatelor.

Rezultatele acestui capitol s-au concentrat exclusiv pe sursele de căldură independente, cum ar fi procesoarele cu un singur nucleu. Având în vedere proliferarea soluțiilor de tip multiprocesor ca parte a sistemelor înglobate de înaltă performanță orientate spre Industria 4.0, conceptele date pot fi extinse prin adăugarea de seturi de noduri - elemente de conductanță de interfață pentru fiecare nucleu independent. În acest caz, este necesar un studiu al fiecărei surse individuale de căldură. Acest lucru duce la o creștere semnificativă a numărului de date experimentale necesare parametrizării modelului, abordarea fiind mai puțin atractivă. Pentru a reduce dependența de datele experimentale se pot implementa tehnicile de învățare automată, asigurând în același timp o bună calitate a rezultatelor prin intermediul soluțiilor de analiză a datelor. Aceste subiecte vor fi abordate în capitolul 3.

Concluziile cercetării au fost publicate în:

- **Alexandru, T. G.,** Mantea, T. A., Pupaza, C., & Velicu, S. (2016). Heat transfer simulation for thermal management of electronic components. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 11(1), 15.
- **Alexandru, T.G. & Pupaza, C.** (2019), "An approach for estimating the total heat transfer rates in embedded systems", *The 11th International Conference of Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, pp. 1-6, 2019, [WOS: 000461147400095](#)

Secțiunea 1. Generalizarea surselor de căldură autonome

3.1. Aspecte generale

În modernizarea inteligentă, alegerea sistemelor înglobate optime pentru modernizarea unităților de control computerizate ale dispozitivelor industriale se efectuează înainte de achiziționarea hardware-ului fizic [A14]. Prin urmare, estimarea adecvată a energiei disipate de componentele electronice trebuie să se bazeze pe cunoștințele ingineresti dobândite de companie din proiecte similare [A05]. În consecință, comportarea termică a circuitelor integrate poate fi reprodusă doar cu un nivel grosier de detaliu. În acest sens, o abordare mai eficientă a captării cunoștințelor constă în utilizarea programelor pentru calculator pentru identificarea relațiilor existente între datele disponibile [Z02]. În acest fel, intrările modelului cu parametri concentrați pot fi utilizate în continuare pentru generalizarea variabilelor de ieșire cu suportul algoritmilor de regresie [P02]. Regresia ÎA este considerată o modalitate convenabilă de abordare a datelor neliniare [K01]. Două metodologii sunt cele mai comune: regresia liniară și modelele rețelei neuronale [G03]. Diversitatea surselor de căldură implementate în sistemele înglobate precum și comportarea termică a fiecărui pachet electronic necesită seturi de date extinse pentru instruire, testare și generalizare. Algoritmii tradiționali de ÎA au o performanță scăzută atunci când prelucreză seturi de date mari [T01]. Astfel de aspecte devin și mai limitative atunci când datele de intrare au zgomot [S03]. Pentru a depăși astfel de probleme, algoritmii de învățare profundă au apărut ca ramură a învățării automate [B04]. Astfel de modele de învățare supravegheată pot gestiona seturi mari de date care cuprind zgomote. Performanța de predicție este proporțională cu cantitatea de date disponibile [T03]. Un model tipic de regresie de învățare profundă cuprinde o rețea neuronală care are mai multe straturi ascunse de neuroni complet conectați [E01]. Rezistența conexiunii este materializată printr-o pondere [D08]. Neliniaritatea este adăugată în model printr-o funcție de activare [S06]. Capacitatea modelului de a generaliza date nevăzute se bazează pe optimizorul folosit pentru minimizarea funcției de cost [L06]. Acest proces se realizează prin actualizarea dinamică a ponderilor în timpul antrenării rețelei neuronale (Fig.3.1).

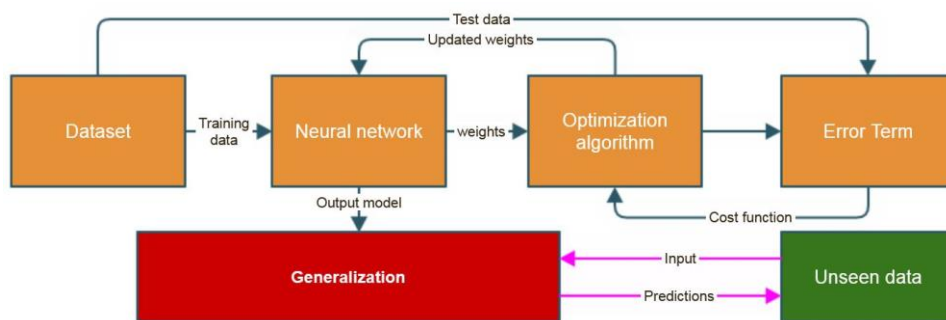


Fig. 3.1 Structura generală a unui model de regresie de învățare profundă

3.2. Considerații teoretice

Regresia ÎA reprezintă un set de metode statistice care sunt răspândite în domeniile economic și industrial pentru a determina relația dintre o variabilă dependentă (etichetă) și o singură sau mai multe variabile independente (trăsături) [M01]. În studiul de față, datele de intrare ale problemei cuprind caracteristici care sunt în strânsă relație cu comportarea termică a unui pachet electronic (tensiunea de alimentare, frecvența de operare sau dimensiunea pastilei), în timp ce ieșirea corespunde variabilelor necesare pentru definirea modelului cu parametri concentrați (amplificarea temperaturii și constantele de timp). Cea mai răspândită tehnică în ÎA pentru anticiparea variabilelor continue este metoda regresiei liniare. Pentru un set de date care cuprinde o singură coloană de caracteristici, eticheta de regresie (p) este o funcție explicită, astfel încât [W06]:

$$p = f(s) \quad (3.1)$$

Legătura dintre caracteristici este definită printr-o familie de reguli care se exprimă:

$$f(s) = a \cdot s + b \quad (3.2)$$

Unde a și b sunt parametrii nespecificați (sau gradele de libertate) care sunt definiți pe baza datelor disponibile. Scopul analizei de regresie liniară este de a identifica valorile optime pentru a și b astfel încât suma pătratelor erorilor dintre rezultatul adevărat și cel anticipat să fie minimizată [S16].

În cazul intrărilor multiple, problema devine una de regresie liniară multiplă [M07]:

$$f(s_1, s_2) = w_{11} \cdot s_1 + w_{12} \cdot s_2 \quad (3.3)$$

Unde: w_{11} și w_{12} sunt ponderi.

Pentru a demonstra utilizarea practică și limitările modelelor de regresie liniară simple se efectuează un studiu experimental. În acest scop, un microcalculator ARM de tip “single board” este supus unei proceduri de evaluare a performanțelor pentru operații în virgulă mobilă RGBenchMM [M12]. Acest dispozitiv a fost implementat într-un mediu de inginerie industrială pentru monitorizarea nivelului de zgomot al dispozitivelor industriale. Un ventilator de răcire cu viteză variabilă este inclus pentru a asigura funcționarea fiabilă a componentelor active (Fig. 3.2).



Fig.3.2. Mini-calculator bazat pe ARM cu o singură placă și cu sistem de răcire personalizat

Obiectivul studiului este acela de a înregistra comportarea termică a UC (ca etichetă) prin varierea temperaturii din carcasă și a tensiunii de intrare a ventilatorului (ca fiind caracteristici). Este dezvoltat un set de date care cuprinde rezultatele pentru 1000 de condiții de testare. Acesta este împărțit în 80% date pentru antrenare și 20% date pentru testarea acurateții predicțiilor. Biblioteca TensorFlow cu Keras ÎA pentru Python pentru a dezvolta modelul de regresie liniară și pentru a minimiza funcția de cost. Pentru optimizare este utilizată metoda gradientului (metoda celei mai rapide descreșteri) pentru a decide ponderile optime. Obiectivul este de a minimiza funcția de cost calculată ca fiind rădăcina pătrată între valorile approximate și cele măsurate (J) prin calculul gradientilor acestora în raport cu parametrul θ pentru întregul set de date [R06].

$$\theta = \theta - \eta \cdot \nabla_{\theta} \cdot J(\theta) \quad (3.4)$$

Un strat suplimentar de normalizare Keras este folosit pentru a aduce variabilele de intrare în același interval (între 0 și 1).

Capacitatea de generalizare a modelului este scăzută având în vedere relația neliniară dintre variabilele independente (tensiunea și temperatura internă) și variabila dependentă (temperatura UC). În consecință, analiza de regresie liniară se dovedește a avea o utilizare limitată în estimarea caracteristicilor transferului de căldură (Fig.3.3).

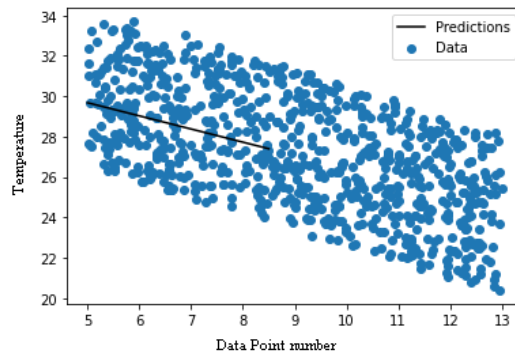


Fig.3.3. Precizia predicției cu regresie liniară multiplă

O rețea neuronală feed forward este implementată pentru a adresa aceste probleme. Astfel de modele definesc un set de puncte în spațiu, iar obiectivul regresiei constă în identificarea valorilor optime în raport cu o metrică aleasă. Această măsurătoare este definită ca fiind termenul de eroare care corectează instanțe ale modelului care sunt prea complexe sau prea departe de țintă [W07].

De exemplu, un model de regresie de învățare ÎA care cuprinde două intrări (tensiunea ventilatorului – i_1 și temperatura din interiorul carcasei – i_2) și o ieșire (temperatura procesorului) poate fi dezvoltat prin intermediul regresiei multiliniare. Pentru a aborda neliniaritatea modelului, în ecuația 3.5 se adaugă o funcție de activare (a) [K05]:

$$f_2(i_1, i_2) = a \cdot (w_{11} \cdot i_1 + w_{12} \cdot i_2) \quad (3.5)$$

În acest caz, modelul nu mai este caracterizat printr-o singură ieșire, ci mai degrabă de n caracteristici intermediare ale funcției, numite l. Pentru exemplul oferit, sunt luate în considerare 3 astfel de caracteristici:

$$\begin{aligned} l_1 &= a \cdot (w_{11} \cdot i_1 + w_{12} \cdot i_2) \\ l_2 &= a \cdot (w_{21} \cdot i_1 + w_{22} \cdot i_2) \\ l_3 &= a \cdot (w_{31} \cdot i_1 + w_{32} \cdot i_2) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Rezultatul final al modelului se calculează astfel:

$$\begin{aligned} f_3(v, t) &= a \cdot (v_1 \cdot l_1 + v_2 \cdot l_2 + v_3 \cdot l_3) = \\ &= a \cdot [v_1 \cdot a \cdot (w_{11} \cdot i_1 + w_{12} \cdot i_2) + v_2 \cdot a \cdot (w_{21} \cdot i_1 + w_{22} \cdot i_2) + v_3 \cdot a \cdot (w_{31} \cdot i_1 + w_{32} \cdot i_2)] \end{aligned} \quad (3.7)$$

unde: v și w reprezintă ponderi.

Ecuațiile de la 3.5 la 3.7 descriu reprezentarea matematică a unei rețele neuronale feed forward cuprinzând 2 neuroni de intrare (i_1 și i_2), un strat ascuns (materializat de 3 neuroni) și un neuron de ieșire (corespunzând obiectivului regresiei – o). Reprezentarea grafică a modelului neuronal este prezentată în figura 3.4.

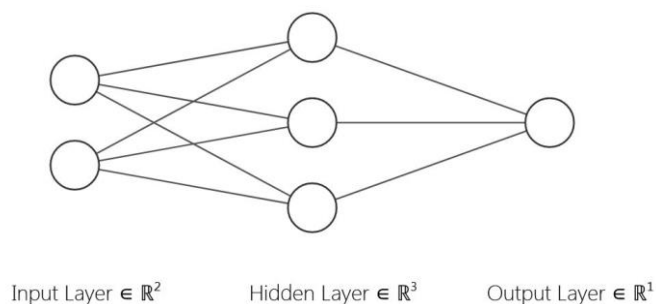


Fig.3.4. Arhitectura rețelei neuronale feed forward

Noua arhitectură este implementată în TensorFlow prin înlocuirea celei anterioare de regresie liniară. Este utilizată funcția de activare Rectified Linear Unit (ReLu) pentru straturile ascunse. Funcția returnează 0 pentru orice intrare negativă și valoarea de intrare pentru orice x pozitiv [C01]:

$$f(x) = \max(0, x) \quad (3.8)$$

Un rezumat al parametrilor utilizați pentru procesul de instruire este prezentat mai jos:

- Rețea neuronală feed forward;
- Caracteristicile au fost normalizate;
- A fost definit un strat ascuns cu 3 neuroni;
- Funcția de activare Rectified Linear Unit (ReLu) este utilizată pentru straturile ascunse;
- Optimizorul de descreștere rapidă a gradientului este utilizat pentru a ajusta ponderile astfel încât funcția de cost să fie minimizată;
- O rată de învățare de 0,01 este definită pentru a controla ponderile în raport cu descreșterea de gradient;
- Funcțiile de calcul ale diferențelor erorilor medii pătratice sunt utilizate ca metrici de convergență ale modelului (tipic unei probleme de regresie);
- Se realizează 100 de epoci (setul de date este împărțit în 100 de secvențe de eșantionare).

Funcția de cost a modelului este minimizată după fiecare epocă (Fig. 3.5).

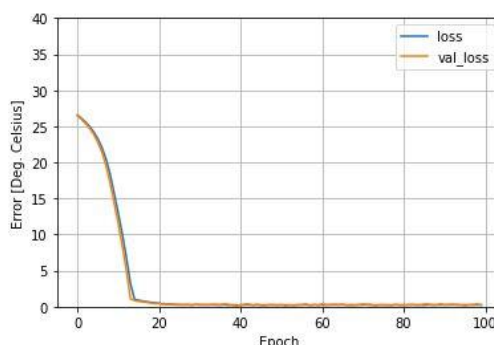


Fig.3.5. Minimizarea funcției de cost după 100 de epoci

Eroarea medie absolută obținută de program la sfârșitul procesului de antrenare este de 0,254°C.

Spre deosebire de modelul de regresie liniară, rețeaua neuronală feed forward are capacitatea de a învăța caracteristicile generale ale modelului. În plus, procesul de optimizare converge către o variantă de model care nu mai captează zgomotul nedorit, dovedind abilități bune de generalizare prin evitarea supraadaptării.

3.3. Modelul de regresie bazat pe învățarea profundă

Analiza de regresie bazată pe rețelele neuronale feed forward dovedește o bună capacitate de a învăța caracteristicile generale dintr-un set de date. Chiar și așa, utilizarea unor astfel de modele pentru componentele electronice înglobate se poate dovedi o provocare din cauza numărului crescut de caracteristici necesare pentru dezvoltarea setului de date, precum și a neliniarității care guvernează dinamica procesului de transfer de căldură.

Învățarea profundă a evoluat ca o familie mai largă de ÎA care vizează modelarea datelor cu un nivel ridicat de abstractizare [O01]. Un model de regresie de învățare profundă cuprinde o rețea neuronală cu mai multe straturi ascunse. În acest fel, caracteristicile primare ale datelor se disting de cele de nivel înalt [L04]. Figura 3.6 prezintă structura unei rețele profunde pentru analiza regresiei:

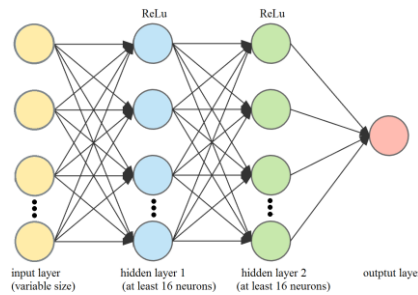


Fig.3.6. Structura generală a unei rețele profunde pentru rezolvarea problemelor de regresie care implică surse de căldură înglobate

3.3.1. Definirea setului de date

Este dezvoltat un set de date care cuprinde o gamă largă de procesoare cu un singur nucleu. Selecția include o varietate de familii de produse, modele și specificații funcționale. Se ține cont de caracteristici ale platformelor hardware care se găsesc într-o relație strânsă cu creșterea temperaturii și timpul de stabilire a UC-urilor în diferite stări de funcționare sunt decise ca: soclul, frecvența magistralei - FSB (MHz), energie disipată din catalog (W), frecvența de operare (MHz), nivelul Cache L2 (Kb), numărul de tranzistori și tensiunea de alimentare a nucleului (V core – V). Aceste caracteristici sunt extrase din manualul de specificații de produs al fiecărui procesor.

Etichetele sunt derivate prin utilizarea aceleiași proceduri experimentale descrise în Capitolul 2 secțiunea 2.3. Figura 3.7 prezintă un exemplu de constante de timp (a) și coeficienți de amplificare a temperaturii (b) pentru procesorul AMD Athlon64 3000.

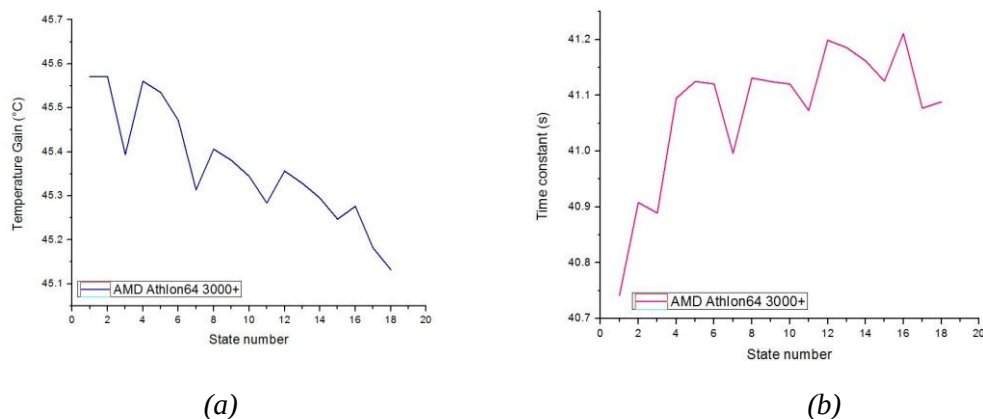


Fig.3.7. Creșterea de temperatură determinată experimental – (a) constanta de timp și (b) coeficienți de amplificare a temperaturii pentru procesorul AMD Athlon64 3000+

3.3.2. Parametrii rețelei profunde

Parametrii care au dovedit cea mai bună capacitate de generalizare pentru sursele de căldură autonome considerând diferite stări de funcționare pot fi rezumați ca fiind.

- Rețea Neuronală Profundă;
- Caracteristici normalizate;
- Două straturi ascunse;
- Fiecare strat ascuns are cel puțin 16 neuroni;
- Setul de date a fost împărțit în 80% date pentru antrenare și 20% date pentru testarea acurateții predicției modelului
- Funcția de activare Rectified Linear Unit (ReLU) este utilizată pentru straturile ascunse;
- Optimizarea Root Mean Square Propagation (RMSProp) este folosită pentru a ajusta ponderile;
- Este definită o rată de învățare de 0,01;

- Funcția de cost a erorii medii pătratice între valorile măsurate și cele estimate este decisă ca metrici de convergență ale modelului;
- Sunt efectuate 100 de epoci.

3.3.3. Convergența modelului

Funcția de cost a modelului este minimizată după 100 de epoci, eroarea medie absolută fiind de 1,05°C (Fig.3.8).

