

REZUMAT
asupra tezei de doctorat
“CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA UNOR SOLUȚII
DE REGLARE DEDICATE SISTEMELOR DE ACȚIONARE ELECTRICĂ
CU PARAMETRI VARIABILI ȘI CU INTRĂRI VARIABLE ÎN TIMP”

1. Actualitatea temei tezei de doctorat. Aspecte generale referitoare la teză.

Creșterea complexității aplicațiilor industriale solicită o permanentă modernizare a automatizărilor industriale și a condus la cerințe noi în raport cu acționările electrice și cu soluțiile de conducere automată aferente. Aceste cerințe se referă de fapt la asignarea performanțelor din ce în ce mai ridicate în raport cu funcționarea în diferite regimuri – pornirea, reglajul vitezei, frânarea, reversarea – și dezvoltarea sistemului de conducere în raport cu aceste cerințe. Sistemele de acționare electrică (abreviat SAE) reprezintă o modalitate de conversie a energiei electrice în energie mecanică și din punct de vedere al performanțelor sunt adeseori superioare celor hidraulice și pneumatice. SAE sunt întâlnite într-un număr mare de aplicații în special datorită facilităților pe care le pot asigura, prin dezvoltarea sistemelor de control. Alegerea tipului de acționare electrică este determinată de condițiile de funcționare și de regimurile de exploatare.

Teza de față ține cont de aceste aspecte. Ea este orientată spre prezentarea preocupărilor de cercetare privind analiza, sinteza și modelarea unor sisteme mecatronice bazate pe acționări electrice. În cadrul tezei sunt analizate și dezvoltate soluții moderne de conducere dedicate reglării vitezei, respectiv poziției, unor sisteme de acționare electrică cu parametri variabili – referință de viteză variabilă, moment de inerție variabil și cuplu rezistent (de sarcină) variabil.

Sistemele mecatronice moderne au câștigat tot mai mult în performanțe, asigurând versatilitate funcțională și aplicativă, inteligență, flexibilitate, fiind aflate într-o permanentă evoluție. Aceste caracteristici sunt furnizate și de sistemul de conducere care trebuie dotat cu capacitatea de a se adapta în permanență la condițiile externe și de a oferi apoi informații necesare conducerii ierarhizate.

În reglarea turației și a poziției pe lângă situațiile de moment de inerție variabil, intrarea de referință variabilă, corelată cu diverse condiții particulare de funcționare, pot apărea și condiționări suplimentare de funcționare, ca de exemplu oscilațiile care se manifestă pe partea mecanică – datorită două sau mai multor mecanisme cuplate elastic.

Strategiile de conducere a servosistemelor trebuie să asigure performanțe foarte bune de regim dinamic și de regim staționar sistemelor de reglare automată dezvoltate. Prin urmare, devine de strictă actualitate și necesitate analiza și dezvoltarea sistematică a algoritmilor de reglare destinați servosistemelor. În acest sens, teza de doctorat este orientată spre elaborarea unor noi metode de dezvoltare a unor soluții de reglare automată dedicate controlului vitezei și poziției a trei aplicații din domeniul mecatronic:

- Sistemul de acționare electrică de înfășurare a unei benzi cu viteză liniară constantă pe un tambur – Sistemul de acționare electrică cu parametri variabili;
- Sistemul de acționare electrică cu intrări variabile în timp cu motor de curent continuu fără perii;
- Echipamentul de laborator – Model 220 Industrial Plant Emulator.

Teza este structurată pe două părți, după cum urmează:

- Partea I cuprinde capitolele 2 și 3, în care sunt sintetizate conceptele care constituie suportul dezvoltării structurilor de reglare dedicate aplicațiilor abordate în teză;
- Partea a II-a cuprinde trei capitole de bază – 4, 5 și 6, care conțin cercetările legate de dezvoltarea soluțiilor de reglare propuse pentru domeniul aplicațiilor vizate – și un capitol (7) ce conține concluziile finale și contribuțiile personale.

În partea finală a tezei sunt prezentate Anexele și Bibliografia.

