



Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013
Investește în oameni!

Proiect EXCELDOC - POSDRU/159/1.5/S/132397
Exelență în cercetare prin burse doctorale și postdoctorale



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI
Facultatea de Automatică și Calculatoare
 Departamentul de Automatică și Informatică Industrială

Nr. Decizie Senat 238 din 30/09/2015

**Contribuții privind monitorizarea și controlul clădirilor
 în scopul creșterii eficienței energetice a acestora**
 - Rezumatul tezei de doctorat -

*„Contributions concerning the monitoring and control of buildings in
 order to increase their energy efficiency”*
 - Summary of PhD Thesis -

Autor: ing. Giorgian Neculoiu
Conducător de doctorat: prof. dr. ing. Valentin Sgârciu

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. dr. ing. Dan POPESCU	de la	Universitatea Politehnica din București
Conducător de doctorat	Prof. dr. ing. Valentin SGÂRCIU	de la	Universitatea Politehnica din București
Referent	Prof. dr. ing. Nicolae PARASCHIV	de la	Universitatea de Petrol și Gaze din Ploiești
Referent	Prof. dr. ing. Sergiu CARAMAN	de la	Universitatea Dunărea de Jos din Galați
Referent	Prof. dr. ing. Dorin CÂRSTOIU	de la	Universitatea Politehnica din București

București 2015

Cuprins

MULȚUMIRI	3
INTRODUCERE	4
1. CONTEXT	4
2. OBIECTIVELE LUCRĂRII	4
3. STRUCTURA LUCRĂRII	4
CAPITOLUL 1	6
PROBLEMATICA EFICIENȚEI ENERGETICE ÎN CONTEXTUL ACTUAL	6
1.1. PROBLEMA SCHIMBĂRILOR CLIMATICE ȘI A EPUIZARII RESURSELOR NATURALE	6
1.2. IMPACTUL SECTORULUI RESIDENȚIAL ASUPRA CONSUMULUI ENERGETIC	7
1.3. REDUCEREA CONSUMULUI DE ENERGIE ÎN CLĂDIRI	8
1.3.1. Utilizarea metodelor tehnico-constructive specifice ingineriei civile	8
1.3.2. Utilizarea surselor de energie regenerabilă în clădiri	1
1.3.3. Utilizarea strategiilor de control termic	10
1.4. CALCULUL SARCINII TERMICE A UNEI CLĂDIRI	10
1.5. CONCLUZII	11
CAPITOLUL 2	12
MODELAREA MATEMATICĂ A UNEI CLĂDIRI	12
2.1. PREZENTAREA SISTEMULUI	12
2.2. REPREZENTAREA ÎN SPAȚIUL STĂRILOR	13
2.3. ANALIZA MODELULUI	1
2.4. IDENTIFICAREA PARAMETRILOR SISTEMULUI	17
2.4.1. Alegerea metodei de identificare	17
2.4.2. Identificarea parametrilor	19
2.5. CONCLUZII	20
CAPITOLUL 3	20
TENDINȚE ACTUALE DE CONTROL AL TEMPERATURII ÎN CLĂDIRI	20
3.1. STRATEGII PENTRU CONTROL TERMIC ÎN CLĂDIRI	21
3.2. ÎNCĂLZIREA INTERMITENTĂ ÎN CLĂDIRI	22
3.2.1. Urmărirea punctului de referință	23
3.2.2. Compensarea condițiilor meteorologice	24
3.3. TEHNICI AVANSATE DE REGLARE AUTOMATĂ A TEMPERATURII	26
3.3.1. Metode de reglare adaptivă pentru temperatura din clădiri	26
3.3.2. Reglarea cu predicție bazată pe model	27
3.4. CONCLUZII	28
CAPITOLUL 4	29
STRATEGIA DE CONTROL TERMIC MPC ȘI PERFORMANȚELE OBTINUTE	29
4.1. MINIMIZAREA FUNCȚIEI DE COST MPC PENTRU SISTEMELE TERMICE	29
4.2. CALCULAREA FUNCȚIEI MPC MINIMIZATĂ FOLOSIND PROGRAMAREA LINIARĂ	31
4.3. ARHITECTURI POSIBILE DE IMPLEMENTARE A MPC	32
4.3.1. Arhitectura descentralizată MPC	33
4.3.2. Arhitectura centralizată MPC	33
4.3.3. Arhitectura distribuită MPC	34
4.4. CRITERII DE PERFORMANȚĂ ÎN CONTROLUL TERMIC AL CLĂDIRILOR	35
4.5. REZULTATELE TESTELOR EXPERIMENTALE	35
4.6. CONCLUZII	38
CAPITOLUL 5	39
CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE ULTERIOARE	39
5.1. CONCLUZII GENERALE	39
5.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE	39
5.3. DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRII	41
5.4. PERSPECTIVE DE CERCETARE ULTERIOARĂ	41
BIBLIOGRAFIE	42

MULȚUMIRI

Această lucrare reprezintă rezultatul activității mele de cercetare din perioada octombrie 2012 – octombrie 2015, în domeniul Automatică și Calculatoare din cadrul Facultății de Automatică și Calculatoare a Universității POLITEHNICA București.

Doresc să exprim sincere mulțumiri domnului prof. dr. ing. Valentin SGÂRCIU, conducătorul științific al lucrării, pentru ajutorul și susținerea morală și profesională oferită pe întreaga perioadă de desfășurare a studiilor doctorale, dar și pentru timpul acordat în vederea îndrumării în elaborarea tezei de doctorat.

Mulțumesc în mod deosebit membrilor comisiei de doctorat pentru onoarea pe care mi-au făcut-o acceptând să citească lucrarea și pentru observațiile și comentariile făcute pentru îmbunătățirea acesteia.

Sunt recunoscător domnului prof. dr. Alexandru Viorel MARINESCU și doamnei prof. dr. Mariana MARINESCU pentru generozitatea cu care mi-au împărtășit din bogata experiență a domniilor lor, pentru colaborarea didactică și de cercetare, încrederea și sprijinul oferit, care au făcut posibilă concretizarea acestei lucrări.

O parte dintre rezultatele prezentate în lucrare au avut ca punct de plecare activitatea desfășurată în cadrul stagiului de cercetare din timpul studiilor doctorale, efectuat la Universitatea INSA din Lyon, Franța. Cu această ocazie, doresc să exprim mulțumiri domnului prof. dr. ing. Christian GHIAUȘ și echipei domniei sale de la centrul de cercetare CETHIL din cadrul Universității INSA din Lyon, pentru oportunitatea și sprijinul acordat. De asemenea, doresc să exprim mulțumiri domnului Ingo Heusler de la Institutul Fraunhofer din Germania pentru materialele referitoare la casa experimentală folosită în cadrul tezei.

Sincere mulțumiri față de membrii Departamentului de Automatică și Informatică Industrială care mi-au oferit un mediu de lucru deosebit. Adresez calde mulțumiri domnului prof. dr. ing. Sergiu Stelian ILIESCU și echipei domniei sale pentru sugestiile și comentariile oferite în toată această perioadă. De asemenea, adresez mulțumiri domnului s.l. dr. ing. Grigore STAMATESCU pentru tot ajutorul acordat în perioada de cercetare.

Doresc să mulțumesc familiei pentru răbdarea, încurajările și sprijinul oferit în toată această perioadă, părinților mei fiindu-le dedicată această reușită. Mulțumesc îndeosebi viitoarei mele soții care a avut încredere în mine, m-a încurajat și mi-a fost alături.

În final doresc să aduc mulțumiri Guvernului României care mi-a acordat o bursă de studiu importantă în perioada 2013-2015 finanțată de Ministerului Fondurilor Europene, prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013.

„Rezultatele prezentate în această lucrare au fost obținute cu sprijinul Ministerului Fondurilor Europene prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013, Contract nr. POSDRU/159/1.5/S/132397.

The work has been funded by the Sectoral Operational Programme Human Resources Development 2007-2013 of the Ministry of European Funds through the Financial Agreement POSDRU/159/1.5/S/132397.”

INTRODUCERE

1. CONTEXT

Consumul de energie reprezintă o problemă importantă a ultimilor ani care este tratată cu maximă atenție la nivel global. La nivelul Uniunii Europene, clădirile rezidențiale și comerciale sunt responsabile de circa 40% din consumul total de energie și de aproximativ 35% din emisiile de gaze cu efect de seră.

Sistemele de control termic automat sunt din ce în ce mai prezente în clădirile ce se construiesc în ultimii ani și au un rol deosebit atunci când se pune problema realizării economiilor de energie, însă păstrând ca și prioritate confortul termic ce trebuie să îl ofere pentru ocupanți.

Din punctul de vedere al aspectului energie – confort, aceste sisteme pot fi caracterizate ca mai mult sau mai puțin performante. Urmărirea valorii de referință și garantarea stabilității sistemului nu mai reprezintă condiții satisfăcătoare ce sunt impuse acestor sisteme. Strategiile de control termic performante impun obținerea performanțelor dorite prin intermediul unei funcționari optime care să conducă la obținerea unui nivel maxim de confort pentru ocupanții clădirii cu un consum minim de energie din partea sistemului de încălzire.

În ultimii ani s-au consemnat cercetări importante cu referire la dezvoltarea de strategii de control termic automat și aplicarea acestora în controlul termic al clădirilor cu scopul de a răspunde solicitărilor impuse de actele normative europene cu privire la epuizarea resurselor naturale. În acest context, este necesară dezvoltarea și includerea în sistemele de control ale clădirilor nou construite a unor structuri de conducere avansate adecvate. Pentru aplicarea acestor strategii de conducere, în primul rând trebuie găsite modele matematice ale acestor procese care să fie caracterizate de un grad ridicat de generalitate. Acestea trebuie să ofere flexibilitate pentru o gamă largă de valori ale mărimilor de intrare și să descrie comportarea procesului pe întreaga sa perioadă de funcționare. Structura acestui model matematic trebuie să fie destul de complexă pentru a surprinde dinamica procesului, însă în același timp, trebuie să fie suficient de simplă pentru a permite proiectarea convenabilă a acestor strategii de control termic automat.

2. OBIECTIVELE LUCRĂRII

Ideile și domeniul de aplicabilitate al tehnicilor de modelare și strategiilor de control termic propuse în cadrul acestei teze sunt orientate în mod special către procesele existente în cadrul clădirilor.

Obiectivul principal al tezei de doctorat este dezvoltarea unei strategii de control termic performantă în scopul obținerii unei creșteri a eficienței energetice a unei clădirii prin intermediul optimizării consumului. Lucrarea de față propune utilizarea unui model de ordin redus al clădirii, model cu un grad ridicat de generalitate și posibilitatea aplicării acestuia în cadrul unui proces distinct cu cunoștințe fizice asemănătoare.

3. STRUCTURA LUCRĂRII

Teza este compusă din 4 capitole și un capitol ce concretizează concluziile, contribuțiile și perspectivele de cercetare ulterioară astfel:

Capitolul 1 al tezei include formularea problemelor generale referitoare la consumul de energie din clădiri și impactul acestora în contextul energetic european. De asemenea, sunt studiate problemele impuse sectorului rezidențial de schimbările climatice și epuizarea resurselor naturale, la nivelul Uniunii Europene și sunt prezentate obiectivele impuse de UE în scopul minimizării acestor efecte. În cadrul studiului este prezentată structura fondului locativ la nivelul țării noastre și distribuția consumurilor de energie pe

sectoare de consum. Studiul este continuat cu prezentarea unor metode generice care au ca și obiectiv principal reducerea consumului de energie din clădiri. Sunt prezentate metode tehnico-constructive de reducere a consumului, metoda de utilizare de energii regenerabile și se face un studiu introductiv asupra strategiilor de control termic. Capitolul este încheiat prin prezentarea metodei de calcul a sarcinii termice necesare unei clădiri care să poată fi folosită ulterior pentru aplicarea unor tehnici avansate de reglare a temperaturii.

În **Capitolul 2** este dezvoltat modelul matematic pentru sistemul supus controlului în cadrul capitolelor următoare. Acest model este obținut prin parcurgerea a doua etape: în prima fază, pe baza cunoștințelor fizice ale clădirii, se determină structura modelului rețelei termice de ordin inferior al clădirii, iar apoi sunt identificați experimental parametrii fizici ai modelului folosind metoda celor mai mici pătrate. Din motive referitoare la complexitatea modelului obținut, casa folosită în cadrul experimentelor a fost aproximată ca o singură zonă termică, cu temperatura uniform distribuită. Modelul astfel realizat este reprezentat cu ecuații în spațiul stărilor, urmând să fie transformat destul de simplu pentru reprezentarea cu ajutorul funcțiilor de transfer, necesară pentru identificarea parametrilor sistemului.

În **Capitolul 3** sunt prezentate fundamente teoretice referitoare la tendințele actuale de control al temperaturii din clădiri. Sunt prezentate strategiile de control termic aplicate frecvent în clădiri cu avantajele și dezavantajele acestora. Capitolul continuă cu prezentarea metodei de încălzire intermitentă în clădiri și prezentarea economiilor aduse de utilizarea acesteia. De asemenea, sunt prezentate conceptele referitoare la urmărirea punctului de referință variabil, referitor la valoarea temperaturii interioare și sunt studiate metodele prin care poate fi compensat efectul perturbațiilor sistemului. Studiul este încheiat cu prezentarea unor tehnici avansate de reglare a temperaturii clădirilor.

Capitolul 4 propune și dezvoltă metoda de minimizare a funcției cost aplicată în cadrul strategiei de control termic predictiv cu Model Predictive Control - MPC. În cadrul acestei metode, programul de ocupare al clădirii este introdus sub forma unui termen al erorii pondere al funcției cost MPC, astfel transformând strategia de control predictiv MPC în cea mai bună soluție de control termic. Calcularea perioadei de timp cu care trebuie pornită în avans încălzirea poate fi determinată cu precizie utilizând acest termen, iar timpul de regres al clădirii între două perioade ocupare-neocupare este micșorat foarte mult, astfel încât la începutul perioadei de ocupare confortul este asigurat prin asigurarea performanței de pornire optimă a sistemului de încălzire. O altă metodă propusă în cadrul acestui capitol este reprezentată de utilizarea programării liniare pentru calcularea funcției cost MPC, prin intermediul căreia problema minimizării acestei funcții de cost poate fi formulată în formă liniară și rezolvată mult mai ușor. Avantajul acestei metode este reprezentat de timpul câștigat pentru obținerea funcției de cost în formă minimă. Capitolul continuă cu prezentarea avantajelor și dezavantajelor utilizării arhitecturilor posibile de implementare a strategiei MPC pentru controlul termic al clădirilor. Sunt prezentate criteriile de performanță ce trebuie atinse în controlul termic al clădirilor. Capitolul este încheiat cu prezentarea rezultatelor obținute în urma implementării strategiei de control MPC și comparația lor cu cele obținute folosind o strategie de control bazată pe reglatoare PID. În urma prezentării acestor rezultate se pot trage concluziile asupra performanței crescute a strategiei de control termic predictiv MPC.

Capitolul 5 prezintă rezultatele obținute în cadrul studiului și concluziile ce pot fi obținute pe baza acestora. Tot în cadrul acestui capitol sunt prezentate perspectivele de cercetare ulterioară ale autorului și diseminarea rezultatelor cercetării.

Rezultatele prezentate în cadrul capitolelor 2 și 4 au fost obținute ca urmare a studiilor realizate în cadrul unui stagiu de cercetare la Universitatea INSA din Lyon, Franța, în perioada februarie - mai 2015. Datele referitoare la casă au fost furnizate în cadrul acestui

stagiu și provin din măsurătorile efectuate pe o casă experimentală cu suprafața de 100 m², situată în sudul Germaniei – Holzkirchen, la Institutul din Fraunhofer pentru fizica clădirilor.

CAPITOLUL 1

PROBLEMATICA EFICIENȚEI ENERGETICE ÎN CONTEXTUL ACTUAL

Unele dintre cele mai mari probleme ale secolului XXI sunt reprezentate de problema încălzirii globale și cea a epuizării resurselor naturale. În acest sens, o mare parte a comunității științifice are ca principală preocupare găsirea de soluții prin care să poată fi minimizat efectul acestor probleme. Aceste soluții sunt reprezentate în mare parte de combinația folosirii de către omenire a unor strategii care să includă un nivel cât mai mare al eficienței energetice și un nivel cât mai redus al emisiilor de gaze cu efect de seră. [1].

Eficiența energetică reprezintă un termen foarte vast care încearcă să prezinte modalitățile prin intermediul cărora putem să obținem un anumit efect, cum ar fi căldura, iluminat, mișcare, etc. utilizând cât mai puțină energie. Acest concept este tot mai întâlnit în industria constructoare de automobile, la fabricarea obiectelor de iluminat economice, la izolarea termică a caselor și consumul energetic din interiorul acestora, dar și în cadrul altor tehnologii. Eficiența energetică poate fi definită ca un concept care se referă la interesul pentru reducerea consumului de energie necesar realizării aceluiași produs, serviciu sau proces. [2].

Faptul că schimbările climatice sunt tot mai pronunțate și manifestarea unei dependențe tot mai mare referitoare la energie au condus la hotărârea Uniunii Europene de a adopta o economie cu un consum de energie cât mai mic. Acest consum de energie trebuie să fie sigur, stabil, competitiv, produs local și sustenabil. Totodată, politica energetică adoptată la nivelul Uniunii Europene promovează interconectarea rețelelor energetice și eficiența energetică. Sursele de energie luate în calcul în cadrul acestei politici energetice pot varia de la combustibili fosili și energia nucleară, până la sursele regenerabile, reprezentate de energia solară, eoliană, biomasă, energia geotermală și hidroelectrică [3].

1.1. PROBLEMA SCHIMBĂRILOR CLIMATICE ȘI A EPUIZĂRII RESURSELOR NATURALE

Fie ca ne referim la centralele prin intermediul cărora producem energia electrică și pe cea necesară încălzirii caselor, la mașinile și avioanele pe care le folosim pentru transport, la fabricile prin intermediul cărora sunt produse bunurile pe care le cumpăram sau la fermele ce produc alimentele necesare pentru hrană, trebuie să fim conștienți de faptul că toate acestea au un rol important în schimbarea climei deoarece acestea sunt sursele primare de generare a „gazelor cu efect de seră” [4].

Una dintre soluțiile pentru minimizarea schimbărilor climatice este reprezentată de reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră din atmosferă. Sectorul rezidențial reprezintă una dintre sursele de producție a acestor gaze, astfel că trebuie să se acționeze și în acest domeniu pentru o reducere eficientă – Fig. 1.1. Această reducere necesită în primul rând investiții și schimbarea modului în care producem, dar mai ales cum folosim energia produsă [4 - 5].

Pentru găsirea unor soluții care să ducă la rezolvarea acestor probleme timp cât mai scurt, Comisia Europeană și Parlamentul European a aprobat mai multe pachete legislative. Unul dintre acestea este pachetul legislativ „Energie - Schimbări Climatice”, aprobat în decembrie 2008, document cunoscut și sub numele de „Planul 3x20” sau „Planul 20-20-20”. Acest plan vine în sprijinul comunității și stabilește o serie de obiective ce trebuie îndeplinite până în anul 2020, printre care se regăsesc: reducerea cu cel puțin 20% a emisiilor de gaze cu efect de seră față de nivelul din anul 1990, reducerea cu 20% a consumului de energie primară prin intermediul îmbunătățirii eficienței energetice și creșterea la peste 20% a nivelului consumului de energie care provine din surse regenerabile [6, 7]. În completarea acestui pachet legislativ, în data de 22 ianuarie 2014, în comunicarea „Un cadru privind clima și energia în perioada 2020-2030”, Comisia Europeană propune noi obiective. Unul dintre aceste obiective se referă la economiile de energie la nivelul Uniunii Europene, care trebuie să atingă pragul de 30% până în anul 2030. De asemenea, se propune reducerea cu 40% a gazelor cu efect de seră și creșterea la 27% a nivelului consumului de energie care provine din surse regenerabile până în anul 2030 [8].

1.2. IMPACTUL SECTORULUI RESIDENȚIAL ASUPRA CONSUMULUI ENERGETIC

Sectorul rezidențial este responsabil de o mare parte a consumului energetic, în același timp fiind și o sursă importantă de gaze cu efect de seră. Studiile în domeniu au arătat că în anul 2011, la nivelul țărilor membre UE, sectorul rezidențial a fost responsabil de circa 40% din consumul total de energie și de aproximativ 36% din emisiile de CO₂ [Fig. 1.1.]. Mai mult decât atât, în acest sector, sistemele de încălzire cu care sunt echipate clădirile consumă aproximativ 50% din energie, ceea ce reprezintă peste 20% din consumul total de energie [9 – 11].

