

0. INTRODUCERE

Dezvoltarea comunicațiilor a făcut ca distanța dintre oameni să se micșoreze, să fie posibile schimburi intense de idei și opinii în toate domeniile, la care cele referitoare la cercetarea științifică ocupă unul din locurile fruntașe. Drept urmare, la nivel global s-a realizat o gamă diversificată de lucrări cu caracter tehnico-științific, care au accelerat descoperiri noi, cu conexiuni interdisciplinare, fiind posibile aplicarea de tehnologii aferente unor domenii de vârf.

După descoperirea microprocesorului (1971) evoluția tehnologică a urmat o curbă ascendentă exponențială, cu creștere importantă – la nivelul comunicației umane – după implementarea tehnologiilor de Internet. Internetul a devenit o nevoie de bază a milioane de oameni care îl folosesc în mai multe scopuri în funcție de nevoile lor. Se estimează că aproximativ 60% din populația lumii utilizează internetul [88], [107]. Aceasta înseamnă că peste jumătate din populație folosește internetul datorită popularității și beneficiilor sale care le sunt oferite oamenilor de către Internet. Un alt aspect al creșterii utilizatorilor de internet este acela că oamenii pot comunica și se pot sincroniza cu alte persoane din întreaga lume prin Internet.

Datorită beneficiilor Internetului, un alt domeniu este în creștere, ceea ce permite obiectelor și mașinilor să se conecteze și să comunice reciproc prin Internet, numit Internet of Things (IoT) [126]. Internetul obiectelor (Internet of Things, IoT) este un fenomen unic, deoarece reunește multe tipuri de tehnologii diferite specifice unor industrii variate. Provocarea generală provine de la cerințele comune pentru conectivitate, securitate și gestiunea datelor, cerințe care impactează toate tipurile de afaceri și medii tehnologice. Cu toate acestea, IoT trebuie să permită aplicații și soluții specifice fiecărui sector de afaceri și dezvoltare și, prin urmare, colaborarea este extrem de necesară, chiar esențială în unele cazuri. În alte cazuri, este necesară convergența serviciilor și tehnologiilor specifice telecomunicațiilor, IT-ului și Web-ului, împreună cu software-ul, aplicațiile și gestionarea datelor.

IoT este aplicat pe scară largă în sisteme inteligente de transport, protecția mediului, activitatea guvernelor, sisteme de siguranța publică, case și orașe inteligente, sisteme inteligente de control al incendiului, sisteme de monitorizare industrială, de îngrijire a persoanelor vârstnice și a pacienților. O rețea IoT poate atinge, în mod abstract, recunoașterea, poziționarea, urmărirea, supravegherea și managementul inteligent al obiectelor conectate.

Sistemele IoT sunt indisolubil legate de tehnologia RFID prin care este posibil un context nou pentru obiectele inteligente, capabile să combine existența lor fizică și virtuală. Prin atașarea unei etichete RFID de identificare pe fiecare obiect este posibilă funcționarea unui sistem inteligent capabil să obțină informații în timp real, fără ca un contact fizic să fie necesar. Acest proces transformă un obiect simplu într-un potențial obiect inteligent ce are posibilitatea de a se auto identifica și este capabil să se conecteze la Internet la nivel global.

În efortul de a înțelege dezvoltarea Internetului în industrii, lucrarea analizează cercetările actuale ale IoT, tehnologiile generice esențiale, aplicațiile majore ale internetului în industrii și identifică tendințele și provocările cercetării. O contribuție principală a acestei lucrări se referă la faptul că rezumă în mod sistematic actuala tehnologie IoT de ultimă generație în ramuri industriale, precum și maniera în care dezvoltările pneumatice pot fi incluse în IIoT.

În ultimii ani (ultima decadă a secolului XXI) a apărut și diseminat în lumea științifică, dar mai ales în sfera aplicațiilor industriale, termenul **Industry 4.0**, inițial în literatura germană, dar cu răspândire rapidă în țările puternic industrializate. **Industry 4.0** este pasul către lumea digitală complet conectată pentru mediul de producție. O condiție esențială pentru această dezvoltare este

utilizarea de tehnologii durabile care nu necesită o pauză cu lumea existentă, dar care să permită o tranziție inteligentă.

Prezentarea domeniului de doctorat

Lumea digitală, aferentă IIoT și Industry 4.0, în care producția de obiecte este realizată de linii de fabricație complet automatizate, cu echipamente capabile să „converseze” între ele, cuprinde o serie de subansambluri funcționale din cadrul sistemelor pneutronice (sisteme complexe de conducere la care mediul de lucru de bază este aerul comprimat).