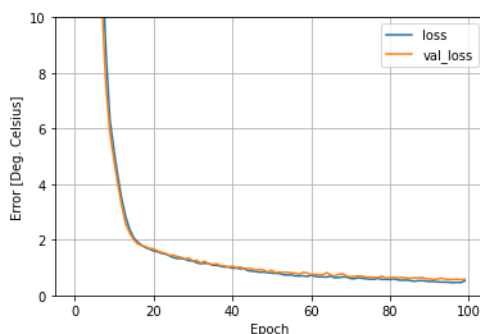


Fig.3.8. Minimizarea funcției de cost după 100 de epoci

Secțiunea 2. Extinderea metodologiei pentru surse de căldură multicip

Abordarea propusă se concentrează apoi pe estimarea căldurii disipate de către sursele de căldură care sunt comune sistemelor înglobate de concepție modernă, în special, procesoarele cu mai multe nuclee sau soluții de tip sistem pe un cip. Pentru a dezvolta o abordare cu parametri concentrați aplicabilă unor astfel de probleme, este imperativă descrierea întregului proces printr-un număr redus de variabile [A09]. Metodologia propusă poate fi divizată în 3 straturi (nivelul experimental, de învățare automată și de simulare). Relația dintre ele este prezentată în figura 3.9.

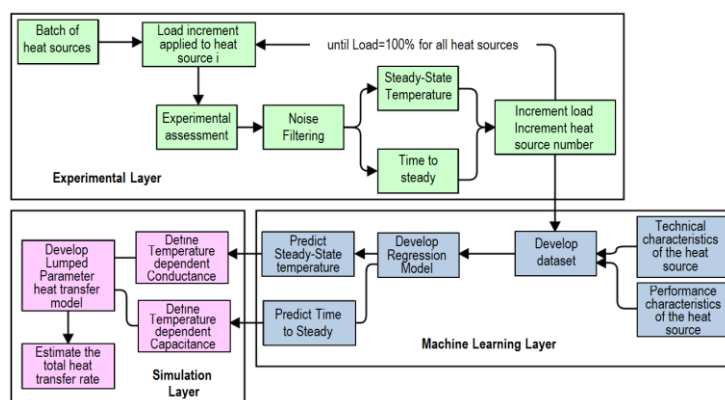


Fig.3.9. O reprezentare schematică a abordării propuse pentru modulele cu mai multe cipuri

Fiecare bloc constitutiv al abordării propuse este detaliat în secțiunile de mai jos.

3.4. Stratul experimental

A fost decis un lot de mostre de UC luând în considerare specificațiile tehnice și de performanță ale acestora. Scopul studiului este de a avea un număr consistent de specimene care să poată acoperi o gamă largă de producători (AMD, Intel și VIA), un număr consistent de nuclee (două, trei și patru), frecvențe (MHz), specificații ale energiei cedate constructiv - TDP (W), tehnologii de litografie (Nm), dimensiuni ale pastilei (mm²) și scoruri de evaluare a performanțelor.

Configurația experimentală este identică cu cea descrisă în Capitolul 2 - Secțiunea 2. Este dezvoltată o procedură automată pentru reglarea amplitudinii semnalului treaptă și pentru schimbarea afinității (sau a nucleului care este supus ciclului de solicitare) din cadrul UC. În acest fel, coeficienții de amplificare a temperaturii și constantele de timp sunt evaluate pentru toate nucleele și combinațiile de nuclee. Toate măsurătorile sunt asamblate într-un singur fișier CSV. La începutul și la sfârșitul fiecărei secvențe experimentale sunt adăugate etichete pentru delimitarea ciclurilor de achiziție.

3.5. Stratul ÎA

Pentru studiul de față, este dezvoltat un set de date care cuprinde caracteristici care sunt extrase din specificațiile tehnice și de performanță ale UC-urilor studiate. Datele referitoare la comportarea termică sunt incluse din stratul experimental. Caracteristicile categoriale sunt convertite în valori numerice. Un exemplu de set de date pentru procesoare cu două nuclee este prezentat în figura 3.10.

Thermal Specifications						Load Data				Experimental Data					
Manufacturer	Frequency (MHz)	TDP (W)	Lithography (Nm)	CPU Mark Score	Die Size (mm ²)	Load Applied to		Step amplitude		Temperature gain (°C)			Settling time(s)		
						LC1	LC2	LPC1	LPC2	TC1	TC2	TCP	TTC1	TTC2	TTP
1	3000	65	45	1741	117.5	1	0	10	0	26.802	27.139	24.578	59.414	58.940	60.788
1	3000	65	45	1741	117.5	0	1	0	10	26.168	25.652	24.943	63.063	62.016	63.786
1	3000	65	45	1741	117.5	1	1	5	5	27.156	26.579	25.269	63.989	64.532	65.072

Features

Labels

Fig.3.10. Coloanele de caracteristici ale unui set de date aplicabile procesoarelor cu două nuclee

Primele 6 coloane includ fișa de date și specificațiile de performanță ale UC-urilor studiate. Coloana 7 și 8 reprezintă o matrice de încărcare. Când se aplică 1 pe LC1 și 0 pe LC2, înseamnă că sarcina va fi aplicată numai pe al doilea nucleu. Coloana 9 și 10 materializează amplitudinea semnalului treaptă. De exemplu, când LPC1 este setat la 10% și LC1 este setat la 1, LC2 la 0, înseamnă că 10% utilizare a resurselor este aplicată pe nucleul 2. Coloanele 11 până la 16 indică creșterea temperaturii și timpul de echilibru pentru starea operațională dată pentru fiecare nucleu (TC și TTC) și pentru întregul pachet UC (TCP și TTP).

3.6. Stratul de simulare

Simularea propusă constă într-o structură care cuprinde elemente subțiri de placă plană de grosime neglijabilă. Detaliile complete ale exteriorului carcasei UC sunt luate în considerare în modelul geometric. În interiorul carcasei, fiecare nucleu este modelat utilizând o reprezentare cu plăci dreptunghiulare. Fiecare element are o temperatură constantă, gradientii fiind evitați prin separarea nodurilor limită. Capacitatea termică este luată în considerare pentru nucleele individuale și pentru întregul pachet UC. O reprezentare grafică a abordării este realizată în figura 3.11.

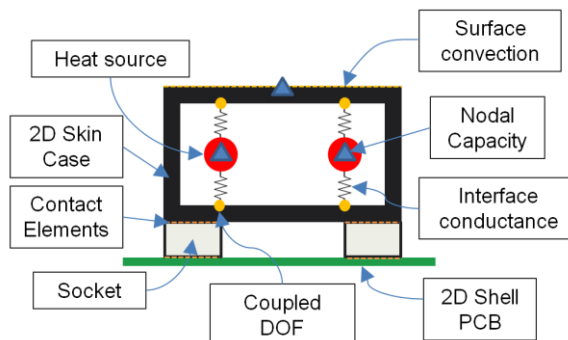


Fig.3.11 Reprezentarea grafică a elementelor finite care cuprind stratul de simulare

3.7. Studiu de caz

Se realizează un studiu de caz privind modernizarea inteligentă a unei unități de comandă computerizată din cadrul unui controler de robot industrial ABB IRC5 (Fig. 3.12).



Fig.3.12. Unitatea de calcul principală a unui controler ABB IRC5 supus procesului de modernizare inteligentă

Scopul actualizării este acela de a înlocui placa de bază și UC învechite din configurația originală cu un sistem înglobat care poate consuma mai puțină energie, oferind în același timp protocoale extinse de rețea și resurse de calcul. Procesorul folosit este un AMD Athlon II X2 B24 cu 2 nuclee.

Setul de date și procedura analizei de regresie sunt prezentate în Secțiunea 3.2.2. După 100 de epoci, precizia antrenării este de $\pm 2,02$ °C, în timp ce precizia de predicție a setului de test este de $\pm 2,51$ °C. Cu funcția de cost minimizată, convergența modelului este optimă.

Pentru a demonstra utilizarea practică a abordării, în modelul de simulare este definit un ciclu de instrucțiuni inactiv de 5 secunde și 5 secunde solicitare maximă. Utilizarea resurselor acționează asupra ambelor nuclee ale procesorului.

În etapa următoare, rezultatele modelului de simulare sunt verificate prin experimente. În acest sens, același ciclu de instrucțiuni este luat în considerare pentru configurația reală. Curbele de temperatură experimentală versus simulare sunt prezentate în figura 3.13 pentru carcasă și nuclee.

O scurtă trecere în revistă a rezultatelor obținute indică faptul că eroarea dintre experimente și simulări este una constantă. Chiar și așa, se pot observa diferențe între pantele celor două curbe de temperatură. Acest lucru se datorează diferitelor surse de eroare, inclusiv achiziția de date, erori de predicție a ÎA și erori rezultate din metodele numerice aproximative utilizate de solverul FEM.

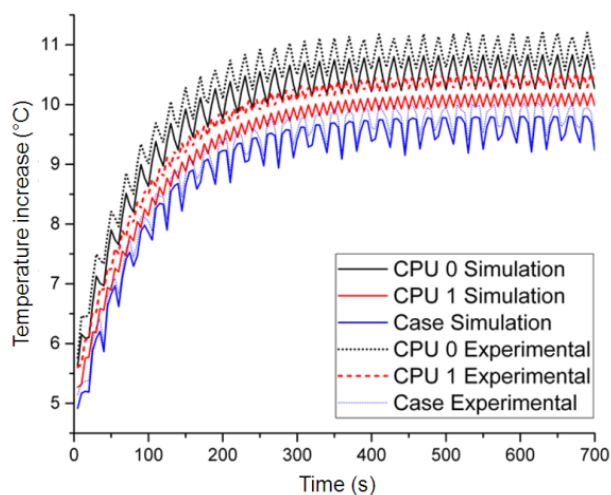


Fig.3.13 Comparația dintre valorile experimentale și cele de simulare

Secțiunea 3. Concluzii

Descrierea căldurii cedate de către componentele electronice care înglobează mai multe cipuri reprezintă o perspectivă provocatoare din cauza complexității fenomenelor termice care guvernează funcționarea unor astfel de soluții. În acest sens, metodologia cu parametri concentrați dezvoltată în capitolul anterior se dovedește a avea o utilizare limitată, având în vedere numărul extins de variabile experimentale necesare pentru parametrizarea modelului. În plus, metodologia inițială de simulare poate studia doar locații generatoare de căldură individuale la un moment dat. Pentru a depăși astfel de probleme, prezentul capitol propune utilizarea practică a ÎA pentru a anticipa creșterea temperaturii și constantele de timp pe baza specificațiilor tehnice și de performanță ale pachetului studiat. Modelul inițial de simulare este completat pentru a lua în considerare joncțiunile suplimentare.

Contribuțiile originale ale capitolului pot fi grupate în următoarele categorii:

1. **Contribuții teoretice:** studii aplicate privind analiza regresiei prin învățare automată și utilizarea diferitelor arhitecturi de învățare pentru generalizarea datelor experimentale pentru surse de căldură cu un singur și multicip;
2. **Contribuții metodologice:** dezvoltarea unui instrument Visual Basic pentru definirea parametrilor concentrați pe baza datelor experimentale (prezentat detaliat în Teza de Doctorat);
3. **Contribuții originale la modelarea FEM:** completarea modelului original de simulare bazat pe parametri concentrați pentru a include mai multe joncțiuni termice;
4. **Implementarea IAC:** A fost finalizată o implementare originală a modelului actualizat în SAMCEF-Patran;
5. **Procedura experimentală** și post-procesarea rezultatelor.

Rezultatele cercetării au fost publicate în:

- **Alexandru, T.G. & Pupază, C.** (2020), "Machine learning generalization of lumped parameter models for the optimal cooling of embedded systems", Studied in Informatics and Control, Vol.28, Iss.2, pp. 1-6, 2019: [WOS: 000573723600003](#), Impact factor 2019: 2.102 ([Q2](#));
- **Alexandru, T.G., & Pupază, C.** (2021). Recurrent neural network for predicting time step biSecțiuneas in structural dynamics, UPB. Scientific Bulletin, Vol. 83, Iss.1, pp.169-180;
- **Alexandru, T.G.** (2019, September). CISA Seminar - An approach for facilitating thermal design through the use of intelligent systems for Industry 4.0. Available at: <https://www.edinburgh-robotics.org/events/cisa-seminar-approach-facilitating-thermal-design-through-use-intelligent-systems-industry-40>, accessed: 25.09.2021.

Modelul generalizat cu parametri concentrați are abilitatea de a capta comportarea termică atât a componentelor independente, cât și a componentelor multicip. În acest sens, inginerii pot evalua în mod adecvat puterea disipată pentru a obține soluții precise pentru dimensionarea sistemelor de răcire. Din această perspectivă, următorul obiectiv constă în abordarea problemelor procesului de dezvoltare a reguletoarelor de temperatură în capitolul următor al lucrării.

Secțiunea 1. Reglatoare de temperatură FEM PID

4.1. Aspecte generale

Răcirea sistemelor înglobate reprezintă un flux de lucru ingineresc care este implementat în unități de control computerizate nou dezvoltate sau modernizate [P08]. Scopul procesului este acela de a asigura funcționarea sigură și fiabilă a dispozitivelor industriale prin menținerea temperaturii componentelor electronice active (de exemplu, procesoare, module de memorie sau cipuri de rețea) sub limita lor operațională [D10]. Acest obiectiv este realizat cu ajutorul componentelor de răcire active (adică ventilatoare sau suflante) sau pasive (adică radiatoare sau canale de dirijare a fluidului) care funcționează într-un mediu de reglare în buclă închisă [W04]. Figura 4.1 prezintă o descriere generală a etapelor fluxului de lucru a sistemelor de răcire înglobate.

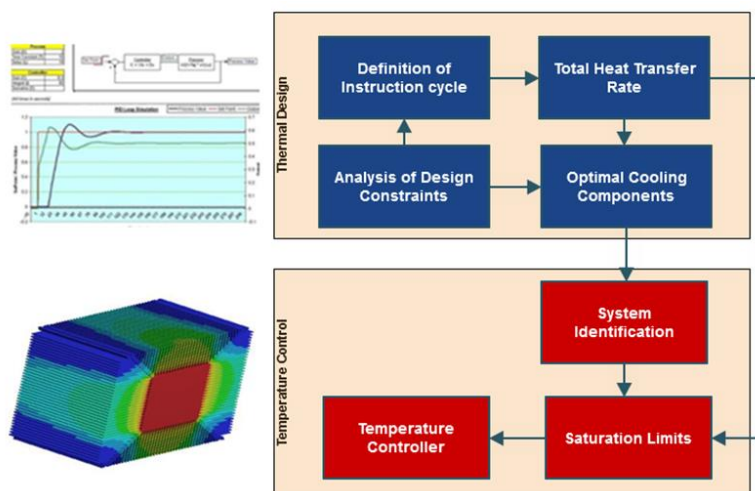


Fig.4.1 O privire de ansamblu asupra etapelor fluxului de lucru de răcire a sistemelor înglobate

Din punct de vedere holistic, blocurile constitutive ale procesului pot fi cuprinse în două sub-fluxuri distincte: proiectarea sistemelor de răcire [G02] și dezvoltarea reglatoarelor de temperatură [H01].

4.2. Considerații teoretice

Dezvoltarea reglatoarelor de temperatură FEM PID se realizează cu ajutorul elementelor unidireționale. Astfel de proceduri de simulare sunt bazate pe principiile arc-amortizor, fiind larg răspândite în solverele FEM pentru replicarea comportării termostatelor, supapelor de siguranță sau ambreiajelor [T06]. Structura tipică a unui element unidirecțional implementat într-un sistem termic este prezentată în figura 4.2.

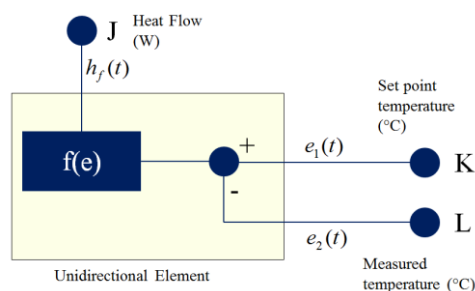


Fig. 4.2 Element unidirecțional implementat în sistemele de analiză termică tranzitorie

Nodurile K și L reprezintă nodurile de control. Valoarea punctului de referință este aplicată ca o condiție la limită (Boundary Condition - BC) pentru nodul K. Nodul L este atașat unei locații

specifice din model care corespunde senzorului de temperatură. Elementul scade în interior temperatura de la Nodul K (e_1) din Nodul L (e_2). Mai mult, permite realizarea unei operații matematice asupra termenului de eroare rezultat (e). Ieșirea lui $f(e)$ reprezintă un flux de căldură care acționează asupra nodului J (h_f) care este proporțional cu (e):

$$h_f(t) = k_i \cdot |f(e)| \quad (4.1)$$

unde: k_i reprezintă constanta de proporționalitate.

Ecuatiile care sunt utilizate în cazul celor trei elemente sunt descrise mai jos [M06]:

- Regulator proporțional:

$$h_f = e_1 - e_2 \quad (4.2)$$

- Regulator integral

$$h_f = \int_0^t (e_1 - e_2) dt \quad (4.3)$$

- Regulator derivativ

$$h_f = \frac{d(e_1 - e_2)}{dt} \quad (4.4)$$

Secțiunea 2. Abordarea propusă

Formalizarea fluxului de lucru pentru răcirea sistemelor înglobate implică două obiective majore: reutilizarea cunoștințelor de inginerie dobândite pe parcursul etapelor de proiectare a sistemelor de răcire și dezvoltarea unui mediu de simulare unificat pentru abordarea ambelor sub-fluxuri de lucru. Din această perspectivă, abordarea propusă cuprinde 3 nivele de abstractizare.

Rezultatul abordării constă în dezvoltarea unei proceduri pentru planificarea vitezei ventilatorului de răcire în vederea utilizării directe într-un sistem înglobat. Pentru rezolvarea problemelor legate de eficiența de calcul a modelului regulatorului rezultat este dezvoltată o procedură de ÎA care utilizează o rețea neuronală recurentă cu memorie pe termen scurt (LSTM).

O reprezentare schematică a abordării propuse este prezentată în figura 4.3.

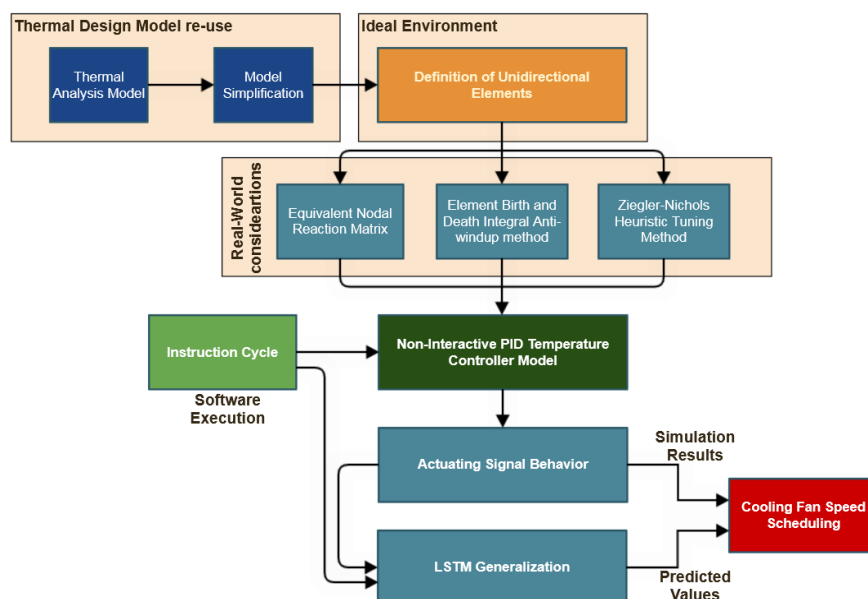


Fig.4.3 O reprezentare schematică a abordării propuse

O descriere detaliată a principalelor blocuri constitutive abordării este realizată în secțiunile de mai jos.