Cea mai bună comparație pentru afirmațiile anterioare este reprezentată de faptul că valoarea consumului casnic anual de energie pentru încălzire spațială este de 264 kWh/mp în România, în condițiile în care media europeană se afla sub această valoare, adică 125 kWh/m² [12]. Pentru îndeplinirea obiectivelor impuse la nivelul Uniunii Europene, soluțiile găsite pentru sectorul rezidențial pot fi reprezentate astfel:

- țările membre mai puțin dezvoltate s-au preocupat să renoveze clădirile existente. Această renovare se referă în primul rând la reabilitarea termică prin intermediul folosirii unor materiale de construcții cu caracteristici tehnico-constructive superioare: materiale de construcție și de termoizolație cu coeficient de transfer termic redus care să conducă la reducerea pierderilor termice prin intermediul anvelopei clădirii, tâmplărie cu geam multistrat tratat pentru reflexia razelor solare și inserție de gaz cu caracteristici termice superioare și alte materiale de construcție cu caracteristici termice superioare;
- țările membre dezvoltate au găsit ca și soluție suplimentară a problemei prezentate construirea de case noi, eficiente sau chiar independente energetic și cu emisii apropiate de zero. Independența energetică a acestor

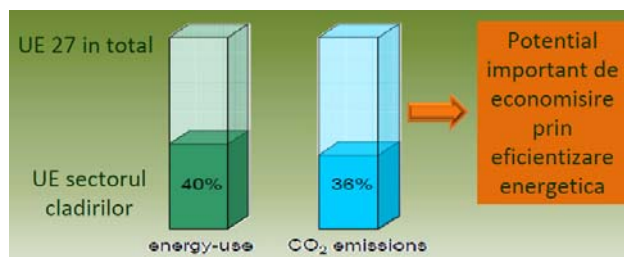


Fig. 1. 1. - Repartiția consumului de energie la nivelul țărilor membre UE

clădiri este dată de faptul că majoritatea energiei necesară funcționării este produsă la nivel local prin intermediul folosirii surselor de energie regenerabilă.

În urma cercetării acestor soluții s-a constatat că acestea aduc o oarecare îmbunătățire, însă nu reprezintă soluția optimă. În acest fel, obiectivele propuse pot fi atinse numai prin utilizarea metodelor amintite anterior în combinație cu alte metode de optimizare a consumului de energie, dezvoltarea de strategii avansate de control termic care să poată fi aplicate în clădiri și bineînțeles, folosirea surselor de energie regenerabilă [1, 10].

1.3. REDUCEREA CONSUMULUI DE ENERGIE ÎN CLĂDIRI

După cum reiese din datele studiilor prezentate anterior, clădirile reprezintă un factor important în ceea ce privește consumul energetic. La nivelul unei clădiri, o cantitate importantă din totalul energiei consumate este utilizată pentru încălzirea spațiului interior și pentru prepararea apei calde de consum. Aceste două surse de consum pot beneficia de o reducere imensă în ceea ce privește energia consumată, prin intermediul mai multor metode.

1.3.1. Utilizarea metodelor tehnico-constructive specifice ingineriei civile

În România, problema eficienței energetice a clădirilor este cu atât mai importantă cu cât fondul de clădiri existent este construit în proporție de peste 50% înainte de anul 1970, aceste clădiri fiind ineficiente energetic. Referitor la noile clădiri, în special cele rezidențiale, se poate spune că au o eficiență energetică relativ scăzută [12]. Structura fondului locativ în funcție de vechime este prezentată în Fig. 1.2. [11]

Din punctul de vedere al ingineriei civile, pentru sporirea eficienței energetice a unei clădiri, în sezonul rece trebuie ca pierderile de căldură mari prin elementele de anvelopă ale acesteia să fie diminuate, ceea ce presupune necesitatea sporirii izolației termice, iar în sezonul cald trebuie ca reducerea consumului energetic pentru răcire să se facă prin asigurarea caracterului de protecție solară a clădirii. Soluțiile folosite în domeniul construcțiilor pentru îmbunătățirea protecției termice a pereților exteriori structurali și nestructurali sunt montarea unui strat termoizolant suplimentar pe pereții existenți. Ferestrele și ușile exterioare pot fi cu ramă din profile PVC, din lemn stratificat, din aluminiu/oțel cu rupere de punte termică, din fibră de sticlă sau mixte și geam termoizolant [13].

În ultimii ani, orice aparat achiziționat vine însoțit de o etichetă care declară în ce clasă energetică se încadrează acesta. La fel ca și acestea, o clădire se poate încadra într-o clasă energetică sau alta, în funcție de performanțele energetice declarate ale sale. Din punct de vedere al eficienței energetice, standardul EN15232 departajează clădirile în șapte clase: A, B, C, D, E, F, G. Clasa energetică a unei case poate fi asociată ca și o notă ce îi este atribuită în funcție de capacitatea acesteia de a economisi energie. Cele șapte clase energetice au în spate un punctaj de la 1 la aproximativ 100, stabilit în funcție de mai mulți parametri.

Pentru ca o casă se poată încadra în clasa energetică A, este necesar ca aceasta să aibă un consum mai mic de 125 kWh/m²/an. Această valoare reprezintă energia consumată în scopul asigurării condițiilor optime de temperatură, iluminat și apă caldă. Clasa energetică cea mai dezavantajoasă este reprezentată de clasa energetică G, clasă ce presupune un consum de peste 820 kWh/m²/an – Fig. 1.3. și Tabelul 1.1.

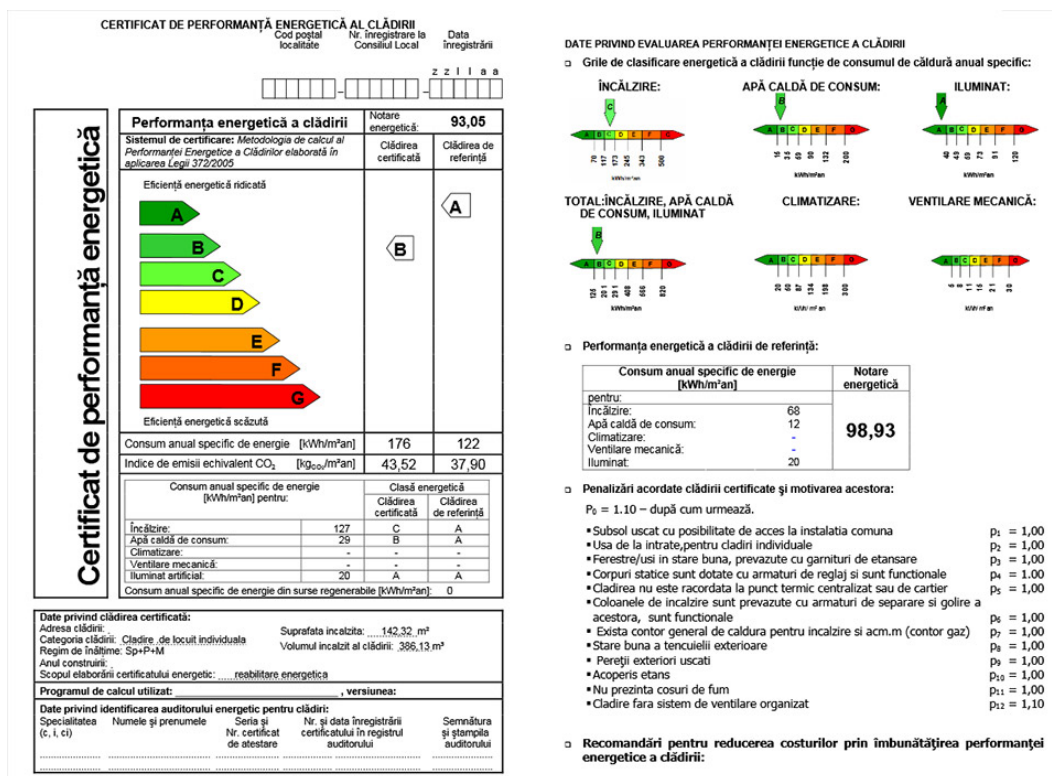


Fig. 1.3. - Exemplu de certificat de performanță energetică pentru un bloc de locuințe

Tabelul 1.1. - Intervalul de clasificare al claselor energetice pentru clădiri

Clasa energetică	Consumul de căldură specific
Clasa energetică A	< 125 kWh/m ² /an
Clasa energetică B	126 – 201 kWh/m ² /an
Clasa energetică C	202 – 291 kWh/m ² /an
Clasa energetică D	292 – 408 kWh/m ² /an
Clasa energetică E	409 – 566 kWh/m ² /an
Clasa energetică F	567 – 820 kWh/m ² /an
Clasa energetică G	> 820 kWh/m ² /an

1.3.2. Utilizarea surselor de energie regenerabilă în clădiri

Cu toate că în ultimii ani am asistat la evoluții tehnologice spectaculoase în mai multe domenii, din păcate în domeniul folosirii energiei regenerabile în cadrul clădirilor nu au existat progrese semnificative. Din acest motiv, integrarea surselor de energie regenerabilă în clădiri reprezintă în continuare o provocare pentru comunitatea științifică care să ducă la reducerea consumului de energie din clădiri.

Chiar dacă discutăm despre o sursă de energie produsă la un preț foarte mic, principalul inconvenient al acesteia este acela că disponibilitatea de producție nu este asigurată în mod continuu. Una dintre soluțiile necesare rezolvării acestui inconvenient este reprezentată de depozitarea energiei produse excedentare în unități de stocare. Această soluție nu poate asigura existența întregii cantități de energie necesară clădirii doar din surse de energie regenerabile. Pentru a asigura continuitatea furnizării de energie, o soluție optimă este reprezentată de sistemele echipate cu surse de energie suplimentare. Aceste sisteme sunt cunoscute sub denumirea de sisteme multi-sursă, iar proveniența energiei de la sursa auxiliară poate fi de asemenea din surse de energie regenerabilă sau energie produsă convențional.

1.3.3. Utilizarea strategiilor de control termic

O altă metodă de reducere a consumului de energie din clădiri este reprezentată de reglarea automată a consumatorilor de energie din interiorul acesteia. Strategia de control termic după care este realizată reglarea este de asemenea foarte importantă și ea conduce la eficacitatea metodei alese pentru controlul termic interior.

Din studiile efectuate cu privire la strategiile de control termic din cadrul clădirilor, reiese faptul că în majoritatea clădirilor radiatoarele sunt prevăzute cu robinete cu capete termostatare, aceasta fiind cea mai răspândită metoda de control termic. Unul dintre efectele negative produse de folosirea necorespunzătoare a lor este supraîncălzirea incintei.

Pentru a diminua acest efect, robinete sunt echipate cu regulatoare automate (RA) de tip PID. În cele mai multe cazuri, aceștia nu sunt concepuți special pentru reducerea consumului energetic, buclele lor de feedback introducând un decalaj între temperatura camerei și punctul de referință, astfel afectând negativ confortul [15 - 17].

O altă metodă de reducere a consumului energetic din clădiri și păstrarea nivelului de confort este reprezentată de implementarea unui sistem de management al clădirii (BMS) care are în componența mai multe sisteme de control tradiționale ce sunt dirijate într-un mod sincronizat.

Pentru a răspunde cerințelor de control ale sistemelor MIMO, trebuie luată în calcul o altă strategie de control care să aibă feedback că și strategia PID (este utilizată eroarea diferenței de temperatură), însă utilizează cât mai multe variabile posibile (valoarea temperaturii exterioare, prognoza meteo și programul de ocupare al clădirii) și, de asemenea, include dinamica sistemului [16, 17, 18]. Pentru a putea aplica o astfel de strategie de control pentru sistemele cu mai multe intrări și mai multe ieșiri, care sunt tipice sistemelor de încălzire, o soluție bună poate fi reprezentată de utilizarea strategiei de Control Predictiv bazat pe Model - CPM (Model Predictive Control - MPC). Dificultățile principale de aplicare ale acestei strategii sunt cerințele ridicate pentru resursele de calcul utilizate și fondul matematic foarte puternic ce este utilizat, mai ales în ceea ce privește partea de modelare a regulatorului [18, 19, 20, 21, 22, 23].

1.4. CALCULUL SARCINII TERMICE A UNEI CLĂDIRI

În general, o clădire poate fi privită ca și un proces termic care este perturbat de condițiile meteo exterioare și de ocupații acesteia. Mărimea ce trebuie reglată în interiorul acestui proces termic este reprezentată de temperatura interioară, parametru ce poate fi modificat prin introducerea de flux termic. Sistemele de încălzire din interiorul clădirilor sunt comandate prin intermediul regulatoarelor automate (RA) care la fiecare perioadă de timp își calculează puterea la care trebuie să funcționeze aceste sisteme – Fig. 1.4.

Sistemul de reglare automată (SRA) convențional al unui sistem reprezentat de o clădire poate fi reprezentat grafic sub forma unei diagrame bloc – Fig. 1.5. [14].

Pentru calcularea sarcinii termice a unei clădiri trebuie determinat fluxul termic

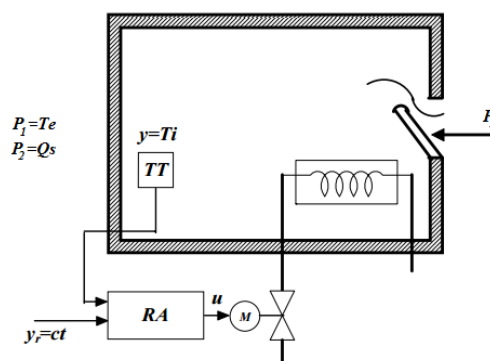


Fig. 1. 4. - Reprezentare grafică a unui sistem de încălzire automatizat

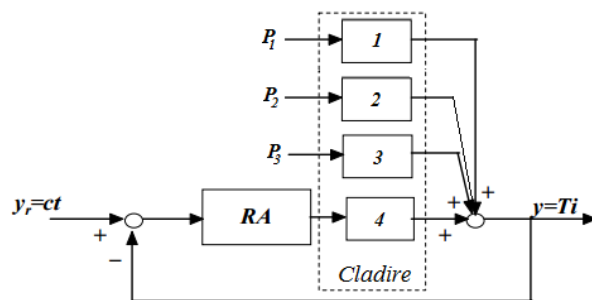


Fig. 1. 5. - Schema bloc a unui SRA pentru încălzirea clădirii

necesar asigurării performanței termice impuse pentru clădire prin intermediul reguletoarelor. Aceasta valoare reprezintă de fapt sarcina termică a clădirii și poate fi determinată prin simularea algoritmului de control al procesului prezentat [15].

Calculul sarcinii termice al unei clădiri poate fi gândita ca și o problemă de control ce poate fi realizată în două etape. În prima fază trebuie eliminat efectul perturbațiilor

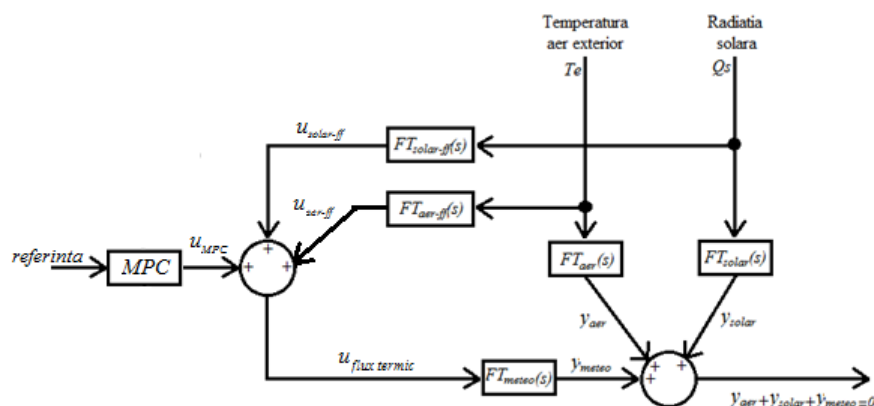


Fig. 1. 6. - Schema bloc a unui sistem de reglare cu predicție

introduse de temperatura exterioară și radiația solară, iar apoi trebuie calculată sarcina termică a clădirii. În acest scop poate fi folosită o strategie de control feed-forward prin intermediul căreia este determinată cantitatea de căldură necesară în clădire pentru eliminarea efectelor produse de perturbațiile aminte. A doua etapă ce trebuie realizată se referă la calculul sarcinii termice necesară ca temperatura interioară (ieșirea sistemului) să urmărească cat mai fidel valoarea de referință. În acest scop poate fi folosită o strategie de control clasică cu reguletoare PID, însă pentru obținerea unor rezultate mai bune este recomandată utilizarea unei strategii de control predictiv care să utilizeze datele referitoare la prognoza meteo și programul de ocupare al clădirii [15]. Reprezentarea grafică a întregului sistem prezentat, reprezentare ce va fi considerată și în cadrul strategiei de control prezentată în cadrul tezei, poate fi făcută prin intermediul schemei bloc prezentate în Fig. 1.6.

1.5. CONCLUZII

Acest prim capitol al tezei se constituie dintr-o vastă documentare cu privire la consumul de energie la nivelul statelor membre ale Uniunii Europene și în particular la nivelul României, accentul fiind pus pe consumul de energie pentru clădirile de locuit. Studiul cuprinde aspecte generale cu referire la reducerea consumului de energie și prezintă potențialul de eficientizare energetică din clădiri. Un spațiu consistent este alocat studiului directivelor referitoare la reducerea consumului de energie în clădirile de locuit, emise la nivel european și transpuse în legislația națională în scopul stabilirii unor strategii de eficientizare energetică, cele mai importante dintre acestea fiind strategiile naționale referitoare la atingerea țintelor din Directiva 20-20-20.

CAPITOLUL 2 MODELAREA MATEMATICĂ A UNEI CLĂDIRI

În societate există o nevoie tot mai mare de a evalua și cuantifica proprietățile termice ale clădirilor pentru a reduce consumul de energie și de a dezvolta metode standard pentru caracterizarea și controlul acestora [24]. Pentru reglarea temperaturii dintr-o clădire, atunci când sunt folosite regulatoare ce au implementate strategii de control avansate, este necesară obținerea modelului dinamic al acesteia. Un astfel de model poate fi obținut de obicei în două etape: în prima fază, pe baza cunoștințelor fizice ale clădirii, este necesară determinarea structurii modelului rețelei termice de ordin inferior al clădirii, iar apoi sunt identificați experimental parametrii fizici ai modelului folosind metoda celor mai mici pătrate [27].

2.1. PREZENTAREA SISTEMULUI

Pentru a putea prezenta mult mai ușor rezultatele studiului efectuat în cadrul acestei teze, am ales să realizez experimentele utilizând date culese din cadrul unei case experimentale, situată în sudul Germaniei – Holzkirchen, la Institutul din Fraunhofer pentru fizica clădirilor - Fig. 2.1. Suprafața acesteia este de 100 m². Datele utilizate corespund perioadei începând cu 09.04.2014 până în 28.04.2014, cu o perioadă de eșantionare de 60 de minute - Fig. 2.2. [28].

Casa a fost testată sub acțiunea condițiilor meteo exterioare, aceste date fiind de asemenea măsurate - Tabelul 2.1 [28]. În vederea realizării unui model al casei, aceasta a fost văzută ca și un sistem cu patru intrări și o ieșire. Intrările sunt reprezentate de variabilele care aduc modificări ambientului interior și anume: temperatura exterioară, temperatura aerului introdus prin ventilație, radiația solară și fluxul termic interior. Ieșirea sistemului este reprezentată de temperatura aerului interior și reprezintă mărimea ce trebuie reglată în cadrul acestei teze.