Domeniul pneutronicii a cunoscut o dezvoltare rapidă în ultimii ani datorită unor avantaje de necontestat legate de componentele pneumatice folosite în construcția sistemelor din această categorie:

- o construcție stabilă funcțional la un preț de cost rezonabil, inferior celui aferent sistemelor electronice echivalente;
- performanțe statice și dinamice ridicate, ceea ce le conferă un avantaj de utilizare în industrii prelucrătoare robotizate;
- folosirea aerului comprimat conferă, pe lângă prețul scăzut al aplicațiilor, și o preferință a utilizării în medii curate (industrii precum cea alimentară sau cea farmaceutică);
- simbioza dintre pneutronică și electronică / informatică a permis elaborarea de soluții noi pentru aplicații la care consacrate erau – până nu demult – doar soluțiile electronice.

Sistemele pneutronice folosesc componente pneumatice performante ca viteză de operare, ceea ce le fac de neînlocuit în multe aplicații, un exemplu elocvent fiind liniile de asamblare automate cu roboți industriali. Trebuie subliniat faptul că – în prezent – elementele de execuție, de la cele mai simple de tip on/off la cele mai complexe care presupun poziționări multiple, au – în varianta pneumatică – performanțe dinamice superioare celor electronice. În consecință s-au efectuat cercetări intense pentru creșterea performanțelor dispozitivelor pneumatice, literatura de specialitate tratând în monografii sau articole – punctuale, de mai mică întindere - principiile constructive, soluțiile inovative de dispozitive care minimizează neliniaritățile și histerezisul mecanic, construcții noi de componente electro-pneumatice. Aceste aspecte explică lista extinsă de referințe bibliografice atașate prezentei lucrări.

Domeniul tezei se încadrează în efortul manifestat de găsire a noi soluții adecvate pentru eficiența echipamentelor pneumatice, cu precădere a celor care folosesc actuatoare (elemente de execuție) în care aerul comprimat constituie mediul natural de lucru.

Scopul tezei

Teza elaborată are ca obiectiv general analiza, construcția și utilizarea distribuitorilor pneumatice digitale on/off comandate în impulsuri modulate PWM, atât sub aspect teoretic cât și experimental, urmărindu-se etapele de la concepție la realizare fizică și folosire în aplicații.

Atingerea obiectivului general s-a făcut urmărindu-se o serie de obiective specifice, care au presupus:

- realizarea de distribuitori digitale on/off comandate în impulsuri PWM simple (construcție cu armătura mobilă cu translație, cu performanțe statice / dinamice bune pentru aplicații multiple);
- analiza performanțelor distribuitorilor realizate cu montaje specifice imaginate de autorul tezei;
- realizarea de experimente concordante scopului (obiectivului) general;

- aplicarea echipamentelor dezvoltate (realizate) în structuri pneutronice care dovedesc atingerea unor performanțe ridicate (capitolul 5);

Teza aduce o serie de contribuții în domeniul pneumaticii proporționale, care sunt detaliate în capitolul final.

O bogată bibliografie (peste 290 de referințe) a stat la baza realizării documentării, în special cea referitoare la partea de sinteză din capitolele 1 și 2.

Conținutul tezei de doctorat

Teza este structurată pe 7 capitole, cel final fiind de evidențiere a contribuțiilor personale și a direcțiilor noi de dezvoltare ulterioară, la care se adaugă o lista de trei anexe și o bibliografie adecvată atingerii obiectivului general și a obiectivelor specifice.

În primul capitol, intitulat “**Integrarea sistemelor pneumatice în noua revoluție industrială**” sunt tratate gradual mecanismele integrării echipamentelor pneumatice în procesul de globalizare a producției de bunuri materiale, odată cu apariția Internetului și a utilizării lui prin dezvoltarea conceptelor IIoT și Industry 4.0. După o trecere în revistă a celor două concepte, lucrarea prezintă efortul integrării Internetului în industrii, prin analiza cercetărilor actuale ale IoT, a tehnologiilor generice esențiale, a aplicațiilor majore ale internetului în industrii și identifică tendințele și provocările cercetării. O contribuție principală a acestei lucrări se referă la faptul că rezumă în mod sistematic actuala tehnologie IoT de ultimă generație în ramuri industriale, precum și maniera în care dezvoltările pneumatice pot fi incluse în IIoT.

Numărul de dispozitive IoT crește de la an la an, motivul fiind acela că oferă confort în viața umană și realizează rezultate mai bune decât oamenii. În acest context **Industry 4.0** este pasul către lumea digitală complet conectată pentru mediul de producție, la care numărul de puncte de măsură necesare (senzori) și dispozitive controlate în mod activ (actuatoare) va crește în mod semnificativ. Ca urmare, cu ajutorul senzorilor și al sistemelor integrate cu software intensiv pot fi create obiecte inteligente.

