

**UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI**

**Facultatea de Inginerie Mecanică și Electrică**

**Departamentul de Automatică, Calculatoare, Inginerie Electrică și Energetică**

**Aplicarea metodelor Ingineriei Software pentru  
modelarea și simularea HIL a algoritmilor de  
control avansat cu aplicații în minerit**

**- Rezumat -**

**Doctorand:**

**Ing. BOGDANFFY Lorand**

**Conducător științific:**

**Prof.univ.dr.ing.mat. POP Emil**

**Petroșani**

**2017**

Această teză de doctorat se clasează în contextul actual al dezvoltării tehnicii, dezvoltare influențată puternic de curentul social și puterea economică a marilor actori de pe piață, cum ar fi industria mijloacelor de transport în general sau industria automobilelor de la vehicule personale la cele folosite în industrie.

Scopul principal este descoperirea și folosirea de tehnici și metode moderne pentru a obține rezultate și produse funcționale mai repede decât concurența, reducând numărul eșecurilor și reducând costurile totale (timp și bani) dedicate testării produselor și reproiectării acestora în cazul problemelor sau erorilor apărute în procesul de dezvoltare-producție.

Teza de doctorat are conținutul împărțit în șapte capitole:

1. Introducere
2. Utilizarea principiilor Ingineriei Software pentru Prototiparea Rapidă a Controlului Automat
3. Analiza stadiului actual al Modelării/Simulării în Controlul Automat
4. Contribuții privind Modelarea/Simularea Controlului Automat utilizând Platforma MATLAB-Simulink-dSPACE
5. Prototiparea controlului optimal la mașinile de ridicat și transportat
6. Simularea MIL-SIL-HIL a controlului avansat al instalației de extracție miniere
7. Concluzii, contribuții și propuneri

Pe lângă principalele capitole se regăsesc și secțiunea de Bibliografie și o secțiune de Anexe.

Primul capitol prezintă o introducere în problematica tezei de doctorat. Se prezintă motivația, obiectivele urmărite, o scurtă prezentare a capitolelor, lucrările publicate și principalele contribuții. Inovația principală este eficientizarea procesului de proiectare și testare cu ajutorul echipamentelor ce pot simula în timp real un proces complex, cu scopul eliminării nevoii de a aduce mașina (procesul tehnologic) fizic în laboratorul de testare. Procesul fizic este înlocuit de un proces simulat, bazat pe modele matematice corecte, această simulare fiind încărcată și executată pe un procesor, în timp real. Dispozitivul fizic proiectat ce urmează să comande funcționarea procesului este conectat la simulare prin intermediul unei interfețe I/O.

Software-ul a pătruns în toate domeniile, de la cele ingineresti, la tranzacții economice, știință, cultură, educație, divertisment, electronică de consum etc. Aceasta a lansat o serie de provocări: preîntâmpinarea cerințelor utilizatorilor, reducerea costurilor, îmbunătățirea calității. Producerea de software a devenit un proces continuu, an de an solicitările și nevoile de software de calitate devin tot mai mari.

Producerea de software este un proces în care sunt implicați trei actori: clienții, proiectanții și utilizatorii. Actorii umani implicați au ca obiectiv realizarea unui produs intelectual invizibil fizic, vizibil doar prin efectele lui asupra echipamentelor de calcul ce îl execută. Software-ul este o creație intelectuală colectivă, complexă și dificil de elaborat. Aceste motive, coroborate cu nevoia tot mai mare de software și de asigurare a unei calități măsurabile, au solicitat proceduri și tehnici ingineresti sub denumirea generică de Inginerie Software (Software Engineering). Ingineria Software stabilește o metodologie riguroasă de realizare a produselor software prin utilizarea principiilor temeinice ingineresti, pentru a obține software de cost scăzut, fiabil, cu funcționare eficientă. Ingineria Software utilizează tehnici, metode și principii de planificare, proiectare, dezvoltare și întreținere a software-ului pentru sistemele de calcul moderne.