Tabelul 2. 1. - Intervalul de măsurare al datelor monitorizate

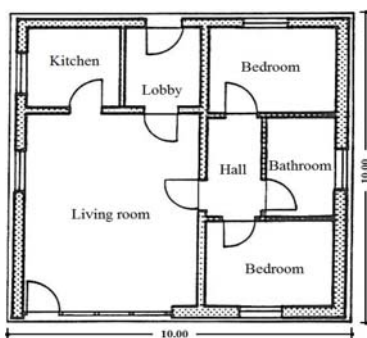


Fig. 2. 1. - Planul de referință al casei experimentale

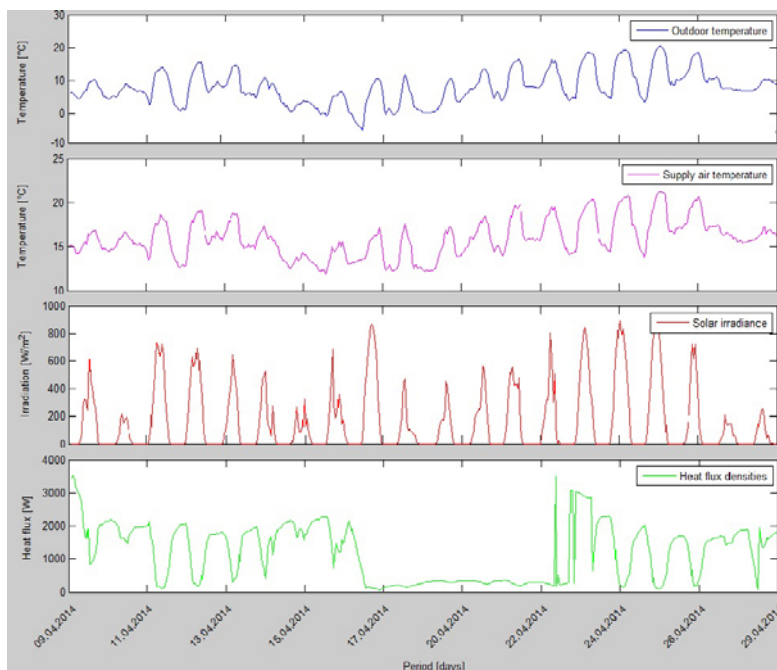


Fig. 2. 2. - Datele măsurate în vederea monitorizării comportamentului termic al clădirii

Variabila măsurată	Simbol	Unitate de măsură	Intervale de măsură
Intrări			
Temperatura exterioară	T_{ep}	[°C]	[-4,93 - 20,41]
Temperatura aerului introdus	T_{ev}	[°C]	[11,91 - 21,23]
Radiația solară	Q_s	[W]	[0,00 - 892,71]
Fluxul intern de caldură	Q_{elp}	[W/m ²]	[3,43 - 1952,26]
Ieșire			
Temperatura interioară	θ_z	[°C]	[21,00 - 32,61]

Sistemul de ventilație utilizat în cadrul clădirii este de tip mecanic. Rata fluxului de aer introdusă de acesta în living este setată la o valoare nominală de 60 m³/h, iar rata de extracție este setată la câte 30 m³/h în dormitorul din zona sudică și în baie. Sistemul de încălzire utilizat în cadrul acestui experiment este reprezentat de încălzitoare electrice. Sistemul reprezentat de întreaga clădire poate fi reprezentat de asemenea sub forma unei diagrame bloc cu patru intrări și o ieșire - Fig. 2.3. [10, 28].

2.2. REPREZENTAREA ÎN SPAȚIUL STĂRILOR

Pentru obținerea unui model de ordin redus se pleacă de la ipotezele minime că proprietățile clădirii sunt distribuite uniform, parametrii modelului sunt constanți în timp, etc.

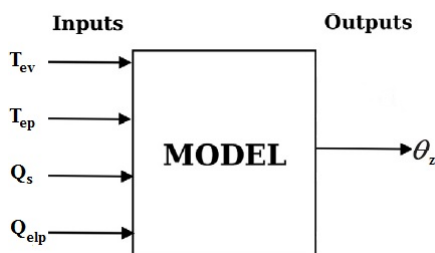


Fig. 2. 3. - Diagrama bloc a sistemului cu patru intrări și o ieșire

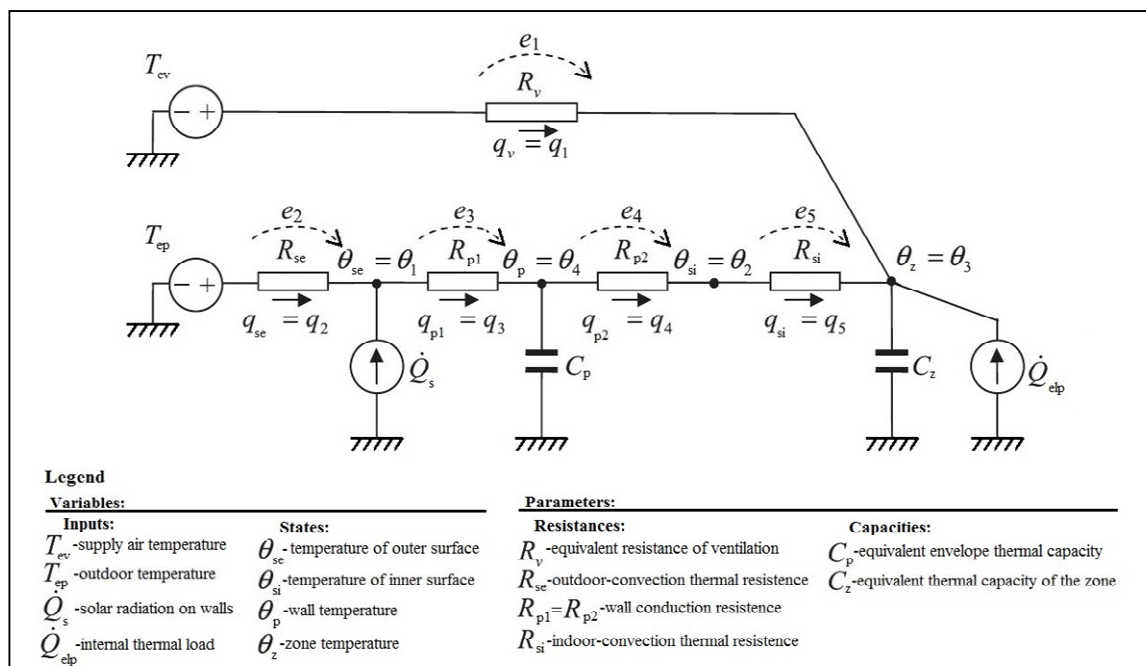


Fig. 2. 4. - Modelul electric echivalent pentru o clădire cu o singură zonă termică

Aceste ipoteze duc la simplificarea modelului. Modelele obținute pe baza cunoștințelor fizice sunt reprezentate în spațiul stărilor utilizând un set de ecuații algebrice diferențiale. Aceste ecuații sunt de fapt o reprezentare a sistemelor cu ecuații diferențiale pentru funcții vectoriale prin care se poate reprezenta un model [29].

În scopul realizării unui model de ordin redus care să fie folosit pentru controlul temperaturii din interiorul clădirii, una dintre metodele folosite pentru reprezentarea transferului de căldură este oferită de reprezentarea rețelei electrice liniare cu parametrii concentrați a clădirii. Principiul acestei metode se referă la analogia dintre două domenii fizice diferite care poate fi reprezentată prin intermediul aceluiași ecuații matematice. În acest fel, în continuare, clădirea va fi reprezentată prin intermediul unui circuit electric liniar, iar ecuațiile în spațiul stărilor vor fi obținute prin rezolvarea acestui circuit [30 - 33].

În acest caz, sursele de tensiune se referă la temperaturi, sursele de curent se referă la fluxul de căldură, rezistențele electrice se referă la rezistența de transmitere a căldurii, iar capacitățile electrice înlocuiesc capacitatea termică din model. Echivalentul unui circuit electric al clădirii poate fi obținut prin unirea unor modele ale componentelor precum pereții, ferestrele, ventilația, masa internă, etc. care sunt reprezentate prin intermediul rețelei electrice.

Pereții interiori ai clădirilor cu o singură zonă sunt considerați a face parte din masa internă, iar pereții exteriori alcătuiesc anvelopa acesteia. Cele mai utilizate rețele pentru anvelopa unei clădiri sunt reprezentările 2R-C [34] sau 3R-2C [35]. Ventilația, infiltrările și ferestrele clădirii nu sunt acumulate de energie termică și pot fi reprezentate în cadrul modelului ca simple rezistențe. Masa termică internă a clădirii este reprezentată sub forma unei capacități electrice.

Pentru casa prezentată anterior, s-a construit un model aproximat ca fiind pentru o clădire cu o singură zonă termică a cărei circuit electric echivalent este reprezentat în Fig. 2.4.

Anvelopa clădirii este reprezentată prin intermediul unei rețele 2R-C. Materialul din care este realizată aceasta este uniform distribuit pe întreaga suprafață, iar proprietățile termo-fizice sunt constante în timp. Anvelopa, ferestrele, ventilația, infiltrările și masa termică internă sunt considerate ca fiind componentele pasive ale clădirii. Conducția termică prin perete este considerată ca fiind unidirecțională și perpendiculară pe suprafața acestuia. Capacitatea termică stocată în perete este reprezentată de C_w , iar izolația peretelui este

reprezentată de rezistențele conductive R_{p1} și R_{p2} . Rezistența termică ce se regăsește la limita dintre anvelopă și aerul interior, respectiv aerul exterior este reprezentată prin rezistențele convective R_{si} , respectiv R_{se} . Capacitatea termică a masei interne este reprezentată de C_z , iar ventilația și infiltrațiile din clădire sunt reprezentate de rezistența R_v . Temperatura exterioară, temperatura aerului introdus prin ventilație, radiația solară și fluxul intern de căldură sunt considerate ca fiind componentele active ale clădirii. Toate aceste condiții sunt considerate ca și ipoteze simplificatoare care să conducă la obținerea unui model de ordin redus.

Temperatura interioară, θ_z , reprezintă ieșirea sistemului, iar în cazul prezentat este influențată de patru intrări: temperatura exterioară, radiația solară, fluxul intern de căldură și temperatura aerului introdus prin ventilație.

Fluxul intern de căldură este o mărime controlabilă, iar el reprezintă de obicei comanda sistemului. Temperatura exterioară, radiația solară, și temperatura aerului introdus prin ventilație sunt surse necontrolabile, însă sunt măsurabile.

Pentru a putea obține reprezentarea în spațiul stărilor pentru circuitul prezentat în Fig. 2.4., este necesară aplicarea teoremei superpoziției prin intermediul căreia sunt extrase patru modele cu o singură intrare și o singură ieșire (SISO - single-input-single-output), fiecare dintre ele corespunzând perechii intrare/ieșire (acțiunea fiecărei surse perturbatoare asupra temperaturii interioare). În cele din urmă, aceste patru modele pot fi reprezentate ca un singur model cu mai multe intrări și o singură ieșire (MISO - multi-input-single-output), așa cum se arată și în Fig. 2.3.

Plecând de la metoda balanței de căldură, dacă se consideră că mediul este format dintr-un set infinit de noduri, fiecare având o temperatură proprie, noduri conectate între ele prin ramuri, fiecare ramură având propria rezistență termică, modelul clădirii poate fi scris sub forma unui set infinit de ecuații algebrice diferențiale [36] sub forma:

$$C\dot{\theta} = -A^T G A \theta + A^T G b + f. \quad (2.1)$$

, unde pentru circuitul termic prezentat anterior, A este matricea de incidență a rețelei ce reprezintă circuitul termic (aceasta reprezintă conexiunea între nodurile rețelei), A^T este reprezentată de matricea transpusă a matricei A , iar parametrii modelului sunt reprezentați de G – reprezintă matricea diagonală a conductanței termice, respectiv C – reprezintă matricea diagonală a capacităților termice:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_p \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} R_v^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{se}^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{p1}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{p2}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{si}^{-1} \end{bmatrix}$$

În ecuația (2.1), variabilele necunoscute sunt cele din vectorul de temperaturi în noduri, $\theta = [\theta_{se} \ \theta_{si} \ \theta_z \ \theta_p]^T$, iar intrările modelului sunt cele din vectorul intrărilor $u = [b \ f]^T$, unde $b = [T_{ev} \ T_{ep} \ 0 \ 0 \ 0]$ reprezintă vectorul surselor de temperaturi pe ramuri, iar $f = [Q_s \ 0 \ Q_{elp} \ 0]$ reprezintă vectorul surselor de căldură din noduri. Ecuația (1) poate fi scrisă sub forma:

$$C\dot{\theta} = K\theta + K_b b + f. \quad (2.2)$$

, unde s-a folosit următoarea notație: $K = -A^T G A$ și $K_b = A^T G$. Pentru circuitul electric prezentat anterior, valorile lui K și K_b sunt următoarele:

$$K = \left[\begin{array}{cc|cc} \frac{R_{p1} + R_{se}}{R_{se}R_{p1}} & 0 & 0 & \frac{1}{R_{p1}} \\ 0 & -\frac{R_{si} + R_{p2}}{R_{p2}R_{si}} & \frac{1}{R_{si}} & \frac{1}{R_{p2}} \\ \hline 0 & \frac{1}{R_{si}} & -\frac{R_{si} + R_v}{R_vR_{si}} & 0 \\ \frac{1}{R_{p1}} & \frac{1}{R_{p2}} & 0 & -\frac{R_{p2} + R_{p1}}{R_{p1}R_{p2}} \end{array} \right] \quad K_b = \left[\begin{array}{cccc|c} 0 & \frac{1}{R_{se}} & -\frac{1}{R_{p1}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{p2}} & -\frac{1}{R_{si}} \\ \hline \frac{1}{R_v} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{si}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{p1}} & \frac{1}{R_{p2}} & 0 \end{array} \right]$$

Din forma matricială a K și K_b se pot deduce destul de ușor valorile K_{11} , K_{12} , K_{21} , K_{22} , respectiv K_{b1} , K_{b2} . Așa cum se poate observa, în matricea diagonală a capacităților termice, C , unele elemente sunt zero. Din acest motiv, ecuația (2.2) poate fi reprezentată ca și un sistem de ecuații algebrice diferențiale, ceea ce înseamnă că ecuațiile algebrice sunt cele care corespund valorilor zero din C , iar ecuațiile diferențiale corespund valorilor non-zero din C . Printr-o simplă rearanjare, păstrând metodologia prezentată în [36], cu scopul separării ecuațiilor diferențiale de cele algebrice, ecuația (2.2) poate fi scrisă sub forma:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_0 \\ \dot{\theta}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{b1} \\ K_{b2} \end{bmatrix} b + \begin{bmatrix} I_{11} & 0 \\ 0 & I_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_C \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

, unde, C_C este matricea diagonală a capacităților termice ne-neglijabile.

- Ecuațiile diferențiale:

Daca sunt eliminate ecuațiile algebrice din reprezentarea (2.3), poate fi obținută reprezentarea în spațiul stărilor, sub următoarea formă:

$$\dot{\theta}_C = C_C^{-1}(-K_{21}K_{11}^{-1}K_{12} + K_{22})\theta_C + C_C^{-1}[-K_{21}K_{11}^{-1}K_{b1} + K_{b2} \quad -K_{21}K_{11}^{-1} \quad I_{22}]u. \quad (2.4)$$

, care poate fi scrisă sub forma:

$$\dot{\theta}_C = A_S\theta_C + B_Su. \quad (2.5)$$

Prin compararea ecuației (2.4) și ecuației (2.5) se poate deduce că relația între matricea stărilor, A_S , și ecuația (2.4) este:

$$A_S = C_C^{-1}(-K_{21}K_{11}^{-1}K_{12} + K_{22}). \quad (2.6)$$

, care pentru casa prezentată se poate scrie ca:

$$A_S = \begin{bmatrix} -\frac{R_{si} + R_v + R_{p2}}{C_z R_v (R_{si} + R_{p2})} & \frac{1}{C_z (R_{si} + R_{p2})} \\ \frac{1}{C_p (R_{si} + R_{p2})} & -\frac{R_{p2} + R_{p1} + R_{se} + R_{si}}{C_p (R_{p1} + R_{se})(R_{p2} + R_{si})} \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

, iar relația între matricea intrărilor, B_S , și ecuația (2.4) este:

$$B_S = C_C^{-1}[-K_{21}K_{11}^{-1}K_{b1} + K_{b2} \quad -K_{21}K_{11}^{-1} \quad I_{22}]J. \quad (2.8)$$

, care pentru casa prezentată se poate scrie ca:

$$B_S = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_z R_v} & 0 & 0 & \frac{1}{C_z} \\ 0 & \frac{1}{C_p (R_{p1} + R_{se})} & \frac{R_{se}}{C_p (R_{p1} + R_{se})} & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

- Ecuațiile algebrice:

Asemănător procedurii anterior, din ecuația (2.3) se poate obține un set de ecuații algebrice care să completeze modelul în spațiul stărilor:

$$\theta_0 = -K_{11}^{-1} \begin{bmatrix} K_{12}\theta_C & [K_{b1} \quad I_{11} \quad 0] \begin{bmatrix} b \\ f_0 \\ f_C \end{bmatrix} \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

, care poate fi scrisă sub forma:

$$\theta_0 = C_S\theta_C + D_Su. \quad (2.11)$$

Prin compararea ecuației (2.10) și ecuației (2.11) se poate deduce că relația între matricea ieșirilor, C_S , și ecuația (2.10) este:

$$C_S = -K_{II}^{-1} K_{I2} \quad (2.12)$$

, iar relația între matricea D_S și ecuația (2.10) este:

$$D_S = -K_{II}^{-1} [K_{bI} \quad I_{II} \quad 0] \quad (2.13)$$

Considerând că ieșirea sistemului este θ_z , și știind că circuitul electric echivalent prezentat anterior are capacitate termică non-neglijabilă, pentru realizarea modelului pentru casa prezentată, valoarea ieșirii, θ_z , va fi obținută din matricea C_S și vectorul θ_c , iar valoarea matricei D_S va fi zero pentru cazul prezentat în continuare:

$$\begin{aligned} C_S &= [1 \quad 0] \\ D_S &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \end{aligned} \quad (2.14)$$

2.3. ANALIZA MODELULUI

Pentru un sistem așa cum este cel prezentat, legătura între intrări și ieșiri poate fi reprezentată sub forma unui set de funcții de transfer. Reprezentarea acestuia sub forma unor funcții de transfer este mult mai benefică pentru analiza întregului sistem. Modelul reprezentat în spațiul stărilor corespunzător circuitului electric echivalent prezentat anterior este:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_C &= A_S \theta_C + B_S u \\ \theta_z &= C_S \theta_C + D_S u \end{aligned} \quad (2.15)$$

Pentru obținerea funcției de transfer este necesară aplicarea transformatei Laplace în condiții inițiale nule, iar ecuația (2.15) poate fi scrisă ca:

$$\begin{cases} s\theta_C = A_S \theta_C + B_S u \\ \theta_z = C_S \theta_C + D_S u \end{cases} \quad (2.16)$$

Din prima ecuație a sistemului de ecuații (2.16) putem obține:

$$\theta_C = (sI - A_S)^{-1} B_S u \quad (2.17)$$

, iar prin intermediul ecuației (2.17) și a celei de-a doua ecuație din sistemul de ecuații (2.16), se poate deduce că ieșirea sistemului nostru este:

$$\theta_z = (C_S (sI - A_S)^{-1} B_S + D_S) u \quad (2.18)$$

, unde matricea de transfer a sistemului este:

$$H_S = C_S (sI - A_S)^{-1} B_S + D_S \quad (2.19)$$

, unde H_S reprezintă modelul sub forma funcției de transfer, s este o variabilă complexă, iar I este matricea identitate ce are aceeași dimensiune cu matricea de stare A .

Fiecare element al matricei de transfer reprezintă o funcție de transfer care reprezintă ieșirea sistemului pentru o anumită intrare din vectorul de intrări [37 - 38]. Pentru circuitul electric echivalent prezentat în cadrul tezei, circuit în care sunt reprezentate patru intrări, se obțin patru funcții de transfer. În final, clădirea este reprezentată prin superpoziția celor patru funcții de transfer și astfel se poate arăta cum fiecare intrare influențează ieșirea sistemului (temperatura interioară).

2.4. IDENTIFICAREA PARAMETRILOR SISTEMULUI

Perturbațiile reprezintă o caracteristică foarte importantă atunci când se dorește realizarea controlului pentru o clădire reală. Pentru a putea utiliza modelul de ordin redus al clădirii, un ultim pas ce trebuie realizat se referă la obținerea valorilor parametrilor care poate fi realizat prin intermediul unui proces de identificare. Astfel, identificarea parametrilor clădirii devine o problemă destul de importantă. În literatura de specialitate sunt cunoscute mai multe metode de identificare a sistemelor, însă nu toate dintre acestea sunt recomandate în cazurile în care sistemul este reprezentat de o clădire [39].