În *Partea I*, în *capitolul 2*, sunt evidențiate principalele obiective ale sistemelor de acționare electrică cu parametri variabili. De asemenea se prezintă câteva tipuri de motoare electrice frecvent utilizate, evidențiindu-se principalele caracteristici ale motoarelor de curent continuu cu și fără perii; sunt prezentate și cele trei aplicații mecatronice cu parametri variabili abordate în teză. În *capitolul 3*, sunt tratate probleme teoretice legate de dezvoltarea soluțiilor de reglare automată: (1) soluții de reglare cu reglatoare PI(D) în varianta simplă sau în varianta cascadă, respectiv în variante extinse cu adaptarea parametrilor (ca suport de comparație pentru celelalte soluții); (2) reglatoare fuzzy de tip Takagi-Sugeno; (3) reglatoare hibride neuro-fuzzy de tip Takagi-Sugeno; (4) soluții cu reglatoare în mod alunecător și (5) soluții cu reglatoare cu două grade de libertate.

Partea a II-a, este dedicată dezvoltării soluțiilor de reglare pentru cele trei procese: în *capitolul 4* - Sistemul de acționare electrică cu parametri variabili (SAE-pv); în *capitolul 5* - Sistemul de acționare electrică cu intrări variabile în timp cu motor de curent continuu fără perii; în *capitolul 6* - Aplicația de laborator: Model 220 Industrial Plant Emulator (M220IPE).

Dupa cum s-a menționat, primele două aplicații au fost furnizate de preocupări din cadrul unui contract de cercetare, iar cea de a 3-a este o instalație de laborator care a permis verificarea experimentală a soluțiilor de reglare adoptate și dezvoltate, particularizat, pe aplicație.

Fiecare din capitolele 2-6 sintetizează la finalul capitolului contribuțiile locale aduse.

Partea a II-a include și *capitolul 7* în care se sintetizează concluziile generale ale tezei și contribuțiile aduse prin teză.

2. Analiza conținutului pe capitole și a contribuțiilor aduse prin teză

Obiectivul acestei teze de doctorat constă în redarea într-o manieră sintetică a rezultatelor de cercetare efectuate pe parcursul celor trei ani de pregătire; rezultatele au fost prezentate în formă restrânsă în lucrări la simpozioane, workshop-uri, conferințe și congrese.

În **Capitolul 1**, intitulat **“Introducere”** este făcută o prezentare generală a tezei. Urmează un paragraf în care sunt prezentate principalele contribuții aduse prin intermediul tezei, capitolul în care se regăsesc acestea și lucrările proprii prin care au fost prezentate și susținute aceste contribuții.

Toate capitolele conțin subcapitole dedicate concluziilor și contribuțiilor personale.

Capitolul al 2-lea „Sisteme de acționare electrică cu parametri variabili și cu intrări variabile în timp. Aplicații mecatronice” este inclus în **Partea I-a**. În cadrul acestui capitol, este prezentată într-o manieră succintă ideea de *variabilitate a parametrilor și mărimilor* unui SAE. În acord cu aplicațiile vizate în cadrul tezei sunt menționate principalele obiective ale SAE cu parametri variabili; de asemenea sunt evidențiate câteva soluții moderne de reglare; o parte din aceste soluții precum și soluțiile noi dezvoltate sunt testate pe aplicațiile mecatronice din capitolele următoare.

Tot în cadrul acestui capitol, se prezintă succint câteva tipuri de motoare electrice. Se prezintă aspecte comparative între principalele caracteristici ale BLDC-m și ale DC-m și aspecte legate de modelarea matematică (informațională) a celor două tipuri de motoare. Caracteristici comparabile cu cele ale unei mașini de curent continuu convenționale se obțin prin asocierea motorului BLDC cu un invertor de frecvență controlată. Relațiile prezentate servesc ulterior la fundamentarea modelării aplicațiilor abordate în capitolele 4, 5 și 6.

În ceea ce privește SAE cu parametri variabili, pot fi precizate următoarele:

- au fost menționate diferite modele de aplicații cu inerție variabilă pentru cazul SAE cu DC-m sau BLDC-m;
- acceptând ipoteze simplificatoare cu valabilitate în situații bine precizate, din MM detaliate, se pot obține MM simplificate, ce vor putea fi utilizate în sinteza legilor de reglare aferente SAE; verificarea soluțiilor se va face pe modele detaliate (neliniare), care caracterizează mai fidel comportarea reală a sistemului;
- cunoașterea cât mai exactă a valorilor parametrilor sistemului este necesară pentru că acest lucru influențează semnificativ dezvoltarea unor structuri de reglare performante;
- datorită faptului că, în cazul sistemelor cu inerție variabilă modificările punctelor de funcționare afectează dinamica sistemului și deoarece legea de reglare depinde de acesta, soluțiile de reglare trebuie să ia în considerare comutarea fără șocuri între unul sau mai mulți algoritmi de reglare.

