



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI,
PROTECȚIEI SOCIALE ȘI
PERSOANELOR VÂRSTNICE
AMPOSDRU



Fondul Social European
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
NAȚIONALE

OIPOSDRU



Universitatea
„Lucian Blaga”
din Sibiu

Investește în oameni!

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Axa prioritară 1 „Educație și formare profesională în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere”

Domeniul major de intervenție 1.5. „Programe doctorale și post-doctorale în sprijinul cercetării”

Titlul proiectului: „Armonizarea valențelor academice românești cu cele ale Comunității Europene”

Cod contract: POSDRU/CPP107/DMI1.5/S/76851

Beneficiar: Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu

Ing. Lucian Eugen ROȘCA

TEZĂ DE DOCTORAT

– REZUMAT –

PLATFORMA COLABORATIVĂ DE ANALIZĂ PARAMETRICĂ A SISTEMELOR MECATRONICE ÎN INDUSTRIA AUTOMOTIVE

Conducător științific:

Prof.univ. dr. ing. Ioan BONDREA

CUPRINS

ABSTRACT	11
Capitolul 1. Introducere	19
1.1. Aspecte generale.....	19
1.2. Obiectivele cercetării.....	20
1.3. Structura și conținutul tezei de doctorat	21
1.4. Metodologia și etapele cercetării.....	24
Capitolul 2. Modele de proiectare și dezvoltare a sistemelor mecatronice. Stadiul actual .	29
2.1. Introducere.....	29
2.2. Sisteme mecatronice curente și aflate în dezvoltare în industria automotive.....	33
2.3. Modele de proiectare a sistemelor mecatronice	36
2.3.1. Modelul Secvențial.....	36
2.3.2. Modelul – VDI 2206	38
2.3.3. Modelul R.F.L.P (requirements / functions/ logical/ physical)	41
2.3.4. Modelul ierarhic	42
2.4. Evaluarea diferitelor modele de proiectare în funcție de nivelul de comunicare inter-disciplinar	45
2.5. Sistemul electronic de frânare și funcțiile de control ABS și ESP.....	46
2.6. Analiza toleranțelor cu ajutorul metodei probabilistice de tip Monte-Carlo.....	50
2.7. Arhitectura sistemului electronic de frânare.....	53
2.7.1. Identificarea secțiunilor sistemului.....	53
2.7.2. Prezentarea arhitecturii mecanice și hidraulice	55
2.7.3. Unitatea electronică de control (ECU)	61
2.8. Descrierea funcției (ABS) anti-locking-brake-system și logica de control.....	62
2.9. Concluzii.....	63
Capitolul 3. Platforma colaborativă de analiză parametrică - propunere.....	65
3.1. Model general de dezvoltare	65
3.2. Platforma colaborativă – analiza parametrică pentru etapa de design conceptual la nivelul de definire a funcțiilor	69
3.3. Platforma colaborativă – analiza parametrică pentru etapa de integrare validare și testare la nivelul funcțiilor sistemului.....	71
3.4. Platforma colaborativă – analiza parametrică pentru etapa de proiectare detaliată	73
3.5. Concluzii.....	74

