

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA
FAKULTATEA DE ELECTRONICĂ ȘI TELECOMUNICAȚII

ing. SERGIU SORIN PANU

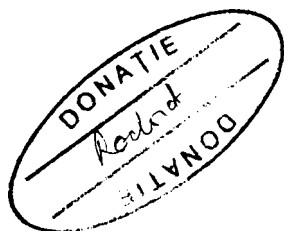
TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător științific:

Prof. dr. ing. TIBERIU MUREȘAN

1998

Climatizări auto cu reglare fuzzy



BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

UNIVAT
EC
Nr. vol. C21278
Data 3.6.03 B

Cuprins

INTRODUCERE

CAP. 1 - SISTEME DE CLIMATIZARE PENTRU AUTOMOBILE -----	1.1
1.1 Cerințe de confort pentru sistemele de climatizare-----	1.1
1.2 Cerințe specifice pentru climatizarea auto-----	1.1
1.3 Structura sistemelor de climatizare auto-----	1.2
1.3.1 Subsistemul de ventilație-----	1.3
1.3.2 Subsistemul de încălzire-----	1.3
1.3.3 Subsistemul de răcire-----	1.3
1.4 Modificarea temperaturii aerului - variante constructive-----	1.4
1.4.1 Controlul debitului lichidului de răcire-----	1.5
1.4.2 Controlul proporției amestecului de aer încălzit și aer răcit-----	1.5
1.5 Regulatorul electronic-----	1.6
1.5.1 Regulator cu comanda subsistemului de încălzire-----	1.6
1.5.2 Regulator cu comanda independentă a subsistemelor de încălzire și răcire-----	1.6
1.5.3 Regulator cu comanda integrată a subsistemelor de încălzire, răcire și ventilație-----	1.7
1.5.4 Panoul de comandă al reglatoarelor electronice-----	1.8
1.6 Concluzii-----	1.9
CAP. 2 - REGULATOARE DE TEMPERATURĂ CLASICE PENTRU SISTEMELE DE CLIMATIZARE AUTO -----	2.1
2.1 Problemele reglării temperaturii în sistemele de climatizare auto-----	2.1
2.2 Soluția de principiu-----	2.2
2.3 Regulator cu performanțe ridicate-----	2.4
2.3.1 Schema bloc a sistemului de comandă-----	2.4
2.3.2 Blocurile de comandă-----	2.6
2.3.3 Blocurile de măsurare-----	2.6
2.3.4 Regulatorul de temperatură-----	2.7
2.3.4.1 Buclele de reglare pentru temperatura aerului suflat-----	2.9
2.3.4.2 Corecția stânga-dreapta-----	2.9
2.3.4.3 Bucla de reglare pentru temperatura interioară-----	2.10
2.3.4.4 Compensarea efectelor perturbațiilor externe-----	2.12
2.3.5 Comanda turbinei de aer-----	2.12
2.3.6 Comanda ventilatorului suplimentar-----	2.15
2.3.7 Comanda subsistemului de răcire-----	2.15
2.3.8 Comanda pompei de apă-----	2.16
2.3.9 Regimuri de funcționare speciale-----	2.16
2.4 Concluzii-----	2.16
CAP. 3 - MODELE TERMICE PENTRU AUTOMOBILE -----	3.1
3.1 Modele termice simplificate-----	3.1
3.1.1 Modelul incintei climatizate ideale-----	3.1
3.1.2 Modelarea surselor adiționale de căldură-----	3.2
3.1.3 Modelarea transferului de căldură prin pereții incintei-----	3.3
3.1.4 Modelarea influenței corpurilor din incintă-----	3.3

3.1.5 Modelarea subsistemelor de încălzire/răcire a aerului suflat	3.4
3.1.6 Variante de modele termice simplificate	3.5
3.2 Model termic detaliat	3.5
3.2.1 Surse de căldură	3.5
3.2.1.1 Sistemul de climatizare	3.6
3.2.1.2 Iluminarea solară	3.6
3.2.1.3 Motorul automobilului	3.13
3.2.1.4 Portbagaj și podea	3.13
3.2.1.5 Motorul instalației de climatizare	3.14
3.2.1.6 Pasagerii	3.14
3.2.2 Ecuația termică	3.14
3.2.3 Rezultatele simulării	3.14
3.3 Concluzii	3.16
CAP. 4 - IMPLEMENTAREA UNUI MODEL TERMIC PENTRU AUTOMOBILE -4.1	
4.1 Ecuațiile modelului și schemele de implementare	4.1
4.1.1 Structura modelului și schema bloc	4.1
4.1.2 Aerul interior	4.3
4.1.3 Sistemul de climatizare	4.4
4.1.4 Caroseria	4.4
4.1.5 Ferestrele	4.5
4.1.5.1 Parbrizul	4.5
4.1.5.2 Ferestrele laterale	4.7
4.1.5.3 Geamul din spate	4.7
4.1.6 Obiectele interioare	4.7
4.1.7 Compartimentul motorului	4.9
4.1.8 Portbagajul și podeaua	4.9
4.1.9 Motorul instalației de climatizare	4.9
4.1.10 Pasagerii	4.9
4.2 Testarea modelului	4.9
4.2.1 Modificarea temperaturii aerului suflat	4.10
4.2.2 Modificarea debitului aerului suflat	4.10
4.2.3 Modificarea intensității radiației solare	4.10
4.2.4 Modificarea temperaturii exterioare	4.11
4.2.5 Modificarea vitezei de deplasare	4.11
4.3 Aplicație - proiectarea unui regulator de temperatură	4.12
4.3.1 Modificarea prescrierii de temperatură	4.13
4.3.2 Modificarea debitului aerului suflat	4.14
4.3.3 Modificarea intensității radiației solare	4.14
4.4 Concluzii	4.15
CAP. 5 - UTILIZAREA REGLĂRII FUZZY ÎN SISTEMELE DE CONTROL AL TEMPERATURII ȘI CLIMATIZARE	
5.1 Reglatoare fuzzy	5.1
5.1.1 Principiul reglării fuzzy	5.1
5.1.2 Regulatorul fuzzy de tip Mamdani	5.2
5.1.2.1 Exemplu: regulator de tip Mamdani pentru comanda unui sistem de climatizare	5.3
5.1.3 Baza de cunoștințe	5.5
5.1.3.1 Variabilele lingvistice	5.5
5.1.3.2 Baza de reguli	5.6

5.1.4 Operatori de inferență	5.7
5.1.5 Operatori de defuzificare	5.7
5.2 Utilizarea reglării fuzzy în sistemele de control al temperaturii	5.9
5.2.1 Aplicație: regulator fuzzy pentru temperatura unui cuptor	5.9
5.2.1.1 Descrierea procesului	5.9
5.2.1.2 Regulatorul fuzzy	5.9
5.2.2 Aplicație: regulator fuzzy pentru temperatura unei incinte	5.10
5.3 Utilizarea reglării fuzzy în sistemele de climatizare	5.12
5.3.1 Regulator fuzzy pentru sistemul de climatizare, varianta de bază	5.12
5.3.2 Regulator fuzzy pentru sistemul de climatizare, varianta îmbunătățită, cu controlul umidității	5.13
5.3.3 Regulator fuzzy pentru sistemul de climatizare al automobilelor	5.14
5.4 Concluzii	5.15
CAP. 6 - ELABORAREA UNUI REGULATOR FUZZY PENTRU SISTEMELE DE CLIMATIZARE AUTO	6.1
6.1 Cerințe pentru sistemul de comandă a climatizării	6.1
6.2 Structura sistemului de comandă a climatizării	6.3
6.2.1 Schema bloc	6.3
6.2.2 Regulatorul de temperatură	6.4
6.2.2.1 Schema bloc	6.4
6.2.2.2 Regulatorul fuzzy	6.7
6.2.2.3 Corecțiile în funcție de perturbațiile externe	6.10
6.2.2.4 Corecțiile fiziologice	6.11
6.2.2.5 Varianta cu prescriere separată a temperaturilor	6.13
6.2.3 Comanda turbinei de aer	6.14
6.3 Concluzii	6.18
CAP. 7 - TESTAREA PRIN SIMULARE A REGULATORULUI FUZZY PENTRU SISTEMELE DE CLIMATIZARE AUTO	7.1
7.1 Alegerea mediului de simulare	7.1
7.2 Modelarea blocurilor reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy	7.1
7.3 Simularea regulatorului de temperatură	7.1
7.3.1 Schema bloc a modelului	7.1
7.3.2 Simularea regulatorului "quasi-P"	7.3
7.3.3 Simularea regulatorului "quasi-PI"	7.4
7.4 Simularea corecțiilor fiziologice din regulatorul de temperatură	7.7
7.4.1 Schema bloc a sistemului de test	7.7
7.4.2 Funcția de transfer a blocului de corecție fiziologică în funcție de temperatura exterioară ..	7.8
7.4.3 Funcția de transfer a blocului de corecție fiziologică în funcție de iluminarea solară	7.8
7.5 Simularea corecțiilor din blocul de comandă a turbinei de aer	7.9
7.5.1 Schema bloc a sistemului de test	7.9
7.5.2 Funcția de transfer a blocului de corecție în funcție de temperatura aerului suflat	7.11
7.5.3 Funcția de transfer a blocului de corecție în funcție de viteza automobilului	7.11
7.5.4 Funcția de transfer a blocului de corecție în funcție de iluminarea solară	7.12
7.6 Concluzii	7.13
CAP. 8 - IMPLEMENTAREA REGULATORULUI FUZZY PENTRU SISTEMELE DE CLIMATIZARE AUTO	8.1

8.1	Posibilități de implementare a reguletoarelor fuzzy	8.1
8.1.1	Clasificarea variantelor de implementare	8.1
8.1.2	Implementări software	8.1
8.1.2.1	Implementări pe calculatoare tip PC	8.2
8.1.2.2	Implementări pe microprocesoare sau microcontrolere standard	8.2
8.1.2.3	Implementări cu procesoare fuzzy specializate	8.3
8.1.3	Implementări hardware	8.4
8.1.3.1	Implementări cu circuite ASIC	8.4
8.1.3.2	Implementări bazate pe memorie	8.4
8.1.4	Analiza comparativă a performanțelor	8.4
8.2	Dezvoltarea aplicațiilor fuzzy	8.5
8.2.1	Etapetele dezvoltării unui regulator fuzzy	8.5
8.2.2	Medii de dezvoltare pentru aplicații fuzzy	8.6
8.3	Implementarea regulatorului fuzzy pentru climatizarea auto	8.7
8.3.1	Alegerea variantei de implementare și a metodei de dezvoltare	8.7
8.3.2	Programul de implementare a regulatorului fuzzy pentru climatizarea auto	8.7
8.3.2.1	Sistemul electronic de comandă a climatizării	8.7
8.3.2.2	Structura programului de comandă a climatizării	8.9
8.3.2.3	Implementarea regulatorului de temperatură fuzzy	8.10
8.3.2.4	Implementarea corecțiilor fuzzy pentru comanda turbinei de aer	8.10
8.3.2.5	Implementarea blocurilor de reglare și corecție bazate pe logica fuzzy	8.11
8.4	Concluzii	8.17
CAP. 9 - REZULTATE EXPERIMENTALE		9.1
9.1	Introducere	9.1
9.2	Testul 1 - Comportarea la modificarea prescrierii, a iluminării solare și a vitezei	9.3
9.3	Testul 2 - Comportarea la modificarea repetată a prescrierii	9.8
9.4	Testul 3 - Comportarea în regim staționar	9.13
9.5	Testul 4 - Comportarea la pornire rece, dimineața	9.18
9.6	Testul 5 - Comportarea la pornire la cald	9.23
9.7	Testul 6 - Compensarea stânga-dreapta	9.28
9.8	Concluzii	9.32
CAP. 10 - CONCLUZII		10.1
10.1	Sisteme de climatizare pentru automobile	10.1
10.1.1	Probleme generale	10.1
10.1.2	Sisteme de climatizare pentru automobile	10.1
10.1.3	Reglarea temperaturii în sistemele de climatizare auto	10.2
10.1.4	Proiectarea și acordarea reguletoarelor de temperatură	10.2
10.2	Modelarea comportării termice a interiorului automobilelor	10.2
10.2.1	Probleme generale	10.2
10.2.2	Elaborarea modelelor termice	10.3
10.2.3	Implementarea modelelor termice	10.3
10.3	Reglarea fuzzy a sistemelor de climatizare pentru automobile	10.4
10.3.1	Aspecte generale privind utilizarea reguletoarelor fuzzy	10.4
10.3.2	Utilizarea reglării fuzzy în sistemele de control al temperaturii și climatizare	10.4
10.3.3	Proiectarea reguletoarelor fuzzy pentru sistemele de climatizare auto	10.4
10.3.3.1	Aspecte generale	10.4
10.3.3.2	Proiectarea sistemului de reglare original, dezvoltat de autor	10.4
10.3.4	Testarea prin simulare a regulatorului fuzzy pentru sistemele de climatizare auto	10.5

Introducere

Evoluția teoriei mulțimilor fuzzy și a aplicațiilor sale în reglarea automată a proceselor

Sub influența gândirii carteziene și a conceptelor fizicii clasice, majoritatea metodelor de modelare a realității, dezvoltate de-a lungul timpului, au avut un caracter bivalent (de tip “da sau nu”), deterministic și precis (în sensul că parametrii modelului reprezintă exact caracteristicile sistemului sau percepția noastră despre acesta). Aceste metode de modelare, care au avut un rol important în evoluția științei și tehnicii, se dovedesc, în anumite situații, insuficiente. Modul uman de gândire (exprimat prin limbajele naturale) și modul de percepție a realității operează cu concepte gradate (de tip “mai mult sau mai puțin”), vagi, difuze. În consecință, în domenii cum ar fi inteligența artificială, teoria deciziei, vederea artificială, clasificarea automată sau reglarea automată a parametrilor percepți senzorial, metodele clasice de modelare, împreună cu tehnicile de proiectare aferente, sunt, de multe ori, ineficiente [Zimm91].

Teoria sistemelor fuzzy a fost creată de Lotfi Zadeh, ca instrument de modelare a sistemelor complexe. Pornind de la ideea că, pentru astfel de sisteme, o modelare lingvistică poate fi mai eficientă decât una matematică, precum și de la constatarea că limbajul uman nu operează cu numere sau simboluri discrete, Zadeh a introdus conceptul de *mulțime fuzzy*, care permite modelarea conceptelor vagi. Pe baza teoriei mulțimilor fuzzy a fost dezvoltată *logica fuzzy* (în care valorile de adevăr pot avea valori intermediare, între “adevărat” și “fals”), care stă la baza *teoriei raționamentului aproximativ*. Acest instrument de modelare a cunoașterii pe baza regulilor fuzzy și-a dovedit eficiența în modelarea experienței unor experți umani, mai ales în cazul sistemelor complexe, afectate de incertitudine [Cox94]. Primele aplicații au apărut, firesc, în teoria deciziei și management, în special sub forma unor sisteme expert fuzzy [Zimm91].

Pornind de la constatarea că, în cazul unor procese complexe, neliniare, variabile în timp, metodele clasice de reglare automată nu pot înlocui operatorii umani, a apărut ideea utilizării unor sisteme expert fuzzy care să capteze experiența acestor operatori. A fost introdusă astfel o nouă clasă de regulatoare automate, denumite *reglatoare fuzzy*. Primele contribuții în această direcție au fost aduse, după 1975, de echipa condusă de E. H. Mamdani, iar în anii '80 de către cercetătorii japonezi [Zimm91].

Japonia este de altfel creditată cu cele mai multe *aplicații practice* ale reglării fuzzy, acest fapt fiind pus în legătură cu filosofia și gândirea asiatică [TAS91]. În prezent se constată însă creșterea gradului de acceptare a produselor care încorporează sisteme fuzzy pe piața europeană și americană [Post91]. Astfel, pentru piața germană se prognozează în anul 2000 o valoare totală de 2,3 miliarde DM, dintre care 0,6 miliarde pentru dispozitivele hardware [FM93] [Elek93a].

Dezvoltările teoretice și apariția tot mai frecventă a aplicațiilor practice ale reglării fuzzy au determinat, în anii '90, progrese semnificative în domeniul *implementării* sistemelor bazate pe logica fuzzy și în special a reglatoarelor fuzzy. Au apărut astfel procesoare și coprocesoare fuzzy specializate, limbaje specializate, biblioteci soft pentru procesoarele și limbajele de uz general, medii de dezvoltare și de simulare.

În *perspectivă*, dezvoltările teoretice vor avea de soluționat problema integrării teoriei sistemelor fuzzy, împreună cu rețelele neuronale, algoritmi genetici și alte teorii moderne, în cadrul mai larg al inteligenței artificiale [Kosk92]. Pe de altă parte, se înregistrează o “falie” între teorie și aplicații, acestea din urmă utilizând elementele teoretice doar la un nivel foarte elementar [Zimm91].

Utilizarea reglării fuzzy în sistemele de climatizare a automobilelor

Sistemele de climatizare realizează reglarea automată a unor parametri de mediu (temperatură, umiditate, viteza aerului), percepți senzorial, care contribuie la crearea senzației de confort. Deoarece atât percepția senzorială, cât și noțiunea de confort au un caracter subiectiv, utilizarea unor sisteme de reglare bazate pe logica fuzzy poate oferi performanțe superioare abordărilor clasice. Aceste regulatoare se proiectează pe baza experienței rezultate în urma studierii reacțiilor umane în cazul reglării manuale, precum și pe baza unor principii din medicină și psihologie, corelate cu restricțiile de ordin tehnic

Pe de altă parte, *climatizarea automobilelor* pune probleme mult mai dificile decât climatizarea locuințelor, datorită următorilor factori: volumul redus și viteza mare de circulație a aerului, necesară pentru eliminarea umidității; influența puternică a perturbațiilor externe (iluminarea solară, temperatura exterioră, temperatura lichidului de răcire, viteza de deplasare, etc.); necesitatea unor regimuri de funcționare speciale (de exemplu, la pornirea rece sau la dezaburirea parbrizului); necesitatea asigurării unor condiții diferite pentru fiecare pasager. În consecință, proiectarea sistemelor de climatizare clasice este deosebit de complexă, necesitând o experiență considerabilă. Structura unui regulator clasic, prezentată în lucrare, ilustrează foarte bine aceste dificultăți, prin complexitate și prin numărul mare de parametri care trebuie stabiliți la acordare. În aceste condiții, punerea la punct a reglatoarelor impune un volum mare de teste în condiții reale, conducând la un timp de dezvoltare mare și la costuri ridicate.

Se observă că sistemele de climatizare pentru automobile au majoritatea caracteristicilor care recomandă *utilizarea reglării fuzzy*: reglarea unor mărimi percepute senzorial și asociate subiectiv în "gradul de confort", complexitatea modelului, perturbații externe puternice, parametri variabili în timp, proiectare bazată pe experiența umană.

Regulatorul fuzzy elaborat de autor

În cadrul activității desfășurate la *Gesellschaft für Fahrzeugklimaregelung* în Stuttgart, autorul a participat la proiectarea și implementarea sistemelor de reglare a climatizării pentru diverse tipuri de autoturisme. Acolo a inițiat și realizat dezvoltarea experimentală a unui sistem de reglare bazat pe logica fuzzy, în scopul evaluării și punerii la punct a acestei noi tehnologii.

În cursul proiectării a ieșit în evidență unul din avantajele importante ale reglării fuzzy, și anume captarea experienței proiectantului, prin intermediul unor reguli lingvistice. Autorul a urmărit facilitarea acestei operații, prin alegerea unei *structuri originale*, derivată dintr-un regulator PI clasic și completată cu mai multe blocuri de compensare utilizând, de asemenea, reguli fuzzy. Această structură, familiară proiectanților reglatoarelor clasice pentru climatizare, a permis formularea de la început a unor reguli corecte, care au necesitat un număr redus de corecții la acordarea experimentală.

La *implementarea* regulatorului fuzzy, pe un sistem de comandă bazat pe microcontrolerul Philips 80C552, autorul a urmărit optimizarea eficienței codului, prin adoptarea unei structuri unice pentru toate blocurile de reglare, ceea ce a permis simplificarea implementării. Un alt factor de creștere a eficienței de implementare a fost optimizarea modului de reprezentare a mulțimilor fuzzy, care a condus la minimizarea numărului de operații aritmetice necesare. Rutinele care implementează regulatorul fuzzy au fost integrate fără probleme în programul de comandă al climatizării.

În timpul *acordării experimentale* a regulatorului au ieșit în evidență din nou avantajele reglării fuzzy, modificările necesare fiind puține și ușor de realizat, datorită codificării lingvistice a experienței proiectantului. Astfel, în locul modificării empirice a valorilor unor coeficienți, a fost necesară modificarea unor reguli lingvistice sau a unor funcții de apartenență care modelează concepte familiare.

Aplicația a fost implementată și testată, în diverse condiții meteorologice și de trafic, pe un autoturism Mercedes E220, oferind deplină satisfacție, după cum consemnează măsurătorile experimentale și fișele

de observație ale diverselor persoane care au participat la teste. Sistemul de reglare fuzzy a fost prezentat și testat de către Mercedes și BMW, obținând aprecieri pentru modul de climatizare foarte plăcut și eficient.

Structura lucrării

Prima parte a lucrării, incluzând primele patru capitole, este dedicată problematicii reglării sistemelor de climatizare din automobile.

Astfel, *Capitolul 1* este o sinteză bibliografică, prezentând cerințele de confort pentru sistemele de climatizare și, în particular, pentru climatizarea auto, structura și funcționalitatea sistemelor de climatizare auto, precum și variantele constructive ale regulatorilor electronice aferente acestora.

În *Capitolul 2* se realizează trecerea în revistă a abordării clasice pentru reglarea automată a climatizării, incluzând problematica generală, soluția de principiu și un exemplu de sistem clasic pentru automobilele de clasă superioară, care ilustrează complexitatea rezultată prin abordarea clasică.

În *Capitolul 3* sunt analizate modelele termice pentru automobile, prezentându-se atât modelul simplificat, obținut pe baza legilor fizice, cât și un model detaliat, pentru un autoturism real. Aceste modele sunt necesare pentru testarea și acordarea (preliminară) prin simulare a regulatorului fuzzy elaborat de autor.

În *Capitolul 4* se prezintă implementarea realizată de autor în mediul de simulare MATLAB/SIMULINK a unui model termic, folosit ulterior pentru acordarea prin simulare a regulatorului fuzzy. În scopul validării modelului propus, sunt incluse rezultatele testării acestuia, precum și un exemplu de utilizare la proiectarea unui regulator clasic, de tip PI.

Partea a doua, formată din capitolele 5-10, abordează reglarea fuzzy a sistemelor de climatizare auto.

În *Capitolul 5* se realizează o sinteză bibliografică, incluzând principalele elemente teoretice pe care se bazează aplicația avută în vedere, precum și diversele aplicații ale reglării fuzzy în sistemele de control al temperaturii și climatizare. Se constată absența din bibliografie (cel puțin în limitele în care autorul a avut acces), a unor abordări similare celei prezentate în lucrare.

Capitolul 6 descrie în detaliu elaborarea de către autor a regulatorului fuzzy destinat sistemelor de climatizare auto. Proiectarea pornește de la specificarea cerințelor specifice aplicației, este continuată la nivelul schemei bloc, fiind apoi detaliată pentru fiecare bloc în parte.

În *Capitolul 7* se prezintă testarea prin simulare a regulatorului fuzzy proiectat anterior, folosind mediul de simulare MATLAB/SIMULINK și modelul termic descris în *Capitolul 4*. Modelarea blocurilor din cadrul regulatorului fuzzy este detaliată în *Anexa 2*.

Capitolul 8 este dedicat implementării realizate de către autor pentru regulatorul fuzzy proiectat anterior. Prima parte conține o analiză comparativă a posibilităților de implementare descrise în bibliografie și o analiză a procesului de dezvoltare a aplicațiilor fuzzy. În continuare se justifică alegerea modului de implementare și a metodei de dezvoltare pentru aplicația avută în vedere. În final se realizează o descriere detaliată a implementării software, care este completată de programul din *Anexa 1*.

În *Capitolul 9* sunt prezentate rezultatele testării experimentale a regulatorului fuzzy pentru climatizarea auto. Din numărul mare de teste realizate efectiv, au fost selectate 6 exemple semnificative, pentru comportarea în regim staționar, la modificarea prescrierii și a mărimilor perturbatoare externe, în regimurile de pornire la cald și la rece, precum și pentru compensarea stânga-dreapta.

În *Capitolul 10* sunt prezentate sintetic concluzii obținute, atât în urma studierii bibliografiei, cât și prin implementarea efectivă a regulatorului fuzzy pentru climatizarea în automobile, fiind evidențiate contribuțiile personale ale autorului.

Mulțumiri

Autorul adresează calde mulțumiri conducătorului științific, prof. dr. ing. Tiberiu Mureșan, pentru îndrumările și asistența acordate pe durata stagiului de doctorat și a elaborării tezei, care au făcut posibilă activitatea chiar în condițiile mai dificile impuse de distanțele geografice.

Autorul mulțumește de asemenea pentru sprijin colegilor și colaboratorilor: Dieter Heinle și Herbert Wieszt de la Mercedes-Benz Sindelfingen, Ralf Weiss de la BMW München, Anita Meliverneyn de la Motorola Sindelfingen, Reinhold Waible, Wolfram Breitling, Jurgen Hamisch-Scheurmann, Horst Singer și Harald Einsenhart de la GKR Schwieberdingen.

Autorul dorește de asemenea să aducă mulțumiri tuturor celor care au fost alături de el pe durata realizării proiectului și a elaborării tezei de doctorat.

1. Sisteme de climatizare pentru automobile

În acest capitol sunt prezentate cerințele pentru sistemele de climatizare folosite în automobile, construcția și funcționarea acestora, precum și principiile soluțiilor clasice de reglare.

1.1 Cerințe de confort pentru sistemele de climatizare

Studiile vizând confortul termic au evidențiat diverse condiționări ale senzației (subiective) de confort:

- condiționări fizice: temperatura aerului, temperatura suprafețelor înconjurătoare, umiditatea relativă a aerului, viteza și presiunea aerului, influențe suplimentare determinate de iluminare
- condiționări intermediare: poziția ocupată, îmbrăcămintea, gradul de aclimatizare, bioritmul zilnic și anual
- condiționări fiziologice: constituția fizică, starea de sănătate, sexul, vârsta, diverse particularități etnice, etc.

Senzația subiectivă de căldură poate fi caracterizată prin "Temperatura percepută", care depinde de temperatura, viteza și umiditatea aerului, precum și de nivelul iluminării [SK91].

Sistemele de climatizare acționează asupra unora dintre parametrii fizici de mai sus. Dintre aceștia, cei care determină în mod esențial gradul de confort termic sunt temperatura, viteza și distribuția aerului [SK91].

1.2 Cerințe specifice pentru climatizarea auto

Climatizarea automobilelor este considerabil mai dificilă decât cea a locuințelor, din următoarele motive [Fran85]:

- Iluminarea solară și "efectul de seră" asociat generează o cantitate de căldură importantă în interiorul cabinei. Caroseriile moderne, foarte aerodinamice, au geamuri cu suprafață mare, puternic înclinate, astfel încât, în timpul verii, mai mult de 3/4 din cantitatea de căldură care pătrunde în interiorul caroseriei se datorează radiației solare. În aceste condiții, dacă temperatura aerului din exterior este de 40 °C la umbră, temperatura din interior poate atinge 80 °C.
- Radiația luminoasă poate produce accentuarea senzației de căldură, pe timpul verii.
- Pasagerii stau mult mai aproape de pereți și ferestre, care au o temperatură apropiată de cea a aerului exterior.
- Izolația termică a automobilelor este mult mai slabă decât cea a locuințelor, conducând la pierderile importante de căldură.
- Aerul este suflat din apropierea pasagerilor, de aceea nu trebuie să fie prea cald, iarna, sau prea rece, vara. În consecință, debitul de aer trebuie să fie mult mai mare, pentru a asigura eficiența climatizării. Astfel, dacă în birouri viteza aerului generat de sistemele de climatizare este în jur de 0,2 m/s, în automobile aceasta poate atinge 3 m/s.
- Pasagerii generează, prin respirație, o cantitate importantă de umiditate (50 ... 100 g/oră). În aceste condiții, sistemele de climatizare trebuie să asigure evitarea aburirii parbrizului, prin suflarea de aer cald și uscat în direcția acestuia. Acest fapt contravine cerințelor de confort, care impun suflarea de aer cald spre picioare și de aer mai rece spre partea superioară a corpului.

Sistemele de climatizare pentru automobile permit păstrarea unei temperaturi interioare în jur de 20 °C, chiar atunci când temperatura exterioară atinge 40 °C la umbră, în condițiile unei iluminări solare puternice [Fran85].

La circulația în oraș, în regim de poluare, se impune utilizare aerului recirculat (fără preluare de aer din exterior). În aceste condiții, evacuarea umidității din interior pune probleme suplimentare sistemului de climatizare.

Creșterea gradului general de confort impune diminuarea curentului de aer la care sunt expuși pasagerii [WKL86] [SK91]. Pentru aceasta, în automobilele europene se utilizează dirijarea indirectă a fluxurilor de aer [Fran85]. Se urmărește de asemenea ameliorarea calității aerului, prin filtrarea prafului, polenului, fumului, mirosurilor neplăcute și a poluanților chimici [SK91].

Panoul de comandă a sistemului de climatizare trebuie să fie cât mai simplu de utilizat, cu minimum de comenzi [WKL86]. Reglarea parametrilor climatizării trebuie să se facă, pe cât posibil, individual, pentru fiecare pasager, atât pentru locurile din față, cât și pentru cele din spate ("reglare multizonală") [WKL86]. Trebuie să existe atât un mod de funcționare complet automat, cât și posibilitatea modificării individuale a parametrilor [WKL86]. Cea mai performantă alternativă o reprezintă utilizarea unor "programe" specifice, corespunzătoare preferințelor fiecărei persoane. Aceste programe sunt stocate în memoria microcalculatorului de comandă, fiind activate în funcție de persoana care ocupă fiecare loc.

Unele sisteme de climatizare au un regim "economic", cu decuplarea sistemului de răcire, care are un consum relativ ridicat de energie (în timpul verii, poate determina creșterea consumului de combustibil al automobilului cu 5 ... 10 %). Cu toate acestea, în absența climatizării, deschiderea ferestrelor și a turelei pentru aerisire duce la creșterea rezistenței aerodinamice și la un consum chiar mai mare de combustibil [Fran85].

Prin utilizarea unor materiale ușoare, se urmărește reducerea greutății elementelor din sistemul de climatizare (radiator, vaporizator), cu efecte favorabile pentru protecția pasagerilor în caz de accident. O altă necesitate pentru sistemele de climatizare moderne este protecția mediului, prin utilizarea unui agent de răcire fără FCKW și asigurarea unei bune etanșeități a circuitului de răcire [SK91].

1.3 Structura sistemelor de climatizare auto

Sistemele de climatizare utilizate în automobile îndeplinesc următoarele funcții principale:

- pomparea aerului cu ajutorul unei turbine
- dirijarea corespunzătoare a fluxurilor de aer, cu ajutorul unor clapete
- încălzirea aerului suflat, cu ajutorul unui sistem de încălzire
- răcirea aerului suflat, cu ajutorul unui sistem de răcire
- reglarea parametrilor aerului suflat (temperatură, viteză, distribuție), cu ajutorul unui sistem electronic.

Astfel, se pot identifica patru subsisteme, prezentate detaliat în cele ce urmează:

- subsistemul de ventilație
- subsistemul de încălzire
- subsistemul de răcire
- regulatorul electronic.

În primele variante constructive, sistemele de climatizare erau obținute prin adăugarea unui subsistem de răcire alături de subsistemul de încălzire, prezent în toate variantele de dotare. În automobilele moderne, toate subsistemele prezentate mai sus sunt grupate în "sisteme de climatizare integrate", care asigură performanțe superioare și au o construcție mai compactă [Fran85].

O tendință modernă în construcția sistemelor de climatizare este încălzirea prin radiație. Lichidul de răcire este folosit pentru a încălzi porțiuni din suprafața podelei, a pereților laterali și a scaunelor, [WKL86] [SK91]. Această metodă asigură un confort sporit, reducând debitul de aer și influența

factorilor perturbatori. Umplerea cu lichid de răcire fierbinte a acestor rezervoare asigură și "încălzirea latentă" pe durata staționării.

1.3.1 Subsistemul de ventilație

Fluxul de aer generat de subsistemul de ventilație parcurge radiatorul subsistemului de încălzire și vaporizatorul subsistemului de răcire, înainte de a fi introdus în cabină. Astfel, subsistemul de ventilație are următoarele funcții:

- creșterea eficienței încălzirii și răcirii
- îndirijarea fluxurilor de energie termică spre zonele unde acestea sunt necesare (de exemplu, spre parbriz pentru dezaburire)
- eliminarea excesului de umiditate generat de pasageri
- creșterea gradului subiectiv de confort al pasagerilor.

Turbina de aer este antrenată, de regulă, de către un motor electric cu turație reglabilă [Fran85]. Există și variante cu acționare hidraulică [WKL86]. Aerul suflat poate fi preluat fie din exterior, fie din interior, în regim de aer recirculat. Sistemele mai sofisticate permit reglarea proporției între debitul de aer exterior și cel recirculat [Fran85] [SK91]. În aceste cazuri, proporția este stabilită, în funcție de temperatura și umiditatea aerului din exterior, de către o buclă de reglare separată.

Orificiile de ventilație sunt amplasate, de regulă, în următoarele poziții [Fran85]:

- spre picioare
- spre corp
- spre parbriz.

Pentru locurile din spate pot fi prevăzute orificii de ventilație suplimentare în tavan, în partea posterioară a cabinei [WKL86], sau între scaunele din față.

1.3.2 Subsistemul de încălzire

Încălzirea aerului suflat se face cu ajutorul unui radiator parcurs de lichidul de răcire a motorului. Debitul de lichid poate fi reglat cu ajutorul unei electrovalve. În varianta cea mai simplă, comanda acesteia este de tipul "totul sau nimic". Prin modificarea factorului de umplere al semnalului de comandă binar, debitul poate fi reglat cvasi-continuu [Fran85].

Deoarece pompa de apă principală, care asigură și debitul prin radiatorul subsistemului de încălzire, este acționată de către motor, debitul menționat depinde de turația motorului [Fran85]. Pentru eliminarea acestei dependențe, sistemele performante folosesc o pompă suplimentară, acționată electric [WKL86] [SK91].

1.3.3 Subsistemul de răcire

Subsistemul de răcire, care realizează răcirea aerului suflat, are schema bloc din Fig. 1.1 și funcționează pe principiul pompei de căldură [Fran85].

Compresorul este antrenat de către motorul automobilului, prin intermediul unui cuplaj cu comandă electromagnetică. Puterea absorbită de compresor poate ajunge, în condiții extreme, până la 8 kW. Agentul de răcire, preluat sub formă de gaz, este puternic comprimat, astfel încât temperatura lui crește de la 60 °C la 120 °C, iar presiunea crește de la 12 bar la 25 bar.

În condensator, gazul se răcește și se lichefiază, fiind transferat în rezervor, unde se păstrează o rezervă de lichid și se extrag resturile de apă, care ar afecta funcționarea sistemului. Condensatorul este plasat în

exteriorul cabinei, alături de radiatorul sistemului de răcire. Un ventil cu comandă electrică permite închiderea circuitului de răcire.

Supapa de expansiune, comandată în funcție de temperatură și presiune, pulverizează lichidul în vaporizator, la o presiune de 2 ... 3,5 bar. Evaporarea se face cu absorbție de căldură, de la aerul care traversează vaporizatorul. Astfel, aerul este răcit puternic (până aproape de 0 °C), fiind apoi suflat în interiorul cabinei.

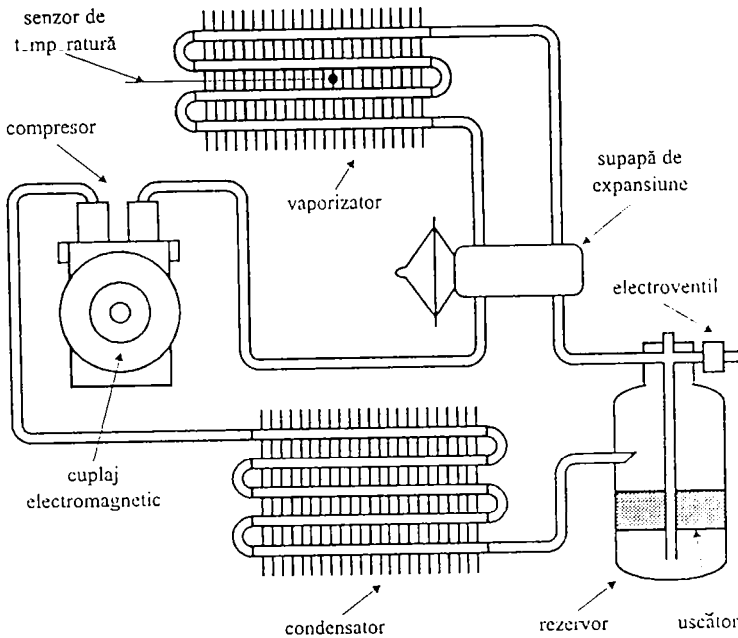


Fig. 1.1 Subsistemul de răcire

În funcție de gradul de răcire și de umiditatea relativă, poate avea loc condensarea vaporilor de apă din aer. Astfel se produce uscarea aerului, efect foarte util în timpul verii, mai ales în regimul de aer recirculat. Apa rezultată prin condensare este evacuată printr-un orificiu aflat în partea inferioară a automobilului.

Cuplajul electromagnetic al compresorului este comandat de obicei de către un regulator independent, conectat cu un senzor al temperaturii din vaporizator. Prin păstrarea unei temperaturi în jur de 1 °C, se evită înghețarea apei condensate.

1.4 Modificarea temperaturii aerului - variante constructive

Modificarea temperaturii aerului suflat în interiorul cabinei se poate face prin două metode distincte, cărora le corespund două variante constructive [Fran85].

1.4.1 Controlul debitului lichidului de răcire

În această variantă, prezentată în partea stângă a schemei bloc din Fig. 1.2, se controlează, prin intermediul unei electrovalve, debitul lichidului de răcire prin radiator.

Cantitatea de căldură transmisă în interiorul cabinei este influențată de turația motorului (care determină debitul pompei de apă), de temperatura aerului exterior și de viteza automobilului (care determină debitul de aer prin radiator). De aceea, această variantă se folosește doar împreună cu un regulator electronic, care compensează influențele nedorite [Fran85].

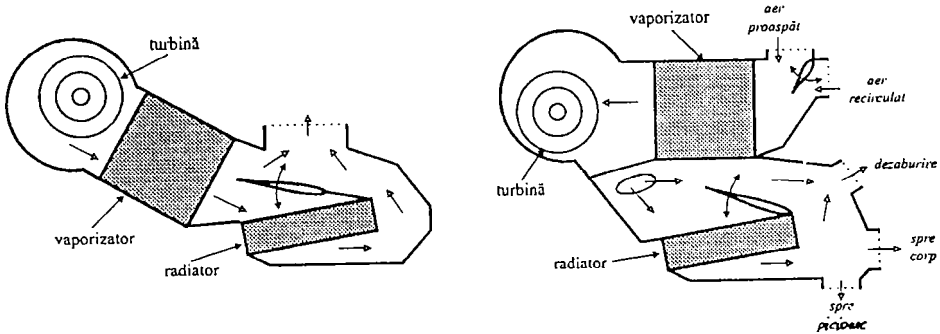


Fig. 1.2 Variantele de modificare a temperaturii aerului: controlul debitului lichidului de răcire (stânga) și controlul proporției amestecului de aer încălzit și aer răcit (dreapta)

1.4.2. Controlul proporției amestecului de aer încălzit și aer răcit

Această variantă, denumită "re-heat" și prezentată în partea dreaptă a Fig. 1.2, presupune răcirea întregului flux de aer până aproape de 0 °C, urmată de divizarea acestuia în două părți, dintre care una trece prin radiator, iar a doua îl ocolește. În continuare, cele două fluxuri se amestecă, proporția fiind controlată prin intermediul unei clapete, antrenată de un motor. Astfel se poate modifica temperatura aerului suflat [Fran85].

Temperatura aerului care iese din vaporizator este reglată independent, de aceea funcționarea sistemului nu este influențată de temperatura aerului exterior.

Deoarece întreaga cantitate de aer introdusă în cabină parcurge în prealabil vaporizatorul, are loc o bună eliminare a vaporilor de apă, prin condensare. Aerul uscat asigură un confort sporit și evită aburirea ferestrelor.

Prin preluarea fluxurilor de aer suflate în cabină din puncte diferite ale circuitului, ca în reprezentarea schematică din partea dreaptă a Fig. 1.2, se realizează o diferențiere a temperaturilor. Astfel, aerul suflat spre picioare este mai cald, iar cel suflat înspre partea superioară a cabinei este mai rece. Această distribuție asigură un grad sporit de confort [Fran85].

Datorită avantajelor menționate, varianta "re-heat" este preferată în sistemele de climatizare moderne. Deoarece întregul debit de aer este răcit, consumul energetic al acestei variante este superior.

1.5 Regulatorul electronic

În funcție de nivelul de performanță, regulatoarele electronice folosite în sistemele de climatizare pot fi clasificate astfel [SK91]:

- cu comanda subsistemului de încălzire;
- cu comanda independentă a subsistemelor de încălzire și răcire;
- cu comanda integrată a subsistemelor de încălzire, răcire și ventilație.

În continuare aceste variante vor fi analizate principal, studiul detaliat al regulatoarelor folosite urmând să fie realizat într-un capitol următor.

1.5.1 Regulator cu comanda subsistemului de încălzire

Comanda încălzirii, pentru sistemele cu controlul debitului lichidului de răcire, se face conform schemei de principiu din Fig. 1.3 [Fran85].

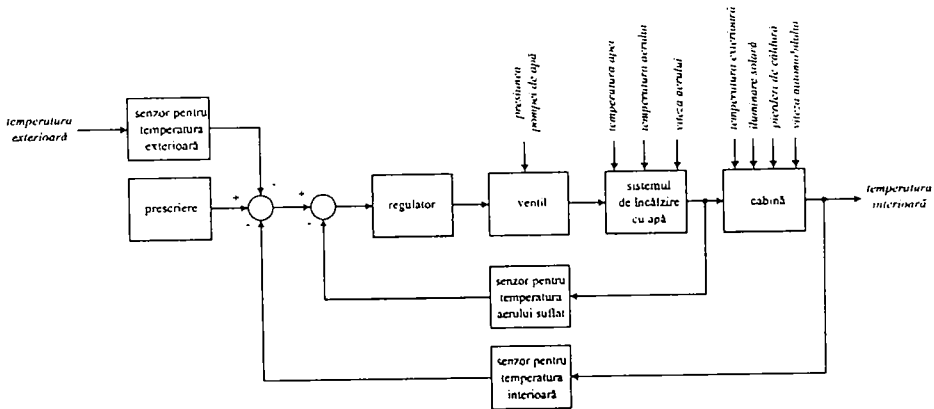


Fig. 1.3 Regulator cu comanda subsistemului de încălzire

Schema bloc include modelele pentru sistemului de încălzire și cabină, evidențiind mărimile perturbatoare: turația motorului, temperatura lichidului de răcire, temperatura aerului exterior, debitul de aer, iluminarea solară și viteza de deplasare. Efectul acestor perturbații este compensat de către regulator.

Regulatorul de tip proporțional este urmat de un modulator în durată, care comandă electrovalva cu un semnal binar. Se observă prezența a două mărimi de reacție, pentru temperatura interioară (principala mărime reglată) și pentru temperatura aerului suflat. Se utilizează și o compensare suplimentară, în funcție de temperatura exterioară. Senzorii de temperatură sunt termistoare NTC.

1.5.2 Regulator cu comanda independentă a subsistemelor de încălzire și răcire

Acest tip de regulator, având schema de principiu din Fig. 1.4, conține bucle de reglare independente pentru temperatura interioară, subsistemul de răcire și ponderea aerului recirculat.

Regulatorul pentru temperatura interioară acționează asupra debitului lichidului de răcire, fiind identic cu cel din varianta anterioară.

Bucula aferentă subsistemului de răcire reglează temperatura aerului care trece prin vaporizator, acționând asupra cuplajului electromagnetice al compresorului. Regulatorul bipozițional este un simplu comparator.

Funcționarea subsistemului de răcire poate fi oprită, prin acționarea unui buton de pe panoul de comandă, pentru a economisi energia.

Comparatorul superior comandă trecerea în regim de aer recirculat, atunci când eroarea buclei de reglare a temperaturii interioare depășește o valoare de prag. Această situație intervine vara, când temperatura aerului exterior este foarte ridicată, capacitatea subsistemului de răcire fiind depășită. Preluarea de aer ceva mai rece din interior permite astfel o răcire mai eficientă. Butonul "aer recirculat" forțează comparatorul în poziția "recirculat", utilizându-se, de regulă, în condiții de poluare, pentru a evita pătrunderea mirosului neplăcut din exterior.

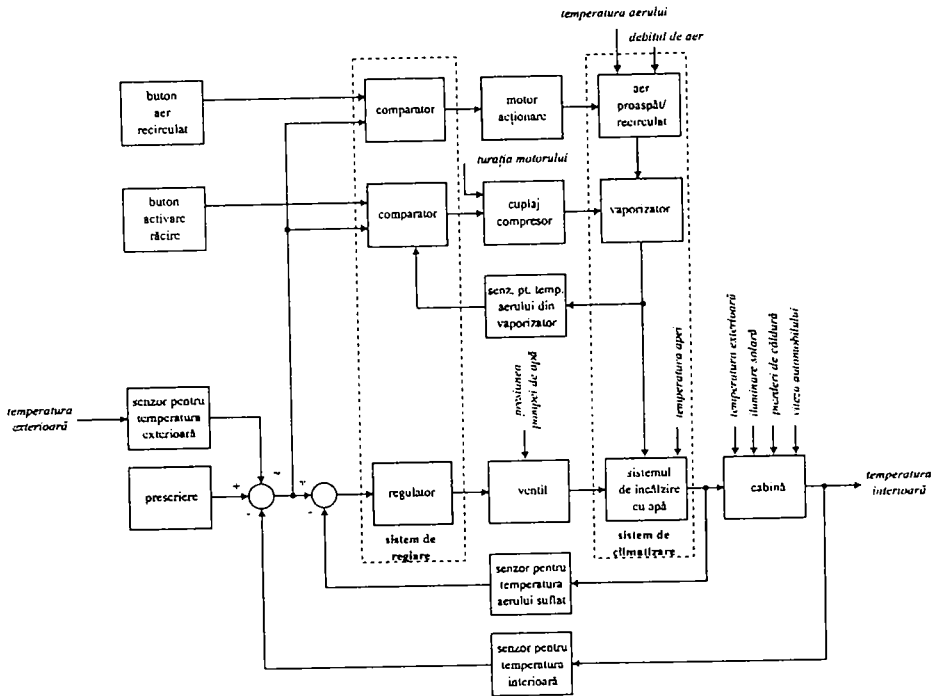


Fig. 1.4 Regulator cu comanda independentă a subsistemelor de încălzire și răcire

1.5.3 Regulator cu comanda integrată a subsistemelor de încălzire, răcire și ventilație

Această tip de regulator, având schema de principiu din Fig. 1.5, asigură gradul maxim de confort, realizând, pe lângă reglarea individuală a celor trei subsisteme, corelarea acțiunii acestora, precum și o comportare diferită în situații speciale. De exemplu, la pornirea automobilului rece în timpul iernii, nu se pornește turbina de aer până când lichidul de răcire a motorului nu atinge o temperatură suficientă [Fran85].

Echipamentul electronic de reglare îndeplinesc și funcții auxiliare: afișarea erorilor de funcționare, comanda pompei auxiliare pentru lichidul de răcire, comanda sistemului de încălzire pentru automobilul în repaus, comanda încălzirii geamului din spate.

62/278
366 B

Regatoarele moderne sunt în exclusivitate microcalculatoare digitale. Pe lângă funcțiile de mai sus, acestea asigură interfața cu panoul de comandă, funcții de supraveghere, diagnoză și securitate.

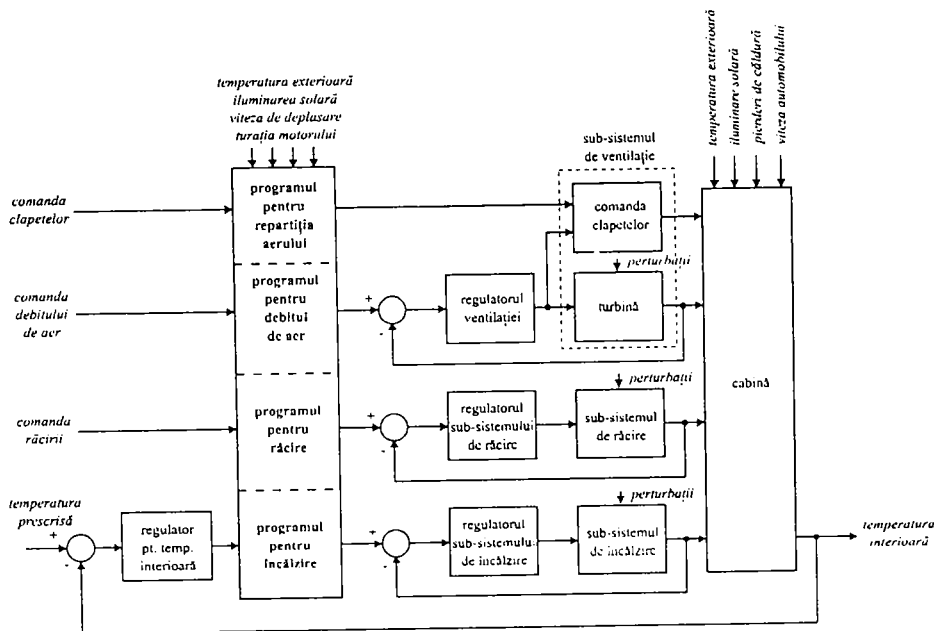


Fig. 1.5 Regulator cu comanda integrată a subsistemelor de încălzire, răcire și ventilație

1.5.4 Panoul de comandă al regatoarelor electronice

Panoul de comandă al sistemelor de climatizare trebuie să permită atât comanda în regim automat, cât și modificarea individuală a parametrilor. Reglajele trebuie să fie distincte, pentru cele două locuri din față. Un set de butoane comune comandă regimurile speciale (dezaburire, aer recirculat). Cu toate acestea, panoul de comandă trebuie să fie cât mai simplu, cu un număr minim de butoane, dispuse astfel încât să permită o acționare comodă.

În Fig. 1.6 se prezintă panoul de comandă al unui sistem de climatizare modern, cu reglare complet automatizată, în variantă "re-heat".

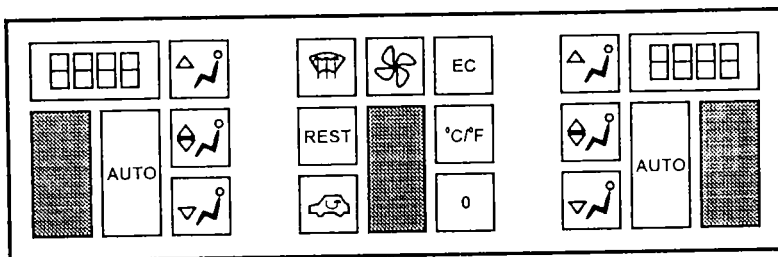


Fig. 1.6 Panoul de comandă al unui sistem de climatizare

Temperatura prescrisă este stabilită individual, pentru cele două părți, și este alifată digital (dreptunghiurile mai închise la culoare reprezintă butoanele unor potențiometre). Butonul °C/°F stabilește unitățile de măsură pentru temperatura afișată.

Butonul **AUTO** activează controlul automat al debitului și distribuției aerului. În acest caz, un regulator automat comandă turbina de aer, în funcție de temperatura prescrisă, de temperatura lichidului de răcire și de viteza automobilului.

Comanda manuală a debitului de aer poate fi realizată în trei regimuri de distribuție, selectate prin butoane separate pentru cele două părți:

- sus
- jos
- sus și jos.

Butoanele comune din partea de mijloc comandă regimurile speciale:

- dezaburire
- ventilație
- regim economic, fără răcirea aerului - EC
- încălzite în staționare - REST
- aer recirculat
- oprirea completă a climatizării - 0.

1.6 Concluzii

- ⇒ Senzația subiectivă de confort este determinată de un set de condiționări fizice, intermediare și fiziologice. Gradul de confort termic este dat în principal de temperatura, viteza și distribuția aerului. Asupra acestor parametri acționează sistemele de climatizare.
- ⇒ Climatizarea automobilelor este considerabil mai dificilă decât cea a locuințelor, principalele cauze fiind: iluminarea solară combinată cu efectul de seră; izolația termică mai slabă; debitul mult mai mare de aer; necesitatea evacuării umidității generate de pasageri.
- ⇒ Pentru sistemele de climatizare utilizate în automobile există două variante constructive distincte, care se comandă diferit: cu controlul debitului lichidului de răcire, respectiv cu controlul proporției de aer încălzit și răcit.
- ⇒ Dependent de variantă, structura sistemului de comandă este diferită. Sistemele de comandă folosite curent în sistemele de climatizare auto pot fi grupate în trei clase de performanță: cu comanda subsistemului de încălzire; cu comanda independentă a subsistemelor de încălzire și răcire; cu comanda integrată a subsistemelor de încălzire, răcire și ventilație.
- ⇒ În sistemele de climatizare performante trebuie implementată comanda automată a debitului de aer, care să permită reglarea cât mai eficientă a temperaturii, oferind în același timp un grad de confort optim.
- ⇒ Pe lângă regimul normal de climatizare, trebuie asigurate o serie de regimuri speciale: dezaburire, ventilație, economic, aer recirculat, etc., în care comanda se realizează diferit.
- ⇒ Proiectarea reguletoarelor de temperatură trebuie să aibă în vedere o operare cât mai simplă și posibilitatea reglajelor individuale pentru fiecare pasager (cel puțin pentru locurile din față).

2. Reglatoare de temperatură clasice pentru sistemele de climatizare auto

În acest capitol sunt prezentate reglatoarele "clasice", folosite curent în sistemele de climatizare auto. După evaluarea problemelor care intervin, se va descrie atât soluția de principiu, cât și o variantă evoluată, cu performanțe ridicate.

2.1 Problemele reglării temperaturii în sistemele de climatizare auto

În Fig. 2.1 este dată schema bloc a reglatoarelor de temperatură folosite în sistemele de climatizare auto. Temperatura aerului din interiorul cabinei, θ_i , se reglează prin intermediul temperaturii aerului suflat de sistemul de climatizare spre cele două locuri din față, θ_{oR} (dreapta) și θ_{oL} (stânga). Mărimile prescrise sunt temperaturile pentru locurile din față, θ_{oR}^* și θ_{oL}^* (notația "*" va indica în continuare mărimile de referință). Celelalte notații folosite în figură sunt: RT - regulator de temperatură; INT - model termic pentru interiorul cabinei.

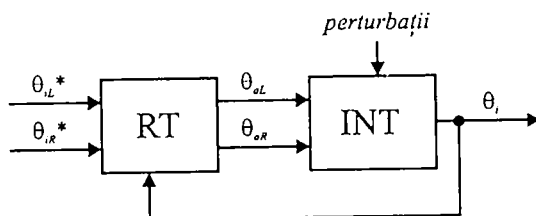


Fig. 2.1 Schema bloc a reglatoarelor de temperatură din sistemele de climatizare auto

În continuare vor fi menționate principalele probleme care apar la reglarea temperaturii în automobile:

1. Cea mai importantă dificultate este cauzată de valoarea mare a debitului de aer suflat (mult mai mare decât la sistemele de climatizare din locuințe). În consecință, reglatoarele au o tendință accentuată de instabilitate. Acest aspect se observă foarte bine în cazul reglării manuale, când sunt necesare multe ajustări succesive, producându-se, de regulă, oscilații de temperatură.
2. Obținerea unor temperaturi diferite, controlate, pentru cele două locuri din față este relativ dificilă, în condițiile în care aerul suflat se amestecă în interior și apar influențe reciproce.
3. Reglarea este afectată de influențele foarte puternice ale factorilor perturbatori: iluminarea solară, temperatura exterioară, viteza de deplasare, temperatura lichidului de răcire, etc. Compensarea eficientă a perturbațiilor impune măsurarea acestora și includerea lor în calculele algoritmului de reglare.
4. Pentru asigurarea unei senzații de confort corespunzătoare, debitul aerului suflat trebuie corelat cu temperaturile dorite și cu mărimile perturbatoare. Comanda optimă a debitului de aer este, de asemenea, o sarcină complexă.
5. Analiza comportării termice a interiorului automobilului conduce la un model foarte complicat, făcând dificilă proiectarea algoritmică a reglatoarelor, precum și acordarea exclusiv prin simulare. De aceea, punerea la punct a reglatoarelor impune, în faza finală, ajustări succesive, cu măsurători pe automobilul real, în condiții de funcționare cât mai diverse. Experiența proiectantului are un rol esențial în procesul de acordare.

2.2 Soluția de principiu

Fig. 2.2 prezintă schema bloc a unui sistem de reglare a temperaturii pentru climatizarea auto [WKL86].
Sunt folosite următoarele notații:

- blocuri
 - procesul condus
 - SI_R, SI_L - subsisteme de încălzire pentru locul din dreapta / stânga
 - INT - model termic pentru interiorul cabinei
 - blocuri de reglare și compensare
 - RTS_R, RTS_L - regulator pentru temperatura aerului suflat spre locul din dreapta / stânga
 - K_{LR} - bloc de compensare pentru temperatura aerului suflat în partea dreaptă, în funcție de temperatura prescrisă pentru partea stângă
 - K_{RL} - bloc de compensare pentru temperatura aerului suflat în partea stângă, în funcție de temperatura prescrisă pentru partea dreaptă
 - elemente de măsură
 - STS_R, STS_L - senzor pentru temperatura aerului suflat spre locul din dreapta / stânga
 - STI - senzor pentru temperatura interioară
 - STE - senzor pentru temperatura exterioară
- mărimi
 - mărimi reglate
 - θ_{aR}, θ_{aL} - temperatura aerului suflat spre locul din dreapta / stânga
 - θ_i - temperatura interioară
 - mărimi de prescriere
 - $\theta_{iR}^*, \theta_{iL}^*$ - temperatura interioară prescrisă pentru locul din dreapta / stânga
 - perturbații externe
 - θ_o - temperatura exterioară
 - mărimi interne ale schemei
 - $\theta_{aR}^*, \theta_{aL}^*$ - temperatura prescrisă pentru aerul suflat spre locul din dreapta / stânga

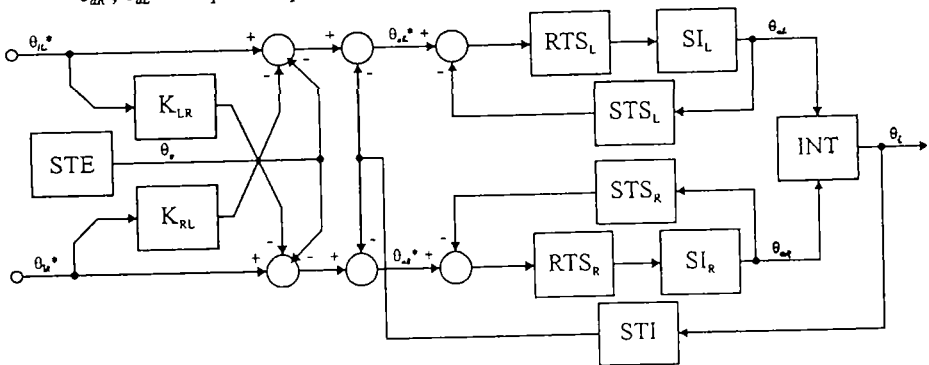


Fig. 2.2 Sistem de reglare a temperaturii pentru climatizarea auto

Se observă o structură de sistem de reglare automată cu două mărimi de referință și o reacție principală, repartizată la cele două referințe. Există două bucle interne, în care temperatura aerului suflat este reglată

separat, pentru fiecare parte, cu ajutorul unor reglatoarele PI. Bucla externă realizează reglarea temperaturii aerului interior, funcționarea sa fiind echivalentă cu a unui regulator de tip P.

Blocurile K_{LR} și K_{RL} realizează o compensare, modificând valoarea prescrisă a temperaturii aerului suflat spre una din părți, în funcție de temperatura prescrisă pentru cealaltă parte. Astfel, presupunând că pasagerul din dreapta crește valoarea θ_{IR}^* , aerul suflat spre acesta va duce la creșterea temperaturii și în partea stângă. Blocul de compensare determină însă reducerea temperaturii aerului suflat spre locul din stânga, astfel încât temperatura sesizată de pasagerul respectiv să fie cât mai puțin modificată. Blocurile K_{LR} și K_{RL} sunt implementate prin elemente de tip PT1.

O a doua compensare diminuează influența perturbatoare a temperaturii exterioare. Astfel, creșterea acestei temperaturi ar determina ridicarea temperaturii interioare. Bucla de reglare externă poate anula modificarea, dar într-un timp relativ lung și cu posibile oscilații. Conexiunea de compensare realizează însă reducerea temperaturii aerului suflat, reducând instantaneu influența temperaturii exterioare. Chiar dacă nu se realizează o compensare perfectă, acțiunea buclei de reglare externe este mai puțin pronunțată, reducându-se variațiile de temperatură la reglare.

2.3 Regulator cu performanțe ridicate

În continuare se va descrie un regulator real, folosit în autoturismele Mercedes de clasă superioară, în scopul evidențierii funcțiilor și complexității acestuia și ca element de comparație, în abordarea “clasică”. Descrierea se bazează pe datele preluate din specificația elaborată de constructor. Atât structura schemei, cât și formulele care stau la baza funcționării blocurilor componente au fost elaborate pe baza experienței firmei constructoare și au fost optimizate experimental, prin încercări pe sisteme (automobile) reale.

2.3.1 Schema bloc a sistemului de comandă

Schema bloc a sistemului de comandă a climatizării este prezentată în Fig. 2.3.