Capitolul al 3-lea, intitulat “*Soluții de conducere și metode clasice de proiectare bazate pe model dedicate sistemelor de acționare electrică cu parametri variabili și cu intrări variabile în timp*” definește noțiunile esențiale necesare pentru abordarea teoretică și apoi dezvoltarea soluțiilor de conducere pentru procesele specifice abordate în teză.

În ultimile două decenii au fost introduse și aplicate diverse tehnici specifice pentru reglarea parametrilor sistemelor de acționare electrică; parte din ele apelează eficient regulatoarele PI(D) convenționale, respectiv soluții extinse bazate pe acestea: sistemele de reglare bazate pe tehnici fuzzy, sistemele cu structuri variabile, soluții bazate pe metodele de estimare a parametrilor și perturbației, soluții de reglare robuste, ș.a. În bună parte aceste soluții au la bază teoria sistemelor liniare invariante în timp, cu extensii spre domeniul neliniar.

Algoritmii de reglare moderni trebuie să răspundă solicitărilor privind calitatea reglării, și să garanteze menținerea nivelului și în condițiile unor solicitări tehnologice diverse (uneori extreme). Rezultatul proiectării și implementării sistemului de conducere automată depinde în mare măsură de corectitudinea modelului matematic (abreviat MM) disponibil pentru procesul condus – MM care poate fi însă destul de complex.

În cadrul acestui capitol, se tratează sintetic structurile de sisteme de reglare automată (abreviat SRA) apelate în teză. Alegerea structurii SRA depinde de complexitatea structurii procesului condus, de performanțele impuse și de echipamentele de automatizare disponibile.

Ținând seama de particularitățile aplicației abordate și cerințele de calitate impuse conducerii, pe baza unui studiu bibliografic referitor la soluții LCA sunt analizate cele cinci soluții de reglare adaptate la aplicațiile mecatronice abordate în teză:

- Soluția/soluții cu regulatoare PI(D), în varianta cu buclă simplă sau în varianta în cascadă, respectiv, în variante extinse cu adaptarea parametrilor;
- Soluția/soluții cu regulatoare fuzzy (regulatoare fuzzy cvasi-PI de tip Takagi-Sugeno);
- Soluția/soluții cu regulatoare hibride neuro-fuzzy (regulatoare neuro-fuzzy cvasi-PI de tip Takagi-Sugeno);

- Soluția/soluții cu regulatoare în mod alunecător (cu structură variabilă, abreviat VSS Variable Structure System);
- Soluția/soluții cu regulatoare cu două grade de libertate (abreviat 2DOF).

Regulatoarele PI(D) sunt utilizate datorită faptului că structura acestor regulatoare este simplă și transparentă, iar parametrii de reglare sunt ușor de acordat. În cadrul tezei, regulatoarele PI(D) sunt folosite de regulă ca și structuri de referință, ca termen de comparație a performanțelor celorlalte structuri de conducere dezvoltate.

Dezvoltarea unor structuri de regulatoare cu adaptarea permanentă a parametrilor la puncte de funcționare caracteristice ale regimului de funcționare al procesului poate fi o soluție de succes, apelabilă și în cazul clasic, dar și în cazul regulatoarelor derivate din acestea.

Regulatoarele fuzzy reprezintă o soluție ce garantează de multe ori performanțe superioare regulatoarelor convenționale, și – în cazul unei proiectări corecte - pot asigura stabilitatea și robustețea SRA. Performanțe mai bune rezultă din modul de adaptare a bazei de reguli și din modul de întocmire al mulțimilor fuzzy asociate variabilelor lingvistice; din acest motiv utilizarea acestui tip de regulatoare poate fi o soluție bună.

Soluția cu regulatoare neuro-fuzzy este justificată de faptul că aceste regulatoare posedă avantaje moștenite atât de la sistemele inteligente fuzzy, cât și de la sistemele adaptive – reactualizarea parametrilor regulatorului fuzzy aduce o creștere a performanțelor sistemului.

Regulatoarele cu structură variabilă – în speță aici regulatoarele sliding-mode - pot reprezenta soluții alternative întrucât ele sunt caracterizate prin robustețe, implementare simplă și compensarea neliniarităților procesului.

Soluțiile de reglare cu regulatoare cu două grade de libertate, pot asigura o comportare bună a semnalului de urmărire și – concomitent – reducerea efectelor perturbațiilor.