Se consideră că procedurile Ingineriei Software sunt dintre cele mai elaborate, mai performante și documentate metode de cercetare, proiectare, testare și întreținere a unui produs nou creat. O situație asemănătoare există și în domeniile de proiectare puternic legate de conducerea prin software și unde din considerente obiective este nevoie în prealabil de modelare/simulare și prototipare. O situație de acest gen este în cazul elaborării controlului automat al mașinilor, instalațiilor și proceselor, unde controlerul cu software integrat (embedded) necesită modelare/simulare în prealabil împreună cu o parte hardware atașată, metodologie cunoscută sub denumirea „Hardware in the Loop” (HIL) și care este tot mai mult folosită. Această metodologie a adus cu sine utilizarea tehnicilor Ingineriei Software. Relativ la aceste noi metode de modelare/simulare, legate și de nevoia prototipării rapide a produsului proiectat, încă se impun clarificări.

Potrivit prezentei teze modelarea/simularea are trei aspecte: Model in the Loop (MIL), Software in the Loop (SIL) și Hardware in the Loop (HIL). Toate aceste faze sunt utilizate, astfel SIL spre exemplu, deși este caracteristică Ingineriei Software, se utilizează tot mai mult și în proiectarea controlului automat. MIL este folosită în multe domenii, iar în tehnologiile electromecanice și electronice se folosește platforma MATLAB-Simulink a firmei MathWorks. Simularea HIL a devenit frecvent utilizată în realizarea proiectelor de automotive, mai ales de când s-a atașat la Simulink interfața dSPACE folosind procesare în timp real.

Platforma pe care se realizează încercările din această lucrare, dSPACE, mai exact procesorul de semnale DS1104, are posibilitatea de a fi folosită cum dorește proiectantul aplicației de control, și anume:

- control direct, similar unui automat programabil sau microcontroler cu 20 de intrări sau ieșiri digitale, 4 canale ADC, 4 canale DAC pe 10 biți, două numărătoare, port serial.

- simularea unui proces și pentru verificarea funcționării corecte a unui controler proiectat pentru proces, oferind o gamă de date diverse controlerului pentru a observa comportamentul acestuia.

Cele de mai sus au reprezentat motivația principală a tezei de doctorat, concretizată prin: **Extinderea cercetărilor de aplicare a metodelor moderne de modelare, simulare, prototipare în domeniul Ingineriei Controlului Automat.** Pe de altă parte: **Aplicarea metodelor Ingineriei Software pentru Modelarea/Simularea MIL-SIL-HIL a algoritmilor de control avansat pentru controlul unor procese din minerit,** l-a constituit **obiectivul principal al cercetării,** desfășurată pe parcursul mai multor ani de cercetare.

Obiectivul principal este susținut de alte obiective atinse în teză, cum ar fi:

- Prezentarea stadiului actual al Prototipării Rapide și Modelării/Simulării HIL;
- Justificarea teoretică și prin aplicații a definiției conceptelor MIL, SIL, HIL;
- Realizarea platformei de modelare/simulare/prototipare MIL/SIL/HIL, având la bază aplicația MATLAB-Simulink-dSPACE, completată cu sistemul de acționare reglabil în buclă de viteză Schneider;
- Modelarea MIL/SIL/HIL pentru diverse aplicații din domeniul proceselor de extracție;
- Aplicații de Rapid Prototyping pentru două procese complexe din minerit: Mașina de extracție pe verticală și Instalația de evacuare a apelor din subteran.

**Capitolul 1,** este intitulat „*Introducere*” și prezintă structura, problematica tezei de doctorat, motivația lucrării, obiectivele urmărite, justificarea cercetării prin câteva lucrări semnificative publicate, contribuțiile principalele și o sinteză a capitolelor.

**Capitolul 2,** intitulat „*Utilizarea principiilor Ingineriei Software pentru Prototiparea rapidă a Controlului automat*”, prezintă un studiu complet asupra nivelului actual al cercetării și utilizării metodelor Ingineriei Software în realizarea de produse software cu posibilitățile de aplicare în domeniul Prototipării Rapide.

În acest capitol se pune accent pe etapele care stau la baza dezvoltării de software, o activitate complexă care necesită un mare efort intelectual, fiind puternic influențat de calitatea manoperei umane.

Producerea de software este un proces în care sunt implicați trei actori: clienții, proiectanții și utilizatorii. Software-ul este o creație intelectuală colectivă, complexă și dificil de stăpânit. Motivele amintite și nevoia tot mai mare de software și de asigurare a unei calități măsurabile a făcut ca încă din

1967 NATO să solicite producerea de software prin proceduri și tehnici ingineresti, introducând denumirea de Inginerie Software (Software Engineering).