Capitolul 4. Contribuții privind proiectarea conceptuală la nivelul funcțiilor sistemului...	77
4.1. Achiziția de date, procesarea și analiza statistică	77
4.2. Instalarea echipamentelor tehnice și achiziția de date.....	78
4.3. Datele colectate, implementarea procesării și analizei acestora.....	80
4.3.1. Date tehnice generale	80
4.3.2. Implementarea algoritmilor de analiză	82
4.4. Rezultatele analizei și interpretarea histogramelor 2D.....	83
4.4.1. Analiza ciclurilor de funcționare a vehiculelor aflate în observație.....	83
4.4.2. Analiza regimului de viteză în exploatarea vehiculelor	84
4.4.3. Analiza distanțelor parcurse în timpul monitorizării:.....	85
4.4.4. Histograma de accelerație și decelerație longitudinală	86
4.4.5. Analiza generală a manevrelor de frânare	88
4.5. Rezultatele analizei și interpretarea histogramelor 3D.....	91
4.5.1. Histograma frânărilor în funcție de viteza inițială și durata acestora.....	91
4.5.2. Analiza frânărilor în funcție de presiune și durată	92
4.6. Analiza detaliată asupra funcției de recuperării energiei de frânare	92
4.7. Concluzii.....	100
Capitolul 5. Contribuții privind etapa de integrare validare și testare la nivelul funcțiilor sistemului.....	103
5.1. Introducere.....	103
5.2. Analiza toleranțelor folosind modelarea și simularea	105
5.2.1. Descrierea toleranțelor sistemului și a gradelor de libertate	106
5.2.2. Toleranțele componentelor mecanice și hidraulice	107
5.2.3. Toleranțe ale componentelor electrice și electronice.	110
5.2.4. Toleranțele bobinelor de acționare a valvelor electro-mecanice.....	110
5.2.5. Toleranțele componentelor electronice	111
5.3. Modelul matematic al sistemului de frânare	118
5.4. Descrierea pașilor evaluării	119
5.4.1. Definierea tipurilor de simulări	119
5.4.2. Simularea de tip static pentru valori fixe ale toleranțelor sistemului	120
5.4.3. Simularea de tip probabilistic folosind metoda Monte-Carlo	121
5.5. Rezultatele simulării	123
5.5.1. Prezentarea rezultatelor simulărilor cu parametri fixați	123
5.5.2. Prezentarea rezultatelor pentru simulările cu parametri generați aleator	124
5.6. Concluzii.....	130
Capitolul 6. Contribuții privind proiectarea detaliată la nivelul componentelor	131
6.1. Introducere.....	131

6.2. Aplicații ale motoarelor electrice folosite în industria auto	132
6.3. Modelarea și simularea motorului electric cu magneți permanenți.....	134
6.3.1. Elementele constructive ale motorul de curent continuu cu magneți permanenți. 134	
6.3.2. Modelul matematic al motorului de curent continuu	136
6.3.3. Rezultatele obținute cu ajutorul simulării folosind Matlab - Simulink	139
6.4. Simularea numerică folosind metoda elementelor finite.....	141
6.4.1. Proiectarea CAD a motorului electric	142
6.4.2. Analiza 2D cu element finit folosind programul de simulare Comsol – Multiphysics	143
6.4.3. Proprietățile de material	146
6.4.4. Discretizarea secțiunii în elemente finite	150
6.5. Rezultatele simulării în element finit	153
6.5.1. Identificarea liniilor de flux magnetic prin secțiunea motorului	153
6.5.2. Identificarea densității de flux magnetic prin secțiunea motorului.	154
6.5.3. Identificarea oscilațiilor cuplului datorate comutației.....	155
6.6. Concluzii.....	157
Capitolul 7. Concluzii, contribuții proprii și noi direcții de cercetare	159
7.1. Concluzii finale	159
7.2. Contribuții proprii.....	161
7.3. Direcții de cercetare viitoare	162
7.4. Lucrări publicate și participări la conferințe.....	163
BIBLIOGRAFIE	164
ANEXE.....	175
ANEXA 1 Implementarea MATLAB a algoritmului de simulare pentru analiza statistică de date	175
ANEXA 2 Implementarea MATLAB a algoritmului de simulare pentru analiza toleranțelor.....	189
ANEXA 3 Implementarea MATLAB-Simulink a modelului motorului de curent continuu cu magneți permanenți	204

Introducere

Proiectarea și dezvoltarea sistemelor mecatronice integrează diferite domenii ale ingineriei cum ar fi: mecanică, electrică, electronică, automatizări și control software. Numărul mare de domenii ale ingineriei implicate în dezvoltarea unui singur produs, aduce în prim plan problema organizării și a colaborării inter-disciplinare în diferite etape ale dezvoltării. Metodele de proiectare și dezvoltare colaborativă devin tot mai importante în vederea obținerii unor timpi mai mici alocăți obținerii prototipului final, pregătit pentru producție. Pentru a permite efecte de sinergie suplimentare între domeniile de inginerie ce contribuie la dezvoltarea unui sistem mecatronic, inginerii din toate disciplinele implicate în dezvoltare, vor trebui să adopte noi metodologii de lucru care să faciliteze colaborarea inter-disciplinară într-o manieră integrată.