Pentru aplicațiile tratate în teză dezvoltarea regulatoarelor PI(D) a fost bazată pe utilizarea criteriilor de optim cunoscute. O succintă sinteză asupra unor metode bazate pe criteriul modulului (m-MO, m-SO, m-ESO) este prezentată în finalul capitolului. Eficiența celor trei metode este dovedită atât în domeniul timp, cât și în domeniul frecvență; aceste metode sunt bazate pe MM de tip benchmark aferente procesului, motiv care justifică tratarea MM neliniare.

Partea a II-a a tezei este structurată pe 4 capitole. Capitole de început (capitolele 4, 5 și 6) tratează aplicațiile de conducere, iar ultimul (capitolul 7) este dedicat concluziilor.

Cercetările relative la modelarea matematică, estimarea și validarea parametrilor mașinilor și acționărilor electrice au fost influențate de :

- dezvoltarea din ultimele două decenii a SAE performante – mașini speciale și sisteme de alimentare prin convertoare statice dedicate, din ce în ce mai performante;
- performanțele impuse acestor sisteme;
- precizia și/sau viteza mare de răspuns.

Dezvoltarea domeniului SAE a fost și este în legătură cu aplicațiile industriale și neindustriale și este susținută de realizarea și dezvoltarea unor structuri de reglare din ce în ce mai performante.

Obiectivul acestei părți a tezei îl constituie susținerea modului în care structurile de reglare moderne - abordate în teză - pot fi dezvoltate, proiectate și implementate. Soluții de reglare moderne sunt dedicate SAE pentru trei categorii de aplicații, regăsite – direct sau indirect – și în domeniul mecatronic; soluțiile vizează în primul rând categoria de procese cu parametrii variabili și mărimi de intrare variabile:

- SAE cu motor de curent continuu (abreviat DC-m) – pentru cazul SAE cu parametri variabili prezentat în *capitolul 4*;
- SAE cu motoare de curent continuu fără perii – 2 aplicații distincte:
 - A. servosistemul cu motor de curent continuu fără perii (abreviat BLDC-m) – SAE cu intrări variabile în timp cu BLDC-m – prezentat în *capitolul 5*;
 - B. echipamentul de laborator: Model 220 Industrial Plant Emulator – SAE cu parametri variabili – prezentat în *capitolul 6*.

Soluțiile de conducere automată au fost dezvoltate pentru a asigura dezideratele de reglare menționate în capitolele 2 și 3.

Procesele abordate în cadrul tezei în capitolele 4, 5 și 6 sunt neliniare, cu neliniarități liniarizabile (continue) care pot fi aduse – prin liniarizare și simplificare – la forma unor modele matematice (MM) de ordin redus de tip benchmark; pe baza acestor modele se asigură dezvoltarea relativ facilă a soluțiilor de reglare.

În lipsa unui stand experimental extins, dedicat testării tuturor soluțiilor de reglare dezvoltate – ele au fost verificate prin simulare în mediul Matlab/Simulink utilizând MM detaliate, dezvoltate. În capitolul 6 cel puțin o parte din aceste soluții sunt apoi testate – parțial – pe un echipament de laborator dedicat, pentru care însă, variația continuă a momentului de inerție nu este posibilă.

În **capitolul 4**, “*Soluții moderne de conducere pentru SAE cu parametri variabili cu motor de curent continuu cu excitație independentă*” este abordată aplicația sistemului de acționare electrică de înfășurare a unei benzi cu viteză liniară constantă pe un tambur; este prezentată modelarea matematică detaliată, liniarizarea modelului matematic și sunt trecute valorile numerice ale aplicației abordate. Pentru această aplicație sunt dezvoltate, testate și verificate, prin simulare, soluții de reglare cu regulatoare convenționale și regulatoare „avansate” încadrate în două structuri diferite de reglare în cascadă:

- soluția de bază pentru care au fost dezvoltate trei soluții de reglare:
 - (1) RG-PI;
 - (2) regulator fuzzy cvasi-PI de tip Takagi-Sugeno cu integrarea ieșirii (abreviat RG-F-TS-cvasi-PI-IE);
 - (3) regulator hibrid neuro-fuzzy de tip Takagi-Sugeno cvasi-PI cu integrarea intrării (abreviat RG-HNF-TS-cvasi-PI-II).
- varianta cu adaptarea parametrilor regulatorului (adaptivă) pentru care au fost dezvoltate cinci soluții de reglare:
 - (1) RG-PI;
 - (2) RG-F-TS-cvasi-PI-IE;
 - (3) RG-F-TS-cvasi-PI-II;
 - (4) regulator cu două grade de libertate (abreviat RG-2DOF);
 - (5) regulator cu structură variabilă cu regulator PI în aval de tip cvasireleu (abreviat RG-SV-PI de tip cvasireleu).