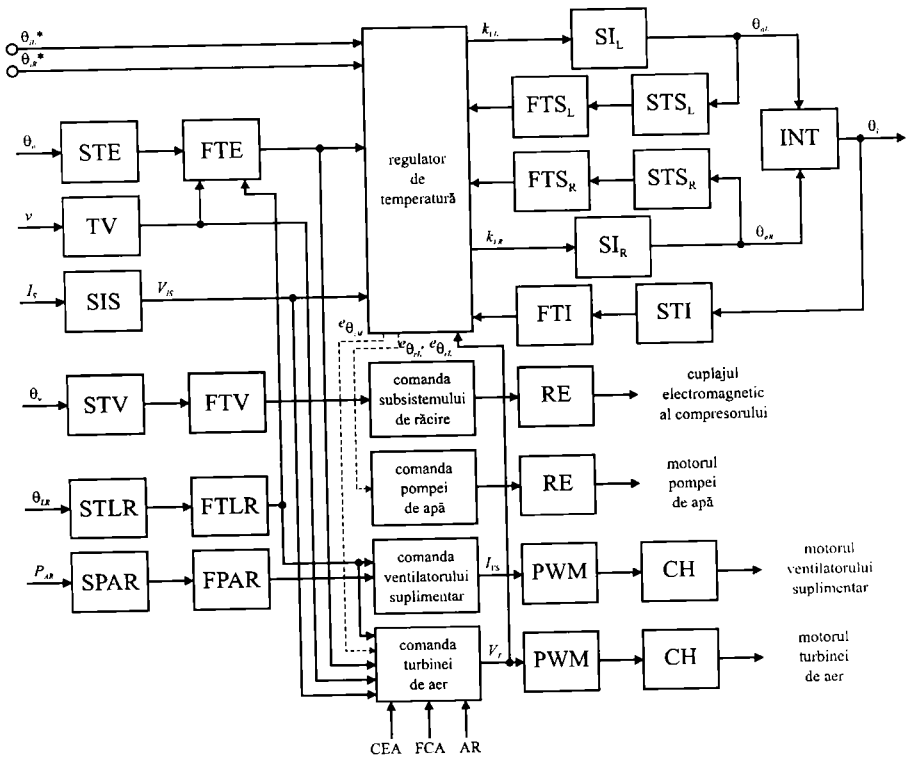


Fig. 2.3 Sistemul de comandă a climatizării

Sunt folosite următoarele notații:

- blocuri
 - procesul condus
 - SI_R, SI_L - subsistem de încălzire pentru locul din dreapta / stânga
 - INT - model termic pentru interiorul cabinei
 - elemente de execuție
 - RE - releu electronic (cu comandă “totul sau nimic”)
 - CH - chopper (cu comandă PWM)

PWM - modulator PWM

- elemente de măsură
STS_R, STS_L - senzor pentru temperatura aerului suflat spre locul din dreapta / stânga
FTS_R, FTS_L - filtru pentru temperatura aerului suflat spre locul din dreapta / stânga
STI - senzor pentru temperatura interioară
FTI - filtru pentru temperatura interioară
STE - senzor pentru temperatura exterioară
FTE - filtru pentru temperatura exterioară
SIS - senzor pentru iluminarea solară
STV - senzor pentru temperatura din vaporizator
FTV - filtru pentru temperatura din vaporizator
STLR - senzor pentru temperatura lichidului de răcire a motorului
FTLR - filtru pentru temperatura lichidului de răcire a motorului
SPAR - senzor pentru presiunea agentului de răcire din subsistemul de răcire
FPAR - filtru pentru presiunea agentului de răcire din subsistemul de răcire

- mărimi

- mărimi reglate
 θ_{aR} , θ_{aL} - temperatura aerului suflat în partea dreaptă/stângă
 θ_i - temperatura interioară
- mărimi de comandă
 k_{vR} , k_{vL} - factor de umplere pentru comanda electrovalvelor subsistemului de încălzire
 V_T - tensiunea de comandă a turbinei de aer
 I_{TS} - curentul de comandă a ventilatorului suplimentar
- mărimi de prescriere
 θ_{iR}^* , θ_{iL}^* - valori prescrise pentru temperatura interioară, în partea dreaptă/stângă
- perturbații externe
 θ_o - temperatura exterioară
 v - viteza de deplasare
 I_S - iluminarea solară
 θ_v - temperatura aerului în vaporizator
 θ_{LR} - temperatura lichidului de răcire a motorului
 p_{AR} - presiunea agentului de răcire
CEA - semnal binar care indică starea clapei de evacuare a aerului
FCA - semnal binar care indică utilizarea filtrului cu cărbune activ
AR - semnal binar care indică utilizarea regimului de aer recirculat
- mărimi interne ale schemei
 V_i - tensiunea de la senzorul de iluminare solară
 $e_{\theta_{iM}}$ - eroarea pentru temperatura interioară medie (variabilă internă a regulatorului de temperatură)
 $e_{\theta_{iR}}$, $e_{\theta_{iL}}$ - eroarea pentru temperatura aerului suflat în partea dreaptă/stângă (variabile interne ale regulatorului de temperatură)

Schema prezentată anterior conține blocuri de comandă, de măsură și de reglare, a căror principiu de funcționare va fi detaliat în secțiunile următoare.

2.3.2 Blocurile de comandă

Sistemul de comandă din schema bloc prezentată anterior generează semnale de comandă pentru următoarele elemente de execuție:

- electrovalvele radiatoarelor și motorul pompei de apă din subsistemul de încălzire
- cuplajul electromagnetic al compresorului din subsistemul de răcire
- motorul turbinei de aer și motorul ventilatorului suplimentar din subsistemul de ventilație.

Modul de comandă va fi explicat pe scurt în cele ce urmează. Sistemul de climatizare se bazează pe controlul debitului lichidului de răcire. Subsistemul de încălzire conține două radiatoare, controlate separat, pentru dreapta și stânga. Deoarece electrovalvele sunt comandate binar ("totul sau nimic"), debitul de lichid se controlează prin intermediul factorilor de umplere k_{vR} și k_{vL} ai semnalelor de comandă.

Motorul turbinei de aer și cel al ventilatorului suplimentar sunt alimentate de chopper comandate cu semnale modulate în durată (PWM). Blocul de comandă a turbinei de aer generează un semnal analogic, V_T , transmis unui modulator PWM, care comandă chopperul. Blocul de comandă a ventilatorului suplimentar generează un semnal similar (în acest caz, un curent), I_{13} .

Cuplajul electromagnetic al compresorului și motorul pompei de apă sunt comandate binar, cu ajutorul unor relee electronice.

2.3.3 Blocurile de măsurare

Tensiunile obținute de la senzorii de temperatură și presiune sunt convertite analog-digital, valorile numerice fiind apoi filtrate (pentru a elimina eventualele perturbații electromagnetice) și a evita regimurile tranzitorii bruște ale reglatoarelor. Tabelul următor prezintă sintetic câteva dintre mărimile măsurate.

	perioada de eșantionare	rezoluția minimă	constanta de timp
temperatura interioară, θ_i	20 ms	0,25 °C	0,3 s
temperatura exterioară, θ_o	20 ms	1 °C	(2.7)
temperaturile aerului suflat, θ_{aL} , θ_{aR}	20 ms	0,5 °C	0,02 s
temperatura în vaporizator, θ_v	20 ms	0,25 °C	0,02 s
presiunea agentului de răcire, p_{AR}	50 ms	0.1 bar	0,05 s

Mărimile θ_i , θ_{aL} , θ_{aR} , θ_v și p_{AR} sunt filtrate prin software, cu ajutorul formulelor discretizate ale unor elemente PT1, având constantele de timp precizate în tabel. Atunci când temperatura prescrisă medie a aerului suflat, notată θ_{M^*} în schema din Fig. 2.4, este mai mică de -5 °C, constanta de timp pentru θ_i se modifică la valoarea de 15 s, pentru a evita oscilațiile comenzii turbinei de aer.

Pentru prelucrarea θ_o se utilizează un algoritm de calcul mai complex, descris în cele ce urmează. Fie $(\theta_o)_{max}$ valoarea măsurată a temperaturii exterioare. Valoarea calculată a temperaturii exterioare, $(\theta_o)_{calc}$, depinde de viteza de deplasare v și de temperatura lichidului de răcire, θ_{LR} . Se notează cu $(\theta_o)_{mem}$ valoarea temperaturii exterioare stocate în memoria EEPROM a calculatorului de comandă. Algoritmul presupune următoarele operații:

- dacă $\theta_{LR} < 40 \text{ }^\circ\text{C}$:
 - * dacă $(\theta_o)_{\max}$ este crescătoare, $(\theta_o)_{\text{calc}}$ se obține din $(\theta_o)_{\max}$ prin filtrare cu un element PT1 având constanta de timp de 32 s;
 - * dacă $(\theta_o)_{\max}$ este descrescătoare, $(\theta_o)_{\text{calc}}$ se obține direct din $(\theta_o)_{\max}$
 - * în ambele cazuri, $(\theta_o)_{\text{calc}}$ se stochează în $(\theta_o)_{\text{mem}}$
- dacă $\theta_{LR} > 40 \text{ }^\circ\text{C}$ și $v > 20 \text{ km/h}$, se procedează ca și mai sus
- dacă $\theta_{LR} > 40 \text{ }^\circ\text{C}$ și $v < 20 \text{ km/h}$, $(\theta_o)_{\text{calc}}$ se obține prin citirea $(\theta_o)_{\text{mem}}$
- la oprirea motorului, $(\theta_o)_{\text{calc}}$ se stochează în $(\theta_o)_{\text{mem}}$.

Turația motorului și viteza de deplasare sunt preluate de la sistemul electronic de control al autoturismului și nu necesită filtrări suplimentare.

Iluminarea solară I_s este măsurată cu un senzor specializat. Pentru a evita luarea în considerare a caracteristicii senzorului, toate specificațiile se referă la tensiunea furnizată de acesta, V_b .

2.3.4 Regulatorul de temperatură

Schema bloc regulatorului de temperatură este prezentată în Fig. 2.4. Sunt folosite următoarele notații:

- blocuri
 - procesul condus
 - SI_R, SI_L - subsistem de încălzire pentru locul din dreapta / stânga
 - INT - model termic pentru interiorul cabinei
 - blocuri de reglare și calcul
 - RTI - regulator pentru temperatura interioară
 - RTS_R, RTS_L - regulator pentru temperatura aerului suflat spre locul din dreapta / stânga
 - (1), (2) - blocuri de calcul (detaliate ulterior)
 - elemente de măsură
 - STS_R + FTS_R, STS_L + FTS_L - senzor + filtru pentru temp. aerului suflat dreapta / stânga
 - FPTS_R, FPTS_L - filtru pentru prescrierea temperaturii aerului suflat dreapta / stânga
 - STI + FTI - senzor + filtru pentru temperatura interioară
 - STE - senzor pentru temperatura exterioară
 - FTE - filtru pentru temperatura exterioară
 - TV - traductor de viteză
 - SIS - senzor pentru iluminarea solară
 - FIS - filtru pentru corecția în funcție de iluminarea solară

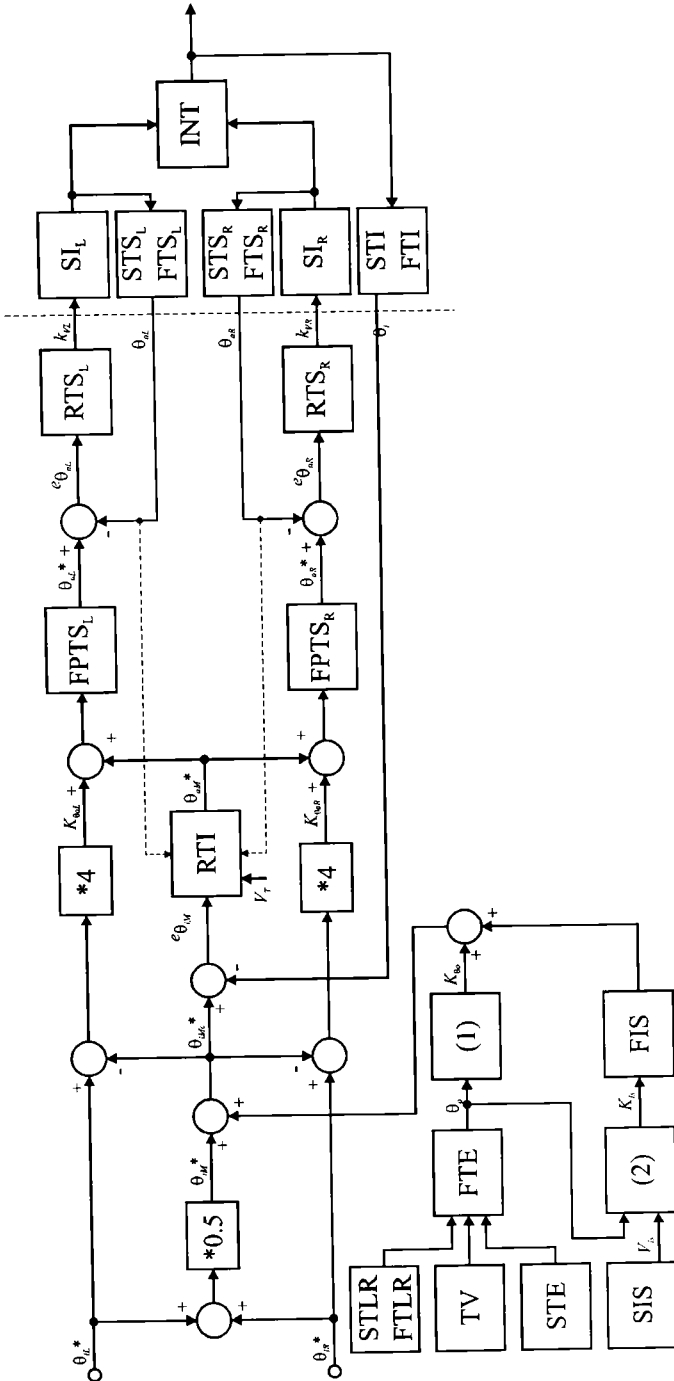


Fig. 2.4 Regulatorul de temperatură

- mărimi
 - mărimi reglate
 - θ_{aR}, θ_{aL} - temperatura aerului suflat în partea dreaptă / stângă
 - θ_i - temperatura interioară
 - mărimi de comandă
 - k_{vR}, k_{vL} - factor de umplere pentru comanda electrovalvelor subsistemului de încălzire
 - mărimi de prescriere
 - $\theta_{iR}^*, \theta_{iL}^*$ - temperatura interioară prescrisă pentru locul din dreapta / stânga
 - perturbații externe
 - θ_o - temperatura exterioară
 - V_{Is} - tensiunea de la senzorul de iluminare solară
 - mărimi interne ale schemei
 - θ_{iM}^* - temperatura interioară prescrisă medie
 - θ_{iMc}^* - temperatura interioară prescrisă medie, compensată
 - $e_{\theta_{iM}}$ - eroarea pentru temperatura interioară medie
 - θ_{aM}^* - temperatura prescrisă a aerului suflat, valoare medie
 - $K_{\theta_{aR}}, K_{\theta_{aL}}$ - corecție pentru temperatura prescrisă a aerului suflat în partea dreaptă / stângă
 - $\theta_{aR}^*, \theta_{aL}^*$ - temperatura prescrisă a aerului suflat în partea dreaptă / stângă
 - $e_{\theta_{aR}}, e_{\theta_{aL}}$ - eroarea pentru temperatura aerului suflat în partea dreaptă / stângă
 - K_{θ_o} - corecție în funcție de temperatura exterioară
 - $K_{V_{Is}}$ - corecție în funcție de iluminarea solară
 - V_T - tensiunea de comandă a turbinei de aer

Pentru a evita complicarea excesivă a notațiilor, mărimile furnizate de senzori și filtrate vor fi notate la fel ca și mărimile reale, reprezentate în schema bloc din Fig. 2.3.

Se observă aplicarea principiului de reglare cu bucle în cascadă, prezentat în cadrul soluției de principiu. Îmbunătățirea performanțelor a impus introducerea unor blocuri suplimentare și complicarea modului de operare al reglatoarelor. Aceste aspecte vor fi detaliate în continuare.

2.3.4.1 Buclele de reglare pentru temperatura aerului suflat

Buclele care includ reglatoarele RTS_R și RTS_L primesc valorile prescrise ale temperaturii aerului suflat ($\theta_{aL}^*, \theta_{aR}^*$) și valorile măsurate (θ_{aL}, θ_{aR}). Reglatoarele furnizează factorii de umplere ai semnalelor PWM care comandă electrovalvele radiatoarelor (k_{vL}, k_{vR}) (raportul între durata de comandă în conducție și perioada semnalului). Reglatoarele au o caracteristică de transfer neliniară, reprezentată în Fig. 2.5. Valorile sunt stocate în memoria calculatorului de comandă, caracteristica fiind implementată prin software.

2.3.4.2 Corecția stânga-dreapta

Datorită amestecării aerului suflat în interiorul caroseriei, este imposibilă măsurarea separată temperaturilor sesizate de cei doi pasageri care ocupă locurile din față. Cu toate acestea, asigurarea gradului dorit de confort impune reglarea separată a celor două temperaturi. Rezolvarea acestei probleme este posibilă prin folosirea unei bucle de reglare unice pentru temperatura aerului suflat (cu un singur senzor), urmată de calcularea temperaturilor prescrise ale aerului suflat spre cele două locuri, în funcție de ieșirea regulatorului și de pozițiile reglajelor individuale corespunzătoare. Astfel, modificarea temperaturii interioare prescrise pentru unul din pasageri nu conduce la modificarea temperaturii percepute de către celălalt pasager.

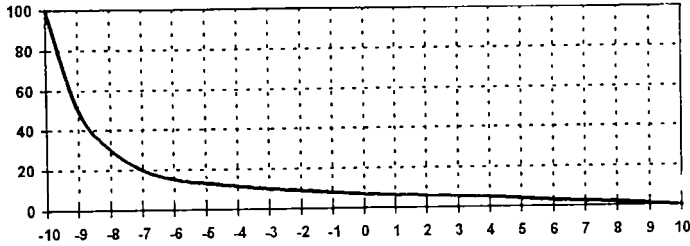


Fig. 2.5 Caracteristica de transfer a regloatoarelor pentru temperatura aerului suflat: $k_{vL,R} [\%] = f(\theta_{aL,R} [^{\circ}\text{C}])$

Conform schemei din Fig. 2.4, se calculează temperatura interioară prescrisă medie

$$\theta_{aI}^* = \frac{\theta_{aL}^* + \theta_{aR}^*}{2} \quad (2.1)$$

la care se adaugă mărimile de compensare a perturbațiilor (analizate ulterior), obținându-se temperatura interioară prescrisă medie compensată, θ_{aIc}^* , transmisă ca referință buclei de reglare a temperaturii interioare. Regulatorul RTI calculează temperatura prescrisă medie a aerului suflat, θ_{aM}^* .

Pe de altă parte, se calculează mărimile de corecție pentru temperatura prescrisă a aerului suflat ($K_{\theta_{aL}}$, $K_{\theta_{aR}}$), pe baza diferențelor între prescrierile individuale și media acestora (incluzând compensările):

$$\begin{aligned} K_{\theta_{aL}} &= 4 \cdot (\theta_{aL}^* - \theta_{aIc}^*) \\ K_{\theta_{aR}} &= 4 \cdot (\theta_{aR}^* - \theta_{aIc}^*) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Coefficienții au fost aleși astfel încât să se respecte condiția menționată anterior, referitor la minimizarea influențelor reciproce între temperaturile prescrise, respectiv percepute, de către pasageri.

Temperaturile prescrise ale aerului suflat (θ_{aL}^* , θ_{aR}^*) se calculează prin însumarea temperaturii prescrise medii (θ_{aM}^*) cu mărimile de corecție corespunzătoare, urmată de o filtrare trece-jos. Blocurile FPTS_R și FPTS_L sunt elemente PT1 cu constanta de timp variabilă, în funcție de modulul valorii prescrise medii:

- $|\theta_{aM}^*| \geq 2 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ constanta de timp = 8 s
- $|\theta_{aM}^*| < 2 \text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ constanta de timp = 30 s

Astfel se asigură un răspuns rapid al buclei de reglare, când aceasta este departe de echilibru. Pe de altă parte, se evită modificările bruște ale temperaturii aerului suflat, când se acționează butoanele de prescriere în condițiile în care bucla de reglare este aproape de echilibru. Valorile constantelor de timp au fost determinate experimental.

2.3.4.3 Bucla de reglare pentru temperatura interioară

Așa cum s-a arătat anterior, reglarea temperaturii interioare este o sarcină relativ dificilă. Pe lângă motivele amintite, intervine unul suplimentar: răspunsul regloatoarelor pentru temperatura aerului suflat depinde de temperatura lichidului de răcire a motorului. Se folosește un regulator digital, bazat pe formula în timp discret a unui regulator PI, în care s-au operat câteva modificări.

Astfel, modul de operare al regulatorului RTI se schimbă în funcție de starea buclei de reglare și de temperatura lichidului de răcire a motorului, θ_{LR} .

a) start cald: $\theta_{LR} > 40 \text{ }^\circ\text{C}$

Eșantionul următor al mărimii de ieșire se calculează în funcție de eșantionul precedent și de mărimea de intrare:

$$(\theta_{aM}^*)_k = (\theta_{aM}^*)_{k-1} + \alpha \cdot \text{sign}\{e_{\theta_{aM}}\} - \beta \cdot e_{\theta_{aM}} \quad (2.3)$$

Coefficienții au valori variabile, astfel:

- coeficientul α depinde de mărimea de intrare a regulatorului, $e_{\theta_{aM}}$, și de debitul de aer, prin intermediul tensiunii de comandă a motorului turbinei, V_T (al cărei algoritm de calcul va fi detaliat ulterior):
 - * $|e_{\theta_{aM}}| < 0.2 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow \alpha = 0$
 - * $|e_{\theta_{aM}}| > 0.2 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow \alpha$ se calculează în funcție de V_T , conform graficului din Fig. 2.6;
- coeficientul β depinde de mărimea de intrare a regulatorului, $e_{\theta_{aM}}$ conform graficului din Fig. 2.7; înainte de introducerea în formulă, produsul $\beta e_{\theta_{aM}}$ se filtrează prin software, cu ajutorul formulei discretizate a unui element PT1 având constanta de timp de 15 s.

La pornire, valoarea ieșirii corespunzătoare pasului de eșantionare anterior, $(\theta_{aM}^*)_{k-1}$, se preia din memoria nevolatilă a calculatorului de comandă (unde a fost stocată înainte de oprire).

b1) start rece, bucla de reglare aproape de echilibru: $\theta_{LR} < 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $|e_{\theta_{aM}}| < 2 \text{ }^\circ\text{C}$

Regulatorul operează ca și în cazul startului cald.

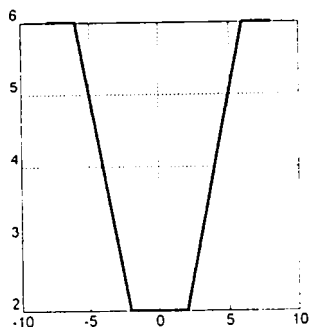
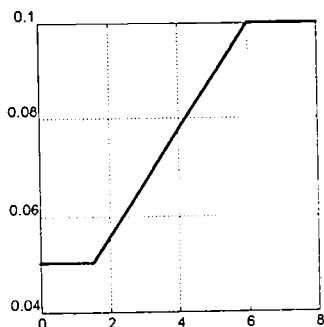


Fig. 2.6 Coeficientul α [°C] = $f(V_T$ [V])

Fig. 2.7 Coeficientul $\beta = f(e_{\theta_{aM}}$ [°C])

b2) start rece, bucla de reglare departe de echilibru: $\theta_{LR} < 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $|e_{\theta_{aM}}| \geq 2 \text{ }^\circ\text{C}$

Mărimea de ieșire a regulatorului se calculează în funcție de temperaturile măsurate ale aerului suflat (θ_{aL} , θ_{aR}) și de semnul mărimii de intrare $e_{\theta_{aM}}$:

$$\bullet \quad e_{\theta_{iM}} < -2 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow \theta_{aM}^* = \frac{\theta_{al} + \theta_{ar}}{2} + 25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.4)$$

$$\bullet \quad e_{\theta_{iM}} > 2 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow \theta_{aM}^* = \frac{\theta_{al} + \theta_{ar}}{2} - 25 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

Acest mod de comandă urmărește atingerea cât mai rapidă a echilibrului. Ieșirea din starea “departe de echilibru” se face în următoarele condiții:

- dacă $e_{\theta_{iM}}$ a fost mai mic decât $-2 \text{ }^\circ\text{C}$, în pasul de eșanționare când $e_{\theta_{iM}}$ devine mai mare decât $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ θ_{aM}^* se micșorează cu $15 \text{ }^\circ\text{C}$, iar în pasul următor se aplică formula corespunzătoare stării de echilibru
- dacă $e_{\theta_{iM}}$ a fost mai mare decât $2 \text{ }^\circ\text{C}$, în pasul de eșanționare când $e_{\theta_{iM}}$ devine mai mic decât $2 \text{ }^\circ\text{C}$ θ_{aM}^* se mărește cu $15 \text{ }^\circ\text{C}$, iar în pasul următor se aplică formula corespunzătoare stării de echilibru.

Se evită astfel apariția unor regimuri tranzitorii, care pot cauza variații de temperatură și debit de aer resimțite de pasageri.

2.3.4.4 Compensarea efectelor perturbațiilor externe

Compensarea efectelor perturbațiilor externe se realizează prin însumarea unor mărimi de compensare la valoarea prescrisă a temperaturii interioare medii:

$$\theta_{iMc}^* = \theta_{iM}^* + K_{\theta_0} + K_{I_s} \quad (2.6)$$

unde:

K_{θ_0} - compensare în funcție de temperatura exterioară

K_{I_s} - compensare în funcție de iluminarea solară și temperatura exterioară

a) Compensarea în funcție de temperatura exterioară

Blocul notat cu (1) în schema din Fig. 2.4 implementează formula de calcul:

$$K_{\theta_0} = \max \left\{ 0 \text{ }^\circ\text{C}, 1 \text{ }^\circ\text{C} - \frac{1}{10} \cdot \theta_o \right\} \quad (2.7)$$

Astfel, atunci când este foarte frig, compensarea contribuie la creșterea temperaturii interioare prescrise, accelerând răspunsul buclei de reglare a temperaturii interioare.

b) Compensarea în funcție de iluminarea solară și temperatura exterioară

Blocul notat cu (2) în schema din Fig. 2.4 implementează formula de calcul:

$$K_{I_s} = \frac{1}{10} \cdot \theta_o - 2 \text{ }^\circ\text{C} \text{ pentru } V_{I_s} > 2,5 \text{ V și } \theta_o > 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.8)$$

Filtrul FIS este un element PT1 cu constanta de timp de 60 s. Perioada de eșanționare a tensiunii de la senzorul de iluminare solară este de 1 s.

2.3.5 Comanda turbinei de aer

După cum s-a arătat mai sus, asigurarea unui grad ridicat de confort presupune corelarea debitului de aer cu temperaturile dorite și cu unele mărimi externe (temperatură exterioară, iluminare solară, viteză).

Tensiunea de comandă a turbinei, V_T , se calculează cu formula:

$$V_T = \left(V_0 + V_{e_{\theta_M}} + V_{\theta_o} - V_S - V_v - V_{CEA} \right) \cdot K_{FCA} \cdot K_{AR} \quad (2.8)$$

unde:

V_0 - termen de bază

$V_{e_{\theta_M}}$ - termen determinat de starea buclei de reglare a temperaturii interioare

V_{θ_o} - termen determinat de temperatura exterioară

V_S - termen determinat de iluminarea solară

V_v - termen determinat de viteza de deplasare

V_{CEA} - termen determinat de deschiderea clapei de evacuare a aerului

K_{FCA} - coeficient determinat de utilizarea filtrului cu cărbune activ

K_{AR} - coeficient determinat de utilizarea regimului de aer recirculat

Valoarea obținută se limitează între $V_{Tmin} = 1,4$ V și $V_{Tmax} = 4,5$ V, după care se transmite modulatorului PWM care comandă chopperul motorului turbinei.

Termenul de bază din formula V_T are valoarea $V_0 = 1,6$ V. Acesta asigură un debit de aer independent de condițiile exterioare.

Termenul $V_{e_{\theta_M}}$ este dat de graficul din Fig. Fig. 2.8, iar termenul V_{θ_o} , de graficul din Fig. 2.9.

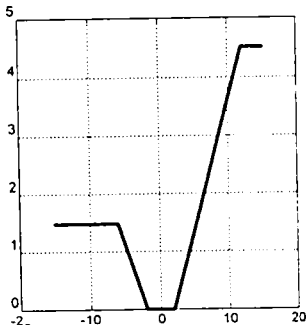


Fig. 2.8 - $V_{e_{\theta_M}} [V] = f(e_{\theta_M} [^{\circ}C])$

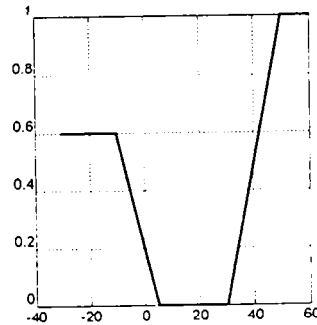


Fig. 2.9 - $V_{\theta_o} [V] = f(\theta_o [^{\circ}C])$

Termenul V_S , dat de graficul din Fig. 2.10, intervine în funcție de valoarea temperaturii exterioare. Decizia se ia pe baza diagramei din Fig. 2.11.

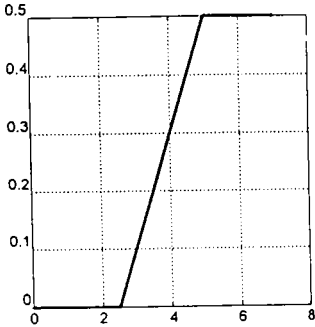


Fig. 2.10 - V_s [V] = f(V_h [V])

Termenul V_v este dat de graficul din Fig. 2.13 și se introduce în formula V_T numai dacă $\theta_o > 23$ °C. Termenul V_{CEA} are valoarea de 0,3 V atunci când este deschisă clapeta de evacuare a aerului și 0 V în caz contrar.

Coeficientul K_{FCA} are valoarea de 1,2 și intervine atunci când se utilizează filtrul cu cărbune activ, destinat eliminării mirosurilor și poluării. Se compensează astfel rezistența opusă de filtru față de fluxul de aer. Pentru a evita variația bruscă a debitului, coeficientul crește treptat, timp de aproximativ 60 s, conform graficului din Fig. 2.12.

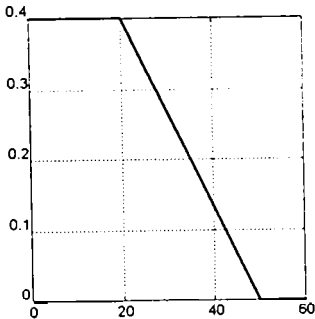


Fig. 2.13 - V_v [V] = f(v [km/h])

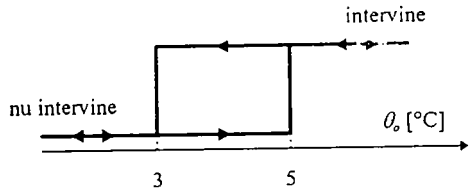


Fig. 2.11 Condiția de introducere a termenului V_s în formula V_T

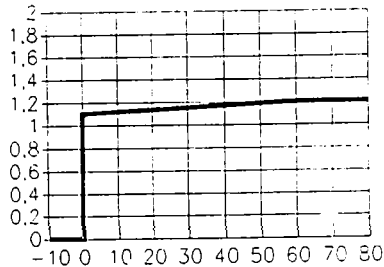


Fig. 2.12 - $K_{FCA} = f(t$ [s])

Coeficientul K_{AR} are valoarea 0,7 și intervine atunci când regimul de aer recirculat este activ manual sau de către senzorul de poluare. Acest coeficient nu intervine atunci când regimul de aer recirculat este activat automat, în condițiile unor temperaturi exterioare foarte mari, cărora subsistemul de răcire nu le poate face față. Astfel, ventilația eficientă contribuie la o mai bună răcire a aerului interior.

La start rece, când lichidul de răcire este rece și temperatura interioară este sub cea prescrisă, debitul de aer trebuie redus, pentru a nu crea o senzație de disconfort. Astfel, tensiunea de comandă pentru turbina de aer în regim de start rece, V_T' , se calculează cu formula:

$$V_T' = \begin{cases} 0,8 \text{ V}; & \theta_{LR} < 30 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0,8 \text{ V} + \frac{V_T - 0,8 \text{ V}}{40 \text{ }^\circ\text{C}}; & 30 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_{LR} \leq 70 \text{ }^\circ\text{C} \\ V_T & \theta_{LR} > 70 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2.10)$$

unde θ_{LR} este temperatura lichidului de răcire, iar V_T este tensiunea de comandă pentru turbina de aer în regim normal, al cărei mod de calcul a fost descris anterior. Intrarea în regimul de start rece se face în funcție de eroarea buclei de reglare a temperaturii interioare, conform graficului din Fig. 2.14.

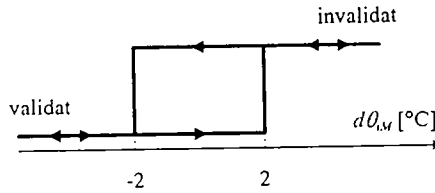


Fig. 2.14 Validarea regimului de start rece pentru comanda turbinei de aer

2.3.6 Comanda ventilatorului suplimentar

Ventilatorul suplimentar asigură, la nevoie, răcirea mai bună a motorului. Semnalul de comandă I_{VS} (curent), care determină factorul de umplere al comenzii chopperului, deci tensiunea de alimentare medie aplicată motorului ventilatorului, se determină cu formula:

$$I_{VS} = \max\{I_{VS1}, I_{VS2}\} \quad (2.11)$$

Primul termen, I_{VS1} , se calculează în funcție de temperatura lichidului de răcire a motorului, θ_{LR} , conform graficului din Fig. 2.15. Al doilea termen, I_{VS2} , se calculează în funcție de presiunea agentului de răcire din subsistemul de răcire, P_{AR} , conform graficului din Fig. 2.16.

Ventilatorul suplimentar nu se comandă atunci când temperatura exterioră θ_o este mai mică decât 5 °C.

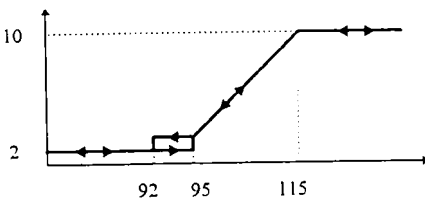


Fig. 2.15 I_{VS1} [mA] = $f(\theta_{LR}$ [°C])

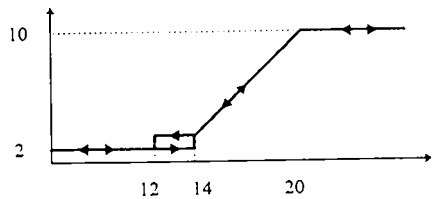


Fig. 2.16 I_{VS2} [mA] = $f(P_{AR}$ [bar])

2.3.7 Comanda subsistemului de răcire

Blocul de comandă a subsistemului de răcire controlează cuplajul electromagnetic al compresorului, în funcție de temperatura din vaporizator θ_v . Această temperatură trebuie să fie cât mai mică, pentru a asigura o răcire eficientă a aerului suflat, dar nu poate scădea sub 1 °C, deoarece ar produce înghețul vaporilor de apă. În plus, cuplarea și decuplarea compresorului nu trebuie să se facă prea frecvent, pentru

a evita uzura cuplajului. Aceste cerințe sunt satisfăcute de algoritmul de comandă cu histerezis, prezentat în Fig. 2.17.

Pentru a evita suprasolicizarea motorului automobilului (compresorul consumând 1 ... 10 CP), durata de cuplare se reduce atunci când temperatura lichidului de răcire depășește 119 °C. În plus, compresorul se decuplează la turații mici ale motorului. Decuplarea intervine și atunci când presiunea agentului de răcire depășește o limită superioară (protecție) sau o limită inferioară (defecțiune).

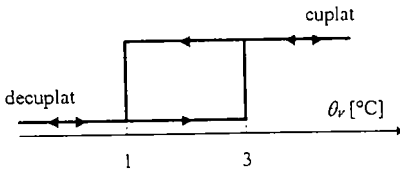


Fig. 2.17 Comanda cuplajului electromagnetic al compresorului

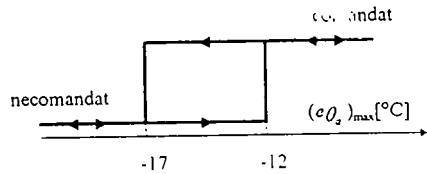


Fig. 2.18 Comanda pompei de apă

2.3.8 Comanda pompei de apă

Pompa de apă din subsistemul de încălzire se decuplează atunci când temperatura aerului suflat este considerabil mai mare decât valoarea prescrisă, conform graficului din Fig. 2.18, unde

$$(e_{\theta_2})_{\max} = \max\{e_{\theta_{at}}, e_{\theta_{af}}\} \quad (2.12)$$

2.3.9 Regimuri de funcționare speciale

Regulatorul descris mai sus oferă un set de regimuri speciale: ZERO (fără climatizare), ECONOMIC (fără răcire, doar cu încălzire), DEFROST (dezghețare). În aceste regimuri, blocurile de comandă au o comportare diferită de cea prezentată anterior.

2.4 Concluzii

- ⇒ Reglarea temperaturii în sistemele de climatizare auto ridică probleme deosebite, datorită debitului mare de aer suflat, care induce o tendință accentuată de instabilitate (comportare oscilantă). În plus, mărimile perturbatoare externe au o influență importantă asupra procesului.
- ⇒ Reglarea independentă a temperaturii, pentru fiecare pasager în parte, este îngreunată de influențele reciproce, datorate amestecării aerului în interiorul cabinei. Regulatorul trebuie să compenseze cât mai bine aceste influențe.
- ⇒ Comanda optimă a debitului de aer suflat este o sarcină relativ dificilă, datorită cerințelor contradictorii determinate, pe de o parte, de un confort optim (debit mic) și, pe de altă parte, de o reglare eficientă a temperaturii (debit mare).
- ⇒ Sistemele de comandă folosite curent în climatizarea automobilelor devin deosebit de complexe, atunci când se urmărește asigurarea unui grad optim de confort. Chiar dacă nu ridică probleme deosebite de implementare, rezultă un număr mare de parametri care trebuie determinați la acordare.
- ⇒ Datorită comportării termice complexe a interiorului automobilului, acesta nu poate fi caracterizat prin modele simple. În consecință, proiectarea regulatorilor și a blocurilor de compensare prin metode analitice este foarte dificilă. Complexitatea modelului termic îngreunează, de asemenea, acordarea

prin simulare. De aceea, punerea la punct se realizează prin ajustări succesive ale parametrilor, pe baza unor măsurători pe automobilul real.

- ⇒ Corelarea celor două aspecte (numărul mare de parametri și necesitatea acordării experimentale) impune efectuarea unui număr mare de teste, în condiții climatice diverse, conducând la creșterea costului total al proiectării și la prelungirea timpului necesar finalizării proiectului. În acest context, utilizarea regulatoarelor fuzzy poate oferi avantaje importante, așa cum se va vedea în capitolele 6-8.

3. Modele termice pentru automobile

În acest capitol se va aborda modelarea comportării termice a cabinei automobilelor, realizându-se o sinteză a informațiilor disponibile în literatură. Se vor introduce mai multe modele, cu diferite grade de complexitate. Implementarea modelelor, în scopul simulării sistemelor de reglare a climatizării, va fi prezentată în capitolul următor.

3.1 Modele termice simplificate

3.1.1 Modelul incintei climatizate ideale

Pentru început, se va elabora modelul termic al unei incinte umplute cu aer, având o izolare termică perfectă față de exterior (schimbul de căldură cu exteriorul făcându-se numai prin intermediul fluxului de aer). Modificarea temperaturii interioare se face pe principiul sistemelor de climatizare: introducerea de aer cu temperatura controlată (simultan cu evacuarea unui debit egal de aer spre exterior).

În reprezentarea schematică din Fig. 3.1 se folosesc următoarele notații:

- θ_i - temperatura aerului din interior [K]
- θ_o - temperatura aerului din exterior [K]
- Q_a - debitul de căldură transmis spre interior [W]
- Q_o - debitul de căldură transmis spre exterior [W].

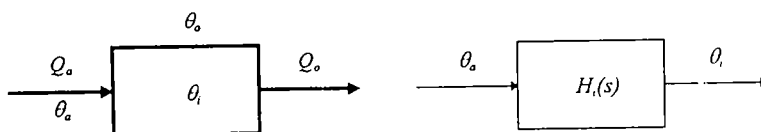


Fig. 3.1 Incintă Ideală: reprezentare schematică (stânga) și modelul operațional (dreapta)

Evoluția temperaturii aerului din interior este descrisă prin ecuația:

$$Q_a - Q_o = m \cdot c_a \cdot \frac{d\theta_i}{dt} \quad (3.1)$$

cu următoarele notații:

- m - masa aerului din interior [kg]
- c_a - căldura specifică a aerului (1005,4 J/kg·K).

Debitul de căldură transmis spre interior este determinat de temperatura și debitul aerului suflat:

$$Q_a = D_m \cdot c_a \cdot \theta_a \quad (3.2)$$

cu notațiile:

- θ_a - temperatura aerului suflat spre interior [K]
- D_m - debitul masic al aerului suflat [kg/s]

Deoarece aerul evacuat are temperatura θ_o , debitul de căldură transmis spre exterior este:

$$Q_o = D_m \cdot c_a \cdot \theta_o \quad (3.3)$$

Deoarece în sistemele de climatizare temperatura interioară se modifică prin intermediul temperaturii aerului suflat, modelul operațional al incintei, reprezentat în Fig. 3.1, va fi exprimat prin funcția de transfer:

$$H_i(s) = \frac{\theta_i(s)}{\theta_a(s)} \quad (3.4)$$

Pe baza ecuațiilor anterioare se obține expresia funcției de transfer:

$$H_i(s) = \frac{1}{1 + s \cdot \tau_a} \quad (3.5)$$

corespunzătoare unui element de tip PT1 cu constanta de timp dată de formula:

$$\tau_a = \frac{m}{D_m} \quad (3.6)$$

sau de formula alternativă:

$$\tau_a = \frac{V}{D_v} \quad (3.7)$$

cu notațiile:

$V = m/\rho$ - volumul aerului din incintă [m³]

$D_v = D_m/\rho$ - debitul volumic al aerului suflat [m³/s]

Astfel, se poate realiza o primă estimare a constantei de timp, obținând valori de ordinul sutelor de secunde.

3.1.2 Modelarea surselor adiționale de căldură

În automobile, căldura transmisă spre interior are, pe lângă sistemul de climatizare, și alte surse: iluminarea solară (cu cea mai importantă contribuție), pasagerii, motorul automobilului și motorul turbinei de aer, etc. Debitul de căldură total generat de aceste surse, notat Q_{ad} în schema bloc din Fig. 3.2, nu depinde de temperatura interioară și se va considera cunoscut. Formulele de calcul vor fi prezentate ulterior.

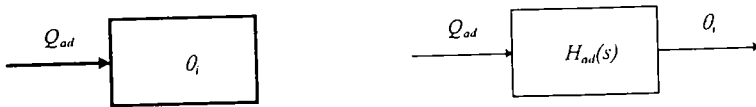


Fig. 3.2 Sursele adiționale de căldură: reprezentare schematică (stânga) și modelul operațional (dreapta)

Considerând separat contribuția acestor surse de căldură (deci anulând debitele de căldură produse prin ventilație), rezultă ecuația:

$$Q_{ad} = m \cdot c_a \cdot \frac{d\theta_i}{dt} \quad (3.8)$$

și funcția de transfer

$$H_{ad}(s) = \frac{\theta_i(s)}{Q_{ad}(s)} = K_{ad} \cdot \frac{1}{s} \quad (3.9)$$

unde constanta este dată de formula:

$$K_{ad} = \frac{1}{m \cdot c_a} \quad (3.10)$$

3.1.3 Modelarea transferului de căldură prin pereții incintei

La elaborarea modelului inițial s-a presupus existența unei izolații termice perfecte. În cazul automobilelor, izolația termică față de exterior este redusă, în special datorită suprafețelor mari ale ferestrelor. Modul în care fiecare element de caroserie contribuie la transferul termic va fi analizat ulterior.

Pentru moment, se va presupune doar că transferul termic are loc prin convecție. În consecință, debitul de căldură, notat Q_p în schema bloc din Fig. 3.3, este dat de ecuația:

$$Q_p = R_{th} \cdot (\theta_i - \theta_o) \quad (3.11)$$

unde R_{th} este rezistența termică echivalentă între interiorul și exteriorul incintei.

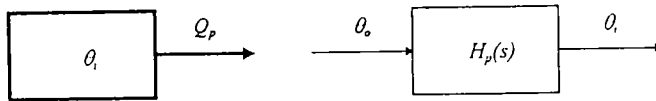


Fig. 3.3 Transferul de căldură prin pereții incintei: reprezentare schematică (stânga) și modelul operațional (dreapta)

Considerând separat contribuția transferului prin pereți (deci anulând debitele de căldură produse de către sistemul de climatizare și sursele adiționale), rezultă ecuația:

$$-Q_p = m \cdot c_a \cdot \frac{d\theta_i}{dt} \quad (3.12)$$

și funcția de transfer

$$H_p(s) = \frac{\theta_i(s)}{\theta_o(s)} = \frac{1}{1 + s \cdot \tau_p} \quad (3.13)$$

unde constanta de timp τ_p este dată de formula:

$$\tau_p = \frac{m \cdot c_a}{R_{th}} \quad (3.14)$$

3.1.4 Modelarea influenței corpurilor din incintă

Modelul propus inițial presupunea că incinta conține doar aer. În cazul cabinei automobilelor, trebuie luate în considerare toate obiectele din interior: pasageri, scaune, bord, capitonaj interior, etc. Aceste

corpuri sunt în contact cu aerul interior, realizându-se un transfer permanent de căldură. În plus, obiectele din interior au o contribuție importantă la absorbția radiației solare. Modelarea detaliată a acestor efecte va fi realizată ulterior, în continuare propunându-se un model aproximativ.

Datorită capacității calorice relativ ridicate, corpurile din interior au o "inerție termică" importantă, întârziind modificarea temperaturii aerului interior. Acest efect poate fi modelat, cu aproximație, prin introducerea unui pol suplimentar în modelul funcției de transfer, care devine:

$$H_i'(s) = \frac{\theta_i(s)}{\theta_a(s)} = \frac{1}{(1+s \cdot \tau_a)(1+s \cdot \tau_c)} \quad (3.15)$$

unde constanta de timp τ_a (corespunzătoare aerului) are valori de ordinul sutelor de secunde, iar constanta de timp τ_c (corespunzătoare corpurilor din interior) are valori de ordinul miilor de secunde. Pentru un exemplu tipic, constantele de timp sunt: $\tau_a = 120$ s; $\tau_c = 1200$ s.

Un model mai simplu, dar suficient de precis în multe aplicații, se obține înlocuind elementul PT2 cu funcția de transfer de mai sus printr-un element PT1, păstrând constanta de timp cu valoare maximă ($\tau_c \gg \tau_a$). Rezultă formula:

$$H_i''(s) = \frac{\theta_i(s)}{\theta_a(s)} = \frac{1}{1+s \cdot \tau_c} \quad (3.16)$$

unde constanta de timp τ_c are valori în jur de 1000 s.

3.1.5 Modelarea subsistemelor de încălzire/răcire a aerului suflat

Modelele introduse până acum au ca mărime de intrare temperatura aerului suflat. În sistemele de climatizare, mărimea de ieșire a regulatorului este comanda electrovalvei radiatorului (sau a clapetei care dozează amestecul de aer). Datorită inerției termice, temperatura aerului atinge cu o oarecare întârziere valoarea dorită. Acest fenomen poate fi modelat prin elemente cu caracter integrator.

Modelul subsistemelor de încălzire/răcire a aerului, prezentat în partea stângă a Fig. 3.4, are ca mărime de intrare semnalul de comandă a electrovalvei, y , (sau factorul de umplere, în cazul comenzii binare) și ca mărime de ieșire temperatura aerului suflat, θ_a . Funcția de transfer $H_{a1}(s)$ a modelului poate avea un caracter integrator (cu un factor de proporționalitate). În literatura consultată se menționează, în alte cazuri, un element PT1 cu o constantă de timp de 60 s. Într-o altă aplicație se folosește un element PT2, cu constantele de timp de 3 s și 60 s (constanta mică modelează inerția termică a aerului, iar cea mare, umplerea treptată a radiatorului cu lichid).

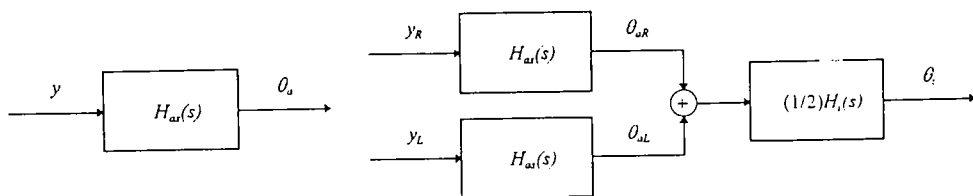


Fig. 3.4 Modelul subsistemelor de încălzire/răcire a aerului suflat (stânga) și utilizarea acestuia în cazul reglării independente a temperaturilor pentru locurile din față (dreapta)

Modelele de mai sus corespund sistemelor de climatizare cu comanda debitului lichidului de răcire. Pentru sistemele cu comanda amestecului de aer, se poate aprecia că răspunsul este mult mai rapid, putând fi modelat printr-un element PT1 cu constanta de timp în jur de 1s.

În cazul sistemelor de climatizare cu comanda independentă a temperaturii aerului suflat, pentru cele două locuri din față, se utilizează două modele de tipul celui introdus anterior, ale căror ieșiri se mediază, ca în schema bloc din partea dreaptă a Fig. 3.4.

În realitate, sistemul modelat este afectat de perturbații importante (temperatura aerului exterior, viteza automobilului, turația motorului, etc.), care ar putea fi luate în considerare. Cu toate acestea, în literatura disponibilă nu au fost întâlnite modele mai precise.

3.1.6 Variante de modele termice simplificate

Prin combinarea elementelor introduse anterior, se pot obține modele cu diverse grade de precizie.

Cel mai simplu model constă dintr-un factor de proporționalitate (corespunzător comenzii subsistemelor de încălzire/răcire) și un element PT1 cu constanta de timp în jur de 1000 s. Astfel, se iau în considerare modificarea temperaturii prin ventilație, transferul de căldură spre exterior și efectul obiectelor din cabină, dar se neglijează inerția termică la încălzirea/răcirea aerului, precum și celelalte debite de căldură.

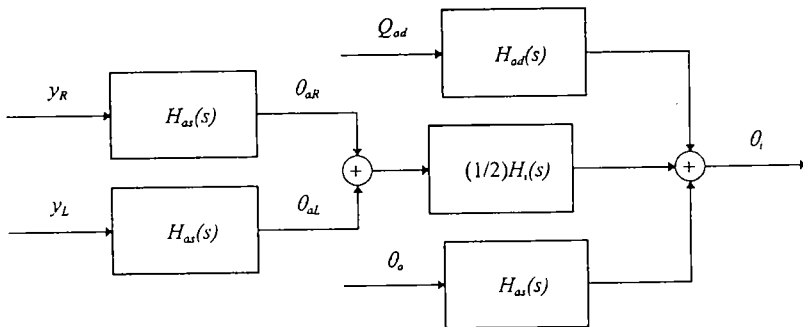


Fig. 3.5 Modelul simplificat în varianta completă

Cel mai complet model are schema bloc din Fig. 3.5 și ia în considerare toate efectele prezentate anterior. Pentru o precizie sporită, se pot utiliza elemente PT2 pentru funcțiile de transfer $H_{as}(s)$ și $H_i(s)$.

3.2 Model termic detaliat

3.2.1 Surse de căldură

În interiorul unui automobil există următoarele surse de căldură [SHA83]:

1. sistemul de climatizare (reprezintă sursa controlată, care permite reglarea temperaturii interioare)
2. radiația solară, convertită în căldură de către:
 - caroserie
 - ferestre
 - obiectele interioare

3. compartimentul motorului
4. podeaua și compartimentul portbagajului
5. motorul instalației de climatizare
6. pasagerii

În continuare se vor analiza pe rând aceste surse, în scopul determinării debitelor de căldură pe care le furnizează.

3.2.1.1 Sistemul de climatizare

Conform celor arătate pentru modelul termic simplificat, debitul de căldură total generat de instalația de climatizare (diferența între debitul primit prin aerul introdus în cabină și cel pierdut prin aerul evacuat din cabină) este dat de formula:

$$Q_v = D_m \cdot c_a \cdot (\theta_a - \theta_i) \quad (3.17)$$

cu notațiile:

- Q_v - debitul de căldură total generat de instalația de climatizare [W]
- D_m - debitul masic al aerului suflat de instalația de climatizare [kg/s]
- c_a - căldura specifică a aerului (1005,4 J/kg·K)
- θ_a - temperatura aerului suflat [°C]
- θ_i - temperatura aerului din interior [°C]

Formula de mai sus este valabilă atât în regimul de aer proaspăt, cât și în cel de aer recirculat. Dacă instalația de climatizare nu este în funcțiune, dar se realizează ventilația cu aer exterior, se utilizează aceeași formulă, cu temperatura exterioară θ_o în locul temperaturii aerului suflat θ_a .

3.2.1.2 Iluminarea solară

Componentele infraroșii din radiația solară sunt parțial absorbite de către corpuri, fiind convertite în căldură. Rezultă astfel încălzirea corpurilor, care emit o parte din căldură în mediul înconjurător. În cazul automobilelor, corpurile care primesc radiația solară sunt: caroseria, ferestrele și obiectele interioare (scaune, bord, tapiserie). În continuare se vor deduce ecuațiile care caracterizează transferul termic, pentru fiecare element.

a) caroseria

Debitele de căldură primite și emise de caroserie sunt prezentate în Fig. 3.6. Se folosesc următoarele notații:

- Q_1 - debitul de căldură provenit de la radiația solară și absorbit de caroserie [W]
- Q_2 - debitul de căldură emis spre exterior [W]
- Q_B - debitul de căldură emis spre interior [W]

Debitul de căldură provenit de la radiația solară este dat de formula:

$$Q_1 = a_B \cdot I_B \cdot S_B \quad (3.18)$$

cu notațiile:

- a_B - coeficient de absorbție a radiației solare de către caroserie
- I_B - intensitatea radiației solare [W/m²]
- S_B - aria suprafeței care primește radiația solară [m²]

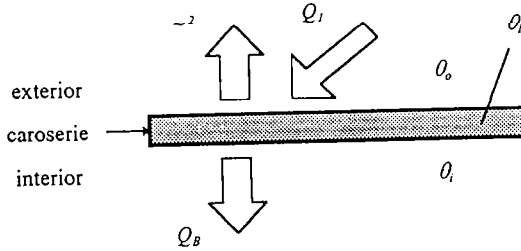


Fig. 3.6 Debiturile de căldură primite și emise de caroserie

Coefficientul de absorbție a_B este determinat în principal de culoarea vopselei. Prin metoda de măsurare descrisă în [SHA83] s-au obținut valorile:

- pentru alb: 0,47
- pentru negru: 0,89.

Intensitatea radiației solare I_B depinde de următorii parametri:

- înclinarea suprafeței față de direcția soarelui, determinată la rândul ei de:
 - elevația soarelui (dată de latitudine, oră și data calendaristică)
 - azimutul soarelui față de automobil (dacă soarele este în față sau lateral)
 - înclinarea suprafeței față de orizontală
- gradul de transparență a atmosferei, τ_a

De exemplu, intensitatea radiației solare primite de o suprafață orizontală, la 35° latitudine nordică, la solstițiul de vară, este reprezentat în Fig. 3.7 [SHA83]. Se observă influența gradului de transparență a atmosferei și a elevației soarelui, dată de oră.

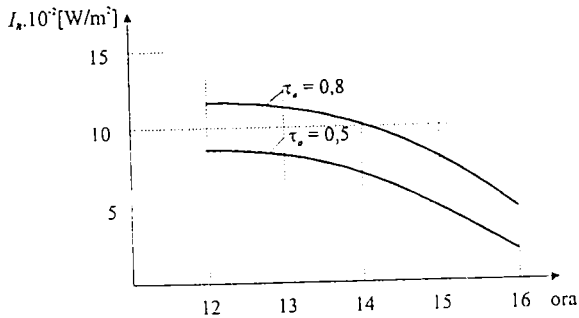


Fig. 3.7 Intensitatea radiației solare în funcție de oră

Pentru o analiză exactă, caroseria se descompune în părțile componente: acoperiș, uși laterale dreapta, uși laterale stânga (se consideră doar acele elemente care delimitează cabina automobilului, deci fără capota motorului și fără aripi, și care primesc direct lumina solară, deci fără podea). Analizând separat fiecare componentă, se obțin grafice de tipul celor din Fig. 3.8 [SHA83].

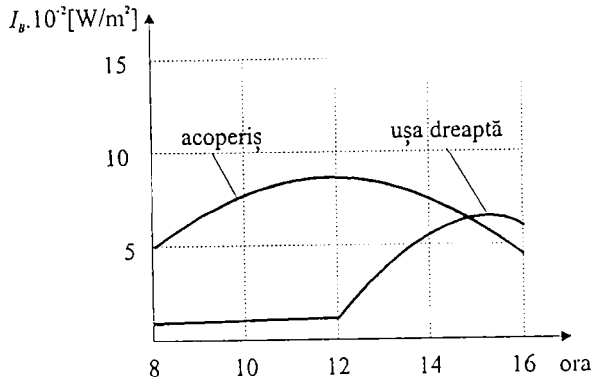


Fig. 3.8 Iluminarea elementelor caroseriei

Debitul de căldură emis spre exterior este dat de formula:

$$Q_2 = \alpha_o \cdot (\theta_B - \theta_o) \cdot S_B \quad (3.19)$$

cu notațiile:

- α_o - coeficient de transfer al căldurii de la caroserie spre exterior [$W/m^2 \cdot K$]
- θ_B - temperatura caroseriei [$^{\circ}C$]
- θ_o - temperatura exterioară [$^{\circ}C$]
- S_B - aria caroseriei [m^2]

Coeficientul de transfer α_o depinde de viteza aerului la suprafața caroseriei. Astfel, dacă automobilul este în repaus, transferul căldurii se face prin convecție naturală, iar coeficientul de transfer depinde de înclinarea suprafeței și de diferența de temperatură, conform formulelor (aproximative) [SHA83]:

- acoperiș : $\alpha_o = 2,63 \cdot (\theta_B - \theta_o)^{0,25}$
- ușă laterală : $\alpha_o = 1,98 \cdot (\theta_B - \theta_o)^{0,25}$

Dacă automobilul este în mișcare, predomină convecția forțată, iar coeficientul de transfer depinde în principal de viteza aerului (aproximativ egală cu viteza de deplasare v), conform formulei [SHA83]:

$$\alpha_o = 4,41 \cdot v^{0,8} \quad (3.20)$$

Debitul de căldură emis spre interior este dat de formula:

$$Q_B = K_B \cdot (\theta_B - \theta_i) \cdot S_B \quad (3.21)$$

cu notațiile:

- K_B - coeficient de transfer al căldurii de la caroserie spre interior [$W/m^2 \cdot K$]
- θ_B - temperatura caroseriei [$^{\circ}C$]
- θ_i - temperatura interioară [$^{\circ}C$]
- S_B - aria caroseriei [m^2]

Coeficientul de transfer K_B depinde de elementul de caroserie considerat (tavan, ușă) și de iluminarea solară. Măsurătorile realizate pe trei automobile tipice au furnizat valoarea medie $K_B = 4,6 W/m^2 \cdot K$ [SHA83].

Modelarea comportamentului termic al caroseriei presupune calcularea debitului de căldură Q_B . Pentru aceasta, este necesară cunoașterea temperaturii caroseriei, determinată, la rândul ei, de cele trei debite de căldură descrise anterior. Calcularea temperaturii θ_B se poate face pe baza următoarei ecuații diferențiale, pe care o vom denumi *ecuația termică a caroseriei*:

$$Q_1 = Q_2 + Q_B + C_B \frac{d\theta_B}{dt} \quad (3.22)$$

cu notația:

C_B - capacitatea calorică a caroseriei [J/ K]

Așa cum s-a arătat anterior, o analiză mai exactă ar presupune descompunerea caroseriei în elemente componente și scrierea ecuației de mai sus pentru fiecare element (rezultând deci temperaturi diferite ale elementelor). Pe de altă parte, deoarece caroseria este confecționată din straturi de materiale diferite iar încălzirea se face numai la suprafață, distribuția în adâncime a temperaturii θ_B este neuniformă [SHA83].

b) ferestrele

În cazul ferestrelor sunt valabile majoritatea considerațiilor expuse anterior pentru caroserie. În continuare se vor prezenta pe scurt formulele și aspectele diferite.

Debitele de căldură primite și emise de ferestre sunt prezentate simplificat în Fig. 3.9. Se folosesc următoarele notații:

Q_3 - debitul de căldură provenit de la radiația solară și absorbit de ferestre [W]

Q_4 - debitul de căldură emis spre exterior [W]

Q_G - debitul de căldură emis spre interior [W]

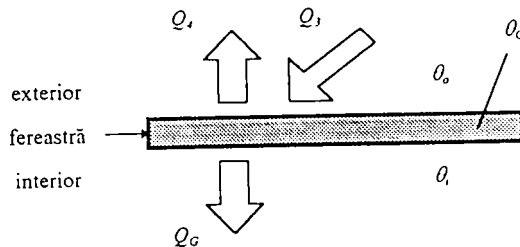


Fig. 3.9 Debitele de căldură primite și emise de ferestre

Debitul de căldură provenit de la radiația solară este dat de formula:

$$Q_3 = a_G \cdot I_G \cdot S_G \quad (3.23)$$

cu notațiile:

a_G - coeficient de absorbție a radiației solare de către ferestre

I_G - intensitatea radiației solare [W/m^2]

S_G - aria suprafeței care primește radiația solară [m^2]

Coeficientul de absorbție a_G depinde de grosimea sticlei și de unghiul de incidență. Pentru o grosime de 5 mm, dependența coeficientului în funcție de unghiul de incidență este prezentată în Fig. 3.10 [SHA83].

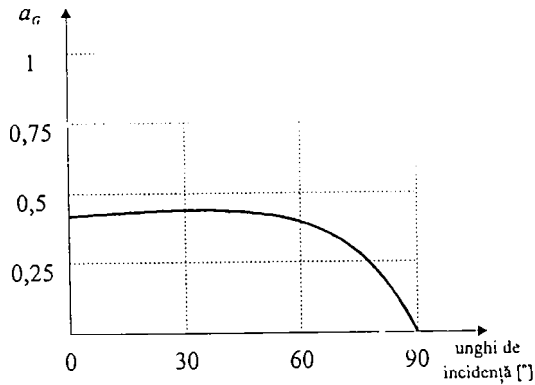


Fig. 3.10 Coeficientul de absorbție a radiației solare

În legătură cu intensitatea radiației solare I_G sunt valabile considerațiile prezentate pentru caroserie.

Pentru o analiză exactă, se pot considera separat următoarele elemente: parbriz; lunetă; ferestre laterale dreapta; ferestre laterale stânga. Analizând separat fiecare element, se obțin grafice de tipul celor din Fig. 3.11[SHA83].

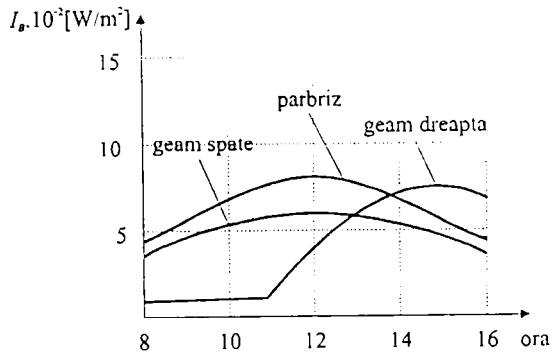


Fig. 3.11 Iluminarea ferestrelor

Debitul de căldură emis spre exterior este dat de formula:

$$Q_4 = \alpha_o \cdot (\theta_G - \theta_o) \cdot S_G \quad (3.24)$$

cu notațiile:

α_o - coeficient de transfer al căldurii de la ferestre spre exterior [$W/m^2 \cdot K$]

θ_G - temperatura ferestrelor [$^{\circ}C$]

θ_o - temperatura exterioară [$^{\circ}C$]

S_G - aria ferestrelor [m^2]

Dacă automobilul este în repaus, coeficientul de transfer α_o depinde de înclinarea suprafeței și de diferența de temperatură, conform formulei:

$$\alpha_o = 1,98 \cdot [(\theta_B - \theta_o) \cdot \cos(\varphi - 90^\circ)]^{0,25} \quad (3.25)$$

unde φ este unghiul ferestrei față de orizontală.