Prezenta lucrare intitulată „**PLATFORMA COLABORATIVĂ DE ANALIZĂ PARAMETRICĂ A SISTEMELOR MECATRONICE ÎN INDUSTRIA AUTOMOTIVE**” abordează subiectul dezvoltării unui produs mecatronic complex unde orice schimbare a unui parametru aparținând unei componente poate influența performanța întregului sistem.

Cuvântul „platformă” se referă aici la o structură de lucru bazată pe principalele etape de proiectare și dezvoltare: proiectare conceptuală la nivel de sistem, proiectare detaliată la nivel de componentă, integrare, verificare și testare. Caracterul colaborativ al acestei platforme reprezintă centralizarea parametrilor diferitelor componente a unui sistem mecatronic și folosirea lor în etapele dezvoltării. În urma proiectării la diferite nivele ale dezvoltării (sistem, subsistem, componentă), se definesc constrângeri de proiectare care sunt mai apoi evaluate pentru a putea fi validate sau modificate după caz.

Cercetările prezentate în această lucrare aduc contribuții la dezvoltarea modelelor de proiectare cu caracter colaborativ inter-disciplinar atât pentru ciclul de dezvoltare la nivel macro cât și micro. Platforma colaborativă introduce un mod mai eficient de lucru utilizând ca proces un model axat pe centralizarea informațiilor referitoare la parametri sistemului mecatronic. Scopul platformei este de a facilita utilizarea unor informații prin o mai bună coordonare care să ușureze identificarea deciziilor optime. Necesitatea acestor cercetări provine din nevoia de creștere a productivității prin micșorarea numărului de cicluri de dezvoltare macro și obținerea unor timpi mai mici pentru procesul de proiectare și dezvoltare. Totodată acestea contribuie și la ușurare muncii inginerilor prin introducerea unor bune practici în activitatea de proiectare și dezvoltare.

Obiectivele cercetării

Pornind de la analiza stadiului actual al tehnologiilor și instrumentelor software folosite în proiectarea și dezvoltarea sistemelor mecatronice, se desprind următoarele obiective ale acestei teze de doctorat:

Obiectivul principal este concepția, dezvoltarea și implementarea unei *platforme colaborative de analiză parametrică* care înglobează tehnici noi de dezvoltare în procesul de proiectare și dezvoltare a sistemelor mecatronice.

Obiectivele specifice:

- 1) Studiu asupra modelelor de dezvoltare în domeniul proiectare a sistemelor mecatronice precum și a nivelului actual al dezvoltărilor teoretice existente în dezvoltarea unor *platformelor colaborative de proiectare și dezvoltare*.
- 2) Studiu asupra sistemelor mecatronice adoptate la ora actuală în industria automotive și stadiul actual asupra sistemele aflate în dezvoltare și totodată în proces de adoptare.
- 3) Cercetări teoretice privind platforma colaborativă de analiză parametrică care are ca obiectiv principal contribuții în creșterea caracterului colaborativ inter-disciplinar atât pentru ciclul de dezvoltare la nivel macro cât și micro.
- 4) Cercetări privind ***proiectarea conceptuală la nivelul de definire a funcțiilor sistemului*** în cadrul platformei de analiză parametrică propuse.
 - a) Cercetări privind sistemul electronic de frânare al autovehiculelor de pasageri, prin implementarea unui sistem de achiziție de date pentru înregistrarea semnalelor măsurate de senzorii autovehiculelor aflate sub observație.
 - b) Implementarea unor algoritmi de procesare a datelor achiziționate folosind mediul de programare MATLAB, pentru o analiză de tip statistic pentru obținere de informații cu caracter cert asupra modului de operare și a condițiilor reale de exploatare.
 - c) Cercetări privind funcția *de recuperare a energiei de frânare* unde se efectuează *analiza parametrică și definirea constrângerilor*.
- 5) Cercetări ***privind etapa de integrare, validare și testare la nivelul funcțiilor sistemului*** în cadrul platformei de analiză parametrică propuse.
 - a) Analiza detaliată a sistemului electronic de frânare (componente mecanice, hidraulice și electrice/electronice) precum și analiza funcției ABS (Anti-lock Braking System) din punctul de vedere al logicii de control și al arhitecturii mecanice și hidraulice.
 - b) Modelarea sistemului electronic de frânare și a funcției de ABS
 - c) Evaluarea impactului toleranțelor datorate producției în serie pentru componentele care compun sistemul de frânare, precum și analiza influenței parametrilor externi din timpul exploatării. Validarea toleranțelor sistemului prin analiza acestora se face folosind modelul sistemului de frânare și tehnica de simulare Monte-Carlo.
- 6) Cercetări ***privind etapa de proiectare detaliată*** în cadrul platformei de analiză parametrică propuse.
 - a) Pentru dezvoltarea la nivel micro (a unei componente) se stabilește ca obiectiv analiza cercetărilor actuale în domeniul modelării CAD și simulării folosind metoda elementului finit pentru motoare electrice.
 - b) Proiectarea CAD folosind mediul de proiectare CATIA a unui motor electric de curent continuu parte componentă a sistemului de frânare și element de acționare a pompei hidraulice a acestuia.
 - c) Folosirea geometriei CAD pentru simulare numerică utilizând metoda elementelor finite și programul software COMSOL-Multiphysics, pentru analiza constrângerilor de proiectare definite în etapele anterioare din cadrul platformei colaborative se analiză parametrică
- 7) Formularea concluziilor referitoare la colaborarea inter-disciplinară prin intermediul *platformei colaborative de analiză parametrică*, în etapele de dezvoltare a sistemelor mecatronice, pentru diferite cicluri ale procesului de dezvoltare: ciclul general de dezvoltare la nivel macro, macro-cicluri în funcție de gradul de maturitate și module de proces specifice cu caracter recurent în etape de rezolvare a problemelor la nivel micro