Pentru studiul eficienței diferitelor soluții de reglare propuse și dezvoltate, au fost întocmite programe Matlab/Simulink dedicate, foarte detaliate. Soluțiile de reglare cu RG-PI dezvoltate ca soluții de bază – utilizate în majoritatea aplicațiilor industriale – au constituit atât suport de comparație, cât și suport în dezvoltarea celorlalte soluții de reglare.

În vederea analizei robusteții soluțiilor de reglare cu RG-PI s-a realizat o analiză de sensibilitate. Pentru a verifica SRA dezvoltate pentru SAE-pv, au fost definite două tipuri de scenarii de simulare:

- Pentru comparația diferitelor variante de SRA-csd, soluția de bază (de referință) și cele derivate, a fost aplicată o referință treaptă;
- Pentru compararea soluțiilor de SRA-csd – variantele cu adaptarea parametrilor regulatorului – pentru testarea capacității de urmărire – a fost aplicată referința viteză liniară constantă și – calculată – referința variabilă pentru viteza unghiulară ω , (referință de turație) calculată în baza dependenței analitice explicitate.

Toate simulările au fost efectuate pe SAE-pv caracterizat prin MM neliniar.

Pe baza analizei comparative a celor trei soluții de reglare cu RG-PI cu valori fixate a parametrilor, RG-F-TS-cvasi-PI-IE și RG-HNF-TS-cvasi-PI-II dezvoltate pentru SRA-csd, soluția de bază, pe baza studiilor de caz pentru nouă situații (scenarii), se poate concluziona necesitatea utilizării unor regulatoare adaptive în structuri de reglare automată.

În ceea ce privește cea de a doua categorie de SRA-csd, soluția adaptivă, din analizele comparative realizate, pe baza rezultatelor de simulare, se poate trage concluzia că practic toate soluțiile de reglare automată propuse pentru aplicația dezvoltată s-au dovedit viabile și garantează performanțe de reglare bune în raport cu modificările referinței: timpi de reglare, timpi de primă reglare relativ reduși și suprareglaj între 5%-15%.

În **capitolul 5** intitulat “*Soluții moderne de conducere pentru SAE cu intrări variabile în timp cu motor de curent continuu fără perii*” este abordată aplicația „sistem de acționare electrică cu intrări variabile în timp cu motor de curent continuu fără perii” (abreviat BLDC-m); este prezentată modelarea matematică, modul de elaborare a logicii de comutație și valorile numerice specifice aplicației abordate. De asemenea, pentru reglarea vitezei sunt dezvoltate, testate și verificate, prin simulare, unsprezece soluții de reglare cu regulatoare convenționale și regulatoare „avansate” încadrate într-o structură de reglare în cascadă:

- Soluția (1) RG-PI;
- Soluția (2) RG-F-TS-cvasi-PI-IE;
- Soluția (3) RG-F-TS-cvasi-PI-II;
- Soluția (4) RG-HNF-TS-cvasi-PI-IE;
- Soluția (5) RG-HNF-TS-cvasi-PI-II;
- Soluția (6) RG-SV-PI-de tip cvasireleu;
- Soluția (7) RG-PI-SV de tip releu ideal;
- Soluția (8) RG-2DOF PID;
- Soluția (9) RG-F-TS-2DOF;
- Soluția (10) RG-SV-PI-2DOF;
- Soluția (11) RG-PI-SV-2DOF.

Soluțiile de reglare cu RG-PI și cu RG-2DOF dezvoltate ca soluții de bază au constituit atât suport de comparație, cât și suport în dezvoltarea celorlalte soluții de reglare. Pentru testarea soluțiilor de reglare dezvoltate pentru SAE cu motor BLDC, au fost definite două scenarii de simulare:

- *Referința 1* – semnal treaptă;
- *Referința 2* – o referință complexă prin care se pot testa caracteristicile de urmărire, definită prin o porțiune de viteză liniar crescătoare (accelerare), o porțiune cu viteză constantă urmată de o porțiune de viteză liniar descrescătoare (decelerare) și apoi de viteză constantă și în final o porțiune de viteză liniar descrescătoare (decelerare) până se ajunge la oprire.