Dacă se imaginează arhitectura IoT sub forma unui arbore, la rădăcina acestuia sunt nelipsite categoriile diverse de senzori (traductoare) și actuatoare, componente esențiale în sistemele pneutronice, iar tehnologiile IoT folosesc ca elemente de cuplare cu mediul extern cele două mari categorii de produse. Deja – în prezent – sunt dezvoltate și / sau implementate numeroase aplicații IoT în diverse industrii, inclusiv monitorizarea mediului, servicii de asistență medicală, managementul inventarului și producției, lanțul de aprovizionare cu alimente, transportul, sprijinul la locul de muncă și la domiciliu, securitatea și supravegherea.

Ca provocări de cercetare și tendințe viitoare în IoT se pot evidenția cele de natură tehnică, legate de arhitectura rețelei, dar mai ales de interconectarea prin diferite tehnologii de comunicare, standardizarea în cadrul IoT, care urmărește să reducă barierele de intrare pentru noii furnizori de servicii și utilizatori, să îmbunătățească interoperabilitatea diferitelor aplicații / sisteme și să permită produselor sau serviciilor să funcționeze mai bine la un nivel mai înalt, respectiv securitatea informațiilor și protecția vieții private. De asemenea, se pot evidenția câteva tendințe de cercetare, cum ar fi integrarea rețelelor sociale cu soluțiile IoT, dezvoltarea tehnologiilor energetice IoT, a tehnicilor de calcul bazate pe inteligența artificială, combinarea IoT și Cloud Computing pentru a dezvolta noi modele sau platforme care să ofere "percepția ca serviciu" pe cloud.

Fără îndoială, sistemele mecatronice sunt compatibile cu noua revoluție industrială, întrucât mecatronica presupune o înlănțuire de aplicații din domeniul mecanicii cu cele ale electronicii și sistemelor informatice, astfel că produsele obținute poartă girul acestor mari ramuri

industriale, fiind caracterizate de o calitate înaltă, cu structuri electronice de ultimă generație, capabile de a efectua operații cu grad mare de dificultate, ceea ce a permis migrarea către produse inteligente. Un sistem mecatronic poate fi considerat cu reglare automată, în sensul că reacționează – în timp real – la diverși stimuli externi (situații), deci presupune existența unor senzori / traductoare pentru preluarea informației externe, respectiv a unor actuatori pentru aplicarea comenzilor.

La ora actuală pneumatica este plasată în rândul tehnologiilor de vârf, eforturile de cercetare fiind îndreptate către rezolvarea neajunsurilor legate de viscozitate și compresibilitatea mediului de lucru. Este de punctat faptul că, în anumite aplicații, structurile pneumatice sunt preferate în exclusivitate față de cele electrice, hidraulice, sau mecanice.

În continuarea capitolului este prezentată noțiunea de sistem tehnic inteligent, implementat prin diferite tehnici, algoritmi sau metode, capabil să emuleze funcții specifice ființelor umane sau ale altor sisteme din diferite domenii. Cei 4 piloni ai conducerii inteligente de procese sunt reprezentați prin sistemele expert, mulțimile fuzzy, rețelele neuronale și algoritmi genetici. În prezent se întâlnesc în lumea reală sisteme pneutrice cu o mare complexitate, asimilabile unor sisteme tehnice inteligente, care au configurații adaptate aplicației în care sunt folosite. Totuși, structura lor este orientată după un concept de proiectare ierarhic – de la proces la server-ul de aplicație – care constituie o îmbinare optimă între componentele hardware și aplicațiile software. Funcția obiectiv cuprinde sarcina pe care sistemul pneumatic trebuie să o îndeplinească. Pentru realizarea obiectivului, acesta trebuie corect descris și definit. În mod uzual se folosesc procedee adecvate de comunicare cu sistemul, cea mai întâlnită variantă presupunând utilizarea unui limbaj adecvat pentru descrierea obiectivului ce trebuie realizat.

Capitolul se încheie cu exemple de sisteme pneumatice inteligente, preluate de la firme cu tradiție în domeniu. Sunt detaliate sisteme de poziționare multiplă realizate de firma Festo, ca și dispozitivul de control independent Control^D utilizat pentru reglarea proceselor în buclă deschisă, în buclă închisă sau în buclă duală (în cascadă) realizat de firma Emerson / Numatics.