Structura și conținutul tezei de doctorat

Lucrarea cuprinde 7 capitole, prezentate în 173 de pagini fără anexe (207 pagini cu anexe), 163 pagini fără bibliografie, 108 referințe bibliografice.

În **Capitolul 1, „Introducere”**, sunt prezentate aspecte generale legate de studiul propus în această teză de doctorat. În prima parte este descrisă și justificată tematica, pornindu-se de la ideea de creștere a productivității și de ușurare a muncii inginerilor din industria producătoare de autovehicule. Este definit, în continuare, obiectivul principal al tezei: concepția, dezvoltarea și implementarea unei platforme colaborative de analiză parametrică care înglobează tehnici noi de dezvoltare în procesul de proiectare și dezvoltare a sistemelor mecatronice, adaptate pentru industria automotive, în special pentru sistemele mecatronice complexe. Sunt definite astfel 7 obiective specifice.

În **Capitolul 2, denumit „Modele de proiectare și dezvoltarea a sistemelor mecatronice. Stadiul actual”**, se prezintă sintetic aspecte privind particularitățile modelelor de proiectare a sistemelor mecatronice. Totodată, se identifică tipurile de sisteme mecatronice adoptate în industria autovehiculelor și stadiul de implementare pentru a așa numitele sisteme „*by-wire*”. Se evidențiază în acest capitol pe deoparte tendința de creștere a complexității pentru majoritatea sistemelor mecatronice în industria automotive iar pe de altă parte necesitatea dezvoltării de cercetări privind elaborarea unor modele structurate de dezvoltare a sistemelor mecatronice cu scopul depășirii limitelor de flexibilitate atinse de metodele actuale. În finalul acestui capitol, sunt delimitate problematicile actuale necesar a fi rezolvate de această cercetare.

În **Capitolul 3, intitulat „Propunerea pentru platforma colaborativă de analiză parametrică a sistemelor mecatronice din industria automotive”** – este propus un model îmbunătățit de dezvoltare pentru sisteme mecatronice. Prin comparație cu modelul standard VDI-2206, modelul propus specifică prezența activității de simulare și analiză parametrică la nivelul de definire conceptuală a funcțiilor sistemului atât pentru etapa de proiectare conceptuală cât și pentru etapa de integrare și verificare. Prin acest model se urmărește definirea unei platforme de proiectare specific domeniului de dezvoltare a sistemelor mecatronice în industria automotive care are scopul de a crește a caracterului colaborativ adică a comunicării între diferitele domenii ale ingineriei la nivel macro și micro al dezvoltării, prin definirea constrângerilor de proiectare pe baza diferitelor analize pentru parametrii (interni și externi), într-un mod coordonat și cu propagare bidirecțională între nivele de dezvoltare.