2.4.1 Alegerea metodei de identificare

Realizarea unei excitații de tip treaptă pentru temperatura aerului exterior și pentru radiația solară este imposibil de realizat în practică. Astfel, metodele grafico-analitice

pentru analiza răspunsului la impuls de tip treaptă unitară nu pot fi folosite și trebuie să folosim o metodă de identificare parametrică. Algoritmii de bază pentru căutarea optimă a valorilor parametrilor sunt căutarea iterativă a minimumului și metoda celor mai mici pătrate [27]. Algoritmii de căutare iterativă a minimumului este aplicat atunci când se dorește aflarea valorii fiecărui parametru fizic din rețeaua electrică echivalentă a sistemului, acesta fiind cazul în care se dorește realizarea unei evaluări a performanței energetice a unei clădiri. Pentru a atinge scopul urmărit de noi, modelul trebuie să fie unul robust care să poată prezice comportamentul viitor al clădirii. Astfel, am ales ca și metodă de identificare a parametrilor metoda celor mai mici pătrate care estimează valorile parametrilor funcției de transfer a sistemului reprezentată în timp discret [27].

Anterior a fost determinată matricea de transfer în timp continuu în funcție de coeficienții matricelor reprezentării în spațiul stărilor. Pentru obținerea matricei de transfer în timp discret trebuie să se urmeze anumiți pași. Pornind de la coeficienții matricelor A_s , B_s , C_s , D_s , prin aplicarea metodei de integrare a lui Euler se poate ajunge foarte ușor la forma funcției de transfer în timp discret.

Metoda de integrare a lui Euler pentru obținerea formei discrete a coeficienților matricelor din reprezentarea în spațiul stărilor este:

$$\begin{aligned} A_d &= I + A_s \Delta t \\ B_d &= B_s \Delta t \end{aligned} \quad (2.20)$$

, unde Δt reprezintă intervalul de timp de discretizare.

Pentru obținerea unei relații între relațiile scrise în domeniul de timp continuu și cele scrise în timp discret este considerat termenul z care reprezintă un operator de decalare a timpului:

$$\begin{aligned} z^n x(t) &= x(t+n) \\ z^{-n} x(t) &= x(t-n) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Relația între matricele în timp continuu și cele în timp discret este:

$$\begin{aligned} A_d = \begin{bmatrix} a_{d11} & a_{d12} \\ a_{d21} & a_{d22} \end{bmatrix} &\rightarrow \begin{aligned} a_{d11} &= (1 + \Delta t * a_{11}) & a_{d12} &= \Delta t * a_{12} \\ a_{d21} &= \Delta t * a_{21} & a_{d22} &= (1 + \Delta t * a_{22}) \end{aligned} \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} b_{d11} & b_{d12} & b_{d13} & b_{d14} \\ b_{d21} & b_{d22} & b_{d23} & b_{d24} \end{bmatrix} \rightarrow b_{dij} = \Delta t * b_{ij}$$

$$C_d = [1 \ 0]$$

$$D_d = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Utilizând aceste valori ale coeficienților matricelor de mai sus, funcția de transfer în timp discret este:

$$H(z) = C_d (zI - A_d)^{-1} B_d + D_d \quad (2.23)$$

, care pentru cazul general poate fi scrisă sub forma:

$$H(z) = [0 \ 1] \begin{bmatrix} z - a_{d11} & -a_{d12} \\ -a_{d21} & z - a_{d22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_{d11} & b_{d12} & b_{d13} & b_{d14} \\ b_{d21} & b_{d22} & b_{d23} & b_{d24} \end{bmatrix} + [0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (2.24)$$

Reprezentarea de mai jos este obținută prin discretizarea în timp a funcției de transfer continue a modelului clădirii, și oferă o formulare liniară a problemei de identificare care asigură găsirea soluției optime. Pentru modelul clădirii de ordin redus prezentat anterior se vor identifica parametrii $m_1, m_2, n_{11} \dots n_{42}$.

$$H(z^{-1}) = \begin{pmatrix} \frac{\theta_z(z^{-1})}{T_{ev}(z^{-1})} \\ \frac{\theta_z(z^{-1})}{T_{ep}(z^{-1})} \\ \frac{\theta_z(z^{-1})}{Q_s(z^{-1})} \\ \frac{\theta_z(z^{-1})}{Q_{elp}(z^{-1})} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{n_{11}z^{-1} + n_{12}z^{-2}}{1 + m_1z^{-1} + m_2z^{-2}} \\ \frac{n_{22}z^{-2}}{1 + m_1z^{-1} + m_2z^{-2}} \\ \frac{n_{32}z^{-2}}{1 + m_1z^{-1} + m_2z^{-2}} \\ \frac{n_{41}z^{-1} + n_{42}z^{-2}}{1 + m_1z^{-1} + m_2z^{-2}} \end{pmatrix}. \quad (2.25)$$

Parametrii n_{11} și n_{12} corespund ieșirii sistemului la interacțiunea cu variația temperaturii aerului introdus prin ventilație, parametrul n_{22} corespunde ieșirii sistemului la interacțiunea cu variația temperaturii aerului exterior, parametrul n_{32} corespunde ieșirii sistemului la interacțiunea cu variația fluxului solar incident pe anvelopa clădirii, iar parametrii n_{41} și n_{42} corespund ieșirii sistemului la interacțiunea cu variația fluxului de căldură intern.

2.4.2 Identificarea parametrilor [38, 40, 41]

Matricea de transfer $H(z)$ poate fi scrisă ca și o funcție de transfer de forma:

$$H(z) = [H_1 \ H_2 \ H_3 \ \dots \ H_n]. \quad (2.26)$$

, unde n reprezintă numărul de intrări ale sistemului.

Ecuția (2.26) poate fi scrisă sub forma:

$$Y(z) = \sum_{i=1}^n H_i(z)u_i(z). \quad (2.27)$$

Prin înlocuirea formei lui H_i cu cea care conține coeficienții n_{ij} și m_j , pentru sistemul prezentat în cadrul tezei vom obține:

$$y(k) = -m_1z^{-1}y(k-1) - m_2z^{-2}y(k-2) + n_{11}z^{-1}u_1(k-1) + n_{12}z^{-2}u_1(k-2) + \dots \quad (2.28)$$

$$+ n_{22}z^{-2}u_2(k-2) + n_{32}z^{-2}u_3(k-2) + n_{41}z^{-1}u_4(k-1) + n_{42}z^{-2}u_4(k-2)$$

Utilizând valorile datelor măsurate în cadrul experimentului prezentat, pot fi determinate valorile parametrilor sistemului prezentați în continuare:

$$x = [m_1 \ m_2 \ n_{11} \ n_{12} \ n_{22} \ n_{32} \ n_{41} \ n_{42}]^T. \quad (2.29)$$

Modelul funcției de transfer rezultate în urma determinării valorilor parametrilor sistemului este:

$$H(z^{-1}) = \begin{pmatrix} \frac{\theta_z(z^{-1})}{T_{ev}(z^{-1})} \\ \frac{\theta_z(z^{-1})}{T_{ep}(z^{-1})} \\ \frac{\theta_z(z^{-1})}{Q_s(z^{-1})} \\ \frac{\theta_z(z^{-1})}{Q_{elp}(z^{-1})} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{0.137 \cdot 10^{-2} z^{-1} - 0.145 \cdot 10^{-2} z^{-2}}{1 - 0.549z^{-1} + 1.539z^{-2}} \\ \frac{0.003 \cdot 10^{-4} z^{-2}}{1 - 0.549z^{-1} + 1.539z^{-2}} \\ \frac{0.002 \cdot 10^{-5} z^{-2}}{1 - 0.549z^{-1} + 1.539z^{-2}} \\ \frac{0.008 \cdot 10^{-3} z^{-1} - 0.011 \cdot 10^{-3} z^{-2}}{1 - 0.549z^{-1} + 1.539z^{-2}} \end{pmatrix}. \quad (2.30)$$

În urma obținerii valorilor parametrilor, este bine de știut că trebuie să se accepte faptul că între model și datele măsurate există întotdeauna o diferență datorată faptului că acest model de ordin inferior este doar o aproximare a comportamentului termic al clădirii. Astfel, există o anumită eroare între datele măsurate și răspunsul modelului. Eroarea obținută între răspunsul modelului și datele măsurate este de 8.07% și poate fi considerată ca și zgomot alb introdus de variația intrărilor din sistem. Răspunsul sistemului obținut cu ajutorul programului Matlab poate fi observat și sub formă grafică în Fig. 2.5., calculat pentru perioada cuprinsă între 09.04.2014 și 28.04.2014.

2.5. CONCLUZII

Acest capitol este destinat dezvoltării unui model matematic pentru sistemul ce este supus controlului în cadrul următoarelor capitole. Modelul a fost obținut plecând de la metoda balanței de căldură, astfel putând fi scris sub forma unui set infinit de ecuații algebrice diferențiale. Pentru a putea obține un astfel de model este necesară parcurgerea a doua etape:

- prima etapă presupune ca pe baza cunoștințelor fizice ale clădirii, să se determine structura modelului rețelei termice de ordin inferior al clădirii;
- în cadrul celei de-a doua etape sunt identificați experimental parametrii fizici ai modelului folosind metoda celor mai mici pătrate.

Din motive referitoare la complexitatea modelului obținut, casa folosită în cadrul experimentelor a fost aproximată ca o singură zonă termică, cu temperatura uniform distribuită. Modelul astfel realizat a fost reprezentat cu ajutorul unor ecuații în spațiul stărilor, urmând să fie transformat destul de simplu pentru reprezentarea cu ajutorul funcțiilor de

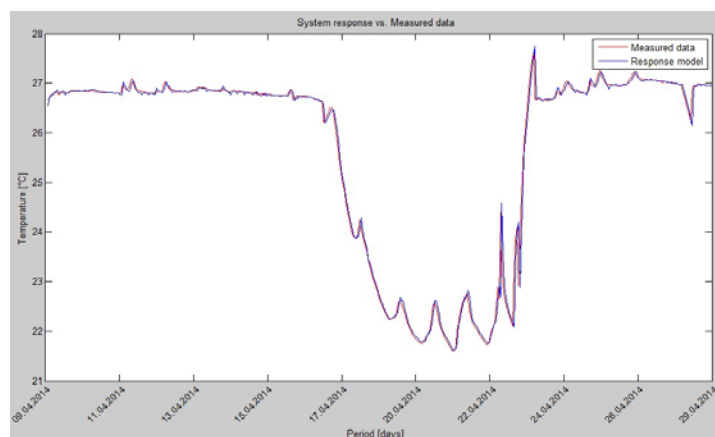


Fig. 2. 5. - Comparatie între reprezentarea datelor măsurate și răspunsul modelului obținut transfer, necesară pentru identificarea parametrilor sistemului.

CAPITOLUL 3

TENDINȚE ACTUALE DE CONTROL AL TEMPERATURII ÎN CLĂDIRI

Atunci când se discută despre controlul termic al clădirilor, trebuie luat în calcul faptul că comportamentul termic al acestora este caracterizat printr-o inerție mare. Acesta este puternic influențat de prognoza meteo și de tipul de ocupare al clădirii. Controlul termic are un impact important asupra consumului de energie, mai ales în sectoarele rezidențial și terțiar, acolo unde încălzirea spațiului este responsabilă de peste 50% din totalul de energie consumat [42].

O primă metodă de reducere a consumului de energie poate fi reprezentată de utilizarea metodelor convenționale aduse de evoluțiile din domeniul ingineriei mecanice și civile. O altă soluție pentru reducerea consumului de energie în clădiri, soluție mult mai bună care presupune costuri suplimentare mai mici, este reprezentată de monitorizarea și controlul automat al consumatorilor de energie din cadrul clădirii. Pentru realizarea acestui scop sunt

disponibile mai multe soluții, începând cu aplicarea strategiilor de control termic convenționale și putând integra aceste soluții într-un sistem de management energetic al clădirii (BEMS – Building Energy Management System).

În ultimii ani, mai multe grupuri de cercetători au realizat studii cu privire la strategiile actuale de control termic aplicate în clădiri. Aceste studii demonstrează că cele mai frecvente strategii de control folosite în clădirile actuale sunt reprezentate de folosirea termostatelor de cameră și a robinetelor termostate montate pe calorifere. Termostatele de camera sunt reprezentate de regulatoare pornire-oprire care sunt prevăzute cu o bandă moartă de funcționare pentru evitarea acționării frecvente. În schimb, robinetele termostate sunt reprezentate de regulatoare proporționale. Aceleași studii au arătat că majoritatea ocupanților clădirii nu utilizează în mod corect robinetele termostate, efectul fiind de cele mai multe ori supraîncălzirea camerei și implicit risipirea energiei. Pentru rezolvarea acestui inconvenient, robinetele pot fi comandate prin intermediul regulatoarelor de tip PID. Studiarea strategiilor de control termic aplicate în clădiri va fi realizată în cadrul capitolului 3.2 [43].

3.1. STRATEGII PENTRU CONTROL TERMIC ÎN CLĂDIRI

În continuare se vor compara pe scurt cele mai importante tehnici de control ale sistemelor de încălzire din interiorul unei clădiri.

Cea mai simplă strategie de control termic pentru o clădire este reprezentată de controlul temperaturii camerei prin principiul pornire-oprire. În cadrul acestei metode, dispozitivele de încălzire din clădire sunt pornite și oprite în funcție de o anumită valoare a erorii temperaturii camerei ($e_{\theta} = \theta_{set-point} - \theta_{room}$), implementată de obicei sub forma unei curbe adecvate de histerezis C_{on-off} :

$$G = C_{on-off} (e_{\theta}) \cdot \quad (3.1)$$

Acesta este un tip de comandă cu feedback și este caracteristic prin faptul că este foarte simplă. Problema este că aceasta nu conține nici o informație legată de dinamica sistemului.

O altă metodă de control este reprezentată de metoda de control cu compensarea temperaturii, care reprezintă o comandă de tip feedforward. Ca și în cazul metodei prezentate anterior, problema este reprezentată de faptul că aceasta nu conține nici o informație legată de dinamica sistemului. Mediul de încălzire, reprezentat de apa (θ_{water}) are temperatura setată în funcție de temperatura exterioară $\theta_{outside}$ printr-o curbă de încălzire predeterminată G_{w-c} :

$$\theta_{water} = C_{w-c} (\theta_{outside}) \cdot \quad (3.2)$$

Strategia de control bazată pe utilizarea regulatoarelor convenționale PID este cea mai utilizată strategie de control termic implementată în cadrul clădirilor. În general, parametrii acestor regulatoare sunt fixați în jurul punctelor nominale de funcționare care duc la rezolvarea problemei reglării ținând cont de restricțiile și performanțele ce sunt impuse. Totuși, acesta nu reprezintă un avantaj al acestei strategii, deoarece sistemul supus reglării în acest caz este reprezentat de o clădire care este caracterizată de o inerție destul de mare și o variație în timp a parametrilor. Aceasta este de asemenea un tip de comandă cu feedback, însă spre deosebire de celelalte două strategii prezentate, aceasta conține unele informații despre dinamica sistemului (temperatura apei de încălzire, θ_{water} , se determină în funcție de eroarea temperaturii camerei, e_{θ} , și de un anumit istoric, *history*):

$$\theta_{water} = f_{PID} (e_{\theta}, history) \cdot \quad (3.3)$$

Din studiile efectuate cu privire la strategiile de control termic din cadrul clădirilor, reiese faptul că în majoritatea clădirilor radiatoarele sunt prevăzute cu robinete cu capete termostate. Dacă ne raportăm la economiile de energie obținute în urma implementării acestui tip de control, rezultatele nu sunt foarte bune, în principal din cauza lipsei de experiență a utilizatorilor care nu le folosesc conform caracteristicilor tehnico-constructive. Unul dintre efectele negative produse de folosirea necorespunzătoare a lor este

supraîncălzirea incintei. Pentru a diminua acest efect, aceste robinete sunt echipate cu regulatoare PID – Fig. 3.1.

În cele mai multe cazuri, aceștia nu sunt concepuți special pentru reducerea consumului energetic, buclele lor de feedback introducând un decalaj între temperatura camerei și punctul de referință, fie că discutăm de sisteme de încălzire cu calorifere sau încălzitoare electrice - Fig. 3.2. În acest fel, confortul este afectat în mod negativ [16].

Atunci când se lucrează cu sisteme cu o singură intrare și o singură ieșire (SISO - single-input-single-output), reglarea acestora este ușor de realizat folosind strategiile de control prezentate anterior. Această problemă devine mai dificil de implementat în momentul în care se dorește realizarea controlului pentru sisteme cu mai multe intrări și mai multe ieșiri (MIMO - multiple-input-multiple-output). În această situație, soluția optimă este reprezentată de înlocuirea regulatoarelor clasice PID cu regulatoare moderne bazate pe strategii avansate de conducere.

Datorită limitărilor echipamentelor de calcul și a complexității modelelor de procese ce trebuie reglate, folosirea regulatoarelor moderne bazate pe strategii avansate de conducere a întârziat să se realizeze în controlul termic al clădirilor. Regulatoarele obținute prin implementarea algoritmilor moderni de conducere au un nivel de complexitate ridicată, iar acordarea acestora impune anumite limite în faza de proiectare [44]. Totuși, în ultimii ani s-a arătat un interes intens asupra acestei probleme din partea comunității științifice care a dus la posibilitatea realizării controlului termic al clădirilor prin intermediul folosirii regulatoarelor moderne bazate pe strategii avansate de conducere, subiect ce va fi tratat pe larg în capitolele următoare.

3.2. ÎNCĂLZIREA INTERMITENTĂ ÎN CLĂDIRI

Încălzirea clădirilor după un program de operare intermitent a început să fie folosită pe scară largă datorită beneficiilor aduse în ceea ce privește economiile de energie. Această operație este posibilă deoarece se presupune că programul de ocupare poate fi cunoscut în prealabil pentru orice clădire, uneori chiar din faza de proiectare a acesteia. Prin utilizarea unei strategii de control potrivite, această abordare conduce la atingerea obiectivului principal din domeniul controlului termic al clădirilor: asigurarea confortului termic, cu un consum minim de energie.



Fig. 3. 2. - Robinete echipate cu controlere PID într-o clădire din România

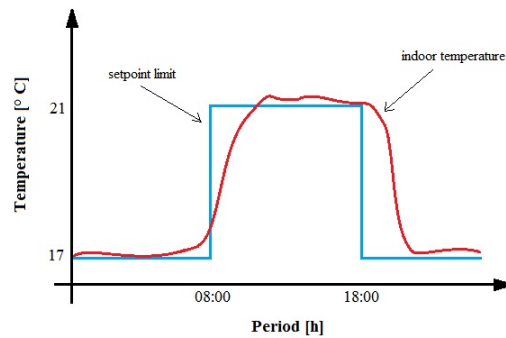


Fig. 3. 4. - Decalaj între temperatura interioară a camerei și punctul de referință

În clădirile ce sunt încălzite după un program intermitent, calcularea sarcinii este foarte importantă, iar aceasta poate fi văzută ca și o problemă de control. În momentul schimbării programului de încălzire, un rol foarte important îl are modul în care este calculat timpul de regres al temperaturii interioare, timp ce influențează foarte mult vârful sarcinii și implicit consumul energetic. Dacă timpul de regres este mic, vârful sarcinii va avea o valoare mare, însă consumul de energie este micșorat [32].

3.2.1. Urmărirea punctului de referință

În cazul clădirilor încălzite intermitent, valoarea de referință are de obicei o variație treaptă, în timp ce temperatura interioară are o tranziție mai lentă. În acest fel, regulatorul trebuie să realizeze tranziția între cele două valori de referință ale temperaturii, mai exact să calculeze fluxul de căldură necesar îndeplinirii cerinței de confort cu consum minim de energie.

Problema care se pune este când trebuie să se repornească încălzirea pentru a atinge nivelul de confort chiar la începutul perioadei de ocupare, deoarece numai în acest caz confortul este asigurat cu un minim de energie consumat. Timpul optim de setare este variabil și depinde de mai mulți factori, cum ar fi aerul exterior, temperaturile interioare, inerția clădirii, puterea termică maximă a sistemului de încălzire, condițiile meteo etc. Confortul termic este definit ca și un interval de temperatură (definit de o limită inferioară și una superioară) în care trebuie să se situeze temperatura interioară. Intervalul de temperatură specificat diferă pentru perioadele ocupate și neocupate. În perioada ocupată (ocupare), acest interval de temperatură se numește zona de confort, iar în timpul perioadei neocupate se numește zonă de siguranță - Fig. 3.3. [25].