Simulările au fost efectuate pe sistemul de acționare caracterizat prin MM de bază, dezvoltat în paragraful 5.2, în regim de referință de viteză (turație) variabilă și cuplul rezistent

variabil. Pentru validarea soluțiilor de reglare propuse și dezvoltate, au fost întocmite programe Matlab/Simulink dedicate detaliate.

Din analize comparativa realizate pe baza rezultatelor de simulare, se poate concluziona că practic toate soluțiile de reglare propuse pentru aplicația servosistemului cu motor BLDC s-au dovedit viabile și garantează performanțe de reglare bune în raport cu modificările referinței: comportare aproximativ aperiodică sau foarte puțin oscilantă și timpi de reglare, respectiv timpi de primă reglare relativ reduși.

În **capitolul 6**, “*Verificări experimentale pe standul Model 220 Industrial Plant Emulator*” este prezentat echipamentul de laborator – Model 220 Industrial Plant Emulator. În acord cu tematica tezei, în cadrul acestui capitol au fost prezentate o parte din rezultatele experimentale privind soluțiile de reglare dezvoltate. Experimentele au fost efectuate pe echipamentul de laborator dedicat (M220IPE), care însă nu poate oferi toate cerințele unor testări de detaliu. Din acest motiv, pentru viitor se are în vedere o colaborare cu furnizorul de echipament prin care executivul de timp real să fie flexibilizat. Prin verificările experimentale efectuate, a fost confirmată viabilitatea soluțiilor de reglare dezvoltate și testate atât în capitolele 4 și 5.

Pe baza ecuațiilor primare care caracterizează funcționarea servosistemului M220IPE, au fost determinate MM neliniare aferente acestui sistem pentru două situații abordate – transmisie realizată prin intermediul unei curele rigide (neelastică) și transmisie realizată prin intermediul unei curele flexibile (elastică).

Pentru cele două situații, pentru reglarea poziției servosistemului M220IPE (aducerea într-o poziție finală dorită), au fost dezvoltate variante de soluții de reglare cu regulatoare convenționale și regulatoare “avansate” încadrate în structura de SRA-convențională (după ieșire). Soluțiile au la bază soluțiile de reglare propuse și testate – prin simulare – în capitolele 4 și 5. Datorită însă unor mărginiri ale echipamentului de laborator, unele dintre aceste soluții au trebuit să fie reformulate.

În esență, capitolul sintetizează:

- dezvoltarea și testarea a cinci soluții de reglare moderne pentru servosistemul M220IPE cu transmisie rigidă fără greutate suplimentare pe cele două discuri:
 - (1) RG-PID;
 - (2) RG-2DOF;
 - (3) RG-SV-PID de tip cvasireleu;
 - (4) RG-F-TS-PD+I;
 - (5) RG-F-TS-PD+I-2DOF.

Soluțiile de reglare cu RG-PID dezvoltate ca soluții de bază, au constituit atât suport de comparație, cât și suport în dezvoltarea celorlalte soluții de reglare;

- dezvoltarea și testarea unor soluții de reglare convenționale cu RG-PID pentru servosistemul M220IPE cu transmisie rigidă cu greutate suplimentare pe discul “load”;
- dezvoltarea și testarea a două soluții de reglare convenționale pentru servosistemul M220IPE cu transmisie flexibilă:
 - (1) RG-PI;
 - (2) RG-PID.

Soluțiile de reglare au fost abordate pentru trei studii de caz.

Experimentele au fost efectuate atât în timp real în mediul Matlab/Simulink, cât și prin intermediul programului executiv. În vederea testării experimentale a soluțiilor au fost realizate

scenarii de verificare experimentală, scenarii care să susțină alegerea „celei mai avantajoase” soluții (dintre cele dezvoltate):