Dacă automobilul este în mișcare, coeficientul de transfer depinde de viteza aerului (aproximativ egală cu viteza de deplasare v) și de orientarea suprafeței. Prin măsurători efectuate pe trei automobile tipice, au rezultat următoarele formule aproximative [SHA83]:

- parbriz: $\alpha_o = 3,79 \cdot v^{0,8}$
- geam spate: $\alpha_o = 4,65 \cdot v^{0,8}$
- ferestre laterale: $\alpha_o = 7,21 \cdot v^{0,8}$

Debitul de căldură emis spre interior este dat de formula:

$$Q_G = \alpha_i \cdot (\theta_G - \theta_i) \cdot S_G \quad (3.26)$$

cu notațiile:

- α_i - coeficient de transfer al căldurii de la ferestre spre interior [$W/m^2 \cdot K$]
- θ_G - temperatura ferestrelor [$^\circ C$]
- θ_i - temperatura interioară [$^\circ C$]
- S_G - aria ferestrelor [m^2]

Coeficientul de transfer depinde de viteza aerului la suprafața ferestrelor, dată la rândul ei de debitul instalației de climatizare. Prin măsurători efectuate pe trei automobile tipice, au rezultat următoarele formule aproximative [SHA83]:

- parbriz: $\alpha_i = 0,584 \cdot V_a^{0,5}$
- geam spate: $\alpha_i = 0,700 \cdot V_a^{0,5}$
- ferestre laterale: $\alpha_i = 0,495 \cdot V_a^{0,5}$

Ecuția termică a ferestrelor este similară cu ecuația termică a caroseriei:

$$Q_3 = Q_4 + Q_G + C_G \frac{d\theta_G}{dt} \quad (3.27)$$

cu notația:

- C_G - capacitatea calorică a ferestrelor [J/K]

Așa cum s-a arătat în cazul caroseriei, o analiză mai exactă ar necesita tratarea separată a ferestrelor, cu scrierea ecuației de mai sus pentru fiecare fereastră (rezultând astfel temperaturi diferite). Spune deosebire de caroserie, în cazul ferestrelor distribuția de temperatură în adâncime se poate considera uniformă.

c) obiectele interioare

Debitele de căldură primite și emise de obiectele interioare sunt prezentate simplificat în Fig. 3.12. Se folosesc următoarele notații:

- Q_3 - debitul de căldură provenit de la radiația solară, transmis prin geamuri și absorbit de obiectele interioare [W]
- Q_{Bi} - debitul de căldură emis spre interior [W]

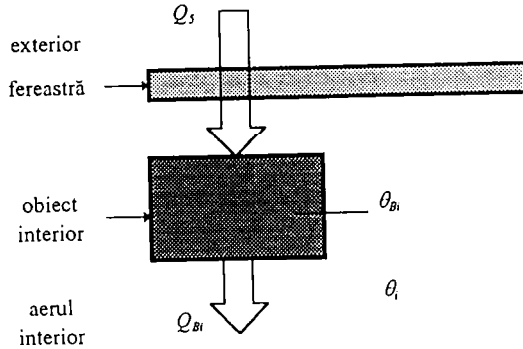


Fig. 3.12 Debitul de căldură primite și emise de obiectele interloare

Debitul de căldură provenit de la radiația solară este dat de formula:

$$Q_s = a_{Bi} \cdot \tau_G \cdot I_G \cdot S_G \quad (3.28)$$

cu notațiile:

- a_{Bi} - coeficient de absorbție a radiației solare de către obiectele interloare
- τ_G - coeficient de transmisie a radiației solare prin ferestre
- I_G - intensitatea radiației solare primită de ferestre [W/m^2]
- S_G - aria suprafeței ferestrelor care primește radiația solară [m^2]

Coeficientul de absorbție a_{Bi} prezintă variații mici în jurul valorii tipice $a_{Bi} = 0,53$. Această valoare a fost determinată pe cale experimentală, cu metoda de măsurare descrisă în [SHA83].

Coeficientul de transmisie τ_G depinde de grosimea sticlei și de unghiul de incidență. Pentru o grosime de 5 mm, dependența coeficientului în funcție de unghiul de incidență este prezentată în Fig. 3.13 [SHA83].

În legătură cu intensitatea radiației solare I_G sunt valabile considerațiile făcute în cazul ferestrelor.

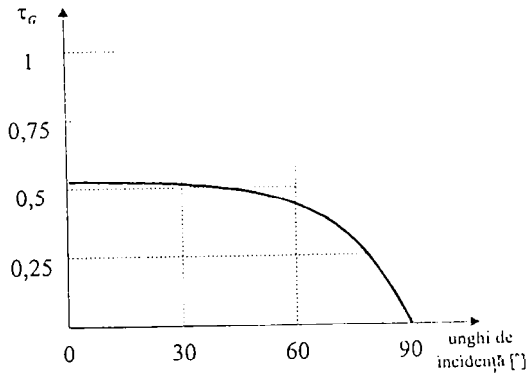


Fig. 3.13 Coeficientul de transmisie a radiației solare

Debitul de căldură emis spre interior este dat de formula:

$$Q_{Bi} = \alpha_{Bi} \cdot (\theta_{Bi} - \theta_i) \cdot S_{Bi} \quad (3.29)$$

cu notațiile:

- α_{Bi} - coeficient de transfer al căldurii de la obiectele interioare spre interior [W/m²·K]
- θ_{Bi} - temperatura obiectelor interioare [°C]
- θ_i - temperatura interioară [°C]
- S_{Bi} - aria suprafeței corpurilor interioare [m²]

Calcularea ariei S_{Bi} este dificilă, datorită formelor complexe ale obiectelor interioare. De aceea, se recurge la determinarea experimentală a produsului $\alpha_{Bi} \cdot S_{Bi}$, rezultând valoarea tipică de 105 W/K [SHA83].

Ecuatia termică a obiectelor interioare este:

$$Q_S = Q_{Bi} + C_{Bi} \frac{d\theta_{Bi}}{dt} \quad (3.30)$$

cu notația:

- C_{Bi} - capacitatea calorică a corpurilor interioare [J/ K]

Capacitatea calorică C_{Bi} se poate calcula prin însumarea produselor dintre masele diverselor obiecte și căldurile specifice ale materialelor din care sunt confecționate.

O analiză mai exactă ar necesita și în acest caz tratarea separată a obiectelor interioare, cu scrierea ecuației de mai sus pentru fiecare obiect (rezultând astfel temperaturi diferite).

3.2.1.3 Motorul automobilului

Debitul de căldură dinspre compartimentul motorului spre cabină este dat de formula:

$$Q_E = K_E \cdot (\theta_E - \theta_i) \cdot S_E \quad (3.31)$$

cu notațiile:

- K_E - coeficient de transfer al căldurii de la compartimentul motorului [W/m²·K]
- θ_E - temperatura compartimentului motorului [°C]
- θ_i - temperatura interioară [°C]
- S_E - aria suprafeței de contact între compartimentului motorului și cabină [m²]

Măsurătorile efectuate cu metoda expusă în [SHA83] arată că produsul $K_E \cdot S_E$ are valoarea tipică 7,0 W/K.

3.2.1.4 Portbagaj și podea

Se consideră că temperatura în compartimentul portbagajului este egală cu temperatura exterioară. În consecință, transferurile termice cu compartimentul portbagajului și cu podeaua se pot trata în mod unitar. Debitul de căldură dinspre acestea spre cabină este dat de formula:

$$Q_C = K_C \cdot (\theta_o - \theta_i) \cdot S_C \quad (3.32)$$

cu notațiile:

- K_C - coeficient de transfer al căldurii de la portbagaj și podea [W/m²·K]
- θ_o - temperatura exterioară [°C]
- θ_i - temperatura interioară [°C]
- S_C - aria suprafeței de contact între compartimentului portbagajului+podea și cabină [m²]

3.2.1.5 Motorul instalației de climatizare

Deoarece acest motor este plasat, de regulă, în cabină, trebuie tratat ca o sursă de căldură separată. Puterea emisă sub formă de căldură depinde de încărcarea și de randamentul motorului. O valoare tipică pentru debitul de căldură emis de acest motor este $Q_M = 175\text{ W}$ [SHA83].

3.2.1.6 Pasagerii

Fiecare pasager emite un debit de căldură dependent de activitatea sa fizică. Astfel, pentru șofer, care are o activitate redusă, debitul este de aproximativ 220 W, iar pentru pasageri, care sunt în repaus, este de aproximativ 120 W [SHA83].

3.2.2 Ecuația termică

Temperatura aerului din cabină este dată de o ecuația termică, similară cu cele prezentate anterior:

$$Q_V + Q_B + Q_G + Q_{B_i} + Q_E + Q_C + Q_M + Q_P = C_i \frac{d\theta_i}{dt} \quad (3.33)$$

cu notațiile:

C_i - capacitatea calorică a aerului din interior [J/ K]

θ_i - temperatura aerului din interior [°C]

debitele de căldură fiind cele introduse anterior.

3.2.3 Rezultatele simulării

Validitatea modelului de mai sus a fost testată prin comparație cu măsurătorile efectuate pe un automobil real [SHA83]. În continuare se vor prezenta rezultatele obținute prin simulare, utilizând modelul introdus anterior [SHA83].

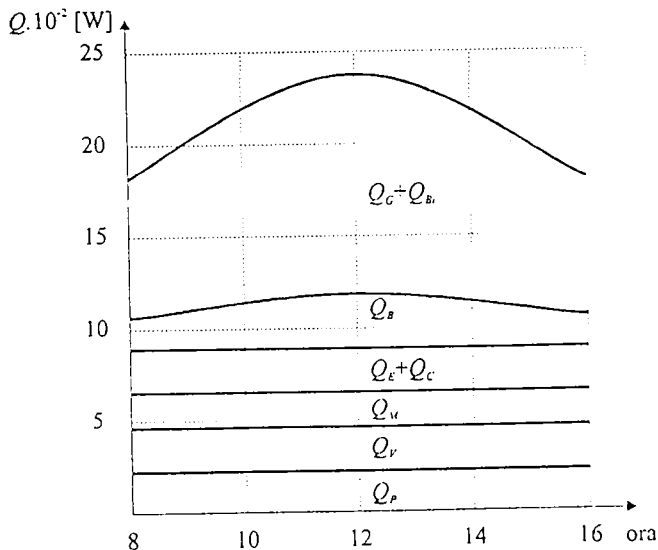


Fig. 3.14 Debiturile de căldură la deplasarea cu viteză constantă

În Fig. 3.14 sunt reprezentate debitele de căldură din model, pentru un automobil care se deplasează cu viteză constantă (fiecare debit este reprezentat prin distanța dintre două grafice alăturate, astfel încât graficul superior reprezintă debitul total de căldură). Sistemul de climatizare funcționează cu următorii parametri:

- temperatura aerului din exterior: $\theta_o = 35^\circ\text{C}$
- temperatura aerului din interior: $\theta_i = 25^\circ\text{C}$
- umiditatea aerului din exterior: 60 %
- umiditatea aerului din interior: 60 %
- debitul de aer al sistemului de climatizare: $D_v = 400\text{ m}^3/\text{h}$
- numărul de pasageri: 2

Debitul total de căldură cauzat de radiația solară, Q_s , este format următoarele componente .

$$Q_s = Q_B + Q_G + Q_{Bi} \quad (3.34)$$

cu notațiile:

- Q_B - debitul transmis de caroserie
- Q_G - debitul transmis de ferestre
- Q_{Bi} - debitul emis de obiectele interioare

Se observă că acest debit depinde semnificativ de nivelul iluminării (determinat de elevația soarelui, deci de oră) și reprezintă mai mult de jumătate din debitul total de căldură care trebuie evacuat de către instalația de climatizare. În concluzie, dimensionarea subsistemului de răcire trebuie realizată pentru condițiile de funcționare cele mai grele, care corespund unei iluminări solare puternice, la ora 12.

În Fig. 3.15 sunt reprezentate debitele de căldură pentru un automobil care pornește din parcare, unde a staționat, expus la soare, un timp mai lung.

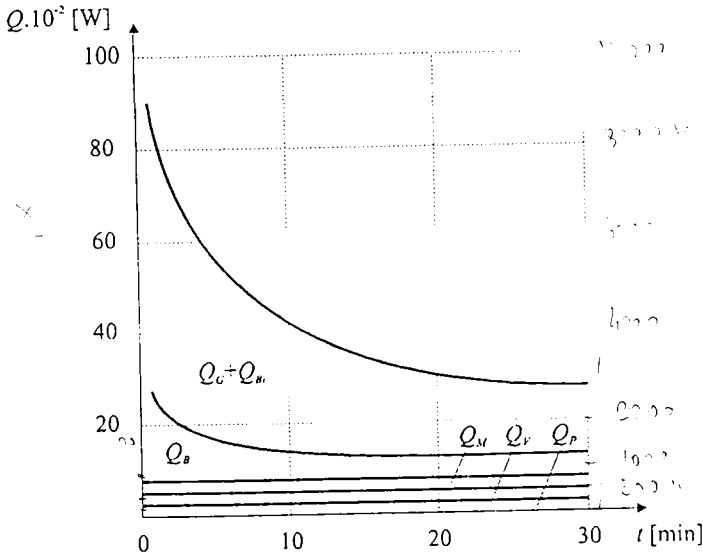


Fig. 3.15 Debitele de căldură la pornirea din parcare

Și în această situație se constată ponderea mare a debitului de căldură cauzat de iluminarea solară. Valoarea acestui debit este extrem de ridicată în primele minute după pornire, când caroseria, ferestrele și obiectele interioare au temperaturi ridicate. În concluzie, asigurarea confortului termic după un timp cât mai scurt de la pornire este condiționată de dimensionarea corespunzătoare a subsistemului de răcire.

Confecționarea geamurilor din sticlă care reflectă radiațiile infraroșii conduce la reducerea cu aproximativ 60% a debitului de căldură $Q_G + Q_{B_i}$. În aceste condiții, se poate utiliza un subsistem de răcire cu o putere mai mică (deci mai ușor și mai ieftin) și se realizează o economie semnificativă de carburant. Se obține în plus o reducere cu până la 7 °C a temperaturii interioare, la staționarea în soare [SHA83].

3.3 Concluzii

- ⇒ Modelele termice ale automobilelor sunt utile atât pentru dimensionarea sistemelor de climatizare (de exemplu, calculul puterii agregatului de răcire), cât și pentru acordarea reguletoarelor de temperatură aferente.
- ⇒ Interiorul automobilelor are o comportare termică relativ complexă, afectată de factori de influență multipli: izolația termică, iluminarea solară, inerția termică a corpurilor din interior, energia termică emisă de pasageri, etc.
- ⇒ Subsistemele de încălzire/răcire a aerului au, de asemenea, o comportare complexă, neliniară, afectată de parametri variabili. De exemplu, răspunsul subsistemului de încălzire este caracterizat prin constante de timp multiple; eficiența încălzirii este diferită de cea a răcirii; eficiența încălzirii depinde de temperatura lichidului de răcire a motorului și de durata acestuia, etc.
- ⇒ S-a prezentat un set de modele termice simplificate, cu grade diferite de complexitate, în funcție de efectele pe care le iau în considerare (de exemplu: radiația solară, căldura emisă de pasageri, izolația termică a cabinei, inerția termică a corpurilor din interior, etc.). Cel mai simplu model constă dintr-un element PT1 și un factor de amplificare.
- ⇒ S-a prezentat, de asemenea, un model termic detaliat, care ia în considerare toate sursele de căldură identificate. Utilizarea acestui model impune cunoașterea unui număr mare de parametri ai automobilului. Deoarece măsurarea unora dintre parametri necesită condiții speciale, aceștia nu sunt disponibili în mod curent, pentru orice automobil.

4. Implementarea unui model termic pentru automobile

În acest capitol se va descrie implementarea, realizată de către autor, a unei variante a modelului termic detaliat introdus în capitolul anterior. Se prezintă ecuațiile modelului, schemele de implementare, rezultatele testării și o aplicație - utilizarea modelului la proiectarea unui regulator de temperatură clasic. S-a folosit mediul de simulare MATLAB/SIMULINK, această opțiune fiind justificată în Capitolul 7.

4.1 Ecuațiile modelului și schemele de implementare

4.1.1 Structura modelului și schema bloc

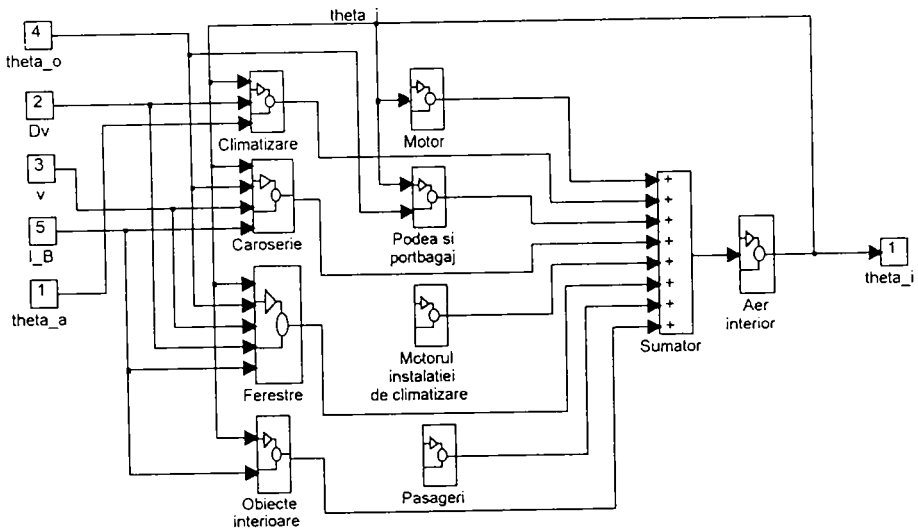


Fig. 4.1 Schema bloc a modelului termic

Modelul urmărește calcularea temperaturii aerului din interiorul cabinei automobilului. Conform celor arătate în capitolul anterior, aerul interior schimbă căldură cu:

- sistemul de climatizare
- caroseria
- ferestrele:
 - parbrizul
 - ferestrele laterale
 - geamul din spate
- obiectele interioare
- compartimentul motorului
- portbagajul și podeaua
- motorul instalației de climatizare
- pasagerii.

Compartimentul portbagajului și podeaua pot fi modelate împreună, deoarece se presupune că au aceeași temperatură. Toate obiectele interioare sunt modelate împreună, deoarece analiza separată ar presupune complicarea modelului și ar necesita date exacte privind capacitatea calorică a fiecărui obiect. Se apreciază că erorile astfel introduse nu afectează semnificativ precizia modelului [SHA83].

În Fig. 4.1 s-a reprezentat schema bloc a modelului termic, modul de implementare a blocurilor fiind descris în detaliu mai jos.

În schema bloc și în celelalte scheme aferente modelului se folosesc următoarele notații:

θ_{i}	θ_i	temperatura aerului din interior [°C]
θ_{a}	θ_a	temperatura aerului suflat [°C]
θ_{o}	θ_o	temperatura exterioară [°C]
D_v	D_v	debitul volumic al aerului suflat de instalația de climatizare [m ³ /h]
v	v	viteza automobilului [m/s]
I_B	I_B	intensitatea radiației solare [W/m ²]
c_a	c_a	căldura specifică a aerului (1005,4 J/kg·K)
ρ_a	ρ_a	densitatea aerului (1,226 kg/m ³)
V_i	V_i	volumul aerului interior [m ³]
Q_v	Q_v	debitul de căldură total generat de instalația de climatizare [W]
θ_B	θ_B	temperatura caroseriei [°C]
Q_B	Q_B	debitul de căldură emis de caroserie spre interior [W]
S_B	S_B	suprafața acoperișului caroseriei [m ²]
m_B	m_B	masa acoperișului caroseriei [kg]
C_B	C_B	capacitatea calorică a acoperișului caroseriei [J/K]
a_B	a_B	coeficientul de absorbție a radiației solare de către caroserie
K_B	K_B	coeficientul de transfer al căldurii de la caroserie spre interior [W/m ² ·K]
Q_G	Q_G	debitul total de căldură emis de ferestre spre interior [W]
S_G	S_G	suprafața totală a ferestrelor [m ²]
τ_G	τ_G	coeficientul de transmisie a radiației solare prin ferestre
$\theta_{G'}$	$\theta_{G'}$	temperatura parbrizului [°C]
$Q_{G'}$	$Q_{G'}$	debitul de căldură emis de parbriz spre interior [W]
$S_{G'}$	$S_{G'}$	suprafața parbrizului [m ²]
$m_{G'}$	$m_{G'}$	masa parbrizului [kg]
$C_{G'}$	$C_{G'}$	capacitatea calorică a parbrizului [J/K]
$a_{G'}$	$a_{G'}$	coeficientul de absorbție a radiației solare de către parbriz
θ_{Bi}	θ_{Bi}	temperatura obiectelor interioare [°C]
Q_{Bi}	Q_{Bi}	debitul de căldură emis de obiectele interioare spre interior [W]
S_{Bi}	S_{Bi}	suprafața obiectelor interioare [m ²]
m_{Bi}	m_{Bi}	masa obiectelor interioare [kg]
C_{Bi}	C_{Bi}	capacitatea calorică a obiectelor interioare [J/K]
α_{Bi}	α_{Bi}	coeficientul de absorbție a radiației solare de către obiectele interioare
α_{Bi}	α_{Bi}	coef. de transfer al căldurii de la obiectele interioare spre interior [W/m ² ·K]

Se adoptă următoarele valori pentru parametrii care intervin în modelul termic:

- masa acoperișului caroseriei: $m_b = 20$ kg
- suprafața acoperișului caroseriei: $S_b = 1,74$ m²
- suprafața parbrizului: $S_C' = 0,789$ m²
- unghiul de înclinare al parbrizului: 36,5°
- suprafața totală a ferestrelor laterale: $S_C'' = 0,986$ m²
- unghiul de înclinare al ferestrelor laterale: 68°
- suprafața geamului din spate: $S_C''' = 0,730$ m²
- unghiul de înclinare al geamului din spate: 42°
- masa corpurilor interioare: $m_{bi} = 25$ kg
- volumul aerului interior: $V_i = 3,75$ m³

O parte din acești parametri au fost preluați din [SHA83], pentru ceilalți alegându-se valori tipice.

4.1.2 Aerul interior

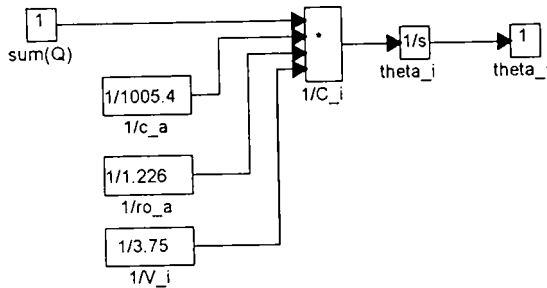


Fig. 4.2 Modelul aerului interior

Calcularea temperaturii aerului interior, θ_i , se face pe baza ecuației termice a acestuia:

$$\sum Q_k = C_i \frac{d\theta_i}{dt} \quad (4.1)$$

unde $\sum Q_k$ este suma debitelor de căldură provenind de la sursele reprezentate în Fig. 4.1.

Capacitatea calorică a aerului interior, C_i , se calculează cu formula

$$C_i = V_i \cdot \rho_a \cdot c_a \quad (4.2)$$

unde volumul aerului interior, V_i , se preia din lista parametrilor, căldura specifică a aerului este $c_a = 1005,4$ J/kg·K, iar densitatea acestuia este $\rho_a = 1,226$ kg/m³.

Schema modelului aerului interior este dată în Fig. 4.2.

4.1.3 Sistemul de climatizare

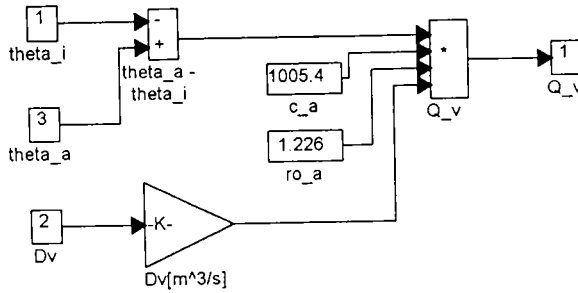


Fig. 4.3 Modelul sistemului de climatizare

Conform celor arătate în capitolul anterior, debitul de căldură total generat de instalația de climatizare este dat de formula:

$$Q_v = D_m \cdot c_a \cdot (\theta_a - \theta_i) = \frac{D_v \cdot [m^3/h]}{3600} \cdot \rho_a \cdot c_a \cdot (\theta_a - \theta_i) \quad (4.3)$$

unde D_m este debitul masic al aerului suflat, în [kg/s], celelalte notații fiind explicate în textul sus. Schema modelului sistemului de climatizare este dată în Fig. 4.3.

4.1.4 Caroseria

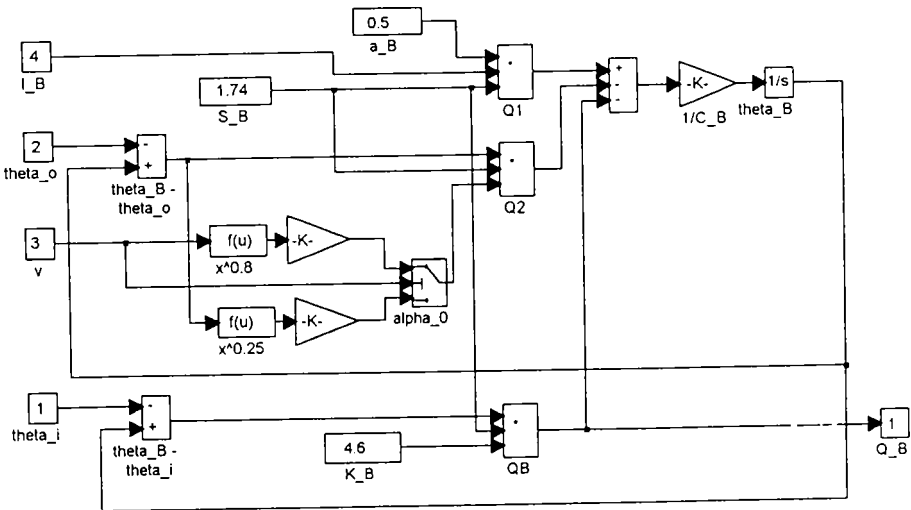


Fig. 4.4 Modelul caroseriei

La modelarea caroseriei se neglijează contribuția ușilor laterale, în acord cu exemplul din [SHA83]. Schema modelului este dată în Fig. 4.4.

Calcularea temperaturii caroseriei, θ_B , se face pe baza ecuației termice a acesteia:

$$Q_1 = Q_2 + Q_B + C_B \frac{d\theta_B}{dt} \quad (4.4)$$

Capacitatea calorică a caroseriei, C_B , se calculează cu formula

$$C_B = m_B \cdot c_B \quad (4.5)$$

unde masa caroseriei, m_B , se preia din lista parametrilor, iar căldura specifică a materialului caroseriei (oțel) este $c_B = 460,79 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.

Debitul de căldură provenit de la radiația solară, Q_1 , este dat de formula

$$Q_1 = \alpha_B \cdot I_B \cdot S_B \quad (4.6)$$

Coeficientul de absorbție a radiației solare de către caroserie, α_B , este preluat din datele prezentate în [SHA83], pentru vopsea de culoare deschisă rezultând valoarea aproximativă $\alpha_B = 0,5$. Intensitatea radiației solare, I_B , este un parametru de intrare al modelului. Suprafața acoperișului, S_B , se preia din lista parametrilor automobilului.

Debitul de căldură emis spre exterior, Q_2 , este dat de formula

$$Q_2 = \alpha_o \cdot (\theta_B - \theta_o) \cdot S_B \quad (4.7)$$

Coeficientul de transfer al căldurii de la caroserie spre exterior, α_o , se calculează cu formula [SHA83]

$$\alpha_o = \begin{cases} 2,63 \cdot (\theta_B - \theta_o)^{0,25}; & \nu = 0 \\ 4,41 \cdot \nu^{0,8}; & \nu > 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

Debitul de căldură emis spre interior, Q_B , este dat de formula

$$Q_B = K_B \cdot (\theta_B - \theta_i) \cdot S_B \quad (4.9)$$

Coeficientul de transfer al căldurii de la caroserie spre interior are valoarea tipică $K_B = 4,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [SHA83].

4.1.5 Ferestrele

Se vor modela separat parbrizul, ferestrele laterale și geamul din spate, deoarece aceste elemente au temperaturi diferite. Schema bloc a modelului ferestrelor este dată în Fig. 4.5.

4.1.5.1 Parbrizul

Calcularea temperaturii parbrizului, θ_G' , se face pe baza ecuației termice a acestuia:

$$Q_3' = Q_4' + Q_G' + C_G' \frac{d\theta_G'}{dt} \quad (4.10)$$

Capacitatea calorică a parbrizului, C_G' , se calculează cu formula

$$C_G' = m_G' \cdot c_G \quad (4.11)$$

unde masa parbrizului, m_G' , se preia din lista parametrilor, iar căldura specifică a materialului parbrizului (sticlă) este $c_G = 754 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.

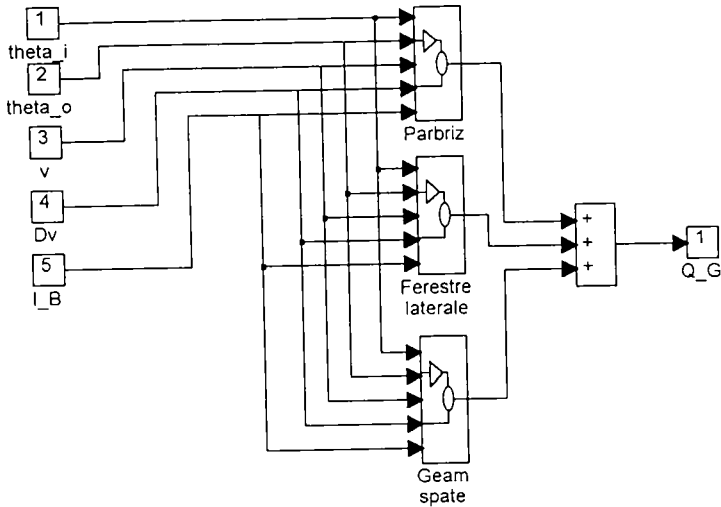


Fig. 4.5 Schema bloc a modelului ferestrelor

Debitul de căldură provenit de la radiația solară, Q_3' , este dat de formula

$$Q_3' = \alpha_G' \cdot I_B \cdot S_G' \quad (4.12)$$

Coefficientul de absorbție a radiației solare de către parbriz, α_G' , este preluat din datele prezentate în [SHA83], pentru sticlă de 5 mm și unghiul de incidență de la ora 12, la latitudinea de 35° rezultând $\alpha_G' = 0,43$. Intensitatea radiației solare, I_B , este un parametru de intrare al modelului. Suprafața parbrizului, S_G' , se preia din lista parametrilor automobilului.

Debitul de căldură emis spre exterior, Q_4' , este dat de formula

$$Q_4' = \alpha_o' \cdot (\theta_G' - \theta_o) \cdot S_G' \quad (4.13)$$

Coefficientul de transfer al căldurii de la parbriz spre exterior, α_o' , se calculează cu formula

$$\alpha_o' = \begin{cases} 1,74 \cdot (\theta_G' - \theta_o)^{0,25}; & v = 0 \\ 3,79 \cdot v^{0,8}; & v > 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

preluată din [SHA83] și particularizată pentru unghiul de înclinare dat în lista parametrilor.

Debitul de căldură emis spre interior, Q_G' , este dat de formula

$$Q_G' = \alpha_i' \cdot (\theta_G' - \theta_i) \cdot S_G' \quad (4.15)$$

Coefficientul de transfer al căldurii de la parbriz spre interior, α_i' se calculează cu formula [SHA83].

$$\alpha_i' = 0,584 \cdot D_v^{0,5} \quad (4.16)$$

Se observă că ecuațiile modelului parbrizului sunt asemănătoare cu cele ale modelului caroseriei, deci cele două scheme sunt similare. În consecință, nu se va reprezenta schema corespunzătoare parbrizului.

4.1.5.2 Ferestrele laterale

Ecuațiile modelului ferestrelor laterale sunt aceleași ca și în cazul parbrizului, diferind doar parametrii și unii coeficienți. În continuare se vor prezenta, pe scurt, doar formulele și parametrii care diferă. Notația "prim" folosită în cazul parbrizului va fi înlocuită cu "secund".

Coeficientul de absorbție a radiației solare de către ferestrele laterale, a_G'' , este preluat din datele prezentate în [SHA83], pentru sticlă de 3 mm și unghiul de incidență de la ora 12, la latitudinea de 35°, rezultând $a_G'' = 0,28$. Coeficientul de transfer al căldurii de la ferestrele laterale spre exterior, α_o'' , se calculează cu formula [SHA83]

$$\alpha_o'' = \begin{cases} 1,98 \cdot (\theta_G'' - \theta_o) ^{0,25}; & \nu = 0 \\ 7,21 \cdot \nu^{0,8}; & \nu > 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

iar coeficientul de transfer al căldurii de la ferestrele laterale spre interior, α_i'' , cu formula [SHA83]

$$\alpha_i'' = 0,495 \cdot D_\nu^{0,5} \quad (4.18)$$

Deoarece iluminarea solară acoperă doar una din părțile laterale, în calcule se folosește jumătate din suprafața totală a ferestrelor laterale, S_G'' , care se preia din lista parametrilor automobilului.

4.1.5.3 Geamul din spate

Ecuațiile modelului geamului din spate sunt aceleași ca și în cazul parbrizului, diferind doar parametrii și unii coeficienți. În continuare se vor prezenta, pe scurt, doar formulele și parametrii care diferă. Notația "prim" folosită în cazul parbrizului va fi înlocuită cu "terț".

Coeficientul de absorbție a radiației solare de către geamul din spate, a_G''' , este preluat din datele prezentate în [SHA83], pentru sticlă de 3 mm și unghiul de incidență de la ora 12, la latitudinea de 35° rezultând $a_G''' = 0,29$. Coeficientul de transfer al căldurii de la geamul din spate spre exterior, α_o''' , se calculează cu formula [SHA83]

$$\alpha_o''' = \begin{cases} 1,98 \cdot (\theta_G''' - \theta_o) ^{0,25}; & \nu = 0 \\ 4,65 \cdot \nu^{0,8}; & \nu > 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

iar coeficientul de transfer al căldurii de la geamul din spate spre interior, α_i''' , cu formula [SHA83]

$$\alpha_i''' = 0,495 \cdot D_\nu^{0,5} \quad (4.20)$$

4.1.6 Obiectele interioare

La modelarea obiectelor interioare se consideră că toate au aceeași temperatură, iar căldura specifică se ia ca medie (aproximativă) pentru materialele folosite [SHA83]. Schema modelului este dată în Fig. 4.6.

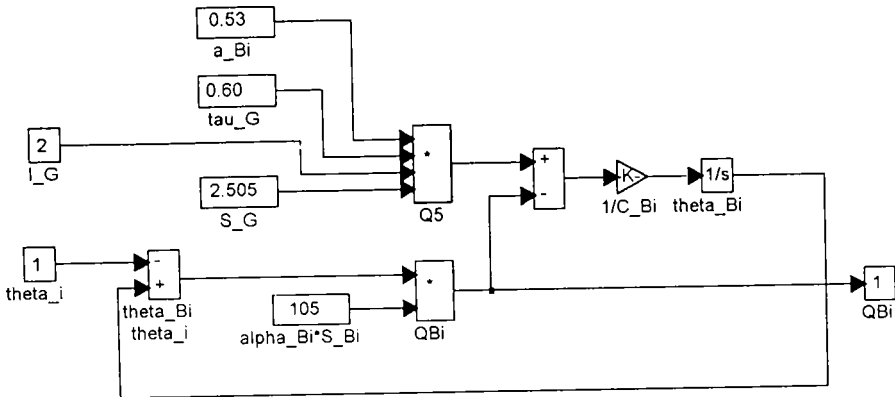


Fig. 4.6 Modelul obiectelor interioare

Calcularea temperaturii corpurilor interioare, θ_{Bi} , se face pe baza ecuației termice a acestora:

$$Q_S = Q_{Bi} + C_{Bi} \frac{d\theta_{Bi}}{dt} \quad (4.21)$$

Capacitatea calorică a corpurilor interioare, C_{Bi} , se calculează cu formula

$$C_{iB} = m_{Bi} \cdot c_{Bi} \quad (4.22)$$

unde masa corpurilor interioare, m_{Bi} , se preia din lista parametrilor, iar căldura specifică a materialului corpurilor interioare se adoptă $c_{Bi} = 1675,6 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ (valoare corespunzătoare unei mase plastice).

Debitul de căldură provenit de la radiația solară, transmis de ferestre și absorbit de obiectele interioare, Q_S , este dat de formula

$$Q_S = a_{Bi} \cdot \tau_G \cdot I_B \cdot S_G \quad (4.23)$$

Coefficientul de absorbție a radiației solare de către obiectele interioare, a_{Bi} , are valoarea medie [SHA83] $a_{Bi} = 0,53$. Coeficientul de transmisie a radiației solare prin ferestre, τ_G , se preia din [SHA83], pentru sticlă de 3 mm și valorile medii ale unghiului de incidență ($20^\circ \dots 60^\circ$) rezultând $\tau_G = 0,60$. Intensitatea radiației solare, I_B , este un parametru de intrare al modelului. Suprafața totală a ferestrelor, S_G , se preia din lista parametrilor automobilului (suma suprafețelor parbrizului, ferestrelor laterale și geamului din spate).

Debitul de căldură emis spre interior, Q_{Bi} , este dat de formula

$$Q_{Bi} = \alpha_{Bi} \cdot (\theta_{Bi} - \theta_i) \cdot S_{Bi} \quad (4.24)$$

Produsul dintre coeficientul de transfer al căldurii de la caroserie spre interior, α_{Bi} , și suprafața corpurilor interioare, S_{Bi} , are valoarea tipică $\alpha_{Bi} \cdot S_{Bi} = 105 \text{ W/K}$ [SHA83].

4.1.7 Compartimentul motorului

Debitul de căldură provenit de la compartimentul motorului, Q_E , este dat de formula

$$Q_E = K_E \cdot (\theta_E - \theta_i) \cdot S_E \quad (4.25)$$

Produsul dintre coeficientul de transfer al căldurii de la compartimentul motorului spre interior, K_E , și suprafața de contact între compartimentul motorului și cabină, S_E , are valoarea tipică $K_E \cdot S_E = 7,0 \text{ W/K}$ [SHA83]. Pentru temperatura din compartimentul motorului se adoptă valoarea tipică $\theta_E = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.1.8 Portbagajul și podeaua

Debitul de căldură provenit de la podea și compartimentul portbagajului, Q_C , este dat de formula

$$Q_C = K_C \cdot (\theta_o - \theta_i) \cdot S_C \quad (4.26)$$

Pentru produsul dintre coeficientul de transfer al căldurii de la podea și compartimentul portbagajului spre interior, K_C , și suprafața de contact între podea și compartimentul portbagajului și cabină, S_C , se adoptă valoarea $K_C \cdot S_C = 10,0 \text{ W/K}$ (presupunând o suprafață de contact mai mare, dar și o izolație termică mai bună decât pentru compartimentul motorului).

4.1.9 Motorul instalației de climatizare

Pentru debitul de căldură generat de motorul instalației de climatizare se adoptă valoarea tipică $Q_M = 175 \text{ W}$ [SHA83].

4.1.10 Pasagerii

Debitul de căldură generat de pasageri se calculează cu formula

$$Q_p = 220\text{W} + N_p \cdot 102\text{W} \quad (4.27)$$

unde N_p este numărul pasagerilor, cu excepția șoferului. S-a folosit valoarea $N_p = 1$.

4.2 Testarea modelului

Verificarea funcționării corecte a modelului se face, pentru început, prin studierea răspunsului la semnal treaptă, corespunzător modificării mărimilor de intrare din Fig. 4.1. Graficele care urmează reprezintă evoluția temperaturii interioare θ_i [$^\circ\text{C}$], în funcție de timpul t [s]. În toate cazurile, se pornește de la o stare staționară, caracterizată prin următoarele valori ale mărimilor de intrare:

- temperatura exterioară: $\theta_o = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- viteza automobilului: $v = 27,7 \text{ m/s}$ (100 km/h)
- intensitatea radiației solare: $I_b = 400 \text{ W/m}^2$
- temperatura aerului suflat: $\theta_a = 12,5 \text{ }^\circ\text{C}$
- debitul aerului suflat: $D_v = 400 \text{ m}^3/\text{h}$

Intensitatea radiației solare este de 950 W/m^2 la ora 12, la latitudinea de 35° și pentru o transparență medie a atmosferei ($\tau_o = 0,64$) [SHA83]. În consecință, valoarea folosită pentru testare corespunde unei iluminări medii. Debitul de aer folosit reprezintă o valoare tipică [SHA83].

În aceste condiții, temperatura aerului interior în regim staționar este de aproximativ $20 \text{ }^\circ\text{C}$. La simulare, aplicarea semnalului treaptă se face după atingerea regimului staționar.

4.2.1 Modificarea temperaturii aerului suflat

În Fig. 4.7 este prezentat răspunsul modelului la modificarea temperaturii aerului suflat, θ_a , de la 12,5 °C la 20 °C.

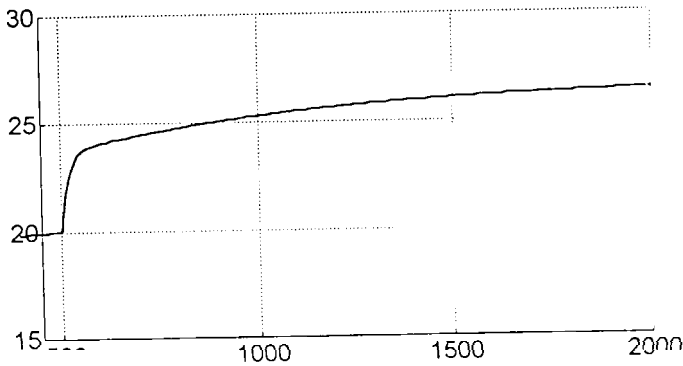


Fig. 4.7 Răspunsul modelului la modificarea temperaturii aerului suflat: $\theta_i [^{\circ}\text{C}] = f(t[s])$

Răspunsul prezintă două faze distincte. În prima, temperatura crește rapid, datorită este înlocuirii aerului existent în interior cu aer având o temperatură diferită. În a doua fază, temperatura crește lent, pe măsura încălzirii caroseriei, ferestrelor și obiectelor din interior, care au o inerție termică relativ mare.

4.2.2 Modificarea debitului aerului suflat

În Fig. 4.8 este prezentat răspunsul modelului la modificarea debitului aerului suflat, \mathcal{D}_a , de la 400 m³/h la 200 m³/h.

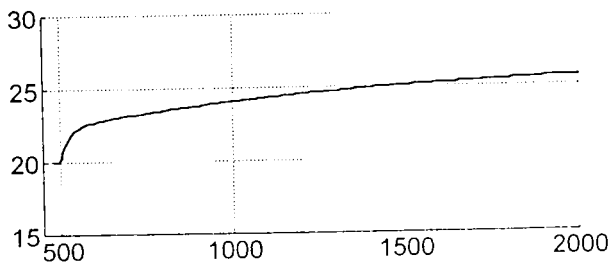


Fig. 4.8 Răspunsul modelului la modificarea debitului aerului suflat: $\theta_i [^{\circ}\text{C}] = f(t[s])$

Așa cum era de așteptat, scăderea debitului de aer rece produce creșterea temperaturii. Se observă și aici prezența celor două faze distincte ale răspunsului.

4.2.3 Modificarea intensității radiației solare

În Fig. 4.9 este prezentat răspunsul modelului la modificarea intensității radiației solare, I_B , de la 400 W/m² la 800 W/m².

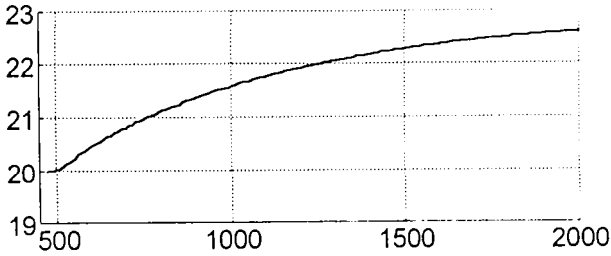


Fig. 4.9 Răspunsul modelului la modificarea intensității radiației solare: $\theta_i [^{\circ}\text{C}] = f(t[s])$

Răspunsul poate fi caracterizat, cu aproximație, printr-o constantă de timp de ordinul miilor de secunde, determinată de încălzirea treptată a caroseriei, ferestrelor și obiectelor interioare, sub acțiunea iluminării solare.

4.2.4 Modificarea temperaturii exterioare

În Fig. 4.10 este prezentat răspunsul modelului la modificarea temperaturii exterioare, $\theta_{e,}$ de la 20 °C la 30 °C.

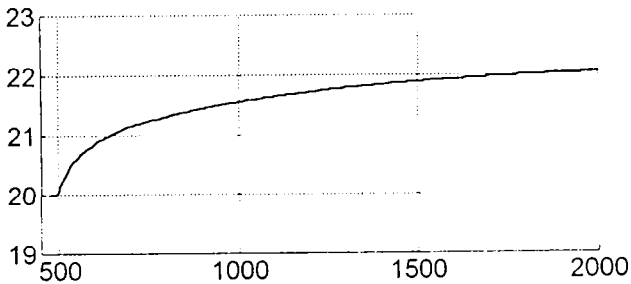


Fig. 4.10 Răspunsul modelului la modificarea temperaturii exterioare: $\theta_i [^{\circ}\text{C}] = f(t[s])$

În acest caz fenomenele sunt mai complexe, iar răspunsul nu mai poate fi caracterizat, cu aproximație, printr-o singură constantă de timp. Astfel, caroseria și ferestrele se încălzesc treptat de la aerul exterior, transmitând căldură aerului interior, care prezintă și el o anumită inerție termică. În plus, obiectele interioare, cu inerție termică mai mare, determină întârzierea suplimentară a răspunsului.

4.2.5 Modificarea vitezei de deplasare

În Fig. 4.11 este prezentat răspunsul modelului la modificarea vitezei de deplasare, v , de la 27,7 m/s la 13,85 m/s.

Așa cum era de așteptat, temperatura aerului interior crește, deoarece răcirea caroseriei și ferestrelor de către aerul exterior este mai puțin intensă (mecanismul de răcire fiind prin convecție forțată). Răspunsul poate fi caracterizat, cu aproximație, printr-o constantă de timp de ordinul miilor de secunde, determinată de încălzirea treptată a caroseriei și ferestrelor.

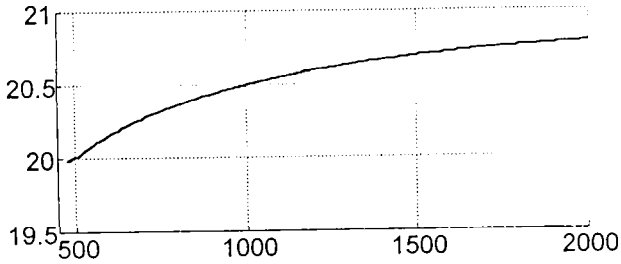


Fig. 4.11 Răspunsul modelului la modificarea vitezei de deplasare: $\theta_i [^{\circ}\text{C}] = f(t[s])$

4.3 Aplicație - proiectarea unui regulator de temperatură

Pentru verificarea suplimentară a funcționării modelului introdus anterior, acesta va fi folosit la proiectarea prin simulare a unui regulator de temperatură clasic, de tip PI. Deși regulatorii folosiți în sistemele de climatizare sunt mai complexe, "nucleul" acestora este, de obicei, un element PI. Deoarece scopul urmărit este verificarea modelului, s-a proiectat doar acest "nucleu".

Schema sistemului de reglare automată a temperaturii este prezentată în Fig. 4.12.

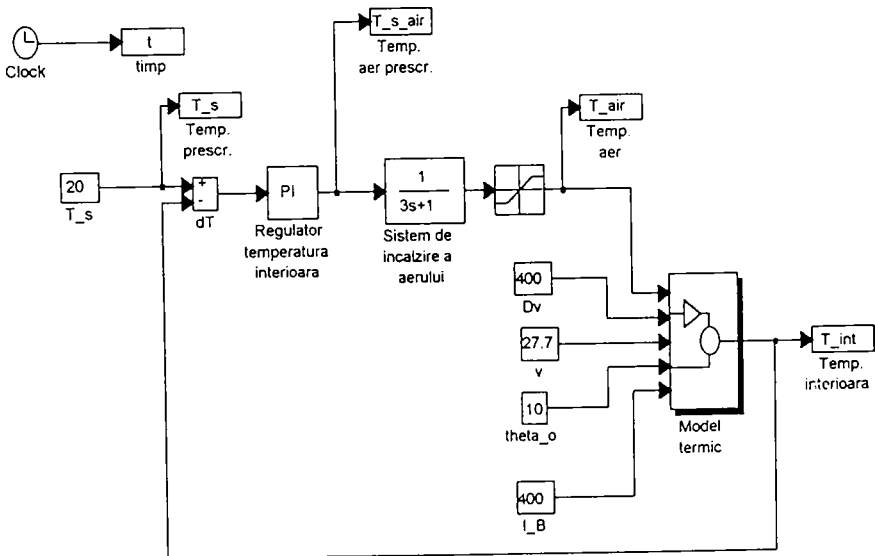


Fig. 4.12 Sistemul de reglare automată a temperaturii

Se folosesc următoarele notații:

t	t	timp [s]
T_s	θ_i^*	temperatura prescrisă pentru aerul din interior [°C]
T_{s_air}	θ_o^*	temperatura prescrisă pentru aerul suflat [°C]
T_{air}	θ_o	temperatura aerului suflat [°C]
T_{int}	θ_i	temperatura aerului din interior [°C]
D_v	D_v	debitul volumic al aerului suflat [m ³ /h]
v	v	viteza automobilului [m/s]
θ_o	θ_o	temperatura exterioară [°C]
I_B	I_B	intensitatea radiației solare [W/m ²]

Regulatorul PI a fost acordat prin simulare, optimizându-se răspunsul la modificarea prescrierii, în condițiile în care temperatura aerului suflat se menține în limite acceptabile (obținerea unui răspuns mai rapid ar presupune variații mai mari ale acestei temperaturi, care ar produce o senzație de disconfort). S-a urmărit, de asemenea, asigurarea unei comportări bune a sistemului de reglare la variații ale parametrilor (debitul de aer suflat, temperatura exterioară, iluminarea solară, viteza de deplasare). În urma acordării, componenta proporțională din formula regulatorului PI are valoarea 3, iar componenta integratoare, valoarea 0,3.

Sistemul de încălzire a aerului, presupus de tip "cu comanda amestecului de aer", este modelat printr-un element PT1 cu constanta de timp de 3 s. Elementul cu caracteristică de saturație limitează temperatura aerului suflat între 2 °C și 60 °C, conform particularităților funcționale ale subsistemelor de încălzire și răcire.

Celelalte mărimi de intrare ale modelului (care intervin ca perturbații în bucla de reglare) au valorile tipice specificate la testarea acestuia:

- temperatura exterioară: $\theta_o = 20$ °C
- viteza automobilului: $v = 27,7$ m/s (100 km/h)
- intensitatea radiației solare: $I_B = 400$ W/m²
- debitul aerului suflat: $D_v = 400$ m³/h

Testarea sistemului de reglare se face prin aplicarea unor variații treaptă pentru mărimea de prescriere și mărimile perturbatoare. În toate graficele s-a reprezentat cu linie continuă temperatura aerului interior, θ_i [°C], iar cu linie întreruptă, temperatura aerului suflat, θ_o [°C], în funcție de timp [s].

4.3.1 Modificarea prescrierii de temperatură

În Fig. 4.13 este prezentat răspunsul sistemului de reglare la modificarea valorii prescrise pentru temperatura aerului interior, θ_i^* , de la 20 °C la 25 °C.

Se observă răspunsul rapid al sistemului de reglare, temperatura prescrisă atingându-se după aproximativ 20 s. Supracreșterea are o valoare acceptabilă, sub 1 °C. Valoarea maximă a temperaturii aerului suflat, aproximativ 32 °C, nu produce o senzație de disconfort. Această temperatură scade lent, pe măsura încălzirii obiectelor din interior.

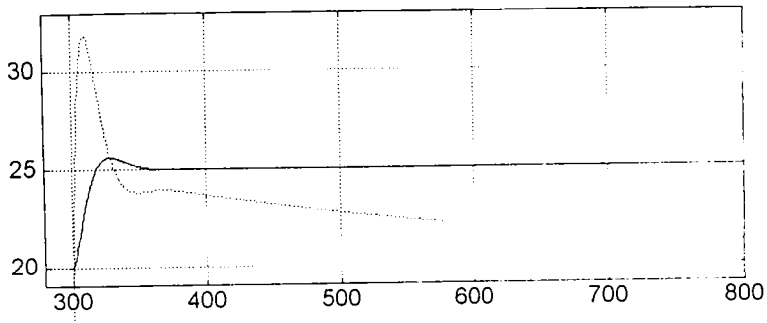


Fig. 4.13 Răspunsul sistemului de reglare la modificarea prescrierii: (—) θ_i [°C] = $f(t[s])$,
(- - -) θ_a [°C] = $f(t[s])$

4.3.2 Modificarea debitului aerului suflat

În Fig. 4.14 este prezentat răspunsul sistemului de reglare la modificarea debitului aerului suflat, D_v , de la 400 m³/h la 200 m³/h.

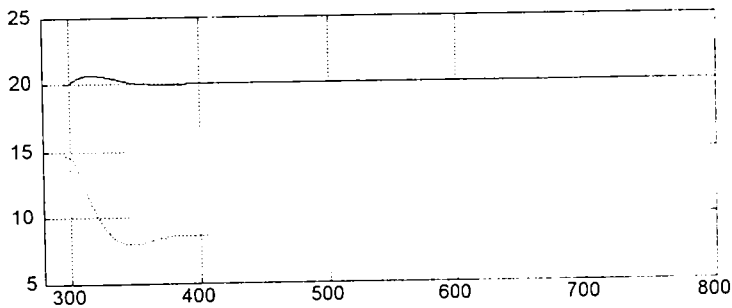


Fig. 4.14 Răspunsul sistemului de reglare la modificarea debitului aerului suflat:
(—) θ_i [°C] = $f(t[s])$, (- - -) θ_a [°C] = $f(t[s])$

Așa cum era de așteptat, temperatura interioară are o tendință de creștere. Se observă că sistemul de reglare compensează bine efectul perturbației, prin reducerea temperaturii aerului suflat, variațiile temperaturii interioare fiind sub 1 °C. În acest exemplu, temperatura aerului suflat scade destul de mult, putând cauza disconfort. Pentru evitarea acestei situații, sistemele de climatizare evoluate controlează debitul de aer, corelându-l cu temperatura acestuia.

4.3.3 Modificarea intensității radiației solare

În Fig. 4.15 este prezentat răspunsul sistemului de reglare la modificarea intensității radiației solare, I_b , de la 400 W/m² la 800 W/m².

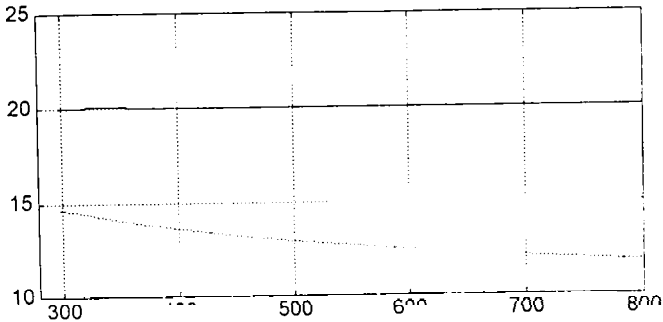


Fig. 4.15 Răspunsul sistemului de reglare la modificarea intensității radiației solare: (---) θ_i [$^{\circ}\text{C}$] = $f(t[s])$, (- - -) θ_a [$^{\circ}\text{C}$] = $f(t[s])$

Deoarece creșterea nivelului de iluminare are un efect lent, compensarea perturbației de către bucla de reglare se realizează fără probleme. Temperatura interioară se menține practic constantă, în timp ce temperatura aerului suflat scade lent.

4.4 Concluzii

- ⇒ S-a prezentat implementarea realizată de autor pentru o variantă a modelului termic detaliat al interiorului cabinei unui automobil. Comparativ cu modelul descris în capitolul anterior, au fost operate unele simplificări, vizând eliminarea parametrilor a căror determinare este dificilă.
- ⇒ S-a folosit mediul de simulare MATLAB/SIMULINK, care permite o implementare comodă și eficientă a modelelor pentru sisteme dinamice.
- ⇒ Modelul a fost testat prin calcularea răspunsului la modificarea principalelor mărimi de influență. Studiarea formelor de variație obținute permite înțelegerea mai bună a comportării modelului, necesară la proiectarea reglatoarelor fuzzy.
- ⇒ Utilitatea modelului a fost exemplificată printr-o aplicație: proiectarea unui regulator de temperatură clasic, de tip PI. Pe lângă acordarea regulatorului, simularea permite studiarea efectului perturbațiilor externe și al modificării parametrilor procesului.

5. Utilizarea reglării fuzzy în sistemele de control al temperaturii și climatizare

Acest capitol include o prezentare sintetică a problematicii reglării fuzzy, urmată de descrierea unor realizări, preluate din literatură, referitoare la proiectarea și aplicarea reguletoarelor fuzzy în sistemele de control al temperaturii și climatizare.

5.1 Reguletoare fuzzy

5.1.1 Principiul reglării fuzzy

Reguletoarele fuzzy sunt, în esență, sisteme expert bazate pe logica fuzzy. Mărimile de ieșire sunt calculate prin inferență (raționament) fuzzy, pe baza unui set de reguli de tip "dacă-atunci", în care antecedentul și consecventul sunt reprezentate prin mulțimi fuzzy. Deoarece regulile pot fi reprezentate matematic prin relații fuzzy, metoda de inferență utilizată derivă din *regula compozițională de inferență* [Zimm91] [Hell91].

Pentru exemplificare, vom considera un reguletor cu o intrare, e , o ieșire, u , și o singură regulă:

dacă e este A , atunci u este Q

Acțiunea regulii compoziționale de inferență este descrisă prin formula [Zimm91] [Hell91]:

$$\mu_C(u) = \min\left\{\mu_Q(u), \max_e\left\{\min\{\mu_P(e), \mu_A(e)\}\right\}\right\} \quad (5.2)$$

unde P este mulțimea fuzzy corespunzătoare premisei. Dacă se dorește modelarea impreciziei de măsurare la determinarea mărimilor de reacție, funcția de apartenență a premisei poate fi un triunghi îngust, centrat pe valoarea mărimii de intrare. În cele mai multe aplicații însă, funcția de apartenență este un "singleton" plasat în dreptul valorii mărimii de intrare e . În ultimul caz, formula de mai sus devine:

$$\mu_C(u) = \min\left\{\mu_Q(u), \mu_A(e)\right\} \quad (5.3)$$

aplicarea ei fiind ilustrată în Fig. 5.1.

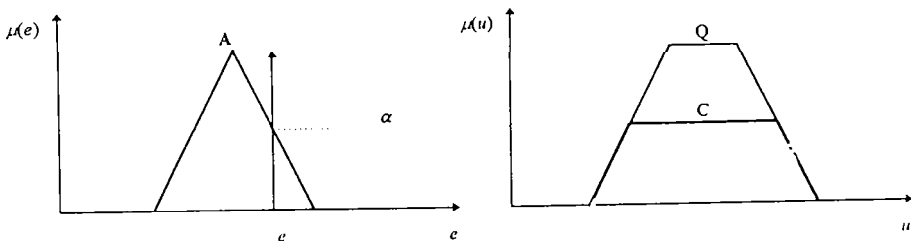


Fig. 5.1 - Acțiunea regulii compoziționale de inferență

5.1.2 Reguletorul fuzzy de tip Mamdani

În majoritatea aplicațiilor se utilizează varianta de reguletor propusă de Mamdani, Assilian, van Nauta Lemke, Kickert, etc., denumită generic "reguletor Mamdani" [Hell91]. Intrările reguletorului, prezentat în Fig. 5.2, sunt eroarea e și derivata acesteia, e' . Derivata poate fi măsurată direct sau calculată, pe baza

valorii erorii în două perioade de eșantionare succesive. Ieșirea este mărimea de comandă u sau, în unele cazuri, derivata acesteia u' sau incrementul Δu .

În continuare se va descrie pe scurt modul de operare a blocurilor din schemă, urmând ca prezentarea detaliată să se realizeze ulterior.

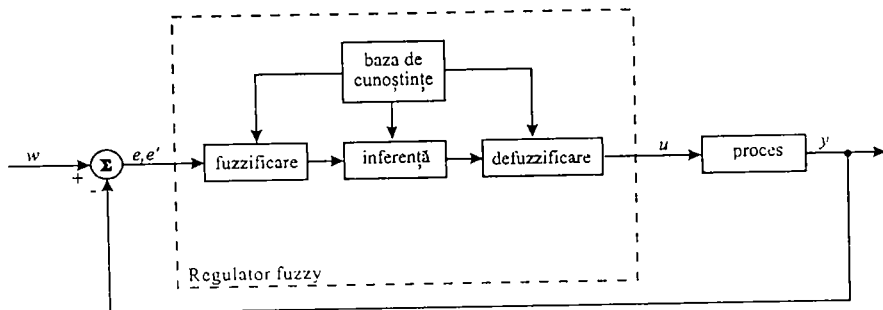


Fig. 5.2 - Regulator fuzzy de tip Mamdani

a) *baza de cunoștințe*

Baza de cunoștințe ("knowledge base") conține:

- definirea variabilelor lingvistice pentru mărimile de intrare și ieșire
- baza de reguli ("rule base") a sistemului expert

Regulile au forma "dacă - atunci". În cazul reguletoarelor Mamdani (cu două intrări și o ieșire), există doi termeni în antecedent, legați prin operatorul logic "și", și un singur termen în consecvent. Forma tipică a regulilor este următoarea:

*dacă temperatura este mare și derivata temperaturii este mare,
atunci trebuie răcit puternic;*

b) *fuzzificare*

Blocul de fuzzificare determină gradul în care mărimile de intrare (de tip crisp), satisfac antecedentele regulilor.

c) *inferență*

Inferența presupune determinarea concluziei raționamentului, prin următoarele etape:

- determinarea gradului de activare pentru fiecare regulă, prin evaluarea operatorilor logici existenți între termenii din antecedent
- determinarea concluziei parțiale pentru fiecare regulă, prin intermediul algoritmului de inferență
- determinarea concluziei generale a raționamentului, prin agregarea concluziilor parțiale

d) *defuzificare*

Blocul de defuzificare determină mărimea de ieșire (crisp) a algoritmului de reglare, pe baza concluziei (fuzzy) a inferenței.

5.1.2.1 Exemplu: regulator de tip Mamdani pentru comanda unui sistem de climatizare

Descrierea de principiu de mai sus va fi ilustrată printr-un exemplu, privind reglarea unui sistem de climatizare [Hell91]. Cele două mărimi de intrare ale regulatorului sunt temperatura T și derivata

acesteia, T' . Se notează cu T_0 temperatura prescrisă și cu $e = T - T_0$, eroarea de temperatură. Deoarece sistemul reglat are un caracter integrator, algoritmul de reglare fuzzy calculează derivata mărimii de comandă a sistemului de încălzire, notată q' .

În partea de sus a figurii sunt prezentate *funcțiile de apartenență* pentru variabilele de intrare. *Baza de reguli* este următoarea:

dacă e este NS și e' este ZO, atunci q' este ZO
dacă e este ZO și e' este NS, atunci q' este NS
dacă e este ZO și e' este PS, atunci q' este PS
dacă e este PB și e' este NB, atunci q' este NB
dacă e este PM și e' este NM, atunci q' este NM
dacă e este PS și e' este NS, atunci q' este NS
dacă e este NB și e' este PM, atunci q' este PM;

unde NS, ZO, PB, etc. sunt termeni ai variabilelor lingvistice pentru intrări și ieșire, reprezentați în Fig. 5.3.