4.3. Simplificarea modelului

O abordare de simulare 2D poate fi utilizată pentru reducerea spațiului dimensional al problemei. Metodologia este aplicabilă radiatoarelor extrudate care sunt supuse unor solicitări și condiții termice care acționează pe întreaga lungime a profilului. Dimensiunea modelului poate fi redusă și mai mult prin utilizarea condițiilor de simetrie. Poate fi analizată în acest fel un sfert sau jumătate din geometrie atunci când fluxul de căldură aplicat este simetric.

4.4. Definirea elementelor unidirecționale

Trei elemente unidirecționale sunt necesare pentru implementarea unui regulator PID ca parte a unei analize termice în regim tranzitoriu. În figura 4.4 este reprezentată schematic strategia de implementare propusă pentru un radiator cu o singură aripioară care este supus unui flux laminar de aer.

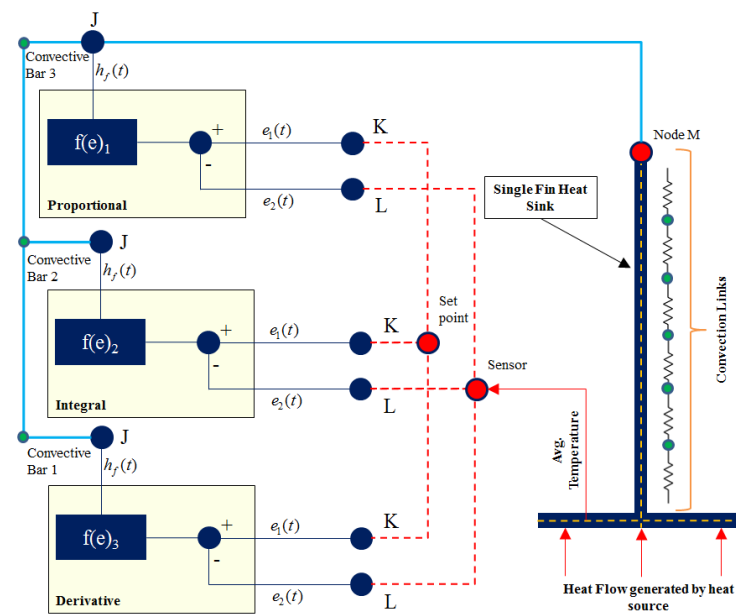


Fig.4.4 Strategia de implementare a regulatorului FEM PID

Nodurile K și L sunt coincidente pentru toate elementele unidirecționale utilizate. Valoarea care se măsoară la nodul L corespunde temperaturii medii la joncțiunea dintre radiator și sursa de căldură. Barele de convecție 1D sunt folosite pentru a lega nodul J cu nodul M care reprezintă vârful aripioarei. Ecuația debitului de căldură este descrisă ca [***02]:

$$q = h_f \cdot A \cdot (T_i - T_j) \quad (4.5)$$

unde q reprezintă debitul de căldură (W), h_f reprezintă filmul de căldură unitar ($W/m^2\text{°C}$), A este aria (m^2) și T este temperatura la unul dintre nodurile elementului (°C).

În cazul barelor de conducție utilizate pentru legarea nodurilor J și M, se decide o valoare mare arbitrară pentru h_f , aria elementului fiind egală cu aria marginilor asociate nodului M. Astfel, se obține o valoare echivalentă pentru rezistența dintre cele două noduri.

Barele de convecție sunt implementate pentru a impune acest comportament prin legarea tuturor nodurilor care aparțin planului vertical cu nodul M. Pentru fiecare conexiune, este definită o valoare specifică pentru h_f . În acest fel, rețeaua de rezistențe termice rezultată reglează energia eliminată din sistem, similar unei BC de convecție.

O altă problemă importantă în proiectarea reguletoarelor PID este timpul mort [D01]. Această întârziere a procesului reprezintă decalajul temporal între semnalele de intrare și cele de ieșire. În cazul mediului FEM acest efect poate fi explicat pe baza densității și căldurii specifice a geometriei. Chiar și așa, o întârziere suplimentară apare din cauza frecvenței sistemului de achiziție [T04]. Din acest punct de vedere, se poate atașa un element de capacitate OD la baza nodurilor radiatorului pentru a impune acest fenomen.

4.5. Matricea reacțiunilor nodale echivalente

Regulatorul FEM PID are capacitatea de a elimina energia din sistem prin replicarea comportării unei BC de convecție, care acționează pe planurile verticale ale aripioarei. Chiar și așa, această variabilă de control nu corespunde niciunui parametru al procesului fizic. Din acest punct de vedere, este necesară convertirea fluxului de căldură generat (W) în viteza de rotație a unui ventilator de răcire (RPM) sau în alte cantități semnificative. O reprezentare schematică a procedurii propuse este evidențiată în figura 4.5.

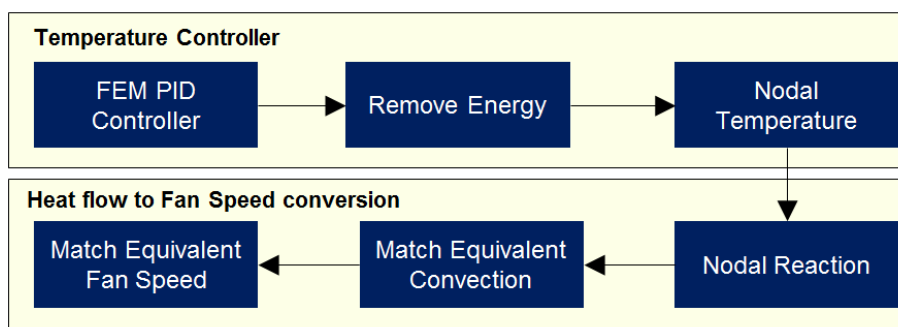


Fig. 4.5 Procedura propusă pentru conversia reacțiilor nodale în viteză de rotație a unui ventilator

În prima etapă este dezvoltat un studiu parametric pentru a identifica relația dintre căldura cedată în plan vertical și filmul de căldură unitar ($W/m^2\text{°C}$). În acest scop, puterea care este disipată de sursa de căldură în timpul ciclului de funcționare al sistemului înglobat este utilizată ca intrare în modelul de simulare. Filmul de căldură unitar al planurilor verticale este definit ca o valoare constantă. Solverul calculează valorile reacțiilor nodale pentru toate nodurile găsite în locația BC, pentru fiecare pas de timp al simulării. În etapa următoare, filmul de căldură unitar definit inițial este incrementat. În consecință, temperatura din sistem va scădea, rezultând reacțiuni nodale diferite. O matrice (M) este implementată pentru a sublinia această comportare:

$$M = \begin{bmatrix} -2.1975E-7 & -4.3950E-7 & -6.5925E-7 & -8.7900E-7 \\ -6.2193E-7 & -1.2439E-6 & -1.85E-6 & \dots \\ -1.0241E-6 & -2.0482E-6 & \dots & \dots \\ -1.8285E-6 & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Matricea din ecuația 4.9 are din 4 linii și 4 coloane. Fiecare linie corespunde pasului de timp, în timp ce coloanele descriu valoarea filmul de căldură unitar aplicat. Fiecare entitate din matrice reprezintă reacțiunea nodală medie care apare în planurile verticale ale aripioarei.

4.6. Metoda activării și dezactivării elementelor pentru evitarea lichidării integratorului

Elementele de execuție (actuatoarele) utilizate în soluțiile de proiectare termică sunt caracterizate de o limită de saturație (sau regiune de funcționare). În regulatorul FEM propus o problemă este comportamentul liniar al semnalului de acționare. În consecință, se poate genera un flux de căldură infinit pentru a compensa creșterea temperaturii sistemului. A doua problemă, care este de asemenea într-o relație strânsă cu saturația este lichidarea integrală. Această situație apare

atunci când are loc o modificare mare a punctului de referință determinând ca termenul integral să acumuleze eroare [K08]. În consecință, regulatorul depășește pe măsură ce eroarea este anulată [T05]. Pentru a aborda ambele probleme metoda de prindere este utilizată (Fig. 4.6).

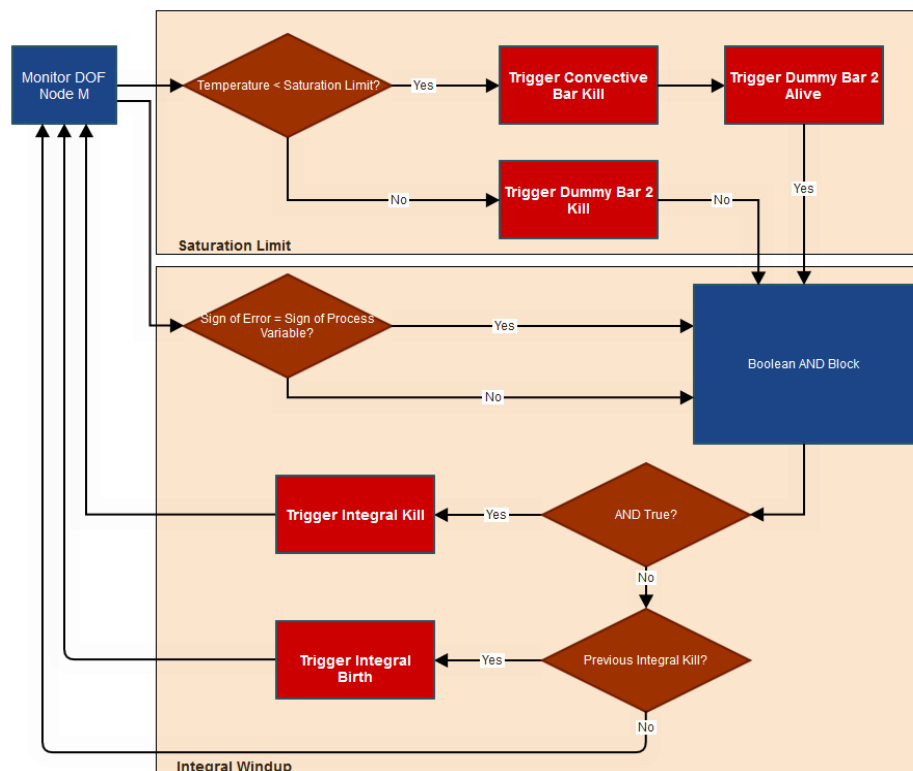


Fig. 4.6 Organigrama metodologiei de prindere propusă

Procedura folosește eficient barele convective false și tehnica activării și dezactivării elementelor. Abordarea este împărțită în două etape: limita de saturație și lichidarea integrală. O scurtă descriere a acestora este realizată mai jos:

- **Limita de saturație**

În FEM, tehnica de activare și dezactivare a elementelor (Element birth and death) permite apariția sau dispariția elementelor în timpul procesului de rezolvare pe baza expresiilor gradelor de libertate (DOF). În acest sens, este definit un vector care corespunde temperaturilor minime pe care le poate prezenta nodul M la limita de saturație a sistemului de răcire. Studiul este finalizat utilizând aceeași procedură de analiză descrisă în secțiunea anterioară.

- **Închidere integrală**

Un bloc „AND” este utilizat pentru a verifica dacă limita de saturație a fost atinsă și dacă semnul erorii corespunde cu semnul variabilei de control [K04]. Dacă condiția este adevărată, atunci elementul unidirecțional corespunzător regulatorului integral este dezactivat. Ulterior, un contor este incrementat pentru a ține evidența acestei acțiuni. Blocul „AND” este apoi verificat pentru următorul subpas. Dacă condiția redevine falsă și contorul indică faptul că termenul integral a fost dezactivat anterior, atunci se declanșează activarea elementului unidirecțional.

4.7. Metoda de reglaj Ziegler-Nichols

Metoda Ziegler-Nichols reprezintă o abordare euristică, iterativă și de reglare online, care este destinată proiectării cu hardware fizic.

Metodologia presupune parcurgerea următoarelor etape:

- 1) Constanta k_i din ecuația 4.1 este setată la o valoare inițială mică pentru regulatorul proporțional (K_p). Termenii integrali și derivați sunt dezactivați;
- 2) Se aplică o intrare treaptă prin intermediul unui flux de căldură constant care acționează la baza aripioarei. Temperatura medie înregistrată la joncțiunea dintre aripioară și sursa de căldură este monitorizată pentru a observa oscilația acesteia;
- 3) K_p crește încet până când se obține stabilitatea neutră;
- 4) Valoarea lui K_p la stabilitatea neutră este considerată a fi K_u și perioada critică de oscilație este considerată a fi T_u (s).

În etapa următoare, valorile lui K_p și T_u sunt utilizate în tabelul 4.1 pentru identificarea lui K_p și a constantelor de timp T_i și T_d [A20].

Tabelul 4.1. Constantele Ziegler-Nichols

Regulator	K_p	T_i	T_d
PID	$0.6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$
PID cu depășire mică	$K_u/3$	$T_u/2$	$T_u/3$
PID fără depășire	$0.2K_u$	$T_u/2$	$T_u/3$

4.8. Generalizarea LSTM

În abordarea propusă, este realizată o implementare LSTM pentru a generaliza comportamentul semnalului de acționare (derivat în timpul etapei matricei de reacțiuni nodale echivalente) pe baza reacțiunilor termice și a fluxului de căldură calculat de solverul FEM pentru 70% din datele de intrare. În acest fel, modelul neuronal poate identifica relația dintre variațiile parametrilor de transfer de căldură și poate prezice ieșirea regulatorului pentru restul de 30% din ciclul de instrucțiuni. În acest fel, cerințele de calcul ale analizei termice sunt reduse.

Este dezvoltat un set de date care cuprinde o matrice multidimensională a acestor caracteristici [A12]. Eticheta (sau valoarea prezisă) este asemănătoare cu semnalul de acționare. Numărul de linii și coloane corespunde formei 2D a setului de date, în timp ce a treia dimensiune este definită pe baza unei constante de antrenare care descrie dimensiunea fiecărei secvențe care este transmisă modelului (Fig.4.7).

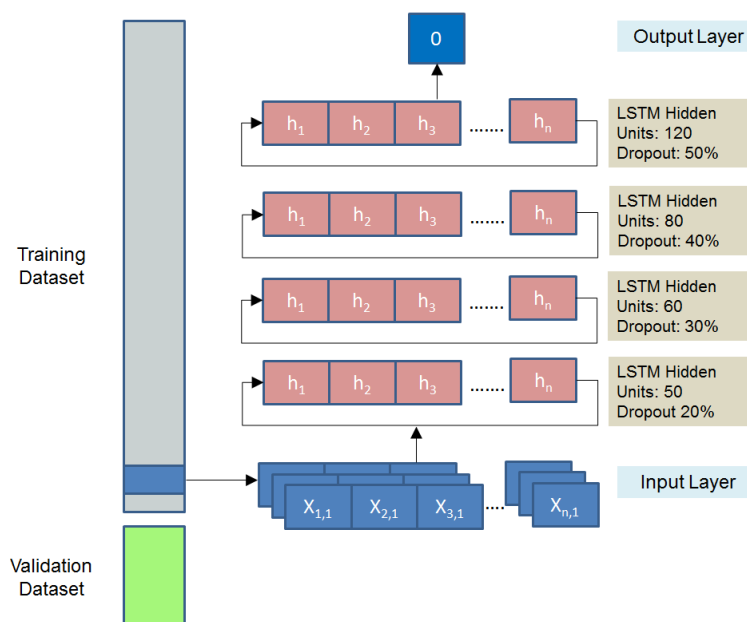


Fig.4.7 Reprezentare grafică a arhitecturii LSTM

În modelul propus, stratul de intrare constă dintr-o matrice multidimensională care cuprinde datele de ieșire normalizate ale solverului. Se adaugă patru straturi LSTM pentru a capta conceptele

abstracte din secvențe. Funcția de activare ReLu este utilizată între ieșirile lor. Fiecare strat ascuns cuprinde celule ascunse, care sunt caracterizate de mai multe unități ascunse. Pe de altă parte, fiecare unitate ascunsă abordează problema dependențelor pe termen lung prin ajustarea fluxului de informații cu ajutorul porților de intrare (input), ieșire (output) și uitare (forget).

Pentru a îmbunătăți capacitatea de generalizare a modelului, tehnica drop-out este implementată pentru a exclude aleatoriu unități LSTM în timpul fiecărei etape de antrenament.

Secțiunea 3. Studiu de caz

A fost dezvoltată o platformă de testare la scară de laborator pentru a demonstra conceptele date. Sistemul în discuție constă dintr-o placă de bază care este echipată cu o UC cu un singur nucleu ca sursă principală de căldură. Răcirea este asigurată prin intermediul unui radiator din aliaj de aluminiu cu aripioare verticale, având atașate două ventilatoare axiale. Sistemul de răcire este supus unor constrângeri spațiale pentru a reproduce condițiile care apar în cazul modernizării inteligente. Scopul acestui studiu este acela de a valida regulator FEM PID prin programarea semnalelor de acționare ale ventilatoarelor de răcire. De asemenea, sunt efectuate evaluări ale eficienței energetice și ale zgomotului generat de ventilator pentru a compara performanțele soluției propuse față de un regulator de temperatură de uz general care este integrat în placa de bază. O reprezentare schematică a hardware-ului implementat este ilustrată în Figura 4.8.

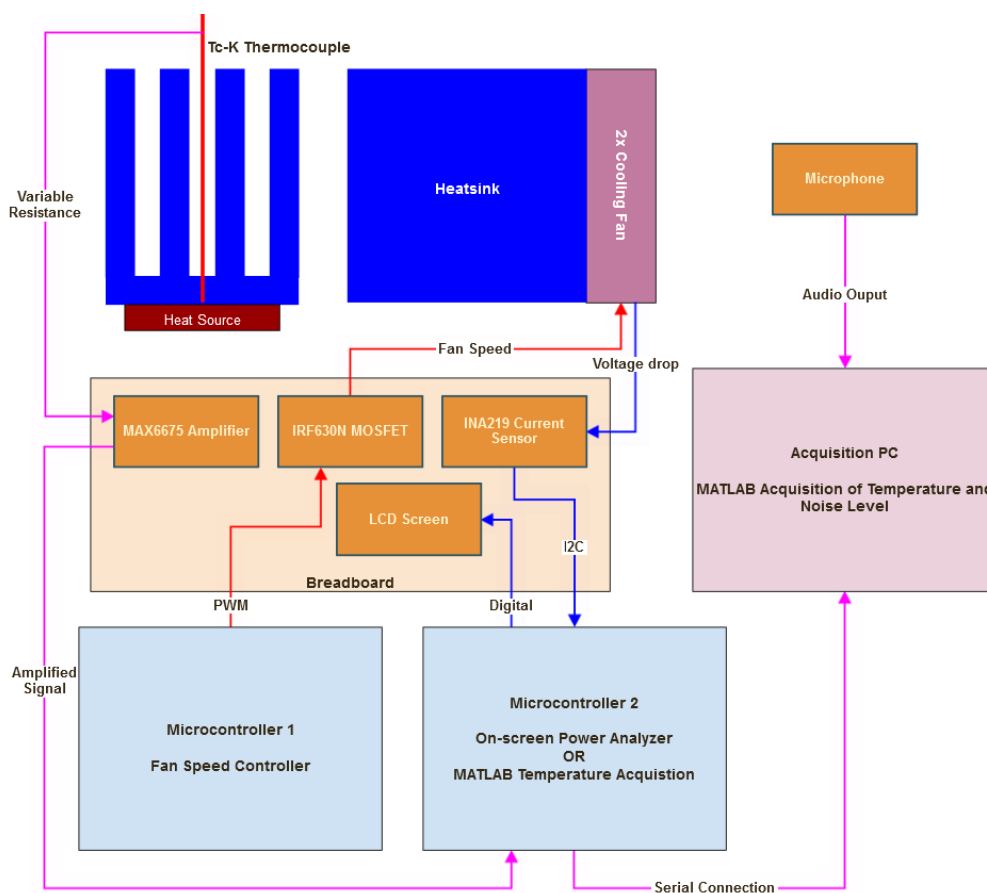


Fig.4.8 Reprezentarea schematică a hardware-ului sistemului de achiziție

O descriere a fiecărui bloc constitutiv este detaliată mai jos:

- **Sursa de căldură:** reprezintă o UC Intel Pentium 4 cu un singur nucleu, care funcționează la o frecvență de 2800 MHz. La utilizarea 100% a resurselor, procesorul are o putere disipată de aproximativ 50 W;

- **Microcontroller 1:** reprezintă o placă de dezvoltare compatibilă Mega 2560 Arduino. Este folosit ca regulator de viteză al ventilatorului împreună cu un MOSFET IRF630N. În acest sens, unul dintre pinii digitali ai microcontrollerului generează semnale PWM care reproduc tensiuni între 0 și 5V pentru reglarea rezistenței variabile a unui MOSFET. Astfel, viteza de rotație a ambelor ventilatoare este programată pe baza rezultatelor derivate din regulatorul FEM PID;
- **Microcontroller 2:** constă dintr-o placă de dezvoltare Arduino Uno care are două moduri de funcționare: analizor de putere pe ecran (folosind un senzor de curent bidirecțional INA219) și modul de achiziție a temperaturii (prin intermediul unui termocuplu TENMA care funcționează alături de un pachet SO Max6675 cu 8 pini);
- **PC de achiziție:** oferă mijloacele necesare pentru programarea microcontrolerelor precum și efectuarea achiziției de date prin utilizarea software-ului MATLAB. În timpul procedurii experimentale, pe ecran sunt prezentate două diagrame în timp real: variația în timp a temperaturii procesorului (prin achiziția de date de la amplificatorul Max6675) și nivelurile de zgomot ale ventilatoarelor (cu suportul unui microfon extern și al funcției splMeter implementată în MATLAB).