Pentru a suplini faptul că dinamica clădirii este destul de lentă (clădirea are o inerție mare), există posibilitatea ca procesul de încălzire să fie pornit în avans, în așa fel încât la începutul perioadei de ocupare temperatura să nu rămână sub zona de confort. Regulatorii PID folosiți conform acestei strategii au ca principal obiectiv urmărirea valorii de referință. Problema care intervine este că în cadrul acestei strategii de control nu este luată în calcul și variația factorilor meteorologici care reprezintă elementele de perturbație pentru sistem. Astfel, chiar dacă pornirea încălzirii se face în avans și la începutul perioadei de

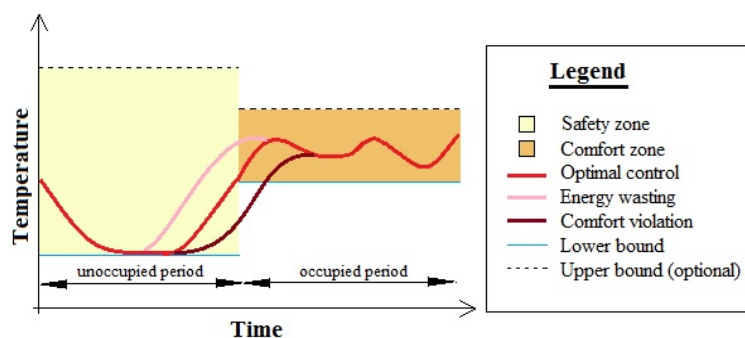


Fig. 3. 3. - Cerințe de confort și scenarii posibile pentru temperatura interioară

ocupare temperatura va urmări punctul de referință setat, nu este garantat faptul că acesta se va încadra în aria de control a pornirii optime, conform Fig. 3.3.

Pornirea optimă a sistemelor de încălzire este reglementată prin intermediul normei Europene EN 12098-2 [45]. Conform normei, pornirea optimă a încălzirii este realizată dacă graficul temperaturii interioare intersectează aria de control a pornirii optime, conform Fig. 3.4. Această arie de control este setată în așa fel încât în momentul de schimbare al programului de ocupare, temperatura să poată varia într-un interval de maxim 1 °C (± 5 °C în comparație cu limita inferioară a confortului), timp de maxim 30 de minute (± 15 minute în comparație cu momentul de schimbare al programului de ocupare).

3.2.2. Compensarea condițiilor meteorologice

Datorită modificării temperaturii exterioare, a punctului de referință variabil și a câștigurilor/pierderilor de căldură, clădirile sunt caracterizate printr-o stare permanentă de dezechilibru termodinamic. Cea mai bună metodă de a compensa efectul condițiilor meteorologice asupra sistemului este reprezentată de calcularea sarcinii de căldură necesare rejectării acestor perturbații și injectarea în sistem a acestei cantități de căldură la momentul potrivit. Astfel, aceste perturbații sunt eliminate cu un consum minim de energie.

Faptul că valoarea de referință a temperaturii interioare este variabilă, impune ca sistemul de încălzire al clădirii să fie comandat de un regulator care să calculeze la fiecare interval de timp cantitatea de căldură necesară atingerii performanțelor termice ale clădirii. Clădirea poate fi privită ca un proces cu intrările reprezentate de variațiile impuse de condițiile meteo și fluxul de căldură furnizat de sistemul de încălzire, iar ieșirea este reprezentată de temperatura aerului interior. Pentru urmărirea valorii de referință a ieșirii este necesară calcularea comenzii (în cazul nostru, cantitatea de căldură ce trebuie injectată în clădire), însă ținând cont de faptul că modelul clădirii și valorile temperaturii exterioare și a radiației solare incidente pe anvelopa clădirii sunt cunoscute, soluția acestei probleme poate fi reprezentată de implementarea unui algoritm optimal de control în buclă deschisă – Fig. 3.5.

În cadrul capitolului 2 a fost obținut modelul clădirii reprezentat sub forma unei matrice de transfer în cadrul căreia se găseau mai multe funcții de transfer. Fiecare dintre aceste funcții de transfer este reprezentarea acțiunii unei anumite intrări a sistemului asupra ieșirii acestuia. Pe baza acestor cunoștințe și folosind principiul superpoziției, reprezentarea grafică a algoritmului prezentat în figura anterioară poate fi transformată conform reprezentării din Fig. 3.6.

În cadrul strategiei de control, compensarea perturbațiilor produse asupra clădirii de condițiile meteorologice poate fi realizată folosind o strategie de control de tip feedforward. Astfel, efectul produs de perturbații este eliminat înainte ca acesta să producă efecte vizibile asupra sistemului.

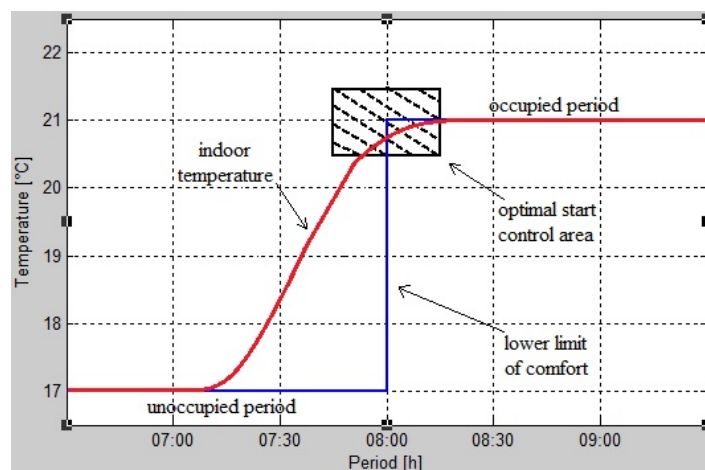


Fig. 3. 4. - Pornirea optimă a sistemului conform normei Europene EN 12098-2

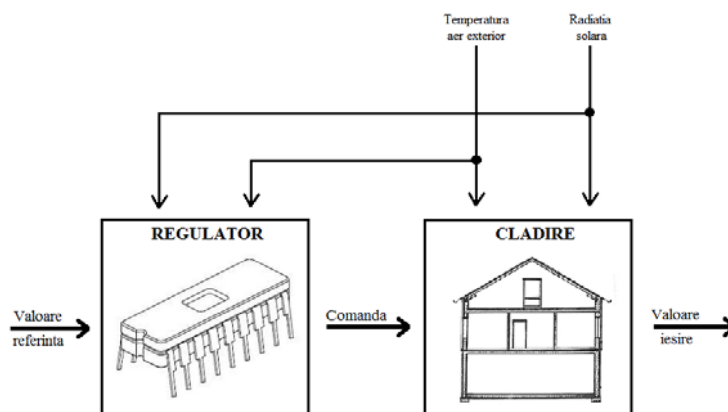


Fig. 3. 5. - Reprezentare grafică a algoritmului optimal de control în buclă deschisă

Folosind funcția de transfer care reprezintă acțiunea temperaturii exterioare asupra ieșirii sistemului (temperatura interioară), corespunzătoare funcției $FT_{aer}(s)$ din Fig. 3.6, și valorile semnalului perturbator reprezentat de temperatura aerului exterior, T_e , poate fi determinată valoarea mărimii ce acționează asupra sistemului sub forma de perturbație la acțiunea cu temperatura aerului exterior, y_{aer} :

$$y_{aer} = FT_{aer} \cdot T_e \quad (3.4)$$

În vederea anulării efectului acestor perturbații, este necesar ca ieșirea obținută ca urmare a efectului perturbator al temperaturii exterioare să fie compensată de ieșirea obținută ca urmare a efectului impus de comanda sistemului, y_{meteo} :

$$y_{aer} + y_{meteo} = 0 \quad (3.5)$$

Aplicând metoda inversă de rezolvare a problemelor de reglare, valoarea mărimii de intrare u_{meteo} poate fi determinată utilizând funcția de transfer $FT_{meteo}(s)$ și valoarea evoluției dorite a comenzii, y_{meteo} , care sunt cunoscute:

$$u_{meteo} = FT_{meteo}^{-1} \cdot y_{meteo} \quad (3.6)$$

Restricția impusă în acest moment este impusă de principiul cauzalității fizice a unei funcții de transfer. Conform acestuia, inversarea raportului sub formă polinomială aduce consecințe atât asupra semnificației fizice a modelului, dar și asupra performanțelor de stabilitate al acestuia. O funcție de transfer corespunzătoare are ordinul numitorului mai mare sau egal cu cel al numărătorului. Semnificația fizică a acestor funcții de transfer este aceea că de regulă cauza trebuie să precedă efectul (adică intratei trebuie să fie modificată înainte să apară modificări asupra ieșirii). Astfel, inversând o funcție de transfer corespunzătoare, așa cum se vede și în relația (3.5), funcția se transformă în una necorespunzătoare din punctul de

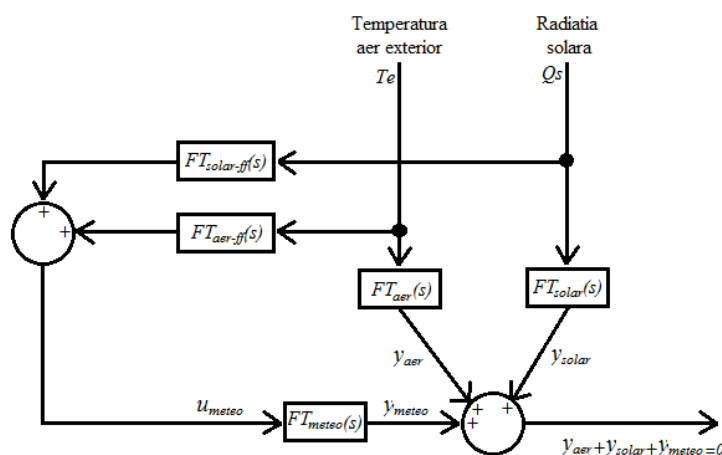


Fig. 3. 6. - Compensarea perturbațiilor produse de condițiile meteorologice utilizând feedforward

vedere al cauzalității fizice. Pentru a evita aplicarea acestui inconvenient în cadrul strategiei de control feedforward, modificarea relației (3.6) prin intermediul relației (3.4) duce la schimbarea semnului relației [46]:

$$u_{meteo} = -FT_{meteo}^{-1} \cdot FT_{aer} \cdot T_e. \quad (3.7)$$

Din relațiile anterioare se poate deduce că funcția de transfer feedforward pentru compensarea perturbațiilor introduse de temperatura exterioară are următoarea formă:

$$FT_{aer-ff}(s) = FT_{meteo}(s)^{-1} \cdot FT_{aer}(s). \quad (3.8)$$

În cadrul modelului prezentat în Fig. 3.6, pe lângă acțiunea factorului perturbator introdus de acțiunea temperaturii exterioare, un alt factor perturbator este reprezentat de acțiunea radiației solare incidente pe suprafața anvelopei clădirii, Q_s . Procedând la fel ca și în cazul compensării perturbației produse de temperatura exterioară, funcția de transfer feedforward pentru compensarea perturbațiilor introduse de radiația solară are următoarea formă:

$$FT_{solar-ff}(s) = FT_{meteo}(s)^{-1} \cdot FT_{solar}(s). \quad (3.9)$$

Luând în considerare faptul că factorii perturbatori ai sistemului sunt cei reprezentați anterior, compensarea condițiilor meteorologice pentru sistemul nostru poate fi realizată prin aplicarea comenzii totale de compensare, reprezentată ca:

$$u_{meteo} = FT_{meteo}^{-1} \cdot FT_{aer} \cdot T_e + FT_{meteo}^{-1} \cdot FT_{solar} \cdot Q_s. \quad (3.10)$$

Astfel, adunând valorile acțiunii factorului perturbator produs de temperatura exterioară cu cele ale acțiunii factorului perturbator introdus de radiația solară și cu valoarea comenzii totale de compensare, putem să demonstrăm destul de simplu că prin calcularea sarcinii de căldură necesare dejectării acestor perturbații, acestea sunt eliminate cu un consum optim de energie.

3.3. TEHNICI AVANSATE DE REGLARE AUTOMATĂ A TEMPERATURII

3.3.1 Metode de reglare adaptivă pentru temperatura din clădiri

Metodele de reglare adaptivă pentru temperatura din clădiri au la baza două tehnici fundamentale de adaptare parametrică: reglarea adaptivă ce folosește un model de referință și reglarea adaptivă cu autoacordarea parametrilor regulatorului. Pentru reglarea temperaturii din interiorul unei clădiri, proces ce de multe ori poate fi caracterizat ca și neliniar, un regulator cu parametrii ficși nu poate să asigure obținerea performanțelor de reglare dorite atunci când se modifică valoarea punctului de referință [47]. Acest inconvenient poate fi rezolvat prin implementarea metodelor adaptive de conducere care permit modificarea parametrilor regulatorului în momentul în care se modifică dinamica procesului.

Specificitatea sistemelor adaptive cu model de referință, adaptate pentru controlul termic al clădirilor, este aceea că întregul sistem este obligat să aibă un comportament cât mai apropiat de comportamentul termic al clădirii – Fig. 3.8. Acest comportament este descris de un model de referință al clădirii și prin intermediul lui se impun indirect performanțele dorite ale sistemului de reglare a temperaturii interioare. El este implementat în paralel cu bucla de reglare convențională și are același semnal de referință ca și aceasta. Pentru compensarea caracterului necunoscut al dinamicii procesului, regulatorul trebuie să își ajusteze parametrii.

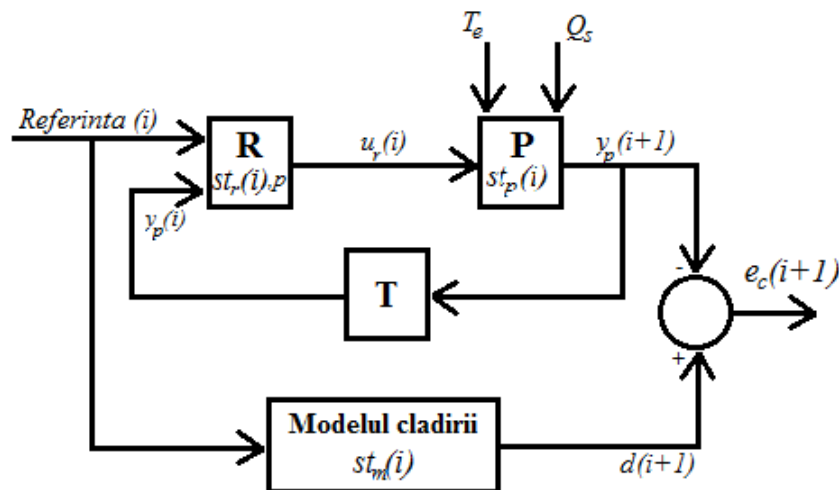


Fig. 3. 8. - Schema bloc a controlului adaptiv direct al temperaturii bazat pe modelul clădirii

Metoda de conducere adaptivă bazată pe model clădirii, prezentată anterior, și metoda de reglare adaptivă autoacordabilă sunt studiate de regula distinct, ca metode distincte de reglare adaptivă. Singura deosebire a lor se referă la faptul că schemele bazate pe model de referință sunt structuri adaptive directe, iar sistemele cu regulator cu autoacordare sunt structuri adaptive indirecte – Fig. 3.9.

3.3.2 Reglarea cu predicție bazată pe model

Conducerea cu predicție bazată pe model reprezintă una dintre direcțiile tehnicilor avansate de reglare automată a temperaturii și face referire la o clasă de algoritmi de conducere care calculează o secvență de comandă ce optimizează comportarea viitoare a procesului. Dat fiind interesul specialiștilor din industrie, dar și al comunității științifice internaționale, această tehnică a cunoscut o dezvoltare extrem de puternică și rapidă. Această tehnică, cunoscută și sub numele de „Model Predictive Control”, a început să fie tratată cu importanță atât în cercetare, cât și în industrie începând cu anii '80. Conducerea automată a rafinăriilor de petrol și a centralelor de producere a energiei electrice au reprezentat primele probleme rezolvate prin intermediul acestei tehnici [48, 49].

Proiectarea reguletoarelor predictive are la baza predicția semnalului de ieșire al procesului, pe baza utilizării unui model matematic al acestuia. Comanda procesului este calculată pas cu pas pentru a determina ieșirea precisă care urmărește o traiectorie dorită peste un orizont de timp prestabilit cu o eroare cât mai mică [50].

În scopul satisfacerii cerințelor actuale impuse controlului termic al clădirilor, simpla rejectare a perturbațiilor și stabilizarea temperaturii nu este o soluție satisfăcătoare.

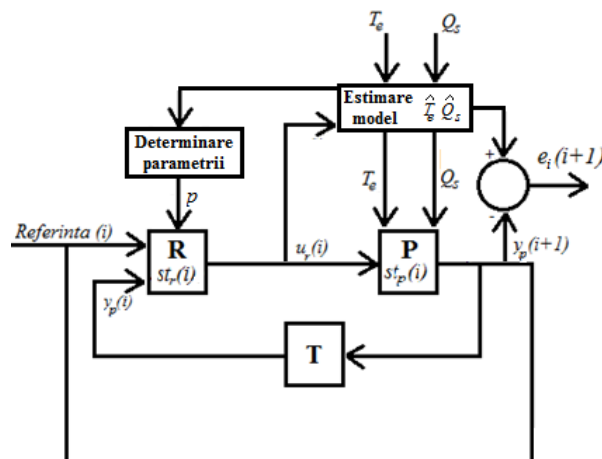


Fig. 3. 9. - Schema bloc a controlului adaptiv indirect al temperaturii

Obiectivele suplimentare ale procesului de reglare se referă la asigurarea confortului și la minimizarea consumului de energie. Pentru atingerea acestor obiective și rezolvarea problemelor din cadrul strategiilor de control prezentate în secțiunea 3.2, în continuare se propune o nouă strategie de control termic care să aibă feedback, ca și în cadrul strategiei ce folosește regulatoare PID (este utilizată eroarea e_θ), să utilizeze cât mai multe variabile posibile (temperatura exterioară, $\theta_{outside}$, prognoza meteo, $\theta_{predicted}$, și alte informații x) și, de asemenea, să includă dinamica sistemului (*history*).

$$\theta_{water} = f_{MPC}(e_\theta, \theta_{outside}, \theta_{predicted}, x, history) \quad (3.11)$$

Dificultățile principale de aplicare a strategiei de control MPC sunt cerințele ridicate pentru resursele de calcul utilizate și fondul matematic foarte puternic ce este utilizat, mai ales în ceea ce privește partea de modelare a regulatorului. Pentru aplicarea unei astfel de strategii de control, inițial este necesar să se realizeze un model dinamic al clădirii care să descrie cât mai corect comportamentul acesteia. Strategia de control a fost utilizată cu succes și în alte domenii de cercetare [18, 51], însă în ultimii ani a manifestat un interes profund pentru cercetarea în domeniul controlului termic al clădirilor [15, 16, 52].

În cadrul strategiei de control termic, cerința referitoare la confort este impusă de un interval de temperatura (definit de o limită inferioară și una superioară). Temperatura interioară trebuie să fie cuprinsă în acest interval, interval ce trebuie să fie diferit pentru perioada de ocupare, respectiv perioada de neocupare. Cum în cadrul experimentului prezentat în această lucrare casa utilizată este echipată cu sisteme de încălzire electrică, considerarea unui interval de temperatura de referință pentru perioada de neocupare poate fi apreciată ca neeficientă din punctul de vedere al consumului de energie.

3.4. CONCLUZII

În acest capitol sunt analizate câteva strategii de reglare automată a temperaturii din clădiri, făcându-se referire atât la tehnici aplicate în prezent pentru realizarea controlului, dar și în contextul mai larg al tehnicilor avansate de conducere ce pot fi aplicate în procesele existente în cadrul clădirilor.

O altă problemă studiată în cadrul capitolului face referire la problema utilizării metodei de încălzire intermitentă în clădiri și prezentarea economiilor aduse de utilizarea acesteia. De asemenea, un alt punct al studiului face referire la problemele apărute în cadrul strategiilor de control termic care au ca și cerințe urmărirea punctului de referință variabil, referitor la valoarea temperaturii interioare.

Pentru a putea implementa strategia de control termic prezentată în teză, în acest capitol sunt studiate metodele prin care poate fi compensat efectul perturbațiilor sistemului. Astfel este prezentată o strategie de tip feedforward care conduce la compensarea perturbațiilor produse asupra clădirii de condițiile meteorologice. În acest fel, efectul produs de perturbații este eliminat înainte ca acesta să producă efecte vizibile asupra sistemului.