Gradul în mărimile de intrare satisfac antecedentele a regulilor se determină prin *fizicizare*. Conform Fig. 5.2, se evaluează funcțiile de apartenență ale termenilor antecedent, în punctele de abscisă egală cu mărimea de intrare corespunzătoare. Presupunând că intrările regulatorului au valorile $e = 1^\circ\text{C}$ și $e' = 0.5^\circ\text{C/s}$, rezultă că e are un grad de apartenență de 0,9 la mulțimea fuzzy corespunzătoare termenului NS, de 0,45 la ZO și de 0,25 la NM. Similar, rezultă pentru e' grade de apartenență nule la NS, ZO și PS.

Gradul de activare a regulilor se calculează pe baza gradului în care sunt satisfăcute antecedentele. Deoarece cele două antecedente ale fiecărei reguli sunt legate prin conectorul logic "și", trebuie folosit un operator de normă T, cel mai frecvent utilizat fiind "min". Rezultatul final este influențat doar de acele reguli în care ambele antecedente sunt satisfăcute cu grade nenule. Pentru exemplul considerat și pentru valorile intrărilor date mai sus, vor fi "activate" numai primele trei reguli. Operațiile aferente sunt prezentate în partea de jos a Fig. 5.1.

Concluziile parțiale ale regulilor se calculează prin *inferență*, conform algoritmului din Fig. 5.2.

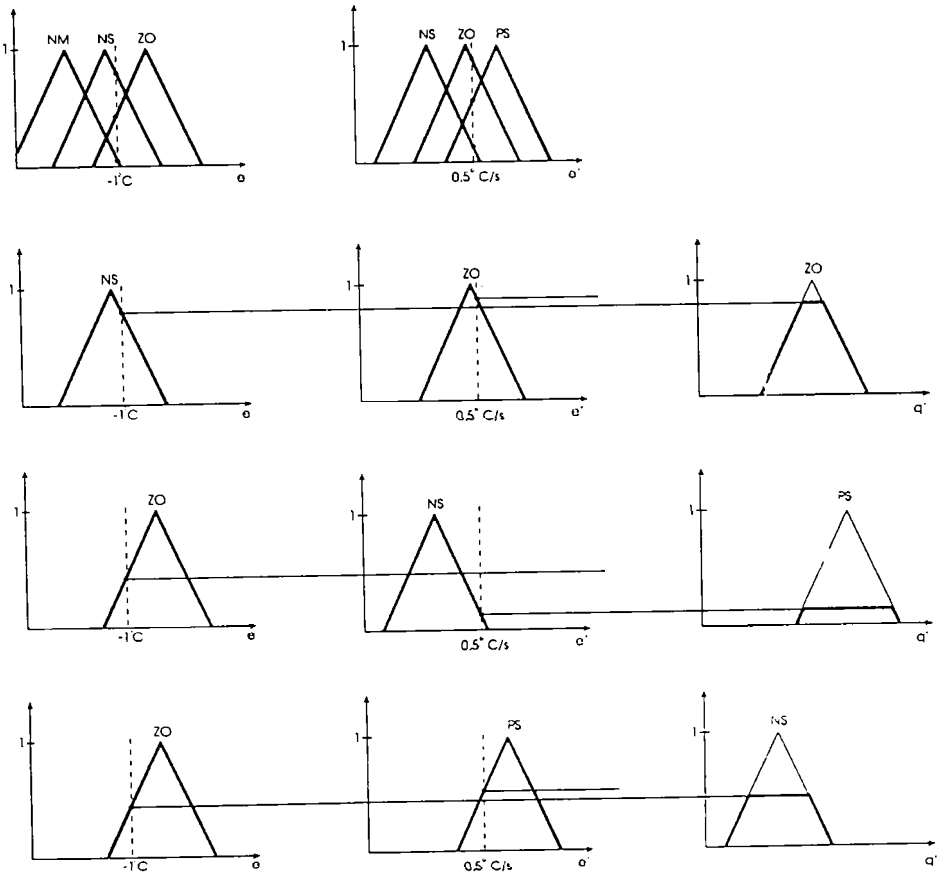


Fig. 5.3 - Algoritm de inferență

Concluzia finală se obține prin *agregare*, pe baza concluziilor parțiale ale regulilor. Deoarece regulile individuale pot fi combinate într-o regulă unică prin operatorul "sau", rezultă că agregarea necesită un operator de normă S. În cele mai multe cazuri se folosește operatorul "max", ilustrat în Fig. 5.4.

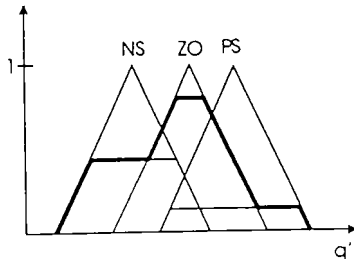


Fig. 5.4 - Agregarea concluziilor parțiale

Valoarea (crisp) de la ieșirea regulatorului se calculează prin *defuzzificare*, pe baza concluziei (fuzzy) globale. Cel mai comun operator de defuzzificare, "centrul de greutate", determină abscisa centrului de greutate pentru suprafața delimitată de funcția de apartenență a concluziei. Creșterea gradului de activare a unei reguli determină deplasarea ieșirii crisp înspre centrul de greutate al termenului consecvent din regula respectivă. Astfel, mecanismul de inferență ia în considerare, în mod global, toate regulile activate, iar contribuția fiecărei reguli este dată de gradul în care mărimile de intrare satisfac condițiile din antecedent.

5.1.3 Baza de cunoștințe

Baza de cunoștințe conține:

- definirea variabilelor lingvistice pentru mărimile de intrare și ieșire
- baza de reguli a sistemului expert

5.1.3.1 Variabilele lingvistice

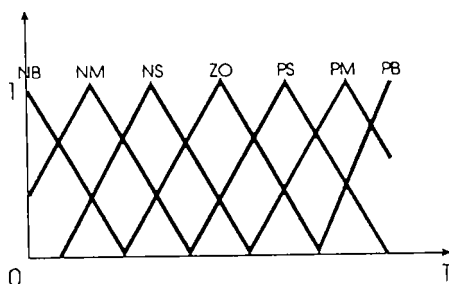


Fig. 5.5- Forma tipică a funcțiilor de apartenență

Variabilele lingvistice sunt caracterizate prin funcțiile de apartenență ale termenilor. Pentru ca regulatorul să fie independent de aplicație, se preferă atribuirea unor *nume care indică mărimea variabilei*, ca în exemplul din Fig. 5.5, unde prescurtările au următoarea semnificație:

- PB: Positive Big (pozitiv mare)
- PM: Positive Medium (pozitiv mediu)
- PS: Positive Small (pozitiv mic)
- ZO: Zero
- NS: Negative Small (negativ mic)
- NM: Negative Medium (negativ mediu)
- NB: Negative Big (negativ mare)

Numărul termenilor se alege de obicei între 3 și 7. Un număr prea mic nu permite o specificare suficient de detaliată a regulilor. Un număr mai mare decât 7 conduce la creșterea volumului de calcule, fără a oferi avantaje suplimentare. În cazul variabilelor de intrare, numărul termenilor trebuie să fie impar, astfel încât termenul central să reprezinte o valoare în jurul lui zero. Este posibilă astfel specificarea acțiunii regulatorului în regim staționar (deoarece variabilele de intrare, eroarea și derivata acesteia se anulează în regim staționar).

La capetele domeniului de valori al variabilei de bază se plasează funcții de apartenență de tip L și I ; iar între acestea, funcții de tip Π sau Δ [Zimm91]. Pentru variabilele de intrare, plasarea în zona centrală a unor funcții mai înguste permite specificarea mai precisă a comportării regulatorului în apropierea regimului staționar.

Expresiile matematice ale funcțiilor de apartenență depind de modul de implementare. Deoarece regulatoarele fuzzy trebuie să opereze în timp real, se preferă utilizarea funcțiilor trapezoidale, care necesită un volum minim de calcule. În plus, aceste funcții pot fi memorate simplu, prin 4 ÷ 5 parametri numerici.

Pentru a acoperi complet domeniul de valori al variabilei de bază, se recomandă ca funcțiile de apartenență alăturate să se intersecteze la 50 ÷ 70% din înălțime. Pentru evitarea redundanței și reducerea volumului de calcule, este bine pentru fiecare valoare a variabilei de bază să existe cel mult două funcții de apartenență nenule. În aceste condiții, pot fi activate simultan cel mult patru reguli (deoarece regulatoarele Mamdani au două variabile de intrare).

Pentru variabila de ieșire se utilizează, în multe aplicații, funcții de apartenență "singleton", rezultând simplificarea calculelor pentru inferență, agregare și defuzzificare.

5.1.3.2 Baza de reguli

Regulile de tip "dacă-atunci" pot fi reprezentate matematic prin relații fuzzy, așa cum s-a arătat mai sus. Acestea au gradul de apartenență egal cu 1 dacă ipoteza și concluzia corespund una cu cealaltă, gradul de apartenență egal cu 0 dacă nu corespund, iar gradele de apartenență intermediare indică o legătură mai slabă.

Dacă numele termenilor indică mărimea variabilei de bază, ca în exemplul din Fig. 5.5, atunci baza de reguli poate avea forma:

- dacă e este NB și e' este ZO, atunci q' este PB
- dacă e este NM și e' este ZO, atunci q' este PM
- dacă e este ZO și e' este PB, atunci q' este NB, ...

Deoarece toate regulile au doi termeni în antecedent, un termen în consecvent și același conector logic, baza de reguli poate fi reprezentată matriceal, astfel:

$e' \setminus e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB
NM
NS
ZO	PB	PM
PS
PM
PB	NB

5.1.4 Operatori de inferență

În exemplul anterior, ca și în majoritatea aplicațiilor, inferența este realizată prin operatorul "min", iar agregarea concluziilor parțiale, prin operatorul "max". Așa cum s-a arătat, se pot folosi și alți operatori de același tip (normă T, respectiv normă S). În literatură sunt menționați [Mizu91]:

- produsul, pentru inferență
- suma, pentru agregare.

În [KH92] se demonstrează că acești operatori, împreună cu metoda de defuzzificare a "centrului de greutate", permit implementarea unui regulator de tip PID. Se afirmă că această abordare este mai intuitivă și că poate oferi performanțe de reglare mai bune, în anumite situații.

5.1.5 Operatori de defuzzificare

În exemplul anterior a fost utilizat operatorul de defuzzificare denumit "centrul de greutate". În continuare vor fi trecute în revistă și alte variante prezentate în literatură. Se vor descrie principalii operatori de defuzzificare, folosiți frecvent în aplicații [HT95] [RG93].

Se notează cu x variabila crisp de ieșire, cu $U = [x_{inf}, x_{sup}]$ universul asociat acestei variabile (interval al axei reale), cu $\mu(x)$ funcția de apartenență a concluziei (fuzzy) și cu $F^{-1}(\mu(x))$, operatorul de defuzzificare.

a) Centrul de greutate ("Center of Gravity")

Se determină abscisa centrului de greutate al suprafeței delimitate de graficul funcției de apartenență:

$$F_{COG}^{-1}(\mu(x)) = \frac{\int_{x_{inf}}^{x_{sup}} \mu(x) \cdot x \cdot dx}{\int_{x_{inf}}^{x_{sup}} \mu(x) \cdot dx} \quad (5.4)$$

b) Centrul sumei ariilor ("Center of Sums")

Acest operator determină abscisa centrului de greutate al "ansamblului" format prin suprapunerea suprafețelor delimitate de funcțiile de apartenență ale concluziilor parțiale:

$$F_{COS}^{-1}(\mu(x)) = \frac{\sum_{k=1}^n A_k \cdot x_k}{\sum_{k=1}^n A_k}; \quad A_k = \int_{x_{inf}}^{x_{sup}} \mu(x) \cdot dx; \quad x_k = F_{COG}^{-1}(\mu_k(x)) \quad (5.5)$$

unde A_k este aria suprafeței delimitate de funcția de apartenență a concluziei parțiale k , iar x_k este abscisa centrului de greutate al aceleiași suprafețe.

Spre deosebire de operatorul centrului de greutate (asociat cu agregarea prin sumă), zona în care mai multe suprafețe corespunzătoare concluziilor parțiale sunt suprapuse se iau în calcul separat, câte o dată pentru fiecare suprapunere. În [HT92] se afirmă că acesta este un avantaj al metodei centrului sumei ariilor.

Utilizarea acestui operator reduce mult volumul calculelor, mai ales atunci când se folosesc funcții de apartenență trapezoidale. Abscisele centrelor de greutate ale trapezelor și ariile acestora se calculează prin formule analitice simple, eliminându-se operația de integrare numerică (funcțiile de apartenență ale concluziilor parțiale sunt tot trapezoidale). În plus, este eliminată și operația de agregare.

c) Metoda înălțimii ("Height")

Se definește valoarea de vârf a unei funcții de apartenență, astfel:

- abscisa vârfului superior al triunghiului, pentru funcțiile triunghiulare
- abscisa mijlocului laturii superioare a trapezului, pentru funcțiile trapezoidale.

Operatorul calculează media ponderată a valorilor de vârf ale funcțiilor concluziilor individuale C_k , x_k , factorii de ponderare fiind gradele de activare ale regulilor corespunzătoare, λ_k .

$$F_H^{-1}(\mu(x)) = \frac{\sum_{k=1}^n x_{vk} \cdot \lambda_k}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (5.6)$$

Acest operator permite simplificarea suplimentară a calculelor, fiind aplicabil doar pentru funcții de apartenență trapezoidale.

Alți operatori, menționați în bibliografie, sunt:

- Centrul celei mai mari arii ("Center of Largest Area")
- Centrul de arie ("Center of Area")
- Primul maxim ("First of Maxima")
- Ultimul maxim ("Last of Maxima")
- Mijlocul maximelor ("Middle of Maxima")
- Media maximelor ("Mean of Maxima")

În [RG93] sunt prezentate *condițiile* pe care ar fi de dorit să le îndeplinească operatorii de defuzzificare. Se constată însă că nici unul dintre operatorii utilizați în mod curent nu îndeplinește toate condițiile selecția operatorului optim urmând să se realizeze de la caz la caz, în funcție de specificul aplicației.

În [HT92] se propune un set de *indicatori de calitate* pentru operatorii de defuzzificare, pentru a facilita selecția acestora. Criteriile au formulări preponderent calitative, aprecierea gradului în care un anumit operator este satisfăcător pentru o aplicație dată reprezentând un obiectiv "fuzzy".

5.2 Utilizarea reglării fuzzy în sistemele de control al temperaturii

5.2.1 Aplicație: regulator fuzzy pentru temperatura unui cuptor

5.2.1.1 Descrierea procesului

Schema bloc a sistemului este prezentată în Fig. 5.1. Sistemul de încălzire folosește o rezistență alimentată de la un redresor comandat în fază. Răcirea se face prin convecție forțată, cu ajutorul unui ventilator. Încălzirea este activată atunci când tensiunea de comandă u este pozitivă, iar răcirea, atunci când u este negativă.

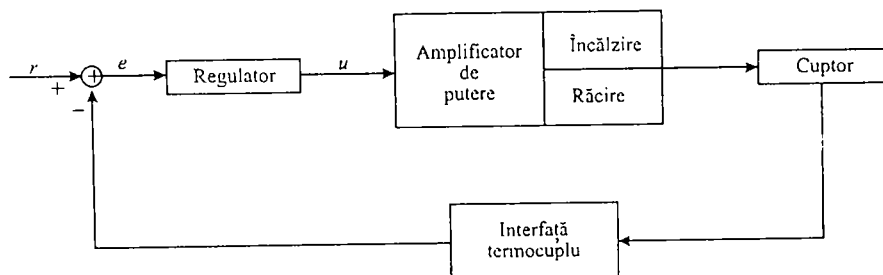


Fig. 5.1 Schema bloc a sistemului de reglare a temperaturii

Principalele probleme care apar la reglare sunt cauzate de neliniaritățile din sistem. Astfel, sistemul de încălzire are o caracteristică de transfer neliniară, cu o "zonă moartă" în jurul tensiunilor nule și o zonă de saturație la valori mari. Pe de altă parte, curentul de aer produs de ventilatorul de răcire duce la creșterea coeficientului de transfer termic. Acest proces este de asemenea neliniar și are o "zonă moartă". Caracteristicile de mai sus justifică utilizarea unui regulator fuzzy.

5.2.1.2 Regulatorul fuzzy

În [SGST94b] se prezintă proiectarea unui regulator fuzzy pentru procesul descris anterior. Variabilele de intrare sunt următoarele:

- eroarea de reglare a temperaturii: $Z1 = T - T_{ref}$
- variația temperaturii: $Z2 = (T_k - T_{k-1})/T_s$
- temperatura: $Z3 = T$

unde T_s este perioada de eșantionare a algoritmului de reglare iar indicele k arată momentul de eșantionare. Pentru fiecare variabilă lingvistică asociată unei intrări se definesc 3 termeni:

- Z1: Neg, Zero, Pos
- Z2: Neg, Zero, Pos
- Z3: Low, Med, High

Rezultă posibilitatea de definire a 27 de reguli, fiecare având în partea de antecedent trei termeni, conectați prin operatorul logic "și".

Se împarte spațiul tridimensional al variabilelor de intrare în 4096 de "celule" (câte 16 intervale pentru fiecare direcție). Pentru fiecare celulă, se calculează "off-line" și se memorează valoarea optimă a comenzii u_{opt} . Acest calcul se bazează pe un model matematic al procesului reglat (fie modelul matematic simplificat, fie un model cu rețele neuronale). Se folosește un algoritm de optimizare, care urmărește

minimizarea integralei pătratului erorii de reglare. Valorile optime astfel obținute permit stabilirea termenilor din partea de consecvent a regulilor (care au deci funcții de apartenență "singleton").

Această metodă de sinteză, denumită "Cell-to-Cell", prezintă o serie de avantaje, în contextul aplicației:

- sinteza algoritmului este automată, fără a fi nevoie de un expert
- algoritmul este aplicabil unei clase largi de sisteme dinamice
- regulatorul fuzzy obținut este simplu, implementarea fiind ieftină.

Deși volumul de calcule necesar pentru identificare este mare, acestea se execută "off-line", deci nu condiționează puterea de calcul a sistemului hardware pe care se face implementarea în timp real.

Pe baza unor rezultate experimentale comparative, utilizând regulatorul fuzzy descris mai sus și un regulator clasic de tip PID, în [SGST94b] se formulează următoarele concluzii:

- regulatorul PID se comportă diferit, în puncte de funcționare diferite; în anumite condiții prezintă instabilitate, cu oscilații ale temperaturii sistemului
- regulatorul fuzzy are o comportare satisfăcătoare, fără oscilații ale temperaturii, în întreg domeniul de temperaturi
- vitezele de răspuns ale celor două regulatoare sunt aproximativ egale.

5.2.2. Aplicație: regulator fuzzy pentru temperatura unei incinte

Aplicația prezentată în [Apr92b] descrie reglarea temperaturii într-o incintă a unei instalații industriale de fabricație a filmelor. Schema de principiu a instalației și a sistemului de reglare este prezentată în Fig. 5.2.

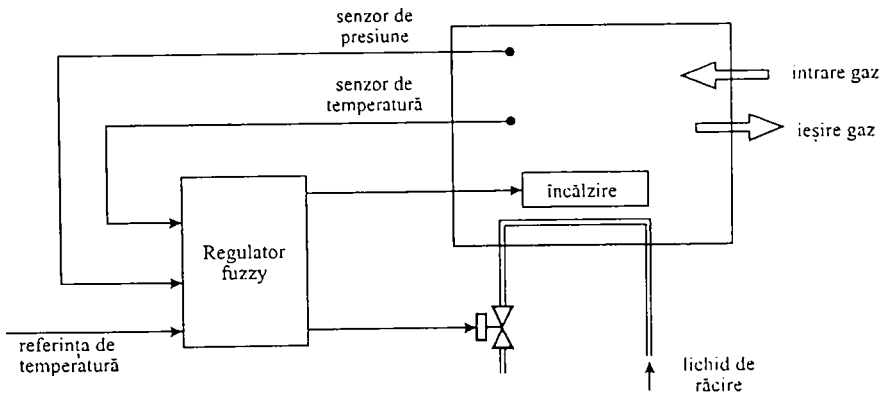


Fig. 5.2 Sistemul de reglare a temperaturii unei incinte

Mărimea de prescriere este temperatura impusă, T_{ref} . Mărimile de reacție preluate din proces sunt: temperatura măsurată T și presiunea măsurată p . Regulatorul generează semnale de comandă pentru instalația de încălzire și instalația de răcire.

Principala problemă apărută la reglare este influența presiunii din incintă asupra temperaturii. În sistemele de reglare clasice această influență este considerată perturbare externă, efectul ei fiind redus prin intervenția regulatorului. Prin utilizarea unui regulator fuzzy, influența menționată poate fi luată în considerare în mod direct în procesul de reglare, prin includerea între variabilele de intrare.

Regulatorul fuzzy are 3 variabile de intrare:

Error (eroarea de temperatură): $e = T_{ref} - T$

Var_Error (variația erorii de temperatură): $\Delta e = e_k - e_{k-1}$

Pressure (presiunea măsurată): p

și 2 variabile de ieșire:

Var_Heater (modificarea comenzii sistemului de încălzire)

Var_Cooler (modificarea comenzii sistemului de răcire).

Funcțiile de apartenență ale termenilor variabilelor lingvistice sunt prezentate în figurile următoare.

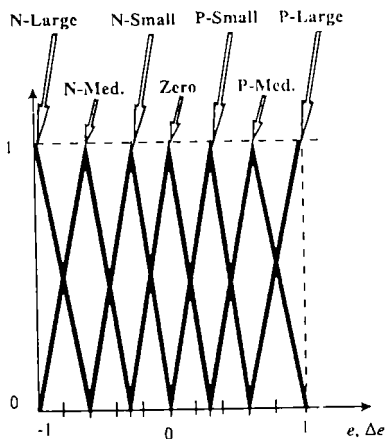


Fig. 5.3 Funcțiile de apartenență ale termenilor pentru Error și Var_Error

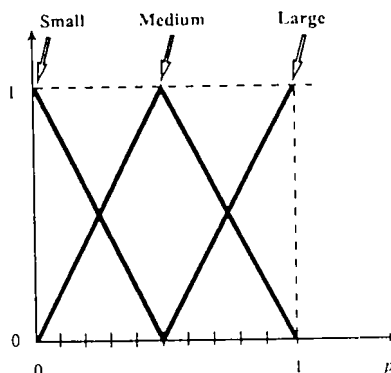


Fig. 5.4 Funcțiile de apartenență ale termenilor pentru Pressure

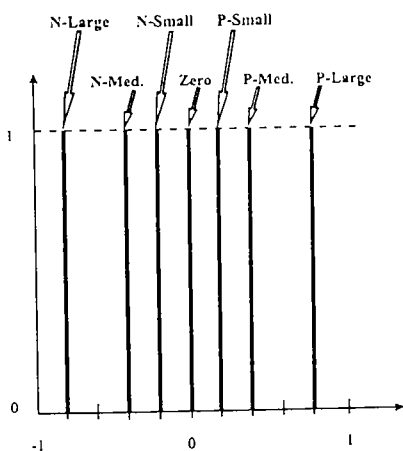


Fig. 5.5 Funcțiile de apartenență ale termenilor pentru Var_Heater și Var_Cooling

Baza de reguli conține 252 de reguli, de forma

if Error is P_Large and Var_Error is N_Large and Pressure is Large, then Var_Heater is Zero
if Error is P_Large and Var_Error is N_Large and Pressure is Large, then Var_Cooling is N_Small

În [Aptr92b] se descrie modul de proiectare a regulatorului, cu ajutorul mediului integrat FIDE, utilizând reprezentările grafice ale funcțiilor Var_Heater(Error, Var_Error) și Var_Cooling(Error, Var_Error), cu parametrul Pressure. Nu se fac referiri la modul de implementare și la performanțele obținute

5.3 Utilizarea reglării fuzzy în sistemele de climatizare

Comanda sistemelor de climatizare (aer condiționat) reprezintă o sarcină complexă, principalele probleme care apar putând fi sistematizate astfel:

1. Cerințele utilizatorilor față de sistemele de climatizare au evoluat, impunând și alte caracteristici, decât simpla reglare a temperaturii. Se are în vedere definirea unor condiții de mediu confortabile și sigure, operație care presupune considerarea unor factori contradictorii. De exemplu, în [Toga93] sunt prezentate preocupările privind realizarea unui "senzor de confort", pentru aplicații spațiale, care urmărește un mare număr de parametri: temperatura aerului, umiditatea, viteza aerului, temperatura radiativă, nivelul de activitate, etc.
2. Sistemele de climatizare prezintă neliniarități (în primul rând întârzieri, datorate fluxurilor de aer), precum și parametri variabili sau afectați de incertitudine: dimensiunile și forma încăperii, masa termică a obiectelor și pereților, intensitatea și localizarea surselor de căldură, introducerea de aer din exterior, etc. [Brub92].
3. În anumite cazuri speciale, se impune o precizie deosebită a reglării. De exemplu, pentru sălile care adăpostesc sisteme de calcul se admite o variație de temperatură de $\pm 1^\circ\text{F}$ (aprox. 0.56°C) și o variație de umiditate de $\pm 3\%$ pe oră [Brub92].
4. Comanda eficientă a sistemelor de climatizare presupune, pe lângă satisfacerea condițiilor de reglare, și solicitări minime pentru instalațiile de încălzire și răcire. Astfel, trebuie minimizată frecvența pomirilor compresorului sistemului de răcire și frecvența manevrării clapetelor sistemului de ventilație naturală [Brub92].
5. Creșterea eficienței energetice a sistemului de climatizare se poate atinge prin utilizarea aerului din exterior, atunci când acesta îndeplinește condițiile necesare de temperatură și umiditate [Brub92]. Comanda acestui subsistem este, de asemenea, relativ complexă, trebuind să ia în considerare mai mulți parametri.

Reglarea fuzzy reprezintă, în acest context, o abordare eficientă și competitivă. În continuare sunt prezentate variante de principiu, cu complexități diferite, pentru sistemele de condiționare a aerului, împreună cu regulatoarele fuzzy aferente.

5.3.1 Regulator fuzzy pentru sistemul de climatizare, varianta de bază

Cea mai simplă structură pentru un sistem de condiționare a aerului este prezentată în Fig. 5.6.

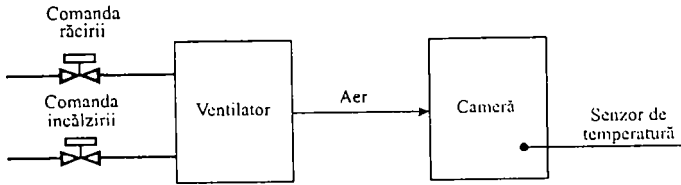


Fig. 5.6 Schema bloc a sistemului de climatizare, varianta de bază

Regulatorul utilizează o singură mărime de reacție: temperatura aerului din încăntă. Modificarea temperaturii se realizează cu ajutorul unui sistem de încălzire și a unui sistem de răcire, comandate separat. În consecință, regulatorul fuzzy are schema bloc din Fig. 5.7 [Aptr92a].

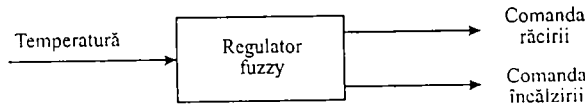


Fig. 5.7 Regulator fuzzy pentru sistemul de climatizare, varianta de bază

Regulatorul cu două ieșiri poate fi descompus în două regulatoare separate, fiecare având o intrare și o ieșire. Termenii variabilelor lingvistice au funcții de apartenență triunghiulare, iar regulile sunt de forma:

dacă temperatura este joasă, atunci crește comanda sistemului de încălzire

În [Janc94] se prezintă îmbunătățirile aduse unui astfel de sistem de climatizare, destinat locuințelor, pentru a ține cont de variațiile de temperatură vară-ianmă și de pe parcursul unei zile.

5.3.2. Regulator fuzzy pentru sistemul de climatizare, variantă îmbunătățită, cu controlul umidității

Controlul umidității este un atribut necesar în aplicațiile de climatizare. Schema bloc a unui sistem de reglare care asigură și controlul umidității este prezentată în Fig. 5.8.

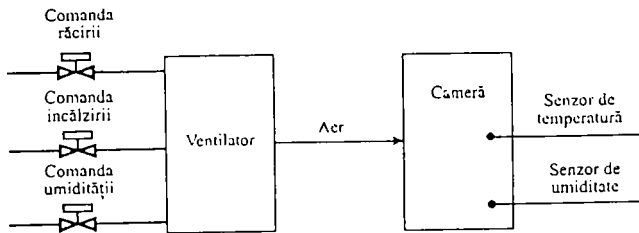


Fig. 5.8 Schema bloc a sistemului de climatizare, varianta cu controlul umidității

Sistemul de reglare utilizează ca mărimi de reacție temperatura și umiditatea aerului din încăntă. Modificarea temperaturii se realizează cu ajutorul unui sistem de încălzire și al unui sistem de răcire, comandate separat, iar modificarea umidității, cu ajutorul altui sistem specializat. În consecință, regulatorul fuzzy are schema bloc din Fig. 5.9 [Aptr92a].

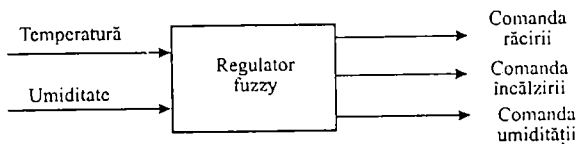


Fig. 5.9 Regulator fuzzy pentru sistemul de climatizare, varianta cu controlul umidității

Regulile pentru comanda sistemelor de încălzire și răcire sunt cele din varianta anterioară. Se adaugă un set de reguli suplimentare, pentru comanda sistemului de umidificare. De exemplu, iarna, când se folosește sistemul de încălzire pentru creșterea temperaturii, aerul devine prea uscat. Acest neajuns poate fi compensat printr-o regulă de forma:

dacă temperatura este joasă, atunci crește puțin comanda sistemului de umidificare

Această regulă acționează în avans, ca un predictor de umiditate, prevenind de asemenea supracreșteri ale nivelului de umiditate. Dacă s-ar utiliza, în locul regulii de mai sus, regula:

dacă umiditatea este redusă, atunci crește puțin comanda sistemului de umidificare

umiditatea ar fi deja prea redusă, atunci când s-ar da comanda de creștere a umidității. Ar rezulta, astfel, oscilații ale nivelului de umiditate.

O variantă asemănătoare, prezentată în [Brub92], folosește 6 variabile de intrare: eroarea de temperatură, derivata acesteia, eroarea de umiditate, derivata acesteia și două dintre mărimile de ieșire ale regulatorului. Pe lângă regulile cu forma de mai sus, există și reguli care stabilesc întârzierile în aplicarea comenzilor, întârzieri considerate ca ieșiri ale regulatorului fuzzy.

5.3.3 Regulator fuzzy pentru sistemul de climatizare al automobilelor

Reglarea temperaturii în interiorul autoturismelor este o sarcină mai dificilă decât reglarea temperaturii în locuințe, deoarece trebuie luați în considerare mai mulți factori, pentru a asigura confortul și siguranța pasagerilor. Pe lângă reglarea temperaturii și umidității, trebuie evitată aburirea geamurilor, care este cauzată de diferența de temperatură interior-exterior, împreună cu un nivel sporit de umiditate interioară. De asemenea, trebuie luate în considerare radiația solară, viteza automobilului și numărul pasagerilor [Aptr92c].

Fig. 5.10 prezintă schema de principiu a unui regulator fuzzy, utilizând 5 senzori care furnizează datele necesare pentru o reglare de calitate a temperaturii și umidității [Aptr92a].

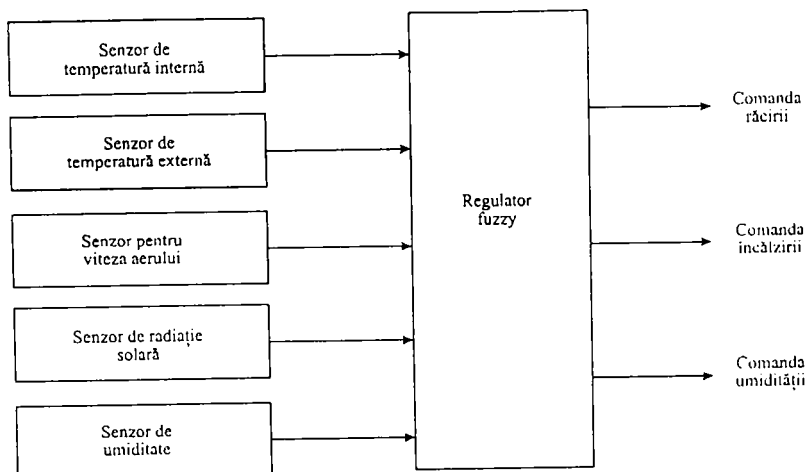


Fig. 5.10 Schema bloc a sistemului de climatizare, varianta specifică pentru automobile

Rapoartele privind realizările practice din acest domeniu evidențiază faptul că regulatoarele fuzzy permit obținerea unor performanțe superioare, comparativ cu regulatoarele clasice, permițând, de exemplu, evitarea schimbărilor rapide de temperatură la deschiderea ușilor sau geamurilor, sau adaptarea la condiții exterioare variabile [Aptr92a].

5.4 Concluzii

- ⇒ Proiectarea regulatoarelor fuzzy presupune, în principal, alegerea variabilelor de intrare și ieșire, a funcțiilor de apartenență pentru termenii variabilelor lingvistice, a bazei de reguli și a operatorilor pentru inferență și defuzzificare.
- ⇒ În proiectarea regulatoarelor fuzzy nu se utilizează un model matematic al procesului. În consecință, regulatoarele fuzzy se pot aplica în cazul proceselor neliniare sau foarte complicate, al căror model matematic fie nu poate fi obținut, fie este prea complex pentru a permite proiectarea unor regulatoare clasice.
- ⇒ Deoarece nu se bazează pe un model matematic al procesului, regulatoarele fuzzy au o comportare mai bună în cazul modificării parametrilor procesului (sunt mai robuste), comparativ cu regulatoarele clasice.
- ⇒ Pe de altă parte, în cazul unor procese cu model matematic simplu, cunoscut, regulatoarele fuzzy nu pot depăși performanțele regulatoarelor clasice, proiectate prin metode exacte.
- ⇒ Sistemele de control al temperaturii sunt neliniare, având, de regulă, și parametri variabili. În consecință, utilizarea reglării fuzzy constituie o alternativă avantajoasă. Literatura de specialitate descrie multe astfel de exemple. Unii constructori de echipamente pentru automatizare oferă regulatoare de temperatură fuzzy.
- ⇒ Sistemele de climatizare ridică probleme mai dificile decât simpla reglare a temperaturii. Pe lângă neliniarități și variația parametrilor, aceste sisteme sunt caracterizate prin cerințe deosebite (confort, precizia reglării, solicitarea minimă a instalației, eficiența energetică ridicată).

În literatura consultată sunt descrise principal două variante de reglatoare pentru sistemele de climatizare din locuințe, având nivele de performanță diferite, și o variantă specifică pentru automobile. Nu sunt prezentate detalii de proiectare și implementare, nici performanțele obținute. Nu au fost găsite alte referințe privind utilizarea reglării fuzzy în sistemele de climatizare auto.

- modificarea temperaturii trebuie să se realizeze totuși nu prea repede, pentru a evita îmbolnăvirea pasagerilor
- răspunsul sistemului la o modificare a temperaturii interioare prescrise trebuie să fie suficient de rapid; altfel, există tendința de a modifica prescrierea, în sensul accentuării schimbării dorite, ceea ce conduce la ajustări succesive și la oscilații mari ale temperaturii interioare
- în cazul sistemelor de climatizare cu reglarea separată a temperaturii pentru cele două locuri din față, trebuie evitată influența stânga-dreapta;
- reglarea automată poate fi considerată optimă atunci când "câștigă încrederea" pasagerilor, aceștia fiind convinși că reglarea manuală nu poate oferi un confort superior
- tipul de climatizare dorit depinde de zonă geografică, de componentele etnice sau educative; de exemplu, americanii preferă o temperatură scăzută și un debit mare de aer, în timp ce europenii optează pentru un debit de aer cât mai redus și temperaturi în jur de 24 °C

3. condiții tehnice relative la sistemul de climatizare

- capacitatea de răcire este de 3 - 6 ori mai mică decât cea de încălzire
- debitul de aer este influențat de viteza automobilului, precum și de pozițiile clapetelor de distribuție
- funcționarea sistemelor de climatizare cu controlul debitului lichidului de răcire este puternic influențată de turația motorului și de curbe
- sistemele de climatizare cu controlul debitului lichidului de răcire reacționează mai rapid la încălzire decât la răcire; pentru evitarea problemelor care pot să apară, se recomandă ca rata de creștere permisă pentru temperatură să fie ce 4 - 20 de ori mai mică decât rata de scădere
- în cazul startului cu motorul cald și dacă temperatura exterioară nu este foarte scăzută, se recomandă limitarea temperaturii aerului suflat la 50 - 65 °C
- senzorul temperaturii exterioare este puternic afectat de erori: provenind de la motor, gazele de eșapament, asfaltul încălzit și radiația solară
- temperatura exterioară măsurată în momentul pornirii este afectată de perioada de staționare, utilizarea acesteia conducând la o comandă falsă a sistemului de climatizare, deci la variații nedorite ale temperaturii exterioare; pentru evitarea acestei situații, la repornire se va utiliza, în locul temperaturii exterioare curente, temperatura exterioară memorată în momentul opririi;
- metoda descrisă anterior se va folosi doar în cazul startului cald (cu lichidul de răcire cald); în cazul startului rece (cu lichidul de răcire rece), se utilizează valoarea curentă a temperaturii exterioare, deoarece în timpul (mai lung) scurs de la ultima oprire este posibilă modificarea semnificativă a temperaturii exterioare; în aceste condiții, utilizare valorii memorate poate cauza o comandă falsă
- la start, aerul nu trebuie dirijat imediat spre parbriz, deoarece s-ar provoca aburirea acestuia, datorită umidității remanente în sistemul de răcire
- dacă se înregistrează o umiditate crescută în exterior împreună cu o temperatură scăzută, se recomandă funcționarea subsistemului de răcire pentru uscarea aerului suflat, evitându-se aburirea geamurilor
- în cazul funcționării în regim de aer recirculat, se recomandă, de asemenea, funcționarea subsistemului de răcire pentru eliminarea umidității generate de pasageri

- regimul de aer recirculat poate fi folosit numai pentru un timp limitat (15 ... 45 min.), după care trebuie amestecat cu aer proaspăt (în proporție de 20 ... 80%), pentru a asigura oxigenul necesar respirației pasagerilor

6.2 Structura sistemului de comandă a climatizării

6.2.1 Schema bloc

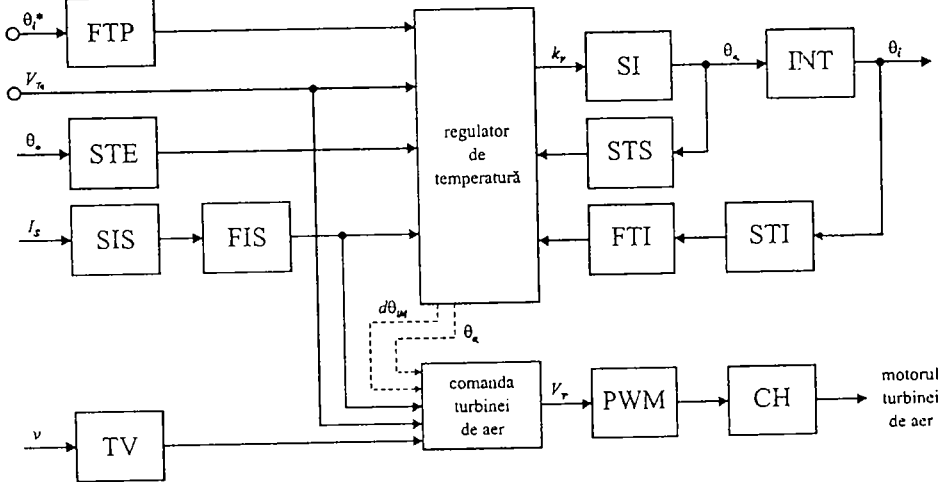


Fig. 6.1 Sistemul de comandă a climatizării

Schema bloc a sistemului de comandă a climatizării este prezentată în Fig. 6.1. Sunt folosite următoarele notații:

- blocuri
 - procesul condus
 - SI - subsistem de încălzire
 - INT - model termic pentru interiorul cabinei
 - elemente de execuție
 - CH - chopper (cu comandă PWM)
 - PWM - modulator PWM
 - elemente de măsură
 - STS - senzor pentru temperatura aerului suflat
 - STI - senzor pentru temperatura interioară
 - STE - senzor pentru temperatura exterioară
 - SIS - senzor pentru iluminarea solară
 - FIS - filtru pentru iluminarea solară
 - TV - traductor de viteză
 - FTI - filtru pentru temperatura interioară
 - FTP - filtru pentru temperatura interioară prescrisă
- mărimi
 - mărimi reglate
 - θ_a - temperatura aerului suflat
 - θ_i - temperatura interioară

- mărimi de comandă
 k_v - factor de umplere pentru comanda electrovalvei subsistemului de încălzire
 V_T - tensiunea de comandă a turbinei de aer
- mărimi de prescriere
 θ_i^* - temperatura interioară prescrisă
 V_{Tc} - comanda turbinei de aer (poziția reglajului manual)
- perturbații externe
 θ_o - temperatura exterioară
 I_S - iluminarea solară
 v - viteza de deplasare
- mărimi interne ale schemei
 $d\theta_{iF}$ - eroarea pentru temperatura interioară corectată fiziologic (variabilă internă a regulatorului de temperatură)

Se observă similaritatea cu schema bloc din Fig. 2.3, corespunzătoare abordării clasice. Blocul regulatorului de temperatură și cel al comenzii turbinei de aer sunt implementate cu ajutorul unor module de calcul care folosesc logica fuzzy. Pentru celelalte blocuri din Fig. 2.3. s-au păstrat implementările clasice (în consecință, acestea nu vor fi analizate pe parcursul prezentului capitol).

Unele dintre semnalele de intrare sunt filtrate suplimentar, în scopul evitării variațiilor prea rapide ale temperaturii interioare, în acord cu cerințele formulate anterior:

- FTP intervine la modificarea bruscă a prescrierii manuale
- FIS intervine la modificarea bruscă a iluminării solare (de exemplu, la trecerea pe sub un pod sau prin umbra unor clădiri)
- FTI intervine în cazul deplasării "pernelor" de aer cu temperaturi diferite din interiorul cabinei (la curbe, accelerări sau decelerări).

Filtrele acționează, cu aproximație, ca elemente de tip PT1, cu unele îmbunătățiri care asigură un răspuns adecvat în condiții diverse. Ca exemplu, va fi prezentat filtrul temperaturii interioare, FTI. O valoare prea mare a constantei de timp (peste 30 s) ar determina o comportare instabilă a buclei de reglare, cu oscilații mari de temperatură. O valoare prea mică ar reduce eficiența filtrului, cauzând variații ale temperaturii interioare la curbe, accelerări sau decelerări. În consecință, se vor folosi două valori diferite ale constantei de timp, selectate în funcție de eroarea buclei de reglare a temperaturii interioare, astfel:

- la erori mari (în modul) se utilizează constanta de timp mică, asigurând un răspuns rapid al reglării
- la erori mici, se folosește constanta de timp mare, care asigură o eficiență ridicată a filtrării
- la comutarea celor două constante de timp se introduce un histerezis de cel puțin 3 °C.

Regulatorul de temperatură calculează factorul de umplere, k_v , al semnalului de comandă pentru ventilul care controlează debitul lichidului de răcire prin radiatorul subsistemului de încălzire. Se măsoară temperatura aerului suflat și temperatura interioară.

Blocul de comandă a turbinei de aer generează tensiunea de comandă V_T , transmisă unui modulator PWM, care comandă un chopper, care, la rândul lui, alimentează motorul turbinei.

Pe lângă sistemul de comandă prezentat în figură, a fost implementat și un sistem cu reglarea separată a temperaturilor pentru cele două locuri din față. Elementele specifice ale acestuia vor fi prezentate ulterior.

6.2.2 Regulatorul de temperatură

6.2.2.1 Schema bloc

Schema bloc detaliată a regulatorului de temperatură este prezentată în Fig. 6.2. Sunt folosite următoarele notații:

- θ_i^* - temperatura interioară prescrisă
- θ_o - temperatura exterioară
- V_{Tc} - comanda turbinei de aer (poziția reglajului manual)
- I_s - iluminarea solară
- $K_{\theta o_1}$ - corecție funcție de temperatura exterioară
- $K_{V_{Tc}}$ - corecție funcție de comanda turbinei de aer
- θ_{ic}^* - temperatura interioară prescrisă, corectată funcție de perturbațiile externe
- $K_{I_{s1}}$ - corecție funcție de iluminarea solară
- $K_{\theta o_2}$ - corecție funcție de temperatura exterioară
- θ_{if}^* - temperatura interioară prescrisă, corectată fiziologic
- $d\theta_{if}$ - eroarea pentru temperatura interioară corectată fiziologic
- $Id\theta_{if}$ - integrala erorii pentru temperatura interioară corectată fiziologic
- θ_{ap}^* - valoarea prescrisă pentru temperatura aerului suflat, componenta "P"
- θ_{ai}^* - valoarea prescrisă pentru temperatura aerului suflat, componenta "I"
- θ_a^* - valoarea prescrisă pentru temperatura aerului suflat
- k_v - factor de umplere pentru comanda electrovalvei subsistemului de încălzire
- θ_a - temperatura aerului suflat
- θ_i - temperatura interioară

FTP - filtru pentru temperatura interioară prescrisă

STE - senzor pentru temperatura exterioară

SIS+FIS - senzor + filtru pentru iluminarea solară

CTE - bloc de corecție în funcție de temperatura exterioară

CDA - bloc de corecție în funcție de comanda debitului de aer

FZ-CIS1 - bloc de corecție fuzzy în funcție de iluminarea solară

FZ-CTE - bloc de corecție fuzzy în funcție de temperatura exterioară

FZ-RP - regulator fuzzy "P"

I - integrator

FZ-RI - regulator fuzzy "I"

RTS - regulator pentru temperatura aerului suflat

SI - subsistem de încălzire

STS - senzor pentru temperatura aerului suflat

INT - model termic pentru interiorul cabinei

STI - senzor pentru temperatura interioară

FTI - filtru pentru temperatura interioară

Se observă prezența unei bucle interne, care reglează temperatura aerului suflat, θ_a , cu ajutorul regulatorului RTS, de tip P.

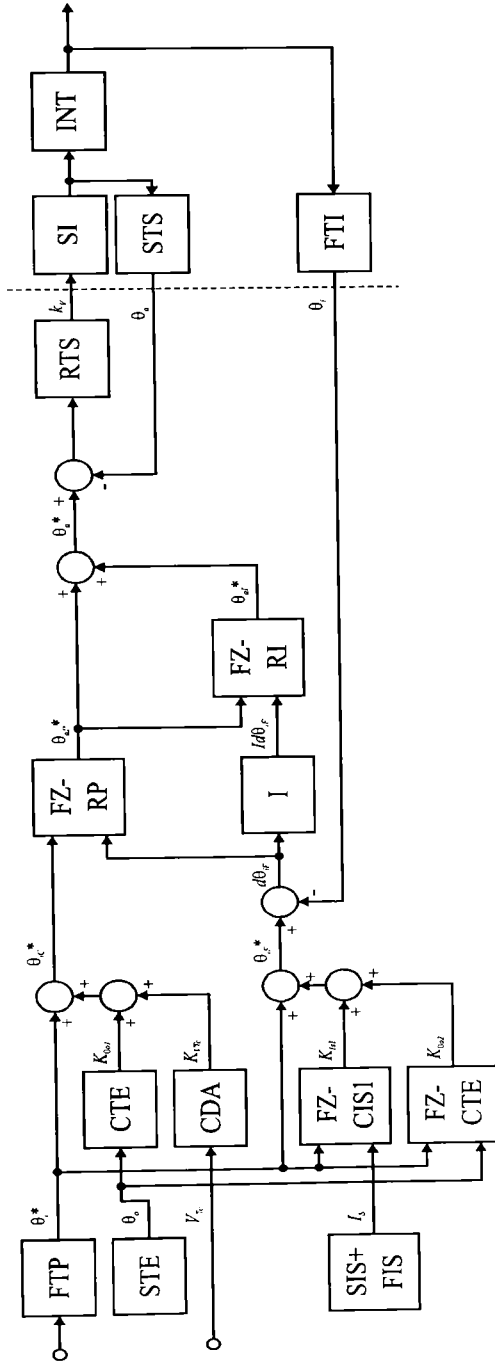


Fig. 6.2 Regulatorul de temperatură

Bucula externă realizează reglarea temperaturii interioare și compensarea perturbațiilor externe, calculând valoarea prescrisă a temperaturii aerului suflat, θ_a^* . Pentru o acordare simplă și eficientă, pe baza experienței existente, pentru regulatorul buclei externe s-a adoptat o soluție asemănătoare cu regulatoarele PI clasice. Se folosesc două regulatoare fuzzy, unul generând o componentă “quasi-proporțională”, iar celălalt, o componentă “quasi-integratoare”. În principiu, regulatorul “quasi-P” ar trebui să asigure temperatura internă prescrisă, chiar în condițiile unor perturbații externe. Compensarea incompletă (inexactă) a acestor perturbații, precum și imperfecțiunile regulatorului “quasi-P” afectează precizia reglării, pe termen lung. Eliminarea acestei deficiențe se realizează prin introducerea regulatorului “quasi-I”, cu rol asemănător componentei integratoare din regulatoarele PI clasice. Acordarea regulatorului de temperatură presupune întâi optimizarea reglării de tip P și apoi adăugarea componentei I, astfel încât cea din urmă să aibă o pondere cât mai redusă. Se obține astfel un răspuns optim al buclei de reglare la variații rapide ale mărimilor de intrare.

În concluzie, temperatura internă prescrisă se obține ca sumă a două componente:

$$\theta_a^* = \theta_{aP}^* + \theta_{aI}^* \quad (6.1)$$

Primul termen, θ_{aP}^* , este calculat de către regulatorul fuzzy “quasi-P”, **FZ-RP**, în funcție de eroarea de temperatură (corectată fiziologic) $d\theta_{IF}$. Cel de-al doilea termen, θ_{aI}^* , este calculat de către regulatorul fuzzy “quasi-I”, **FZ-RI**, în funcție de integrala erorii de temperatură (corectată fiziologic) $I d\theta_{IF}$. Datorită caracteristicilor de transfer neliniare ale regulatoarelor fuzzy, ca și prin introducerea în calcul a unor mărimi suplimentare (prescrierea corectată θ_{IC}^* la **FZ-RP** și componenta proporțională a ieșirii θ_{aP}^* la **FZ-RI**), se pot obține performanțe superioare abordărilor clasice.

Corecțiile temperaturii prescrise în funcție de perturbațiile externe (temperatura exterioară și debitul de aer, determinat de poziția butonului de comandă a turbinei) se implementează cu ajutorul blocurilor CTE și CDA, având caracteristici de transfer neliniare. Mărimile de corecție K_{a1} și K_{1T} intervin doar în valoarea transmisă regulatorului **FZ-RP**.

Corecțiile fiziologice ale temperaturii prescrise sunt implementate cu ajutorul unor blocuri de corecție bazate pe logica fuzzy, **FZ-CIS1** și **FZ-CTE**, identice funcțional cu regulatoarele prezentate anterior. Mărimile de corecție K_{a1} și K_{a2} intervin doar în valoarea transmisă regulatorului **FZ-RI**.

Integratorul **I** realizează însumarea mărimii de intrare în fiecare perioadă de eșantionare a algoritmului de reglare, urmată de limitarea rezultatului la valori reprezentabile pe 16 biți.

6.2.2.2 Regulatoarele fuzzy

Regulatoarele fuzzy, cu structuri identice, sunt de tip Mamdani (cu două intrări, o ieșire, reguli binare cu conector logic “ȘI”). Termenii corespunzători mărimilor de intrare au funcții de apartenență trapezoidale (sau, ca un caz particular, triunghiulare), iar termenii corespunzători ieșirii sunt de tip “singleton”. Această ultimă caracteristică micșorează volumul de calcule pentru inferență și defuzifiicare, oferind totuși performanțe corespunzătoare în aplicația considerată. Modul de implementare a regulatoarelor va fi prezentat în detaliu în Capitolul 8, codul sursă fiind dat în Anexa 1.

În continuare se vor prezenta bazele de cunoștințe ale regulatoarelor, incluzând termenii variabilelor lingvistice și baza de reguli.

1. Regulatorul fuzzy "P" - FZ-RP

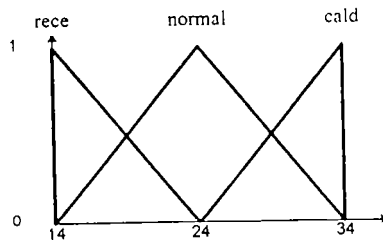


Fig. 6.3 Termenii variabilei lingvistice pentru θ_{c^*} [°C]

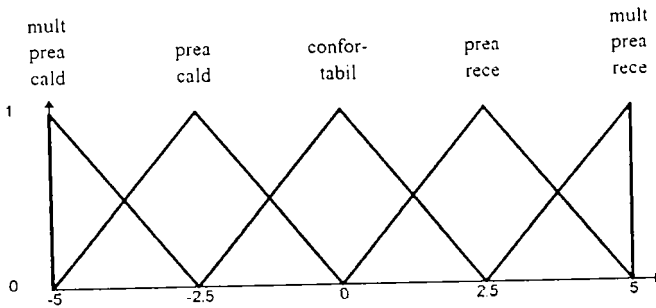


Fig. 6.4 Termenii variabilei lingvistice pentru $d\theta_f$ [°C]

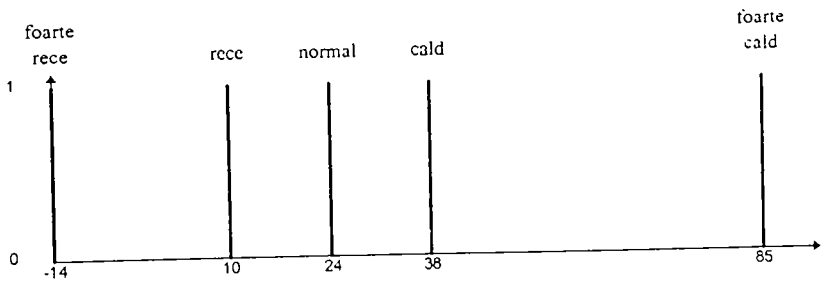


Fig. 6.5 Termenii variabilei lingvistice pentru θ_{up^*} [°C]

$\theta_{ic}^* \rightarrow$ $d\theta_F \downarrow$	rece	normal	cald
mult prea cald	foarte rece	foarte rece	rece
prea cald	foarte rece	rece	normal
confortabil	rece	normal	cald
prea rece	normal	cald	foarte cald
mult prea rece	cald	foarte cald	foarte cald

Se observă că baza de reguli conține termeni apropiați de “normal” pe una din diagonale, iar valorile termenilor cresc spre “foarte rece” respectiv “foarte cald”, pe măsura îndepărtării de diagonală. În aceste condiții, repartizarea relativ uniformă a termenilor tuturor funcțiilor de apartenență ar determina ca ieșirea să depindă aproximativ liniar de fiecare din intrări. Astfel, s-ar realiza o reglare de tip P în raport cu eroarea buclei temperaturii interioare, $d\theta_F$, cu o corecție liniară în funcție de temperatura prescrisă (corectată) θ_{ic}^* .

Prin îngustarea domeniului de variație al funcțiilor de apartenență pentru una din intrări se obține un efect similar creșterii factorului de amplificare, în cazul unui regulator P clasic. Modificarea distribuției funcțiilor de apartenență (față de repartizarea uniformă) permite implementarea unei comportări neliniare.

Neliniaritatea în raport cu valoarea ieșirii (calculată în condițiile distribuției uniforme) se poate obține acționând asupra termenilor variabilei lingvistice a ieșirii. Astfel, deplasarea spre valori mai mari a funcției de apartenență pentru “foarte cald” din variabila lingvistică θ_{ap}^* realizează accentuarea acțiunii regulatorului, atunci când se urmărește încălzirea puternică a aerului suflat. Același efect, dar mai puțin accentuat, a fost implementat pentru răcirea puternică. Se obține o reglare mai fină în apropierea stării de echilibru, combinată cu o reglare rapidă, departe de echilibru. Rezultă un răspuns mai rapid, păstrându-se în același timp stabilitatea sistemului.

2. Regulatorul fuzzy “I” - FZ-RI

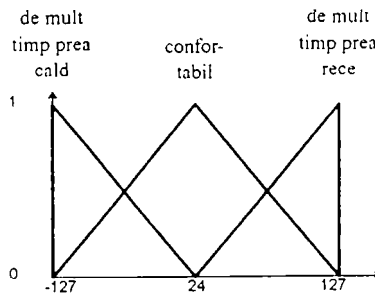


Fig. 6.6 Termenii variabilei lingvistice pentru $d\theta_F$ [°C·s]

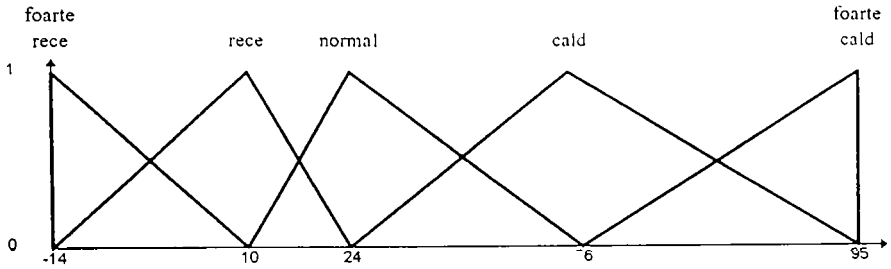


Fig. 6.7 Termenii variabilei lingvistice pentru θ_{ap}^* [°C]

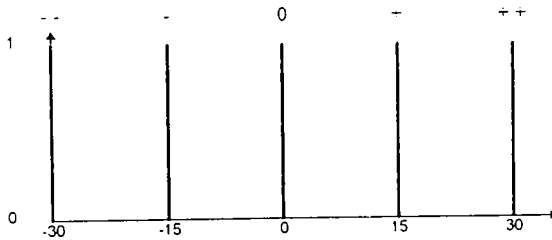


Fig. 6.8 Termenii variabilei lingvistice pentru θ_{il}^* [°C]

$Id\theta_{IF} \rightarrow$ $\theta_{ap}^* \downarrow$	de mult timp prea cald	confortabil	de mult timp prea rece
foarte rece	0	0	++
rece	-	0	++
normal	-	0	+
cald	--	0	+
foarte cald	--	0	0

Structura bazei de reguli a fost aleasă astfel încât componenta integratoare a comenzii, θ_{il}^* , să fie nulă atunci când integrala erorii buclei, $Id\theta_{IF}$, indică un regim confortabil. În caz contrar, componenta integratoare depinde atât de $Id\theta_{IF}$, cât și de ieșirea regulatorului FZ-RP. Dependența a fost stabilită astfel încât influența părții integratoare să fie atenuată, atunci când componenta "quasi-P", θ_{ap}^* , asigură aducerea temperaturii interioare spre valoarea prescrisă (de exemplu, când în interior e de mult timp prea cald, iar θ_{ap}^* este foarte mică).

În varianta PI "clasică", zona respectivă a bazei de reguli (colțurile din stânga sus și dreapta jos în tabelul anterior) ar trebui să conțină termenul "--". S-a constatat însă că aceasta conduce la o comportare instabilă a regulatorului și astfel a apărut ideea considerării ieșirii regulatorului "quasi-P" ca intrare a regulatorului "quasi-I".

Repartizarea neuniformă a termenilor pentru intrarea θ_{ad}^* este în acord cu repartizarea similară în variabila lingvistică a ieșirii regulatorului FZ-RP, reprezentată în Fig. 6.7.

6.2.2.3 Corecțiile în funcție de perturbațiile externe

Funcțiile de transfer ale blocurilor de corecție CTE și CDA se obțin pe baza unui set de determinări experimentale, în care se măsoară pozițiile reglajelor manuale care asigură o temperatură interioară constantă, la variația temperaturii exterioare și în condițiile unui debit de aer optim. Blocurile de corecție pot fi implementate prin interpolare în tabele sau prin formule liniarizate, calculate "on-line".

6.2.2.4 Corecțiile fiziologice

Corecțiile fiziologice pot fi stabilite pe baza experienței în climatizarea auto și a unor studii de fiziologie, sau, alternativ, prin măsurători experimentale asupra unui sistem cu reglaj manual (variantă utilizată de autor). Măsurătorile trebuie realizate cu sistemul la echilibru, acoperind un domeniu larg al mărimilor funcție de care se realizează corecția. Se măsoară modificările necesare ale valorii prescrise θ_i^* , care asigură păstrarea neschimbată a senzației fiziologice în condițiile modificării mărimii de influență. Pe baza acestor modificări se realizează proiectarea blocurilor de corecție fuzzy.

Pentru simplificarea implementării, blocurile de corecție fuzzy au o structură similară cu regulatoarele fuzzy prezentate anterior: două intrări, o ieșire, reguli binare cu conector logic "ȘI". În continuare se vor prezenta bazele de cunoștințe.

a) Corecția în funcție de iluminarea solară - FZ-CIS1

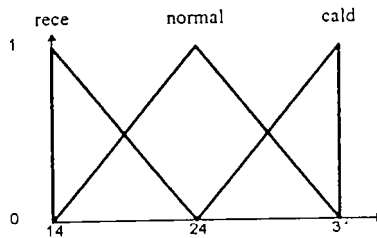


Fig. 6.9 Termenii variabilei lingvistice pentru θ_i^* [$^\circ\text{C}$]

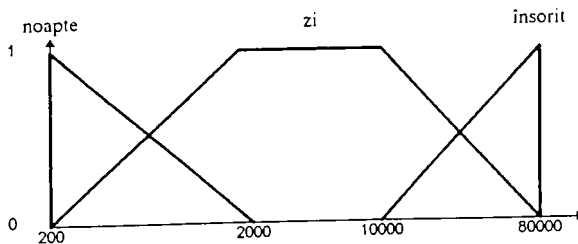


Fig. 6.10 Termenii variabilei lingvistice pentru I_s [lux] (scară logaritmică)

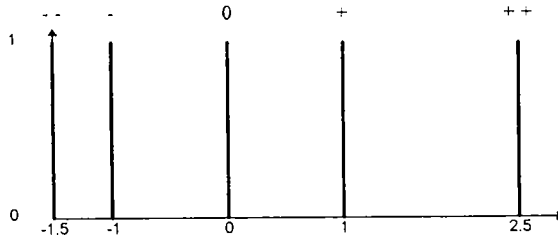


Fig. 6.11 Termenii variabilei lingvistice pentru K_{LI} [°C]

$\theta_i^* \rightarrow$ $I_S \downarrow$	rece	normal	cald
noapte	0	+	++
zi	0	0	0
însorit	--	-	∪

În regim de “zi”, când I_S are valori de 2000 - 10000 lux, nu se aplică nici o corecție. În regim de “noapte”, când iluminarea este mai redusă, se realizează creșterea prescrierii buclei de temperatură, θ_{iF}^* . Pentru a obține o senzație fiziologică semnificativă, creșterea este mai mare atunci când temperatura prescrisă de pasager, θ_i^* , este mai mare. În regim “însorit”, când iluminarea este mai ridicată, se realizează reducerea prescrierii buclei de temperatură, tot în funcție de temperatura prescrisă de pasager.