4.9. Procedura de testare

Pentru a aplica un ciclu de instrucțiuni tranzitoriu pe UC formula Leibniz pentru calculul zecimalelor lui π este implementată [B02].

$$\frac{\pi}{4} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{2k+1} \quad (4.7)$$

Un script a fost dezvoltat pentru a ajusta aleatoriu precizia valorii π pentru un interval de timp de 500 de secunde.

Scopul acestei proceduri de testare este de a verifica atât comportamentul regulatorului FEM PID de uz general, cât și al regulatorului PID propus. Valoarea temperaturii punctului de referință este definită aproape de limita de funcționare a temperaturii stabile a UC (70°C maxim, s-a decis 67°C).

4.10. Simplificarea modelului

Procesul de dezvoltare a regulatorului de temperatură este realizat cu sprijinul aplicațiilor MSC Patran (pentru modelarea cu elemente finite) și a solverului LMS Samtech Mecano (pentru analiza termică). Modelul de simulare are la bază formularea stării plane de tensiuni și deformații. Se ia în considerare doar secțiunea transversală a profilului radiatorului, lungimea plăcii reci fiind definită ca un parametru constant. Sunt studiate jumătate din numărul total de aripioare având în vedere simetria geometriei. Pentru a materializa profilul radiatorului un total de 2856 de elemente patrulare sunt definite.

4.11. Definirea elementelor unidirecționale

Trei elemente unidirecționale sunt implementate cu ajutorul controlerului SAMCEF .MCE DIGI. Barele de convecție1D sunt folosite pentru a lega nodul J cu M [***03]. Aria acestor elemente este egală cu 85 mm², valoarea coeficientului de film h_f fiind considerată 600 W/m²°C. Nodurile K sunt coincidente, având definită o temperatură care corespunde valorii punctului de referință de 67°C. Nodurile de monitorizare L sunt de asemenea coincidente, fiind atașate zonei de aplicare a fluxului de căldură. În model este inclus un grup de bare de convecție având o secțiune de

1 mm² adiacent elementelor unidirecționale pentru a recrea procesul de eliminare a căldurii determinată de fluxul de aer

4.12. Matricea reacțiunilor nodale echivalentă

Luând în considerare viteza de rotație minimă și maximă a ventilatoarelor de răcire o gamă de valori ale filmului de căldură unitar este decisă. Pentru platforma de testare dată, $\omega_{\min} = 2400$ RPM și $\omega_{\max} = 9000$ RPM. Chiar și așa, configurația experimentală în discuție poate executa cicluri de instrucțiuni de putere redusă, care necesită fie viteze ale ventilatorului sub valoarea minimă controlabilă, fie ca ventilatoarele să fie oprite pentru ca sistemul să atingă valoarea de referință. În ambele scenarii, convecția forțată va fi înlocuită cu răcirea prin convecție naturală.

4.13. Metoda activării și dezactivării elementelor pentru evitarea lichidării integratorului

Implementarea metodei de activare și dezactivare a elementelor unidirecționale este realizată cu ajutorul limbajului de programare Fortran 77, care este integrat în solverul Samcef. Astfel, utilizatorii pot dezvolta programe care pot rula alături de programul de simulare pentru aplicarea unor constrângeri suplimentare modelului. În acest scop, se folosește un compilator extern pentru a testa codul cu valori eșantion. În etapa următoare, liniile de intrare și de ieșire sunt înlocuite cu comenzi Samcef.

4.14. Metoda de reglaj Ziegler-Nichols

Având în vedere faptul că scopul regulatorului este acela de îndepărtare a căldurii din proces constanta de proporționalitate a fost variată negativ. Figura 4.9 (a) descrie valoarea K_u de -0,35 care este cea mai apropiată de stabilitatea neutră. După efectuarea ajustărilor fine se realizează stabilitatea completă neutră (la limită) a modelului pentru $K_u = -0,3596$, valoarea constantei de timp T_u fiind estimată la 50 de secunde (Fig. 4.9 (b)).

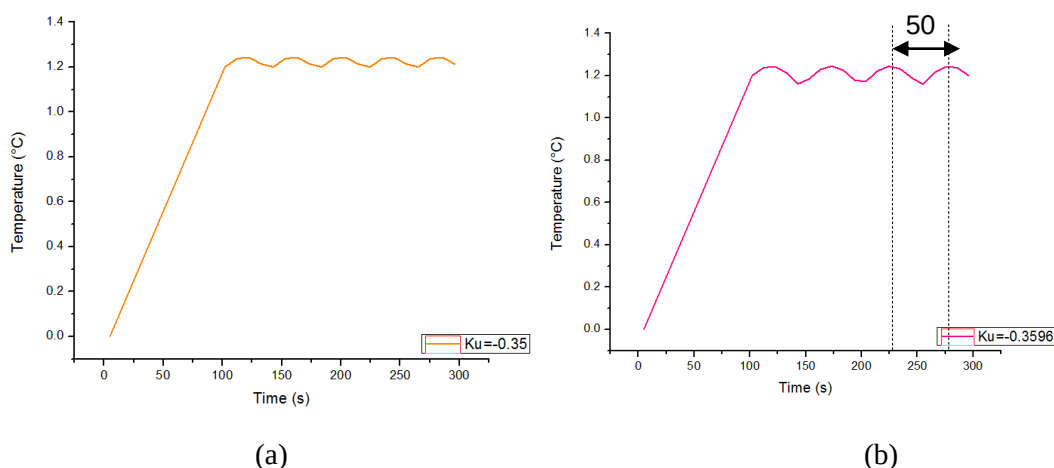


Fig.4.9 Reglaj K_p pentru stabilitate neutră

Valorile rezultate pentru constantele regulatorului sunt calculate pe baza constantelor PID standard descrise de: $K_p = -0.21576$; $K_i = -0.0086304$ și $K_d = -0.0690432$

4.15. Generalizare LSTM

Rețeaua neuronală recurentă LSTM este utilizată pentru a generaliza comportamentul semnalului de acționare calculat la ieșirea regulatorului FEM PID. În acest scop, este dezvoltat un set de date care cuprinde o gamă largă de scenarii operaționale.

Setul de date include: fluxul de căldură la baza radiatorului (W). Eticheta procesului de regresie este semnalul de acționare (% din utilizarea ventilatorului). Valorile sunt furnizate ca serii

temporale, dimensiunea pasului fiind de 0,01 secunde. Valorile care depășesc puterea disipată a UC-ului real au fost incluse pentru a îmbunătăți abilitățile de generalizare ale modelului. În total, sunt furnizate 90000 de rânduri în scopuri de instruire și testare.

TensorFlow 2.0 cu biblioteca Keras Machine Learning sunt utilizate pentru definirea arhitecturii LSTM. Un număr total de 5 epoci este ales ca parametru de antrenament, ceea ce înseamnă că setul de date este transmis înapoi și înainte de 5 ori. În fiecare epocă, funcția de reducere a erorii pătratice medii este monitorizată pentru a evalua acuratețea predicției modelului. La epoca 1, funcția de reducere are o valoare de 0,0395, în timp ce la epoca 5 valoarea este minimizată la 0,0060.

Precizia modelului este testată luând în considerare un ciclu de instrucțiuni aleatoriu de 500 de secunde de putere redusă care nu a fost inclus în setul de date original. Această abordare a fost aleasă dat fiind faptul că provoacă vârfuri bruște de amplitudine scăzută în semnalul de acționare. Figura 4.10 compară forma vitezei reale și prezise a ventilatorului pentru intrările date.

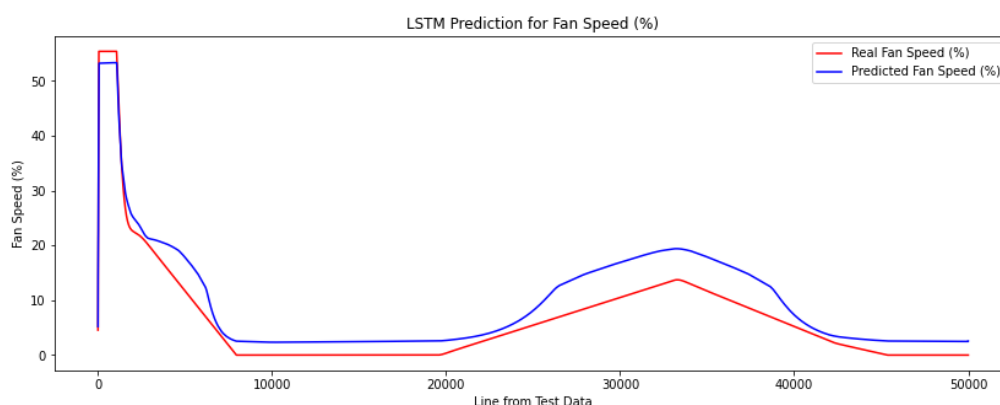
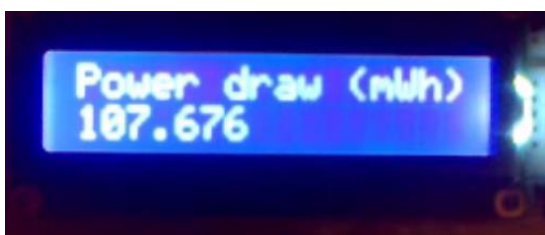


Fig.4.10 Capacitatea rețelei neuronale LSTM de a generaliza comportamentul regulatorului FEM PID

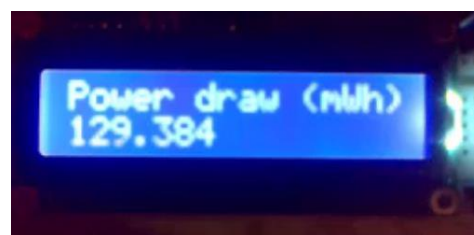
4.16. Evaluarea performanțelor regulatorului

Prima etapă a evaluării performanțelor regulatorului constă în extragerea semnalului de acționare al ventilatoarelor de răcire pe baza ciclului de instrucțiuni descris în secțiunea 4.9. Temperatura de referință este de 67°C. În următoarea etapă, primul microcontroler programează ventilatoarele de răcire pe baza semnalului de acționare, în timp ce al doilea microcontroler realizează procesul de achiziție a datelor.

Pentru determinarea performanțelor regulatorului se evaluează consumul de energie și zgomotul generat de ventilatoare. În acest scop, modul de funcționare al celui de-al doilea microcontroler este schimbat la măsurarea puterii. Aceeași procedură este luată în considerare pentru evaluarea caracteristicilor de performanță ale regulatorului integrat în placa de baza (Smart Fan). În acest caz, semnalul de acționare este generat direct la nivelul pinilor PWM. Temperatura de referință a fost crescută la 69,2°C pentru a ține cont de efectul rezistenței termice (având în vedere faptul că regulatorul integrat în placa de bază funcționează prin achiziționarea temperaturii de la senzorul intern care este încorporat în pastila UC). Figura 4.11 (a) și (b) ilustrează consumul total de energie la 500 de secunde pentru cele două metodologii de control.



(a)



(b)

Fig.4.11. Citirea consumului de energie pe ecran la $\Delta t = 500$ secunde

Tabelul 4.2 prezintă nivelurile de zgomot măsurate de microfonul extern pentru ambele scenarii de testare:

Table 4.2 Nivelurile de zgomot pentru regulatorul FEM PID

Metodologia de control	Nivel maxim de zgomot (dB)	Nivel minim de zgomot (dB)	Nivel mediu de zgomot (dB)
Regulator FEM PID	26.67	12.23	23.66
Regulator pentru ventilatorul inteligent	27	13.51	25.88

Figura 4.12 compară curbele de temperatură ale regulatorului FEM PID cu cele ale regulatorului integrat în placa de bază.

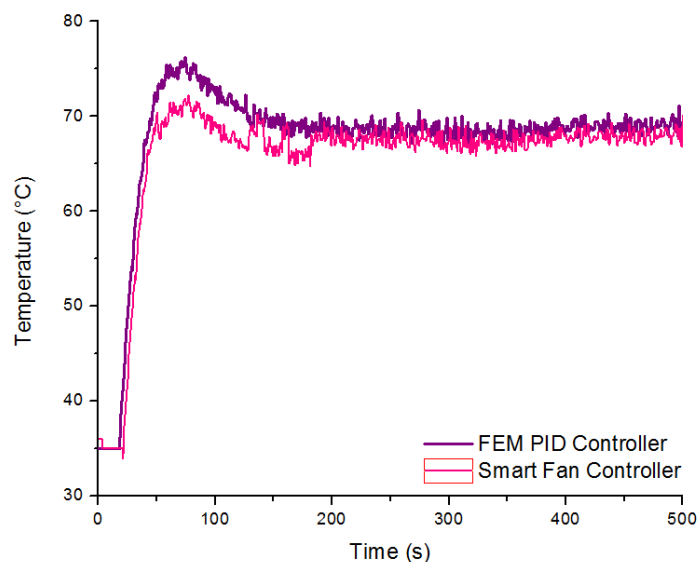


Fig. 4.12. Temperaturile experimentale pentru regulatorul FEM PID și pentru cel integrat în placa de bază

În tabelul 4.3 sunt sintetizate caracteristicile de performanță a celor două regulatoare.

Tabel 4.3 Compararea performanțelor de control

Caracteristică	Regulator FEM PID	Regulator Smart Fan
Timpul în creștere (s)	50	30
Timp de stabilizare (s)	150	100
Depășire (%)	12	5
Consum energetic (mWh)	107.676	129.384
Nivelul mediu al zgomotului (dB)	23.66	25.88

Este efectuată o validare încrucișată între regulatorul FEM PID simulat și cel anticipat de rețeaua neuronală. În acest scop, ciclul de lucru considerat anterior este utilizat ca flux de căldură de intrare în analiza termică. Pentru a programa ventilatoarele de răcire în sistemul real este folosit semnalul de acționare derivat din simulare. Rezultatele obținute indică diferențe de +6,11% în cazul consumului de energie și -7,21% în cazul nivelurilor medii de zgomot (Fig. 4.13).

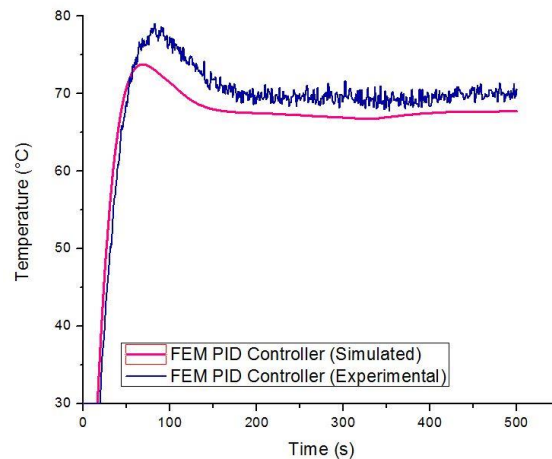


Fig. 4.13 Validarea regulatorului FEM PID vs. cel prezis de rețeaua neuronală

Secțiunea 4. Concluzii

Prezentul capitol abordează aspectele limitative ale fluxurilor de lucru necesare pentru dezvoltarea sistemelor de răcire, cu accent pe procesul de dezvoltare a reguletoarelor de temperatură. Formalizarea metodologiei se realizează prin reutilizarea modelelor de simulare care au fost finalizate în capitolele anterioare. Problemele legate de cerințele de calcul ale reguletoarelor FEM PID sunt abordate prin reducerea dimensiunii problemei transferului de căldură. În lucrare este propusă o abordare a simulării care se bazează pe modelarea transferului de căldură cu parametri concentrați și subrutine definite de utilizator pentru a facilita implementarea în lumea reală a metodologiei de control. Pentru generalizarea abordării se utilizează RNN de tip LSTM.

Contribuțiile originale ale lucrării pot fi grupate în următoarele categorii:

1. **Contribuții teoretice:** dezvoltarea unui regulator de temperatură PID care ține cont de limita de saturație și de metoda de lichidare a integralei și implementarea acestuia într-un mediu de simulare FEM;
2. **Contribuții metodologice:** conversia variabilei de proces la ieșirea regulatorului într-un semnal semnificativ prin intermediul unei matrice de convecție echivalentă; reglajul regulatorului prin folosirea metodei euristice Ziegler-Nichols și generalizarea semnalului de acționare pe baza unui model LSTM cu o singură intrare, o singură ieșire;
3. **Contribuții originale de modelare FEM:** abordarea simplificării modelului bazată pe reducerea dimensionalității problemei și definirea condițiilor de simetrie;
4. **Implementarea IAC:** a fost finalizată o implementare originală SAMCEF-Patran;
5. **Procedura experimentală** originală și post-procesarea rezultatelor.

Concluziile cercetării au fost publicate în:

- **Alexandru, T. G., & Pupaza, C. (2021).** The development of PID temperature controllers based on FEM thermal analysis. In MATEC Web of Conferences (Vol. 342). EDP Sciences, Indexing in progress.

Abordarea propusă poate facilita dezvoltarea de soluții precise pentru modernizarea inteligentă fără a fi necesare cunoștințe și resurse extinse prin tratarea atât a problemelor de proiectare a sistemelor de răcire, cât și de dezvoltare a reguletoarelor de temperatură. Chiar și așa, materialele utilizate pentru dezvoltarea radiatoarelor, precum și învechirea imprevizibilă a sistemelor înglobate în contextul Industriei 4.0 aduc în discuție probleme legate de dezvoltarea durabilă. Acest aspect este abordat în capitolul 5 al lucrării.

Secțiunea 1. Proiectarea sustenabilă a sistemelor de răcire

5.1. Aspecte generale

Sistemele de răcire reprezintă un subsistem vital al unităților de control computerizate nou dezvoltate sau modernizate. Ansamblul rezultat al componentelor de răcire are scopul de a elimina puterea disipată de sursele de căldură active. În acest fel, funcționarea sigură și fiabilă a dispozitivelor industriale este asigurată pe întregul ciclu de viață al acestora. Gama largă de materiale utilizate în concepția sistemelor de răcire, complexitatea tehnologiilor de fabricație necesare dezvoltării radiatoarelor și consumul de energie rezultat din funcționarea soluțiilor de răcire prin convecție forțată aduc în discuție probleme de mediu (Fig. 5.1).