Cei mai folosiți algoritmi de conducere automată cu aplicabilitate pe procese energetice sunt bazați pe structuri de reglare clasică. Obținerea performanțelor acestor structuri este realizată numai în jurul unui punct nominal de funcționare. În ultimi ani, atenția comunității științifice a fost ținută către studierea strategiilor de reglare predictive proiectate în domeniul clasic de discretizare, strategii care să poată fi aplicate și în cadrul controlului termic al clădirilor.

CAPITOLUL 4

STRATEGIA DE CONTROL TERMIC MPC ȘI PERFORMANȚELE OBȚINUTE

Atunci când discutăm despre controlul termic al clădirilor ocupate intermitent, Model Predictive Control (MPC) este considerată ca fiind una dintre cele mai potrivite metode. Aceasta minimizează criteriile legate de disconfort și energie prin includerea în strategia de control a prognozei meteo, viitorului program de ocupare stabilit prin puncte și a constrângerilor din optimizare. În studiile de simulare, MPC a depășit alte regulatoarele testate în ceea ce privește consumul de energie și criteriile de confort [28]. Există teste practice care au demonstrat că rezultatele obținute în simulare se mențin și în practică [26, 53].

4.1. MINIMIZAREA FUNCȚIEI DE COST MPC PENTRU SISTEMELE TERMICE

Atunci când se ia în considerare faptul că prețul energiei poate fi fix sau variabil, criteriul economic poate fi formulat ca:

$$F_e = \int_t p(t)\phi(t)dt \quad (4.1)$$

, unde $p(t)$ este un factor de pondere, legat de costul energiei, iar $\phi(t)$ este fluxul de căldură furnizat clădirii. În cazul în care prețul energiei este constant în timpul zilei, minimizarea funcției F_e este echivalenta pentru minimizarea consumului de energie. Atunci când prețul variază în timpul zilei, factorul pondere $p(t)$ este modulat în timp în funcție de prețul de energie [18].

Minimizarea unei funcții de cost pe un orizont de timp viitor, finit, poate fi calculată de către strategia de control predictiv bazat pe modelul clădirii (MPC) prin intermediul unei secvențe de comandă. Performanța incorporată în funcția de cost este precisă prin utilizarea unui model al clădirii, a viitoarelor variații ale punctelor de referință și, acolo unde sunt disponibile, viitoarele variații ale perturbațiilor. Având în vedere că modelul clădirii este indispensabil pentru MPC, pot fi găsiți algoritmi care utilizează formulări clasice, folosind funcții de transfer, spațiu stărilor sau modele de convoluție [17].

Cum modelul unei clădiri poate fi definit în mod natural prin reprezentări în spațiul stărilor, MPC este mai ușor de înțeles în timp discret decât în timp continuu [18]. Astfel, în cadrul acestei lucrări este utilizat algoritmul MPC în timp discret realizat pe baza modelului prezentat în capitolul 2.

Pentru a rezolva problema controlului termic utilizând strategia de control MPC este necesară modificarea criteriului de minimizare al acestei strategii în conformitate cu programul viitor de ocupare al clădirii. Această operație permite asigurarea confortului în perioada de ocupare, încă de la începutul acesteia, fără a fi nevoie să se asigure confortul și în perioada de neocupare. Astfel este minimizat la maximum și criteriul referitor la consumul de energie. MPC poate fi utilizat pentru prezicerea comportamentului clădirii pentru un anumit orizont de timp numai dacă există un model al procesului (clădirii). Pentru o clădire, care este aproximată ca o singură zonă termică, reprezentarea sistemului în timp discret liniar are următoare forma ARX:

$$Q(z^{-1}) \cdot y(k) = W(z^{-1}) \cdot u(k-1) + P(k) \quad (4.2)$$

, unde $u(k)$ este intrarea sistemului (puterea de încălzire), $y(k)$ este ieșirea sistemului (temperatura aerului interior), $P(k)$ este perturbația sistemului, z^{-1} este un operator de întârziere, iar $Q(z^{-1})$ și $W(z^{-1})$ sunt două polinoame definite ca:

$$\begin{cases} Q(z^{-1}) = 1 + q_1 \cdot z^{-1} + q_2 \cdot z^{-2} + \dots + q_n \cdot z^{-n} \\ W(z^{-1}) = w_0 + w_1 \cdot z^{-1} + w_2 \cdot z^{-2} + \dots + w_n \cdot z^{-n} \end{cases} \quad (4.3)$$

Utilizând această strategie de control, secvența de comandă este obținută prin minimizarea unei funcții de cost. În cadrul controlului predictiv bazat pe model, cea mai utilizată formă a funcției de cost este:

$$J(k) = \sum_{i=N_l}^{N_y} \delta(i) [\hat{y}(k+i) - y^\theta(k+i)]^2 + \sum_{i=0}^{N_u-1} \lambda(i) [u(k+i) - u(k+i+1)]^2 \quad (4.4)$$

, care poate fi scrisă minimizat ca:

$$J(k) = \sum_{i=N_l}^{N_y} \delta(i) [\hat{y}(k+i) - y^\theta(k+i)]^2 + \lambda \sum_{i=0}^{N_u-1} \Delta u^2(k+i) \quad (4.5)$$

Acest criteriu de optimizare are doi termeni: unul care se referă la eroare și unul care se referă la efortul controlului. În funcția de cost, valoarea minimă și valoarea maximă a orizontului de predicție este reprezentată de N_l , respectiv N_y , ieșirea prezisă este $\hat{y}(k+i)$, iar valoare de referință viitoare este $y^\theta(k+i)$. Coeficientul pondere pentru eroare este δ , iar coeficientul pondere pentru comandă este λ . N_u este orizontul de control, iar Δu este incrementarea comenzii. Modul în care pot fi calculate în forma matricială ieșirile viitoare, prezise pentru orizontul de timp N_y , este definit de următoarea formulă:

$$\hat{y} = Fx(k) + \psi_1 u + \psi_2 p \quad (4.6)$$

, unde matricele F , ψ_1 și ψ_2 sunt funcții ale modelului cu parametrii constanți care nu este neapărat necesar să se calculeze în timpul controlului.

În scopul de a rezolva problema întârzierii, despre care s-a discutat la strategia de control care utilizează controlere PID, în continuare este propusă o nouă funcție de cost. Această funcție de cost este construită pe baza funcției prezentate anterior, însă are în componență și programul viitor de ocupare, sub forma unui termen al erorii pondere:

$$J(k) = \sum_{i=N_l}^{N_y} \delta^k(i) [\hat{y}(k+i) - y^\theta(k+i)]^2 + \lambda \sum_{i=0}^{N_y-N_l} u(k+i) \quad (4.7)$$

, cu respectarea următoarelor condiții:

$$\begin{aligned} 0 \leq u(k+i) \leq P_{max}, & \quad \forall i = 0 \dots N_y - N_l \\ u(k+i) = u(k+N_u-1), & \quad \forall i = N_u \dots N_y - N_l \end{aligned} \quad (4.8)$$

În acest exemplu, termenul erorii pondere $\delta^k(i)$ este programul viitor de ocupare și este definit ca:

$$\delta^k(i) = \begin{cases} 1, & \text{daca } k+i \text{ corespunde perioadei de ocupare} \\ 0, & \text{daca } k+i \text{ corespunde perioadei de neocupare} \end{cases} \quad (4.9)$$

Deoarece obiectivul este de a minimiza consumul de energie, termenul referitor la efortul comenzii din funcția cost a fost schimbat cu u , iar forma pătratică a fost eliminată.

În Fig. 4.1. se poate observa modul de schimbare al factorului $\delta^k(i)$ din valoarea 0 în valoarea 1 și invers. Existența acestui factor în funcția cost permite absența unui punct de referință în perioada de neocupare, astfel încât în această perioadă să fie urmărită numai problema eficienței consumului energetic. Totuși, dacă o persoană pătrunde în clădire în perioada de neocupare și condițiile de confort nu sunt asigurate, valoarea coeficientului pondere pentru eroare, $\delta^k(i)$, este schimbată forțat în așa fel încât toate elementele acestuia vor

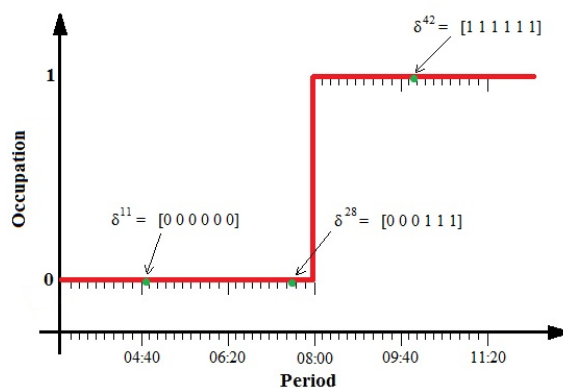


Fig. 4. 1. - Modificarea valorii factorului pondere $\delta^k(i)$

deveni 1.

Atunci când este strict necesar pentru micșorarea cererii computaționale a optimizării și pentru evitarea temperaturilor foarte scăzute în perioada de neocupare poate fi impusă o valoare minimă a temperaturii:

$$\hat{y}(k+i) \geq T_{min}, \quad \forall i = N_I \dots N_y. \quad (4.10)$$

4.2. CALCULAREA FUNCȚIEI MPC MINIMIZATĂ FOLOSIND PROGRAMAREA LINIARĂ

Având în vedere faptul că fluxul de căldură este variabila manipulată, u , iar ieșirea sistemului este temperatura interioară, y , o nouă formulare a problemei MPC poate fi rezolvată astfel [15]:

$$\text{Funcția de cost minimizată : } F(p) = \sum_{i=1}^{N_u} u(p+i) \quad (4.11)$$

$$\text{Cu condițiile : } \begin{cases} 0 \leq u(p+i) \leq u_{max}, & i = 1 \dots N_u \\ \hat{y}(p+j) \geq \theta_{min}(p+j), & j = 1 \dots N_y \end{cases}$$

, unde $u(p+i)$ este puterea sistemului de încălzire, care trebuie să fie pozitivă pe tot orizontul viitor de comandă - N_u , u_{max} este puterea maximă a sistemului de încălzire, θ_{min} este limita inferioară a zonei de confort/siguranță, singura limita considerată în cazul încălzirii. Ieșirea prezisă a sistemului pentru următorul timp de eșantionare - N_y este \hat{y} . Valoarea orizontului de predicție - N_y va fi aleasă în așa fel încât să fie mai mare decât perioada neocupată, pentru a garanta existența soluției sub constrângerile dinamice introduse prin inerția clădirii și pentru ca la sfârșitul perioadei de ocupare, problema de optimizare să surprindă începutul următoarei perioade de ocupație.

Rezolvarea problemei de optimizare din ecuația (4.11) asigură găsirea secvenței de comandă care rezolvă cerințele puse sistemului. Această problemă este rezolvată de algoritmul de control MPC. Având în vedere că problema este formulată în forma liniară și știind că modelul sistemului este liniar, aceasta poate fi rezolvată prin programare liniară. Pentru această operație, problema de control trebuie să fie formulată în următoarea formă canonică:

$$\text{Funcția de cost minimizată : } a^T u \quad (4.12)$$

$$\text{Cu condițiile : } Nu \leq b$$

, unde a , b respectiv N sunt vectorii respectiv matricea coeficienților cunoscuți, iar u este vectorul variabilelor, care în cazul nostru este secvența de comandă.

Noutatea care apare în cazul programării liniare în forma canonică (4.12) este că pentru a estima ieșirea viitoare, \hat{y} , din ecuația (4.11), este necesar ca aceasta să se extragă din modelul sistemului. Acest lucru poate fi realizat, deoarece sistemul poate fi reprezentat prin intermediul unei reprezentări liniare discrete în spațiul stărilor:

$$\begin{cases} x(p+1) = Ax(p) + B_1u(p) + B_2w(p) \\ y(p) = Cx(p) + Du(p) + D_2w(p) \end{cases} \quad (4.13)$$

, unde u reprezintă intrarea manipulată a sistemului (fluxul de căldură), iar w reprezintă intrările (perturbațiile) măsurabile, dar incontrolabile (temperatura exterioară și radiația solară).

Astfel, estimarea viitoarei ieșiri, \hat{y} , sub forma matricială este:

$$\hat{y} = Gx(p) + \beta_1 u + \beta_2 d \quad (4.14)$$

, unde matricele G , β_1 și β_2 sunt funcțiile modelului cu parametrii constanți, iar vectorii sunt:

$$\begin{aligned} \hat{y} &= [\hat{y}(p+1) \quad \hat{y}(p+2) \quad \hat{y}(p+3) \quad \dots \quad \hat{y}(p+N_y)]^T \\ u &= [u(p) \quad u(p+1) \quad u(p+2) \quad \dots \quad u(p+N_y-1)]^T \\ d &= [w^T(p) \quad w^T(p+1) \quad w^T(p+2) \quad \dots \quad w^T(p+N_y-1)]^T \end{aligned} \quad (4.15)$$

Se poate observa în ecuația (4.14) faptul că estimarea viitoarelor ieșiri depinde numai de starea actuală, $x(p)$, precum și de intrare actuală și viitoare, $u(p) \dots u(p + N_y - 1)$, și perturbațiile de $w(p) \dots w(p + N_y - 1)$. Viitoarele perturbații, de obicei, pot fi obținute din prognoza meteo.

$$y_{min} = [\theta_{min}(p+1) \ \theta_{min}(p+2) \ \theta_{min}(p+3) \ \dots \ \theta_{min}(p+N_y)]^T. \quad (4.16)$$

Definind în formă vectorială limita inferioară de siguranță/zona de confort pentru orizontul de timp N_y , ca și în ecuația (4.16), și înlocuind în ecuația (4.12) estimarea viitoarelor ieșiri prin relația (4.14), problema de optimizare în formă canonică devine:

$$\begin{aligned} \text{Funcția de cost minimizată} &: \quad a^T u \\ \text{Cu condiția} &: \quad \begin{bmatrix} -I \\ I \\ -\beta_1 \end{bmatrix} u \leq \begin{bmatrix} 0 \\ au_{max} \\ Gx(p) + \beta_2 d - y_{min} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

, unde a și I sunt vectorul unitate, respectiv matricea identitate de mărime corespunzătoare sistemului. Astfel, prin utilizarea programării liniare pentru a rezolva problema de optimizare din ecuația (4.17) este obținută strategia de control care menține temperatura interioară peste o limita inferioară, cu un consum minim de energie.

4.3. ARHITECTURI POSIBILE DE IMPLEMENTARE A MPC

Pe lângă necesitatea determinării unui model dinamic al clădirii, unul dintre dezavantajele implementării strategiei de control termic predictiv cu MPC este reprezentat de volumul mare de calcul datorat fondului matematic pentru realizarea regulatorului. În acest sens, pentru implementarea unei astfel de strategii de control trebuie acordată o atenție deosebită asupra minimizării necesarului de timp pentru realizarea calculelor și asupra resurselor computaționale necesare și a tehnologiilor folosite în acest sens [20, 21, 22, 23].

În continuare vor fi studiate mai multe arhitecturi de implementare a Model Predictive Control – MPC care să țină cont și de limitările impuse din punct de vedere al timpului consumat și al cererii computaționale necesare minimizării funcției de cost. Obiectivul implementării acestora este ca pe lângă îndeplinirea obiectivului principal al controlului termic în clădiri să se obțină și o minimizare a cererii computaționale necesare procesării calculelor pentru realizarea controlului termic. Pentru realizarea acestui obiectiv, casa prezentată în capitolul 2 a fost aproximată ca și două zone termice (camerele din zona de sud formează zona termică 1, iar camerele din partea nordică formează zona termică 2) – Fig. 4.2. Această decizie a fost luată și pe baza concluziilor obținute în urma procesului de modelare, în urma cărora s-a constatat că dacă s-ar lua în calcul două zone termice pentru clădirea considerată, rezultatele ar putea fi îmbunătățite.

În majoritatea clădirilor multi-zona echipate cu regulatoare automate pentru controlul termic, aceste regulatoare lucrează în mod independent. Totuși, pentru rezultate foarte bune trebuie să se țină cont și de parametrii reguletoarelor din zonele învecinate și de aportul de energie ce este transferată prin pereții interiori învecinați. Pentru simplificarea experimentului propus în cadrul acestui studiu, clădirea a fost aproximată ca două zone termice. Fiecare zonă termică are în componență sa mai multe camere cu temperatura interioară egală, aceleași caracteristici constructive ale pereților și sunt echipate cu încălzitoare electrice independente.

Utilizând programul de ocupare zilnică al clădirii, prezentat în Tabelul 4.1, au fost obținute rezultatele ce vor fi prezentate în următoarele secțiuni.

Tabelul 4. 1. - Programul de ocupare zilnică al clădirii

Zona	Programul de ocupare	Referință
Zona 1	8:00 – 20:00	22.5 °C
Zona 2	9:00 – 18:00	23 °C

4.3.1 Arhitectura descentralizată MPC

Plecând de la idea prezentată anterior, referitoare la faptul că în majoritatea clădirilor multi-zona controlul termic este realizat independent, în continuare este prezentată o arhitectura de control termic MPC în care temperatura aerului din fiecare zonă este reglată automat în mod independent de către un regulator automat pe care este implementată această strategie de control optim – Fig. 4.2 (sus).

Printre neajunsurile acestei aproximări se regăsesc influențele termice provenite de la zonele vecine, prin intermediul pereților interiori. Acestea nu pot fi luate în calcul de către strategia de control MPC, fiind considerate perturbații externe necunoscute. Aceste perturbații nu pot fi rejectate pe termen scurt utilizând modelul fiecărei zone, astfel că apar depășiri ale valorii de referință a ieșirii sistemului – Fig. 4.2 (jos). Valorile reprezentate grafic au fost obținute pe baza programului de ocupare zilnică a clădirii, pentru una dintre zilele din cadrul perioadei de monitorizare a casei prezentate în cadrul capitolului 2.

Această arhitectură reprezintă o generalizare a soluției propuse de noi în cadrul acestui capitol, însă de data aceasta pentru o clădire cu doua zone termice, pentru care strategia de control este aplicată în mod independent. Din punct de vedere al cererii computaționale, arhitectura prezentată reprezintă o soluție bună, timpul necesar pentru calcularea funcției cost fiind destul de mic. Problema care apare este reprezentată de faptul că nu sunt îndeplinite cerințele referitoare la confort și consumul de energie, motivul fiind faptul că sistemele nu comunică între ele.

4.3.2 Arhitectura centralizată MPC

O altă arhitectură posibilă pentru implementarea strategiei de control MPC în clădirile multi-zona este reprezentată de soluția care utilizează un singur regulator care implementează strategia de control optim pentru întreaga clădire (ambele zone termice) – Fig. 4.3 (sus). Astfel, prin intermediul acestei arhitecturi, în orice moment sunt cunoscuți parametrii de intrare/ieșire caracteristici pentru zona vecină.

Avantajul acestei arhitecturi este reprezentat de cunoașterea de către sistem a influențelor termice provenite de la zonele vecine, prin intermediul pereților interiori, fapt care duce la rejectarea perturbațiilor în timp util utilizând modelul fiecărei zone. În acest fel, utilizând același program de ocupare zilnică a clădirii, nu mai apar depășiri ale valorii de referință a ieșirii sistemului – Fig. 4.3 (jos).

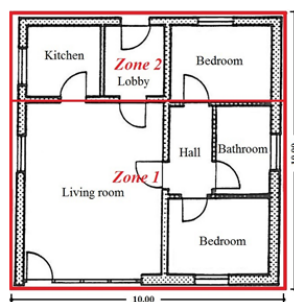


Fig. 4. 2. - Planul clădirii de referință cu doua zone termice

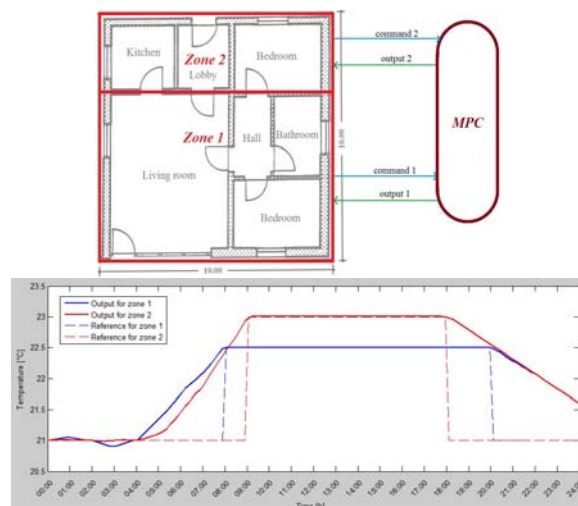


Fig. 4.3. - Arhitectura centralizată MPC

Principalul dezavantaj al acestei arhitecturi este reprezentat de faptul că cererea computațională și timpul necesar efectuării calculului crește direct proporțional cu mărimea sistemului. Practic, cu cât sistemul are în componență mai multe zone termice, cu atât timpul necesar implementării strategiei de control va crește, și asta datorită puterii de calcul limitate a regulatorului. Un alt dezavantaj se referă la faptul că defectarea regulatorului pe care este implementată strategia de control va conduce la întreruperea strategiei de control optim pentru întregul sistem de încălzire.