În **Capitolul 4, al acestei teze de doctorat intitulat „Contribuții privind proiectarea conceptuală la nivelul de definire a funcțiilor sistemului mecatronic”** este selectată ca studiu de caz funcția de recuperare a energiei de frânare a sistemului electronic de frânare pentru autovehiculele de pasageri. Cercetările privind analiza parametrilor de exploatare pentru sistemul electronic de frânare au loc prin implementarea unui sistem de achiziție de date pentru înregistrarea semnalelor măsurate de senzorii autovehiculelor. Post-procesarea datelor este realizată prin implementarea unui algoritm de analiză statistică folosind mediul de programare MATLAB iar rezultatele generate sunt sintetizate prin obținerea unor histograme și diagrame cu caracter cert asupra ciclurilor de operare și a condițiilor reale de exploatare ale autovehiculelor.

Înainte de începerea etapei de proiectare detaliată la acest nivel al dezvoltării se stabilesc constrângeri specifice în relație directă cu parametri externi de exploatare în mediu real. Acest studiu de analiză a parametrilor de exploatare determină definirea constrângerilor pentru următoarele etape de dezvoltare cum ar fi: limitele minime și maxime în care trebuie să se încadreze sistemul pentru ca funcțiile propuse să aibă eficiență maximă; estimarea frecvenței de activare a unei anumite funcții (impactul asupra sistemului) estimarea nivelului de uzură; definire parametrilor de testare.

În cazul funcției de recuperare a energiei de frânare, în cadrul acestor cercetări este demonstrat modul în care pe baza analizelor parametrilor de exploatare sunt identificate constrângerile specifice (intervalul de viteză și nivelul de decelerație) pentru care sistemul trebuie să fie dimensionat, astfel încât recuperarea energiei să fie cât mai eficientă.

În **Capitolul 5**, denumit „**Contribuții privind etapa de integrare, validare și testare la nivelul funcțiilor sistemului**” în cadrul platformei colaborative propuse este exemplificată validarea sistemului de frânare pentru funcția de ABS (Anti-locking Brake System) din punctul de vedere al asigurării calității. Sunt prezentate pentru început arhitectura sistemului de frânare și descrierea funcției ABS. În continuare crearea modelului matematic al sistemului pornește de la identificarea secțiunilor acestuia (mecanic, hidraulic, electronic și de control) unde toleranțele fiecărei componente în parte sunt prezentate iar valorile acestora stabilite ca parametri de intrare ai modelului. Sunt stabiliți mai apoi pașii evaluării astfel că două tipuri de analiză sunt alese, una pentru valorile nominale ale parametrilor (conform cu designul) și a doua prin simulare folosind metoda Monte-Carlo (parametrii de intrare aleși aleator). Rezultate simulării prezintă influența toleranțelor datorată producției de serie asupra performanțelor sistemului pentru un eșantion fixat de unități produse în serie. Cercetările din acest capitol au rolul de a exemplifica punctual tehnicile prin care validarea funcției unui sistem mecatronic poate fi efectuată pentru etapa de integrare folosind tehnica simulării și constrângerile definite în etapele anterioare de dezvoltare.

În **Capitolul 6**, intitulat „**Contribuții privind proiectarea detaliată la nivelul componentelor sistemului mecatronic**” se referă la folosirea constrângerilor definite în nivelele anterioare de proiectare, cu scopul de a fi validate sau modificate prin efectuarea mai multor cicluri de analiză prin simulare la nivel micro. În cazul etapei de proiectare detaliată la nivelul de dezvoltare a componentelor, activitatea de simulare specifică domeniului ingineriei este parte integrată a procesului de implementare. Platforma colaborativă plasează activitatea de simulare direct corelată cu folosirea constrângerilor specifice ca date de intrare pentru simulare.