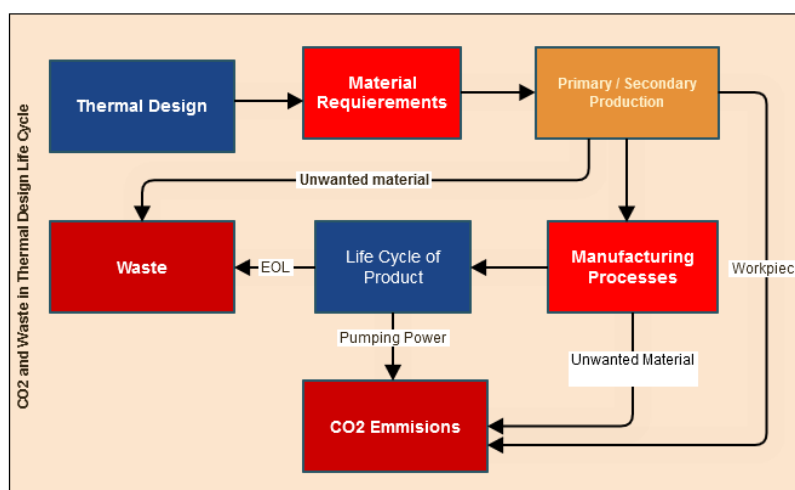


Fig. 5.1 Emisii de CO₂ și deșeuri rezultate din ciclul de viață al sistemelor de răcire

În faza de proiectare, inginerii decid specificațiile geometrice optime ale componentelor de răcire și gama de ventilatoare sau suflante care sunt necesare pentru a îmbunătăți eliminarea căldurii [L09]. Fabricarea radiatoarelor necesită utilizarea pe scară largă a semifabricatelor din materiale neferoase. De cele mai multe ori, tehnologiile de extrudare, turnare la înaltă presiune sau prelucrări prin așchiere sunt folosite pentru a transforma materia primă în diferite configurații de aripioare de răcire [E02]. Energia consumată și instrumentele necesare pentru a finaliza acest proces reprezintă o sursă de emisii de CO₂ și deșeuri [A07]. În plus, amprente de carbon apar și din cauza producției primare și secundare a pieselor de prelucrat, precum și a funcționării ventilatoarelor de răcire.

În contextul industrial actual o altă problemă de mediu a sistemelor de răcire se datorează învechirii imprevizibile a sistemelor înglobate care sunt implementate în unitățile de control computerizate ale dispozitivelor inteligente [M05]. În acest sens, noi soluții hardware apar pe piață în fiecare an pentru a sprijini cerințele de calcul din ce în ce mai mari ale tehnologiilor transformatoare ale Industriei 4.0. Pentru a fi competitive, companiile îmbunătățesc continuu resursele hardware/software ale dispozitivelor industriale. În consecință, apar deșeuri electronice și emisii de CO₂, care necesită strategii adecvate de scoatere din uz (EOL).

5.2. Considerații teoretice

Un exemplu de estimare a deșeurilor și al amprente de carbon este oferit în continuare, luând în considerare un radiator care cuprinde aripioare de înălțime diferită fabricat prin frezarea unei foi de aluminiu de 70x100x100 mm. Specificațiile geometrice ale soluției sunt prezentate în figura 5.2.

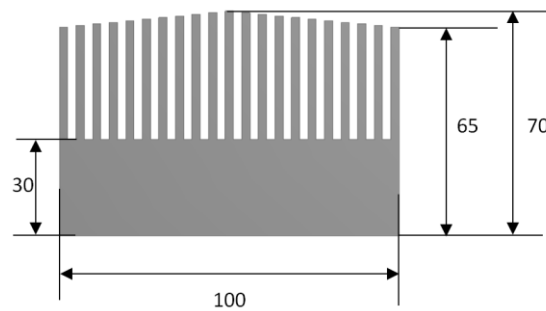


Fig.5.2 Specificațiile geometrice ale radiatorului

Abordarea presupune în prima etapă evaluarea emisiilor de CO₂ rezultate din procesul de semifabricare. Toate informațiile sunt extrase din [G05] luând în considerare procesul Bayern-Hall Hérault Route pentru producția primară de aluminiu, precum și producția secundară de aluminiu prin retopire și turnare a deșeurilor.

În medie, pentru fabricarea piesei din tablă de aluminiu de producție primară sunt eliberate 26,38 KgCO₂ în atmosferă sau 1,19 KgCO₂ prin mijloace de producție secundară.

Amprenta de carbon a procesului de prelucrare prin așchiere este estimată în etapa următoare. În acest scop, cerințele de putere netă (P_C) și timpul de prelucrare (T_C) sunt derivate din parametrii regimului de așchiere [I04]:

$$P_C = \frac{a_e \cdot AP \cdot V_f \cdot k_c}{60 \cdot 10^6} \quad (5.1)$$

Unde a_e reprezintă adâncimea radială de așchiere (mm), AP adâncimea axială de așchiere (mm), V_f reprezintă viteza de avans (mm/min) și k_c reprezintă porțiunea specifică de așchiere (N/mm²).

$$T_C = \frac{l_m}{V_f} \quad (5.2)$$

Unde l_m reprezintă lungimea de prelucrare (mm).

Cerințele totale de energie (KWh) sunt calculate prin înmulțirea puterii nete (KW) cu timpul de prelucrare (h) pentru fiecare caracteristică de frezare (i):

$$P_{total} = \sum P_{C_i} \cdot T_{C_i} \quad (5.3)$$

În majoritatea cazurilor, mașinile de frezat transformă energia electrică în energie mecanică. Prin urmare, amprenta de carbon a procesului poate fi estimată din P_{total} luând în considerare factorul mediu de emisie de 0,56 KgCO₂/KWh derivat din [***01].

Pentru a calcula parametrii regimului de așchiere este utilizată aplicația Sandvik CoroPlus. Se consideră un centru de prelucrare cu puterea de 28 KW, care dispune de un arbore principal cu viteză de rotație de 18000 RPM. Semifabricatul folosit este o placă plană din aliaj de aluminiu de uz general cu duritate 90 HB. În total sunt eliberate în atmosferă 0,0250 KgCO₂ pentru prelucrarea aripioarelor și finisarea bazei radiatorului.

În etapa următoare, amprenta de carbon rezultată din funcționarea ventilatorului de răcire este estimată pentru un ciclu de viață de 10000 de ore. În acest scop, este considerat un ventilator de 80 mm care funcționează la o viteză medie de 2000 RPM, cu un debit de aer de 24 CFM. Pe baza fișei tehnice a produsului, consumul de energie instantaneu al ventilatorului este de 0,069 W (derivat din V_{ce} și I_c). Astfel, amprenta de carbon pentru 10000 de ore poate fi estimată la 0,22 KgCO₂.

Rezultatele abordării propuse indică faptul că peste 99% din amprenta de carbon se datorează producției primare a semifabricatului. În acest sens, o abordare de dezvoltare durabilă

aplicabilă sistemelor de răcire ar trebui să se concentreze pe limitarea necesarului de materiale. Chiar și așa, o soluție mai eficientă constă în înlocuirea parțială sau completă a aliajelor de aluminiu sau cupru cu materiale alternative sau mai ecologice. Aspectul limitativ al acestei perspective este faptul că nu toate materialele existente permit fabricarea radiatoarelor ca o singură componentă. În plus, expunerea pe termen lung la fluidele de răcire precum și variațiile de temperatură ale sursei de căldură limitează și mai mult gama de soluții disponibile.

Secțiunea 2. Abordarea propusă

Obiectivul prezentului capitol este acela de a studia perspectiva integrării alabandinei, o sulfură de mangan care este răspândită în toate sterilele instalațiilor miniere de Au-Ag-Te în proiectarea radiatoarelor cu convecție forțată.

5.3. Aspecte mineralogice și geologice

În România, concentrații semnificative de alabandină pot fi întâlnite în sterilul din jurul exploatărilor miniere din Săcărâmb Au-Ag-Te (localitate de tip) și în zăcămintele de minereu polimetalic din Baia de Arieș [D07].

Sterilul de sulfosare reprezintă o preocupare de mediu la nivel mondial datorită oxidabilității și solubilității unor astfel de minerale [D03, P07]. Din acest punct de vedere, expunerea pe termen lung a alabandinei la aer sau apă disociază manganul și sulful provocând poluarea apelor subterane. În acest sens, găsirea unei soluții viabile economic pentru acest material poate rezolva mai multe probleme.

5.4. Reprezentarea schematică a metodologiei

Abordarea propusă pentru integrarea alabandinei în procesele de proiectare a sistemelor de răcire cuprinde 4 niveluri de abstractizare:

- 1) Evaluarea pericolului de toxicitate:** la expunerea pe termen lung la aer sau apă, alabandina aduce în discuție pericolele de toxicitate datorită disocierii manganului și a sulfului. Ca urmare, această materie primă nu poate fi utilizată în concepția sistemelor de răcire, în special în cazul convecției forțate. Chiar și așa, o soluție pentru limitarea solubilității și oxidabilității sulfosărilor constă în acoperirea suprafețelor exterioare ale materialului cu un grund protector.
- 2) Caracteristici termice:** conductivitatea termică a materialelor folosite în concepția sistemelor de răcire are o mare influență asupra eficienței generale a aripioarelor. În acest sens, caracteristicile termice ale alabandinei sunt analizate prin mijloace experimentale pentru a identifica dacă mostra este semiconductor, conductor sau izolator. De asemenea, este important să se studieze influența stratului de protecție asupra caracteristicilor menționate anterior.
- 3) Procesul de dezvoltare a sistemului de răcire:** datorită sistemului său de cristalizare izometrică, alabandina poate fi prelucrată numai prin intermediul tehnologiilor de debitare la rece în corpuri de formă dreptunghiulară. În funcție de rezistența termică dorită, se pot dezvolta corpuri din alabandină care să înlocuiască radiatoarele convenționale. Atunci când sursa de căldură disipează o cantitate semnificativă de energie, se poate implementa un radiator cu material hibrid, prin combinarea alabandinei cu o placă subțire metalică. Acest scenariu este aplicabil numai sistemelor de răcire cu convecție forțată.

- 4) **Optimizare:** Din perspectiva dezvoltării durabile a produsului propus, obiectivul abordării este de a maximiza integrarea materialelor alternative în concepția sistemelor de răcire. În acest scop, radiatorul prezentat inițial în lucrare este supus unor studii de dinamica fluidelor pentru a identifica secvența optimă de dispunere a corpurilor de alabandină. Rezultatele obținute sunt utilizate pentru implementarea soluției finale.

O reprezentare schematică a abordării este ilustrată în figura.5.3.

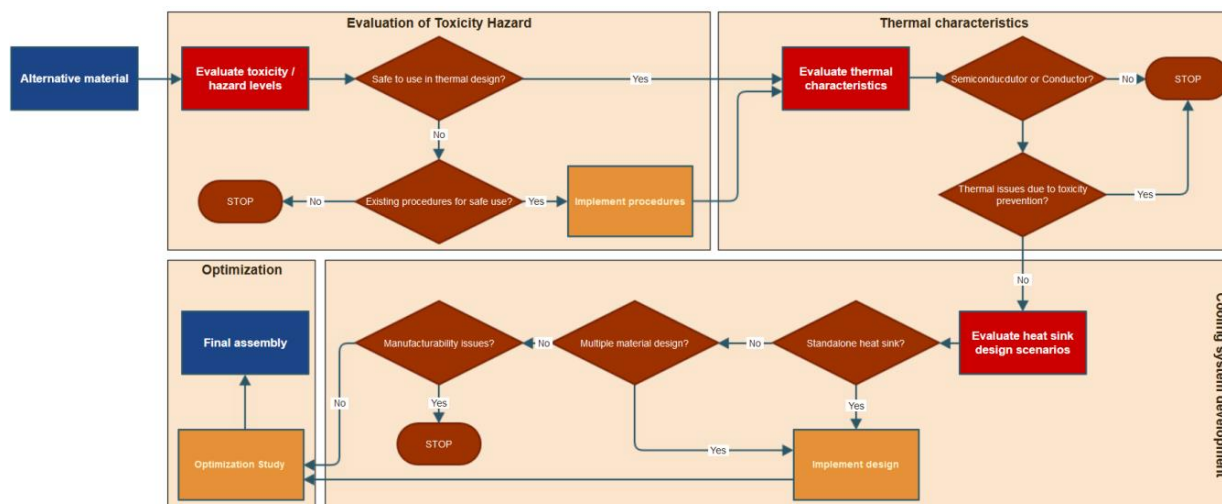


Fig. 5.3 Reprezentarea schematică a abordării propuse

Secțiunea 3. Studiu de caz

Conceptele enunțate sunt dovedite prin intermediul unui stand experimental care cuprinde o sursă de căldură cu putere constantă și un sistem de răcire cu convecție forțată (Fig. 5.4).

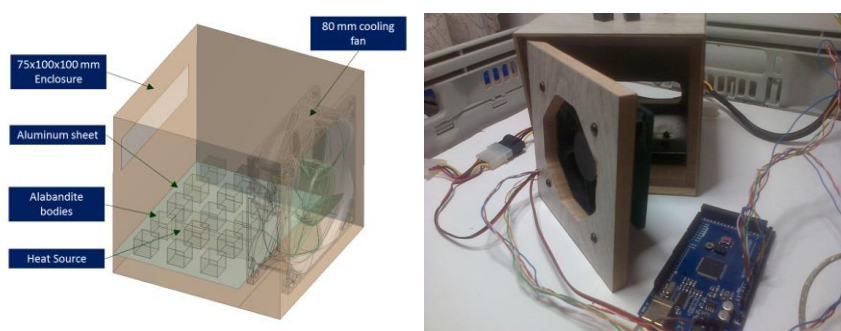


Fig.5.4 Sistem de răcire cu convecție forțată

Un radiator cu aripioare lipite este implementat pentru a menține temperatura componentei active sub limitele sale operaționale. Aripioarele sunt materializate prin corpi dreptunghiulare din alabandină. Debitul de aer este asigurat de un ventilator de admisie montat pe partea frontală a carcasei.

5.5. Evaluarea pericolului de toxicitate

Un grund acrilic se aplică cu ajutorul unui pistol pneumatic de vopsit pentru a acoperi suprafețele exterioare ale materialului. O problemă cunoscută a vopselelor acrilice este

conductivitatea lor termică scăzută, dat fiind faptul că pentru componenta de bază a acestor produse este un izolator termoplastic [C04]. Din acest punct de vedere, se așteaptă o scădere substanțială a rezistenței termice a alabandinei. Pentru a depăși astfel de probleme, soluția inițială este amestecată cu pulbere de grafit. Raportul se decide ca 1/4 cu diluție a vâscozității de 10% pentru asigurarea curgerii amestecului rezultat prin duza pistolului pneumatic. În acest fel, pulberea de grafit aderă la suprafețele corpului de alabandină sporind conductanța de contact termic, în timp ce stratul de grund asigură o protecție optimă împotriva oxidabilității și solubilității (Fig. 5.5).

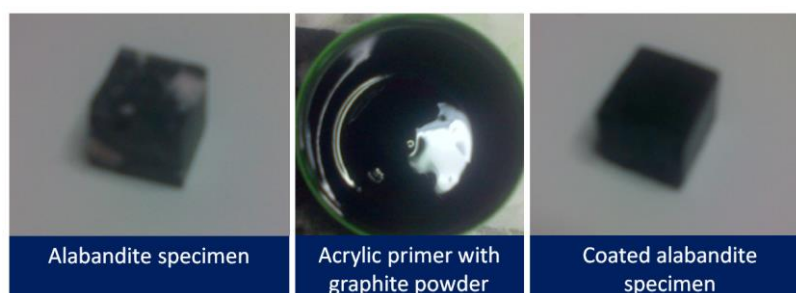


Fig. 5.5. Probă de alabandină de bază și tratată

5.6. Caracteristici termice

Densitatea probei din alabandină este calculată pe baza masei acestuia: $9,5 \cdot 10^{-4}$ Kg pentru un volum de 250 mm^3 , rezultând o densitate de $3,8 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$.

O procedură experimentală este dezvoltată pentru a evalua caracteristicile termice ale speciimenelor din alabandină de bază și tratată (Fig. 5.6).

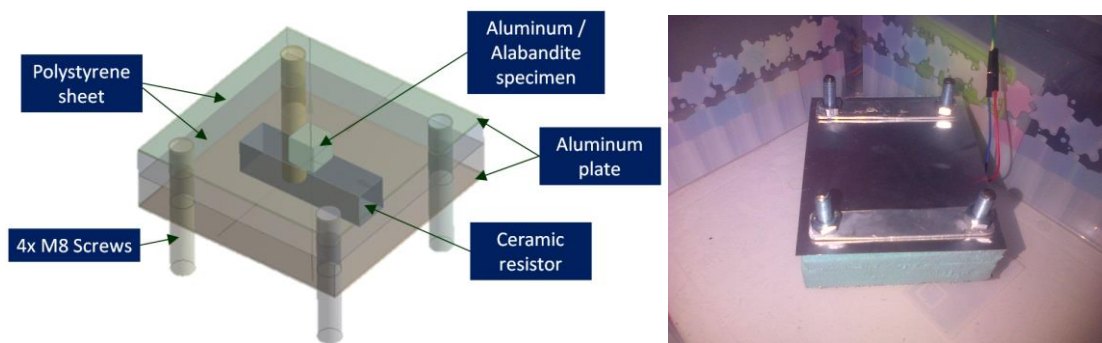


Fig. 5.6. Structura experimentală pentru evaluarea caracteristicilor termice

Platforma de testare cuprinde două foi de polistiren care încorporează o rezistență ceramică cu disipare constantă a energiei și o probă pătrată din materialul analizat. Cele două corpuri sunt în contact unul cu altul, între suprafețele lor de joncțiune apărând o diferență de temperatură. Ansamblul este îmbinat prin intermediul a două plăci de aluminiu pentru a asigura conductanța optimă. Patru șuruburi M8 sunt utilizate pentru a fixa ansamblul. între suprafața superioară a rezistenței și placa superioară de aluminiu are loc o diferență de temperatură. Conductivitatea termică a oricărei probe poate fi evaluată pe baza legii lui Fourier a conducției prin măsurarea temperaturii plăcii reci. Pe de altă parte, se poate efectua o analiză termică în regim tranzitoriu pentru a aproxima căldura specifică a materialului studiat pe baza procedurii de optimizare directă implementată în interfața Workbench [***02].

Un rezumat al caracteristicilor termice derivate pentru o probă din alabandină pură este prezentat mai jos:

- Densitate: $3,8 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$
- Conductivitate termică: $0,718 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
- Căldură specifică: $251,92 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$

În etapa următoare, caracteristicile termice sunt evaluate pentru proba din alabandină tratată. Are loc doar o modificare minoră a valorilor inițiale:

- Densitate: $3.8 \cdot 10^{-9}$ t/mm³
- Conductivitate termică: 0.803 W/m°C
- Căldură specifică: 303 J/Kg°C

5.7. Dezvoltarea sistemului de răcire

Corpurile din alabandină tratate pot fi implementate ca elemente individuale de răcire în aplicații de putere redusă care necesită valori ridicate de rezistență termică. Chiar și așa, o utilizare mai eficientă a acestui material poate fi realizată prin dezvoltarea radiatoarelor cu aripioare lipite. În acest sens, o foaie subțire de aluminiu poate fi folosită ca placă rece pentru lipirea cuburilor din alabandină care să acționeze ca aripioare (Fig. 5.7).