4.3.3 Arhitectura distribuită MPC

Deoarece în cadrul acestei lucrări clădirea este văzută sub forma unui sistem cu mai multe intrări și o ieșire (MISO), format din două zone termice, pentru implementarea unei strategii de control termic optim se pune problema utilizării unei arhitecturi care să solicite cât mai puțin regulatorul din punct de vedere al cererii computaționale. Așa cum se poate observa din studiul arhitecturilor prezentate anterior, arhitectura centralizată este limitată de dimensiunile sistemului comandat, iar arhitectura descentralizată nu îndeplinește cerințele referitoare la confortul termic și consumul de energie. Astfel, se poate observa cu ușurință că pentru rezolvarea tuturor problemelor menționate, soluția poate fi reprezentată de utilizarea unei arhitecturi distribuite – Fig. 4.4 (sus). Această arhitectură combină modul de lucru al celor două soluții prezentate anterior, astfel îmbunătățind rezultatele întregului sistem, din toate punctele de vedere.

Acest tip de arhitectură este recomandat pentru sistemele cu mai multe zone termice, sisteme ai căror parametri sunt influențați de zona vecină. Arhitectura are o structură

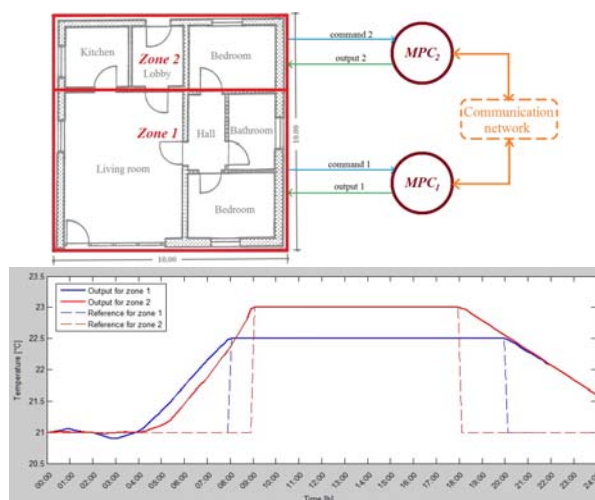


Fig. 4.4. - Arhitectura distribuită MPC

asemănătoare cu cea a arhitecturii descentralizată. Fiecare zonă termică este comandată în mod automat prin intermediul unei bucle de reglare independente, însă pentru a obține o soluție optimă la nivelul întregului sistem, aceste bucle independente schimbă între ele informații referitoare la parametrii zonei vecine și la comportamentul viitor al acestora [54]. Acest schimb de informații este realizat prin intermediul unei rețele de comunicație ce leagă buclele independente ale sistemului între ele, așa cum se poate vedea în Fig. 4.4 (sus).

În comparație cu celelalte două arhitecturi prezentate, din punct de vedere computațional aproximarea distribuită are același nivel de complexitate cu cel al arhitecturii descentralizate, însă soluția optimă pentru întregul sistem este găsită într-un timp mult mai mic. De asemenea, propunerea distribuită a MPC aduce beneficii în ceea ce privește eficiența comunicației. În cazul defectării unuia dintre regulatoarele MPC, restul sistemului continuă să rămână funcțional spre deosebire de soluția MPC centralizată, acesta reprezentând un alt avantaj important al acestei soluții.

Considerăm acest tip de arhitectură ca fiind soluția optimă pentru implementarea unei strategii de control termic optim la nivelul unei clădiri cu mai multe zone termice. Îmbunătățirile aduse de aceasta duc la rejectarea perturbațiilor în timp util folosind modelul fiecărei zone, astfel fiind îndeplinite cerințele de confort termic și consum de energie cu un necesar de putere de calcul cât mai mic și într-un timp cât mai redus. În acest fel, utilizând programul de ocupare zilnică al clădirii folosit și anterior, nu mai apar depășiri ale valorii de referință a ieșirii sistemului – Fig. 4.4 (jos).

4.4. CRITERII DE PERFORMANȚĂ ÎN CONTROLUL TERMIC AL CLĂDIRILOR

Pentru a putea beneficia de o bună comparație a performanțelor sistemelor de control termic al clădirilor este necesară stabilirea unor criterii care să corespundă acestor performanțe. De obicei, ca și părți componente ale sistemului de control se regăsesc și actuatori, precum pompele de căldură. Aceste echipamente sunt destul de scumpe și sunt sensibile la cicluri frecvente pornire-oprire. Astfel, o particularitate aparte a sistemului de control este agresivitatea comenzii care face referire la numărul de cicluri de comutare pornire-oprire și care joacă un rol decisiv pentru uzura de acționare.

Printre criteriile de performanță ale unui astfel de sistem putem enumera:

- criteriile referitoare la consumul de energie
- criteriile referitoare la confort

Numărul de cicluri de pornire-oprire ale echipamentelor reprezintă o caracteristică importantă a unui sistem BEMS. Un număr mai mic de cicluri de repornire este considerat a fi mai bun, astfel reducându-se uzura dispozitivului de acționare și îmbunătățind eficiența energetică a sistemului [53].

Capacitatea sa de a reporni încălzirea la momentul potrivit reprezintă unul dintre punctele esențiale ale unui BEMS. Această operație este făcută cu scopul de a recupera clădirea în timp util de la valoarea de referință setată pentru noapte. În caz contrar, rezultatul obținut produce disconfort la începutul perioadei de ocupare, ori irosirea de energie. Normativul european EN 12098-2 prevede reguli clare pentru testul de pornire optimă a sistemului. Astfel, acest test este trecut dacă temperatura interioară trece prin fereastra optimă de verificare la pornire care prevede un interval de temperatură de 1 °C (0,5 °C sub limita inferioară de confort și 0,5 °C peste el) timp de 30 de minute (15 minute înainte de schimbarea setată dimineața și 15 minute după) – Fig. 3.4 [45].

4.5. REZULTATELE TESTELOR EXPERIMENTALE

Performanțele sistemului de control termic utilizat în cadrul experimentelor, sistem bazat pe strategia de control predictiv MPC, sunt evaluate în comparație cu cele ale unui sistem de reglare bazat pe implementarea cu regulatoare convenționale PID. Aceste

sisteme au fost proiectate ca și subsisteme ce sunt încorporate în sistemul BEMS al clădirii. Rolul sistemului BEMS este de a acționa fiecare pompa și robinet al sistemului de încălzire, în scopul de a menține temperatura interioară peste limita minimă impusă, utilizând cât mai puțină energie.

Reglarea temperaturii interioare este realizată în două etape. Prima etapă este reprezentată de compensarea acțiunii factorilor perturbatori ai sistemului (temperatura exterioară și radiația solară) prin intermediul implementării unei strategii de control în buclă feedforward. A doua etapă este reprezentată de urmărirea punctului de referință al temperaturii interioare (ieșirea sistemului) prin intermediul implementării programului de ocupare al clădirii în cadrul unei strategii de control predictiv. Aceste două strategii de control sunt implementare în cadrul regulatorului ce va efectua operația de reglare a temperaturii interioare. Rezultatele astfel obținute sunt comparate cu cele oferite de un sistem de reglare al aceluiași sistem, însă în implementarea căruia sunt folosite regulatoare PID. Date fiind aceste soluții și având modelul dinamic al clădirii, determinat în capitolul 2, rezultatele supuse comparării performanțelor sistemului și caracterizarea comportamentului termic al clădirii, vor fi detaliate în continuare prin intermediul celor două teste experimentale.

Primul test experimental a fost efectuat pentru situația în care casa folosită are un program de ocupare diferit (perioada de ocupare și perioada de neocupare). La începutul perioadei de ocupare temperatura va trebui să aibă o creștere de tip treaptă unitară în intervalul 17°C - 22°C . Data fiind inerția mare a clădirii, temperatura va atinge pragul respectiv cu o oarecare întârziere. Pentru a evita acest neajuns, sistemul de încălzire trebuie repornit în avans.

Pentru realizarea acestui test au fost selectate două perioade de câte cinci zile reprezentative pentru vremea din timpul iernii și pentru vremea din timpul verii. Motivația acestei alegeri a fost variația de amplitudine a temperaturii exterioare care conduce la pornirea/oprirea repetată a sistemului de încălzire. Variațiile temperaturii exterioare și a nivelului radiațiilor solare pentru cele cinci zile considerate pot fi observate prin intermediul Fig. 4.5 și Fig. 4.6. Așa cum s-a prezentat anterior, ca și limite pentru punctul de referință ce trebuie urmărit se va considera numai limita inferioară a zonei de confort/siguranță. Pentru exemplul nostru, limita inferioară este de 22°C în perioada de ocupare (07:00 - 22:00), iar pentru perioada de neocupare (22:00 - 07:00) este de 17°C .

În urma implementării celor două strategii de control prezentate, variațiile temperaturii interioare sunt prezentate în Fig. 4.7. Se poate observa că temperatura medie obținută prin intermediul strategiei de control bazat pe regulatoare PID este în general mai mare decât cea rezultată prin intermediul strategiei de control predictiv bazat pe MPC. Cu toate acestea, în cazul controlului MPC, temperatura nu se încadrează sub limita inferioară a zonei de confort / siguranță, ceea ce înseamnă că strategia MPC este o soluție acceptabilă. Acest lucru înseamnă că metoda de reglare cu regulatoare PID a consumat mai multă energie decât este necesar.

În ceea ce privește confortul, se poate observa că la începutul perioadei de ocupare regulatorul PID are un comportament nefavorabil, mai ales în perioada de iarnă. Acesta repornește încălzirea în momentul schimbării punctului de referință introducând astfel un decalaj între temperatura interioară și punctul de referință. În acest fel, strategia de control bazată pe regulatoare PID nu a trecut testul de pornire optimă.

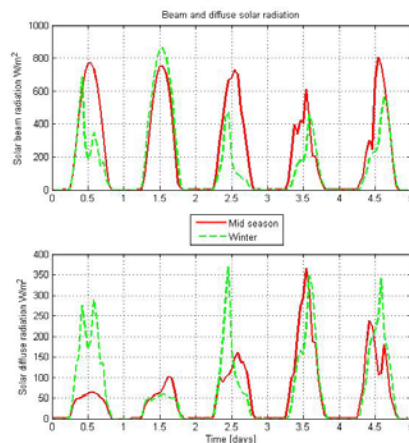


Fig. 4. 6. - Variația nivelului radiației solare pentru perioada testată

Pentru perioada de testare de iarnă, strategia de control MPC a consumat cea mai mică cantitate de energie termică pentru încălzire, în același timp, oferind cel mai bun confort termic. Economii de energie realizate nu sunt foarte substanțiale, însă îmbunătățirea confortului termic este vizibilă în cadrul strategiei de control predictiv bazat pe MPC.

Deoarece s-a constatat că economiile de energie nu sunt substanțiale, a mai fost efectuat un al doilea test experimental în care specificațiile sistemului sunt modificate. S-a constatat că importante economii de energie pot fi realizate prin impunerea unei limite inferioare de temperatură doar pentru perioada de ocupare a clădirii. Ținând cont de faptul că sistemul de încălzire folosit în cadrul experimentului nostru este reprezentat de încălzitoare electrice cu un randament termic foarte bun, se constată că nu este eficientă impunerea unei limite a temperaturii interioare pentru perioada de neocupare. Timpul de regres în cazul utilizării sistemelor de încălzire electrice este destul de mic, iar economiile de energie obținute prin intermediul acestei metode pot fi substanțiale. Cazul prezentat în cadrul acestui test se referă la evoluția temperaturii interioare într-un interval de 24 de ore, în sezonul de vara.

Utilizând modelul matematic obținut în capitolul 2, programul de ocupare și datele referitoare la prognoza meteo, a fost obținută forma minimă a funcției de cost prezentată în cadrul capitolului 4.2. În cadrul acestui experiment, programul de ocupare al casei este considerat a fi în intervalul orar 8:00-20:00. Punctul de referință ce trebuie urmărit pentru valoarea temperaturii interioare în acest interval este de 22.5 °C.

Prin intermediul implementării acestor date în programul Matlab, s-a obținut răspunsul sistemului în urma folosirii acestei strategii de control termic predictiv pentru una

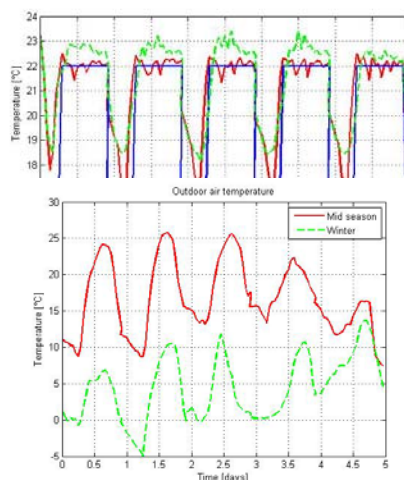


Fig. 4. 5. - Variația temperaturii exterioare pentru perioada testată

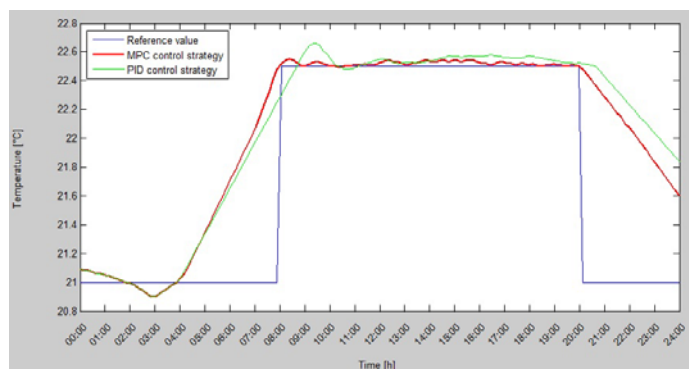


Fig. 4.8. - Comparație între rezultatul obținut pentru o singură zi prin implementarea strategiei de control MPC, respectiv PID

dintre zilele monitorizate. Pentru observarea îmbunătățirilor aduse de această strategie de control predictiv, răspunsul obținut este comparat ca și în exemplul prezentat anterior cu cel obținut în urma implementării unei strategii care utilizează reglaje PID pentru realizarea controlului termic. Această comparație a rezultatelor poate fi observată sub formă grafică în Fig. 4.8.

După cum se poate observa, strategia de control predictiv cu MPC este soluția recomandată pentru controlul termic al clădirii. În urma interpretării rezultatelor obținute, se constată că aceasta asigură un control optim al temperaturii prin faptul că la începutul perioadei de ocupare este asigurată pornirea optimă (încălzirea este pornită în avans pentru a se încadra în aria de pornire optimă specificată în cadrul capitolului 3), dar și pe toată perioada de ocupare. Folosirea programului viitor de ocupare al clădirii în cadrul funcției de cost aduce îmbunătățiri rezultatelor obținute, consumul de energie fiind optimizat. Spre deosebire de soluția implementată cu reglaje PID, consumul de energie este mai mic. Rezultatele strategiei de control termic cu MPC nu conduc la supraîncălzirea clădirii, deoarece sistemul de încălzire este comandat în corelație cu programul de ocupare al clădirii. În acest fel este asigurat un nivel ridicat al confortului ocupanților clădirii.

4.6 CONCLUZII

În acest capitol este dezvoltată și analizată o strategie avansată de reglare automată care are la baza controlul predictiv bazat pe model. Deși această strategie a fost aplicată cu succes în alte domenii ingineresti, în ultimii ani s-a constatat un interes deosebit cu referire la aplicarea ei în domeniul controlului termic al clădirilor.

Acest capitol propune și dezvoltă metoda de minimizare a funcției cost aplicată în cadrul strategiei de control termic predictiv cu Model Predictive Control - MPC. În cadrul acestei metode, programul de ocupare al clădirii este introdus sub forma unui termen al erorii pondere al funcției cost MPC, astfel transformând strategia de control predictiv MPC în cea mai bună soluție de control termic. Calcularea perioadei de timp cu care trebuie pornită în avans încălzirea poate fi determinată cu precizie utilizând acest termen, iar timpul de regres al clădirii între două perioade ocupare-neocupare este micșorat foarte mult, astfel încât la începutul perioadei de ocupare confortul este asigurat prin asigurarea performanței de pornire optimă a sistemului de încălzire.

În finalul capitolului sunt prezentate rezultatele obținute în urma implementării strategiei de control MPC și comparația lor cu cele obținute folosind o strategie de control bazată pe reglaje PID. În urma prezentării acestor rezultate se pot trage concluziile asupra performanței crescute a strategiei de control termic predictiv MPC.

Elementele de originalitate ce sunt introduse prin intermediul acestui capitol au ca scop dezvoltarea unui algoritm avansat de control termic al clădirii care să aducă îmbunătățiri în mod special proceselor cu o dinamică lentă, specifică acestor sisteme. Pentru eliminarea întârzierii introdusă de bucla de feedback din cadrul strategiei de control tradițional ce

utilizează reglatoare PID, în cadrul strategiei predictive de control a fost implementat în funcția cost programul de ocupare al clădirii sub forma unui factor al erorii pondere din cadrul funcției cost MPC. Astfel, rezultatele obținute au fost îmbunătățite.

CAPITOLUL 5

CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE ȘI DIRECȚII DE CERCETARE ULTERIOARE

5.1 CONCLUZII GENERALE

Obiectivul acestei cercetări a fost dezvoltarea unei metode de control termic în scopul obținerii unei creșteri a eficienței energetice a unei clădirii prin intermediul optimizării consumului. Lucrarea de față propune utilizarea unui model de ordin redus al clădirii, model cu un grad ridicat de generalitate și posibilitatea aplicării acestuia în cadrul unui proces distinct cu cunoștințe fizice asemănătoare. De asemenea, utilizând acest model, în lucrare este propusă și analizată ca și strategie avansată de control termic, metoda de control predictiv MPC – Model Predictive Control.

Utilizând strategia propusă, îmbunătățirile sunt aduse de faptul că programul de ocupare al clădirii este folosit sub forma unei erori pondere a funcției cost MPC. Suplimentar, strategia propusă ia în calcul și eliminarea perturbațiilor introduse de variația indicatorilor de mediu ce pot fi extrași din prognoza meteo, astfel asigurând un nivel maxim de confort pentru ocupanții clădirii cu un necesar minim de energie. Această operație este posibilă prin intermediul utilizării unei strategii de reglare cu buclă feedforward care permite eliminarea efectelor provocate de acțiunea acestor indicatori înainte ca aceștia să producă efecte vizibile asupra sistemului. În urma implementării strategiei de control propuse pentru o casă experimentală și a comparării rezultatelor astfel obținute cu cele obținute folosind o strategie de control tradițională (cu reglatoare PID), s-a constatat o minimizare a consumului de energie, în condițiile în care nivelul de confort al ocupanților este menținut în limitele impuse.

Lucrarea este motivată de evoluțiile din ultimii ani în domeniul tehnicii de calcul și al componentelor hardware, evoluții ce au permis elaborarea mai multor direcții de dezvoltare a unor strategii avansate de conducere automată, în scopul creșterii performanțelor referitoare la controlul termic al clădirilor. De asemenea, lucrarea este justificată și de preocupările actuale în scopul minimizării efectelor produse de epuizarea resurselor naturale și emisiilor de gaze cu efect de seră. În acest context, membrii comunității științifice cu preocupări în domeniul studiului acestor tipuri de procese au elaborat mai multe studii în acest domeniu, oferind astfel soluții corespunzătoare fiecărei aplicații, soluții care să ducă la minimizarea efectelor inițiale. Studiul de față dezvoltă o metodă de modelare matematică și propune o strategie de conducere avansată, adecvată unor procese termice existente în interiorul unei clădiri.