În capitolul 2 al tezei, intitulat “**Stadiul actual de dezvoltare al echipamentelor pneumatice proporționale**” este realizată o evaluare atentă a domeniului, care conduce la identificarea principalelor tendințe și perspective, și anume: dezvoltarea puternică a pneumatice în viitor, încorporarea informaticii în sistemele și echipamentele pneumatice de conducere, care contribuie la dezvoltarea sistemelor pneutrice, creșterea fiabilității, acuratețea funcțională și performanța statică și dinamică a dispozitivelor pneumatice reale, precum și dezvoltarea și construirea de noi tipuri de echipamente pneumatice de înaltă performanță.

Capitolul își propune să stabilească principalele tendințe și perspective în domeniul echipamentelor pneumatice pentru aplicații diverse, în special legate de automatizarea proceselor tehnologice. Studiul unei bibliografii extinse a arătat ca tendințe ireversibile integrarea senzorilor și a traductoarelor, ca și a electronicii aferente, în construcția celor mai noi echipamente, miniaturizarea construcțiilor, creșterea interesului față de siguranța mediului, trecerea la posibilitățile de reciclare a echipamentelor la sfârșitul ciclului lor de viață, construcția de echipamente cu consum redus de energie.

Întrucât teza este axată pe contribuții în domeniul distribuitorilor pneumatice proporționale, au fost prezentate aspectele constructiv-funcționale ale acestora, plecând de la configurația cea mai simplă a unui distribuitor 2/2 (cu două poziții și 2 orificii), în varianta constructivă cea mai utilizată - cea cu sertar cilindric cu mișcare de translație. Un asemenea echipament poate fi cu acționare “totul sau nimic” sau cu acționare proporțională.

Datorită faptului că echipamentele proporționale analogice sunt scumpe, au – în general – un histerezis de valori ridicate, caracteristica poate avea zone cu pante diferite, performanțele sunt date de precizia cu care sunt realizate elementele constructive ale echipamentului, de frecările mecanice, de jocurile existente, de existența sau inexistența controlului automat al poziției armăturii mobile a actuatorului, se analizează – în continuare - echipamentele proporționale comandate în impulsuri modulate, la care nu este posibil un reglaj continuu al debitului instantaneu, dar realizează un control al debitului mediu. Principalele avantaje ale utilizării acestor distribuitoare sunt: viteză mare de răspuns, preț de cost acceptabil (echipamentele sunt simple constructiv și nu impun condiții deosebite de execuție și montaj), eliminarea histerezisului și a efectelor sale nedorite, obținerea unei repetabilități foarte bune. Totodată, un sistem de acționare în care sunt integrate asemenea echipamente poate fi controlat cu ajutorul unui microprocesor / microcontroller, ceea ce simplifică foarte mult structura sistemului de comandă.

Pentru comanda distribuitoarelor digitale on/off se folosesc o serie de tehnici de conducere în impulsuri modulate, care sunt analizate în continuare: *metode de reglare a debitului folosind semnale de comandă modulate*, din care fac parte metoda PFM (“Pulse Frequency Modulation”) și metoda PWM (“Pulse Width Modulation”), *metode de reglare a debitului bazate pe cuplarea mai multor distribuitoare*, cum sunt metoda PNM (“Pulse Number Modulation”) și metoda PCM (“Pulse Cod Modulation”).

Indiferent de maniera de comandă în impulsuri, tehnicile de conducere țin seama de caracteristicile dinamice ale procesului, astfel că trebuie aplicată o lege de reglare concordantă dinamicii procesului, dublată de asigurarea unor performanțe statice impuse de realitatea fizică a aplicației. În cadrul tezei intenția este de a combina conceptele dezvoltate de teoria sistemelor automate (teoria reglării) cu schemele electronice de obținere a semnalelor de comandă astfel încât să se asigure performanțele conform funcției obiectiv asumate.

Capitolul continuă cu realizări de firmă, în care obținerea unor sisteme pneumatice de acționare performante nu poate fi concepută fără utilizarea echipamentelor pneumatice proporționale care controlează debitul și presiunea. Este motivul pentru care eforturile proiectanților și fabricanților din acest domeniu sunt dirijate în direcția promovării acestor echipamente.

Din baleierea produselor identificate de firmă am constatat folosirea schemelor analogice de reglare în buclă deschisă, respectiv buclă închisă, introducerea tehnicii digitale prin folosirea unor DSP-uri sau microcontrollere de ultimă generație (în esență pentru reglare digitală, dar și pentru comunicație cu posturi dispecer pentru automatizări complexe); o tehnică pe larg folosită în comanda părții electromecanice se bazează pe PWM, care presupune generarea unor impulsuri dreptunghiulare de frecvență mult mai mare decât maximum frecvenței proprii a părții electromecanice, lățimea impulsurilor fiind proporțională cu semnalul de comandă, media impulsurilor pe perioada fundamentală fiind astfel proporțională cu comanda.