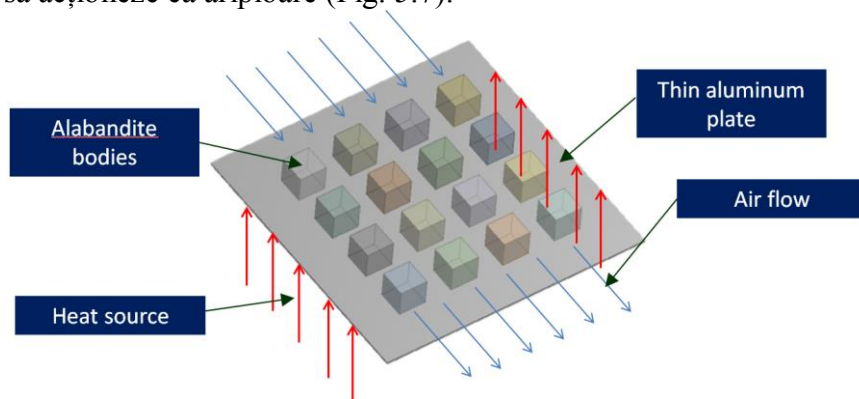


Fig. 5.7. Prototip virtual al proiectării radiatorului cu aripioare lipite

În acest fel, traseul fluxului de aer este constrâns datorită existenței unor pereți suplimentari în domeniul de curgere al incintei. În apropierea corpurilor din alabandină are loc o creștere locală a vitezei fluidului de răcire, rezultând drept consecință un transfer de căldură convectiv îmbunătățit. Această comportare poate fi evidențiată prin intermediul unui studiu de dinamica fluidelor realizat cu ajutorul ANSYS Fluent. În acest scop, o placă de aluminiu pătrată de 100x100 mm este supusă unui flux de aer de 0,5 m/s, cu numărul Reynolds în domeniul laminar. Totodată, în centrul de greutate al plăcii este adăugat un corp din alabandină de 10x10 mm. În acest caz, curgerea fluidului are caracter turbulent, rezolvarea realizându-se folosind modelul k-ε. O schimbare clară a traseului curentului de aer poate fi observată între configurația inițială și cea actualizată (Fig. 5.8 – a și b).

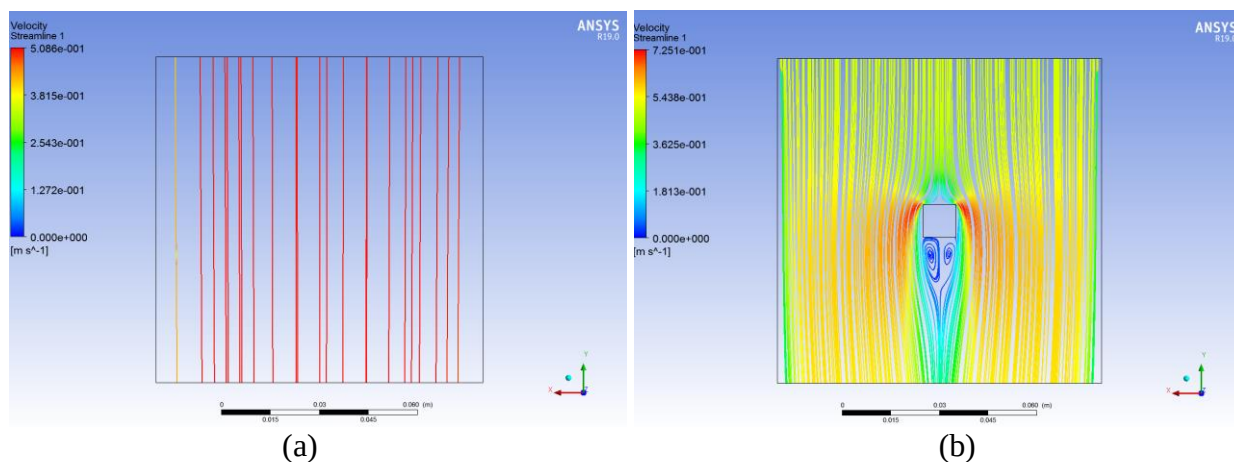


Fig. 5.8 Traseul de curgere a fluidului fără corpul din alabandină (a) și considerând corpul de alabandină (b)

În cazul laminar, viteza fluidului de răcire este egală la intrare și ieșire. Pe de altă parte, datorită prezenței pereților verticali în centrul de greutate al plăcii, poate fi observată în cazul regimului turbulent o creștere substanțială de 50% a vitezei aerului.

În acest sens, corpurile dreptunghiulare din alabandină pot fi utilizate pentru a dirija fluxul de aer. În plus, capacitățile semiconductoare ale materialului vor contribui și la disiparea căldurii.

5.8. Studiu de optimizare

Un obiectiv în dezvoltarea acestui radiator alternativ constă în identificarea secvenței optime de dispunere a aripioarelor pentru a asigura o răcire optimă. Se efectuează un studiu al suprafeței de răspuns pentru rezolvarea problemei descrise anterior și identificarea scenariului de proiectare adecvat. În acest scop, sunt parametrizate cotele de gabarit ale geometriei corpului. Variabila de ieșire reprezintă temperatura maximă care apare pe placa rece la o putere constantă de disipare de 0,5W. Figura 5.9 prezintă suprafața de răspuns rezultată.

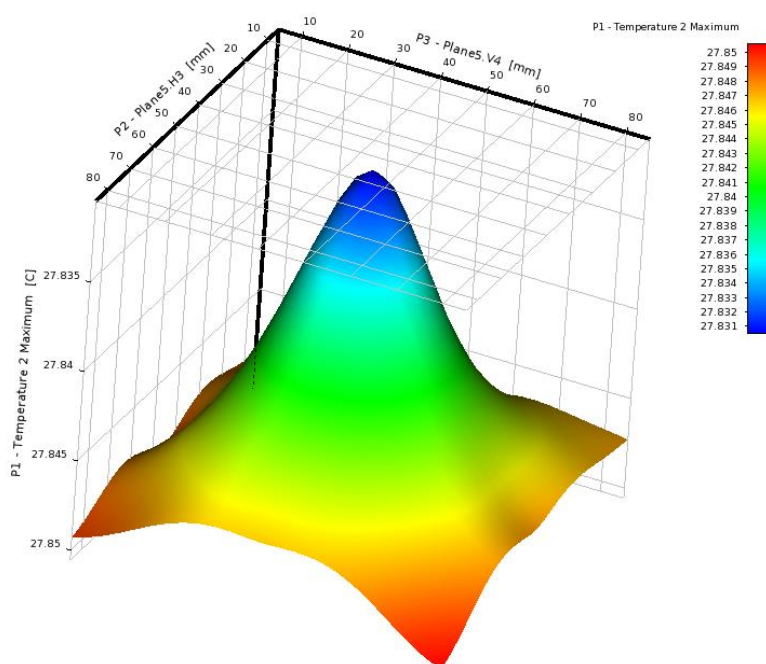
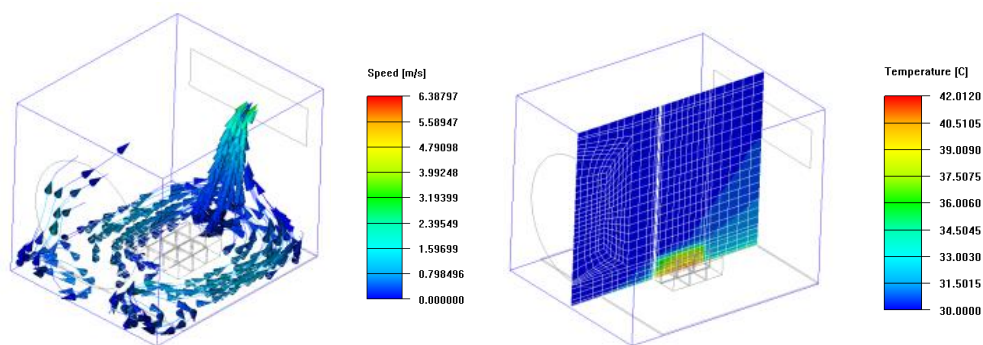


Fig. 5.9 XY Locația probei din alabandină în raport cu creșterea temperaturii plăcii reci

Rezultatele evidențiază faptul că parametrii optimi de răcire sunt obținuți atunci când corpurile din alabandină sunt dispuse în centrul plăcii reci, temperaturile fiind cu 0,07% mai mici în comparație cu cele din oricare alte scenarii. Acest lucru poate fi explicat prin gradientul vitezei din figura 5.8 care subliniază o zonă largă de valori maxime care sunt distribuite egal în colțurile din stânga și din dreapta ale corpului dreptunghiular.

5.9. Implementarea conceptelor date

Rezultatele și concluziile enunțate anterior sunt utilizate pentru implementarea conceptelor date pentru sistemul de răcire cu convecție forțată descris la începutul acestui capitol. Pentru a reproduce comportarea platformei de testare se realizează un studiu de simulare. ANSYS Icepak este utilizat în acest scop, este utilizat. Modelul de simulare este compus din 9 corpuri din alabandină care sunt poziționate în centrul de greutate al plăcii reci. Dimensiunea mostrelor utilizate este de 10x10x10 mm. Existența corpurilor din alabandină constrânge fluxul de aer, forțând creșterea vitezei acestuia în apropierea suprafețelor verticale opuse ($\geq 1,59$ m/s). În consecință, sunt îmbunătățite capacitățile de răcire prin convecție forțată. Vectorii de viteză și distribuția de temperatură sunt reprezentate în figura 5.10.



Air Speed – 6.38 m/s

Temperature – 42.5°C

Fig. 5.10 Viteza aerului și profilul de temperatură pentru scenariul radiatorului cu aripioare lipite

Rezultatele simulării sunt verificate prin intermediul unui stand experimentale (Fig. 5.11).

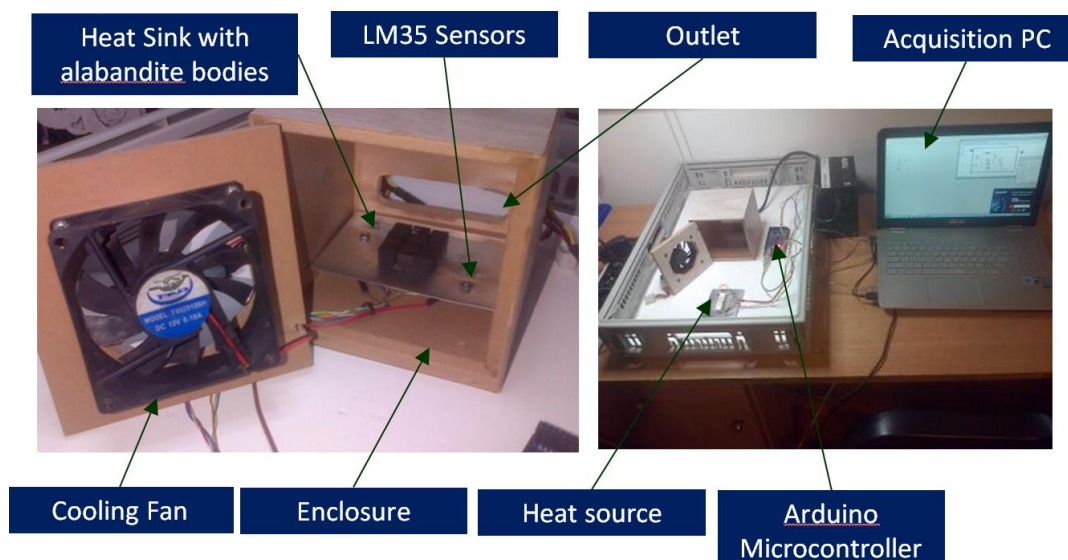


Fig. 5.11 Configurația experimentală utilizată pentru a verifica rezultatele simulării

În acest scop, doi senzori LM35 sunt montați în două colțuri opuse ale plăcii reci. Pentru achiziția de temperaturi este utilizat un microcontroler compatibil Arduino Mega 2560. Figura 5.12 prezintă cele două soluții de răcire analizate, accentul fiind pus pe modul de poziționare a sursei de căldură și a sistemului de măsurare.

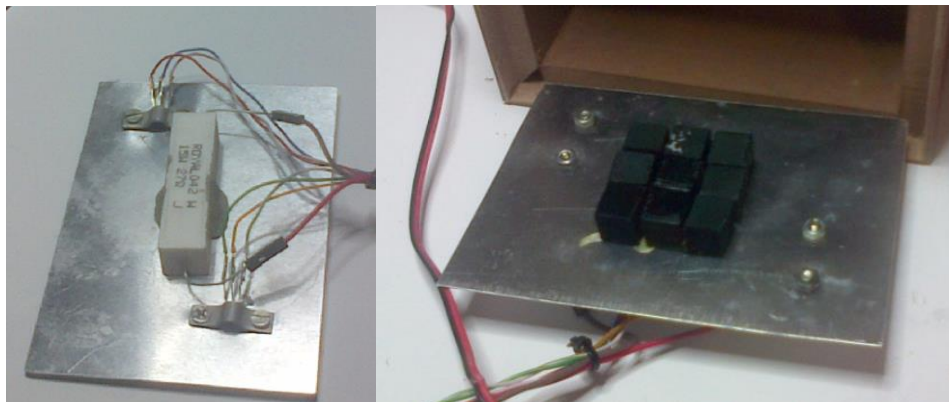


Fig. 5.12 Radiator de căldură cu aripioare lipite care cuprinde o placă subțire de aluminiu și 9 corpi din alabandină

Ciclul de testare este de 1000 secunde pentru ca sistemul să atingă starea de echilibru. Se are în vedere valoarea medie a semnalelor procesate de la cei doi senzori. Figura 5.13 ilustrează graficul de variație a temperaturii pentru scenariile de răcire cu plăci reci.

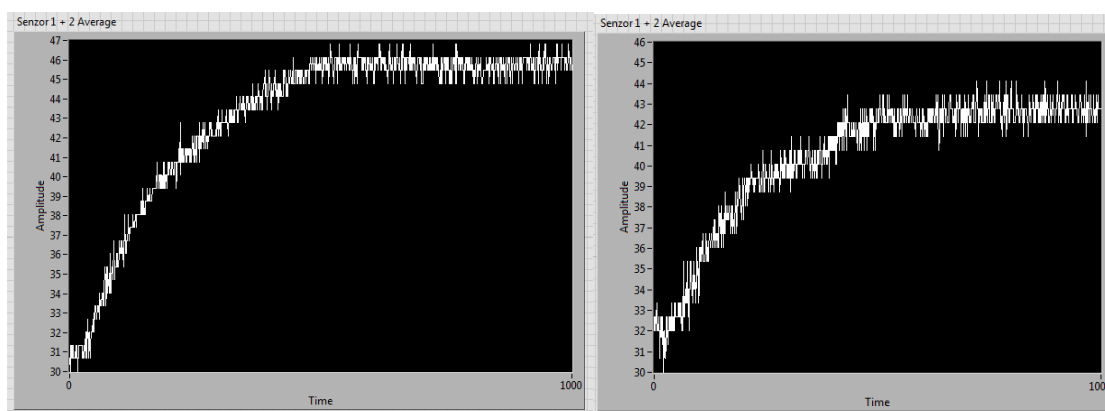


Fig. 5.13 Graficul timp față de temperatură pentru scenariul de răcire a plăcii reci

Temperatura de echilibru este estimată la 46°C.

În pasul următor, se evaluează comportamentul radiatorului cu aripioare lipite prin folosirea aceluiași proceduri. Temperatura de echilibru este estimată la 43,5°C.

5.10. Reducerea amprentei de carbon

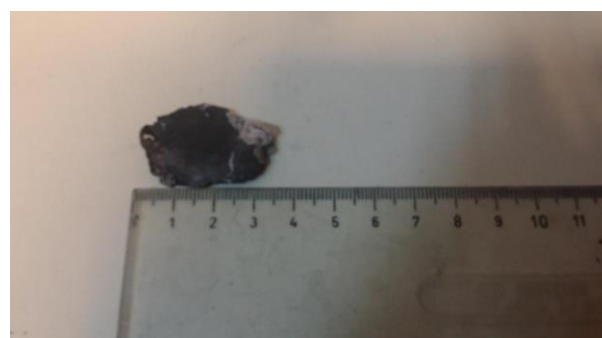
În etapa următoare, aripioarele din alabandină sunt înlocuite cu aripioare verticale din aluminiu. Specificațiile geometrice ale acestora sunt obținute cu ajutorul metodologiei analitice descrise în [L08]. Informațiile referitoare la numărul Reynolds și la coeficienții de transfer de căldură care apar datorită regimului de curgere turbulent sunt extrase din simulările anterioare.

Procedura de estimare a amprentei de carbon prezentată în secțiunea 2 este utilizată pentru a evalua emisiile de CO₂ rezultate din semifabricarea plăcii de aluminiu, prelucrarea aripioarelor și datorită necesarului energetic al ventilatorului de răcire. În total se disipă 2,38 KgCO₂ în cazul producției primare și 0,30 KgCO₂ în cazul producției secundare.

Amprenta de carbon a tehnologiei de debitare la rece utilizată pentru prelucrarea aripioarelor din alabandină este estimată prin măsurarea experimentală a cerințelor de energie ale procesului. În acest sens, un corp din alabandină de 35x15x1 mm este debitat utilizând o mașină de precizie Struers Accutom-5 (Fig. 5.14 – a și b).



(a)



(b)

Fig. 5.14 (a) Mașină de tăiat și șlefuit de precizie Steuers Acutom 5; (b) proba din alabandină

Cerințele energetice ale procesului sunt măsurate cu ajutorul unui calculator de energie cu afișaj Orno OR-WAT-419(GS) (Fig.5.15).



Fig. 5.15 Calculator de energie cu afișaj Orno OR-WAT-419(GS)

Pentru timpul de debitare de 0,05 ore, consumul maxim instantaneu este de 0,158 KW. Astfel, energia totală necesară procesării a 5250 mm² de alabandină este de 0,008 KWh sau $1,52 \cdot 10^{-6}$ KWh pentru fiecare mm². În cazul radiatorului cu aripioare lipite, cele 9 aripioare din alabandină au un volum total de 9000 mm². În concluzie, energia totală necesară pentru fabricarea aripioarelor este de 0,0137 KWh sau 0,00152 KWh pentru fiecare aripioară.

Economii de carbon de până la 78% pot fi realizate în cazul producției primare și de 16% în cazul producției secundare. Pentru informare, tabelul 5.1 reprezintă modificările procentuale detaliate pentru fabricarea celor două radiatoare.

Tabelul 5.1. Modificări procentuale detaliate pentru cele două radiatoare

Semifabricat	Amprenta de Carbon (KgCO ₂)		Diferențe (%)	Prelucrarea aripioarelor	Amprenta de Carbon (KgCO ₂)		Diferențe (%)
	Radiatorul standard	Radiatorul cu aripioare lipite			Radiatorul standard	Radiatorul cu aripioare lipite	
Producție primară	2.13	0.28	-87.02	Producție primară	0.0277	0.0243	-12.28
Producție secundară	0.05	0.01	-87.02	Producție secundară			

Rezultatele obținute demonstrează că economii semnificative de carbon (până la 1,85 Kg CO₂ pentru studiul de față) pot fi realizate prin integrarea alabandinei ca soluție alternativă pentru proiectarea aripioarelor de răcire în radiatoarele cu convecție forțată. În plus, viabilitatea economică a acestui material poate avea efecte pozitive pe termen lung asupra populațiilor care sunt afectate de poluarea cu mangan.