- pentru compararea celor cinci soluții de reglare – RG-PID, RG-2DOF, RG-SV-PID de tip cvasireleu, RG-F-TS-PD+I și RG-F-TS-PD+I-2DOF – pentru testarea capacității de urmărire, au fost aplicate ca referință impulsuri dreptunghiulare. Pe baza analizei comparative, se poate concluziona că în ceea ce privește timpul de reglare și timpul de primă reglare cele mai bune performanțe au fost date de SRA-c cu RG-F-TS-PD+I-2DOF, cel mai mare suprareglaj a fost realizat de SRA-c cu RG-F-TS-PD+I, iar soluția cu RG-PID s-a dovedit a fi cea mai lentă, înregistrând cei mai mari timpi de reglare și timpi de primă reglare;
- pentru compararea soluției de reglare cu RG-PID proiectate pentru M220IPE în nouă cazuri semnificative, a fost aplicată o referință treaptă; pe baza analizei comparative, se poate concluziona că soluțiile adecvate pentru $J_{l,init}$, $J_{l,med}$ și $J_{l,max}$ sunt redade de studiile de caz 1.1, 2.2 și 3.3; preocupări ulterioare au în vedere utilizarea unor regulatoare adaptive în structuri de reglare automată – a se vedea capitolul 4;
- pentru compararea soluțiilor de reglare cu RG-PI și RG-PID, relativ la testarea capacității de urmărire, a fost aplicat scenariul cu referință rampă; pe baza analizei comparative, se poate concluziona că soluția de reglare cu RG-PID este superioară soluției de reglare cu RG-PI;
- soluțiile au fost testate și cu semnal de referință sinusoidal, dar ele nu aduc nimic nou pentru aprecierea performanțelor, fapt pentru care nu s-a insistat asupra prezentării acestora.

Capitolul al 7-lea este intitulat “*Concluzii. Contribuții aduse prin teză. Direcții ulterioare de cercetare*”. În cadrul capitolului sunt sintetizate principalele concluzii și contribuțiile aduse. Ele sunt distribuite în ambele părți ale tezei și au fost rezumate în capitolul 1 respectiv detaliate separat la finalul fiecărui capitol.

Principalele contribuții prezentate în **Partea I**, sunt sintetizate pe capitole după cum urmează:

Capitolul 2:

- analiza comparativă între principalele caracteristici ale motoarelor BLDC și DC;
- modelarea matematică a BLDC-m pentru cazul asocierii BLDC-m cu un inverter de frecvență controlată care asigură o viteză de rotație a rotorului aflată în sincronism cu frecvența inverterului; echivalarea d.p.d.v al MM de tip benchmark a celor două tipuri de mașini: DC-m și BLDC-m;
- realizarea sintezei cu privire la trei aplicații mecatronice moderne;
- prezentarea principalelor observații în ceea ce privește SAE cu parametri variabili.

Capitolul 3:

- prezentarea sistematică a unor noțiuni necesare abordării teoretice și dezvoltării soluțiilor de conducere;
- în vederea asigurării unei treceri fără șoc de pe un a.r.n. pe un altul s-a realizat o sintetizare a condițiilor de comutare;
- s-a făcut o sinteză asupra algoritmilor de reglare fuzzy și neuro-fuzzy de tip Takagi-Sugeno;
- s-a realizat o sinteză asupra soluțiilor de reglare cu structură variabilă;
- sintetizarea celor trei abordări de dezvoltare a algoritmilor de reglare 2DOF;
- prezentarea sistematică a celor trei metode bazate pe criteriul modulului.

Principalele contribuții prezentate în **Partea a II-a**, sunt sintetizate pe capitole după cum urmează:

Capitolul 4:

- elaborarea unui MM neliniar foarte detaliat pentru SAE-pv;
- având ca punct de plecare MM neliniar al SAE-pv, elaborarea unor MM liniarizate dedicate proiectării reguletoarelor (modele de tip benchmark);
- dezvoltarea și verificarea prin simulare a trei structuri de reguletoare (cu echivalent în a.r.n.) (RG-PI, RG-F-TS-cvasi-PI-IE și RG-HNF-TS-cvasi-PI-II) dedicate reglării vitezei SAE-pv; analiza comparativă a celor trei soluții de reglare dezvoltate;
- efectuarea unei analize de sensibilitate a soluțiilor la modificări parametrice (pe modelele liniarizate); studiul oferă o imagine asupra robusteții soluțiilor de reglare cu RG-PI (SRA-csd, soluția de bază);
- dezvoltarea și verificarea prin simulare a cinci a.r. (RG-PI, RG-F-TS-cvasi-PI-IE, RG-F-TS-cvasi-PI-II, RG-2DOF și RG-SV-PI de tip cvasireleu) dedicați reglării vitezei SAE-pv; algoritmi dezvoltati au fost încadrați în SRA-csd, soluția adaptivă; analiza comparativă a celor cinci soluții de reglare dezvoltate;
- dezvoltarea unui program Matlab/Simulink pentru determinarea coeficienților polinoamelor ce caracterizează RG-2DOF;
- dezvoltarea programelor de simulare pentru testarea soluțiilor de reglare propuse pentru SAE-pv.