În acest capitol proiectarea detaliată este abordată pentru una din componentele principale de acționare a sistemului de frânare și anume motorul electric de curent continuu care acționează pompa hidraulică. În prima parte a acestui capitol este prezentat modelul matematic pentru obținerea caracteristicilor dinamice, unde implementarea se face folosind mediul de simulare MATLAB – Simulink. De asemenea se prezintă proiectarea CAD 3D a acestuia, elementele constructive și tipurile de material. Simularea cu element finit se realizează folosind platforma mediul de simulare COMSOL–Multiphysics și a geometriei CAD 2D al motorului. Rezultatele obținute în acest capitol evidențiază efectul temperaturii asupra cuplului dezvoltat de motor în condițiile în care variația acestuia poate influența major performanțele întregului sistem de frânare.

În **Capitolul 7**, denumit „**Concluzii, contribuții personale și direcții noi de cercetare**” sunt prezentate concluziile finale, contribuțiile originale proprii, prezentarea rezultatelor științifice obținute în urma studiului (lista de lucrări publicate), precum și direcțiile viitoare de cercetare. Prezenta teză de doctorat, prin studiile și cercetările efectuate, propune o îmbunătățire a modelului standard VDI-2206 de dezvoltare a sistemelor mecatronice prin modelul de platformă colaborativă de analiză parametrică care extinde activitatea de simulare și analiză și pentru nivelul de definire a funcțiilor sistemului atât în etapa de proiectare conceptuală cât și pentru etapa de integrare verificare și testare.

Metodologia și etapele cercetării

Pornind de la obiectivele propuse precum și de la analiza critică asupra realizărilor teoretice și experimentale în domeniul modelelor de dezvoltare sistemelor mecatronice, s-a efectuat o clasificare a acestora în funcție de nivelul de colaborarea inter-disciplinară în atât la nivel micro cât și la nivel macro folosind trei criterii principale: proiectarea paralelă, colaborarea la nivel macro și colaborarea la nivel micro. Totodată din studiile efectuate se evidențiază că într-un proces de dezvoltare, modelarea și simularea au un rol important fiind parte integrantă a procesului de dezvoltare. Proiectarea, modelarea și simularea, asistată de calculator (software specializat) s-au dezvoltat ca răspuns la necesitatea de eficientiza a procesul de dezvoltare a unui produs, mai ales a celor complexe. Prin simulare se poate studia comportamentul diferitelor tipuri de sisteme, cu scopul luării unor decizii privind îmbunătățirea lor viitoare. Proiectarea, modelarea și simularea sistemelor cu ajutorul unui software dedicat scurtează durata de obținere a soluțiilor optime, permite analiza unui număr mare de variante posibile prin modificarea parametrilor modelului și are avantajul revenirii cu ușurință la varianta cu rezultatul cel mai apropiat de cerințele tehnice. În cadrul dezvoltării sistemelor mecatronice simularea este prezentă pentru toate domenii implicate în dezvoltare (fig. 1.1): elemente mecanice și crearea modelelor cinematice, modele pentru acționări hidraulice, modelarea sistemului electric, modelarea și simularea logicii de control.

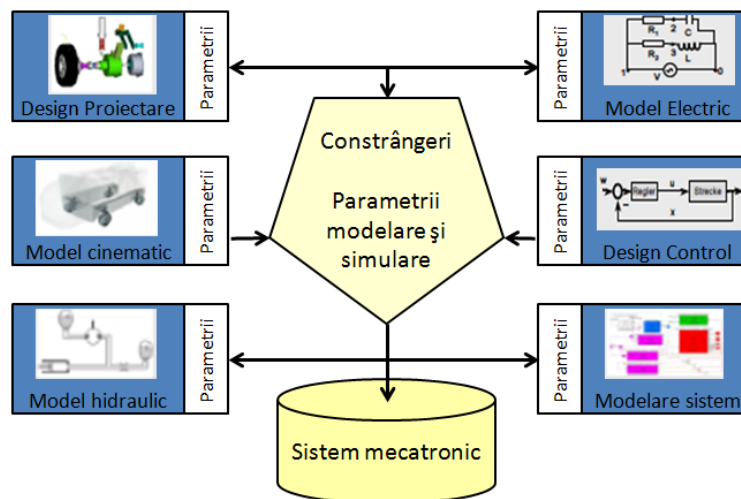


Figura 0.1 Simularea pentru diferite domenii ale ingineriei

Pe baza concluziilor stadiului actual este propus un **model de platformă colaborativă de analiză parametrică** pentru dezvoltarea sistemelor mecatronice care să vină în sprijinul creșterii eficienței la nivelul de dezvoltare prin micșorarea timpilor necesari proiectării, unde tendința actuală este una de creștere a complexității datorită numărului mare de componente legate într-o arhitectură complexă pentru majoritatea sistemelor aflate în dezvoltare în industria autoimove.