Secțiunea 4. Concluzii

Prezentul capitol abordează problemele de mediu ale procesului de proiectare a sistemelor de răcire în contextul industrial actual. Pe parcursul lucrării sunt evidențiate trei surse principale de emisii de CO₂: producția de semifabricate pentru radiatoare, prelucrarea aripioarelor de răcire și energia consumată de către ventilatoare sau suflante. Obiectivul unei abordări de dezvoltare

durabilă aplicabilă sistemelor de răcire are ca scop minimizarea necesarului de materie primă. În acest sens, abordarea propusă investighează capacitatea de integrare a alabandinei în proiectarea radiatoarelor cu aripioare lipite pentru utilizarea în medii cu convecție forțată. În prima etapă, problemele de toxicitate ale materialului sunt abordate prin acoperirea suprafețelor sale exterioare cu un grund acrilic, care este amestecat cu pulbere de grafit. Un stand experimental este dezvoltat pentru a evalua caracteristicile termice ale specimenelor din alabandină de referință și a celor tratate cu grund acrilic. Rezultatele obținute indică faptul că alabandina este un semiconductor. De asemenea, stratul aplicat pe pereții exteriori nu are un efect semnificativ asupra caracteristicilor termice ale materialului. Este propusă o variantă constructivă de radiator hibrid, care cuprinde o placă rece subțire de aluminiu cu cuburi din alabandină lipite. Secvența optimă de dispunere a aripioarelor este decisă cu sprijinul metodologiei suprafeței de răspuns. Studiul evidențiază faptul că răcirea optimă se realizează atunci când corpurile suplimentare sunt poziționate în apropierea centrului de greutate al plăcii reci. Conceptele date sunt dovedite prin intermediul unui sistem de răcire prin convecție forțată real. O comparație între radiatorul propus și o soluție constructivă convențională este inclusă pentru a sublinia economiile de carbon ale abordării.

Contribuțiile originale ale lucrării pot fi grupate în următoarele categorii:

1. **Contribuții teoretice:** estimarea emisiilor de CO₂ rezultate din ciclul de viață al sistemelor de răcire
2. **Contribuții metodologice:** dezvoltarea unui sistem de protecție acrilică pentru minimizarea toxicității alabandinei; proiectarea unui radiator cu aripioare lipite care cuprinde aripioare din alabandină pentru răcirea forțată prin convecție.
3. **Contribuții originale de modelare FEM:** evaluarea caracteristicilor termice ale alabandinei pe baza unor proceduri experimentale și de simulare
4. **Implementarea IAC:** au fost finalizate implementări originale ANSYS Mechanical și Fluent.
5. **Procedura experimentală** și post-procesarea rezultatelor.

Rezultatele cercetării au fost publicate în:

- **Alexandru, T.G. & Pupaza, C.** (2017), “Eco-design of heat sinks based on CAD/CAE techniques”, Proceedings in Manufacturing Systems, Vol.12, Iss.1, pp. 9-16, 2017.

Cercetările viitoare se vor concentra pe minimizarea erorii de măsurare prin îmbunătățirea procedurii experimentale. Un alt obiectiv viitor al cercetării constă în evaluarea potențialului utilizării nano-pulberilor ca tehnologie alternativă de acoperire.

Concluzii Finale

Modernizarea inteligentă reprezintă o abordare alternativă de transformare industrială care vizează modernizarea unităților de control computerizate învechite ale dispozitivelor industriale. În acest fel, automatizarea convențională poate fi convertită în CPS cu suportul unor platforme hardware suplimentare. Acest proces beneficiază de o mare varietate de programe de calculator, precum și de interfețe de programare “high-level”. Chiar și așa, o serie de fluxuri de lucru aduc în discuție necesitatea dezvoltării unor soluții particulare, având în vedere diversitatea unităților de control computerizate existente în ingineria industrială. În acest sens, răcirea sistemelor înglobate reprezintă un aspect fundamental al proiectelor de modernizare inteligentă. În lucrare se realizează o defalcare a disciplinelor care stau la baza procesului. Un exemplu practic este oferit pentru a sublinia lipsa literaturii de specialitate în domeniu.

Evaluarea energiei termice disipată de sursele de căldură din cadrul sistemelor înglobate reprezintă o etapă esențială a oricărui proces de dimensionare a sistemelor de răcire. Deși există abordări conservative pentru finalizarea acestei etape, utilizarea lor în modernizarea inteligentă este limitată, având în vedere constrângerile supuse procesului. Pentru a depăși astfel de probleme, în lucrare se propune o abordare cu parametri concentrați care se bazează pe conceptele teoretice ale sistemelor de ordinul întâi. Conceptele propuse sunt transpuse într-un mediu de simulare FEM cu suportul unor macroelemente care dispun de conductanță și capacitate variabilă. Parametrizarea analizei termice se realizează prin intermediul datelor experimentale. Pe parcursul lucrării sunt efectuate experimente pentru a demonstra utilizarea practică a abordării pentru evaluarea comportării termice a surselor din cadrul sistemelor înglobate. Metodologia poate fi reutilizată cu succes atunci când pachetul a fost studiat anterior.

Descrierea căldurii cedate de către componentele electronice care înglobează mai multe cipuri reprezintă o perspectivă provocatoare din cauza complexității fenomenelor termice care guvernează funcționarea unor astfel de soluții. În acest sens, metodologia cu parametri concentrați dezvoltată anterior dovedește o utilizare limitată, având în vedere numărul extins de variabile experimentale necesare pentru parametrizarea modelului. În plus, metodologia inițială de simulare poate studia doar locații generatoare de căldură individuale la un moment dat. Pentru a depăși astfel de probleme, se utilizează algoritmi de ÎA pentru a anticipa creșterea temperaturii și constantele de timp pe baza specificațiilor tehnice și de performanță ale pachetului studiat. Sunt incluse completări în modelul inițial de simulare pentru a lua în considerare joncțiunile suplimentare ale componentelor multicip.

Capitolul 4 abordează aspectele limitative ale fluxurilor de lucru necesare pentru dezvoltarea sistemelor de răcire, cu accent pe procesul de dezvoltare a reguletoarelor de temperatură. Formalizarea metodologiei se realizează prin reutilizarea modelelor de simulare care au fost finalizate în capitolul anterior. Problemele legate de cerințele de calcul ale reguletoarelor FEM PID sunt adresate prin reducerea dimensiunii problemei transferului de căldură. În lucrare este propusă o abordare de simulare care se bazează pe modelarea transferului de căldură cu parametri concentrați și subrutine definite de utilizator este propusă pentru a facilita implementarea în lumea reală a metodologiei de control. Pentru generalizarea abordării se utilizează RNN de tip LSTM.

Problemele de mediu ale procesului de proiectare a sistemelor de răcire sunt studiate în contextul industrial actual. Pe parcursul lucrării sunt evidențiate trei surse principale de emisii de CO₂: producția de semifabricate pentru radiatoare, prelucrarea aripioarelor de răcire și energia consumată de către ventilatoare sau suflante. Obiectivul unei soluții de dezvoltare durabilă aplicabilă sistemelor de răcire are ca scop minimizarea necesarului de materie primă. În acest sens, abordarea propusă investighează capacitatea de integrare a alabandinei în proiectarea radiatoarelor cu aripioare lipite pentru utilizarea în medii cu convecție forțată. În prima etapă, problemele de

toxicitate ale materialului sunt abordate prin acoperirea suprafețelor exterioare cu un grund acrilic, care este amestecat cu pulbere de grafit. Este dezvoltat un stand experimental pentru a evalua caracteristicile termice ale specimenelor din alabandină de referință și a celor tratate cu grund acrilic. Rezultatele obținute indică faptul că alabandina este un semiconductor. De asemenea, stratul aplicat pe pereții exteriori nu are un efect semnificativ asupra caracteristicilor termice ale materialului. Este propusă o variantă constructivă de radiator hibrid, care cuprinde o placă rece subțire de aluminiu cu cuburi din alabandină lipite. Secvența optimă de dispunere a aripioarelor este decisă cu sprijinul metodei suprafețelor de răspuns. Studiul evidențiază faptul că răcirea optimă se realizează atunci când corpurile suplimentare sunt poziționate în apropierea centrului de greutate al plăcii reci. Conceptele date sunt dovedite prin intermediul unui sistem de răcire prin convecție forțată real. O comparație între radiatorul propus și o soluție constructivă convențională este inclusă pentru a sublinia economiile de carbon ale soluției propuse.

Contribuțiile originale ale lucrării pot fi grupate în următoarele categorii

1. Contribuții teoretice:

- Utilizarea sistemelor de ordinul întâi cu amplificare de temperatură și constante de timp variabile pentru dezvoltarea unui model de intrare-ieșire cu parametri concentrați.
- Dezvoltarea unui instrument Visual Basic pentru definirea parametrilor concentrați pe baza datelor experimentale;
- Dezvoltarea unui regulator de temperatură PID cu limită de saturație și metoda de lichidare a integralei și implementarea acestuia într-un mediu de simulare FEM;
- Estimarea emisiilor de CO₂ rezultate din ciclul de viață al sistemelor de răcire

2. Contribuții metodologice

- Dezvoltarea de proceduri experimentale în scopul identificării parametrilor sistemului și utilizarea ulterioară a rezultatelor obținute pentru parametrizarea analizei termice în regim tranzitoriu.
- Actualizarea modelului inițial cu parametri concentrați pentru a include joncțiunile aferente surselor de căldură multicip
- Conversia variabilei de proces la ieșirea regulatorului FEM PID într-un semnal semnificativ prin intermediul unei matrice de convecție echivalentă.
- Reglajul regulatorului FEM PID prin folosirea metodei euristice Ziegler-Nichols
- Generalizarea semnalului de acționare pe baza unui model LSTM cu o singură intrare, o singură ieșire
- Dezvoltarea unui sistem de protecție acrilică pentru minimizarea toxicității alabandinei
- Proiectarea unui radiator cu aripioare lipite care cuprinde aripioare din alabandină pentru răcirea forțată prin convecție.

3. Contribuții originale de modelare FEM

- Utilizarea practică a unui macroelement pentru modelarea parametrilor concentrați bazat pe conductanța și capacitatea dependente de temperatură.
- Actualizarea modelului original de simulare bazat pe parametri concentrați pentru a include mai multe joncțiuni termice
- Abordarea simplificării modelului bazată pe reducerea dimensiunii și definirea condițiilor de simetrie

- Evaluarea caracteristicilor termice ale alabandinei utilizând mijloace de simulare și experimentate

4. Implementarea IAC

- A fost realizată o implementare originală SAMCEF-ANSYS pentru modelul cu parametrii concentrați aplicabilă surselor de căldură cu un singur cip.
- A fost finalizată o implementare originală SAMCEF-Patran pentru modelul cu parametrii concentrați aplicabilă surselor de căldură multicip
- A fost finalizată o implementare originală SAMCEF-Patran pentru dezvoltarea regulatorului de temperatură FEM PID
- Au fost finalizate implementări originale ANSYS Mechanical și Fluent pentru identificarea parametrilor geometrici optimi ai radiatorului cu aripioare de alabandină lipite

5. Proceduri experimentale:

- Dezvoltarea unei noi proceduri pentru achiziția de temperaturi și prelucrarea rezultatelor.

Sunt propuse următoarele obiective de continuare a cercetărilor în domeniu:

1. **Dezvoltarea unui algoritm pentru minimizarea erorii de achiziție a temperaturii atunci când sursele de căldură funcționează la putere redusă:** acuratețea modelului cu parametrii concentrați se bazează pe rezoluția sistemului de achiziție. În acest sens, senzorii de temperatură convenționali nu sunt capabili să capteze gradientii termici care apar în primele stări de funcționare ale ciclului de instrucțiuni. Din această perspectivă, o procedură de feedback poate fi dezvoltată pentru a minimiza zgomotul de achiziție și pentru a îmbunătăți acuratețea datelor experimentale. În acest fel, fidelitatea modelului cu parametrii concentrați poate fi îmbunătățită fără a utiliza dispozitive experimentale costisitoare..
2. **Extinderea abilităților de generalizare ale algoritmului de regresie ÎA:** în acest sens, modelele neuronale descrise în Capitolul 3 au capacitatea de a generaliza comportarea termică a surselor de căldură care aparțin aceleiași familii de produse. Caracteristici precum tehnologia de încapsulare, tehnica de lipire sau caracteristicile geometrice pot fi luate în considerare în procesul de dezvoltare a setului de date. În acest fel, creșterea temperaturii și constantele de timp pot fi anticipate pentru o gamă mai largă de componente electronice.
3. **Includerea tuturor cunoștințelor experimentale într-o bază de date pentru utilizare ulterioară:** constantele de timp și de amplificare a temperaturii utilizate pentru definirea modelului cu parametrii concentrați reprezintă o sursă valoroasă de cunoștințe ingineresti. În acest sens, poate fi dezvoltată o bază de date pentru a facilita utilizarea viitoare a datelor experimentale.
4. **Extinderea metodologiei de control al temperaturii FEM PID pentru a include o procedură de reglaj bazată pe model:** metoda euristică Zielger-Nichols utilizată pentru reglajul regulatorului necesită parcurgerea unei abordări iterative pentru obținerea constantelor de control optime. Din această perspectivă, o procedură bazată pe model se poate dovedi mai puțin consumatoare de resurse, oferind în același timp caracteristici de performanță mai bune. Astfel de algoritmi de reglaj pot fi incluși în mediul de programare al solverului FEM.
5. **Investigarea utilizării nanopulberilor pentru acoperirea pereților exteriori ai aripioarelor de alabandinei:** grundul acrilic îmbogățit cu pulbere de grafit ajută la prevenirea oxidării manganului. Această tehnologie de acoperire nu influențează caracteristicile termice ale alabandinei. Din această perspectivă, utilizarea nanopulberilor

(precum nanoparticule de cupru sau aluminiu) poate îmbunătăți semnificativ abilitățile de transfer de căldură ale aripioarelor alabandinei. În acest sens, sunt necesare cercetări viitoare pentru dezvoltarea unui agent de lipire care poate facilita aderența dintre nanopulberi și oxidul de mangan.

6. **Analiza unor configurații multiple de radiatoare lipite pentru a facilita utilizarea aripioarelor fabricate din materiale alternative:** designul radiatorului lipit propus în Capitolul 5 reprezintă una dintre numeroasele opțiuni disponibile. În acest sens, pot fi utilizate diferite forme de plăci reci pentru a spori caracteristicile de rezistență termică, facilitând în același timp utilizarea mai eficientă a alabandinei în sistemele de răcire.
7. **Studiul mai multor tipuri de decantare în scopul proiectării radiatorului:** în România, haldele de steril reprezintă o preocupare semnificativă de mediu. Cantități mari de deșeuri miniere solide se găsesc în Munții Apuseni, Baia Mare și Carpații Occidentali. Exemple de materiale includ: pirite, cuarț, galenă și sfalerită. Abordarea descrisă în Capitolul 5 poate fi folosită pentru a studia fezabilitatea includerii unor astfel de minerale în procesul de proiectare termică.
8. **Integrarea tuturor conceptelor date într-o interfață grafică prietenoasă utilizatorului:** captarea și reutilizarea efectivă a cunoștințelor ingineresti poate fi realizată prin dezvoltarea unei singure interfețe grafice care să cuprindă conceptele date într-un cadru comun. În acest fel, fluxul de lucru pentru dezvoltarea sistemelor de răcire în cadrul proiectelor de modernizare inteligentă poate fi abordat prin intermediul unor instrumente asistate, proceduri și liste de verificare.

Bibliografie

- [***01] *** (2007), Date statistice aferente energiei electrice produse în anul 2007, Autoritatea Nationala de Reglementare în domeniul Energiei., Bucuresti
- [***02] *** (2018), ANSYS 19.0 User's Manual, ANSYS Inc., Canonsburg
- [***03] *** (2013), SAMCEF User's Manual, LMS Samtech, Liege
- [A02] Abukhalil, T., Almahafzah, H., Alksasbeh, M., & Alqaralleh, B. A. (2020). Power optimization in mobile robots using a real-time heuristic. *Journal of Robotics*, 2020.
- [A05] Ahmed, S., Kim, S., & Wallace, K. M. (2007). A methodology for creating ontologies for engineering design.
- [A06] Al-Doori, W. H. A. R. (2011). Enhancement of natural convection heat transfer from the rectangular fins by circular perforations. *International journal of automotive and mechanical engineering*, 4, 428-436.
- [A07] Alexandru, T. G., & Pupaza, C. (2017). Eco-design of heat sinks based on CAD/CAE techniques. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 12(1), 9.
- [A09] Alexandru, T. G., & PUPĂZĂ, C. (2020). Machine learning generalization of lumped parameter models for the optimal cooling of embedded systems. *Studies in Informatics and Control*, 29(2), 169-177.
- [A10] Alexandru, T. G., Mantea, T. A., Pupaza, C., & Velicu, S. (2016). Heat transfer simulation for thermal management of electronic components. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 11(1), 15.
- [A11] Alexandru, T.G. (2019, September). CISA Seminar - An approach for facilitating thermal design through the use of intelligent systems for Industry 4.0. Available at: <https://www.edinburgh-robotics.org/events/cisa-seminar-approach-facilitating-thermal-design-through-use-intelligent-systems-industry-40>, accessed: 25.09.2021
- [A12] Alexandru, T.G., & Pupăză, C. (2021). Recurrent neural network for predicting time step bisections in structural dynamics, 83(1), pp.169-180
- [A13] Al-Maeeni, S. S. H., Kuhnhen, C., Engel, B., & Schiller, M. (2020). Smart retrofitting of machine tools in the context of industry 4.0. *Procedia CIRP*, 88, 369-374.
- [A14] Ravi, D., Honnavalli, P.B. & Vijay, C.N. (2020, December). A System to Retrofit Existing Infrastructure to be Smart and IoT Ready. In *Proceedings of the 2020 4th International Conference of Vision, Image and Signal Processing* (pp. 1-6).
- [A15] Amrouch, H., Ebi, T., Schneider, J., Parameswaran, S., & Henkel, J. (2013, September). Analyzing the thermal hotspots in FPGA-based embedded systems. In *2013 23rd International Conference on Field programmable Logic and Applications* (pp. 1-4). IEEE.
- [A16] Andrews, J. A. (1988). Package thermal resistance model: Dependency on equipment design. *IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology*, 11(4), 528-537.
- [A17] Aneja, B., Singh, S., Chandna, U., & Maheshwari, V. (2011). Review of temperature measurement and control. *Intl. Journal of Electrical and Electronics Engineers*, 3(2), 29-37.
- [A19] Arularasan, R., Dhanushkodi, G., & Velraj, R. (2011). CFD simulation studies and experimental validation on a parallel plate heat sink. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 3(5-6), 526-537.
- [A20] Åström, K. J., & Hägglund, T. (2004). Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control, *Journal of process control*, 14(6), pp.635-650.
- [B01] Bahrami, M. (2014). Steady conduction heat transfer. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 135-224.
- [B02] Bailey, D. H., Plouffe, S. M., Borwein, P. B., & Borwein, J. M. (1997) The quest for pi, *The Mathematical Intelligencer*, 19, pp.50-56
- [B04] Bashar, A. (2019). Survey on evolving deep learning neural network architectures. *Journal of Artificial Intelligence*, 1(02), 73-82.
- [B05] Bathe, K. J., & Khoshgoftaar, M. R. (1979). Finite element formulation and solution of nonlinear heat transfer. *Nuclear Engineering and Design*, 51(3), 389-401.
- [B07] Bi, Q., Cai, W. J., Lee, E. L., Wang, Q. G., Hang, C. C., & Zhang, Y. (1999). Robust identification of first-order plus dead-time model from step response. *Control Engineering Practice*, 7(1), 71-77.
- [B10] Bongomin, O., Yemane, A., Kembabazi, B., Malanda, C., Chikonkolo Mwape, M., Sheron Mpfu, N., & Tigalana, D. (2020). Industry 4.0 Disruption and Its Neologisms in Major Industrial Sectors: A State of the Art. *Journal of Engineering*, 2020.