Capitolul 5:

- elaborarea unui MM detaliat pentru servosistemul cu BLDC-m necesar simulării detaliate a comportării; elaborarea programelor Matlab-Simulink necesare pentru asigurarea funcționalității BLDC-m și elaborarea pe baza MM detaliat a schemelor bloc informaționale aferente SAE;
- dezvoltarea și verificarea prin simulare a unei soluții de SRA-csd cu reguletor convențional de viteză PI dedicată reglării vitezei SAE;
- dezvoltarea și verificarea prin simulare a unei soluții de SRA-csd cu reguletoare avansate de viteză fuzzy și neuro fuzzy cvasi-PI de tip Takagi-Sugeno – RG-F-TS-cvasi-PI-IE, RG-F-TS-cvasi-PI-II, RG-HNF-TS-cvasi-PI-IE și RG-HNF-TS-cvasi-PI-II – dedicate reglării vitezei SAE; analiza comparativă a soluțiilor de reglare dezvoltate;
- dezvoltarea și verificarea prin simulare a unei soluții de SRA-csd cu reguletoare avansate de viteză cu structură variabilă – RG-SV-PI-de tip cvasireleu și RG-PI-SV de tip releu ideal – dedicate reglării vitezei SAE; analiza comparativă a soluțiilor de reglare dezvoltate;
- dezvoltarea și verificarea prin simulare a unei soluții de SRA-csd cu reguletoare avansate de viteză cu două grade de libertate – RG-2DOF PID, RG-F-TS-2DOF, RG-SV-PI-2DOF și RG-PI-SV-2DOF – dedicate reglării vitezei SAE; analiza comparativă a soluțiilor de reglare dezvoltate.

Capitolul 6:

- deducerea și apoi calculul parametrilor procesului prin identificare experimentală;
- modelarea matematică a servosistemului M220IPE și interpretarea modelelor ca modele de tip benchmark;
- dezvoltarea și verificarea prin experimente cu scenarii concludente pentru aplicația principală a tezei a cinci structuri de reguletoare (cu echivalent în a.r.n.) (RG-PID, RG-

- 2DOF, RG-SV-PID de tip cvasireleu, RG-F-TS-PD+I și RG-F-TS-PD+I-2DOF) dedicate reglării poziției M220IPE; analiza comparativă a celor cinci soluții de reglare dezvoltate;
- construirea bazei de reguli și formularea concluziilor pentru algoritmi de reglare fuzzy de tip Takagi-Sugeno;
 - dezvoltarea și verificarea prin experimente a unor structuri de reglatoare (RG-PID), pentru nouă cazuri semnificative, dedicate reglării poziției M220IPE; analiza comparativă a studiilor de caz dezvoltate;
 - dezvoltarea și verificarea prin experimente a unor structuri de reglatoare (RG-PI, RG-PID), dedicate reglării M220IPE; analiza comparativă a celor două soluții de reglare dezvoltate;
 - dezvoltarea programelor pentru testarea soluțiilor de reglare propuse pentru M220IPE.

Perspective de cercetare:

Soluțiile de reglare automată dedicate reglării vitezei unor SAE care funcționează în condiții de variabilitate a intrărilor și parametrilor, respectiv a poziției (aplicații mecatronice) abordate în teză pot oferi în continuare subiecte de cercetare viitoare; dintre acestea sunt vizate următoarele:

- implementarea soluțiilor de reglare dezvoltate în cadrul tezei, pe echipamente în timp real;
- lărgirea gamei de aplicații ce funcționează în condiții similare;
- analize teoretice și aplicative legate de stabilitățile aplicațiilor cu reglatoare similare celor dezvoltate în cadrul tezei; tratarea aplicațiilor în condiții de restricții;
- adaptarea SAE cu motor BLDC la cazul $J_{tot}(t)$ variabil prin extensia structurii la situațiile dezvoltate în capitolele 3 și 4; utilizarea reglatoare adaptive pentru reglarea poziției servosistemului M220IPE;
- colaborarea cu furnizorul de echipament (M220IPE) prin care executivul de timp real să fie flexibilizat;
- dezvoltarea unor estimatoare pentru aplicațiile mecatronice abordate în capitolele 4, 5 și 6.