Distribuția neuniformă a funcțiilor de apartenență pentru K_{LI} , asigură o eficiență mai mare a corecției atunci când se urmărește creșterea prescrierii. Funcția trapezoidală a termenului “zi” din variabila lingvistică I_S determină o corecție nulă pentru un interval mai larg al valorilor I_S , în acord cu cerințele practice.

b) Corecția în funcție de temperatura exterioară - FZ-CTE

Termenii variabilei lingvistice pentru θ_i^* sunt aceiași ca și în Fig. 6.9.

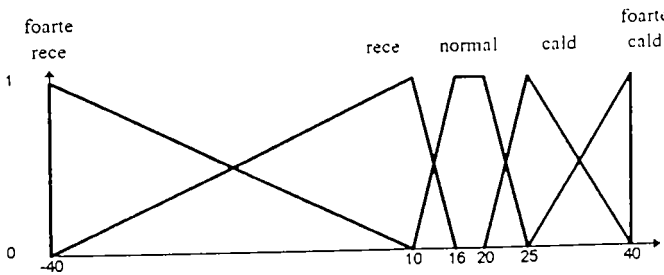


Fig. 6.12 Termenii variabilei lingvistice pentru θ_i [°C]

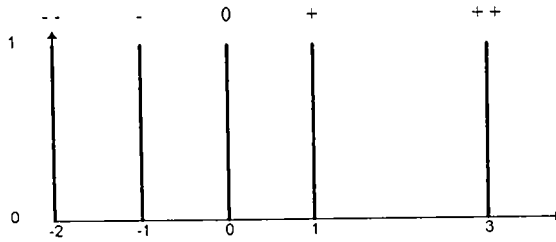


Fig. 6.13 Termenii variabilei lingvistice pentru K_{ab2} [°C]

$\theta_i^* \rightarrow$ $\theta_o \downarrow$	rece	normal	cald
foarte rece	+	++	++
rece	0	+	+
normal	0	0	0
cald	-	-	0
foarte cald	--	--	-

Această corecție fiziologică asigură creșterea prescrierii θ_{iR}^* la temperaturi externe θ_o mici și scăderea prescrierii la temperaturi externe mari, creând o senzație de confort agreabilă. Pentru a obține o senzație fiziologică semnificativă, modificarea este mai pronunțată atunci când temperatura prescrisă de pasager, θ_i^* , se apropie de valorile extreme.

Alocarea termenilor variabilei lingvistice θ_o realizează descrierea corespunzătoare a senzației fiziologice de căldură. Repartizarea neuniformă a termenilor pentru K_{ab2} accentuează corecția atunci când se urmărește creșterea prescrierii.

6.2.2.5 Varianta cu prescriere separată a temperaturilor

După cum s-a arătat în Capitolul 2, varianta de regulator cu prescriere separată a temperaturilor pentru cele două locuri din față conține două bucle de reglare a temperaturii aerului suflat. Mărimile de referință ale acestor bucle se calculează pornind de la ieșirea regulatorului temperaturii interioare, prin introducerea unor corecții, în funcție de diferențele prescrierilor de temperatură manuale:

$$\begin{aligned} \theta_{aR}^* &= \theta_o^* + p \cdot (\theta_{iR}^* - \theta_{iL}^*) \\ \theta_{aL}^* &= \theta_o^* + p \cdot (\theta_{iL}^* - \theta_{iR}^*) \end{aligned} \quad (6.2)$$

unde:

- θ_{aR}^* , θ_{aL}^* - prescrierea buclei de reglare a temperaturii aerului suflat, dreapta/stânga
- θ_o^* - ieșirea regulatorului temperaturii interioare
- θ_{iR}^* , θ_{iL}^* - prescrierea manuală a temperaturii interioare, dreapta/stânga
- p - coeficient

Spre deosebire de varianta clasică, descrisă în Capitolul 2, unde coeficientul p avea o valoare constantă (egală cu 4 în Fig. 2.4), în varianta cu reglare fuzzy acest coeficient trebuie să fie calculat în fiecare perioadă de eșantionare a algoritmului de reglare. Aceasta deoarece "componenta proporțională" a regulatorului (similară cu factorul de amplificare în curent continuu), nu mai este constantă. Formula de calcul pentru coeficientul p este:

$$p_k = \frac{\theta_{k-1}^*}{d\theta_{k-1}} \quad (6.2')$$

unde k este indicele perioadei de eșantionare a algoritmului de reglare.

Celelalte blocuri din schemă își păstrează funcționalitatea.

6.2.3 Comanda turbinei de aer

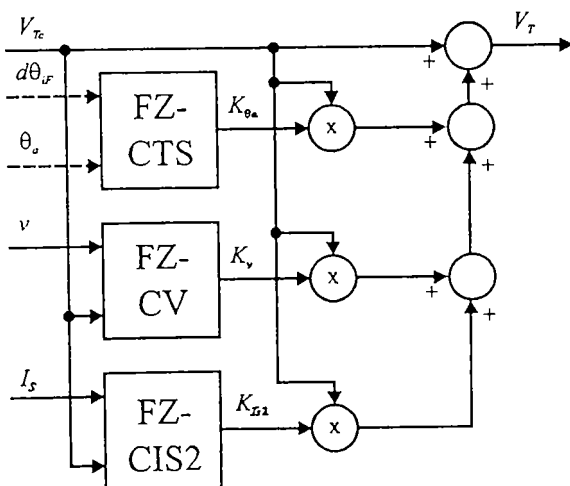


Fig. 6.14 Comanda turbinei de aer

Schema bloc detaliată a sistemului de comandă pentru turbina de aer este prezentată în Fig. 6.14. Sunt folosite următoarele notații:

- V_{Tc} - tensiune de comandă corespunzătoare reglajului manual al debitului de aer
- V_T - tensiune de comandă pentru modulatorul PWM al turbinei de aer
- $d\theta_{i,r}$ - eroarea pentru temperatura interioară corectată fiziologic (mărime internă a regulatorului de temperatură)
- θ_a - temperatura aerului suflat
- v - viteza automobilului
- I_s - iluminarea solară
- K_{θ_a} - corecție funcție de temperatura exterioră
- K_v - corecție funcție de viteza de deplasare
- K_{I_s2} - corecție funcție de iluminarea solară

FZ-CTS - bloc de corecție fuzzy în funcție de temperatura aerului suflat
 FZ-CV - bloc de corecție fuzzy în funcție de viteza de deplasare
 FZ-CIS2 - bloc de corecție fuzzy în funcție de iluminarea solară

Tensiunea de comandă V_{Tc} este obținută de la butonul de reglaj manual al debitului de aer. Alternativ, această tensiune poate fi calculată automat, pentru a asigura un reglaj de temperatură cât mai eficient și o senzație de confort optimă. Valorii V_{Tc} i se aplică o corecție multiplicativă, în funcție de unele mărimi perturbatoare externe (iluminarea solară și viteza de deplasare), de temperatura aerului suflat și de eroarea buclei de reglare a temperaturii interioare (variabilă internă a regulatorului de temperatură). Se obține astfel tensiunea de comandă V_T , aplicată modulatorului PWM, care comandă un chopper, care, la rândul lui alimentează motorul turbinei de aer:

$$V_T = V_{Tc} \cdot (1 + K_{\theta_s} + K_v + K_{I2}) \quad (6.3)$$

În continuare se vor descrie bazele de cunoștințe ale blocurilor de corecție fuzzy.

a) Corecția în funcție de temperatura aerului suflat - FZ-CTS

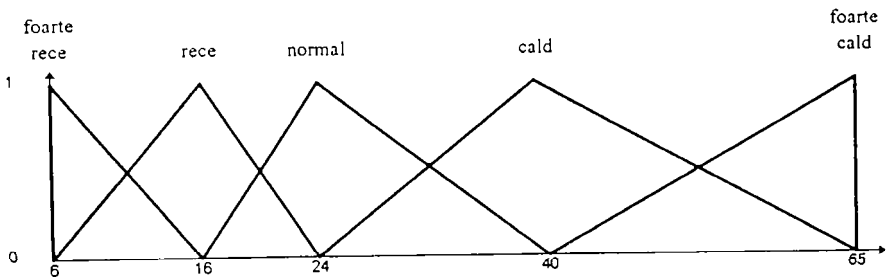


Fig. 6.15 Termenii variabilei lingvistice pentru θ_s [°C]

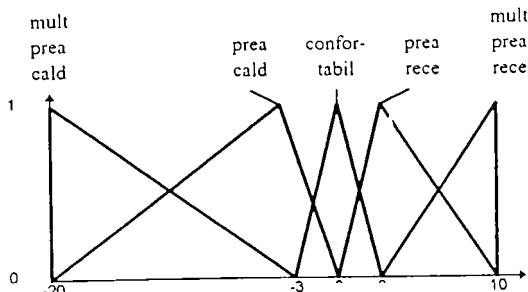


Fig. 6.16 Termenii variabilei lingvistice pentru $d\theta_f$ [°C]

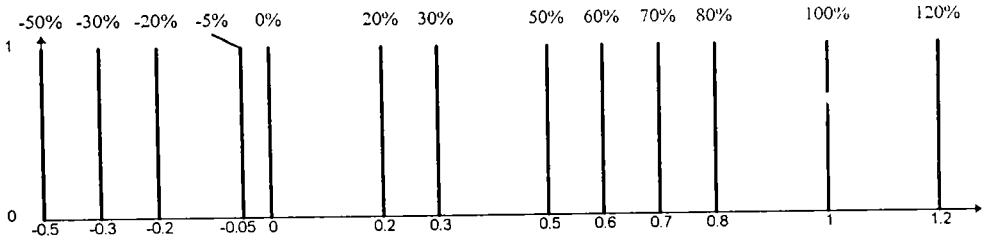


Fig. 6.17 Termenii variabilei lingvistice pentru K_a

$\theta_a \rightarrow$ $d\theta_{i,F} \downarrow$	foarte rece	rece	normal	cald	foarte cald
mult prea cald	+70%	+100%	0%	+30%	-50%
prea cald	+30%	+50%	0%	+20%	-50%
confortabil	0%	0%	0%	0%	0%
prea rece	-50%	-20%	0%	+30%	+20%
mult prea rece	-50%	-30%	0%	+80%	+50%

b) Corecția în funcție de viteza de deplasare - FZ-CV

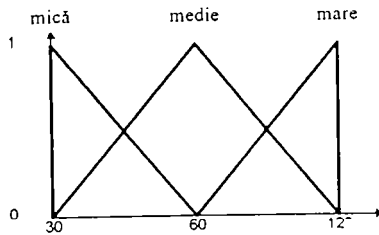


Fig. 6.18 Termenii variabilei lingvistice pentru v [km/h]

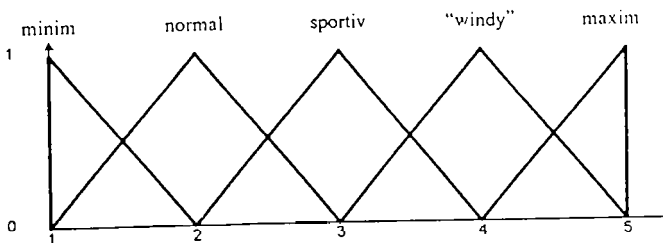


Fig. 6.19 Termenii variabilei lingvistice pentru V_{re} [nivel]

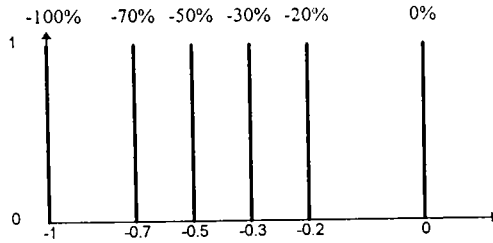


Fig. 6.20 Termenii variabilei lingvistice pentru K ,

$v \rightarrow$ $V_{TC} \downarrow$	mică	medie	mare
minim	0%	-50%	-100%
normal	0%	-50%	-100%
sportiv	0%	-30%	-70%
“windy”	0%	-20%	-50%
maxim	0%	0%	0%

Blocul de corecție descris asigură o reglare eficientă a temperaturii, evitând în același timp disconfortul pasagerilor. Astfel, debitul de aer este crescut atunci când temperatura fluxului de aer asigură aducerea temperaturii interioare la valoarea dorită (de exemplu, atunci când în interior este prea rece, iar aerul suflat este cald). Cu toate acestea, creșterea este mai moderată atunci când temperatura aerului suflat are valori extreme (foarte cald sau foarte rece), pentru a evita senzația neplăcută care s-ar produce. Invers, debitul de aer este redus atunci când temperatura fluxului de aer nu asigură aducerea temperaturii interioare la valoarea dorită. Acest lucru se poate întâmpla la start rece, când lichidul de răcire nu poate realiza, în primele minute, încălzirea suficientă a aerului suflat, sau în regimul de funcționare economic, când subsistemul de răcire nu funcționează.

Dacă aerul suflat este cald, dar nu atât de cald ca și aerul din interior, se crește puțin debitul de aer, pentru a asigura un efect fiziologic plăcut prin ventilație și pentru a ajuta la înlocuirea mai rapidă a aerului în mașină. Acest comportament este implementat prin regulile din colțul din dreapta-sus al tabelului anterior, unde apar termenii “+30%” și “+20%”.

Termenii variabilelor lingvistice ale intrărilor au fost stabiliți în acord cu senzațiile fiziologice corespunzătoare. Valorile din baza de reguli au fost determinate pe baza experienței existente și au fost apoi optimizate prin ajustări experimentale.

Acest bloc de corecție asigură reducerea comenzii turbinei de aer la creșterea vitezei de deplasare, pentru a compensa creșterea “naturală” a debitului de aer, provocată de creșterea vitezei. Reducerea este corelată cu poziția reglajului manual, pentru a asigura un confort optim.

Termenii variabilelor de intrare au fost uniform distribuiți, iar forma exactă a bazei de reguli a fost optimizată prin măsurători experimentale.

c) Corecția în funcție de iluminarea solară - FZ-CIS2

Termenii variabilei lingvistice pentru V_{Tc} sunt identici cu cei reprezentați în Fig. 6.19, iar cei corespunzătorii lui I_S sunt reprezentați în Fig. 6.10.

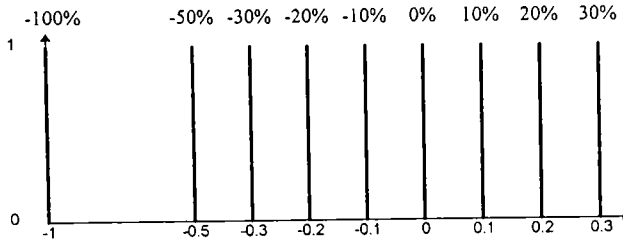


Fig. 6.21 Termenii variabilei lingvistice pentru K_{I2}

$I_S \rightarrow$ $V_{Tc} \downarrow$	noapte	zi	însorit
minim	-30%	0%	0%
normal	-30%	0%	+10%
sportiv	-10%	0%	+20%
“windy”	0%	0%	+30%
maxim	0%	0%	0%

Acest bloc de corecție asigură corelarea debitului de aer cu iluminarea solară, ținând cont și de poziția reglajului manual. Debitul de aer este redus noaptea și crescut în condiții de iluminare intensă. Pentru reglajul “maxim” al V_{Tc} , tensiunea de comandă V_T are oricum valoare maximă, așa că o corecție pozitivă nu ar avea nici un efect; în consecință, ultima linie a tabelului anterior conține termenul “0%”. Valorile din baza de reguli au fost determinate, așa cum s-a arătat, pe baza experienței existente și prin ajustări experimentale.

6.3 Concluzii

- ⇒ Elaborarea unui regulator fuzzy impune sistematizarea principiilor esențiale ale reglării, specifice sistemelor de climatizare auto. Aceste principii, elaborate de autor, rezultă din: experiența proiectantului (obținută prin proiectarea sistemelor de reglare clasice); medicină și psihologie; caracteristicile tehnice ale instalației de climatizare.
- ⇒ Sistemul de comandă propus de autor pornește de la schema bloc tipică a sistemelor de comanda pentru climatizarea auto, introdusă în Capitolul 2, implementând cu ajutorul logicii fuzzy cele mai importante blocuri (regulatorul de temperatură și comanda turbinei de aer).
- ⇒ Blocul regulator de temperatură are o structură originală, propusă de autor și denumită “quasi-PI” (diferită de regulatoarele “fuzzy-PI” convenționale). Adoptarea acestei structuri permite simplificarea acordării, folosind experiența dobândită la proiectarea regulatoarelor clasice, de tip PI.

- ⇒ Datorită funcțiilor de transfer neliniare ale blocurilor reglatoare fuzzy și datorită mărimilor de intrare suplimentare ale acestora, structura "quasi-PI" permite obținerea unor performanțe superioare reglării clasice, în condițiile unei acordări corecte.
- ⇒ Concepția corectă a regulatorului "quasi-PI" se face după același principiu ca și în cazul reglatoarelor PI clasice: se optimizează întâi componenta "quasi-P", după care se adaugă, cu ponderea necesară, componenta "quasi-I".
- ⇒ Compensarea mărimilor perturbatoare externe și a parametrilor variabili care influențează comportarea regulatorului (temperatura exterioară și debitul de aer) se realizează în același mod ca și la reglatoarele clasice.
- ⇒ Corecțiile fiziologice ale temperaturii interioare în funcție de temperatura exterioară și iluminarea solară, destinate creșterii gradului de confort, trebuie specificate pe baza experienței proiectantului. În acest condiții, implementarea corecțiilor cu ajutorul unor blocuri de inferență bazate pe logica fuzzy permite specificarea directă a regulilor de corecție, prin intermediul regulilor de inferență. Se exploatează astfel capacitatea sistemelor fuzzy de a capta experiența proiectantului sub forma unor reguli lingvistice.
- ⇒ La comanda turbinei de aer se implementează, în același mod, trei corecții, în funcție de temperatura aerului suflat, viteza de deplasare și iluminarea solară.
- ⇒ Prin utilizarea unor "module" de inferență fuzzy identice, atât pentru reglare, cât și pentru corecții, se obține o simplificare importantă a implementării.

7. Testarea prin simulare a regulatorului fuzzy pentru sistemele de climatizare auto

Regulatorul fuzzy descris în capitolul anterior a fost testat prin simulare. În continuare este prezentată abordarea folosită de autor pentru simulare, împreună cu unele dintre rezultatele obținute.

7.1. Alegerea mediului de simulare

Mediul de simulare utilizat pentru aplicația avută în vedere trebuie să permită atât modelarea procesului reglat (comportarea termică a interiorului cabinei), cât și a regulatorului.

Modelul procesul reglat, prezentat pe larg în Capitolul 3, conține atât blocuri liniare, descrise prin funcții de transfer în operațional, cât și blocuri neliniare, descrise prin funcții matematice (produs, putere, etc.). Regulatorul de temperatură fuzzy, introdus în capitolul anterior, conține, în plus, blocurile reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy. Modelarea acestora se poate realiza, cel mai simplu, prin intermediul unei secvențe de program care reproduce funcționarea programului folosit la implementare.

În concluzie, mediul de simulare trebuie să îndeplinească următoarele cerințe:

- să permită modelarea blocurilor liniare, prin intermediul funcțiilor de transfer
- să permită modelarea blocurilor neliniare, prin intermediul expresiilor matematice
- să permită modelarea unor blocuri prin intermediul secvențelor de program
- să ofere algoritmi de simulare performanți pentru regimul tranzitoriu

Sistemul SIMULINK din mediul de simulare MATLAB îndeplinește toate condițiile de mai sus, oferind și o interfață grafică pentru descrierea modelelor. Sistemul permite modelarea blocurilor prin intermediul unor secvențe de program în limbajul MATLAB. Mecanismul de simulare se bazează pe metodele numerice din mediul MATLAB, oferind precizie și eficiență. Aceste argumente au determinat alegerea sistemului SIMULINK, ca variantă optimă pentru simulare.

7.2. Modelarea blocurilor reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy

Elaborarea unui model al sistemului de reglare introdus în capitolul anterior presupune, în primul rând, modelarea blocurilor reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy (așa cum s-a arătat, aceste blocuri au o funcționalitate identică).

În acest scop, a fost dezvoltat un program în limbajul MATLAB, care implementează formulele corespunzătoare etapelor mecanismului de inferență fuzzy. Aceste formule, împreună cu parametrii caracteristici, sunt prezentate pe larg în Capitolul 8, unde se descrie implementarea propriu-zisă. Secvența de program în MATLAB, corespunzătoare blocului regulator fuzzy FZ-RP din cadrul regulatorului de temperatură introdus în capitolul anterior, este prezentată în Anexa 2.

7.3. Simularea regulatorului de temperatură

7.3.1. Schema bloc a modelului

Pe baza modelelor blocurilor reglatoare bazate pe logica fuzzy, s-a modelat parțial sistemul de reglare a temperaturii prezentat în capitolul anterior. Schema bloc a modelului, implementat în SIMULINK, este dată în Fig. 7.1.

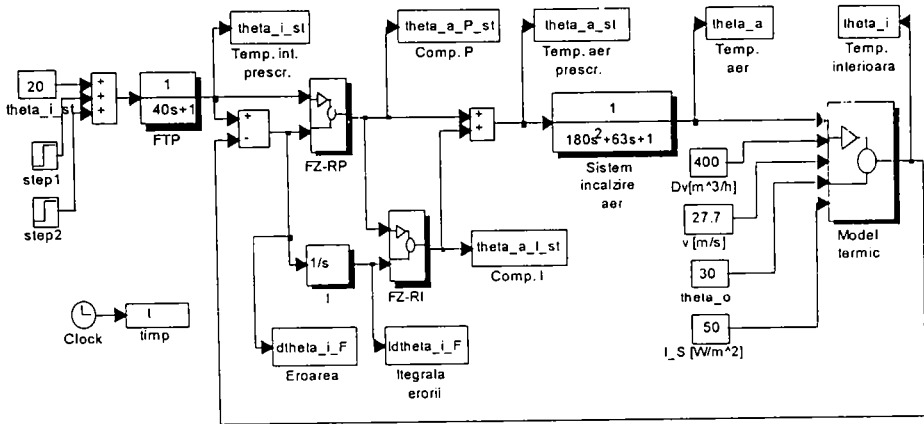


Fig. 7.1 Modelul parțial al regulatorului de temperatură

Se folosesc următoarele notații:

FTP - filtru pentru temperatura interioară prescrisă

FZ-RP - regulator fuzzy "quasi-P"

FZ-RI - regulator fuzzy "quasi-I"

Celelalte notații, împreună cu simbolurile corespunzătoare introduse în capitolul precedent, sunt date în tabelul următor.

schema bloc	simbol	semnificație
θ_{i_st}	θ^*	prescrierea pentru temperatura interioară [°C]
$d\theta_{i_F}$	$d\theta_F$	eroarea buclei de reglare a temperaturii [°C]
$Id\theta_{i_F}$	$Id\theta_F$	integrala erorii buclei de reglare a temperaturii [°C·s]
θ_{a_st}	θ_a^*	prescrierea pentru temperatura aerului suflat [°C]
$\theta_{a_P_st}$	θ_{aP}^*	comp. "quasi-P" a prescrierii pentru temp. aerului suflat [°C]
$\theta_{a_I_st}$	θ_{aI}^*	comp. "quasi-I" a prescrierii pentru temp. aerului suflat [°C]
θ_a	θ_a	temperatura aerului suflat [°C]
θ_i	θ_i	temperatura interioară [°C]
θ_o	θ_o	temperatura exterioră [°C]
Dv	D_v	debitul volumic al fluxului de aer [m ³ /h]
v	v	viteza de deplasare a automobilului [m/s]
I_S	I_S	intensitatea radiației solare [W/m ²]

Modelul termic al interiorului cabinei este cel introdus în Capitolul 4. Conform considerațiilor din Capitolul 3, subsistemul de încălzire a aerului este modelat printr-un element PT2, cu constantele de timp de 3 s și 60 s. Filtrul pentru temperatura prescrisă este un element PT1 cu constanta de timp de 40 s.

Utilizând modelul descris, au fost realizate mai multe simulări, în scopul punerii la punct a blocurilor reglatoare. S-a urmărit răspunsul tranzitoriu al buclei de reglare, atât la modificarea prescrierii, cât și la modificarea mărimilor perturbatoare externe. S-a avut în vedere, de asemenea, degradarea performanțelor reglării la modificarea parametrilor procesului. Din setul de simulări au fost selectate, în această prezentare, câteva exemple semnificative.

Conform metodei acordare prezentate în capitolul anterior, a fost introdus întâi doar regulatorul "quasi-P", urmărindu-se obținerea unei comportări cât mai bune, blocul regulator "quasi-I" fiind adăugat ulterior.

7.3.2. Simularea regulatorului "quasi-P"

Această situație se modelează prin deconectarea ieșirii blocului FZ-RI de la sumator. Pentru temperatura interioară prescrisă (aplicată la intrarea FTP) s-a considerat o variație treaptă, între $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ și $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperatura exterioară este $\theta_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, iar celelalte mărimi perturbatoare au valorile: $D_i = 400\text{ m}^3/\text{s}$; $I_s = 50\text{ W/m}^2$; $v = 22,7\text{ m/s}$. În Fig. 7.2 este prezentată evoluția în timp a mărimii de prescriere, θ_i^* , (după FTP) și a temperaturii interioare, θ_i . Simularea propriu-zisă s-a realizat pentru un interval mai lung de timp, astfel încât variația prescrierii să intervină după atingerea unei stări staționare; graficele prezintă doar porțiunea de interes.

Deși răspunsul sistemului de reglare este relativ rapid, el este caracterizat prin statism, la temperatura prescrisă de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (regulatorul nu reușește menținerea egalității între mărimea de ieșire și prescriere). Pentru eliminarea acestei probleme se impune adăugarea componentei integratoare.

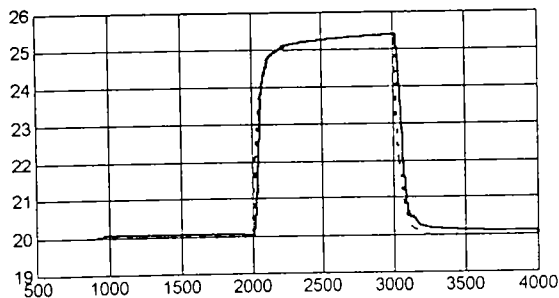


Fig. 7.2 Simularea regulatorului "quasi-P": (- - -) $\theta_i^*[\text{ }^{\circ}\text{C}] = f(t[\text{s}])$, (—) $\theta_i[\text{ }^{\circ}\text{C}] = f(t[\text{s}])$

7.3.3 Simularea regulatorului "quasi-PI"

Pentru a simula această situație se reconectează ieșirea blocului FZ-RI la sumator. Temperatura interioară are aceeași formă de variație, iar celelalte mărimi perturbatoare au aceleași valori ca și în cazul anterior. În Fig. 7.3 este prezentată evoluția în timp a mării de prescriere, θ_i^* , (după FTP) și a temperaturii interioare, θ_i . Se observă eliminarea problemei statismului. Răspunsul este foarte rapid, prezentând chiar o supracreștere, cu amplitudine acceptabilă.

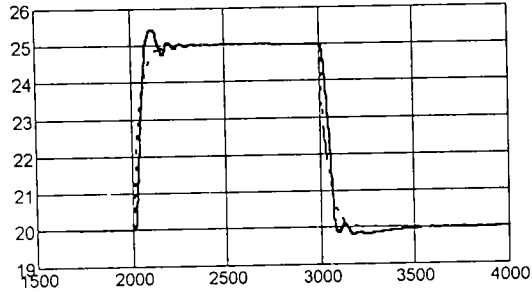


Fig. 7.3 Simularea regulatorului "quasi-PI": (- - -) $\theta_i^*[\text{°C}] = f(t[s])$, (- · - ·) $\theta_i [\text{°C}] = f(t[s])$;
 $\theta_o = 0 \text{ °C}$

Pentru a studia influența condițiilor externe, s-a repetat simularea anterioară pentru o temperatură exterioară diferită: $\theta_o = 30 \text{ °C}$. Formele de undă corespunzătoare sunt prezentate în Fig. 7.4. Se observă comportarea asemănătoare a regulatorului, cu o oarecare reducere a duratei oscilațiilor.

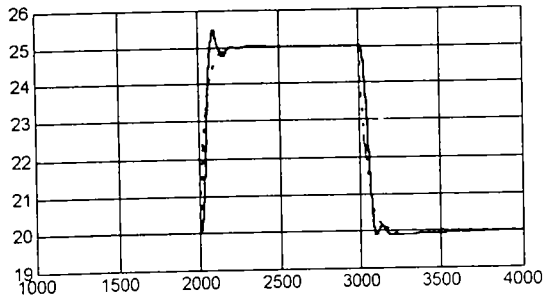


Fig. 7.4 Simularea regulatorului "quasi-PI": (- - -) $\theta_i^*[\text{°C}] = f(t[s])$, (- · - ·) $\theta_i [\text{°C}] = f(t[s])$;
 $\theta_o = 30 \text{ °C}$

Calitatea reglării este caracterizată, pe lângă temperatura interioară, și de temperatura aerului suflat, θ_o . Asigurarea unui grad corespunzător de confort impune ca această temperatură să nu aibă valori prea ridicate, nici prea coborâte. În Fig. 7.5 s-a reprezentat forma de variația a temperaturii interioare în cadrul ultimei simulări (regulator "quasi-PI", $\theta_o = 30 \text{ °C}$). Se constată îndeplinirea condiției enunțate anterior.

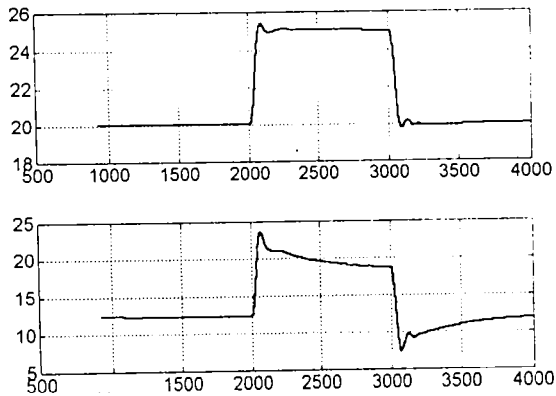


Fig. 7.5 Simularea regulatorului "quasi-PI"; sus: θ_c [°C] = $f(t[s])$, Jos: θ_a [°C] = $f(t[s])$

La acordarea regulatorului este utilă cunoașterea formelor de variație pentru componentele "quasi-P" și "quasi-I" ale comenzii. Pentru ultima simulare, mărimea de comandă θ_c^* și componentele acesteia (θ_{cP}^* , θ_{cI}^*) sunt prezentate în Fig. 7.6. Se observă prezența unei componente "quasi-I" nenule, care contribuie la eliminarea statismului. Pe de altă parte, amplitudinea componentei "quasi-I" este semnificativ mai mică decât cea a componentei "quasi-P", indicând o proiectare corectă a regulatorului.

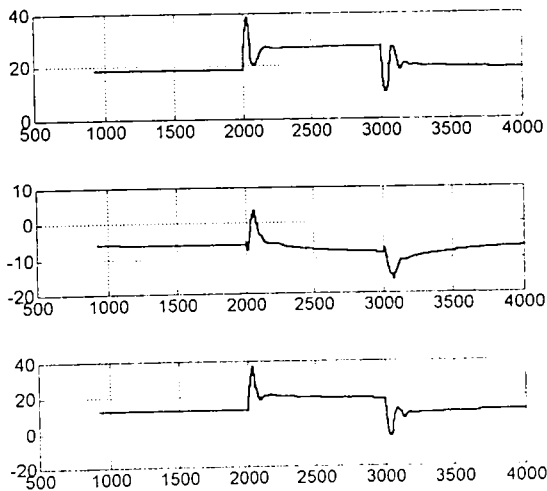


Fig. 7.6 Simularea regulatorului "quasi-PI"; sus: θ_{cP}^* [°C] = $f(t[s])$,
 mijloc: θ_{cI}^* [°C] = $f(t[s])$, Jos: θ_c^* [°C] = $f(t[s])$

Utilizarea modelului termic detaliat al cabinei, introdus în Capitolul 4, permite și simularea efectului perturbațiilor externe. Spre exemplificare, în Fig. 7.7 se prezintă temperatura interioară și temperatura

aerului suflat, pentru o variația treaptă a iluminării solare I_s . Temperatura interioară prescrisă este $\theta_i^* = 20^\circ\text{C}$, ceilalți parametri având valorile din ultima simulare. Se observă compensarea foarte bună a perturbației, variația temperaturii interioare fiind neglijabilă. Datorită efectului de încălzire relativ lent al radiației solare, temperatura aerului suflat nu înregistrează variații bruște ca urmare a perturbației.

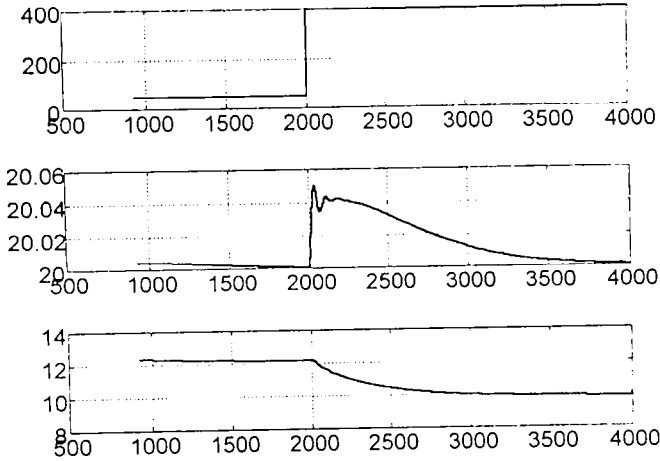


Fig. 7.7 Simularea regulatorului "quasi-PI"; sus: $I_s [\text{W}/\text{m}^2] = f(t[\text{s}])$, mijloc: $\theta_i [^\circ\text{C}] = f(t[\text{s}])$, jos: $\theta_a [^\circ\text{C}] = f(t[\text{s}])$

O altă aplicație foarte utilă a simulării este studierea influenței debitului de aer asupra calității reglării. În Fig. 7.8 se prezintă aceleași forme de undă ca și în Fig. 7.4, obținute însă pentru o valoare mai mică a debitului de aer: $D_v = 100 \text{ m}^3/\text{h}$. Se observă deteriorarea semnificativă a performanțelor reglării, prin apariția statismului. În acest mod, prin încercări succesive, se poate determina valoarea minimă a debitului de aer care asigură o reglare corespunzătoare, pentru diverse valori ale prescrierii și ale mărimilor perturbatoare.

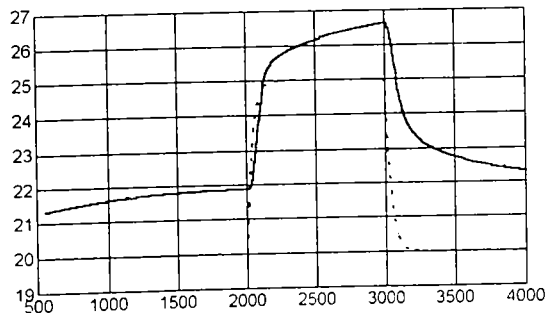


Fig. 7.8 Simularea regulatorului "quasi-PI": (- - -) $\theta_i^* [^\circ\text{C}] = f(t[\text{s}])$, (---) $\theta_i [^\circ\text{C}] = f(t[\text{s}])$; $D_v = 100 \text{ m}^3/\text{h}$

7.4 Simularea corecțiilor fiziologice din regulatorul de temperatură

Blocurile de corecție fiziologică FZ-CIS și FZ-CTE din componența regulatorului de temperatură au rolul de a modifica prescrierea buclei de reglare, pentru a asigura un grad sporit de confort, la schimbarea temperaturii exterioare și a iluminării solare. În consecință, proiectarea acestor blocuri se bazează pe experiența existentă, iar acordarea fină se realizează în automobilul real, în funcție de senzațiile fiziologice înregistrate de mai multe persoane. Simularea regimului tranzitoriu al buclei de reglare, așa cum a fost introdusă anterior, nu este utilizabilă. În schimb, simularea caracteristicii de transfer ("suprafeței de reglare") a blocurilor poate oferi informații utile privind comportarea acestora.

Astfel, dacă în cadrul procesului iterativ de acordare se dorește schimbarea valorii unei corecții, pentru anumite condiții, se modifică baza de reguli și/sau funcțiile de apartenență ale blocului de corecție, pe baza experienței proiectantului. Înainte de testarea pe automobilul real, comportarea blocului de corecție poate fi verificată și eventual ajustată suplimentar prin vizualizarea funcției de transfer, realizându-se astfel reducerea timpului și efortului necesar la acordare.

7.4.1 Schema bloc a sistemului de test

Schema bloc a sistemului de test, implementat în SIMULINK, este dată în Fig. 7.9.

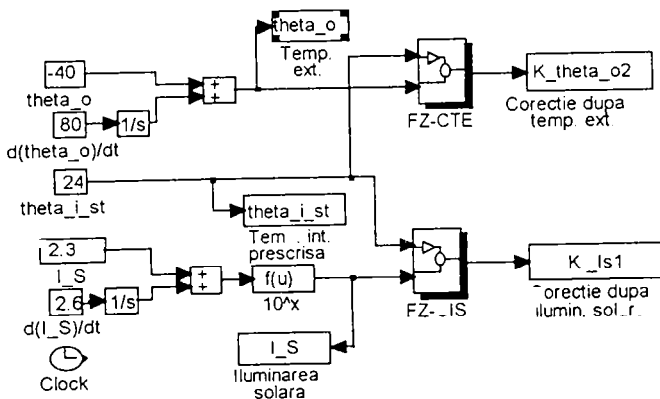


Fig. 7.9 Sistemul de test pentru simularea corecțiilor fiziologice din regulatorul de temperatură

Se folosesc următoarele notații:

FZ-CTE - bloc de corecție fiziologică fuzzy în funcție de temperatura exterioară

FZ-CIS - bloc de corecție fiziologică fuzzy în funcție de iluminarea solară

Celelalte notații, împreună cu simbolurile corespunzătoare introduse în capitolul precedent, sunt date în tabelul următor.

schema bloc	simbol	semnificație
theta_i_st	θ_i^*	prescrierea pentru temperatura interioară [°C]
theta_o	θ_o	temperatura exterioară [°C]
I_S	I_s	intensitatea radiației solare [W/m ²]
K_theta_o2	K_{θ_o2}	corecție fiziologică în funcție de temperatura exterioară
K_Is1	K_{I_s1}	corecție fiziologică în funcție de iluminarea solară

Pentru temperatura exterioară și iluminarea solară se aplică variații liniare (ultima, pe o scară logaritmică). Simularea, utilizând un pas constant, se rulează repetat, pentru diferite valori ale temperaturii interioare prescrise. Astfel, este posibilă reprezentarea grafică a funcțiilor de transfer pentru cele două blocuri.

7.4.2 Funcția de transfer a blocului de corecție fiziologică în funcție de temperatura exterioară

Funcția de transfer a blocului de corecție fiziologică în funcție de temperatura exterioară este prezentată în Fig. 7.10. În acest grafic și în următoarele, intensitatea nuanțelor de gri ale suprafețelor este dependentă de valoarea corespunzătoare pe axa verticală.

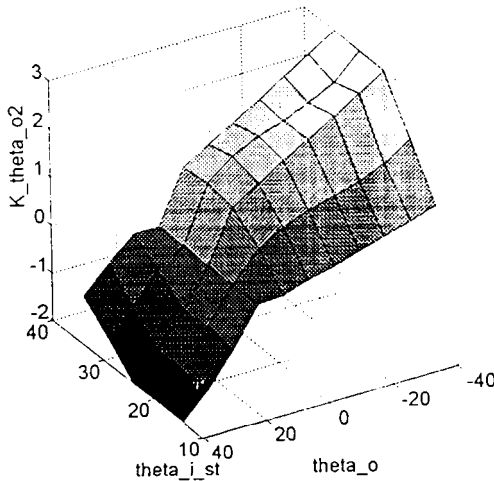


Fig. 7.10 Funcția de transfer a blocului de corecție fiziologică în funcție de temperatura exterioară: $K_{\theta_o2} [^{\circ}\text{C}] = f(\theta_o [^{\circ}\text{C}], \theta_{i_st} [^{\circ}\text{C}])$

Se observă generarea unei corecții pozitive (creșterea temperaturii interioare prescrise) la temperaturi exterioare mici, respectiv generarea unei corecții negative la temperaturi exterioare ridicate, creând o senzație sporită de confort. Pentru a obține o senzație fiziologică semnificativă, corecția este mai pronunțată atunci când temperatura prescrisă de pasager se apropie de valorile extreme.

7.4.3 Funcția de transfer a blocului de corecție fiziologică în funcție de iluminarea solară

Funcția de transfer a blocului de corecție fiziologică în funcție de iluminarea solară este prezentată în Fig. 7.11.

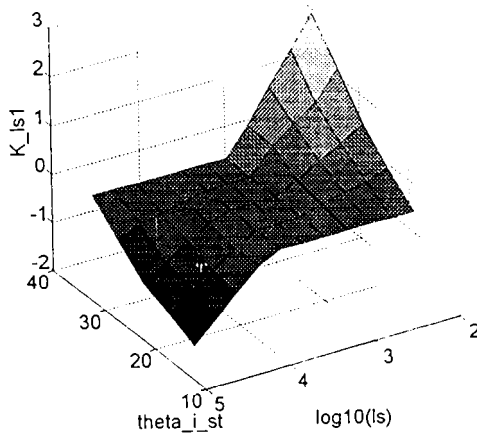


Fig. 7.11 Funcția de transfer a blocului de corecție fiziologică în funcție de iluminarea solară: K_s [°C] = $f(\log_{10}(I_s$ [W/m²]), θ_i^* [°C])

Se observă generarea unei corecții negative la intensități mari ale radiației solare, când temperatura interioară prescrisă este mică (răcire, în soare puternic), precum și generarea unei corecții pozitive la intensități mici ale radiației solare, când temperatura interioară prescrisă este mare (încălzire, noaptea). Aceste corecții oferă o senzație sporită de confort, prin accentuarea acțiunii așteptate de pasageri de la sistemul de climatizare.

7.5 Simularea corecțiilor din blocul de comandă a turbinei de aer

Corecțiile din blocul de comandă a turbinei de aer țin cont, în mare măsură, tot de senzațiile fiziologice ale pasagerilor. În consecință, acordarea finală a blocurilor de corecție fuzzy trebuie realizată, de asemenea, pe automobilul real, simularea putând furniza doar reprezentări ale funcțiilor de transfer.

7.5.1 Schema bloc a sistemului de test

Schema bloc a sistemului de test, implementat în SIMULINK, este dată în Fig. 7.12.

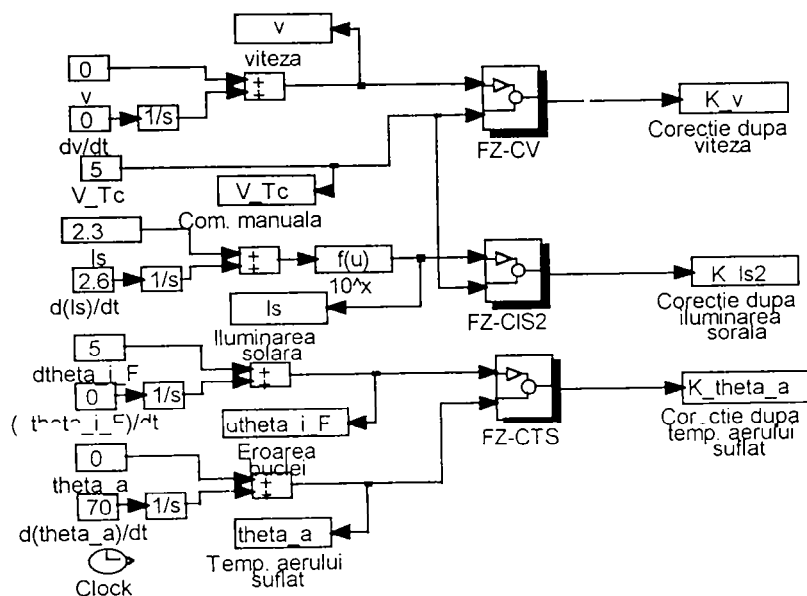


Fig. 7.12 Sistemul de test pentru simularea comenzii turbinei de aer

Se folosesc următoarele notații:

FZ-CV - bloc de corecție fuzzy în funcție de viteza automobilului

FZ-CIS2 - bloc de corecție fuzzy în funcție de iluminarea solară

FZ-CTS - bloc de corecție fuzzy în funcție de temperatura aerului suflat

Celelalte notații, împreună cu simbolurile corespunzătoare introduse în capitolul precedent, sunt date în tabelul următor.

schema bloc	simbol	semnificație
v	v	viteza automobilului [m/s]
V_Tc	V_{Tc}	comanda manuală a turbinei de aer
I_S	I_s	intensitatea radiației solare [W/m^2]
dtheta_i_F	$d\theta_{iF}$	eroarea buclei de reglare a temperaturii interioare [$^{\circ}C$]
theta_a	θ_a	temperatura aerului suflat [$^{\circ}C$]
K_v	K_v	corecție în funcție de viteza automobilului [%]
K_theta_a	K_{θ_a}	corecție în funcție de temperatura aerului suflat [%]
K_I_s2	K_{I_s2}	corecție în funcție de iluminarea solară [%]

Pentru viteza automobilului, temperatura aerului suflat și iluminarea solară se aplică variații liniare. Simularea, utilizând un pas constant, se rulează repetat, pentru diferite valori ale comenzii manuale a turbinei de aer. Astfel, este posibilă reprezentarea grafică a funcțiilor de transfer pentru cele trei blocuri.

7.5.2 Funcția de transfer a blocului de corecție în funcție de temperatura aerului suflat

Funcția de transfer a blocului de corecție în funcție de temperatura aerului suflat este prezentată în Fig. 7.13.

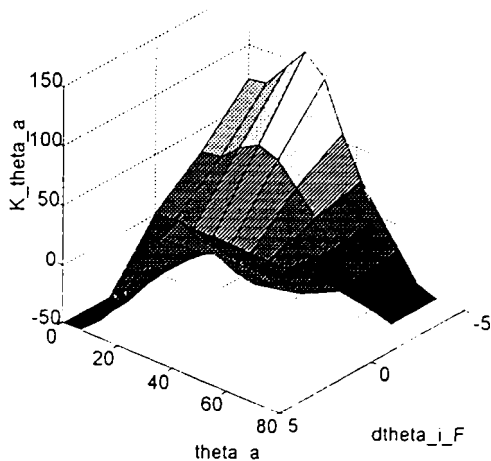


Fig. 7.13 Funcția de transfer a blocului de corecție a comenzii turbinei în funcție de temperatura aerului suflat: $K_{\theta_a} [\%] = f(\theta_a, [^{\circ}\text{C}], d\theta_{i_F} [^{\circ}\text{C}])$

Se observă reducerea debitului de aer la valori foarte mici și foarte mari ale temperaturii aerului suflat, în scopul evitării senzației de disconfort care s-ar produce în aceste condiții. Deoarece valorile extreme deranjante ale temperaturii aerului suflat apar pe durata regimurilor tranzitorii, corecția este mai accentuată atunci când bucla de reglare este departe de echilibru. Corecția scade până la zero atunci când bucla de reglare se apropie de echilibru, deoarece se presupune că acesta este regimul de climatizare este dorit de pasageri.

7.5.3 Funcția de transfer a blocului de corecție în funcție de viteza automobilului

Funcția de transfer a blocului de corecție în funcție de viteza automobilului este prezentată în Fig. 7.14.

Se observă reducerea debitului de aer la valori mari ale vitezei automobilului, pentru a compensa creșterea naturală a debitului, datorată creșterii presiunii în prizele de aer. Corecția scade atunci când valoarea prescrisă a debitului se apropie de maxim, pentru a permite o ventilație eficientă.

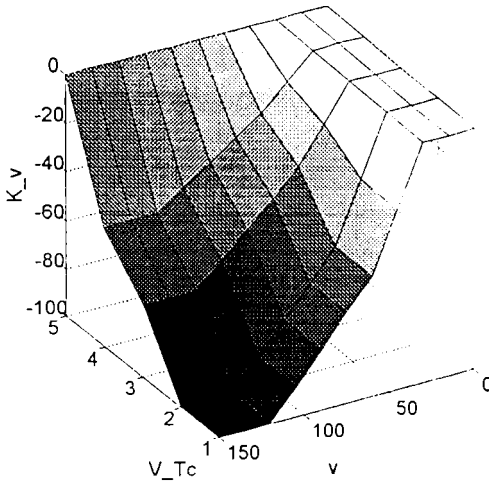


Fig. 7.14 Funcția de transfer a blocului de corecție a comenzii turbinei în funcție de viteza automobilului: $K_v [\%] = f(v \text{ [m/s]}, V_{Tc} \text{ [nivel]})$

7.5.4 Funcția de transfer a blocului de corecție în funcție de iluminarea solară

Funcția de transfer a blocului de corecție în funcție de iluminarea solară este prezentată în Fig. 7.15.

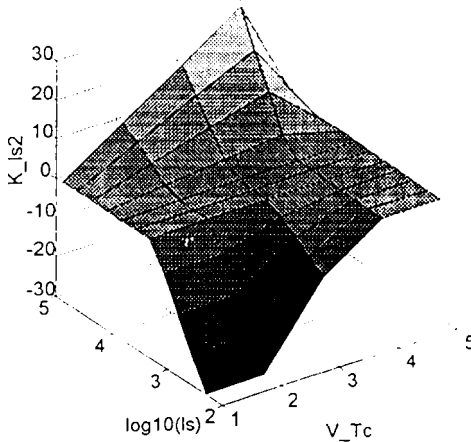


Fig. 7.15 Funcția de transfer a blocului de corecție a comenzii turbinei în funcție de iluminarea solară: $K_{Is} [\%] = f(I_s \text{ [W/m}^2\text{]}, V_{Tc} \text{ [nivel]})$

Se observă reducerea debitului de aer, la valori mici ale iluminării (noaptea) și creșterea acestuia în condiții de iluminare puternică. Corecție depinde și de valoarea prescrisă a debitului de aer, astfel încât să se obțină o senzație fiziologică semnificativă.

7.6 Concluzii

- ⇒ Datorită dificultății verificării stabilității și acordării reguletoarelor fuzzy prin metode analitice, se recurge la acordarea experimentală. În aceste condiții, utilizarea simulării pe calculator permite reducerea timpului necesar pentru punerea la punct.
- ⇒ Precizia simulării este condiționată de precizia modelului procesului. Reglarea fuzzy se utilizează în special pentru procese complexe, neliniare, a căror modelare este dificilă. În aceste cazuri, acordarea prin simulare oferă rezultate aproximative, impunându-se o acordare suplimentară, pe sistemul real.
- ⇒ Pe lângă acordarea reguletoarelor, simularea permite studiul influenței perturbațiilor externe și al parametrilor procesului asupra performanțelor reglării. În multe situații practice, acest studiu este dificil de realizat pe modelul experimental (de exemplu, realizarea unei variații treaptă a temperaturii exterioare ar necesita o instalație de climatizare de mari dimensiuni).
- ⇒ Sistemul SIMULINK din mediul de simulare MATLAB oferă facilitățile necesare pentru modelarea reguletoarelor fuzzy și a proceselor cu blocuri liniare și neliniare. Algoritmii de simulare a sistemelor dinamice oferă un grad ridicat de precizie și eficiență.
- ⇒ Elaborarea inițială a reguletoarelor fuzzy din sistemul de climatizare (prezentată în capitolul anterior), bazată pe experiența autorului, conduce la rezultate bune în cazul simulării, atunci când se folosește modelul termic detaliat al interiorului cabinei, introdus în Capitolul 4. Compensarea perturbațiilor externe este, de asemenea, corespunzătoare.
- ⇒ Simularea validează structura de regulator "quasi-PI", propusă de autor pentru reglarea temperaturii interioare. Se pune în evidență efectul favorabil al componentei "quasi-integratoare". Prin furnizarea celor două componente ale comenzii, simularea permite o acordare optimă, în care ponderea principală să aparțină componentei "quasi-proporționale".
- ⇒ Simularea permite studierea influenței debitului de aer asupra funcționării buclei de reglare a temperaturii interioare. Alegerea corectă a acestui parametru este deosebit de importantă, deoarece determină atât performanțele reglării, cât și gradul de confort. Aceste două obiective conduc, de multe ori, la cerințe contradictorii, fiind necesară găsirea unui compromis optim.

8. Implementarea regulatorului fuzzy pentru sistemele de climatizare auto

În acest capitol se va realiza, pentru început, prezentarea comparativă a posibilităților de implementare pentru regulatoarele fuzzy, precum și a procesului de dezvoltare pentru aplicațiile fuzzy. Pe baza concluziilor acestor analize, se va alege varianta optimă de implementare și dezvoltare pentru regulatorul fuzzy de temperatură proiectat în Capitolul 6.

În continuare, se va prezenta modul de implementare a acestui regulator, cu accent pe implementarea în limbaj de asamblare a blocurilor de reglare și corecție bazate pe logica fuzzy.

8.1 Posibilități de implementare a regulatoarelor fuzzy

8.1.1 Clasificarea variantelor de implementare

Datorită complexității operațiilor pe care le presupun, implementările practice ale regulatoarelor fuzzy sunt realizate digital. În cele ce urmează se vor trece în revistă diversele variante de implementare, conform următoarei clasificări [Meir93]:

- implementări software
 - implementări pe calculatoare tip PC
 - implementări pe microprocesoare sau microcontrolere standard
 - implementări cu procesoare fuzzy specializate
- implementări hardware
 - implementări bazate pe memorie
 - implementări cu circuite ASIC

8.1.2 Implementări software

Implementarea software a regulatoarelor presupune discretizarea mărimilor de intrare / ieșire și intermediare, atât în timp, cât și în amplitudine. Rezultă următoarele probleme specifice (comune atât regulatoarelor clasice, cât și regulatoarelor fuzzy):

a) Eșantionarea trebuie realizată cu o frecvență de câteva ori mai mare decât cea corespunzătoare constantelor de timp ale procesului și decât frecvențele maxime din spectrele semnalelor prelucrate. Perioada de eșantionare limitează superior durata calculului, impunând alegerea unui procesor suficient de rapid.

b) Cuantizarea poate conduce la următoarele probleme:

- zgomot de cuantizare
- limitarea unor mărimi intermediare
- instabilitate.

Evitarea acestor probleme impune următoarele măsuri:

- alegerea corectă a formatului de reprezentare pentru mărimile de intrare, intermediare și de ieșire
- aplicarea unor operații de scalare.

Optimizarea vitezei de execuție presupune însă evitarea scalărilor și folosirea, pe cât posibil, a lungimii de cuvânt specifice procesorului (pentru care există operații aritmetice implementate printr-o singură

instrucțiune). În consecință, alegerea corectă a procesorului utilizat prezintă o importanță deosebită. În continuare vor fi prezentate pe scurt principalele variante de implementare software.

8.1.2.1 Implementări pe calculatoare tip PC

Datorită vitezelor de calcul ridicate ale procesoarelor actuale, această alternativă permite programarea în limbaje de nivel înalt. Cel mai frecvent se utilizează limbajul C, datorită portabilității și eficienței codului generat. Unele implementări folosesc facilitățile de programare orientată pe obiecte ale limbajului C++ [Cox94].

Există două metode de abordare pentru descrierea regulatorului:

- scrierea codului direct în C, utilizând, eventual, biblioteci dedicate [Altr93]
- folosirea unui limbaj specializat pentru descrierea regulatorului, urmat de conversia în C, cu ajutorul unui procesor.

Pentru ilustrarea limbajelor specializate, se vor prezenta caracteristicile limbajului FPL ("Fuzzy Programming Language"), introdus de Togai InfraLogic [Toga90]. Acesta este un limbaj bazat pe obiecte, destinat specificării sistemelor expert fuzzy (clasă care include și regulatoarele fuzzy). Descrierea este independentă de metodele de inferență și defuzzificare avute în vedere. Descrierile realizate în FPL pot fi compilate, generând programe în limbaj C sau limbaj de asamblare, pentru diverse tipuri de procesoare. Se remarcă faptul că FPL este un limbaj descriptiv (realizează o descriere a sistemului expert), în timp ce programele generate prin compilare sunt procedurale (precizează acțiunile necesare pentru implementarea sistemelor expert).

În concluzie, deși implementarea pe calculatoare tip PC se caracterizează prin flexibilitate și costuri de dezvoltare relativ mici, viteza de execuție este în general redusă. În plus, calculatoarele tip PC sunt mai scumpe, în comparație cu sistemele de comandă cu microcontrolere. În concluzie, varianta prezentată este avantajoasă în aplicațiile complexe și pentru procese relativ lente.

8.1.2.2 Implementări pe microprocesoare sau microcontrolere standard

Se utilizează, de cele mai multe ori, sisteme cu microcontrolere din familiile standard (8051, 8096, 68HC05, 68HC11). Există două posibilități de abordare:

- programarea în limbaj de asamblare - permite optimizarea vitezei de execuție și a spațiului de memorie ocupat, dar efortul de dezvoltare este important
- programarea în C - codul are o eficiență mai redusă și ocupă un spațiu mai mare de memorie.

În [Altr93] se sugerează câteva posibilități de optimizare pentru implementarea software, în limbaj de asamblare, a regulatoarelor fuzzy:

- Utilizarea unor funcții de apartenență cu forme particulare (preferabil trapezoidale) permite reprezentarea acestora prin parametri, deci economisirea memoriei necesare (comparativ cu stocarea eșantioanelor unor funcții de formă arbitrară).
- Reprezentarea prin parametri conduce, în plus, la implementarea eficientă a operatorilor (prin câteva formule de calcul, aplicate parametrilor funcțiilor de apartenență, evitându-se prelucrarea eșantion cu eșantion).
- Optimizarea reprezentării funcțiilor trapezoidale prin intermediul a 4 parametri - abscisele extremităților laturii mari și înclinările laturilor neparalele - permite calcularea mai rapidă a gradelor de apartenență, la fuzificarea.
- Selecția operatorului de defuzzificare trebuie realizată în funcție de posibilitatea procesorului de a executa instrucțiuni de împărțire.

Prin aplicarea acestor optimizări, s-au obținut următoarele performanțe, referitoare la timpii de calcul și la memoria necesară (timpii corespund cazurilor cele mai defavorabile, valorile tipice fiind cu aproximativ 35% mai mici):

1. microcontroler Intel 80C196KD (16 biți), frecvența de tact 20MHz, ROM intern
 - regulator fuzzy cu 2 intrări, 1 ieșire, 20 reguli: 0,34ms, 0,43K
 - regulator fuzzy cu 4 intrări, 1 ieșire, 100 reguli: 1,2ms, 1,0K
2. microcontroler Intel 80C51 (8 biți), frecvența de tact 12MHz, ROM intern
 - regulator fuzzy cu 2 intrări, 1 ieșire, 20 reguli: 1,7ms, 0,52K
 - regulator fuzzy cu 4 intrări, 1 ieșire, 100 reguli: 2,7ms, 1,2K

În [CCGT92] este descrisă o altă implementare software a unui regulator fuzzy, în limbaj de asamblare, folosind procesorul de semnal Motorola DSP56001 (virgulă fixă 24 biți, tact de 27 MHz). În funcție de operatorii de inferență utilizați, se evaluează între 62.000 și 85.000 reguli / sec.

În [Burg94] este descris modul de implementare a unui regulator fuzzy de temperatură, cu ajutorul unui microcontroler de cost redus, de tip PIC16C71. Acesta conține un convertor analog / digital pe 8 biți cu 4 canale, 1Kx14bit memorie de program și 36 byte memorie de date. Sunt descrise două variante de regulatoare:

- un regulator "minimal", cu o singură variabilă de intrare (eroarea de temperatură), o variabilă de ieșire (factorul de umplere al comenzii PWM pentru sistemul de încălzire) și 4 reguli
- un regulator "standard", de tip Mamdani, cu două intrări (eroarea de temperatură și viteza de variație a temperaturii), o ieșire (factorul de umplere) și 9 reguli.

În ultima variantă, programul în limbaj de asamblare are 365 de instrucțiuni, ocupând cam o treime din memoria de program a microcontrolerului.

În concluzie, implementarea pe microprocesoare sau microcontrolere standard oferă o mare flexibilitate, la un preț mic al sistemului hardware. Viteza este însă relativ scăzută (în situația utilizării unor procesoare ieftine), iar dezvoltarea este costisitoare, fie din punct de vedere al efortului necesar (la programarea în limbaj de asamblare), fie din cel al programelor utilizate (în cazul mediilor de dezvoltare specializate). În consecință, varianta este avantajoasă pentru producția de serie mare și pentru procese relativ lente.

8.1.2.3 Implementări cu procesoare fuzzy specializate

Primul procesor specializat pentru aplicații fuzzy a fost Omron FZ-1000, apărut în 1987, iar primul procesor fuzzy digital, FC110, produs de Togai InfraLogic, a fost lansat în 1989. La ora actuală există mai multe tipuri de procesoare sau coprocesoare fuzzy, cu diverse arhitecturi și caracteristici. Se implementează concepte hardware moderne, cum ar fi prelucrarea paralelă și "pipeline", cu arhitecturi de tip RISC, integrarea tabelor de căutare, codificarea în memorie a setului de reguli, etc. [Meir93]. Structura tipică a unui procesor fuzzy este descrisă în [WSDY92].

Principalele procesoare fuzzy disponibile la ora actuală sunt:

- FC110 (Togai InfraLogic) [Toga92]
- FP-3000 (Omron) [Omro91]
- FP-5000 (Omron) [SO192]
- NLX230 (American NeuraLogix) [Base93] [Base93a]
- SAE 80C99, Siemens [Siem94]
- W.A.R.P. 1.0, SGS-Thomson [SGST94] [PPR92]
- Fuzzy 166, Inform GmbH [Moos92].

Sunt disponibile și module pentru diverse magistrale standard, incluzând aceste procesoare fuzzy [Toga92a] [Omro91a] [SGST94].

Procesoarele fuzzy specializate oferă o viteză de execuție mult mai mare decât implementările "exclusiv software", dar au un preț considerabil. Flexibilitatea rămâne ridicată, deoarece regulatorul este implementat prin program. Pentru majoritatea procesoarelor fuzzy sunt disponibile medii de dezvoltare, care oferă o interfață grafică pentru descrierea regulatorului, generarea automată a codului, posibilități de simulare și, în unele cazuri, de acordare automată. Considerând atât viteza, cât și flexibilitatea, această variantă oferă performanțele optime. Costul ridicat al procesoarelor o recomandă însă numai pentru aplicațiile foarte performante, de serie mică.

8.1.3 Implementări hardware

8.1.3.1 Implementări cu circuite ASIC

Această variantă presupune includerea în circuitele integrate specifice pentru aplicații (ASIC) a unor structuri de procesoare fuzzy, disponibile sub formă sintetizată și utilizabile direct în programele CAD. Se obține o viteză foarte ridicată, specifică implementărilor hardware. Flexibilitatea este însă mică, deoarece structura regulatorului nu mai poate fi modificată după fabricație. Prețul acestor circuite este mare, în special la un volum mic de producție. Astfel de nuclee de procesoare fuzzy sunt oferite de Togai InfraLogic [Toga92b], SGS Thomson [PPR92] și Sican [Nage93].

În concluzie, implementarea cu circuite ASIC este avantajoasă pentru aplicațiile performante, de serie mare.

8.1.3.2 Implementări bazate pe memorie

În această variantă se memorează în circuite RAM sau EPROM eșantioane ale suprafeței de reglare, calculate "off-line". Mărimile de intrare, convertite analog-digital, servesc la calcularea adresei, iar datele preluate din memorie, convertite digital-analogic, reprezintă mărimile de ieșire a regulatorului. Capacitatea de memorie necesară depinde de rezoluția impusă pentru mărimile de intrare și ieșire.