Eliminarea completă a erorilor din software nu poate fi realizată. Similar ca în orice alt domeniu, nu se poate dovedi inexistența unui lucru. Prin testare se pot depista prezența erorilor, nu și absența lor. Concluzia este că printr-o realizare a unei proiectări eficiente, cresc șansele de a avea un minim de erori. „Orice încercare de a economisi timp în proiectare conduce la pierderi de timp de zece ori mai mari în timpul testării”. Producerea unui software are minim trei etape: **Proiectarea, Codarea și Testarea**. Toate cele de mai sus s-au dovedit prezente și în procedurile de proiectare și prototipare a sistemelor de control automat.

Beneficiind de un bogat material din literatura de specialitate, pe de o parte, și pe baza experienței proprii dobândită de-a lungul a circa 10 ani de activitate în domeniul programării și utilizării aplicațiilor software, pe de altă parte, am procedat la realizarea unei sinteze a domeniului orientată spre aplicarea în Ingineria controlului automat, care actual este subordonat aplicațiilor de software embedded. Această dominantă „software embedded” a adus cu sine un salt calitativ enorm în conducerea automată a mașinilor, instalațiilor și proceselor, dar și partea negativă legată de producerea și utilizarea software-ului, de limitele fizico-psihoice umane, generatoare și de erori. Precizez că principiile și metodele prezentate în acest capitol aparțin autorilor materialelor consultate [10], [12], [41], [50], etc. Contribuția personală se rezumă la sinteza domeniului și concepția integratoare: Inginerie Software, MIL/SIL/HIL, Prototipare Rapidă, Control automat, care se va dovedi în capitolele următoare deosebit de importantă în atingerea obiectivului general.

**Capitolul 3, „Analiza stadiului actual al Modelării/Simulării în Controlul automat”**, prezintă definiții, concepte, obiective și particularități ale procesului de modelare-proiectare. În momentul actual, Ingineria Sistemelor de Control este dominată de echipamente cu software integrat (embedded). Acestea au o parte software care controlează un proces, funcționând în buclă. În general cele două părți hardware și software sunt conectate între ele în buclă pentru a asigura funcționarea conform algoritmilor sistemului. Acest mod de lucru corespunde cel mai bine sistemelor tehnice actuale începând de la cele mai simple cum sunt stabilizatoarele și încheind cu mașinile complexe din gama autovehiculelor.

Tot în acest capitol se prezintă conceptele de proces, simulare, hardware, software, buclă, model, HIL, MIL, SIL.

În funcție de partea care se modelează avem cele trei situații astfel:

- **Model in the Loop (MIL)** dacă Procesul, Controlerul și Interfețele se modelează/simulează. Este cazul folosit în prima fază a proiectării.

- **Software in the Loop (SIL)** dacă Procesul și Controlerul cu Software-ul se modelează/simulează. Este cazul folosit în faza de proiectare și testare software.
- **Hardware in the Loop (HIL)** dacă Procesul și Interfețele se modelează/simulează. Este cazul folosit în faza de punere în funcțiune a sistemului de control. Trebuie precizat că SIL se modelează/simulează mai rar întrucât MIL și HIL acoperă și partea esențială de modelare (software-ul) a opțiunii SIL.

Principiul aplicării modelării/simulării în Ingineria Controlului Automat urmărește cele cinci etape din Ingineria Software: Cerințe, Proiectare, Codare, Testare, Livrare, adaptate la problemă. Etapele corespunzătoare pentru Ingineria Controlului vor fi:

- Analiza procesului controlat și determinarea cerințelor;
- Elaborarea Algoritmului de control și Schema logică, Proiectarea;
- Modelarea/Simularea MIL, Codarea;
- Modelarea/Simularea SIL-HIL și Testarea.

Sunt prezentate câteva aplicații ce se pot proiecta folosind principiile despre care s-a discutat: simularea MIL-SIL-HIL a comenzii bidirecționale a unui motor de inducție și simularea MIL/SIL/HIL a comenzii unei benzi transportoare de servire a unui robot.