Capitolul se încheie cu tendințe și perspective privind echipamentele pneumatice proporționale, în cadrul căruia s-au analizat - din punct de vedere constructiv și funcțional - o serie de distribuitoare proporționale comandate în impulsuri modulate. O analiză a lucrărilor de specialitate din domeniu arată preocupările specialiștilor referitoare la distribuitorul pneumatic proporțional canalizate – în principal - pe: analiza elementelor constructive care intră în configurația distribuitorului și modalitățile de creștere a performanțelor prin optimizarea acestora; dezvoltarea de soluții noi (particulare) de produse din această categorie, care să satisfacă cerințele

de performanță, în special prin reducerea costurilor echipamentelor; realizarea de soluții inovatoare privind strategiile de automatizare, care să permită creșterea performanțelor dinamice ale structurilor pneuonice în care se folosesc distribuitoare pneumatice proporționale comandate în impulsuri; folosirea de structuri bazate pe distribuitoare comandate în impulsuri pentru obținerea unor precizii ridicate de poziționare.

În capitolul 3, intitulat **“Stabilirea modelelor constructive de distribuitoare proporționale comandate în impulsuri modulate”**, sunt analizate în detaliu distribuitoarele pneumatice digitale, atât din punct de vedere constructiv, cât și privind performanțele acestora. O atenție deosebită este acordată distribuitorului pneumatic proporțional comandat în impulsuri cu armătură mobilă cu mișcare de translație, pentru care se realizează proiectarea.

Ideea de bază de la care s-a pornit în concepția distribuitorului a fost ca închiderea liniilor de câmp magnetic să se facă prin material feromagnetic caracterizat de o permeabilitate magnetică relativă $\mu_r \gg \mu_{aer}$. Dacă acest principiu se păstrează, atunci forța electromagnetică dezvoltată va fi suficient de mare pentru a atrage armătura mobilă spre miezul magnetic fix, operație care se poate realiza cu o frecvență ridicată. Dimensiunile distribuitorului au fost astfel calculate încât componentele acestuia să fie asamblate într-un corp normal de seringă.

Continuând ideea prezentată anterior s-a conceput o variantă îmbunătățită de distribuitor, care are posibilitatea modificării ușoare a secțiunii de curgere, cuplarea rapidă (fără modificări) în cascadă a mai multor distribuitoare, simplificarea constructivă prin adoptarea unor repere simetrice. De asemenea, modelul proiectat cu programul Inverter, permite o funcționare de calitate privind maniera de procesare a debitului prin distribuitor.

Capitolul cuprinde o secțiune importantă de proiectare dimensională a categoriilor de distribuitoare anterior dezvoltate, stabilindu-se – prin formalizare matematică – dimensiunile de curgere (diametrul, cursa armăturii mobile) funcție de forma supapei și direcția de curgere a fluidului prin distribuitor. O componentă importantă este acordată dimensionării electromagnetului prin proiectarea componentelor sale, astfel încât să se încadreze spațial în formele dorite. De asemenea, sunt prezentate realizările colectivului din departamentul de Mecatronică și Mecanică de Precizie cu referire la soluții constructive și modele experimentale de distribuitoare digitale.

Componenta finală a capitolului se referă la blocul electronic de achiziție și comandă, în care se tratează aspectele de concepție și construcție a modalităților de generare semnale de comandă, achiziție semnale analogice și numerice de la schemele elaborate. Se face precizarea că tehnica de bază constă în folosirea mediului de dezvoltare LabVIEW, la care cuplarea cu mediul extern este realizată prin modulul NI USB 6001. De asemenea, se prezintă etajul final de comandă a distribuitoarelor folosit în cadrul ridicărilor experimentale.

În capitolul 4, intitulat **„Cercetări teoretice și experimentale ale modelelor propuse”**, sunt analizate – atât teoretic, cât și experimental – modelele matematice ale sistemelor pneumatice propuse, care folosesc distribuitoare digitale comandate în impulsuri PWM.

O primă parte a capitolului este destinată modelării matematice a sistemelor pneumatice; astfel, plecând de la ecuația continuității debitului, se trece la ecuația variației presiunii într-un volum de lucru, care este urmată de expresia debitului într-o secțiune dată și ecuația de mișcare cu ajutorul căreia se exprimă echilibrul forțelor care acționează asupra elementelor mobile din echipamentele pneumatice.