În concluzie, implementarea bazată pe memorie oferă o viteză de execuție foarte mare, la un preț redus, dar este lipsită de flexibilitate.

8.1.4 Analiza comparativă a performanțelor

În continuare, se va realiza o evaluare sintetică a principalilor indicatori de performanță pentru variantele de implementare expuse anterior.

Astfel, flexibilitatea scade pentru implementările orientate predominant spre hardware, conform graficelor din Fig. 8.1:

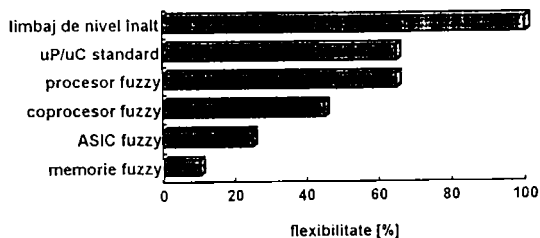


Fig. 8.1 Flexibilitatea diverselor variante de implementare

Pe de altă parte, Fig. 8.2 prezintă valori aproximative pentru prețul regulatorilor fuzzy, în variantele de implementare descrise anterior.

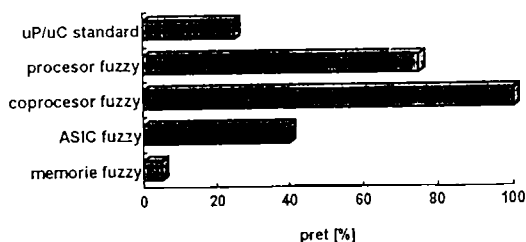


Fig. 8.2 Prețul diverselor variante de implementare

8.2 Dezvoltarea aplicațiilor fuzzy

În continuare se va prezenta pe scurt procesul de dezvoltare (punere la punct) a aplicațiilor fuzzy, în scopul alegerii modului de abordare optim, pentru aplicația avută în vedere.

8.2.1 Etapele dezvoltării unui regulator fuzzy

a) Proiectarea aplicației presupune următoarele operații:

- definirea funcțiilor de apartenență ale variabilelor lingvistice
- definirea bazei de reguli
- descrierea unor detalii specifice de implementare: operatorii de inferență și defuzzificare, formatul de reprezentare a variabilelor, etc.

b) Testarea cu ajutorul funcției de transfer reprezintă o etapă de verificare preliminară. Pentru regulatorile cu două intrări și o ieșire se afișează, în proiecție spațială, funcția de transfer (denumită și suprafață de reglare). Forma suprafeței poate fi modificată prin intermediul funcțiilor de apartenență și al bazei de reguli. Deoarece această formă este mai puțin semnificativă pentru comportarea regulatorului, sunt necesare etape suplimentare de acordare.

c) Testarea prin simulare este necesară înainte de implementarea regulatorului pe sistemul real. Acest tip de verificare presupune simularea unei bucle de reglare, incluzând regulatorul și modelul procesului. La intrările de prescriere se aplică stimuli programabili, cu diverse forme. Evoluțiile în timp ale mărimilor

semnificative ale regulatorului și procesului, obținute în urma simulării, sunt afișate grafic. Regulatorul se acordează, prin modificarea funcțiilor de apartenență și a bazei de reguli, până când răspunsul capătă forma dorită. Este important ca situațiile simulate să acopere cât mai complet regimurile de lucru ale sistemului real. Deoarece modelarea procesului introduce, inevitabil, aproximații, nici această etapă de verificare nu este suficientă.

d) Generarea codului apare ca o etapă intermediară, în cazul folosirii unui limbaj specializat pentru descrierea sistemului fuzzy.

e) Verificarea pe sistemul real se realizează prin implementarea efectivă a regulatorului, punerea acestuia în funcțiune, achiziția datelor în timpul funcționării și reprezentarea grafică a acestora. În această etapă se face acordarea finală a regulatorului, până când se obține răspunsul dorit.

8.2.2 Medii de dezvoltare pentru aplicații fuzzy

O opțiune importantă în dezvoltarea unei aplicații fuzzy se referă la folosirea (sau nu) a unui mediu de dezvoltare specializat. Acest aspect va fi analizat în cele ce urmează.

Una dintre principalele calități ale sistemelor de reglare fuzzy este posibilitatea de utilizare a cunoștințelor unor experți umani, cunoscători ai procesului reglat. Este dorit ca proiectarea regulatorilor fuzzy să se realizeze fără intervenția unor specialiști în inteligența artificială, reglarea automată, software, etc. Mediile de dezvoltare pentru aplicații fuzzy fac posibilă proiectarea, acordarea și utilizarea regulatorilor fuzzy de către persoane fără cunoștințe deosebite în domeniile de mai sus. Principalele facilități ale unui astfel de mediu sunt:

- descrierea grafică a funcțiilor de apartenență și asistarea proiectantului la formularea regulilor (prin intermediul unei interfețe grafice)
- memorarea descrierii regulatorului (de obicei, prin intermediul unui limbaj specializat)
- reprezentarea grafică a suprafețelor de reglare
- simularea regulatorului, cu vizualizarea formelor de undă ale mărimilor de interes și a gradelor de activare ale regulilor; de obicei, există posibilitatea de modelare a procesului condus, prin intermediul unui limbaj apropiat de C; mediile evaluate permit chiar reprezentarea grafică a procesului reglat
- generarea automată a codului, în C sau în limbajul de asamblare al unor microprocesoare, microcontrolere sau procesoare fuzzy specializate
- testarea regulatorului pe sistemul real: calculatorul pe care rulează mediul de dezvoltare este prevăzut cu un modul de interfață analogică, servind la generarea unor stimuli și la achiziția mărimilor de interes din proces; acestea sunt reprezentate grafic, ca și în cazul simulării; deși acest mod de testare este foarte util, facilitatea nu este deocamdată prezentă decât în mediile de dezvoltare cele mai evaluate.

La ora actuală există mai multe astfel de medii de dezvoltare, cu nivele diferite de complexitate, un sistem perfecționat fiind TILShell, oferit de Togai InfraLogic [Toga90a].

În absența unui mediu de dezvoltare, programul care implementează regulatorul fuzzy se scrie direct de către proiectant. Funcțiile de apartenență și baza de reguli se codează, de regulă, în structurile de date ale programului. Pentru calculele mecanismului de inferență se pot utiliza biblioteci de funcții dedicate, acolo unde acestea sunt disponibile. Simularea sistemului de reglare presupune fie folosirea unui mediu de simulare specializat, care să permită modelarea regulatorului și a procesului, fie elaborarea unui program de simulare special, de regulă într-un limbaj de nivel înalt. Testarea pe sistemul real impune (atunci când acesta este un sistem de comandă cu microprocesor sau microcontroler) adăugarea în programul de implementare a unor secvențe de cod speciale, care să transfere spre un calculator extern eșantioane ale

mărimilor de interes. Formele de undă corespunzătoare acestor eşantioane se vor reprezenta grafic cu ajutorul unui mediu de simulare sau al unui program specializat.

În consecință, utilizarea unui mediu de dezvoltare permite reducerea considerabilă : timpului necesar pentru punerea la punct a aplicațiilor fuzzy. Totuși, dezvoltarea este perfect posibilă (cu un efort mai mare) și în absența unui astfel de mediu. În final, decizia este dictată de specificul proiectului și, nu în ultimul rând, de costul ridicat al mediilor de dezvoltare performante.

8.3 Implementarea regulatorului fuzzy pentru climatizarea auto

8.3.1 Alegerea variantei de implementare și a metodei de dezvoltare

Aplicația avută în vedere, și anume comanda sistemelor de climatizare din autoturisme, are următoarele caracteristici:

- procese relativ lente, cu constante de timp de ordinul secundelor + minutilor
- producție de serie mare, care impune un cost cât mai redus al suportului hardware
- necesitatea unei bune flexibilități, pentru adaptare la diferite modele de automobile și pentru a permite optimizări ulterioare.

În consecință, varianta optimă de implementare presupune *utilizarea sistemelor cu microcontrolere și a programării în limbaj de asamblare.*

S-a preferat scrierea directă a codului, fără utilizarea un mediu de dezvoltare specializat, din următoarele considerente: eficiența maximă a codului generat; necesitatea integrării modulului regulator fuzzy într-un sistem de programe existent; costul ridicat al mediilor de dezvoltare. Deoarece utilizarea logicii fuzzy a condus la scurtarea semnificativă a timpului necesar pentru acordarea regulatorului, intervalul afectat implementării acestuia în limbaj de asamblare nu a prelungit semnificativ timpul total de proiectare.

Așa cum s-a arătat în Capitolul 7, pentru faza de testare prin simulare s-a optat pentru utilizarea mediului MATLAB/SIMULINK. Deoarece modelarea comportării termice a interiorului caroseriei presupune aproximări inevitabile, acordarea finală a fost realizată pe sistemul real. În acest scop, s-au inclus în programul de comandă rutine speciale pentru transmisia datelor la un calculator personal, conectat cu sistemul de comandă. Afișarea acestor date s-a realizat atât în MATLAB, cât și cu ajutorul unui program dedicat.

8.3.2 Programul de implementare a regulatorului fuzzy pentru climatizarea auto

8.3.2.1 Sistemul electronic de comandă a climatizării

Schema bloc a sistemului electronic de comandă este dată în Fig. 8.3.

Blocul de interfață pentru intrări analogice conține un multiplexor analogic, circuite de limitare și protecție, circuite de amplificare și filtrare.

Blocul intrărilor digitale include circuite de formare, limitare și protecție; calcularea turațiilor se face de către procesor, prin măsurarea frecvenței semnalelor digitale.

Blocul de interfață pentru ieșirile de mică putere conține, pentru majoritatea semnalelor, circuite "latch"; semnalul de comandă a turbinei de aer este filtrat, obținându-se o tensiune proporțională cu factorul de umplere (necesară în această formă pentru comanda circuitului de putere aferent turbinei); pentru semnalele de interfațare cu calculatorul extern este prevăzută o conversie de nivel TTL - Fig. 8.32.

Blocul ieșirilor de putere conține etaje de putere cu tranzistoare MOSFET și circuite de sesizare a scurtcircuitelor la ieșiri; în caz de scurtcircuit, se inhibă comanda și se transmite un semnal de avarie la procesor.

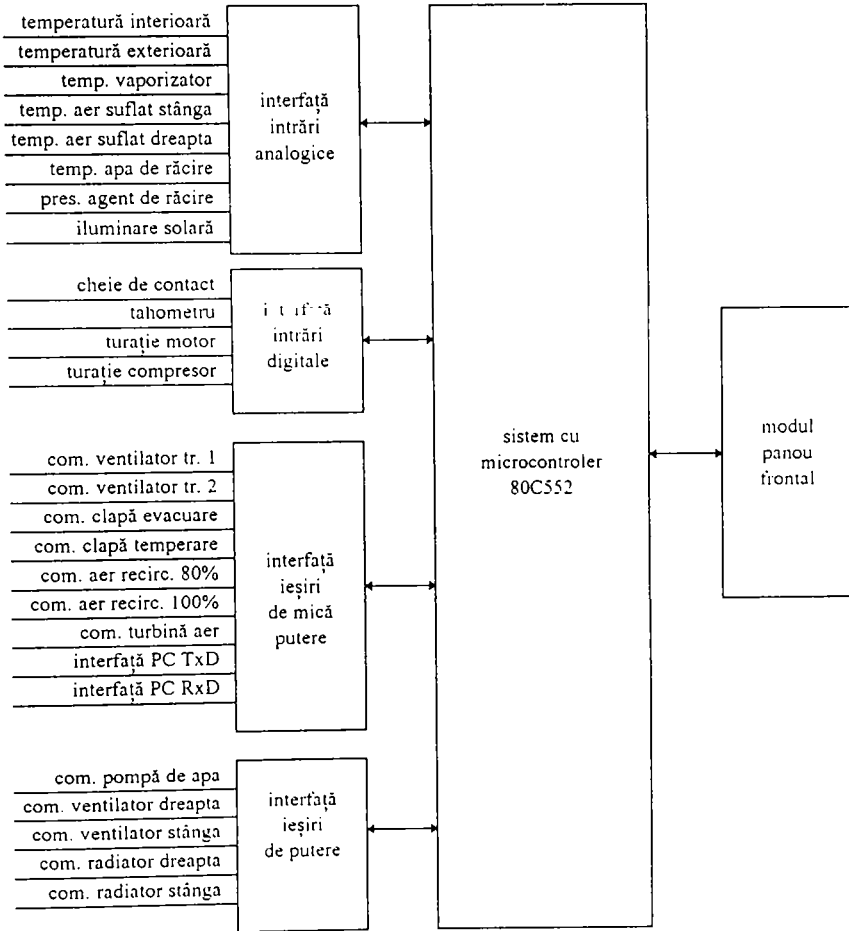


Fig. 8.3 Schema bloc a sistemului electronic de comandă

8.3.2.2 Structura programului de comandă a climatizării

Principalele module ale programului de comandă a climatizării, implementat pe sistemul descris anterior, îndeplinesc următoarele funcții:

- definiții
 - definirea constantelor
 - definirea variabilelor din memoria RAM
 - *definirea structurilor de date cu parametrii regulatorilor fuzzy*
- definirea structurilor de date cu tabelele de interpolare
- preluarea mărimilor de intrare
 - achiziția mărimilor de la convertoarele analog-numeric
 - citirea tastaturii
 - achiziția stării contactelor binare
 - măsurarea turației motorului
 - măsurarea vitezei mașinii
 - detectarea regimului de scurtcircuit la drivere
 - detectarea condițiilor de pornire, pe baza stării cheii de contact
 - detectarea aprinderii farurilor
- calcule
 - *implementarea regulatorului de temperatură fuzzy*
 - *implementarea corecțiilor fuzzy pentru comanda turbinei de aer*
 - *implementarea blocurilor de reglare și corecție bazate pe logica fuzzy*
 - implementarea elementelor de tip PT1
 - implementarea regimurilor speciale corespunzătoare comenzilor maxime de încălzire / răcire
 - bibliotecă de rutine aritmetice
 - rutine de interpolare
- comenzi
 - comanda ventilatoarelor radiatoarelor din sub-sistemul de încălzire
 - comanda turbinei de aer
 - comanda clapetelor de aer
 - comanda și supravegherea compresorului din sus-sistemul de răcire
 - comanda regimului de aer proaspăt / aer recirculat
 - comanda pompei suplimentare de apă din sistemul de răcire a motorului
 - comanda ventilatoarelor suplimentare pentru răcirea motorului
- diverse
 - generarea tactului și măsurarea timpului
 - interfațarea cu memoria EEPROM, care stochează tipul automobilului și condițiile inițiale ale climatizării
 - detectarea și memorarea erorilor de funcționare
 - transmisia datelor spre calculatorul personal conectat în exterior, în regimul de testare
 - afișarea mărimilor pe panoul de comandă

Aceste funcții sunt apelate succesiv, în cadrul unei bucle a programului principal. Bucla este parcursă cu o perioadă constantă, de 20 ms, timp este suficient pentru efectuarea tuturor calculelor algoritmului de comandă, incluzând regulatoarele și blocurile de corecție fuzzy.

Funcțiile scrise cu caractere normale se regăsesc și în cazul comenzii clasice (cu reglare PID) a sistemelor de climatizare. Funcțiile scrise cu caractere înclinate sunt specifice abordării bazate pe logica fuzzy, implementarea lor fiind prezentată în detaliu în cele ce urmează.

8.3.2.3 Implementarea regulatorului de temperatură fuzzy

Calculule corespunzătoare regulatorului de temperatură fuzzy sunt implementate, conform schemei bloc din Fig. 6.2, într-un modul de program scris în limbaj de asamblare. Aceste calcule pot fi sistematizate după cum urmează:

- scalarea și filtrarea temperaturii interioare prescrise, θ_i^*
- scalarea semnalului de la senzorul temperaturii exterioare, STE
- scalarea și filtrarea semnalului de la senzorul de iluminare solară, SIS+FIS
- apelarea rutinei corespunzătoare blocului regulator fuzzy "quasi-P", FZ-RP
- apelarea rutinei corespunzătoare blocului regulator fuzzy "quasi-I", FZ-RI
- implementarea regulatorului temperaturii aerului suflat, RTS, de tip P
- implementarea blocului de corecție în funcție de temperatura exterioară, CTE, prin interpolare într-un tabel predefinit
- implementarea blocului de corecție în funcție de debitul de aer, CDA, prin intermediul unei formule de interpolare liniară
- apelarea rutinei corespunzătoare blocului de corecție fiziologică fuzzy în funcție de iluminarea solară, FZ-CIS1
- apelarea rutinei corespunzătoare blocului de corecție fiziologică fuzzy în funcție de temperatura exterioară, FZ-CTE
- implementarea blocului de integrare a erorii buclei de reglare, I
- aplicarea corecțiilor fiziologice și calcularea temperaturii interioare prescrise, corectate fiziologic, θ_i^*
- calcularea erorii buclei de reglare, $d\theta_r$
- calcularea temperaturii prescrise a aerului suflat, θ_s^*

Implementarea calculelor de mai sus a fost facilitată de utilizarea unei biblioteci de funcții aritmetice (adunări, complement, înmulțiri, împărțiri, etc.) și a unor funcții speciale de interpolare. Implementarea blocurilor reglatoare și de corecție fuzzy va fi detaliată ulterior.

8.3.2.4 Implementarea corecțiilor fuzzy pentru comanda turbinei de aer

Calculule corespunzătoare corecțiilor fuzzy pentru comanda turbinei de aer sunt implementate, conform schemei bloc din Fig. 6.3, într-un modul de program scris în limbaj de asamblare. Aceste calcule pot fi sistematizate după cum urmează:

- apelarea rutinei corespunzătoare blocului de corecție fuzzy în funcție de temperatura aerului suflat, FZ-CTS
- apelarea rutinei corespunzătoare blocului de corecție fuzzy în funcție de viteza automobilului, FZ-CV
- apelarea rutinei corespunzătoare blocului de corecție fuzzy în funcție de iluminarea solară, FZ-CIS2
- calcularea tensiunii de comandă a turbinei de aer, V_r

Și în acest caz a fost utilizată biblioteca de funcții aritmetice. Implementarea blocurilor de corecție fuzzy va fi detaliată în continuare.

8.3.2.5 Implementarea blocurilor de reglare și corecție bazate pe logica fuzzy

Blocurile de reglare și corecție bazate pe logica fuzzy sunt utilizate atât în regulatorul de temperatură, cât și la comanda turbinei de aer. Aceste blocuri, cu funcționalitate identică, au structura reprezentată în Fig. 8.4 și următoarele caracteristici:

- două intrări și o ieșire
- reguli cu doi termeni în antecedent, unul în consecvent, operator logic "și"
- funcții de apartenență trapezoidale pentru variabilele lingvistice ale intrărilor; reprezentare simplificată a funcțiilor de apartenență pentru variabilele lingvistice ale ieșirii, echivalentă cu folosirea unor funcții "singleton"
- algoritm de inferență optimizat pentru implementarea eficientă în limbaj de asamblare
- intrările și ieșirea crisp, ca și gradele de apartenență, sunt reprezentate pe 8 biți (lungimea cuvântului procesorului); mărimile intermediare din formula de defuzzificare sunt reprezentate pe 24 ... 32 de biți, pentru a evita depășirile
- memorie RAM utilizată: 24 byte (permite folosirea memoriei interne)
- timp de execuție: 5 ... 10 ms.

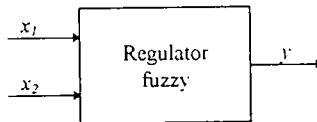


Fig. 8.4 - Schema bloc a regulatorului

1. Structurile de date

Adresele mărimilor de intrare și ale parametrilor regulatorului sunt preluate dintr-un tabel din memoria RAM, având următoarea structură:

K_FF:	adresa variabilei de intrare x_1	
K_FF+1:	adresa tabelului termenilor variabilei lingvistice pentru x_1 (TABLV_X1)	HIGH
K_FF+2:		LOW
K_FF+3:	adresa variabilei de intrare x_2	
K_FF+4:	adresa tabelului termenilor variabilei lingvistice pentru x_2 (TABLV_X2)	HIGH
K_FF+5:		LOW
K_FF+6:	adresa tabelului termenilor variabilei lingvistice pentru y (TABR_Y)	HIGH
K_FF+7:		LOW

Aceeași zonă de memorie este folosită, după preluarea parametrilor de intrare, pentru stocarea temporară a datelor, în următoarea structură:

K_FF:	$S_1 = \Sigma(\mu_i, s_i, A_i)$	BYTE1
K_FF+1:		BYTE2
K_FF+2:		BYTE3
K_FF+3:		BYTE4
K_FF+4:	$S_2 = \Sigma(\mu_i, A_i)$	BYTE1
K_FF+5:		BYTE2
K_FF+6:		BYTE3
K_FF+7:		BYTE4

Următoarea zonă din memoria RAM este folosită pentru stocarea gradelor de apartenență calculate prin fuzzificare. Se presupune că orice valoare a intrării crisp aparține cu un grad nenul la cel mult 4 termeni. Zona de date aferentă fiecărei intrări permite stocarea a 4 grade de apartenență, împreună cu numerele de ordine ale termenilor corespunzători. Datorită adiacenței zonelor de memorie, sunt valabile egalitățile: MEMBERS1 = K_FF+8; MEMBERS2 = K_FF+16.

MEMBERS1:	primul termen pentru x_1	numărul de ordine
MEMBERS1+1:		gradul de apartenență
MEMBERS1+2:	al doilea termen pentru x_1	numărul de ordine
MEMBERS1+3:		gradul de apartenență
MEMBERS1+4:	al treilea termen pentru x_1	numărul de ordine
MEMBERS1+5:		gradul de apartenență
MEMBERS1+6:	al patrulea termen pentru x_1	numărul de ordine
MEMBERS1+7:		gradul de apartenență

MEMBERS2:	primul termen pentru x_2	numărul de ordine
MEMBERS2+1:		gradul de apartenență
MEMBERS2+2:	al doilea termen pentru x_2	numărul de ordine
MEMBERS2+3:		gradul de apartenență
MEMBERS2+4:	al treilea termen pentru x_2	numărul de ordine
MEMBERS2+5:		gradul de apartenență
MEMBERS2+6:	al patrulea termen pentru x_2	numărul de ordine
MEMBERS2+7:		gradul de apartenență

Parametrii funcțiilor de apartenență sunt stocați în tablele din memoria ROM. Pentru variabilele lingvistice ale intrărilor sunt folosite funcții trapezoidale, cu forma din Fig. 8.5, caracterizate prin parametrii a , b , c și d . Variabila lingvistică pentru x_1 are n termeni, iar cea pentru x_2 , p termeni. Se presupun îndeplinite condițiile $a_i < b_i < c_i < d_i$, cu $i = 1 \dots n$; $a_{i1} < a_{i2} < \dots < a_{in}$ și similar pentru x_2 .

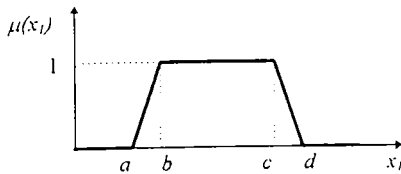


Fig. 8.5 - Funcțiile de apartenență ale termenilor pentru intrări

Tabelele corespunzătoare celor două variabile lingvistice ale intrărilor au următoarea structură:

TABL_V_X1:

n
a_{11}
b_{11}
c_{11}
d_{11}
...
a_{1n}
b_{1n}
c_{1n}
d_{1n}

TABL_V_X2:

p
a_{21}
b_{21}
c_{21}
d_{21}
...
a_{2p}
b_{2p}
c_{2p}
d_{2p}

În scopul accelerării calculului, pentru funcțiile de apartenență ale termenilor ieșirii se memorează doar aria A_i și abscisa centrului de greutate s_i , conform Fig. 8.6. Această abordare este echivalentă cu utilizarea unor funcții de apartenență "singleton".

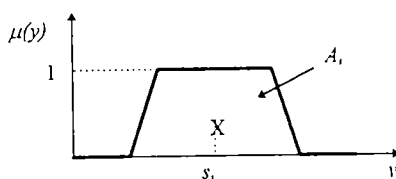


Fig. 8.6 - Funcțiile de apartenență ale termenilor pentru ieșire

Tabelul corespunzător variabilei lingvistice a ieșirii are următoarea structură:

TABR_Y:

A_1
s_1
p_1
...
A_m
s_m
p_m

Mărimile suplimentare p_i , denumite grade de plauzibilitate, permit specificarea ponderei fiecărei reguli, servind la acordarea fină a regulatorului. Deși algoritmul dezvoltat permite utilizarea acestor grade de plauzibilitate, ele nu sunt folosite în aplicația concretă avută în vedere.

Regulile nu sunt memorate în structuri de date distincte, fiind determinate de corespondența între pozițiile termenilor variabilelor de intrare și pozițiile termenilor variabilelor de ieșire, în tabelele aferente. Astfel, regula care include în antecedent termenul j corespunzător lui x_1 și termenul k corespunzător lui x_2 are în consecvență termenul cu poziția

$$i = j + n * (k + 1)$$

în tabelul **TABR_Y**. Prin acest mod de reprezentare se reduce timpul de calcul, găsirea termenului din consecvență necesitând doar operații aritmetice simple. Dimensiunea tabelului termenilor pentru y este mai mare, datorită stocării repetate a aceluiași termen, atunci când apare în părțile consecvente ale unor reguli

diferite. Acest fapt nu pune însă probleme deosebite, având în vedere capacitățile de memorie ROM folosite curent în sistemele cu microcontrolere.

2. Algoritmul de inferență fuzzy

Operația de *fuzzificare* presupune determinarea gradului în care fiecare mărime de intrare satisface termenii din antecedent. Pentru aceasta, se evaluează valorile funcțiilor de apartenență ale termenilor, pentru valorile particulare ale intrărilor. De exemplu, pentru intrarea x_j și termenul j , formulele sunt:

$$\mu_{1j} = \begin{cases} \frac{x_1 - a_{1j}}{b_{1j} - a_{1j}}; & a_{1j} < x_1 < b_{1j} \\ 1; & b_{1j} \leq x_1 \leq c_{1j} \\ \frac{d_{1j} - x_1}{d_{1j} - c_{1j}}; & c_{1j} < x_1 < d_{1j} \end{cases}$$

Parametrii funcțiilor de apartenență se citesc din tabelele `TABLV_X1` și `TABLV_X2`, iar rezultatele se stochează în tabelele `MEMBERS1` și `MEMBERS2`.

Operatorul logic fuzzy și este implementat prin funcția `min`. Astfel, gradul de activare μ_i al regulii i este calculat cu formula:

$$\mu_i = \min\{\mu_{1j}, \mu_{2k}\}$$

unde relația între i , j și k este cea prezentată anterior.

Determinarea mărimii crisp de ieșire se face prin *defuzzificare*, cu ajutorul formulei:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i \cdot s_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i \cdot A_i}; \quad m = n \cdot p$$

unde parametrii A_i și s_i se citesc din tabela `TABR_Y`. În cazul folosirii gradelor de plauzibilitate, acestea se includ în produsele din ambele sume.

3. Schema logică

Schema logică a subrutinei de reglare i corecție fuzzy este prezentată în Fig. 8.7, blocul de fuzzificare fiind detaliat în Fig. 8.8.

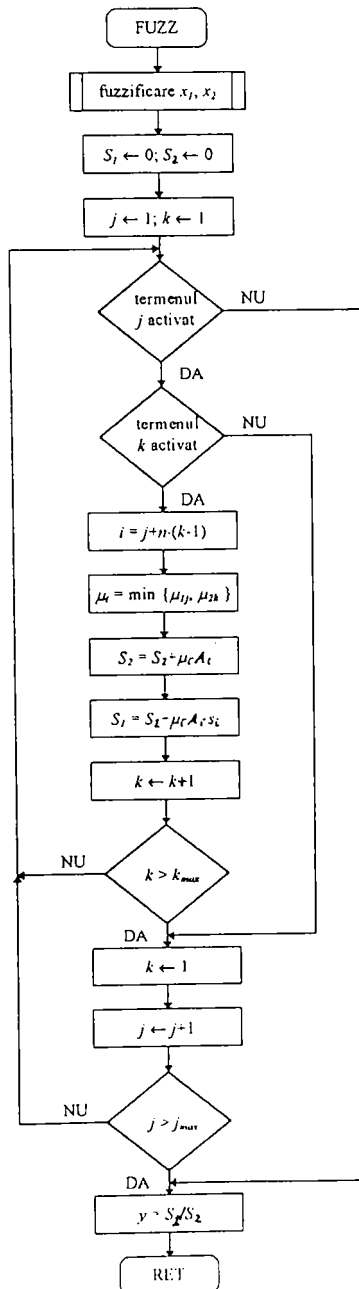


Fig. 8.7 - Schema logică a subrutinei de reglare / corecție fuzzy

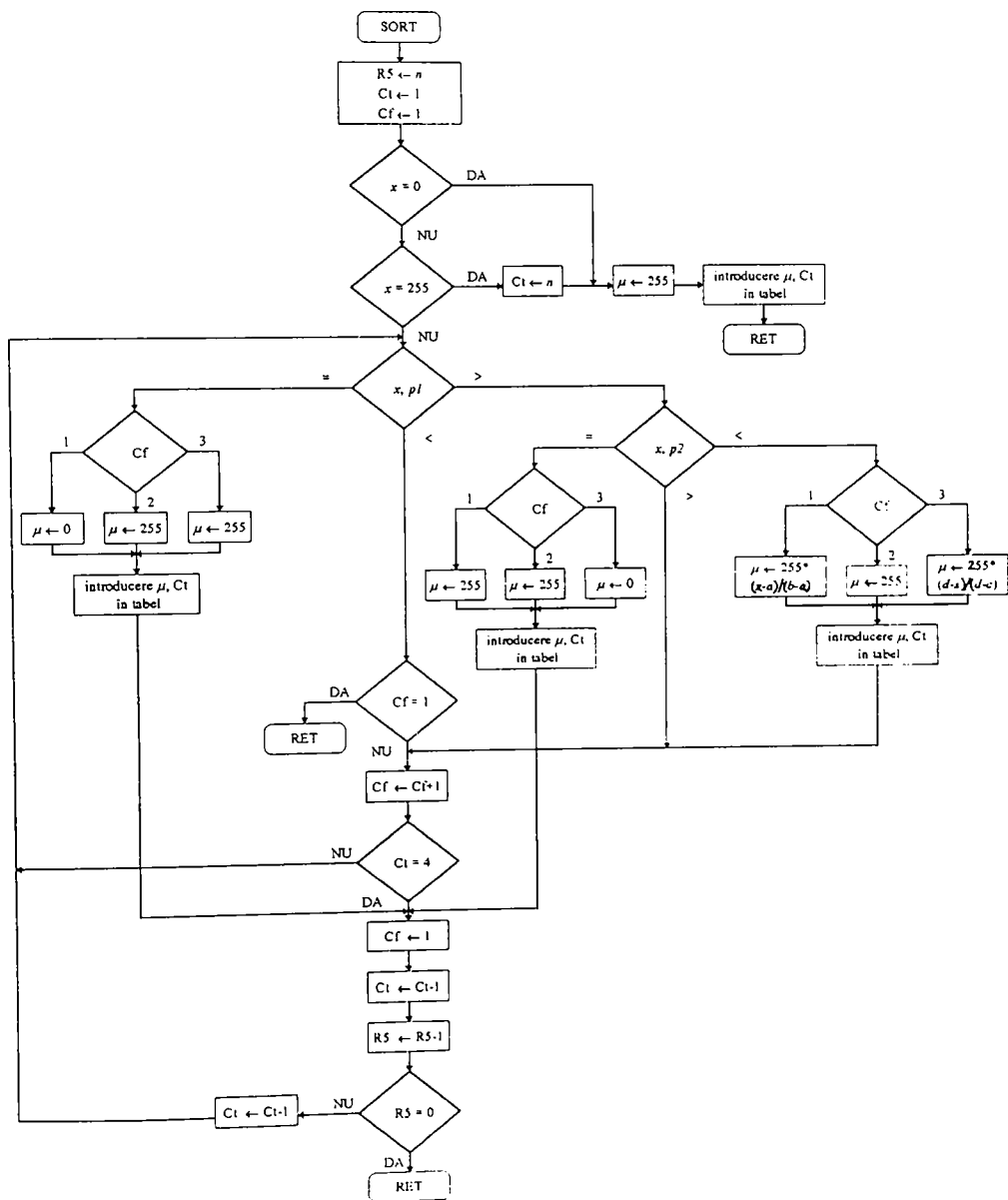


Fig. 8.8 - Schema logică a blocului de fuzzificare

4. Codul sursă

În Anexa 1 se prezintă codul sursă comentat al programului care implementează blocurile de reglare și corecție fuzzy.

8.4 Concluzii

- ⇒ Pentru regulatoarele fuzzy există mai multe posibilități de implementare, atât hardware cât și software. Acestea le corespund diverse nivele de performanță și cost. Selecția modalității optime de implementare trebuie realizată în funcție de specificul fiecărei aplicații.
- ⇒ Punerea la punct a aplicațiilor fuzzy urmează o succesiune de etape de proiectare și testare bine precizate. Utilizarea mediilor de dezvoltare specializate permite reducerea considerabilă a timpului necesar pentru proiectarea aplicațiilor fuzzy. Totuși, dezvoltarea este posibilă și fără folosirea acestor medii, prin scrierea directă a codului. Această ultimă abordare permite obținerea unui cod mai eficient, în anumite situații concrete.
- ⇒ Aplicația avută în vedere, și anume reglarea fuzzy a sistemelor de climatizare, are următoarele caracteristici specifice: proces relativ lent, cu constante de timp de ordinul secundelor + minutilor; producție de serie mare, impunând un cost cât mai redus al suportului hardware; necesitatea unei bune flexibilități, pentru adaptare la diferite modele de automobile și pentru a permite optimizări ulterioare.
- ⇒ Caracteristicile de mai sus au determinat utilizarea unui microcontroler uzual, de 8 biți, dotat cu o gamă largă de periferice: Philips 80C552. Sistemul cu microcontroler realizează și celelalte funcții necesare pentru comanda climatizării.
- ⇒ Codul care implementează regulatorul este scris în limbaj de asamblare, pentru a obține o eficiență maximă. Implementarea a urmărit, în primul rând, minimizarea timpului de calcul, prin optimizarea modului de reprezentare pentru funcțiile de apartenență și baza de reguli. Toate calculele corespunzătoare algoritmului de comandă se execută în mai puțin de 20 ms.
- ⇒ Regulatorii fuzzy necesită, de regulă, mai mult spațiu de memorie pentru program și variabile. Pentru eliminarea acestui dezavantaj, atât blocurile de reglare fuzzy, cât și blocurile de corecție bazate pe logica fuzzy sunt implementate printr-o subrutină unică, conducând la reducerea dimensiunii codului. Astfel, întreg codul care implementează comanda sistemului de climatizare, în varianta cu reglare fuzzy, nu depășește 3K, nefiind necesar un spațiu de memorie mai mare decât cel corespunzător variantei cu reglare clasică PID.
- ⇒ Punerea la punct a regulatorului fuzzy s-a dovedit mai rapidă și mai ușor controlabilă, decât în cazul regulatoarelor clasice, de tip PID. Astfel, dezvoltarea regulatorului fuzzy descris în lucrare a durat aproximativ o lună, pe când punerea la punct a unui regulator clasic necesită între 3 și 6 luni.

9. Rezultate experimentale

9.1 Introducere

Acordarea finală a sistemului de comandă pentru climatizarea auto s-a realizat prin măsurători pe automobilul real. Punerea la punct a necesitat mai multe zeci de teste, în condiții de funcționare diverse.

În cadrul regimului de testare, mărimile de interes sunt transmise de către programul de reglare, printr-o interfață serială, unui calculator personal. Aici datele sunt preluate de către un program specializat, care le stochează pe disc. Un alt program permite afișarea și tipărirea ulterioară a formelor de undă, sau conversia în formate specifice altor programe de prelucrare a datelor.

Pot fi achiziționate în jur de 40 de mărimi, disponibile în cadrul programului de reglare. Acestea pot fi: mărimi măsurate, mărimi de comandă, variabile interne ale regulatorului, stările diverselor semnale digitale sau fanioane ale programului.

În continuare vor fi prezentate câteva dintre testele efectuate, corespunzătoare unei etape de dezvoltare intermediare și acordării finale a regulatorului. Selecția a urmărit ilustrarea comportamentului în situațiile tipice: modificarea prescrierii și a perturbațiilor externe (viteză, iluminare solară), pornire la cald și la rece. Formele de undă reprezentate corespund următoarelor mărimi (s-au păstrat notațiile din Capitolul 7):

schema bloc	simbol	semnificație
theta_i_st_L	θ_{iL}^*	prescrierea pentru temperatura interioară, stânga [°C]
theta_i_st_R	θ_{iR}^*	prescrierea pentru temperatura interioară, dreapta [°C]
theta_i	θ_i	temperatura interioară [°C]
theta_LR	θ_{LR}	temperatura lichidului de răcire [°C]
theta_o	θ_o	temperatura exterioară [°C]
theta_v	θ_v	temperatura din vaporizator [°C]
v	v	viteza de deplasare a automobilului [m/s]
V_I_S	V_{Is}	tensiunea de la senzorul de iluminare solară [V]
k_v_L	k_{vL}	factorul de umplere al comenzii ventilului radiatorului, stânga [%]
k_v_R	k_{vR}	factorul de umplere al comenzii ventilului radiatorului, dreapta [%]
theta_a_L	θ_{aL}	temperatura aerului suflat, stânga [°C]
theta_a_R	θ_{aR}	temperatura aerului suflat, dreapta [°C]
V_T	V_T	tensiunea de comandă a turbinei de aer [V]
theta_i_st_F	θ_{iF}^*	temperatura interioară prescrisă, compensată fiziologic [°C]

Formele de undă de mai sus permit aprecierea calității reglării. Acordarea reguletoarelor a necesitat și examinarea unor variabile interne ale regulatorului de temperatură, cum ar fi eroarea de reglare, integrala acesteia, ieșirile celor două blocuri de reglare ("quasi-P" și "quasi-I"), etc.

Pe axele orizontale sunt notate momentele achiziției eșantioanelor, în formatul (oră : minut: secundă). Gruparea formelor de undă s-a realizat după cum urmează:

Graficul 1: mărimile de prescriere (temperaturile interioare prescrise, stânga / dreapta) și răspunsul buclei de reglare (temperatura interioară măsurată)

Acest grafic include mărimile cele mai importante pentru aprecierea calității reglării. Se pot determina timpul de răspuns al reglării, precum și eventualele supracreșteri sau oscilații. Temperatura internă obținută depinde, pe lângă cele două prescrieri, și de corecțiile fiziologice.

Graficele 2-4: mărimile perturbatoare externe (temperatura exterioară, temperatura lichidului de răcire, temperatura din vaporizator, viteza de deplasare, iluminarea solară)

Examinarea acestor mărimi permite identificarea unor situații tipice, în care să se urmărească răspunsul regulatorului. Spre deosebire de simulare, în cazul experimentelor aceste mărimi nu pot avea forme de variație ideale (treaptă, rampă). S-a urmărit, totuși, acoperirea unor condiții de funcționare cât mai diverse. În plus, temperatura lichidului de răcire permite distincția între startul cald și startul rece.

Tensiunea de la senzorul de iluminare solară, V_{I_S} , scade la creșterea iluminării, valoarea de 5 V corespunzând unei iluminări nule.

Graficul 5: mărimile de comandă (factorul de umplere al comenzii ventilului radiatorului, stânga / dreapta)

Examinarea acestor mărimi poate evidenția atingerea regimului de limitare, când degradarea răspunsului buclei de reglare este cauzată nu de acordarea regulatorului, ci de puterea prea mică a subsistemelor de încălzire / răcire.

Graficul 6: temperatura aerului suflat, stânga / dreapta

Aceste mărimi sunt importante pentru aprecierea gradului de confort al reglării, atingerea unor valori extreme trebuind evitată.

Graficul 7: tensiunea de comandă pentru turbina de aer

În cadrul testelor prezentate, comanda turbinei de aer a fost păstrată constantă, pentru a elimina influența debitului de aer asupra buclei de reglare a temperaturii. Verificarea acordării corecte a blocurilor de compensare fuzzy pentru debitul de aer a trebuit realizată pe baza impresiilor persoanelor care realizează testul.

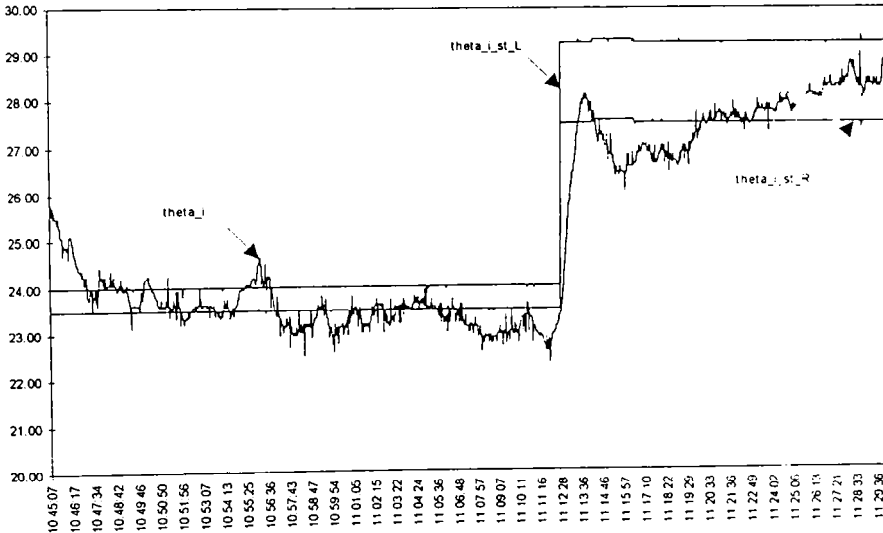
Graficul 8: temperatura interioară prescrisă, compensată fiziologic

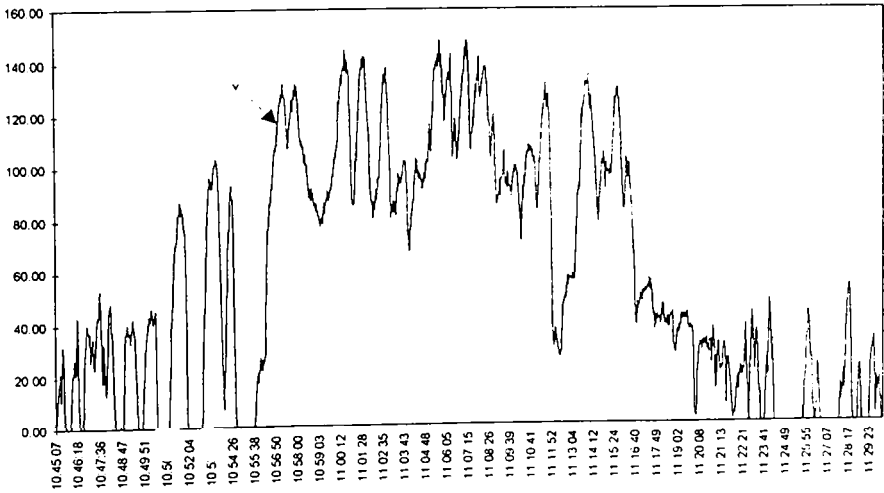
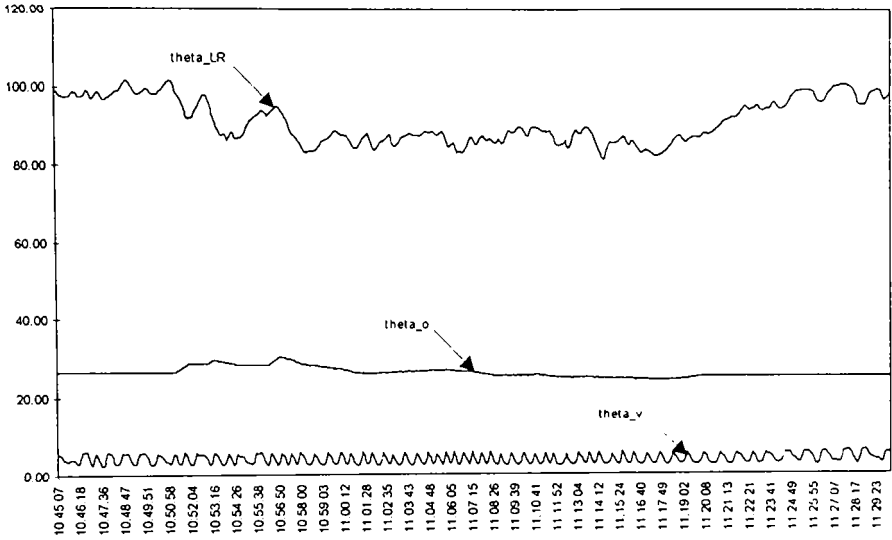
Această mărime permite evaluarea efectului blocurilor de compensare fuzzy a temperaturii interioare. Verificarea acordării corecte se face însă tot pe baza impresiilor persoanelor care realizează testul.

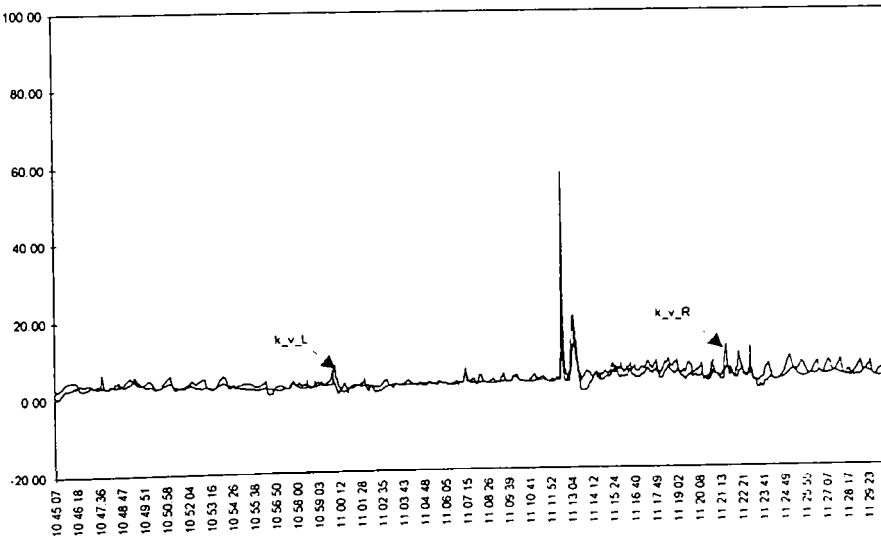
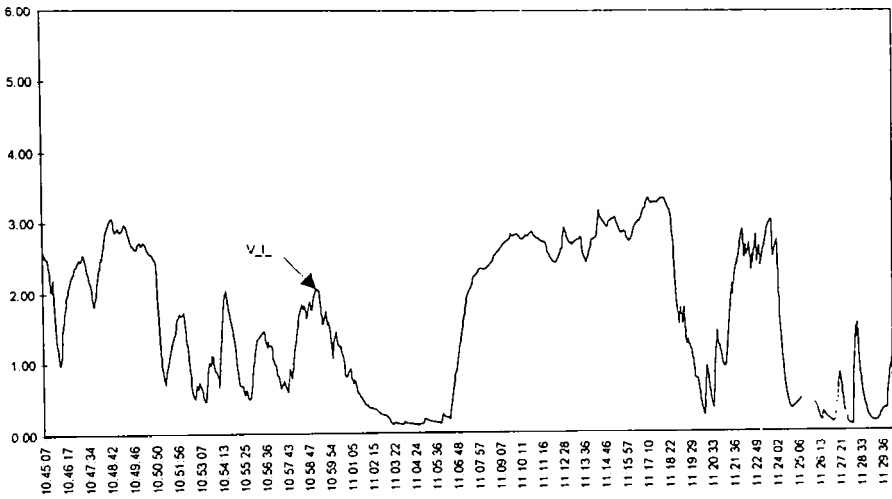
9.2 Testul 1 - Comportarea la modificarea prescrierii, a iluminării solare și a vitezei

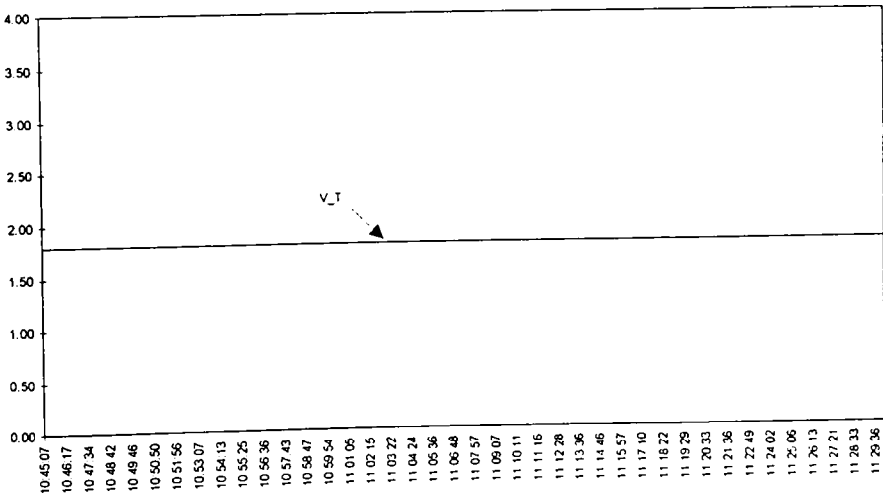
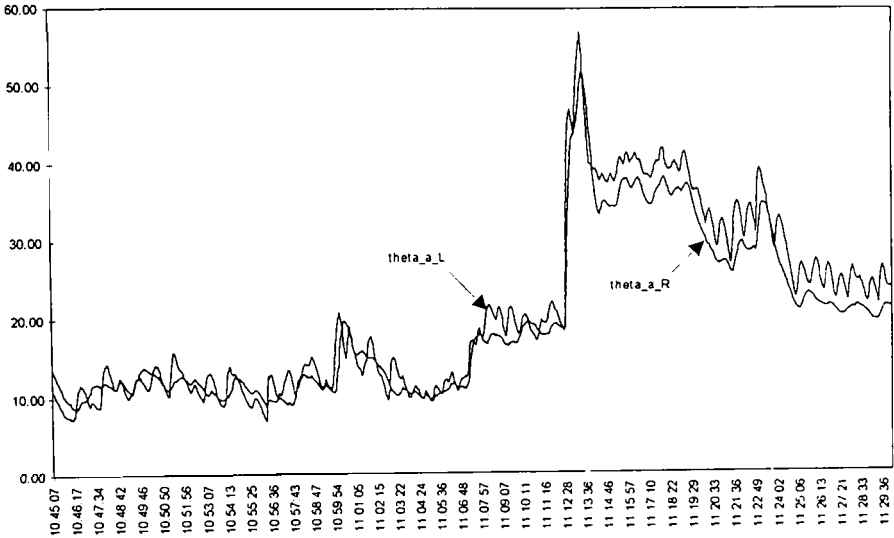
În cadrul acestui test, temperaturile interioare prescrise sunt modificate brusc, urmărindu-se evoluția temperaturii interioare. Viteza de deplasare și iluminarea solară suferă, de asemenea, variații semnificative ca amplitudine și relativ bruște, permițând aprecierea calității reglării.

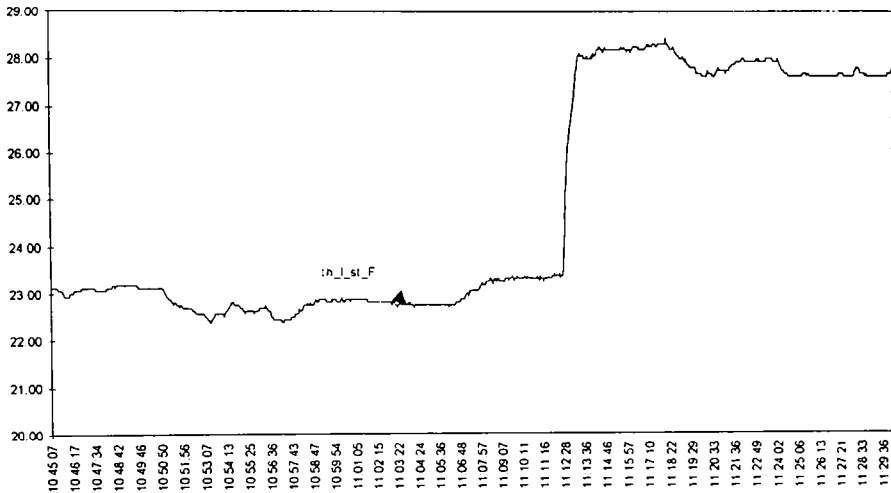
Testul a fost realizat în data de 16 iulie, între orele 10:54 și 11:30. Temperatura exterioră a fost ridicată (25 .. 30 °C). Deplasarea s-a făcut în oraș (cu variații mari ale vitezei), pe autostradă (viteză ridicată, relativ constantă) și apoi din nou în oraș. Iluminarea solară a fost intensă, cu variații mari (senin / înnorat). Pornirea s-a realizat la cald. Debitul de aer a fost relativ redus.











Pe baza formelor de undă reprezentate anterior rezultă următoarele concluzii:

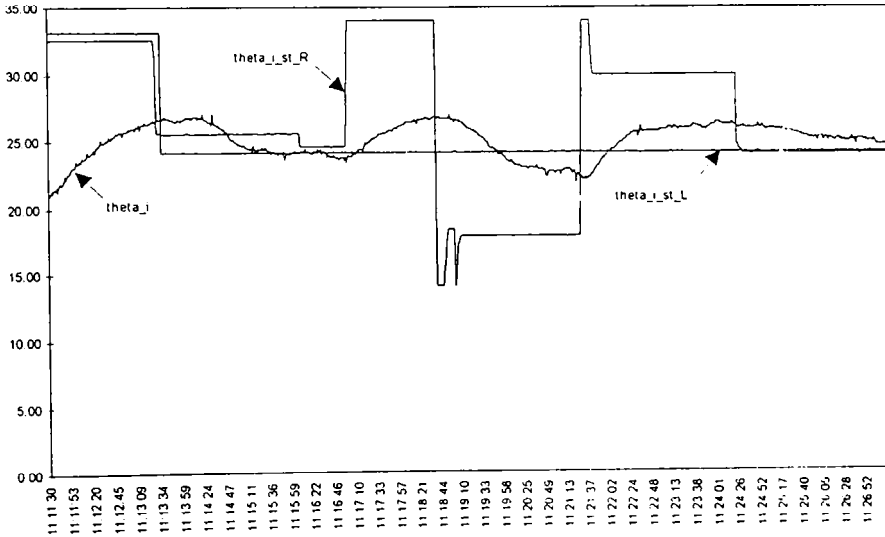
- La pornire, temperatura interioară scade de la 26 °C (valoare egală cu temperatura exterioară) la valoarea dorită, în aproximativ 1,5 minute. Deoarece temperatura în vaporizator este joasă, temperatura aerului suflat poate să scadă foarte rapid până în jur de 10 °C, contribuind la răspunsul rapid al buclei.
- Creșterea bruscă a vitezei, la ora 10:55:38, produce creșterea temperaturii încălzitului de răcire și creșterea temperaturii interioare, cu aproximativ 0,5 °C. Perturbația este compensată imediat de către bucla de reglare.
- Creșterea puternică a iluminării solare, începând cu ora 10:58, nu produce variații semnificative ale temperaturii interioare, confirmând funcționarea corectă a regulatorului.
- La modificarea prescrierilor, la ora 11:12:28, temperatura interioară atinge valoarea dorită după aproximativ 1 minut. Se înregistrează o supracreștere și oscilații, având amplitudine acceptabilă. Factorul de umplere al comenzii ventilelor ia o valoare mare, determinând creșterea rapidă a temperaturii aerului suflat, deci răspunsul rapid al buclei și supracreșterea. Temperatura aerului suflat are, pentru scurt timp, o valoare mai ridicată, dar se menține între limite acceptabile.
- Corecția fiziologică a temperaturii interioare prescrise este influențată semnificativ de prescrieri și, în mai mică măsură, de iluminarea solară. Influența temperaturii exterioare nu poate fi detectată, deoarece aceasta este aproximativ constantă.

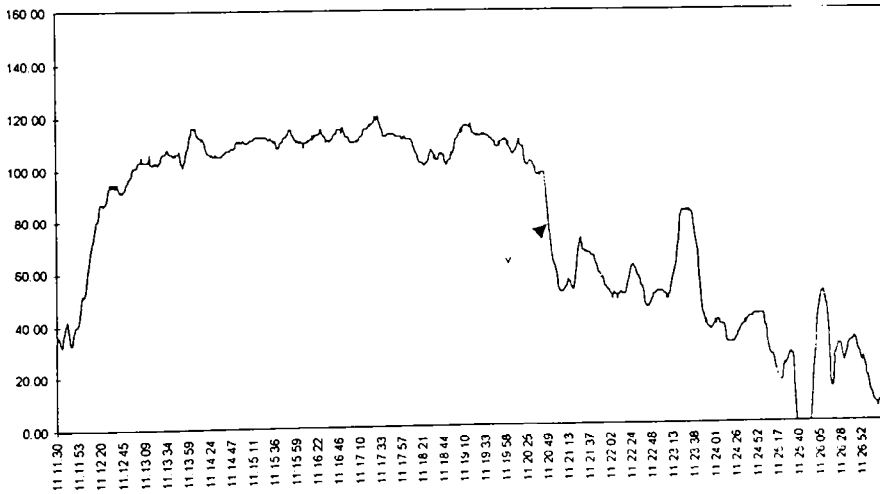
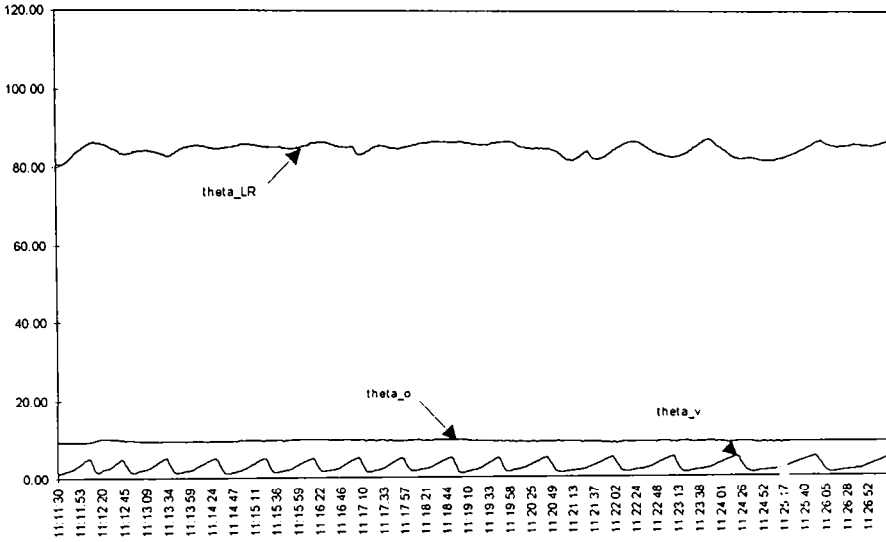
În această variantă de acordare s-a urmărit obținerea unui răspuns cât mai rapid, care cauzează o oarecare instabilitate, caracterizată prin supracreștere și oscilații. Această comportare a fost ameliorată în variantele ulterioare, așa cum se va constata în testul următor.

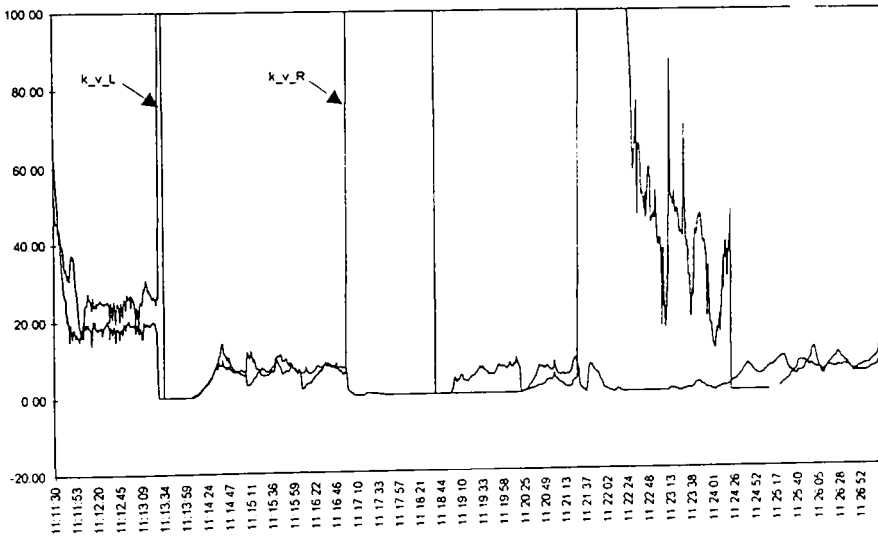
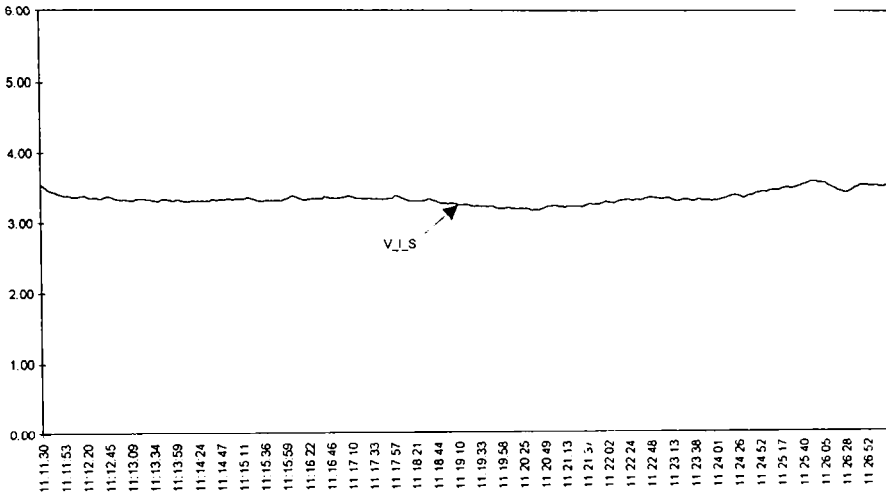
9.3 Testul 2 - Comportarea la modificarea repetată a prescrierii

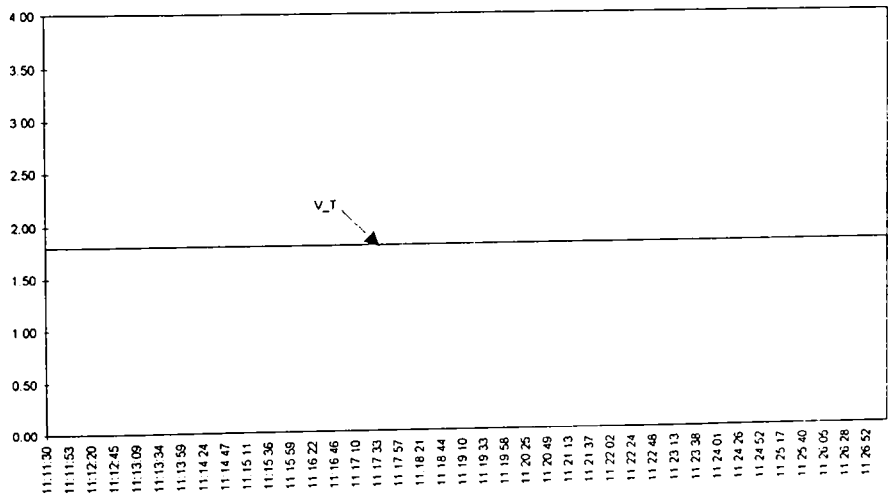
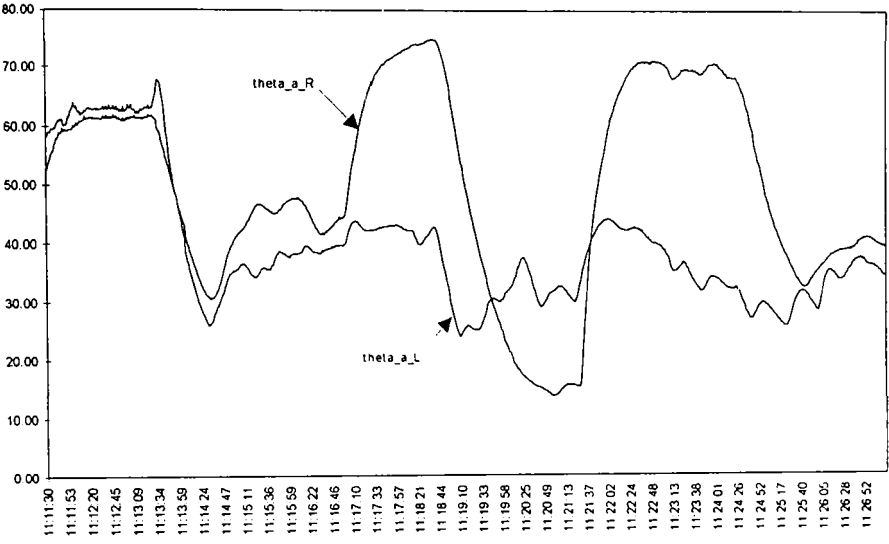
În cadrul acestui test, temperaturile interioare prescrise sunt modificate brusc, repetat, și măsurându-se evoluția temperaturii interioare.