**Capitolul 4, „Contribuții privind Modelarea/Simularea Controlului automat utilizând Platforma MATLAB-Simulink-dSPACE”**, prezintă principiile de prototipare rapidă utilizând MATLAB-Simulink-dSPACE, probleme generale privind mediul MATLAB-Simulink și structura mediului Simulink. Se prezintă la început metodele și principiile de utilizare a platformei MATLAB-Simulink pentru realizarea simulărilor de tip MIL. Se tratează apoi în detaliu extensia dSPACE pentru a se realiza simulări de tip SIL-HIL. Sinteza noțiunilor, modul de utilizare și aplicare sunt preluate după literatura de specialitate și documentația tehnică pusă la dispoziție de producător. Conceptele, principiile, metodele, datele tehnice și principalele scheme sunt prelucrate după cele ale firmei MathWorks. Principala contribuție o reprezintă combinarea metodelor de proiectare din Ingineria Software cu cele de Modelare/Simulare HIL pentru a realiza Modelarea/Simularea în scopul Prototipării Rapide în Ingineria Controlului Automat.

În acest capitol partea hardware și software a sistemului complet este prezentată în detaliu. Se presupune că MATLAB, Simulink, Real-Time Workshop și Real-Time Interface (RTI) pentru DS1104 R&D Controller Board au fost instalate corect. Pentru a porni aplicația este necesar ca licențele să fie disponibile și activate. La prima rulare a aplicației ControlDesk este necesară specificarea modelului de Controller Board (DS1104) ca platformă de lucru.

După detalierea funcționării platformei, sunt prezentate câteva aplicații implementate cu ajutorul acesteia, cum ar fi: simularea HIL a controlului unei acționări cu tahogramă trapezoidală, simularea HIL a conducerii unei acționări cu tahogramă parabolică, simularea HIL a controlului unui agregat de evacuare a apei din subteran.

**Capitolul 5, „Prototiparea controlului optimal la mașinile de ridicat și transportat”,** prezintă principiile de control optimal cu metode de optimizare staționară și dinamică. Acest capitol este în mare parte original și tratează principiile și metodele de optimizare staționară și dinamică cu exemple concrete. În prima parte a capitolului se realizează prezentarea principiilor și metodelor de optimizare, stabilind condițiile de existență și clasele de relații aplicabile pentru optimizarea staționară și dinamică. Există o mare varietate de metode de optimizare staționară, dintre care două sunt cel mai folosite și anume: multiplicatorii lui Lagrange și gradientul. Prelucrarea s-a făcut pe baza materialelor existente în literatura de specialitate, însă aplicațiile, modelarea, simularea și rezultatele sunt originale. În finalul capitolului se prezintă aplicații de prototipare a controlului optimal pentru mișcarea unui elevator cu contragreutate, a unui robot și a unei instalații de tractare.

**Capitolul 6, „Simularea MIL-SIL-HIL a controlului avansat al instalației de extracție miniere”,** prezintă o analiză detaliată a instalațiilor de extracție din subteran, începând cu cerințele de control, continuând cu modelul matematic, tahograma de funcționare liniară, simulări ale funcționării dinamice pentru un set de parametri de intrare. Instalațiile de extracție miniere sunt complexe tehnico-tehnologice care asigură încărcarea și transportul substanțelor minerale utile (cărbune, minereu) pe verticală până în punctele de depozitare. Mașinile de extracție sunt cele care asigură legătura între suprafață și subteran, atât pentru transportul mineralelor, cât și a personalului în condiții de siguranță și securitate a muncii. Funcționarea instalațiilor de extracție trebuie să elimine erorile umane, lucru ce se poate realiza doar prin control automat și algoritmi avansați, cum ar fi cei optimali.

Din punctul de vedere al controlului avansat al instalației de extracție miniere problema esențială o reprezintă realizarea automată a diagramei de viteză a motorului de acționare (a tahogramei) în condițiile îndeplinirii unor criterii de optim-adaptiv și asigurarea tuturor condițiilor cerute de procesul tehnologic de extracție. După o prezentare a controlului adaptiv, se trece la simularea MIL în MATLAB-Simulink. În continuare se aplică metoda de simulare SIL pentru a verifica software-ul de control al instalației de extracție. O asemenea problemă a fost tratată și în alte lucrări [31], [32], [43] utilizând limbajul de programare Assembler pentru implementarea pe un PC sau HDL pentru implementarea cu VLSI. În cele din urmă se realizează o proiectare și testare HIL prin conectarea elementelor sistemului, partea de proces simulată și partea hardware (PLC și invertor, motor, encoder).