În continuare se trece la modelarea distribuitorului pneumatic proporțional comandat în impulsuri având armătura mobilă cu translație, la care se analizează în detaliu subsistemele aferente (electromagnetic și mecano-fluidic), stabilindu-se relațiile analitice care descriu funcționarea acestora, și se determină diametrul nominal de curgere și cursa armăturii mobile pentru categoria de distribuitoare proiectate în capitolul 3.

Un loc aparte este acordat simulării distribuitorului la anclanșarea / declanșarea releului electromagnetic; plecând de la ideile teoretice exprimate la dinamica distribuitorului în capitolul 3, se tratează – folosind tehnica transformatei Laplace directe și inverse – răspunsul în timp la activarea bobinei electromagnetului. Analiza teoretică detaliată s-a făcut pentru a studia timpul total de anclanșare, care este o parte critică în stabilirea frecvenței maxime de lucru pentru distribuitor. Se face precizarea că supozițiile teoretice asumate în acest paragraf au fost verificate pe cale experimentală prin determinările efectuate cu osciloscopul digital. De asemenea, a fost realizat un program de simulare în LabVIEW pentru această componentă, care permite determinarea rapidă a parametrilor folosiți în formalizarea matematică.

Pentru partea de declanșare s-a demonstrat teoretic și s-a confirmat experimental că timpul de închidere a supapei distribuitorului este mult redus în raport cu cel de deschidere datorită diodei de stingere a impulsului plasată în paralel cu bobina releului electromagnetic.

Pentru demonstrarea avantajelor tehnicii de “speed up” s-a realizat un montaj adecvat folosind un comutator electronic de mare viteză comandat de un monostabil, astfel că a fost posibilă aplicarea unui semnal de menținere cu amplitudinea de 25% din cea normală, care a dus, atât la creșterea frecvenței de funcționare, cât și la scăderea considerabilă a consumului energetic.

Pentru dezvoltarea unui model al distribuitorului privind debitul masic instantaneu s-au expus conceptele teoretice în §.4.3.2.1, care au fost verificate prin ridicările experimentale. De asemenea, pentru verificarea raportului maxim de modulare a funcționării distribuitorului, expus teoretic în §.4.3.2.3, s-a realizat experimente care prezintă debitul instantaneu în funcție de presiunea de intrare, cu o restricție variabilă la ieșire pe evacuare, datele prezentate tabelar și grafic fiind în concordanță cu comportamentul teoretic în regim staționar și dinamic. În această parte a lucrării se prezintă o metodă de modelare care este relativ independentă de structura internă a unui distribuitor PWM. În continuare, combinația dintre distribuitor și amplificatorul său de comandă este considerată un dispozitiv on-off cu întârzieri de deschidere și închidere. Aceste întârzieri sunt deduse din răspunsurile dinamice ale presiunii, ca funcție a intrării lățimii impulsului modulatorului. Modelul de debit masic instantaneu este stabilit prin reproducerea matematică a procesului de modulare a distribuitorului. De asemenea, se stabilește modelul debitului masic echivalent și raportul maxim de modulare a funcționării.

Pentru simularea numerică a funcționării distribuitorului s-au folosit două medii diferite, și anume: mediul AMESim (Advanced Modelling Environment for performing Simulations - “Mediu avansat de efectuare a simulărilor”) și mediul Matlab Simulink. Din analiza rezultatelor obținute prin simulare se poate trage concluzia că debitul mediu poate fi controlat prin intermediul parametrului factor de umplere cât și prin intermediul frecvenței impulsurilor de comandă. Modelul realizat în mediul Simulink a fost făcut pe baza relațiilor stabilite în paragraful 4.2.2. Cele două metode de simulare au constituit obiectul unei analize comparative.

În continuare s-a realizat analiza experimentală a modelelor propuse, pentru distribuitorul proiectat efectuându-se experimente pentru a evidenția comportarea distribuitorului în frecvență cu restricție, comportarea distribuitorului în frecvență fără restricție, comportarea distribuitorului

la factor de umplere variabil, comportarea distribuitorului la factor de umplere variabil, presiune de intrare 2 ... 4 bari, restricție de 1 bar în ieșire.

În finalul capitolului se prezintă o analiză comparativă a rezultatelor teoretice și experimentale în conexiune directă cu echipamentele folosite, prin prisma performanțelor lor statice și dinamice.

În cadrul capitolului 5, intitulat „**Aplicații ale distribuitoarelor pneumatice proporționale comandate în impulsuri PWM**”, se prezintă două studii de caz pentru punerea în evidență a avantajelor distribuitoarelor digitale on/off.