5.2 CONTRIBUȚII ORIGINALE

Elementele de originalitate prezentate în teză pot fi conturate după cum urmează:

1. Realizarea unui studiu asupra literaturii de specialitate recente referitoare la tehnicile utilizate în scopul creșterii eficienței energetice a clădirilor. A fost studiat și prelucrat un număr considerabil de materiale de specialitate, dintre care: cărți, articole apărute în volumele unor conferințe, reviste și diverse publicații, articole prezentate la diverse congrese sau mese rotunde cu referire la eficiența energetică a clădirilor, teze de doctorat în domeniul de specialitate, normative elaborate de instituții naționale sau internaționale etc. Studiul documentar efectuat a fost canalizat în următoarele direcții:
 - Aspecte generale referitoare la problematica epuizării resurselor naturale și a emisiilor de gaze cu efect de seră;

- Aspecte generale referitoare la consumul de energie din clădiri și a eficienței energetice a acestora;
 - Politica Uniunii Europene referitoare la obținerea eficienței energetice în domeniul clădirilor;
 - Metode de creștere a eficienței energetice a clădirilor existente, dar și a celor aflate deja în uz.
2. Analizarea rapoartelor de specialitate și a documentației internaționale referitoare la problema schimbărilor climatice și a impactului sectorului rezidențial asupra consumului de energie. Analizarea normativelor europene și sintetizarea restricțiilor ce sunt impuse prin implementarea acestora;
 3. Analiza contextului european și național, subliniind cerințele propuse prin Strategia Europa 2020 în domeniul eficienței energetice a clădirilor;
 4. Realizarea unei sinteze asupra problemelor existente în ceea ce privește consumul energetic din clădiri și a metodelor de optimizare a acestuia;
 5. Analiza stării actuale a structurii fondului locativ la nivel național și sinteza strategiilor de control termic ce sunt aplicate frecvent în clădirile aflate în uz. Prezentarea unor metode generice folosite în scopul obținerii unei reduceri a consumului de energie din clădiri. Prezentarea fenomenelor ce țin de higrtermica clădirii și cum sunt acestea influențate de utilizarea unor tehnici tehnico-constructive moderne;
 6. Realizarea modelului termic pentru o casă experimentală. A fost propus un model de ordin redus al clădirii, model cu un grad ridicat de generalitate și posibilitatea aplicării acestuia în cadrul unui proces distinct cu cunoștințe fizice asemănătoare. Pentru obținerea acestuia, clădirea a fost aproximată ca și o singură zonă termică și s-a presupus ca proprietățile clădirii sunt distribuite uniform, iar parametrii modelului sunt constanți în timp, astfel fiind obținut un model matematic liniar al clădirii. În cadrul acestei operații, clădirea a fost văzută ca și un sistem cu patru intrări și o ieșire;
 7. Reprezentarea în spațiul stărilor a modelului matematic obținut utilizând un set de ecuații algebrice diferențiale, pornind de la reprezentarea rețelei electrice liniare cu parametri concentrați a clădirii. Ulterior, pentru analiza întregului sistem, a fost realizată reprezentarea sub forma unui set de funcții de transfer prin aplicarea transformatei Laplace;
 8. Identificarea numerică a parametrilor sistemului modelat utilizând metoda celor mai mici pătrate, simularea, validarea modelului, reprezentarea grafică a rezultatului obținut și compararea acestuia cu valorile reale măsurate în cadrul casei experimentale folosite în cadrul studiului;
 9. Identificarea problemelor ce pot să apară în cadrul strategiei de control termic al unei clădirii ce utilizează regatoare PID – strategie de control tradițională (întârzierea provocată de bucla de feedback) și găsirea unei soluții care să corecteze acest inconvenient;
 10. Transpunerea problemei de control termic al clădirii într-o problemă de reglare automată și reprezentarea acesteia prin intermediul unei bucle de reglare care să caracterizeze cât mai bine întregul sistem. În acest sens, eliminarea perturbațiilor introduse de variațiile factorilor meteorologici este realizată prin intermediul utilizării unei bucle de reglare de tip feedforward, astfel fiind neutralizat efectul acestora înainte de a produce modificări asupra comportamentului termic al clădirii;
 11. Implementarea unei strategii de control termic predictiv în clădiri folosind ca și strategie de control MPC – Model Predictive Control. Minimizarea funcției cost MPC prin intermediul folosirii unor tehnici de programare liniară;

12. Utilizarea programului de ocupare al clădirii în cadrul strategiei de control termic predictiv sub forma unui factor al erorii pondere din cadrul funcției cost MPC. Motivul acestei alegeri este acela de a elimina timpul de întârziere apărut la începutul schimbării programului de ocupare sub forma unui nivel crescut al disconfortului termic (corectarea problemelor apărute în cadrul utilizării strategiei de control termic ce utilizează regulatoare PID);
13. Prezentarea unor arhitecturi posibile de implementare a strategiei de control termic predictiv MPC, cu avantajele și dezavantajele fiecăreia dintre ele. Pentru fiecare tip de arhitectură prezentată s-a realizat și un test experimental și au fost prezentate rezultatele, subliniind îmbunătățirile aduse de fiecare dintre arhitecturi;
14. Realizarea unor teste experimentale care să demonstreze că folosirea strategiei de control termic predictiv propusă în teză aduce îmbunătățiri în comparație cu o strategie de control tradițională (cu regulatoare PID). Au fost realizate două teste experimentale, atât pentru perioada de vară, cât și pentru perioada de iarnă. Performanțele obținute au fost mai bune pentru cazul utilizării strategiei de control și a metodelor propuse în cadrul tezei.

5.3 DISEMINAREA REZULTATELOR CERCETĂRII

O parte a studiilor realizate în cadrul acestei teze au fost prezentate în volumele unor conferințe științifice organizate atât în țară cât și în străinătate și într-o revistă de specialitate.

Capitolul 2 conține rezultate publicate în:

- **Neculoiu G.**, Dache V., Stamatescu G., Sgârciu V., – Buildings modeling in order to implement optimal temperature control, Electronics, Computers and Artificial Intelligence 2015 - International Conference, 7th Edition, vol. 1, București, România, 25 – 27 June 2015, ISSN: 1843 – 2115, pg. S43-S48, 2015 (volum indexat IEEE și în curs de indexare ISI).

Capitolul 3 conține studii publicate în:

- **Neculoiu G.**, Stamatescu G., Sgârciu V. – Thermal control strategies applied in intermittently heating buildings, Buletinul științific al UPB, Seria C: Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, București, România, 2015, Universitatea POLITEHNICA București, 2015.

Rezultatele prezentate în Capitolul 4 sunt publicate în:

- **Neculoiu G.**, Dache V., Stamatescu G., Sgârciu V., – Model Predictive Control applied for building thermal control, IEEE ACEMP-OPTIM-ELECTROMOTION 2015 - International Conference, Side, Turkey, 02 – 04 September 2015, ISBN: 978-1-4763-7239-8, pg. 363 – 368, 2015 (volum ce va fi indexat IEEE și ISI);
- **Neculoiu G.**, Sgârciu V., Marinescu A.V., Marinescu M., – Increasing energy efficiency of a building with minimal computational demands using Model Predictive Control, 14th RoEduNet IEEE International Conference: Networking in Education and Research, Craiova, România, 24-26 September 2015, The Agency for Administration of National Network of Informatics for Education and Research ARNIEC/RoEduNet, 2015 (volum indexat IEEE și în curs de indexare ISI).

5.4 PERSPECTIVE DE CERCETARE ULTERIOARĂ

Se dorește ca cercetările prezentate în cadrul tezei de doctorat să poată fi validate și experimental prin intermediul unor dezvoltări ulterioare cu aplicabilitate pe o clădire reală. Perspectivele de cercetare ulterioară se referă în primul rând la posibilitatea aplicării strategiei de control termic prezentate în cadrul tezei pe o clădire reală, realizată pe teritoriul țării noastre. De asemenea, este avută în vedere și implementarea altor strategii de modelare și conducere care să aibă ca și rezultat obținerea unor performanțe dinamice ale sistemului condus mai bune în comparație cu cele deja propuse.

O altă direcție de cercetare vizează studiul impactului utilizării surselor de energie regenerabilă asupra clădirilor și găsirea unor metode de optimizare a consumului energetic care să țină cont la maximum de utilizarea potențialului adus de aceste surse.

BIBLIOGRAFIE

- [1] *EUROSTAT*, „Energy yearly statistics 2007”, Office for Official Publications of the European Communities, ISBN 978-92-79-12787-8, 2009;
- [2] *Alina-Daniela Handra, Nicolae-Radu Ciotor*, „Eficienta energetica”, *Analele Universității “Constantin Brâncuși” din Târgu Jiu, Seria Inginerie*, Nr. 3/2009, pg. 325 – 330, 2009;
- [3] *Comisia Europeana*, „Versiunea consolidata a Tratatului privind Uniunea Europeana si a Tratatului privind functionarea Uniunii Europene”, *Jurnalul Oficial al Uniunii Europene – C 326*, ISSN 1977 – 1029, 2012;
- [4] *Comisia Europeana*, „Schimbarile climatice – despre ce este vorba? O introducere pentru tineri”, *Oficiul pentru Publicații al Uniunii Europene*, ISBN 978-92-79-09560-3, 2009;
- [5] *The Core Writing Team, R.K. Pachauri, A. Reisinger*, „Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC”, Geneva, Switzerland, Intergovernmental Panel on Climate Change, ISBN 92-9169-122-4, 2008;
- [6] *Comisia Europeana*, „Directiva 2010/31/UE - Performanța energetică a clădirilor”, *Jurnalul Oficial al Uniunii Europene – L 153*, 2010;
- [7] *Comisia Europeana*, „Directiva 2006/32/CE privind eficiența energetică la utilizatorii finali și serviciile energetice”, *Jurnalul Oficial al Uniunii Europene – L 114*, 2006;
- [8] *Comisia Europeana*, „Eficiența energetică și contribuția sa la securitatea energetică și cadrul pentru politica privind schimbările climatice și energia pentru 2030”, *Jurnalul Oficial al Uniunii Europene – L 520*, 2014;
- [9] *Comisia Europeana*, „Provocările din domeniul energetic și politica energetică - Contribuția Comisiei la reuniunea Consiliului European din 22 mai 2013”, *Jurnalul Oficial al Uniunii Europene – 2013*;
- [10] *G. Neculoiu, V. Dache, G. Stamatescu, V. Sgarciu*, “Buildings modeling in order to implement optimal temperature control”, *Electronics, Computers and Artificial Intelligence 2015 - International Conference, 7th Edition*, vol. 1, pp. S43-S48, 2015;
- [11] *D. Rotariu*, „Eficienta energetica in cladirile existente in Romania”, *Conferinta Eficienta Energetica Germana in Cladiri si Case Pasive Romanesti, Hotel Crowne Plaza, Bucuresti*, 2012;
- [12] *Asociatia Romana pentru Promovarea Eficientei Energetice*, „CARTEA ALBA – Eficienta Energetica in Romania”, Editura AGIR, ISBN 978-973-720-513-1, Bucuresti, 2013;
- [13] *M. Georgescu*, „Solutii de eficienta energetica pentru diferite tipuri de cladiri (aspecte tehnice si economice, studii de caz)”, *Programul Natiunilor Unite pentru Dezvoltare – A doua sesiune de instruire a personalului tehnic a autoritatilor publice locale in cadrul proiectului “Imbunatatirea eficientei energetice in gospodariile si comunitatile cu venituri mici din Romania”*, Craiova, 2012;
- [14] *S.S. Iliescu*, „Teoria reglării automate – nete curs”, *Universitatea Tehnica de Constructii din Bucuresti*, 2014;
- [15] *I. Hazyuk, C. Ghiaus, D. Penhouet*, „Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: part II - control algorithm”, *Building and Environment*, vol. 51, pg. 388–394, 2012;
- [16] *Samuel Privara, Jan Siroky, Lukas Ferkl, Jiri Cigler*, „Model predictive control of a building heating system: The first experience”, *Energy and Buildings*, vol. 43, pg. 564-572, 2011;
- [17] *L. Peeters, J. Van der Veken, H. Hens, L. Helsen, W. D'Haeseleer*, „Control of heating systems in residential buildings: current practice”, *Energy and Building*, vol. 40, pg. 1446–1455, 2008;
- [18] *E.F. Camacho, A.C. Bordons*, „Model Predictive Control”, Springer-Verlag, London, 2004.
- [19] *L. Wang*, „Model Predictive Control system design and implementation using MATLAB”, Springer-Verlag, London, 2009.

- [20] *Gârlașu D., Săndulescu V., Halcu I., Neculoiu G., Grigoriu O., Marinescu M., Marinescu V.*, „A Big Data implementation based on Grid Computing”, 11th RoEduNet IEEE International Conference: Networking in Education and Research, The Agency for Administration of National Network of Informatics for Education and Research ARNIEC/RoEduNet, ISSN-L: 2068-1038, pg. 62-65, 2013;
- [21] *Rusu O., Halcu I., Grigoriu O., Neculoiu G., Săndulescu V., Marinescu M., Marinescu V.*, „Converting unstructured and semi-structured data into knowledge”, 11th RoEduNet IEEE International Conference: Networking in Education and Research, The Agency for Administration of National Network of Informatics for Education and Research ARNIEC/RoEduNet, ISSN-L: 2068-1038, pg. 85-88, 2013;
- [22] *Ciubăncan M., Neculoiu G., Grigoriu O., Halcu I., Săndulescu V., Marinescu M., Marinescu V.*, „Data Mining processing using GRID technologies”, 11th RoEduNet IEEE International Conference: Networking in Education and Research, The Agency for Administration of National Network of Informatics for Education and Research ARNIEC/RoEduNet, ISSN-L: 2068-1038, pg. 89-91, 2013;
- [23] *Bărbulescu M., Grigoriu R. O., Halcu I., Neculoiu G., Săndulescu V. C., Marinescu M., Marinescu V.*, „Integrating of structured, semi-structured and unstructured data in natural and build environmental engineering”, 11th RoEduNet IEEE International Conference: Networking in Education and Research, The Agency for Administration of National Network of Informatics for Education and Research ARNIEC/RoEduNet, ISSN-L: 2068-1038, pg. 92-95, 2013;
- [24] *G. Neculoiu, V. Dache, G. Stamatescu, V. Sgarciu*, “Model Predictive Control applied for building thermal control”, IEEE ACEMP-OPTIM-ELECTROMOTION 2015 - International Conference, ISBN: 978-1-4763-7239-8, pg. 363 – 368, Side, Turkey, 2015;
- [25] *B. Paris, J. Eynard, S. Grieu, T. Talbert, M. Polit*, „Heating control schemes for energy management in buildings”, *Energy and Building*, vol. 42, pg. 1908–1917, 2010;
- [26] *T.Y. Chen*, „Application of adaptive predictive control to a floor heating system with a large thermal lag”, *Energy and Building*, vol. 34, pg. 45–51, 2002;
- [27] *I. Hazyuk, C. Ghiaus, D. Penhouet*, “Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part I - Building modeling”, *Building and Environment*, vol. 51, pg. 379-387, 2012;
- [28] *P. Strachan, I. Heusler, M. Kersken, M. J. Jimenez*, “Test Case Twin_House_Experiment_2. Validation of Building Energy Simulation Tools (Subtask 4). Version 4”, IEA ECB Annex 58, 2014;
- [29] *I. Naveros, C. Ghiaus*, “Order selection of thermal models by frequency analysis of measurements for building energy efficiency estimation”, *Applied Energy*, vol. 139, pg. 230-244, 2015;
- [30] *G. Strang*, “Introduction to applied mathematics”, Welley-Cambridge Press, 1986;
- [31] *M. Kummert, P. Andre, J. Nicolas*, “Optimal heating control in a passive solar commercial building”, *Solar Energy*, vol. 69, pg. 103-116, 2001;
- [32] *C. Ghiaus, I. Hazyuk*, “Calculation of optimal thermal load of intermittently heated buildings”, *Energy and Buildings*, vol. 42, pg. 1248-1258, 2010;
- [33] *S. Wang, X. Xu*, “Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification”, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, pg. 419-432, 2006;
- [34] *D.A. Coley, J.M. Penman*, “Simplified thermal response modelling in building energy management. Paper III: demonstration of a working controller”, *Building and Environment*, vol. 31, pg. 93-97, 1996;
- [35] *M.J. Jimenez, H. Madsen, K.K. Andersen*, “Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB”, *Building and Environment*, vol. 43, pg. 170-180, 2008;
- [36] *C. Ghiaus*, “Causality issue in the heat balance method for calculating the design heating and cooling load”, *Energy*, vol. 50, pg. 292-301, 2013;
- [37] *J. Crassidis, J. Junkins*, “Optimal estimation of dynamic systems. 2nd ed.”, Taylor & Francis, 2011;

- [38] *H. Park, N. Martaj, M. Ruellan, R. Bennacer, E. Monasson*, „Modeling of a Building System and its Parameter Identification”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 8, pg. 975-983, 2013;
- [39] *Eremia C. V., Neculoiu G., Grigoriu O., Oboukhova N., „Motuko A.*, Data compression and panoramic images formation in UAV military tv-monitoring system”, *European Scientific Journal*, edition vol.9, no.33/November 2013, ISSN: 1857 – 7881 (Print), e-ISSN: 1857- 7431, pg. 436-448;
- [40] *H. Okuyama, Y. Onishi*, „System parameter identification theory and uncertainty analysis methods for multi-zone building heat transfer and infiltration”, *Building and Environment*, vol. 54, pg. 39-52, 2012;
- [41] *A. Rabl*, „Parameter Estimation in Buildings: Methods for Dynamic Analysis of Measured Energy Use”, *Solar Energy Engineering*, vol. 110, pg. 52-66, 1988;
- [42] *ADEME*, „Chiffres clés du Bâtiment - Energie - Environnement – 2010”, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2011;
- [43] *M. Kummert, P. Andre, J. Nicolas*, „Optimal heating control in a passive solar commercial building”, *Solar Energy*, vol. 69, pg. 103-116, 2001;
- [44] *F. Fang, W. Tan, J. Liu*, „Tuning of Coordinated Controllers for Boiler Turbine Units”, *Acta Automatica Sinica*, vol. 31, nr. 2, 2005;
- [45] *CEN*, “Controls for Heating Systems - Part 2: Optimum Start–Stop Control Equipment for Hot Water Heating Systems”, European Committee for Standardization, 2001;
- [46] *F. E. Cellier*, „Continuous System Modeling”, Springer – Verlag, 1991;
- [47] *K. J. Astrom, N. Wittenmark*, „Adaptive Control”, Addison-Wesley Publishing Comp., 1989;
- [48] *R. De Keyser, A. Van Cauwenberghe*, „Extended Prediction Self-Adaptive Control”, IFAC Symposium on Identification, pg. 1317-1322, 1985;
- [49] *Marinescu M., Ciubăcan M., Dulea M., Grigoriu R. O., Halcu I., Neculoiu G., Săndulescu V. C., Niculescu-Faida O., Marinescu A. V.* , „Software system for inventory and assessment of the wear of computing machines from a network of grid data centers”, 13th RoEduNet IEEE International Conference: Networking in Education and Research, The Agency for Administration of National Network of Informatics for Education and Research ARNIEC/RoEduNet, ISSN: 2068-1038, pg. 1-4, 2014;
- [50] *Xu Min, Li Shaoyuan, Ca Wenjian*, „Cascade generalized predictive control strategy for boiler drum level”, *ISA Transactions*, vol. 44, pg. 399 – 411, 2005;
- [51] *M. Morari, J. Lee*, “Model predictive control: past, present and future”, *Computers and Chemical Engineering*, vol. 23, pg. 667–682, 1999;
- [52] *D. Kolokotsa, A. Pouliezios, G. Stavrakakis, C. Lazos*, “Predictive control techniques for energy and indoor environmental quality management in buildings”, *Building and Environment*, vol. 44, pg. 1850-1863, 2009;
- [53] *I. Hazyuk, C. Ghiaus, D. Penhouet*, “Model Predictive Control of thermal comfort as a benchmark for controller performance”, *Automation in Construction*, vol. 43, pg. 98-109, 2014;
- [54] *M.D. Doan, T. Keviczky, I. Necoara, M. Diehl, B.D. Schutter*, “A distributed version of Han’s method for dMPC using local communications only”, *Journal of Process Control*, vol. 17, pg. 37-50, 2007.