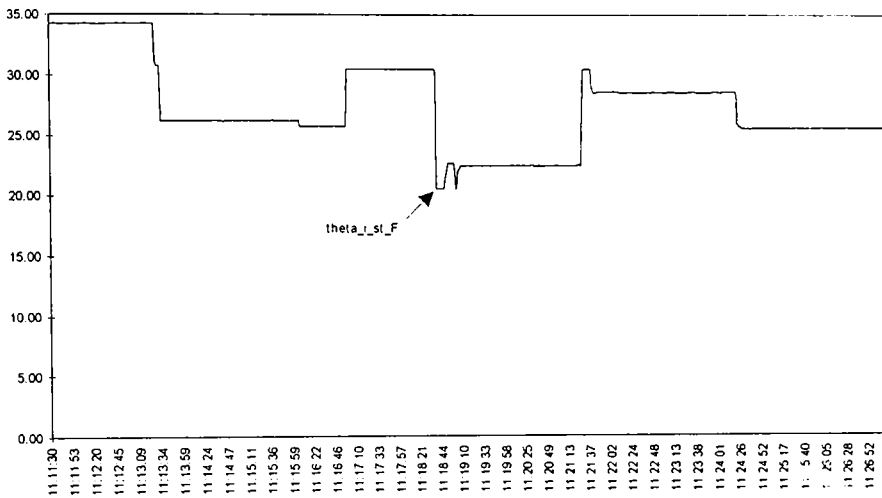
Testul a fost realizat în data de 21 octombrie, între orele 11:11 și 11:27. Temperatura exterioară a fost de aproximativ 10 °C. Deplasarea s-a făcut pe autostradă și apoi în oraș. Iluminarea solară a fost relativ redusă, corespunzător lunii octombrie, la prânz. Pornirea s-a realizat la cald. Debitul de aer a fost relativ redus. Cele două temperaturi interioare prescrise au fost modificate atât simultan, cât și independent.











Pe baza formelor de undă reprezentate anterior rezultă următoarele concluzii:

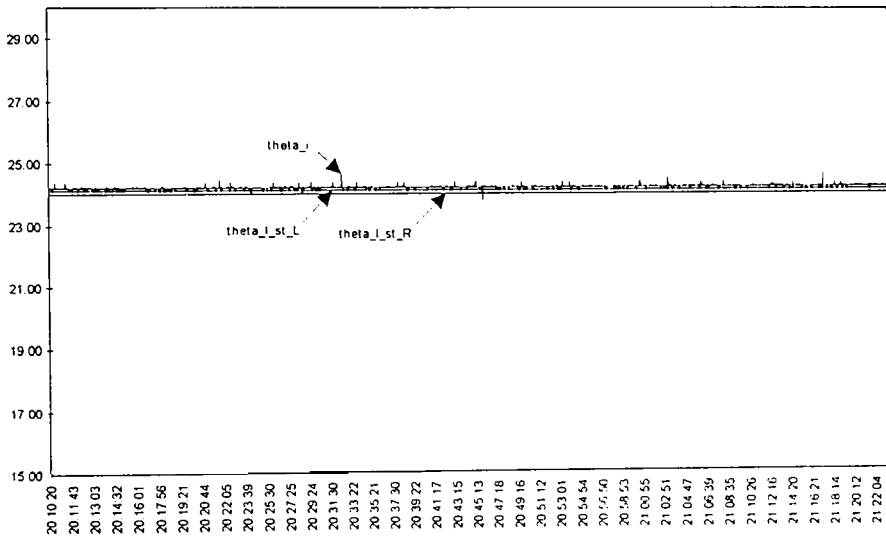
- În această variantă de acordare au fost eliminate supracreșterea și oscilațiile. Regimul staționar este atins, de regulă, după 1 ... 2 minute, chiar la modificări mari ale prescrierii.
- Se observă modificările rapide ale mărimilor de comandă - factorii de umplere ai semnalelor pentru ventilele radiatoarelor. Temperatura aerului suflat are o variație mai lentă, cu întârzieri în jur de 1 minut, determinate, în principal, de puterile limitate ale subsistemelor de încălzire și răcire. Acestea sunt principala cauză a întârzierii răspunsului buclei de reglare a temperaturii interioare, dar timpii de răspuns sunt acceptabili, pentru aplicația avută în vedere.
- Corecția fiziologică a temperaturii interioare prescrise este influențată semnificativ de temperaturile interioare prescrise. Alte influențe nu sunt detectabile.

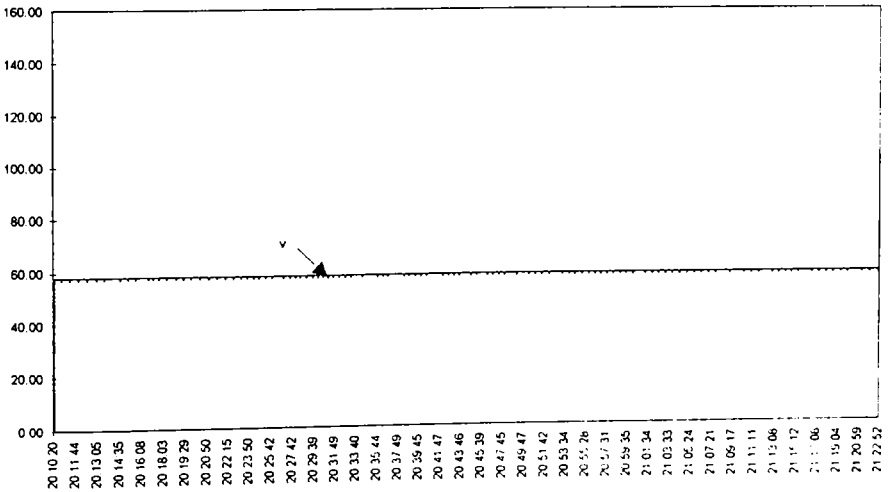
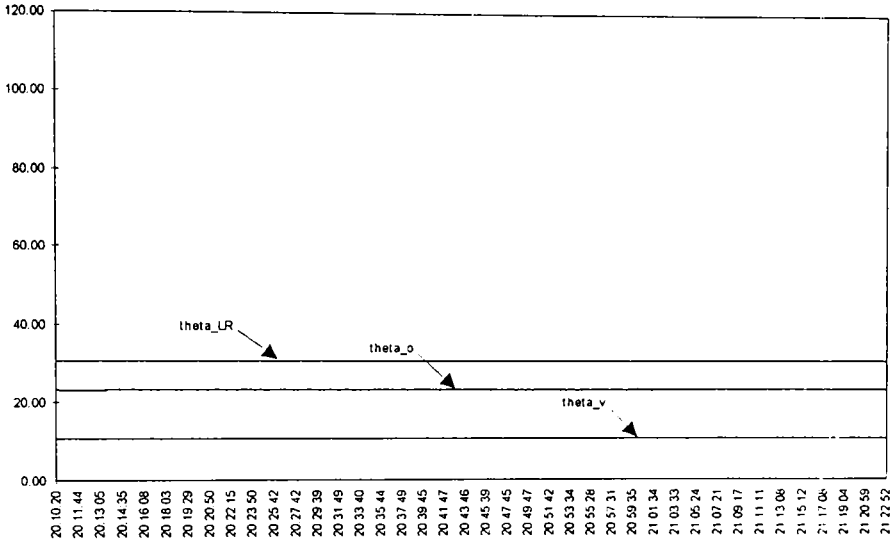


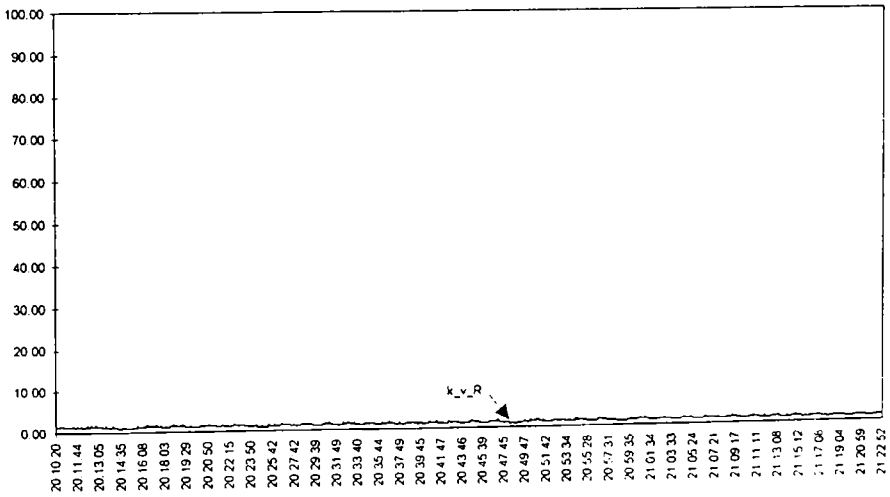
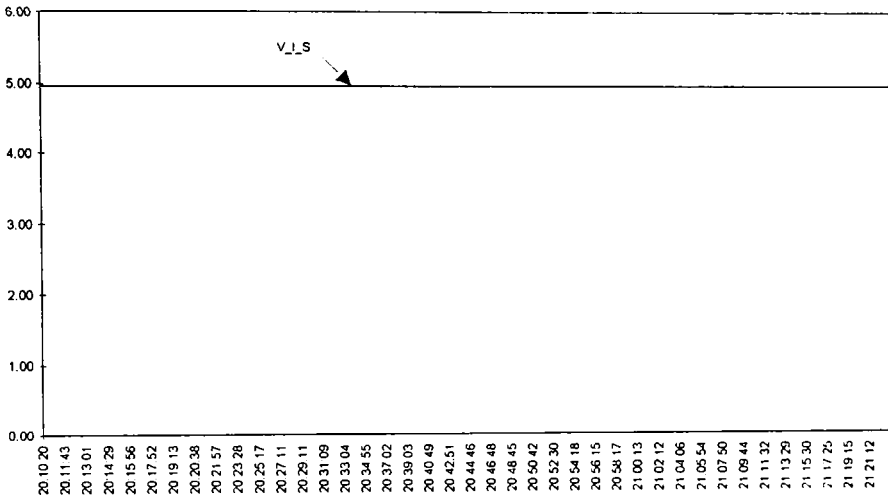
9.4 Testul 3 - Comportarea în regim staționar

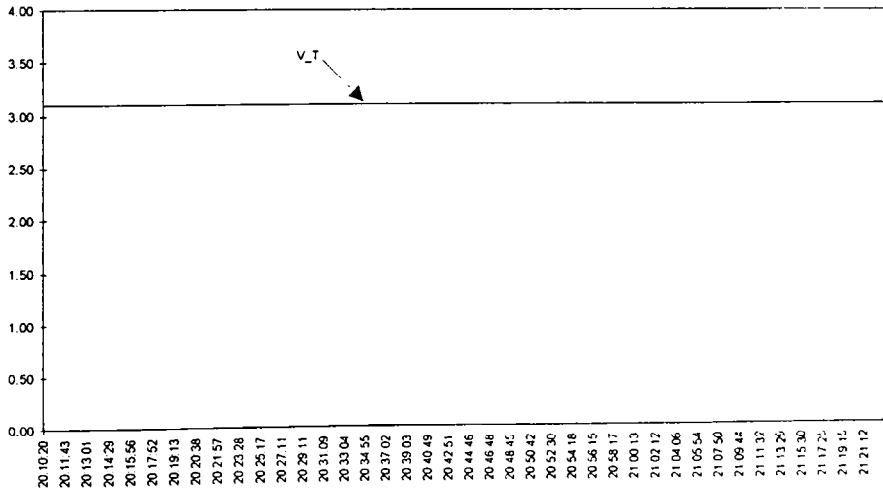
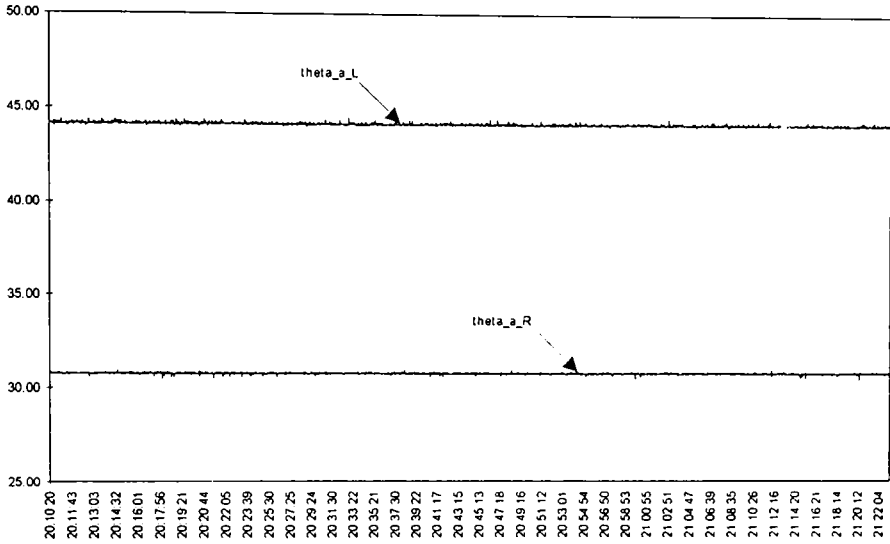
În cadrul acestui test, temperaturile interioare prescrise, ca și mărimile perturbatoare externe, sunt păstrate constante, urmărindu-se evoluția temperaturii interioare.

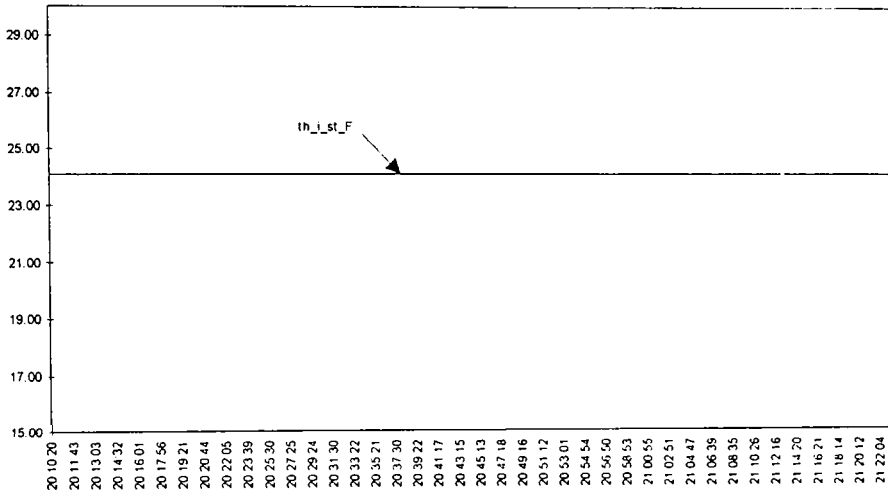
Testul a fost realizat în data de 20 octombrie, seara, între orele 20:10 și 21:22. Temperatura exterioară a fost constantă, aproximativ egală cu 23 °C. Deplasarea s-a făcut cu viteză constantă, iluminarea solară a fost nulă, iar debitul de aer, ridicat.











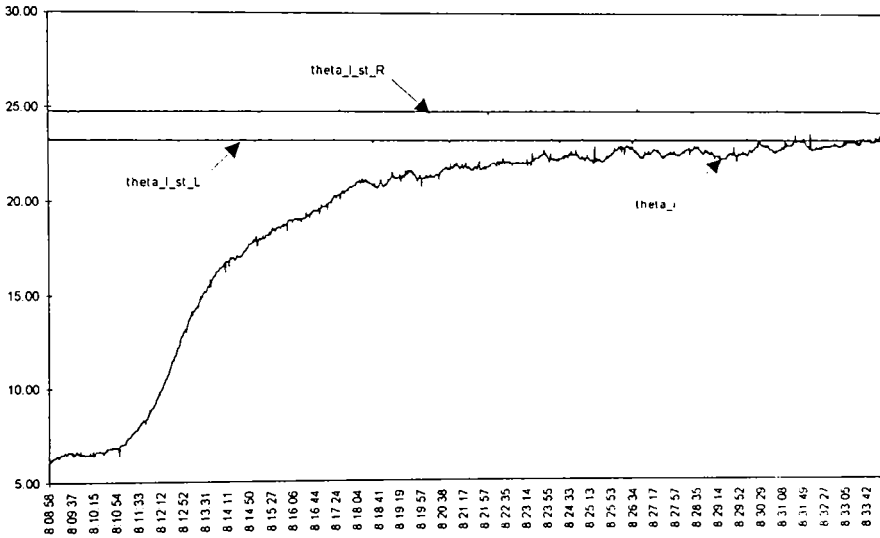
Pe baza formelor de undă reprezentate anterior rezultă următoarele concluzii:

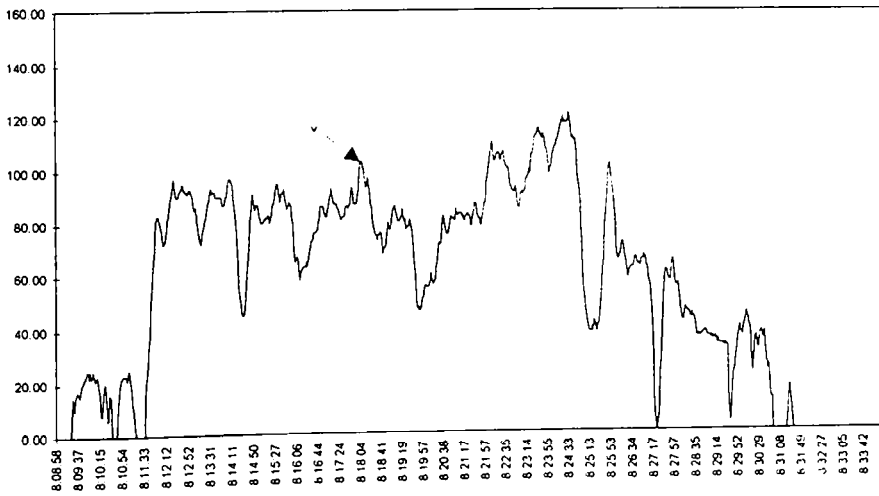
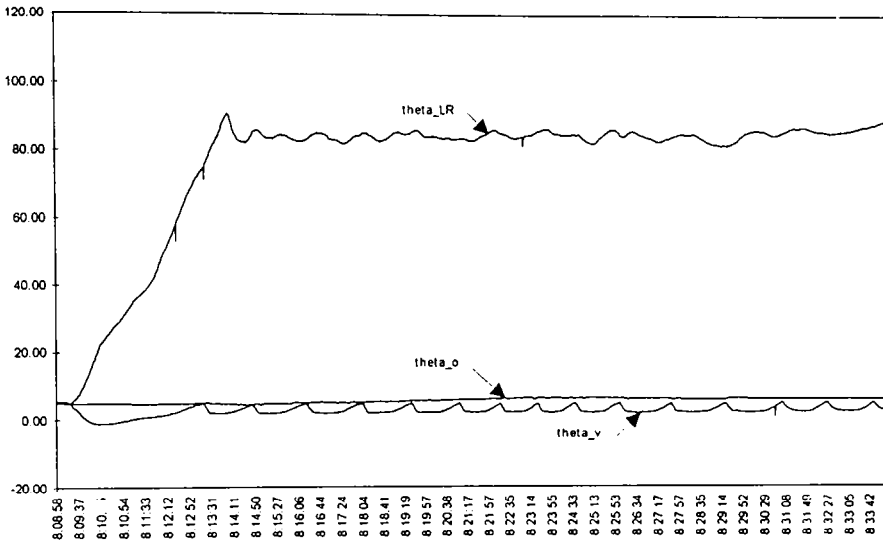
- Temperatura interioară se menține constantă, cu variații ne semnificative (mai mici de $\pm 0,5$ °C). Mărimile de comandă și temperatura aerului suflat sunt, de asemenea, constante.
- Corecția fiziologică a temperaturii interioare prescrise este constantă, deoarece toate mărimile care o influențează sunt constante.

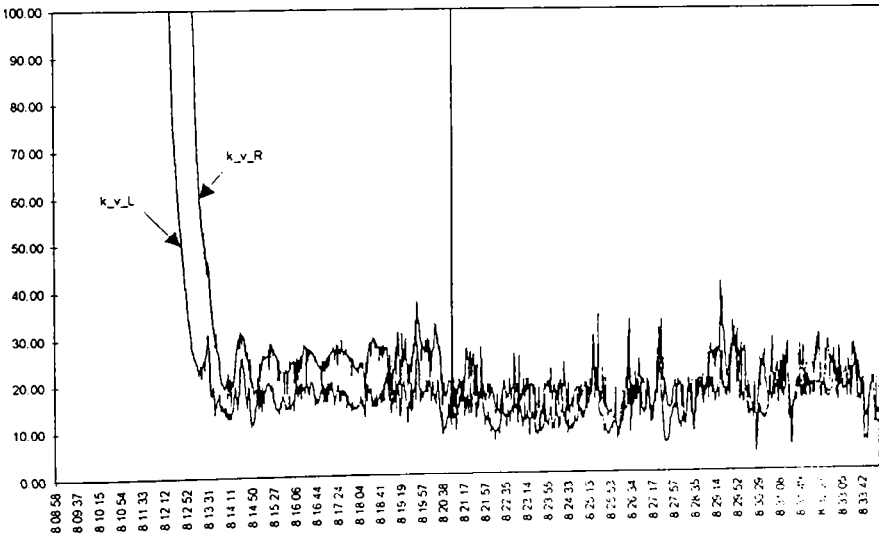
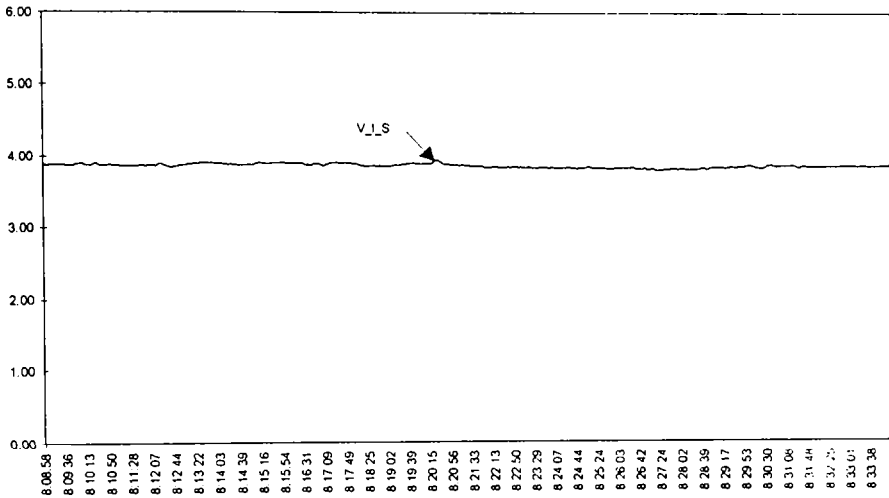
9.5 Testul 4 - Comportarea la pornire rece, dimineața

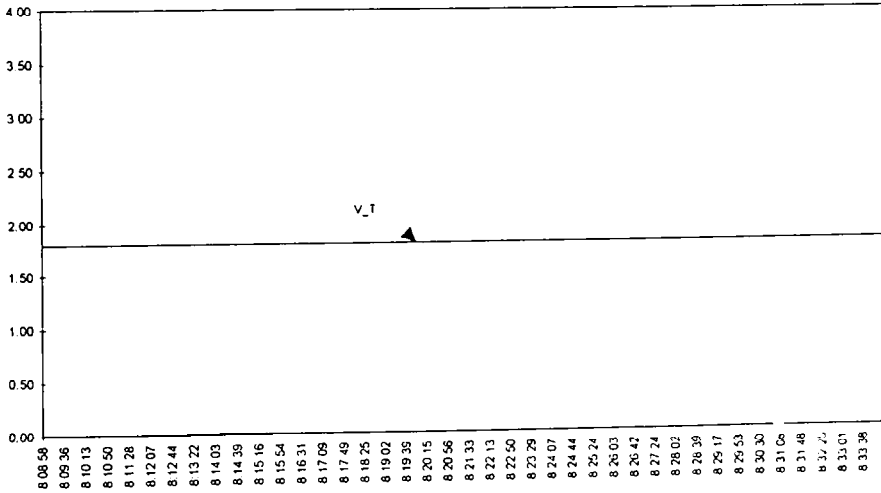
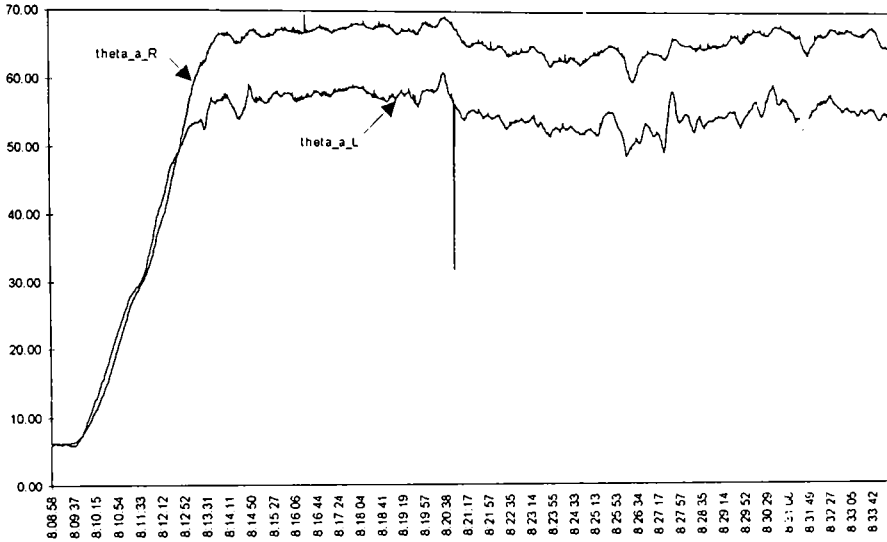
În cadrul acestui test, se realizează o pomire la rece, urmărindu-se evoluția temperaturii interioare.

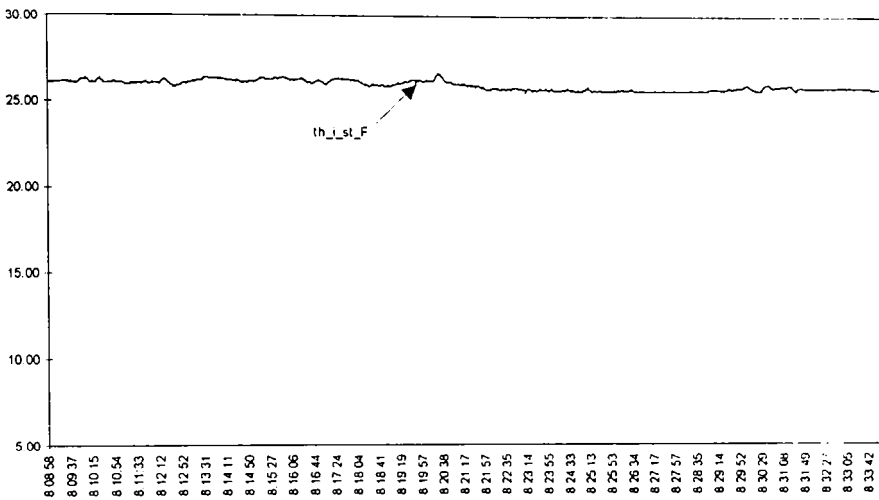
Testul a fost realizat în data de 22 octombrie, între orele 8:08 și 8:34. Temperatura exterioară a fost coborâtă (5 °C). Deplasarea s-a făcut în mare parte pe autostradă, apoi în oraș. Iluminarea solară a fost relativ redusă și constantă, iar debitul de aer a fost relativ redus.











Pe baza formelor de undă reprezentate anterior rezultă următoarele concluzii:

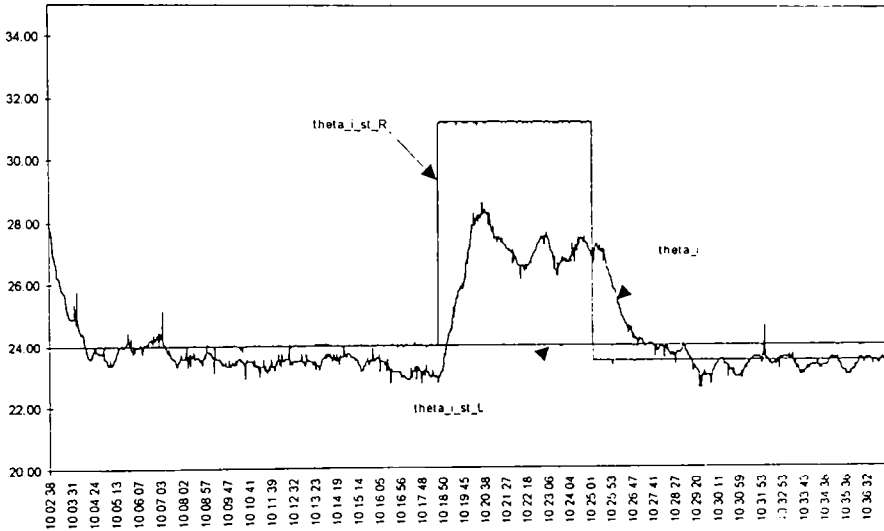
- Temperatura interioară pornește de la o valoare coborâtă, egală cu temperatura exterioară (5 °C). Temperatura în vaporizator și cea a lichidului de răcire au aceeași valoare.
- Temperatura interioară atinge o valoare acceptabilă în aproximativ 5 minute. Întârzierea e cauzată de capacitatea redusă a subsistemului de încălzire, determinată, la rândul ei, de temperatura insuficientă a lichidului de răcire a motorului.
- Se observă că temperatura aerului suflat evoluează simultan cu temperatura lichidului de răcire, în condițiile în care comenzile sunt maxime. Aerul suflat spre dreapta este mai cald, deoarece și temperatura prescrisă este mai mare.
- Corecția fiziologică a temperaturii interioare prescrise este influențată, slab, de iluminarea solară. Influența temperaturii exterioare nu poate fi detectată, deoarece aceasta este aproximativ constantă. Cel mai puternic factor de influență, prescrierea, este constantă.

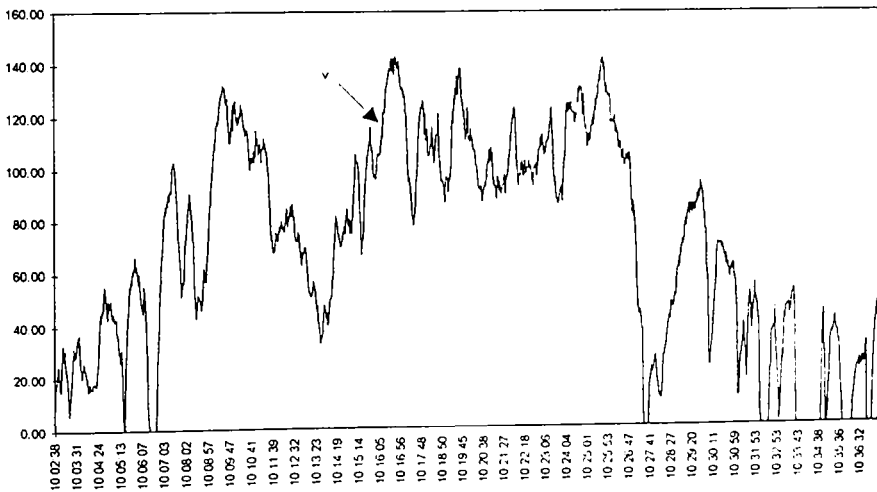
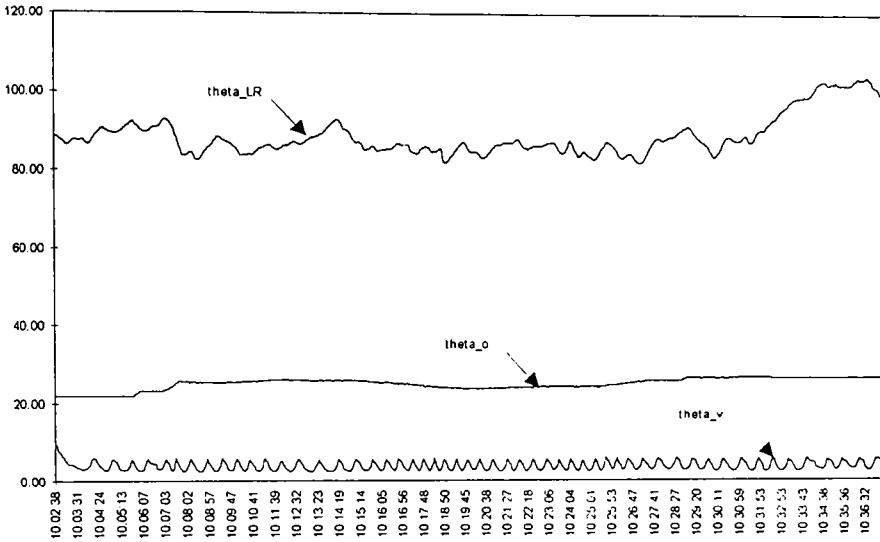


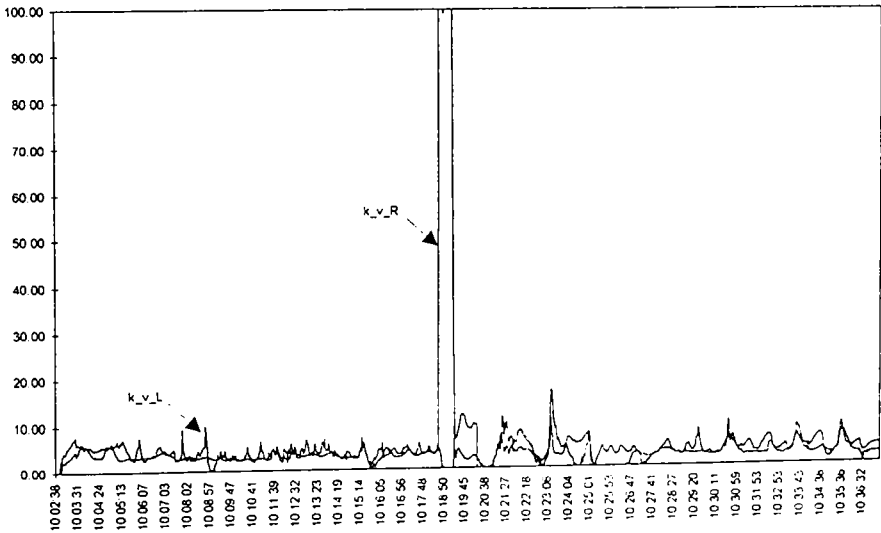
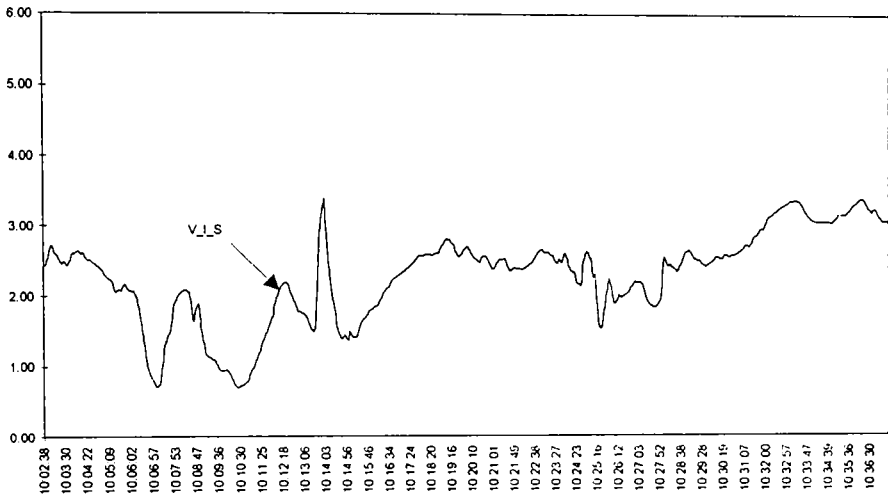
9.6 Testul 5 - Comportarea la pornire la cald

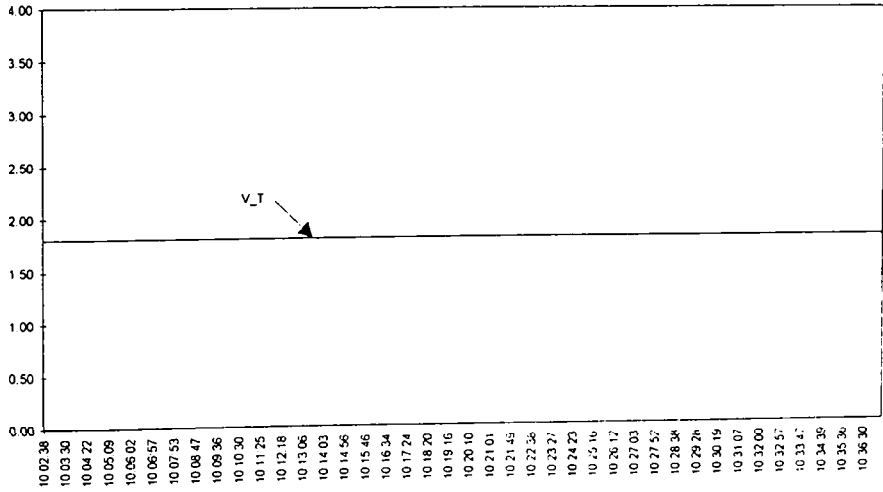
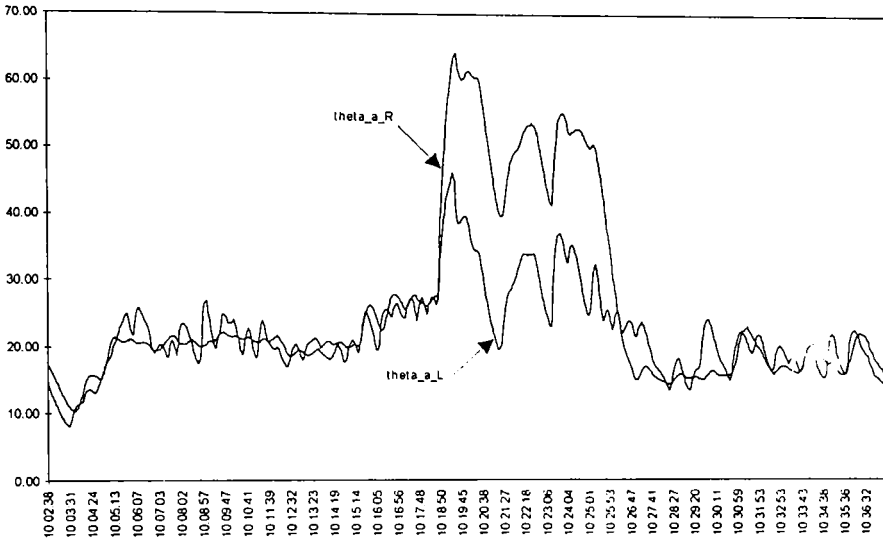
În cadrul acestui test, se realizează o pornire la cald, urmărindu-se evoluția temperaturii interioare.

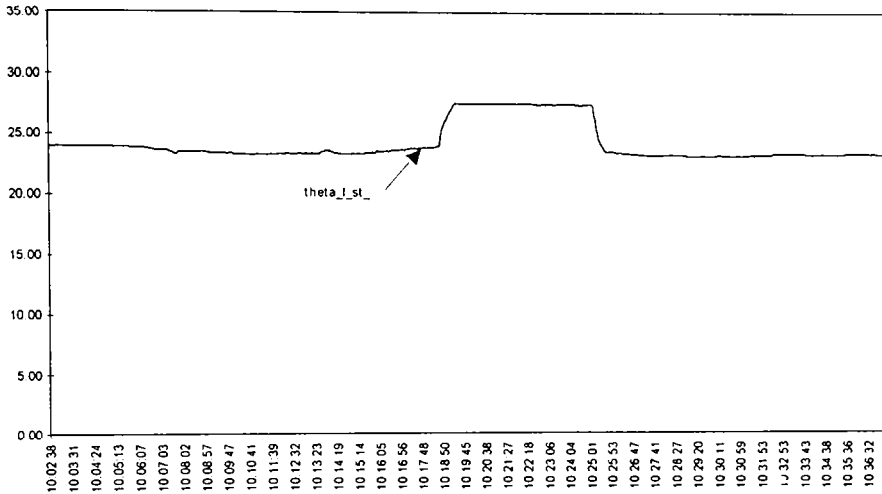
Testul a fost realizat în data de 16 iulie, între orele 10:02 și 10:36. Temperatura exterioară a fost medie (22 ... 24 °C). Deplasarea s-a făcut în oraș, pe autostradă, apoi din nou în oraș. Iluminarea solară a fost medie, iar debitul de aer, relativ redus.











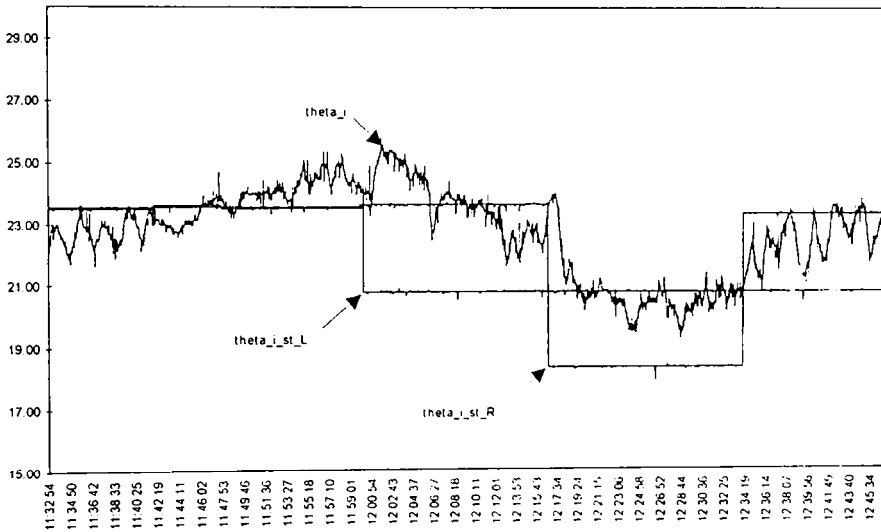
Pe baza formelor de undă reprezentate anterior rezultă următoarele concluzii:

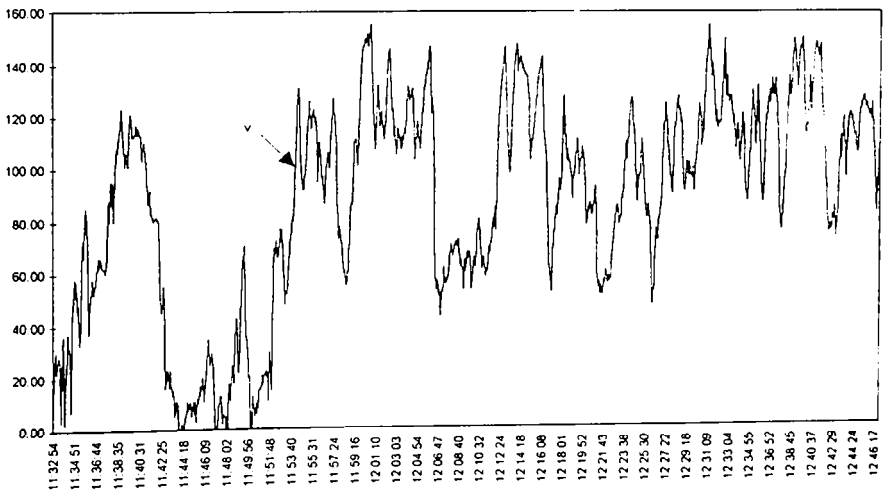
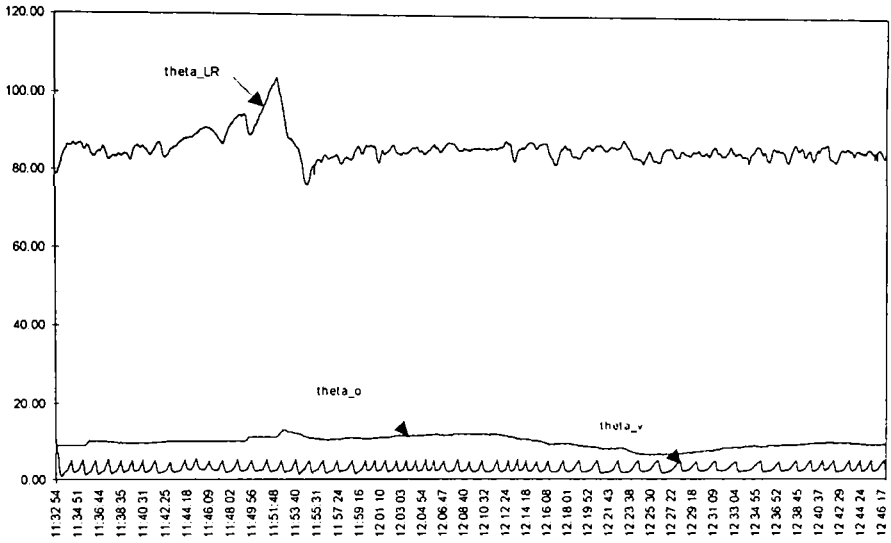
- Temperatura interioară pornește de la o valoare relativ ridicată (28 °C), determinată de temperatura exterioară și de iluminarea solară. Lichidul de răcire este cald, iar temperatura în vaporizator, suficient de coborâtă.
- Temperatura interioară atinge valoarea dorită după aproximativ 1,5 minute.
- Comportarea în regim tranzitoriu, atât la pornire cât și la modificarea prescrierii, sunt similare celor din Testul 1, corespunzând aceluiași parametri de acordare.
- Corecția fiziologică a temperaturii interioare prescrise este influențată de prescriere și, slab, de iluminarea solară și de temperatura exterioară.

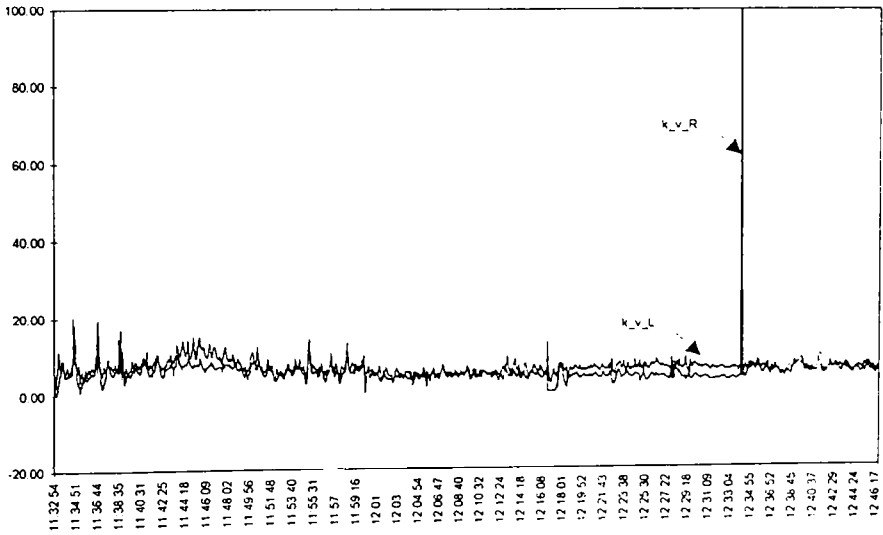
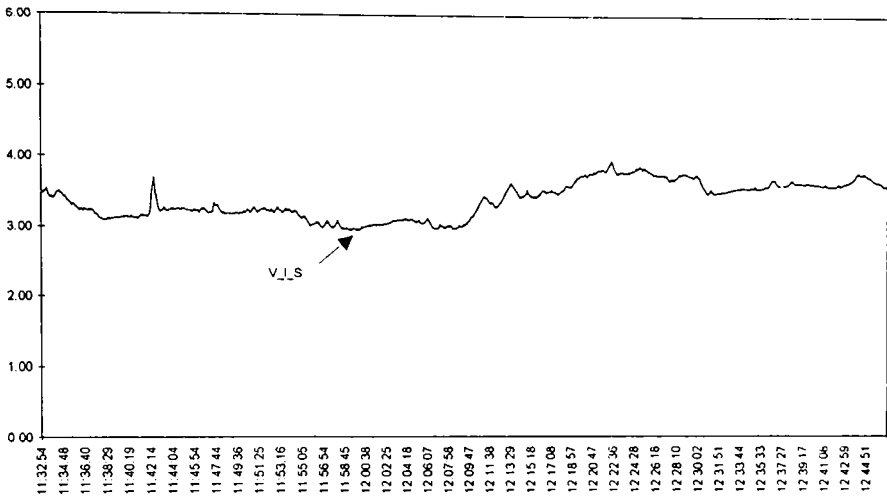
9.7 Testul 6 - Compensarea stânga-dreapta

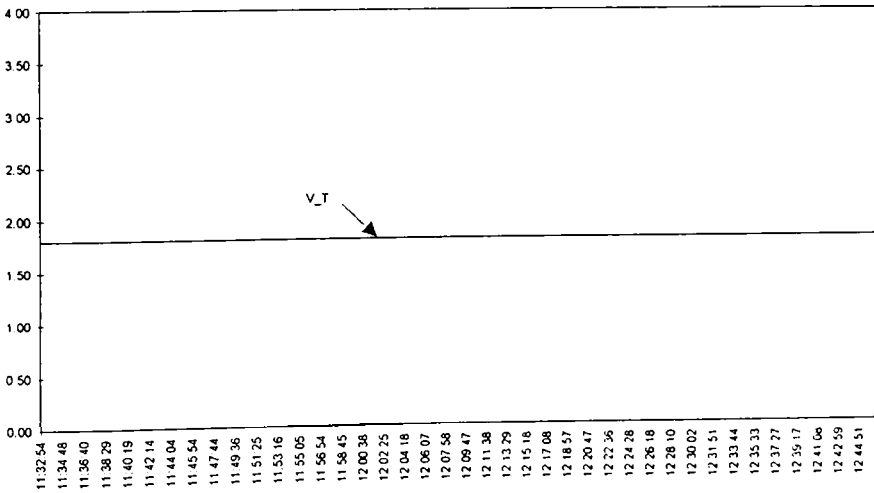
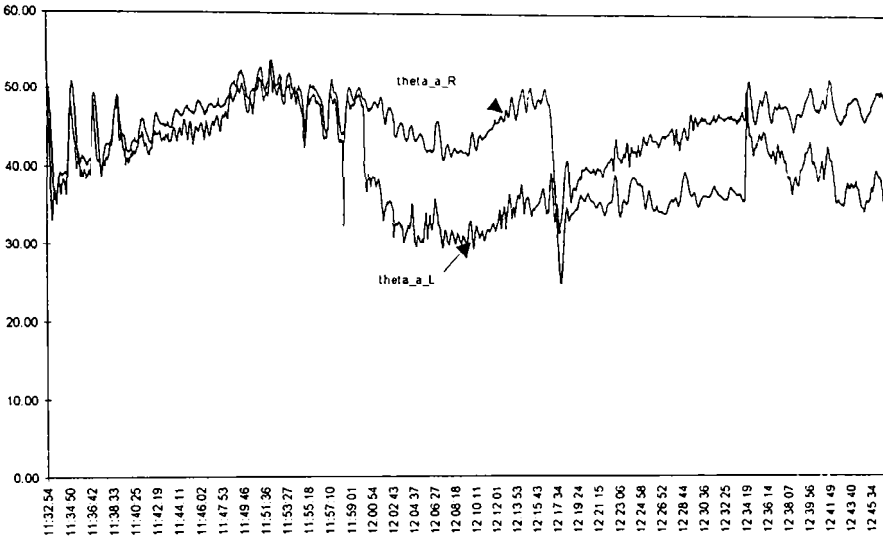
În cadrul acestui test, se realizează modificarea celor două prescrieri, urmărindu-se evoluția temperaturilor aerului suflat.

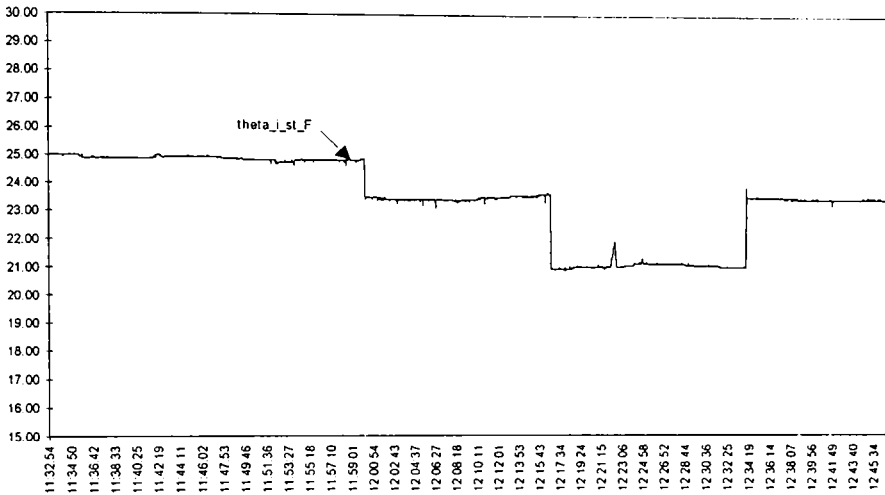
Testul a fost realizat în data de 24 octombrie, între orele 11:32 și 12:45. Temperatura exterioară a fost relativ scăzută (10 °C). Deplasarea s-a făcut cu viteză variabilă. Iluminarea solară a fost scăzută, iar debitul de aer, relativ redus.











Pe baza formelor de undă reprezentate anterior rezultă următoarele concluzii:

- La reducerea temperaturii prescrise pentru partea dreaptă (ora 12:17:34), temperatura aerului suflat în dreapta scade. Temperatura interioară scade și ea, înspre media celor două prescrieri.

9.8 Concluzii

- ⇒ Măsurătorile experimentale reprezintă o etapă indispensabilă în acordarea regulatorului de temperatură pentru climatizarea auto.
- ⇒ Realizarea măsurătorilor experimentale a presupus implementarea unei funcții speciale în programul de reglare și utilizarea unui calculator personal extern, conectat cu sistemul de comandă a climatizării.
- ⇒ Mărimile necesare pentru aprecierea calității reglării sunt: temperaturile interioare prescrise, perturbațiile externe (temperatura exterioară, iluminarea solară, viteza de deplasare, temperatura lichidului de răcire, temperatura în vaporizator), mărimile de comandă pentru ventilă, temperaturile aerului suflat, temperatura interioară. Pentru acordare este necesară și examinarea unor variabile interne ale regulatorului de temperatură.
- ⇒ Testele au urmărit, printre altele, următoarele aspecte: comportarea tranzitorie la modificarea prescrierii și a perturbațiilor externe; comportarea în regim staționar: pomirea la rece și la cald; compensarea stânga / dreapta.
- ⇒ Rezultatele testelor evidențiază o bună calitate a reglării, în toate regimurile studiate. Anumite probleme (supracreștere și oscilații), apărute în prime fază a punerii la punct, au fost eliminate pe parcurs.

10. Concluzii

În cele ce urmează se realizează o prezentare sistematică a concluziilor formulate pe parcursul lucrării.

10.1 Sisteme de climatizare pentru automobile

În această secțiune sunt prezentate principalele concluzii ale autorului, rezultate în urma elaborării sintezei bibliografice din Capitolele 1 și 2, referitoare la sistemele de climatizare pentru automobile și la reglarea automată a temperaturii în aceste sisteme.

10.1.1 Probleme generale

Senzația subiectivă de confort a pasagerilor din automobile este determinată de un set de condiționări fizice, intermediare și fiziologice. Sistemele de climatizare acționează asupra acelor parametri care determină *gradul de confort termic*, și anume temperatura, viteza și distribuția aerului.

Climatizarea automobilelor este considerabil mai dificilă decât cea a locuințelor, principalele cauze fiind următoarele:

- iluminarea solară combinată cu efectul de seră;
- izolația termică mai slabă;
- debitul mult mai mare de aer;
- necesitatea evacuării umidității generate de pasageri.

Sistemele de climatizare utilizate în automobile îndeplinesc următoarele *funcții principale*:

- pomparea aerului și dirijarea corespunzătoare a fluxurilor de aer;
- încălzirea aerului suflat;
- răcirea aerului suflat;
- reglarea automată a parametrilor aerului suflat (temperatură, viteză, distribuție).

10.1.2 Sisteme de climatizare pentru automobile

Sistemele de climatizare pentru automobile conțin, de regulă, patru *sub-sisteme*, corespunzătoare funcțiilor enumerate mai sus:

- sub-sistemul de ventilație;
- sub-sistemul de încălzire;
- sub-sistemul de răcire;
- regulatorul electronic.

Pentru sistemele de climatizare utilizate în automobile există două *variante constructive* distincte:

- cu controlul debitului lichidului de răcire;
- cu controlul proporției amestecului de aer încălzit și aer răcit.

Dependent de variantă, structura sistemului de comandă este diferită. Sistemele de comandă folosite curent în sistemele de climatizare auto pot fi grupate în trei *clase de performanță*:

- cu comanda sub-sistemului de încălzire;
- cu comanda independentă a sub-sistemelor de încălzire și răcire;
- cu comanda integrată a sub-sistemelor de încălzire, răcire și ventilație.

Pe lângă regimul normal de climatizare, trebuie asigurate o serie de *regimuri speciale* de dezaburire, ventilație, economic, aer recirculat, etc., în care comanda se realizează diferit.

Proiectarea reguletoarelor de temperatură trebuie să aibă în vedere, pe lângă obținerea unui grad de confort cât mai bun, și o *operare cât mai simplă*, cu posibilitatea *reglajelor individuale* pentru fiecare pasager (cel puțin pentru locurile din față).

10.1.3 Reglarea temperaturii în sistemele de climatizare auto

Reglarea temperaturii în sistemele de climatizare auto ridică *probleme deosebite*, din următoarele motive:

- debitului mare de aer suflat induce o tendință accentuată de instabilitate (comportare oscilantă);
- mărimile perturbatoare externe (iluminarea solară, temperatura exterioară, viteza de deplasare, temperatura lichidului de răcire, etc.) au o influență puternică asupra procesului; reguletoarele trebuie să compenseze, pe cât posibil, aceste influențe;
- reglarea independentă a temperaturii, pentru fiecare pasager în parte, este îngreunată de influențele reciproce, datorate amestecării aerului în interiorul cabinei;
- comanda optimă a debitului de aer suflat este o sarcină relativ dificilă, datorită cerințelor contradictorii determinate, pe de o parte, de un confort optim (debit mic) și, pe de altă parte, de o reglare eficientă a temperaturii (debit mare).

10.1.4 Proiectarea și acordarea reguletoarelor de temperatură

Datorită comportării termice complexe a interiorului automobilului, acesta nu poate fi caracterizat prin modele simple. În consecință, *proiectarea reguletoarelor și a blocurilor de compensare* este dificilă prin metode analitice.

La automobilele de clasă superioară, unde se urmărește asigurarea unui grad ridicat de confort, sistemele de comandă a climatizării devin foarte complexe. Chiar dacă aceasta nu pune probleme deosebite la implementare, *acordarea* este foarte dificilă, datorită numărului mare de parametri care trebuie determinați. Complexitatea modelului termic îngreunează, de asemenea, acordarea prin simulare. De aceea, punerea la punct se realizează prin ajustări succesive ale parametrilor, pe baza unor măsurători pe automobilul real.

Corelarea celor două aspecte (numărul mare de parametri și necesitatea acordării experimentale) impune efectuarea unui număr mare de teste, în condiții climatice diverse, conducând la creșterea costului total al proiectării și la prelungirea timpului necesar finalizării proiectului. În acest context, *utilizarea reguletoarelor fuzzy* poate oferi avantaje importante, așa cum rezultă din Capitolele 6-9 ale prezentei lucrări.

10.2 Modelarea comportării termice a interiorului automobilelor

În această secțiune sunt prezentate concluziile obținute de autor prin dezvoltarea unui set de modele termice simplificate, prin analiza unui model termic detaliat preluat din bibliografie, precum și prin implementarea proprie, testarea și aplicarea modelului termic detaliat.

10.2.1 Probleme generale

Modelele termice ale automobilelor sunt *necesare* atât pentru dimensionarea sistemelor de climatizare (de exemplu, calculul puterii agregatului de răcire), cât și pentru acordarea reguletoarelor de temperatură aferente.

Modelele termice cu un grad ridicat de precizie sunt *complexe*, din următoarele motive:

- interiorul automobilelor are o comportare termică relativ complexă, afectată de factori de influență multipli: izolația termică, iluminarea solară, inerția termică a corpurilor din interior, energia termică emisă de pasageri, etc.;
- sub-sistemele de încălzire/răcire a aerului au, de asemenea, o comportare complexă, neliniară, afectată de parametri variabili.

10.2.2 Elaborarea modelelor termice

În funcție de scopul urmărit, se pot utiliza modele mai simple, dar mai puțin precise, sau modele mai complexe și mai precise. Astfel, în capitolul 3 se dezvoltă, pe baza relațiilor fizice, un *set de modele termice simplificate*, în care, pornind de la incinta ideală, se introduc pe rând diverse efecte perturbatoare:

- surse adiționale de căldură: radiația solară, căldura emisă de pasageri;
- influența izolației termice imperfecte a cabinei;
- inerția termică a corpurilor din interior;
- comportarea sub-sistemelor de încălzire/răcire a aerului suflat.

Modelul termic detaliat, prezentat în același capitol, ia în considerare toate sursele de căldură semnificative:

- sistemul de climatizare (reprezintă sursa controlată, care permite reglarea temperaturii interioare)
- radiația solară, convertită în căldură de către caroserie, ferestre și obiectele interioare;
- compartimentul motorului;
- podeaua și compartimentul portbagajului;
- motorul instalației de climatizare;
- pasagerii.

Utilizarea acestui model impune cunoașterea unui număr mare de parametri ai automobilului, care nu sunt disponibili în mod curent, deoarece măsurarea lor necesită condiții speciale.