Cu referire la primul subcapitol, intitulat *Comanda actuatorilor pneumatice cu distribuitoare comandate în impulsuri PWM*, se pleacă de la un suport teoretic adecvat pentru comanda motoarelor pneumatice, insistând pe precizia de poziționare a soluțiilor expuse în literatura tehnică de specialitate.

În paragraful *Modelarea matematică a sistemului electro-pneumatic* este studiat un model al sistemului electro-pneumatic care include distribuitoare on/off și un cilindru cu dublă acțiune fără tijă. Astfel, se prezintă: modelarea distribuitorului on/off, modelarea cilindrului cu dublă acțiune fără tijă, modelul mediat de intrare continuă folosind un suport matematic adecvat. Se scoate în evidență legătura dintre presiunea din camerele cilindrului și deplasare, dar și maniera în care pot fi folosite distribuitoarele digitale on/off în probleme de poziționare.

În paragraful intitulat *Proiectarea controlerului pentru sistemul electro-pneumatic*, se propune folosirea de semnale PWM cu faze modificabile pentru a îmbunătăți performanța de reglare. În acest sens se analizează cele șapte moduri de comutare a celor patru distribuitoare folosite în controlul poziției, rezultând efectele prezentate pe direcția pozitivă denumită „avans”, respectiv direcția negativă denumită „retragere”. Aceste moduri, clasificate în Tabelul 5.A.1 funcție de comenzile logice ale distribuitoarelor, au efecte diferite și pot influența performanța controlului în condiții de presiune diferite. Se propune astfel strategia PWM cu schimbare de fază, la care comutarea de la modul x la modul y ($1 \leq x \leq 7$, $1 \leq y \leq 7$) într-o perioadă PWM este definită ca modul M_{xy} , unde x reprezintă modul principal de control (pe durata cât lățimea impulsului este activă = “1” logic) și modul y reprezintă modul auxiliar de control (pe durata în care lățimea impulsului este inactivă = “0” logic). Strategia PWM cu schimbare de fază este implementată cu controlerul de mod glisant (urmărire), în plus, fiind alocate două traductoare de presiune TP_S și TP_D pentru a măsura presiunea ambelor camere. Se analizează – în continuare - strategia completă PWM cu schimbare de fază, care este împărțită în două dimensiuni: funcția de alunecare s și diferența de presiune ΔP .

O analiză aparte este alocată secțiunii de selectare a parametrilor, în care sunt prezentate mai multe metode adecvate pentru a selecta parametrul diferenței de presiune, parametrii funcției de glisare α , β , χ și alți parametri critici din controlerul modului de glisare. Alegerea acestor parametri se face - în principal - pe baza erorii de poziție.

Prelucrarea datelor de la traductorul incremental de poziție a constituit o problemă importantă a poziționării, întrucât presupune preluarea – fără pierderi sau adaos de impulsuri – a deplasării efectuate de masa mobilă a motorului pneumatic. S-a încercat, mai întâi, o soluție consacrată, care folosește un numărător reversibil și un convertor numeric analogic, care însă nu a condus la rezultate mulțumitoare, întrucât – în experimente – s-a constatat că dubla conversie (numeric-analogic, urmată de una analog-numerică) realizează cumulara erorilor, deci măsurarea cu eroare inacceptabilă a deplasării. S-a apelat la o soluție inovativă, bazată pe proprietatea

modulului **NI USB 6001** de numărare a impulsurilor, care a condus la o realizare practică de excepție, în sensul că programul din **LabVIEW** urmărește deplasarea de la traductorul incremental de poziție fără pierderi / adaos de impulsuri.

În continuare se prezintă configurarea generală a sistemului electro-pneumatic, detaliindu-se atât componenta pneumatică cât și cea electronică. Cu echipamentele precizate și mediul de dezvoltare LabVIEW s-a trecut la realizarea experimentelor, care au presupus mai multe situații după cum urmează:

- Cazul experiment fără frână fără oscilații la comandă crescătoare, respectiv descrescătoare;
- Cazul experiment fără frână cu oscilații la comandă crescătoare, respectiv descrescătoare;
- Cazul experiment cu frână fără oscilații la comandă crescătoare, respectiv descrescătoare;
- Cazul experiment cu frână cu oscilații amortizate la comandă crescătoare, respectiv descrescătoare.

Toate rezultatele arată soliditatea controlerului propus împotriva incertitudinilor din model și fiabilitatea strategiei cu schimbare de fază PWM.