UPB	Teză de Doctorat	Generalizarea algoritmilor de învățare automată pentru fluxurile de răcire ale sistemelor înglobate din unitățile de comandă-control utilizate în ingineria industrială pentru facilitarea procesului de modernizare inteligentă	Tudor George D. ALEXANDRU
-----	------------------	--	---------------------------

- [C01] Chen, Y., Dai, X., Liu, M., Chen, D., Yuan, L., & Liu, Z. (2020, August). Dynamic relu. In European Conference on Computer Vision (pp. 351-367). Springer, Cham.
- [C02] Chen, Y., Han, Z., Cao, K., Zheng, X., & Xu, X. (2020). Manufacturing upgrading in industry 4.0 era. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 766-771.
- [C04] Coelho, T.M., Nogueira, E.S., Pereira, J.R.D., Baesso, M. L., & Bento, A.C. (2005). Thermal properties of thin acrylic paints using thermal wave interferometry, *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 125, pp. 519-522.
- [C05] Contreras, J. D., Garcia, J. I., & Pastrana, J. D. (2017). Developing of Industry 4.0 Applications. *International Journal of Online Engineering*, 13(10).
- [D01] da Silva, L. R., Flesch, R. C. C., & Normey-Rico, J. E. (2020). Controlling industrial dead-time systems: When to use a PID or an advanced controller. *ISA transactions*, 99, 339-350.
- [D02] Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383-394.
- [D03] Das, A. P., Sukla, L. B., Pradhan, N., & Nayak, S. (2011). Manganese biomining: a review. *Bioresource Technology*, 102(16), 7381-7387.
- [D04] De Micco, L., Vargas, F. L., & Fierens, P. I. (2019). A literature review on embedded systems. *IEEE Latin America Transactions*, 18(02), 188-205.
- [D05] Dick, R. P., Lakshminarayana, G., Raghunathan, A., & Jha, N. K. (2003). Analysis of power dissipation in embedded systems using real-time operating systems. *IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems*, 22(5), 615-627.
- [D06] Dietrich, A., van de Sand, R., & Reiff-Stephan, J. (2021). Implementation of a machine tool retrofit system. *TH Wildau Engineering and Natural Sciences Proceedings*, 1.
- [D07] Dinca, G. (2019), *Mineralogia zacământului de au-ag-te sacarămb, cu privire speciala asupra sulfosarurilor*, Doctoral Thesis, Universitatea din Bucuresti
- [D08] Ding, S., Li, H., Su, C., Yu, J., & Jin, F. (2013). Evolutionary artificial neural networks: a review. *Artificial Intelligence Review*, 39(3), 251-260.
- [D10] Dziurdzia, P., & Kos, A. (2000, March). High efficiency active cooling system. In Sixteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (Cat. No. 00CH37068) (pp. 19-26). IEEE.
- [E01] Edalatifar, M., Tavakoli, M. B., Ghalambaz, M., & Setoudeh, F. (2020). Using deep learning to learn physics of conduction heat transfer. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-18.
- [E02] EKL-Ag (2020), Heat sinks for industrial applications, Available at: <https://www.ekl-ag.de/en/products/heatsinks-industry>, accessed: 25.09.2021
- [F01] Faulkner, D., Khotan, M., & Shekarriz, R. (2004). Managing electronics thermal management. *Heat Transfer Engineering*, 25(2), 1-4.
- [G01] García, J. I., Cano, R. E., & Contreras, J. D. (2020). Digital retrofit: A first step toward the adoption of Industry 4.0 to the manufacturing systems of small and medium-sized enterprises. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(8), 1156-1169.
- [G02] Garimella, S. V., Fleischer, A. S., Murthy, J. Y., Keshavarzi, A., Prasher, R., Patel, C., ... & Raad, P. E. (2008). Thermal challenges in next-generation electronic systems. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 31(4), 801-815.
- [G03] Gevrey, M., Dimopoulos, I., & Lek, S. (2003). Review and comparison of methods to study the contribution of variables in artificial neural network models. *Ecological modelling*, 160(3), 249-264.
- [G04] Górecki, K., Zarębski, J., Górecki, P., & Ptak, P. (2019). Compact thermal models of semiconductor devices—a review. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 65(2), 151-158.
- [G06] Grimes, S., Donaldson, J., & Gomez, G. C.. (2014) Report on the environmental benefits of recycling, Bureau of International Recycling, London
- [G07] Grujicic, M., Zhao, C. L., & Dusel, E. C. (2005). The effect of thermal contact resistance on heat management in the electronic packaging. *Applied Surface Science*, 246(1-3), 290-302.
- [G08] Guerreiro, B. V., Lins, R. G., Sun, J., & Schmitt, R. (2018). Definition of Smart Retrofitting: First steps for a company to deploy aspects of Industry 4.0. In *Advances in Manufacturing* (pp. 161-170). Springer, Cham.
- [G09] Guyer, E. C. (1999). Handbook of applied thermal design. CRC press.

UPB	Teză de Doctorat	Generalizarea algoritmilor de învățare automată pentru fluxurile de răcire ale sistemelor înglobate din unitățile de comandă-control utilizate în ingineria industrială pentru facilitarea procesului de modernizare inteligentă	Tudor George D. ALEXANDRU
-----	---------------------	---	------------------------------

- [H01] Hannemann, R. J. (2003). Thermal control of electronics: Perspectives and prospects.
- [H03] Hefner, A. R., & Blackburn, D. L. (1994). Thermal component models for electrothermal network simulation. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, 17(3), 413-424.
- [H04] Huang, H. C., & Usmani, A. S. (2012). *Finite element analysis for heat transfer: theory and software*. Springer Science & Business Media.
- [I02] Intel Corporation (2001). *Intel®Pentium® III Processor Thermal Design Guide*
- [I03] Irani, S., Shukla, S., & Gupta, R. (2003). Online strategies for dynamic power management in systems with multiple power-saving states. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 2(3), 325-346.
- [I04] Isakov, E. (2004), *Engineering formulas for metalcutting: presented in customary US and metric units of measure*, Industrial Press Inc., New York
- [J01] Jamal, R., Singh, I. K., Kumar, V., Chandel, A., & Singh, R. K. *Introduction to Multiphysics Simulation for Integrated PCB Design and Operational Environment Analysis of Via*.
- [J02] Jenkins, T. (2005). A brief history of... semiconductors. *Physics education*, 40(5), 430.
- [J03] Joseph, E. A., & Olaiya, O. O. (2017). Cohen-coon PID Tuning Method; A Better Option to Ziegler Nichols-PID Tuning Method. *ENginnering Research*, 2(11), 141-145.
- [K01] Kamble, L. V., Pangavhane, D. R., & Singh, T. P. (2014). Heat transfer studies using artificial neural network-a review. *International Energy Journal*, 14(1).
- [K02] Karlsson, R., & Luttrupp, C. (2006). EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special issue. *Journal of cleaner production*, 14(15-16), 1291-1298.
- [K04] Kheirkhahan, P. (2017, October). Robust anti-windup control design for pid controllers. In *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)* (pp. 1622-1627). IEEE.
- [K05] Koçak, Y., & Şiray, G. Ü. (2021). New activation functions for single layer feedforward neural network. *Expert Systems with Applications*, 164, 113977.
- [K08] Kumar, S., & Negi, R. (2012, December). A comparative study of PID tuning methods using anti-windup controller. In *2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems* (pp. 1-4). IEEE.
- [L01] Lafon, F., Ramanujan, A., & Fernandez-Lopez, P. (2015). Black Box Model of Integrated Circuits for ESD Behavioral Simulation and Industrial Application Case. *Advanced Electromagnetics*, 4(2), 26-37.
- [L04] Langley, P., & Simon, H. A. (1995). Applications of machine learning and rule induction. *Communications of the ACM*, 38(11), 54-64.
- [L05] Lasance, C., Vinke, H., Rosten, H., & Weiner, K. L. (1995, February). A novel approach for the thermal characterization of electronic parts. In *Proceedings of 1995 IEEE/CPMT 11th Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)* (pp. 1-9). IEEE.
- [L06] Laudani, A., Lozito, G. M., Riganti Fulginei, F., & Salvini, A. (2015). On training efficiency and computational costs of a feed forward neural network: a review. *Computational intelligence and neuroscience*, 2015.
- [L07] Lee, E. A., & Seshia, S. A. (2017). *Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach*. Mit Press.
- [L08] Lee, H. S. (2010). *Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells*. John Wiley & Sons.
- [L09] Lee, S. (1995). Optimum design and selection of heat sinks. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, 18(4), 812-817.
- [L12] Li, Y., Carabelli, S., Fadda, E., Manerba, D., Tadei, R., & Terzo, O. (2020). Machine learning and optimization for production rescheduling in Industry 4.0. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(9), 2445-2463
- [L14] Lima, F., Massote, A. A., & Maia, R. F. (2019, October). IoT energy retrofit and the connection of legacy machines inside the Industry 4.0 concept. In *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (Vol. 1, pp. 5499-5504). IEEE.
- [L16] Lobur, M., Salo, Y., Farmaha, I., Senkovich, O., & Pytel, K. (2021, May). Automated ARM CPU-Based Cloud System for the Industrial Internet of Things. In *2021 IEEE XVII th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)* (pp. 25-28). IEEE.

- [M01] Mahesh, B. (2020). Machine Learning Algorithms-A Review. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. [Internet], 9, 381-386.
- [M02] Mantea, T. A., Alexandru, T. G., Pupăză, C., & Nicolescu, A. F. (2016). Software Integration for Heat Transfer Simulation of Electronic Circuits. *Studies in Informatics and Control*, 25(1), 70.
- [M03] Marilungo, E., Papetti, A., Germani, M., & Peruzzini, M. (2017). From PSS to CPS design: a real industrial use case toward Industry 4.0. *Procedia Cirp*, 64, 357-362.
- [M04] Masood, T., & Sonntag, P. (2020). Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry*, 121, 103261.
- [M05] Meng, X., Thörnberg, B., & Olsson, L. (2012, September). Component obsolescence management model for long life cycle embedded system. In *2012 IEEE AUTOTESTCON Proceedings* (pp. 19-24). IEEE.
- [M06] Mugisha, J. C., Munyazikwiye, B., & Karimi, H. R. (2015, November). Design of temperature control system using conventional PID and Intelligent Fuzzy Logic controller. In *2015 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY)* (pp. 50-55). IEEE.
- [M07] Myers, R. H., & Myers, R. H. (1990). *Classical and modern regression with applications* (Vol. 2, p. 488). Belmont, CA: Duxbury press.
- [M09] Narasimhan, S., & Majdalani, J. (2002). Characterization of compact heat sink models in natural convection. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25(1), 78-86.
- [M10] Naresh, G., Sai, G. A., Abhiram, G., Sandeep, K. S., Vardhan, G. A., & Krishna, K. B. Steady State Thermal Analysis on Heat Sinks by Varying Fin Configuration Using ANSYS.
- [M11] Niemann, H., & Miklos, R. (2014, December). A simple method for estimation of parameters in first order systems. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 570, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
- [M12] Nikolskiy, V., & Stegailov, V. (2016). Floating-point performance of ARM cores and their efficiency in classical molecular dynamics. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 681, No. 1, p. 012049). IOP Publishing.
- [M13] Nouman, K., Asim, Z., & Qasim, K. (2018, May). Comprehensive Study on Performance of PID Controller and its Applications. In *2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)* (pp. 1574-1579). IEEE.
- [O01] Ongsulee, P. (2017, November). Artificial intelligence, machine learning and deep learning. In *2017 15th International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [P01] Padula, F., & Visioli, A. (2011). Tuning rules for optimal PID and fractional-order PID controllers. *Journal of process control*, 21(1), 69-81.
- [P02] Pagani, S., Manoj, P. S., Jantsch, A., & Henkel, J. (2018). Machine learning for power, energy, and thermal management on multicore processors: A survey. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 39(1), 101-116.
- [P04] Park, J. S., Jung, Y. K., Butler, K. T., & Walsh, A. (2018). Quick-start guide for first-principles modelling of semiconductor interfaces. *Journal of Physics: Energy*, 1(1), 016001.
- [P07] Patil, D. S., Chavan, S. M., & Oubagaranadin, J. U. K. (2016). A review of technologies for manganese removal from wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 468-487.
- [P10] Pivoto, D. G., de Almeida, L. F., da Rosa Righi, R., Rodrigues, J. J., Lugli, A. B., & Alberti, A. M. (2021). Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 176-192.
- [P12] Pupăză, C., & Parpală, R. C. (2011). *Modelare și analiză structurală cu ANSYS workbench (Structural Modeling and Analysis using Ansys workbench)*, Politehnica Press.
- [R01] Raciti, A., & Cristaldi, D. (2013, October). Thermal modeling of integrated power electronic modules by a lumped-parameter circuit approach. In *AEIT Annual Conference 2013* (pp. 1-6). IEEE.
- [R03] Rejikumar, G., Arunprasad, P., Persis, J., & Sreeraj, K. M. (2019). Industry 4.0: key findings and analysis from the literature arena. *Benchmarking: An International Journal*.
- [R05] Romeo, L., Loncarski, J., Paolanti, M., Bocchini, G., Mancini, A., & Frontoni, E. (2020). Machine learning-based design support system for the prediction of heterogeneous machine parameters in industry 4.0. *Expert Systems with Applications*, 140, 112869.
- [R06] Ruder, S. (2016). An overview of gradient descent optimization algorithms. *arXiv preprint arXiv:1609.04747*.

UPB	Teză de Doctorat	Generalizarea algoritmilor de învățare automată pentru fluxurile de răcire ale sistemelor înglobate din unitățile de comandă-control utilizate în ingineria industrială pentru facilitarea procesului de modernizare inteligentă	Tudor George D. ALEXANDRU
-----	---------------------	---	------------------------------

- [S01] Sabbah, W., Arabi, F., Avino-Salvado, O., Buttay, C., Théolier, L., & Morel, H. (2017). Lifetime of power electronics interconnections in accelerated test conditions: High temperature storage and thermal cycling. *Microelectronics Reliability*, 76, 444-449.
- [S02] Sacala, I. S., Moisescu, M. A., & Repta, D. (2013, May). Towards the development of the future internet based enterprise in the context of cyber-physical systems. In *2013 19th International Conference on Control Systems and Computer Science* (pp. 405-412). IEEE.
- [S03] Saseendran, A., Setia, L., Chhabria, V., Chakraborty, D., & Barman Roy, A. (2019). Impact of Noise in Dataset on Machine Learning Algorithms.
- [S04] Sasidhar, N., & Suresh, M. P. ARM microcontroller based Wireless Industrial Automation System. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (IJAREEIE)*, 3.
- [S06] Sazli, M. H. (2006). A brief review of feed-forward neural networks. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A2-A3 Physical Sciences and Engineering*, 50(01).
- [S07] Schelling, P. K., Shi, L., & Goodson, K. E. (2005). Managing heat for electronics. *Materials Today*, 8(6), 30-35.
- [S08] Schlechtendahl, J., Keinert, M., Kretschmer, F., Lechler, A., & Verl, A. (2015). Making existing production systems Industry 4.0-ready. *Production Engineering*, 9(1), 143-148.
- [S09] Schweitzer, D., Ender, F., Hantos, G., & Szabó, P. G. (2015). Thermal transient characterization of semiconductor devices with multiple heat sources—Fundamentals for a new thermal standard. *Microelectronics Journal*, 46(2), 174-182.
- [S10] Seidman, T. I. (1988, December). Some problems with thermostat nonlinearities. In *Proc. 27th IEEE Conf. Decision and Control* (pp. 1255-1259).
- [S11] Sen, M. (2004). A review of principles and applications of thermal control. *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*, 1(4), 115-131.
- [S12] Sezer, E., Romero, D., Guedea, F., Macchi, M., & Emmanouilidis, C. (2018, June). An industry 4.0-enabled low cost predictive maintenance approach for smes. In *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1-8). IEEE.
- [S13] Shapiro, B. (2003). Creating compact models of complex electronic systems: An overview and suggested use of existing model reduction and experimental system identification tools. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 26(1), 165-172.
- [S14] Shenkman, A. L. (2006). *Transient analysis of electric power circuits handbook*. Springer Science & Business Media.
- [S15] Shinohara, A. C., da Silva, E. H. D. R., de Lima, E. P., Deschamps, F., & da Costa, S. E. G. (2017). Critical success factors for digital manufacturing implementation in the context of industry 4.0. In *IIE Annual Conference. Proceedings* (pp. 199-204). Institute of Industrial and Systems Engineers (IIE).
- [S16] Simoncelli, E., & Daw, N. (2003). Least squares optimization. *Lecture Notes*, Available at: <http://www.cns.nyu.edu/eero/teaching.html>, accessed: 25.09.2021
- [S18] Singh, K. K., & Agnihotri, G. (2012). *System Design Through Matlab®, Control Toolbox and Simulink®*. Springer Science & Business Media.
- [S19] Singhal, P., Shah, D., & Patel, B. (2014). Temperature control using fuzzy logic. *arXiv preprint arXiv:1402.3654*.
- [S20] Smolinski, P., & Wu, Y. S. (1998). An implicit multi-time step integration method for structural dynamics problems. *Computational Mechanics*, 22(4), 337-343.
- [T01] Terol, R. M., Reina, A. R., Ziaei, S., & Gil, D. (2020). A Machine Learning Approach to Reduce Dimensional Space in Large Datasets. *IEEE Access*, 8, 148181-148192.
- [T03] Thompson, N. C., Greenewald, K., Lee, K., & Manso, G. F. (2020). The computational limits of deep learning. *arXiv preprint arXiv:2007.05558*.
- [T04] Torrico, B. C., de Almeida Filho, M. P., Lima, T. A., Forte, M. D. D. N., Sá, R. C., & Nogueira, F. G. (2018). Tuning of a dead-time compensator focusing on industrial processes. *ISA transactions*, 83, 189-198.
- [T05] Tsavnin, A., Efimov, S., & Zamyatin, S. (2020). Overshoot elimination for control systems with parametric uncertainty via a PID controller. *Symmetry*, 12(7), 1092.
- [T06] Tudor, G. A., & Pupaza, C. (2021). The development of PID temperature controllers based on FEM thermal analysis. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 342). EDP Sciences.

- [W01] Wan, J., Tang, S., Shu, Z., Li, D., Wang, S., Imran, M., & Vasilakos, A. V. (2016). Software-defined industrial internet of things in the context of industry 4.0. *IEEE Sensors Journal*, 16(20), 7373-7380.
- [W03] Wang, W., & Yuan, X. (2016). Lumped-parameter-based thermal analysis for virtual prototyping of power electronics systems.
- [W04] Wang, X., Castellazzi, A., & Zanchetta, P. (2013, September). Temperature control for reduced thermal cycling of power devices. In 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE) (pp. 1-10). IEEE.
- [W06] Weisberg, S. (2005). *Applied linear regression* (Vol. 528). John Wiley & Sons.
- [W07] Wilcox, R. R. (1996). Confidence intervals for the slope of a regression line when the error term has nonconstant variance. *Computational Statistics & Data Analysis*, 22(1), 89-98.
- [W08] Wu, R., Wang, H., Pedersen, K. B., Ma, K., Ghimire, P., Iannuzzo, F., & Blaabjerg, F. (2016). A temperature-dependent thermal model of IGBT modules suitable for circuit-level simulations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(4), 3306-3314.
- [Z01] Zakoldaev, D. A., Shukalov, A. V., Zharinov, I. O., & Zharinov, O. O. (2019, April). Organization of information exchange between digital companies of Industry 4.0. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 510, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.
- [Z02] Zhang, K., Guliani, A., Ogrenci-Memik, S., Memik, G., Yoshii, K., Sankaran, R., & Beckman, P. (2017). Machine learning-based temperature prediction for runtime thermal management across system components. *IEEE Transactions on parallel and distributed systems*, 29(2), 405-419.