10.2.3 Implementarea modelelor termice

În Capitolul 4 se prezintă implementarea realizată de autor pentru o variantă a modelului termic detaliat al interiorului cabinei unui automobil. S-a pornit de la modelul detaliat descris în Capitolul 3, operând unele simplificări, în scopul eliminării parametrilor a căror determinare este dificilă. Modelul a fost testat prin calcularea răspunsului la modificarea principalelor mărimi de influență. Utilitatea modelului a fost exemplificată printr-o aplicație: proiectarea unui regulator de temperatură clasic, de tip PI.

S-a constatat că *mediul de simulare* MATLAB/SIMULINK permite o implementare comodă și eficientă a modelelor pentru sisteme dinamice.

S-a observat, de asemenea, că studierea comportării modelului detaliat, chiar într-o aplicație de reglare clasică, permite înțelegerea mai bună a sistemului real (referitor, de exemplu, la efectul perturbațiilor externe sau al modificării parametrilor). Concluziile rezultate s-au dovedit utile pentru proiectarea și acordarea regulatorului fuzzy.

10.3 Reglarea fuzzy a sistemelor de climatizare pentru automobile

În această secțiune sunt prezentate concluziile obținute de autor prin analiza aplicațiilor de reglare fuzzy a temperaturii, disponibile în bibliografie, precum și prin elaborarea, acordarea prin simulare, implementarea și testarea unui regulator fuzzy original.

10.3.1 Aspecte generale privind utilizarea reguletoarelor fuzzy

Deoarece în proiectarea reguletoarelor fuzzy nu se utilizează un model matematic al procesului, aceste reguletoare se pot aplica și în cazul *proceselor neliniare sau foarte complicate*, al cărui model matematic fie nu poate fi obținut, fie este prea complex pentru a permite proiectarea unor reguletoare clasice.

Deoarece nu se bazează pe un model matematic exact al procesului, reguletoarele fuzzy au o comportare mai bună în cazul *modificării parametrilor procesului* (sunt mai robuste), comparativ cu reguletoarele clasice.

Pe de altă parte, în cazul unor procese cu model matematic simplu, cunoscut, și parametri constanți, reguletoarele fuzzy nu pot depăși performanțele reguletoarelor clasice, proiectate prin metode exacte.

10.3.2 Utilizarea reglării fuzzy în sistemele de control al temperaturii și climatizare

Sistemele de control al temperaturii sunt neliniare, având, de regulă, și parametri variabili. În consecință, utilizarea reglării fuzzy constituie o alternativă avantajoasă. Literatura de specialitate descrie mai multe astfel de exemple, iar unii constructori de echipamente pentru automatizare produc reguletoare de temperatură fuzzy.

Sistemele de climatizare ridică probleme mai dificile decât simpla reglare a temperaturii. Pe lângă neliniarități și variația parametrilor, aceste sisteme sunt caracterizate prin cerințe deosebite (confort, precizia reglării, solicitarea minimă a instalației, eficiența energetică ridicată).

În literatura avută la dispoziție sunt descrise, principal, două variante de reguletoare pentru sistemele de climatizare din locuințe și o variantă specifică pentru automobile. Nu sunt prezentate detaliile de proiectare și implementare, nici performanțele obținute. Nu au fost găsite alte referințe privind utilizarea reglării fuzzy în sistemele de climatizare auto.

10.3.3 Elaborarea reguletoarelor fuzzy pentru sistemele de climatizare auto

10.3.3.1 Aspecte generale

Proiectarea reguletoarelor fuzzy presupune, în general, alegerea funcțiilor de apartenență pentru termenii variabilelor lingvistice, a bazei de reguli și a operatorilor pentru inferență și defuzificare.

Elaborarea unui reguletor fuzzy pentru *sistemele de climatizare auto* impune, pe de altă parte, sistematizarea principiilor esențiale ale reglării, specifice sistemelor de climatizare auto. Aceste principii rezultă din:

- experiența proiectantului (obținută prin proiectarea sistemelor de reglare clasice);
- cunoștințe din medicină și psihologie;
- caracteristicile tehnice ale instalației de climatizare.

Dintre principiile enumerate în secțiunea 6.1, următoarele reprezintă, sau generează în implementare, contribuții originale:

- experiența umană, determinată prin analiza reacțiilor în cazul reglării manuale
 - reglarea temperaturii
 - în cazul radiației solare puternice, există tendința de a reduce temperatura
 - noaptea, există tendința de a ridica temperatura
 - la viteze ridicate, există tendința de a scădea temperatura
 - reglarea debitului de aer
 - atâta timp cât aerul suflat nu are o temperatură adecvată (de exemplu la start, cu lichidul de răcire rece), se reduce debitul de aer, pentru a evita senzația de disconfort;

- în situații extreme (temperatura interioară mult prea mare sau mult prea mică) după atingerea temperaturii adecvate a aerului suflat, există tendința de mărire a debitului de aer până la atingerea unei senzații de confort
- principii din medicină și psihologie
 - modificarea temperaturii trebuie să se realizeze totuși nu prea repede, pentru a evita îmbolnăvirea pasagerilor
 - răspunsul sistemului la o modificare a temperaturii interioare prescrise trebuie să fie suficient de rapid; altfel, există tendința de a modifica prescrierea, în sensul accentuării schimbării dorite, ceea ce conduce la ajustări succesive și la oscilații mari ale temperaturii interioare
 - reglarea automată poate fi considerată optimă atunci când “câștigă încrederea” pasagerilor, aceștia fiind convingși că reglarea manuală nu poate oferi un confort superior
 - tipul de climatizare dorit depinde de zona geografică, de componentele etnice sau educative; de exemplu, americanii preferă o temperatură scăzută și un debit mare de aer, în timp ce europenii optează pentru un debit de aer cât mai redus și temperaturi în jur de 24 °C
- condiții tehnice relative la sistemul de climatizare
 - în cazul startului cu motorul cald și dacă temperatura exterioară nu este foarte scăzută, se recomandă limitarea temperaturii aerului suflat la 50 - 65 °C

10.3.3.2 Elaborarea sistemului de reglare original, dezvoltat de autor

Sistemul de comandă propus de autor pornește de la schema bloc a sistemelor de comandă pentru climatizarea auto, introdusă în Capitolul 2, implementând cu ajutorul logicii fuzzy cele mai importante blocuri: regulatorul de temperatură și comanda turbinei de aer.

Blocul regulator de temperatură are o structură originală, propusă de autor și denumită “quasi-PI” (diferită de regulatoarele “fuzzy-PI” convenționale). Adoptarea acestei structuri permite simplificarea acordării, folosind experiența dobândită la proiectarea reglatoarelor clasice, de tip PI. Datorită funcțiilor de transfer neliniare ale blocurilor reglatoare fuzzy și datorită mărimilor de intrare suplimentare ale acestora, structura “quasi-PI” permite obținerea unor performanțe superioare reglării clasice, în condițiile unei acordări corecte. Proiectarea regulatorului “quasi-PI” se face după același principiu ca și în cazul reglatoarelor PI clasice: se optimizează întâi componenta “quasi-P”, după care se adaugă, cu ponderea necesară, componenta “quasi-I”.

Corecțiile fiziologice ale temperaturii interioare în funcție de temperatura exterioară și iluminarea solară, destinate creșterii gradului de confort, trebuie specificate pe baza experienței proiectantului. În acest condiții, implementarea corecțiilor cu ajutorul unor blocuri de inferență bazate pe logica fuzzy permite specificarea directă a regulilor de corecție, prin intermediul regulilor de inferență. Se exploatează astfel capacitatea sistemelor fuzzy de a capta experiența proiectantului sub forma unor reguli lingvistice.

Prin utilizarea unor “module” de inferență fuzzy identice, atât pentru reglare, cât și pentru corecții, se obține o simplificare importantă a implementării.

10.3.4 Testarea prin simulare a regulatorului fuzzy pentru sistemele de climatizare auto

10.3.4.1 Aspecte generale

Acordarea experimentală a reglatoarelor fuzzy este impusă de absența unor metode analitice de verificare a stabilității și de acordare. În aceste condiții, utilizarea *simulării pe calculator* permite:

- reducerea timpului necesar pentru punerea la punct;
- studiul influenței perturbațiilor externe și al parametrilor procesului asupra performanțelor reglării; în multe situații practice, acest studiu este dificil de realizat pe modelul experimental

(de exemplu, realizarea unei variații treaptă a temperaturii exterioare la automobile ar necesita o instalație de climatizare de mari dimensiuni).

Pe de altă parte, precizia simulării este condiționată de precizia modelului procesului. Reglarea fuzzy se utilizează în special pentru procese complexe, neliniare, a căror modelare este dificilă. În aceste cazuri, acordarea prin simulare oferă doar *rezultate aproximative*, impunându-se o acordare suplimentară, pe sistemul real.

Sistemul *SIMULINK* din mediul de simulare MATLAB oferă facilitățile necesare pentru modelarea reguletoarelor fuzzy și a proceselor cu blocuri liniare și neliniare, prin intermediul unor algoritmi de simulare a sistemelor dinamice, cu un grad ridicat de precizie și eficiență.

10.3.4.2 Testarea prin simulare a sistemului de reglare original, dezvoltat de autor

Simularea reguletoarelor fuzzy din sistemul de climatizare, descrise în Capitolul 6, împreună cu modelul termic detaliat al interiorului cabinei, introdus în Capitolul 4, conduce la rezultate bune, în ceea ce privește atât răspunsul la modificarea prescrierii, cât și compensarea perturbațiilor externe. Simularea validează structura de reglator “quasi-PI”, propusă de autor pentru reglarea temperaturii interioare. Se pune în evidență efectul favorabil al componentei “quasi-integratoare”. Prin calcularea independentă a celor două componente ale comenzii, simularea permite o acordare optimă, în care ponderea principală să aparțină componentei “quasi-proporționale”.

Simularea permite studierea influenței debitului de aer asupra funcționării buclei de reglare a temperaturii interioare. Alegerea corectă a acestui parametru este deosebit de importantă, deoarece determină atât performanțele reglării, cât și gradul de confort; aceste două obiective conduc, de multe ori, la cerințe contradictorii, fiind necesară găsirea unui compromis optim.

10.3.5 Implementarea reglatorului fuzzy pentru sistemele de climatizare auto

10.3.5.1 Aspecte generale

Pentru reguletoarele fuzzy există mai multe *posibilități de implementare*, atât hardware cât și software. Acestea le corespund diverse nivele de performanță și cost. Selecția modalității optime de implementare trebuie realizată în funcție de specificul fiecărei aplicații.

Punerea la punct a aplicațiilor fuzzy urmează o succesiune de *etape* de proiectare și testare bine precizate, prezentate în lucrare.

Utilizarea *mediilor de dezvoltare* specializate permite reducerea considerabilă a timpului necesar pentru proiectarea aplicațiilor fuzzy. Totuși, dezvoltarea este posibilă și fără folosirea acestor medii, prin scrierea directă a codului. Această ultimă abordare permite obținerea unui cod mai eficient, în anumite situații concrete.

10.3.5.2 Implementarea sistemului de reglare original, elaborat de autor

Aplicația avută în vedere, și anume reglarea fuzzy a sistemelor de climatizare, are următoarele *caracteristici specifice*:

- proces relativ lent, cu constante de timp de ordinul secundelor ≠ minutelor;
- producție de serie mare, impunând un cost cât mai redus al suportului hardware;
- necesitatea unei bune flexibilități, pentru adaptare la diferite modele de automobile și pentru a permite optimizări ulterioare.

Caracteristicile de mai sus au determinat folosirea unui microcontroler uzual, de 8 biți, dotat cu o gamă largă de periferice: Philips 80C552. Sistemul cu microcontroler realizează și celelalte funcții necesare pentru comanda climatizării.

Codul care implementează regulatorul este scris în limbaj de asamblare, pentru a obține o eficiență maximă. Implementarea a urmărit, în primul rând, minimizarea timpului de calcul, prin optimizarea modului de reprezentare pentru funcțiile de apartenență și baza de reguli. Toate calculele corespunzătoare algoritmului de comandă se execută în mai puțin de 20 ms. Regulatele fuzzy necesită, de regulă, mai mult spațiu de memorie pentru program și variabile. Pentru eliminarea acestui dezavantaj, atât blocurile de reglare fuzzy, cât și blocurile de corecție bazate pe logica fuzzy sunt implementate printr-o subrutină unică, conducând la reducerea dimensiunii codului.

Punerea la punct a regulatorului fuzzy s-a dovedit mai rapidă și mai ușor controlabilă, decât în cazul regulatelelor clasice, de tip PID.

10.3.6 Rezultate experimentale

10.3.6.1 Aspecte generale

Precizia limitată a modelelor folosite la simulare face ca acordarea experimentală să reprezinte o etapă indispensabilă în dezvoltarea regulatelelor de temperatură pentru climatizarea auto. În cazul regulatelelor fuzzy, absența unei metode algoritmice de proiectare face ca acordarea experimentală să fie și mai importantă.

Mărimile necesare pentru *aprecierea calității reglării* sunt:

- temperaturile interioare prescrise;
- perturbațiile externe (temperatura exterioară, iluminarea solară, viteza de deplasare, temperatura lichidului de răcire, temperatura în vaporizator);
- mărimile de comandă pentru ventile;
- temperaturile aerului suflat;
- temperatura interioară.

Pentru *acordare* este necesară și examinarea unor variabile interne ale regulatorului de temperatură.

Testele urmăresc calitatea reglării în următoarele *regimuri de funcționare*:

- comportarea tranzitorie la modificarea prescrierii și a perturbațiilor externe;
- comportarea în regim staționar;
- pornirea la rece și la cald;
- compensarea stânga / dreapta.

10.3.6.2 Experimentarea sistemului de reglare original, dezvoltat de autor

Realizarea măsurătorilor experimentale a presupus implementarea unei funcții speciale în programul de reglare și utilizarea unui calculator personal extern, conectat cu sistemul de comandă a climatizării.

În Capitolul 9 sunt prezentate câteva dintre graficele obținute pe parcursul testării. *Rezultatele testelor* evidențiază o bună calitate a reglării, în toate regimurile studiate. Anumite probleme (supracreștere și oscilații), apărute în prime fază a punerii la punct, au fost eliminate, în scurt timp, pe parcursul

10.4 Contribuții originale

- formularea sistematică a cerințelor de confort specifice climatizării auto;
- prezentarea sintetică a sistemelor de climatizare auto și a problematicii reglării acestora, cu evidențierea dezavantajelor soluțiilor clasice existente;
- elaborarea unui set de modele termice pentru automobile, bazate pe legile fizice, și prezentarea comparativă a unui model termic detaliat;
- implementarea în MATLAB/SIMULINK a unei variante a modelului termic detaliat, testarea prin simulare a modelului și formularea unor concluzii privind comportarea termică a automobilului, utilizabile la proiectarea regulatorului fuzzy;
- prezentarea sintetică a principiilor reglării fuzzy;
- prezentarea rezultatelor unui studiu bibliografic asupra utilizării reglării fuzzy în sistemele de control al temperaturii și climatizare, evidențiindu-se absența unor realizări similare (în limita surselor bibliografice disponibile);
- sistematizarea cerințelor esențiale ale reglării în sistemele de climatizare, pornind de la experiența de proiectare existentă, precum și de la considerente medicale, psihologice și tehnice;
- formularea unor *concepte originale referitoare la cerințele reglării*:
 - ajustarea corecțiilor fiziologice în funcție de prescrieri, obținând o mai bună adaptare la specificul persoanei (“recunoscută” pe baza prescrierii pe care o realizează); acest comportament este implementat după cum urmează:
 - ajustarea corecției fiziologice dependente de iluminarea solară, în funcție de temperatura interioară prescrisă: blocul FZ-CIS1 din Fig. 6.2;
 - ajustarea corecției fiziologice dependente de temperatura exterioară, în funcție de temperatura interioară prescrisă: blocul FZ-CTE din Fig. 6.2;
 - ajustarea corecției fiziologice dependente de iluminarea solară, în funcție de debitul de aer prescris: blocul FZ-CIS2 din Fig. 6.14;
 - adaptarea debitului de aer suflat la temperatura acestuia, pentru obținerea unui confort maxim; acest comportament este implementat blocul FZ-CTS din Fig. 6.14, după cum urmează:
 - utilizarea unui debit redus atâta timp cât aerul suflat nu are o temperatură adecvată;
 - în condiții de dezechilibru pronunțat al buclei de reglare pentru temperatura interioară, creșterea debitului după atingerea temperaturii adecvate a aerului suflat;
 - reducerea debitului la un nivel minim necesar, după atingerea echilibrului;
 - asigurarea unui răspuns suficient de rapid la modificarea prescrierii pentru temperatura interioară; astfel, se evită tendința naturală a pasagerului de a modifica repetat prescrierea, câștigând “încrederea” acestuia pentru reglarea automată; acest comportament este asigurat de regulatorul de temperatură din Fig. 6.2;

- limitarea ratei de modificare a temperaturii interioare, pentru a evita îmbolnăvirea pasagerilor; acest comportament este implementat blocul FTP din Fig. 6.1; se impune realizarea unui compromis între această cerință și cea formulată în paragraful anterior;
- limitarea superioară a temperaturii aerului suflat, pentru a nu crea o senzație de disconfort (cu excepția temperaturilor exterioare foarte scăzute);
- scăderea ușoară a temperaturii interioare la viteze ridicate, din considerente fiziologice;
- elaborarea unei *structuri originale a regulatorului de temperatură* (fig. 6.2), bazată pe regulatorul PI clasic, dar diferită de regulatoarele “fuzzy-PI” descrise în literatură; structura propusă asigură următoarele avantaje:
 - permite utilizarea unor mărimi intermediare cu semnificație fiziologică precisă: temperatura interioară corectată fiziologic $\theta_{i,r}^*$ și componenta “quasi-proporțională” a temperaturii prescrise pentru aerul suflat $\theta_{r,p}^*$ din Fig. 6.2;
 - permite utilizarea a două mărimi de intrare distincte: temperatura interioară prescrisă compensată θ_{c}^* și cea corectată fiziologic $\theta_{i,r}^*$; astfel, considerentele fiziologice și cele psihologice (date de prescriere) pot fi tratate în mod distinct de către regulator;
 - permite introducerea treptată a componentei “quasi-”, la apropierea de echilibru a buclei de reglare pentru temperatura interioară, crescând gradul de stabilitate al regulatorului;
 - permite acordarea independentă a regulatorului “quasi-P”, a regulatorului “quasi-I”, a blocurilor de corecție fiziologică și a celor de compensare;
 - implementarea corecțiilor fiziologice prin intermediul unor blocuri fuzzy, ceea ce permite utilizarea unor formulări lingvistice și deci simplificarea acordării;
- elaborarea unei *metode originale de acordare* a blocurilor fuzzy de corecție fiziologică, pornind de la modificările prescrierii manuale în condițiile utilizării unui regulator P acordat și compensat;
- implementarea în MATLAB/SIMULINK a unui model parțial al regulatorului de temperatură; testarea și acordarea prin simulare a regulatorului; testarea prin simulare a blocurilor de corecție fiziologică;
- analiza comparativă a posibilităților de implementare a regulatoarelor fuzzy și selecția alternativei optime pentru cazul climatizării auto;
- analiza comparativă a variantelor de dezvoltare a aplicațiilor fuzzy și selecția alternativei optime pentru cazul concret avut în vedere;
- *implementarea efectivă* a regulatorului fuzzy pentru sistemele de climatizare auto, în limbaj de asamblare, folosind microcontrolerul Philips 80C552;
- *optimizarea implementării*:
 - din punct de vedere al timpului de calcul, prin alegerea adecvată a modului de reprezentare pentru funcțiile de apartenență și baza de reguli;
 - din punct de vedere al spațiului de memorie, prin utilizarea unor blocuri fuzzy identice în schemele bloc din Fig. 6.2 și 6.14;
- *testarea experimentală* a regulatorului fuzzy pe un autoturism Mercedes E220, calitatea reglării fiind atestată de fișele de observație ale persoanelor care au participat la teste.

A1. Implementarea software a blocurilor reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy

În această anexă se prezintă codul sursă, în limbajul de asamblare al microcontrolerului 80C552, dezvoltat de autor pentru implementarea blocurilor reglatoare și de corecție fuzzy, utilizate în regulatorul de temperatură introdus în Capitolul 6. Principiul implementării software a acestor blocuri este descris în detaliu în Capitolul 8.

```

$NOMOD51
$DEBUG
INCLUDE 8XC552.INC
TITLE FUZZY NORM MODUL
RSEG FUZ_SEG
;-----+-----;
; Numele Subprogramului: FUZ
;-----+-----;
; Functie: Inferenta fuzzy (fara considerarea factorilor de plauzibilitate)
;-----+-----;
; Parametri de intrare: nici unul (in memoria RAM exista o zona de date care
; contine adresele pentru: variabilele de intrare,
; termenii variabilelor de intrare si iesire, reguli)
;-----+-----;
; Parametri de iesire: Marimea de iesire a regulatorului, in A
; valori intre 0 si 255
;-----+-----;
; Registre utilizate: A, R0, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, DPTR, B
;-----+-----;
; Registre modificate: A, R0, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, DPTR, B
;-----+-----;
; Biti utilizati: toti bitii din PSW
;-----+-----;
; Biti modificati: toti bitii din PSW
;-----+-----;
; Timp de executie: 5-10ms
;-----+-----;
;-----+-----;
; Subprograme exportate
;-----+-----;
GLOBAL FUZ
;-----+-----;
;-----+-----;
; Constante importate
;-----+-----;
GLOBAL K_FF ; Adresa zonei parametrilor regulatorului
;-----+-----;
; Schema bloc a regulatorului:
;-----+-----+
; x1--+ | | | | | | | |
; | | | | | | | |
; | | | | | | | |
; x2--+ | | | | | | | |
; | | | | | | | |
; +-----+-----+
; x1, x2, y: 8 biti, fara semn
;-----+-----;
; Zona de date cu adresele marimilor crisp de intrare si adresele
; tabelor cu termenii variabilelor lingvistice (in RAM):
; K_FF:
; DB 1 ;intrarea crisp x1
; DB 1 ;octetul superior al tabeli termenilor pentru X1
; DB 1 ;octetul inferior al tabeli termenilor pentru X1
; DB 1 ;intrarea crisp x2

```


Implementarea software a blocurilor reguloare și de corectie bazate pe logica fuzzy

```
-----  
; Formula de calcul pentru iesirea crisp  
; SUM pi*ui*si*Ai  
; y = ----- , ui= min(μlj,μ2k)  
; SUM pi*ui*Ai  
;  
; +- (x-aj)/(bj-aj); a <= x < b (Functia 1)  
; |  
; μlj= 1; b <= x <= c (Functia 2)  
; |  
; +- (dj-x)/(dj-cj); c < x <= d (Functia 3)  
;  
; Iesirea poate lua valori doar intre sl si sm  
; Din cauza reprezentarii pe 8 biti fara semn, toate variabilele sint codate  
; corespunzator, deci formula se modifica si ea  
  
FUZ:  
-----  
; fuzzificare  
-----  
; pune pe zero zonele de date MEMBERS1 si MEMBERS2  
MOV R0,#K_FF+7  
MOV R4,#16 ; lungimea celor doua zone de date alaturate  
CLR A  
LMCLR:  
INC R0  
MOV @R0,A  
TP3: DJNZ R4,LMCLR  
  
; fuzzificare x1; se completeaza zona MEMBERS2  
TP4: SETB F0 ; fanion pentru a doua variabila  
TP5: CALL SORT ; rutina de fuzzificare  
  
; fuzzificare x2; se completeaza zona MEMBERS1  
TP6: CLR F0 ; fanion pentru prima variabila  
CALL SORT ; rutina de fuzzificare  
  
; -----  
; inferenta si calcularea sumelor din formula de defuzzificare  
; -----  
TP7: MOV R0,#K_FF+1 ; DPTR <- adr. tab. termenilor pt. x1 (TABLV_X1)  
MOV A,@R0  
MOV DPH,A  
INC R0  
MOV A,@R0  
MOV DPL,A  
CLR A  
  
MOVC A,@A+DPTR ; B <- n (numarul termenilor pentru x1)  
MOV B,A  
  
MOV R0,#K_FF+6 ; DPTR <- adresa tabelului termenilor  
; pentru y si regulilor (TABR_Y)  
MOV A,@R0  
MOV DPH,A  
INC R0  
MOV A,@R0  
MOV DPL,A  
  
MOV R0,#K_FF-1 ; S1 <- 0, S2 <- 0  
; (anularea zonei de date K_FF ... K_FF+7)  
MOV R4,#8  
CLR A  
LFCLR:  
INC R0  
MOV @R0,A  
TP8:
```


Implementarea software a blocurilor reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy

```
DJNZ    R4,LFCLR

TP9:
; Inicializari
FUZINF:
MOV     R2,#K_FF+8      ; R2 <- pointer pentru termenii x1
                          ; (initalizare cu K_FF+8 = MEMBERS1)
MOV     R3,#K_FF+16    ; R3 <- pointer pentru termenii x2
                          ; (initalizare cu K_FF+16 = MEMBERS2)

; Bucla termenilor activati
MATRIX:
; Test termeni activati pentru x1
MOV     A,R2
MOV     R0,A
MOV     A,@R0          ; A <- j (nr. primului termen activat pentru x1)
TP10:   JNZ     MX1
        JMP     DEFUZ   ; nici un termen activat pentru x1 => impartire
TP11:
MX1:    MOV     R7,A     ; R7 <- j (nr. primului termen activat pentru x1)

; Test termeni activati pentru x2
MOV     A,R3
MOV     R0,A
MOV     A,@R0          ; A <- k (nr. primului termen activat pentru x2)
TP12:   JNZ     REGNR   ; exista cel puțin un termen activat pentru x2
                          ; => calc. nr. regulii
TP13:   INC     R2      ; nici un termen activat pentru x2
                          ; => urmatorul termen pentru x1
        JMP     NEXTVAR1

; Calcularea numarului regulii: R1 <- i = j+n*(k-1)
REGNR:  PUSH    B       ;introducere n in stiva
        DEC    A       ;A <- k-1
        MUL   AB       ;n*(k-1)
        ADD   A,R7     ;j+n*(k-1)
        MOV   R1,A     ;R1 <- i = j+n*(k-1)

; Calcularea gradului de activare a regulii: R7 <- μi = min (μ1j,μ2k)
INC     R2             ;R2 = adresa(μ1j)
INC     R3             ;R3 = adresa(μ2k)
MOV     A,R2
MOV     R0,A
MOV     A,@R0
MOV     R7,A          ; R7 <- μ1j (gradul de activ. pt. term. j al x1)
MOV     A,R3
MOV     R0,A
MOV     A,@R0
MOV     B,R7          ; A <- μ2k (gradul de activ. pt. term. k al x2)
MOV     B,R7          ; B <- μ1j
CJNE   A,B,MYTEST

MYTEST: JNC     R7MY     ;A >= R7 -> μi este deja în R7
        MOV   R7,A     ;A < R7 -> μi trebuie transferat din A în R7
                          ;R7 = μi

; S2 <- S2 + μi*Ai (3 bytes = 3 bytes + 1 byte * 1 byte)
R7MY:  MOV     A,R1     ;A <- i (numarul regulii)
DEC    A
MOV     B,#2          ; se inlocuieste cu 3 daca tabela include
                          ; si gradele de plauzibilitate
        MUL   AB       ;A <- (i-1)*2 (adresa Ai)
        MOV   B,R7     ;B <- μi
        MOVC A,@A+DPTR ;A <- Ai (aria pt. term. consecvent al regulii i)
        MUL   AB       ;BA <- μi*Ai
        MOV   R6,B     ;R5 <- LOW(μi*Ai)
        MOV   R5,A     ;R6 <- HIGH(μi*Ai)
```

Implementarea software a blocurilor reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy

```

MOV     R0, #K_FF+7      ;R0 <- adresa BYTE1(S2)
MOV     A, @R0
ADD     A, R5
MOV     @R0, A           ;BYTE1(S2) <- BYTE1(S2)+ BYTE1(μi*Ai)

DEC     R0                ;R0 <- adresa BYTE2(S2)
MOV     A, @R0
ADDC   A, B              ;BYTE2(S2) <- BYTE2(S2)+ BYTE2(μi*Ai)+CY
MOV     @R0, A

DEC     R0                ;R0 <- adresa BYTE3(S2)
MOV     A, @R0
MOV     B, #0
ADDC   A, B              ;BYTE3(S2) <- BYTE3(S2) +CY
MOV     @R0, A

; Preluare sz din tabel
MOV     A, R1            ;A <- i (numarul regulii)
DEC     A                ;A <- i-1
MOV     B, #2           ;se inlocuieste cu 3 daca tabela include
                        ;si gradele de plauzibilitate
MUL     AB              ;A <- (i-1)*2
INC     A                ;A <- (i-1)*2+1 (adresa s1)
MOVC   A, @A+DPTR      ;A <- si

; Calculare (R6, R5, R4) <- μi*Ai*si (3 bytes = 2 bytes * 1 byte)
                        ;(R6, R5) = μi*Ai
                        ;A = si
MOV     B, R5           ;B <- BYTE1(μi*Ai)
MOV     R0, A           ;R0 <- si
MUL     AB              ;AB <- si*BYTE1(μi*Ai)
MOV     R4, A           ;R4 <- BYTE1(μi*Ai*si)
MOV     R1, B           ;B <- BYTE2(si*BYTE1(μi*Ai))
MOV     A, R0           ;A <- si
MOV     B, R6           ;B <- BYTE2(μi*Ai)
MUL     AB              ;AB <- si*BYTE2(μi*Ai)
ADD     A, R1           ;A <- BYTE1(si*BYTE2(μi*Ai))*
                        ;   BYTE2(si*BYTE1(μi*Ai)) = BYTE2(μi*Ai*si)
MOV     R5, A           ;R5 <- BYTE2(μi*Ai*si)
CLR     A
ADDC   A, B             ;A <- BYTE1(si*BYTE2(μi*Ai))+CY = BYTE3(μi*Ai*si)
MOV     R6, A           ;R6 <- BYTE3(μi*Ai*si)

; S1 = S1+μi*Ai*si (4 bytes = 4 bytes + 3 bytes)
MOV     R0, #K_FF+3     ;R0 <- adresa BYTE1(S1)
MOV     A, @R0
ADD     A, R4
MOV     @R0, A         ;BYTE1(S1) <- BYTE1(S1)+ BYTE1(μi*Ai*si)

DEC     R0                ;R0 <- adresa BYTE2(S1)
MOV     A, @R0
ADDC   A, R5
MOV     @R0, A         ;BYTE2(S1) <- BYTE2(S1)+ BYTE2(μi*Ai*si)+CY

DEC     R0                ;R0 <- adresa BYTE3(S1)
MOV     A, @R0
ADDC   A, R6
MOV     @R0, A         ;BYTE3(S1) <- BYTE3(S1)+ BYTE3(μi*Ai*si)+CY

DEC     R0                ;R0 <- adresa BYTE4(S1)
MOV     A, @R0
MOV     B, #0
ADDC   A, B             ;BYTE4(S1) <- BYTE4(S1)+CY
MOV     @R0, A

POP     B                ;extragere n din stiva
INC     R3              ;incrementare pointer pentru termenii lui x2
CJNE   R3, #K_FF+24, TESTR3;testarea depasirii spatiului de memorie

TESTR3: JNC     NEXTVAR1    ;s-au epuizat term. activ. pt. x2 => testare x1
DEC     R2              ;decrementare pointer pentru termenii lui x1

```

Implementarea software a blocurilor reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy

```
MATRIX:      JMP      MATRIX          ;reluarea buclei termenilor
NEXTVAR1:    MOV      R3,#K_FF+16      ;re-initializare pointer pentru termenii lui x1
              ;(cu K_FF+16 = MEMBERS2)
              INC      R2            ;incrementare pointer pentru termenii lui x2
              CJNE     R2,#K_FF+16,TESTR2;testarea depasirii spatiului de memorie
TESTR2:      JC       MATRIX          ;reluarea buclei termenilor
```

```
; -----
; defuzzificare - calcularea fractiei
; -----
; Calculare S1/S2 (rezultatul pe 8 biti, fara semn)
; deimpartit (Di) in K_FF ... K_FF+3
; impartitor (Im) in K_FF+5 ... K_FF+7
; registre de comparare: (R7,R6,R5) (Cm)
; rezultat in K_FF ... K_FF+3
```

DEFUZ:

```
; Cm <- 0
CLR      A
MOV      R7,A
MOV      R6,A
MOV      R5,A

; contor <- 32
MOV      R4,#32
```

; bucla impartirii

DIVROT:

```
; Di <- Di*2
MOV      R0,#K_FF+3
CLR      C
MOV      A,@R0          ;A <- BYTE1(Di)
RLC      A
MOV      @R0,A
DEC      R0
MOV      A,@R0          ;A <- BYTE2(Di)
RLC      A
MOV      @R0,A
DEC      R0
MOV      A,@R0          ;A <- BYTE3(Di)
RLC      A
MOV      @R0,A
DEC      R0
MOV      A,@R0          ;A <- BYTE4(Di)
RLC      A
MOV      @R0,A

; Cm <- Cm*2
MOV      A,R5            ;A <- BYTE1(Cm)
RLC      A
MOV      R5,A
MOV      A,R6            ;A <- BYTE2(Cm)
RLC      A
MOV      R6,A
MOV      A,R7            ;A <- BYTE3(Cm)
RLC      A
MOV      R7,A

; (R3,R2,R1) <- Dif = Cm-Dv
CLR      C
MOV      R0,#K_FF+7
MOV      A,@R0          ; A <- BYTE1(Dv)
MOV      B,R5            ;stocare temporata
XCH      A,R5            ;A = BYTE1(Cm), R5=BYTE1(Dv)
SUBB     A,R5            ;A <- BYTE1(Cm)-BYTE1(Dv)
MOV      R1,A           ;R1 <- BYTE1(Dif) = BYTE1(Cm)-BYTE1(Dv)
MOV      R5,B           ;R5 = BYTE1(Cm)

DEC      R0
```

Implementarea software a blocurilor regulatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy

```
MOV     A,@R0           ;A <- BYTE2(Dv)
MOV     B,R6           ;stocare temporara
XCH     A,R6           ;A = BYTE2(Cm), R6 = BYTE2(Dv)
SUBB    A,R6           ;A = BYTE2(Cm)-BYTE2(Dv)-CY
MOV     R2,A           ;R2 <- BYTE2(Dif) = BYTE2(Cm)-BYTE2(Dv)-CY
MOV     R6,B           ;R6 = BYTE2(Cm)

DEC     R0
MOV     A,@R0         ;A <- BYTE3(Dv)
MOV     B,R7         ;stocare temporara
XCH     A,R7         ;A = BYTE3(Cm), R7 = BYTE3(Dv)
SUBB    A,R7         ;A = BYTE3(Cm)-BYTE3(Dv)-CY
MOV     R3,A         ;R3 <- BYTE3(Dif) = BYTE3(Cm)-BYTE3(Dv)-CY
MOV     R7,B         ;R7 = BYTE3(Cm)

; testare semn Dif
JC      ROT32        ;Dif < 0 => salt

; Dif >= 0 => Cm <- Cm-Dv
MOV     A,R1
MOV     R5,A
MOV     A,R2
MOV     R6,A
MOV     A,R3
MOV     R7,A        ; (R7,R6,R5) <- (R3,R2,R1)

;BIT0(Di) <- 1
MOV     R0,#K_FF+3
MOV     A,@R0
SETB    ACC.0
MOV     @R0,A

; decrementare & testare contor
ROT32:  DJNZ    R4,DIVROT    ; reluare bucla

; A <- BYTE1(rezultat)
TP33:   MOV     R0,#K_FF+3
        MOV     A,@R0

FUZEXIT:
        RET

;*** SUBROUTINE ***
;-----
;| SORT:
;| Calculeaza gradele de apartenenta ale intrarilor crisp la termenii
;| variabilelor lingvistice corespunzatoare, prin fuzzificare.
;| Fanionul F0 indica ariabila de intrare: F0 = 0 pentru x1 si F0 = 1 pentru x2
;| Gradele de apartenenta sunt stocate in tabelele MEMBEPS1 si MEMBEPS2
;| Numarul maxim de termeni este 63.
;-----

SORT:
        CLR     A
        JNB    F0,L1        ;fuzzificare x1
        ADD    A,#3        ;fuzzificare x2

L1:     ADD    A,#K_FF      ;adresa var. crisp x (x1 sau x2), in functie de F0.
        MOV    RO,A
        MOV    A,@R0
        MOV    R4,A        ;R4 <- x
        INC    R0          ;HIGH(TABLV_X)
        MOV    A,@R0
        MOV    DPH,A
        INC    R0          ;LOW(TABLV_X)
        MOV    A,@R0
        MOV    DPL,A      ;DPTR <- TABLV_X
```

Implementarea software a blocurilor reglatoare și de corectie bazate pe logica fuzzy

```
CLR      A
MOVC    A,@A+DPTR
PUSH    ACC      ;stiva <- n
MOV     R5,A      ;R5 <- n
MOV     A,#1
MOVC    A,@A+DPTR
MOV     R7,A      ;R7 <- a_1

MOV     R6,#2      ;initializarea offsetului pt. tabela termenilor
MOV     R2,#1      ; Ct <- 1 (contorul termenilor)
MOV     R3,#1      ; Cf <- 1 (contorul segmentelor functiei 1 ... 3)

TESTMINMAX:
; determinarea gradului de apartenenta pentru x = 0 si x = 255
CJNE    R4,#0,TST255
SJMP    MY1        ; salt daca x = 0

TST255:
CJNE    R4,#255,TABEXTRACT      ; salt daca x <> 255
MOV     A,R5
MOV     R2,A      ; Ct <- n (daca x = 255)

MY1:
MOV     B,#255      ; μ <- 255 (pentru x = 0 sau x = 255)

TP14:
CALL    ZFE        ; introducerea μ si Ct in tabela MEMBERS

TP15:
JMP     SORTEXIT

; calcularea adresei pentru tabela termenilor
TABEXTRACT:
MOV     B,R7      ; B <- p1 (ultimul parametru preluat din tabela)
CLR     A
ADD     A,R6
MOVC    A,@A+DPTR
MOV     R7,A      ; R7 <- p2 (urmatorul parametru al functiei)
MOV     A,B      ; A <- p1

;Suche nach getroffenen Terme
PUSH    B      ; stiva <- p1
MOV     B,R4      ; B <- x
CJNE    A,B,COMP1 ; salt daca x <> p1
POP     B      ; B <- p1

;-----
; secventa se executa doar cind x = p1
EQUST1:
TESTF1:
CJNE    R3,#1,TESTF2      ; salt daca Cf <> 1
;Cf = 1 => x la inceputul pantei crescatoare => μ = 0
INC     R6
INC     R6      ; introducerea μ = 0 si Ct in tabela MEMBERS
JMP     TP18      ; urmatorul termen

TESTF2:
CJNE    R3,#2,TESTF3      ; salt daca Cf <> 2
;Cf = 2 => x la inceputul palierului => μ = 255
MOV     B,#255
CALL    ZFE        ; introducerea μ = 255 si Ct in tabela MEMBERS
INC     R6
JMP     TP18      ; urmatorul termen

TESTF3:
;Cf = 3 => x la inceputul pantei descrescatoare => μ = 255
MOV     B,#255
CALL    ZFE        ; introducerea μ = 255 si Ct in tabela MEMBERS
JMP     TP18      ; urmatorul termen

;-----
; secventa se executa doar cind x <> p1
COMP1:
POP     B      ; B <- p1
JNC     TESTST1    ; x < p1

;-----
; secventa se executa doar cind x > p1
```

Implementarea software a blocurilor reguloare și de corecție bazate pe logica fuzzy

```
XCH   A,R7      ; A = p2; R7 = x
PUSH  B         ; stiva <- p1
MOV   B,R4     ; B <- x
CJNE  A,B,COMP2 ; salt daca x <> p2
POP   B         ; B <- p1

;-----
; secventa se executa doar cind x > p1, x = p2
EQUST2:
XCH   A,R7      ; A = x, R7 = p2
TESF1:
CJNE  R3,#1,TESF2 ; salt daca Cf <> 1
;Cf = 1 => sfirsitul pantei crescatoare =>  $\mu = 255$ 
MOV   B,#255
CALL  ZFE       ; introducerea  $\mu = 255$  si Ct in tabela MEMBERS
INC   R6
INC   R6
JMP   TP18     ; urmatorul termen

TESF2:
CJNE  R3,#2,TESF3 ; salt daca Cf <> 3
;Cf = 2 => la sfirsitul palierului =>  $\mu = 255$ 
MOV   B,#255
CALL  ZFE       ; introducerea  $\mu = 255$  si Ct in tabela MEMBERS
INC   R6
JMP   TP18     ; urmatorul termen

TESF3:
;Cf = 3 => sfirsitul pantei descrescatoare =>  $\mu = 0$ 
JMP   TP18     ; urmatorul termen

;-----
; secventa se executa doar cind x > p1, <> p2
COMP2:
POP   B         ; B <- p1
XCH   A,R7     ; A = x, R7 = p2
JC    NEXTST   ; salt daca x > p2

;-----
; secventa se executa doar cind x > p1, x < p2
TSF1:
CJNE  R3,#1,TSF2; salt daca Cf <> 1
;Cf = 1 => panta crescatoare =>  $\mu = 255 * (x-a) / (b-a)$ 
MOV   B,A      ; B <- P1 = a
MOV   A,R7     ; A <- P2 = b
CLR   C
SUBB  A,B      ; A <- b-a
MOV   R0,A     ; R0 <- b-a
MOV   A,R4     ; A <- x
CLR   C
SUBB  A,B      ; A <- x-a
MOV   B,#255
MUL  AB       ; (B,A) <- 255*(x-a)

TP16:
CALL  DIVBAR0  ; B <- (B,A):R0 =>  $B = \mu = 255 * (x-a) / (b-a)$ 

TP17:
CALL  ZFE     ; introducerea  $\mu$  si Ct in tabela MEMBERS
JMP   NEXTST

TSF2:
CJNE  R3,#2,TSF3; salt daca Cf <> 2
;Cf = 2 => palier =>  $\mu = 255$ 
MOV   B,#255
CALL  ZFE     ; introducerea  $\mu = 255$  si Ct in tabela MEMBERS
JMP   NEXTST

TSF3:
;Cf = 3 => panta descrescatoare =>  $\mu = 255 * (d-x) / (d-c)$ 
MOV   B,A      ; B <- p1 = c
MOV   A,R7     ; A <- p2 = d
CLR   C
SUBB  A,B      ; A <- d-c
MOV   R0,A     ; R0 <- d-c
MOV   A,R7     ; A <- d
CLR   C
```

Implementarea software a blocurilor reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy

```
SUBB  A,R4      ; A <- d-x
MOV   B,#255
MUL   AB       ; (B,A) <- 255*(d-x)

CALL  DIVBARO  ; B <- (B,A):R0 => B =  $\mu = 255*(d-x)/(d-c)$ 
CALL  ZFE      ; introducerea  $\mu$  si Ct in tabela MEMBERS
JMP   NEXTST   ; urmatorul termen

;-----
; secventa se executa doar cind x < p1
TESTST1:
CJNE  R3,#1,NEXTST ; salt daca Cf <> 1
;Cf = 1 => terminare subrutina
JMP   SORTEXIT

;-----
; urmatorul segment
NEXTST:
INC   R3       ; Cf <- Cf+1
CJNE  R3,#4,NXTT; salt daca Cf <> 4
;Cf = 4 => termen nou

;-----
; termen nou
TP18:
MOV   R3,#1    ;Cf <= 1
DUNZ  R5,NEXTTERME ;Ct <- Ct-1; salt daca Ct <> 0
Ct = 0 => s-au terminat termenii

TP19:
JMP   SORTEXIT

;-----
; urmatorul termen
NEXTTERME:
INC   R2       ;Ct <- Ct+1
INC   R6       ;incrementare offset tabela termenii
CLR   A
ADD   A,R6
MOVC  A,@A+DPTR
MOV   R7,A     ;A <- p1

NXTT:
INC   R6       ; incrementare offset tabela termenii
JMP   TABEXTRACT

;-----
; terminarea subrutinei
SORTEXIT:
RET

;*****
; Memorare  $\mu$  si Ct in tabela MEMBERS
; B =  $\mu$ ; R2 = Ct
; fanionul Fo selecteaza tabela: FO = 0 => MEMBERS1; FO = 1 => MEMBERS2
; modifica A, R0

ZFE:
MOV   R0,#K_FF+8; R0 <- MEMBERS1
JNB   FO,ZFE1

ZFE2:
MOV   R0,#K_FF+16 ; R0 <- MEMBERS2 daca FO = 1

ZFE1:
MOV   A,@R0      ; testarea valorii din tabela
JZ    EINTRAGEN  ; salt daca valoarea din tabela e nula =>
; pozitie libera
INC   R0         ; pozitia curenta ocupata, incrementare pointer
INC   R0
JMP   ZFE1      ; reluare bucla de testare

EINTRAGEN:
MOV   A,R2       ; memorare Ct
MOV   @R0,A
```

Implementarea software a blocurilor reglatoare și de corectie bazate pe logica fuzzy

```
INC     R0
MOV     A,B           ; memorare  $\mu$ 
MOV     @R0,A

ZFEXIT:
RET

;*****
; Impartire (B,A) : R0, rezultatul in B
; modifica A, B, R0, R1
; notatii: L = LOW(deimpartit); H = HIGH(deimpartit)
DIVBARO:
XCH     A,R7
PUSH    ACC
XCH     A,R7         ;stiva <- R7 (stocare temporara)
MOV     R7,#16       ;contor
MOV     R1,#0        ;registru de comparare (V)
DIVLOOP:
CLR     C
RLC     A             ;A <- L*2
XCH     A,B           ;B <- L*2; A <- H
RLC     A             ;A <- H*2
XCH     A,B           ;A <- L*2; B <- H*2
XCH     A,R1         ;A <- V; R1 <- L*2
RLC     A             ;A <- V*2
PUSH    B
MOV     B,R0
CJNE   A,B,TESTVERG
;
CJNE   A,R0,TESTVERG
TESTVERG:
POP     B
TP20:
JC      WRL           ;salt daca V < impartitor (R0)
SUBB   A,R0           ;A <- V - impartitor
XCH    A,R1           ;A <- L*2; R1 <- V
SETB   ACC.0         ;L.0 <- 1
SJMP   WRL2
WRL:
XCH    A,R1           ;R1 <- V*2; A <- L*2
WRL2:
DJNZ   R7,DIVLOOP;decrementare contor; testare; reluare bucla
TP21:
MOV    B,A            ;B <- LOW(rezultat)
POP    ACC            ;R7 <- stiva
MOV    R7,A
RET

;*****
FUZ_E:
END
```


A2. Modelarea blocurilor reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy

În această anexă se prezintă codul sursă, în limbajul MATLAB, dezvoltat de autor pentru modelarea blocurilor reglatoare și de corecție fuzzy, utilizate în schema bloc a regulatorului de temperatură introdus în Capitolul 6. Parametrii sunt specifici blocului FZ-RP, dar implementarea mecanismului de inferență este valabilă pentru toate blocurile.

```
function y=fcl(x)
% FC1 Regulator fuzzy FZ-RP, pentru sistemul de climatizare
%   x = [x1, x2]
%       x1 - prima intrare -> theta_iC_st [grade_C]
%       x2 - a doua intrare -> dtheta_i_F [grade_C]
% Returneaza variabila de iesire -> theta_aP_st

% parametrii regulatorului FZ-RP
% -----

% descrierea functiilor de apartenenta pentru termenii primei intrari
MFx1 = [14 14 14 24
        14 24 24 34
        24 34 34 34];

% descrierea functiilor de apartenenta pentru termenii celei de-a doua intrari
MFx2 = [-5.0 -5.0 -5.0 -2.5
        -5.0 -2.5 -2.5 0.0
        -2.5 0.0 0.0 2.5
         0.0 2.5 2.5 5.0
         2.5 5.0 5.0 5.0];

% descrierea functiilor de apartenenta singleton pentru termenii iesirii:
sy = [-14 10 24 56 95];

% descrierea bazei de reguli
RB = [1 1 2
      1 2 3
      2 3 4
      3 4 5
      4 5 5];

% valoare "default", folosita atunci cind nu este activata nici o regula
yd = 24;

% limitele de variatie pentru marimile de intrare
xlmin = 14;
xlmax = 34;
x2min = -5;
x2max = 5;

% mecanismul de inferenta
% -----

% extrage variabilele de intrare din vectorul de intrare
x1 = x(1);           % extrage prima intrare
x2 = x(2);           % extrage a doua intrare

% limiteaza variabilele de intrare
if x1 < xlmin, x1 = xlmin; end;
if x1 > xlmax, x1 = xlmax; end;
if x2 < x2min, x2 = x2min; end;
if x2 > x2max, x2 = x2max; end;
```

Modelarea blocurilor reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy

```
% determina numarul de termeni pentru cele 2 intrari
[ntx2,ntx1] = size(RB);           % ntx1 = nr. de termeni pentru x1
                                   % ntx2 = nr. de termeni pentru x2

% compara x1 cu fiecare F.A. din MFx1
for i = 1:ntx1

    % extrage parametrii F.A.
    a = MFx1(i,1);
    b = MFx1(i,2);
    c = MFx1(i,3);
    d = MFx1(i,4);

    % calculeaza valoarea F.A., la abscisa x1
    if x1 < a
        m1(i) = 0;
    elseif x1 < b
        m1(i) = (x1-a)/(b-a);
    elseif x1 <= c
        m1(i) = 1;
    elseif x1 < d
        m1(i) = (d-x1)/(d-c);
    else
        m1(i) = 0;
    end
end

% compara x2 cu fiecare F.A. din MFx2
for i = 1:ntx2

    % extrage parametrii F.A.
    a = MFx2(i,1);
    b = MFx2(i,2);
    c = MFx2(i,3);
    d = MFx2(i,4);

    % calculeaza valoarea F.A., la abscisa x2
    if x2 < a
        m2(i) = 0;
    elseif x2 < b
        m2(i) = (x2-a)/(b-a);
    elseif x2 <= c
        m2(i) = 1;
    elseif x2 < d
        m2(i) = (d-x2)/(d-c);
    else
        m2(i) = 0;
    end
end

% determina numarul de termeni pentru iesire
nty = size(sy);           % nty = nr. de termeni pentru y

% initializeaza variabilele inainte de prelucrarea regulilor
S1 = 0;                   % S1 = suma de la numator
S2 = 0;                   % S2 = suma de la numitor
m = 1;                    % m = contorul regulilor

% preluceaza fiecare regula din RB
for i = 1:ntx1
    for j = 1:ntx2
        k = RB(j,i);

        if k ~= 0
            % 0 valoare nula indica absenta unei reguli
            % deci nu se executa operatiile din bucla
            % aplica operatorul AND -> min
            m = min(m1(i), m2(j));

            % actualizeaza numitorul
            S1 = S1 + m*sy(k);
        end
    end
end
```

Modelarea blocurilor reglatoare și de corecție bazate pe logica fuzzy

```
% actualizeaza numaratorul
S2 = S2 + m;

% incrementeaza contorul regulilor
m = m+1;
    end
end

% calculeaza iesirea
if S2 ~= 0
    y = S1/S2;           % daca numitorul este nenul,
                        % calculeaza raportul
else
    y = yd;             % daca nu,
                        % returneaza valoarea implicita
end

end
```

Bibliografie

- [Altr93] von Altrock, C., "Standard-Microcontroller im Wettlauf mit Prozessoren", *Elektronik plus*, 2/1993, pp. 51-58
- [Altr94] von Altrock, C., "Fuzzy Datenanalyse in der Medizintechnik", 4. *Aachener Fuzzy Symposium*, Mai 1994, pp. 99-107
- [Apr92] "What is Fide? ", Apronix, 1992 [Apr92] "Servo Motor Force Control", FIDE Application Note 003-920814, Apronix Inc., 1992
- [Apr92a] *Temperature Control (2)*, FIDE Application Note 005-920903, Apronix, 1992
- [Apr92b] *Temperature Control (3)*, FIDE Application Note 006-920914, Apronix, 1992
- [Apr92c] *Fuzzy Logic Will Make Cars Smarter*, Excerpt form *Computer Design*, April, 1992 (provided by Apronix FuzzyNet)
- [Apr92d] "What is Fide? ", Apronix, 1992
- [Base93] Basehore, P., "Progress in the application of fuzzy logic techniques and products", *Electronic Engineering*, March, 1993, pp. 47 - 53
- [Base93a] Basehore, P.M., "Intelligenter Neuro-Fuzzy Chip". *Elektronik plus*, 2/1993, pp. 119-122
- [Brei92] Breiden, O., "Practische Entwicklung eines Fuzzy-Logik-Systems", *elektronik industrie* no. 7, 1992, pp. 50-53
- [Brub92] *Fuzzy environmental Control*, The Huntington Technical Brief, no. 31, Oct., 1992 (provided by Apronix FuzzyNet)
- [Burg94] Burgstaller, A., "Wechselstromschweissen von Aluminium", 4. *Aachener Fuzzy Symposium*, Mai 1994, pp. 5-1
- [Burg94a] Burghardt, M., "Temperturregelung mit Fuzzy Techniken", 4. *Aachener Fuzzy Symposium*, Mai, 1994, pp. 109-114
- [CGGT92] del Campo, I., Gonzales de Mendevil, J.R., Garitagoitia, J.R., Tarela, J.M., "A DSP Based Fuzzy Logic Controller", *Proceedings of the 2nd International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks*, Iizuka, Japan, 1992, pp. 1123 - 1126
- [Cox94] Cox, E., "The Fuzzy Systems Handbook", Academic Press, Cambridge, MA, 1994
- [Dumm94] Dummermuth, E., "Aufbau und schrittweise Verfeinerung von Fuzzy Steuerung", 4. *Aachener Fuzzy Symposium*, Mai, 1994, pp. 131-139
- [Elek93] *** Microcontroller auf Fuzzy-Pfad. *Elektronik*, 2/1993
- [Elek93a] *** "Was der Fuzzy-Markt verspricht", *Elektronik*, 23/1993
- [Elka93] Elkan, C., "The Paradoxical Success of Fuzzy Logic", University of California, San Diego, July, 1993
- [Feli93] Felix, R., "Fuzzy-Logik: Schrittmacher der Zukunft", *Elektronik*, 2/1993

- [FGRY93] Figueiredo, M., Gomide, F., Rocha, A., Yager, R., "Comparison of Yager's Level Set Method for Fuzzy Logic Control with Mamdani's and Larsen's Methods", IEEE Trans. Fuzzy Systems, Vol.1, No.2, May 1993, pp. 156-159
- [FM93] *** "Marktprognosen: Der Fuzzy-Boom ist programmiert", *FuzzyMonitor*, Nr. 1, Juni 1993
- [Fran85] Frank, W., *Klimaanlagen - Mehr Komfort mit neuer Systemen*, mot 17/1985
- [Fran94] Franke, S., "Anwendung der Fuzzy Logic in der Datenanalyse", 4 *Aachener Fuzzy Symposium*, Mai 1994, pp. 49-57
- [FM93] *** "Marktprognosen: Der Fuzzy-Boom ist programmiert", *Fuzzy Monitor*, Nr. 1, Juni 1993
- [FS93] *** "Three Fuzzy Logic Applications", *The Fuzzy Source*, Togai Infral.ogic, Spring 1993, pp. 4-6
- [Funk94] Funk, N., "Fuzzyregelung bei Bioreaktoren", 4 *Aachener Fuzzy Symposium*, Mai 1994, pp. 37-46
- [Gebh94] Gebhardt, J., "Stabilisierung eines Containerschiffs mit Fuzzy Logic", 4 *Aachener Fuzzy Symposium*, Mai 1994, pp. 15-24
- [Hell91] Hellendoorn, H., *Fuzzy Logic and Fuzzy Control*, SICSL Report 91/5, Siemens Intelligent Control Laboratory, 1991
- [HT92] Hellendoorn, H., Thomes, C. "On Defuzzification in Fuzzy Controllers". SICSL Report 92/3, Siemens Intelligent Control Lab, 1992
- [Info92] "FuzzyTECH", Data Sheets, Inform GmbH, 1993
- [Janc94] Janczik, M., "Fuzzy-Logik in der Heiztechnik", 4 *Aachener Fuzzy Symposium*, Mai 1994, pp. 27-35
- [KF88] Klir, G.J., Folger, A.T., *Fuzzy Sets, Uncertainty and Information*, Prentice-Hall, 1988
- [KH92] Koczy, L.T., Hirota, K., "A fast algorithm for fuzzy inference by compact rules", in *Fuzzy Logic For the Management of Uncertainty*, Zadeh, L.A., Kacprzyk, J. (ed.), John Wiley and Sons, 1992
- [Klar92] Klar, W., "Expertensysteme: gestern, heute, morgen", Teil 2, *Elektronik*, 4 1992, pp. 78-81
- [Knap92] Knappe, H., "Das Fuzzy-Expertensystem", *mini Micro magazin*, nr.6, 1992, pp. 44-48
- [Kosk92] Kosko, B., "Neural Networks and Fuzzy Systems", Prentice-Hall International, Englewood Cliffs, NJ, 1991
- [Krau94] Krause, B., "Ein intelligenter Optosensor mit Neuro Fuzzy", 4 *Aachener Fuzzy Symposium*, Mai 1994, pp. 59-70
- [Meir93] Meiritz, A., "Lichtblick im Fuzzy-Hardware-Dschungel", *Elektronik plus*, 2/1993, pp. 45-50
- [Mizu91] Mizumoto, M., "Min-Max-Gravity Method Versus Product-Sum-Gravity Method for Fuzzy Control", Proc. IFSA '91, Brussels, 1991, vol. Artificial Intelligence, pp. 129-132

- [SHA83] Shimizu, V.S., Hara, H., Asakawa, F., *Analysis of air-conditioning heat load of a passenger vehicle*, Int. J. of Vehicle Design, vol.4, nr.3, 1983, pp. 292-311
- [Siem94] "SAE 80C99 Fuzzy Coprocessor", Data Sheets, Siemens, 1994
- [SK91] Schanzer, H.-P., Kalt, H.-P., *Klimakomfort im Reisebus*, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 1991
- [SOI92] Shimizu, K., Osumi, M., Imae, F., "Digital Fuzzy Processor FP-5000", Proceedings of the 2nd International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks, Iizuka, Japan, 1992, pp. 539 - 542
- [TKH96] Tryba, V., Kiziloglu, B., Heider, H., "Realisierung von Fuzzy-Logik?", *Elektronik*, 4/1996, pp. 60-79
- [Toga90] "The Fuzzy Programming Language (FPL)", Togai InfraLogic, 1990
- [Toga90a] "The TILShell", Togai InfraLogic, 1990
- [Toga91] Togai, M., "The Machine That Can Say Maybe", *Gain*, Vol. 10 No. 1 March 1991
- [Toga92] "The FC110 Digital Fuzzy Processor", Data Sheets, Togai InfraLogic, 1992
- [Toga92a] "Single Board Fuzzy Controller (SBFC)", Data Sheets, Togai InfraLogic, 1992
- [Toga92b] "Fuzzy Computational Accelerator", Data Sheets, Togai InfraLogic, 1992
- [Toga93] "Environmental Control", *The Fuzzy Source*, Volume 3, Issue 1, Togai InfraLogic, Spring 1993
- [Tran93] "The Fuzzy Control Manager", TransferTECH, 1993
- [Trau91] Trautzi, G., "Mit Fuzzy-Logik näher zur Natur?", Teil I/I, *Elektronik*, 9/1991, pp. 48-53
- [Wall89] Waller, L., "Fuzzy Logic: it's Comprehensible, it's Practical - and it's Commercial", *Electronics*, March 1989
- [WKL86] Weible, R., Kern, J., Lochmar, K., *Mikrocomputer Steuerungssystem für Heizungs- und Klimaanlage in Kraftfahrzeugen*, VDI Berichte nr. 612, 1986
- [WSDY92] Watanabe, H., Symon, J.R., Detloff, W.D., Yount, K.E., "VLSI Fuzzy Chip and Inference Accelerator Board", in *Fuzzy Logic For the Management of Uncertainty*, Zadeh, L.A., Kacprzyk, J. (ed.), Wiley, 1992
- [Zimm91] Zimmermann, H.-J., "Fuzzy Set Theory - and Its Applications", Kluwer, Academic Publishers, Norwell, MA, 1991

- [Moos92] Moosburger, G., "Brillante Unschärfe", *Elektronik*, 7/1992, pp. 62 - 70
- [Nage93] Nagel, A., "Konkurrenz für etablierte Fuzzy-Chips", *Elektronik plus*, 2/1993, pp. 59-62
- [NKK92] Nauck, D., Klawonn, F., Kruse, R., "Fuzzy Sets, Fuzzy Controllers, and Neural Networks", *Scientific Journal of the Humboldt-University, Berlin, Series Medicine* 41, no.4, 1992, pp. 99 - 120
- [Noss91] Nossem, B., "Expertensystem mit Fuzzy-Logik", *mini Micro magazin*, nr.12, 1991, pp. 76-77
- [Omro91] "FP3000 Digital Fuzzy Processor", Data Sheets, Omron Corp., 1991
- [Omro91a] "FP-30AT Fuzzy Inference Board", Data Sheets, Omron, 1991
- [Omro91b] *Fuzzy Temperature Controller ESAF*, Data Sheets, OMRON Corp., Osaka, Japan, 1991
- [Omr92] *Fuzzy Temperature Controller ESAF*, Data Sheets, OMRON Corp., Osaka, Japan
- [Panu93] Panu, S., *Fuzzy Klimaregelung*, Präsentation, Mercedes Benz, Sindelfingen, 1993
- [Panu93a] Panu, S., *Moderne Kfz. Fuzzy Klimaregelung - BMW*, München, 1993
- [Panu94] Panu, S., *Fuzzy Car Climate Control*, Proceedings of the Symposium on Electronics and Telecommunications, Timisoara, 1994
- [Panu94a] Panu, S., *Fuzzy Klimaregelung als Strategische Marktoption*, Mercedes Benz, Sindelfingen, 1994
- [Panu94b] Panu, S., *Physiologische Klimaregelung mit Fuzzy Logik*, Mercedes Benz, Sindelfingen, 1994
- [Panu95] Panu, S., "Sisteme fuzzy. Domenii și posibilități de utilizare", Referat nr. 1 în cadrul pregătirii lucrării de doctorat, Universitatea Tehnică Timișoara, 1995
- [Panu95a] Panu, S., "Tendințe actuale în proiectarea și realizarea reguletoarelor fuzzy", Referat nr. 2 în cadrul pregătirii lucrării de doctorat, Universitatea Tehnică Timișoara, 1995
- [Pedr93] Pedrycz, W., "Fuzzy Control and Fuzzy Systems", 2-nd edition, Research Studies Press, Somerset, England, 1993
- [Post91] Post, H., "Verschläft Europa wieder eine High-tech-Chance?", *Elektronik*, 7/1991, pp. 90-94
- [PPR92] Pagni, A., Poluzzi, R., Rizotto, G., "WARP: Weight Associative Rule Processor - An innovative Fuzzy Logic Controller", Proceedings of the 2nd International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks, Iizuka, Japan, 1992, pp. 543 - 546
- [RG93] Runkler, T.A., Glesner, M., "A Set of Axioms for Defuzzification Strategies - Towards a Theory of Rational Defuzzification Operators", Second IEEE International Conference on Fuzzy Systems, San Francisco, March-April 1993
- [Schu93] Schulz, W., "Anwendungen reizen die Fuzzy-Technik noch nicht aus", *VDI-Nachrichten*, Nr.18, Mai, 1993, p. 6
- [SGST94] "W.A.R.P. 1.0", Data Sheets, SGS-Thomson, 1994
- [SGST94a] "WARP-SDT 1.0" Data Sheets, SGS-Thomson, 1994
- [SGST94b] *Oven Termoregulation*, W.A.R.P. Application Series, SGS-Thomson, 1994