Al doilea studiu de caz se referă la reglarea presiunii într-un rezervor cu pierderi variabile folosind distribuitor comandat în impulsuri modulate PWM. În cadrul paragrafului *Scopul și modalitatea de atingere a acestuia* se precizează că sistemul propus urmărește reglarea presiunii în incinta unui rezervor de volum fix V la valoarea dorită P_r și menținerea constantă a acesteia, pierderile variabile fiind simulate cu un drosel pneumatic, urmărindu-se cum schema de comandă compensează aceste pierderi.

În cadrul experimentelor din această secțiune se folosește distribuitorul cu supapă sferică prezentat în capitolul 3. Acest echipament, integrat în structura sistemului, este un distribuitor comandat în impulsuri modulate, de mici dimensiuni ($D_n = 2$ mm), cu poziție preferențială, tip 2/2, comandat electric, cu un electromagnet ce poate funcționa la frecvențe mari de lucru, obținându-se astfel, la orificiul de consumator, un debit de aer ce corespunde valorii medii a debitului efectiv ce traversează circuitul intern al echipamentului.

În continuare se trece la elaborarea modelului matematic pentru incinta de volum constant, plecând de la variația presiunii în incinta de volum constant V – funcție de debitul de alimentare a acesteia. Se stabilesc astfel relații care permit analiza funcționării sistemului automat de reglare a presiunii atât într-o modalitate analitică cât și în una pe cale experimentală.

Determinarea analitică a legii de variație a presiunii P în incinta de volum fix V presupune tratarea distinctă a celor trei cazuri corespunzătoare celor trei situații de funcționare (detalii despre notații în cadrul tezei, subcapitolul 5.B):

- **Cazul 1)** pentru situația $0 \leq p \leq 0.528$, în care regimul este sonic;
- **Cazul 2)** pentru situația în care $0.528 \leq p \leq p_p$, cu $p_p = \frac{P_p}{P_a}$, astfel că rezultă regim subsonic;
- **Cazul 3)** este pentru situația $p_p \leq p \leq p_r$, $p_r = \frac{P_r}{P_a}$, la care regimul este subsonic.

Relațiile pentru cele trei cazuri au fost integrate într-un program dezvoltat în mediul **LabVIEW 2011**, iar rezultatele au confirmat supozițiile teoretice.

În cadrul paragrafului destinat determinării experimentale a variației de presiune în incinta de volum constant s-au prezentat experimente cu un montaj dezvoltat pe baza schemei de principiu din figura 5.B.1, prin care s-a demonstrat valabilitatea analizei teoretice din paragraful anterior, precum și alte proprietăți legate de comanda în impulsuri a distribuitorilor digitale.

Experimentele și-au propus să scoată în evidență comportarea distribuitorului comandat în impulsuri în reglarea presiunii folosind comenzi digitale cu frecvențe și factor de umplere diferite, precum și la modificarea pragurilor P_p , P_r și a debitului de evacuare prin droselul pneumatic. S-a observat că, la aceeași valoare a pierderilor, pusă în evidență pe debitmetrul electronic, răspunsul sistemului de reglare a presiunii este mai bun cu cât factorul de umplere este mai mare și frecvența impulsurilor de comandă – de asemenea – mai mare (acest aspect era de așteptat întrucât este în concordanță cu analiza teoretică expusă în capitolele 3 și 4. Deoarece traductorul de presiune are ieșire în curent continuu unificat 4 ... 20 mA, iar timpul său de răspuns este de aproximativ 20 ms, s-au putut efectua determinări dinamice, care să arate modul de încărcare al rezervorului la diferite frecvențe PWM și diferite presiuni de alimentare.

Pentru efectuarea buclei de reglare a presiunii în rezervor s-a realizat montajul din figura 5.B.4, cu observația că s-a renunțat la distribuitorul clasic **DC** întrucât rezervorul **Rz** este de volum redus, distribuitorul pneumatic digital **DM** reușind să umple rezervorul într-un timp rezonabil (de ordinul zeci de secunde). De asemenea, pentru o bună efectuare a experimentului, valoarea achiziționată de la traductorul de presiune a fost multiplicată cu factorul constant 10, după care a fost trecută prin filtrul digital de netezire. Rezultatele experimentelor – cu comentarii detaliate – sunt prezentate în cadrul tezei, acestea fiind în concordanță cu supozițiile teoretice prezentate în prima parte a subcapitolului 5.B.

Această lucrare se încheie cu un set de concluzii în capitolul 6 în care sunt prezentate rezultatele obținute și contribuțiile originale de-a lungul stagiului doctoral privind utilizarea distribuitorilor pneumatice digitale comandate în impulsuri PWM în sistemele de urmărire și poziționare. Tot aici este expusă lista de lucrări ale autorului tezei și sunt prezentate perspectivele de dezvoltare ulterioară.