**Capitolul 7** intitulat „**Concluzii, contribuții și propuneri**” prezintă o listă succintă cu principalele rezultate ale cercetării. Sunt enumerate și propuneri viitoare de continuare și dezvoltare a acestei cercetări. **Câteva concluzii sunt:**

- Calitatea măsurabilă a software-ului este asigurată prin proceduri bine organizate de testare. Numai testarea garantează că produsul realizat este conform cu cerințele clientului și că este gata de livrare pentru a fi introdus în practică.
- Erorile se pot datora: Cerințelor insuficient specificate și implementate, proiectării neriguroase, codării cu erori etc.
- Testarea software este unul dintre cele mai riguroase proceduri de găsim a erorilor utilizând: metode de teste, cazuri de test, date de test, metode de evaluare a rezultatelor testelor și metode de eliminare a erorilor (depanare).
- Indiferent de tipul simulării, procesul, în general, nu poate fi adus în laborator pe platforma de modelare-simulare și trebuie simulat folosind relații matematice.
- Proiectarea unui software pentru a controla un sistem, poate fi simulat pe o platformă de simulare adecvată și care conectat la interfețele reale ale procesului simulat ne va oferi rezultate importante privind funcționarea și eventualele corecții necesare. Aceasta este metoda de Modelare/Simulare SIL.
- Testarea funcționării corecte a unui echipament hardware real, se poate face pe un model care să controleze echipamentul HW, se implementează modelul procesului pe o platformă de simulare care se conectează la echipament. Rulăm modelul (simularea) mixt HW+SW și obținem datele care se vor analiza ulterior. Aceasta este Modelarea/Simularea HIL.

**Contribuțiile principale:**

- Adaptarea/configurarea platformei de testare: software-ul Simulink, placa dSpace DS1142, elemente de conectare cu lumea reală: informaționale (traductor de viteză de tip Taho și encoder), invertor de tensiune și frecvență, motor de acționare, surse, aparate de măsură și echipamente de protecție.
- S-a realizat o analiză aprofundată privind metodele Ingineriei Software și sinteza multitudinii metodelor de testare, cu stabilirea locului și rolului acestor metode asupra creșterii calității și siguranței produsului software din domeniul controlului automat.
- S-a definit conceptul RP prin MIL/SIL/HIL care constituie principiul de realizare a aplicațiilor de control automat din teză.
- S-a utilizat MIL/SIL/HIL pentru prototiparea mai multor aplicații din domeniul conducerii acționărilor electrice și a proceselor de extracție, ca de exemplu: Comanda bidirecțională a unui



motor de inducție; Comanda în suveică a unui transportor cu bandă pentru deservirea unui robot. Pentru fiecare aplicație se parcurg cele patru etape rezultate din adaptarea principiilor Ingineriei Software.

- S-au realizat aplicațiile RP pentru 2 procese complexe din minerit: Mașina de extracție și Instalația de evacuare a apelor din subteran.
- Rezultatele prezentate au făcut obiectul unor lucrări științifice publicate în străinătate, la simpozioane și conferințe de prestigiu unele cotate ISI, ca de exemplu WSEAS Kuala-Lumpur (Malayesia) și Ischia (Italia).

#### **Propuneri de utilizare a rezultatelor:**

- Cercetările realizate în cadrul prezentei tezei, pot constitui un punct de sprijin în vederea realizării unor aplicații RP de control automat, pe de o parte, precum și un punct de plecare pentru dezvoltarea viitoare a cercetării în acest domeniu. Dezvoltarea în continuare a acestei metode este susținută de faptul că actual reprezintă cea mai utilizată tehnică folosită cu succes în multe laboratoare de cercetare străine, dominând domeniul industriei automobiliste.
- Utilizând experiența din această teză se pot concepe și realiza alte variante de platforme MIL/SIL/HIL și pentru alte domenii. Chiar dacă la noi metoda este puțin folosită în viitor se prevede o largă utilizare impusă de nevoia prototipării rapide a sistemelor de control cu software embedded.
- Modelele matematice ale aplicațiilor de control adaptiv și optimal și a relațiilor stabilite au un caracter general, ceea ce le conferă o mare generalitate de aplicare dacă problemele analizate se încadrează în aceste categorii.
- Lucrarea poate constitui o bază de plecare pentru publicarea altor lucrări sau a unei monografii în acest domeniu. Există deja o solicitare din partea editurii „Lambert Academic Publishing-Germania” de publicare a unei monografii pe tema Simulării Controlului optimal.