În cadrul platformei colaborative cercetările privind **analiza parametrilor de exploatare pentru sistemul electronic de frânare** au loc prin implementarea unui sistem de achiziție de date pentru înregistrarea semnalelor măsurate de senzorii autovehiculelor. Post-procesarea datelor este realizată prin implementarea unui algoritm de analiză statistică folosind mediul de programare MATLAB iar rezultatele generate sunt sintetizate prin obținerea unor histograme și diagrame cu caracter cert asupra ciclurilor de operare și a condițiilor reale de exploatare ale autovehiculelor.

Tematica asigurării calității în producția de serie este abordată pentru etapa de validare și testare la nivelul funcțiilor sistemului. Sistemul electronic de frânare cuprinde un număr mare de componente legate într-o arhitectură complexă, iar pentru analiza impactului toleranțelor acestora asupra performanțelor sistemului s-a adoptat implementarea simulării de tip Monte-Carlo. Totodată în acest studiu sunt analizați și factorii perturbatori externi întâlniți în exploatare. Simularea folosind tehnica Monte-Carlo este o metodă de evaluare iterativă a modelelor care folosesc ca intrări seturi de numere aleatoare. Această metodă este implementată pentru funcția de frânare de tip ABS care implică o serie de parametri variabili, în principal toleranțe ale părților mecanice, electronice și hidraulice. Pașii implementării sunt:

- Modelarea sistemului de frânare și simularea funcției de ABS pornind de la caracteristica de acționare a valvei de ABS curent vs. presiune.
- Stabilirea parametrilor de intrare prin stabilirea distribuțiilor probabilistice ale toleranțelor pentru fiecare componentă
- Stabilirea parametrilor externi prin preluarea distribuțiilor probabilistice ale toleranțelor pentru temperatură și tensiune, consum
- Simularea diferitelor condiții posibile atât legate de producție cât și de exploatare

Rezultatele cercetării sunt relevante în activitatea de control al calității la nivelul funcțiilor sistemului determinând impactul toleranțelor asupra performanțelor sistemului și pe de altă parte oferă posibilitatea efectuării unor optimizări ulterioare. Modificarea toleranțelor poate fi făcută pe baza acestor cercetări unde este determinată valoarea maximă a deviațiilor ce poate fi acceptate pentru anumite componente fără se aduce un compromis asupra performanțelor sistemului.

Tematica proiectării detaliate la nivelul componentelor sistemului este abordată pentru una din componentele principale de acționare a sistemului de frânare și anume motorul electric de curent continuu care acționează pompa hidraulică. Folosirea metodei de analiză folosind metoda elementului finit este adoptată, pentru dezvoltarea unei componente la nivel micro în etapa de proiectare detaliată, metodă pe care activitățile de cercetare și dezvoltare în industrie se bazează cu predilecție.

În cadrul cercetărilor s-a realizat modelarea și simularea motorului de curent continuu, componentă a sistemului de frânare folosit în acționarea pompei hidraulice. Scopul urmărit este de a folosi constrângerile definite în diferite nivelele superioare de proiectare ca date de intrare pentru analiza parametrilor, iar rezultatele indică influența acestora asupra cuplului electromagnetic dezvoltat de motor. Obiectivul acestei cercetări este de modelare și simularea efectelor magnetice care se produc în timpul funcționării motorului electric și a căror variație contribuie la modificări în performanța sistemului studiat.

Cercetările realizate în cadrul acestei lucrări au fost direcționate spre creșterea nivelului de cunoaștere în domeniul proiectării sistemelor mecatronice în industria automotive prin abordarea diferitelor tehnici de modelare și diferite metode de simulare adaptate pentru rezolvarea unor probleme specifice la ora actuală în industrie.

Tehnicile și metodele ce cercetare folosite în cadrul acestei lucrări pentru atingerea obiectivelor propuse pot fi clasificate în ramuri distincte:

- **Achiziția de date:** constă în instalarea în autovehicule a echipamentelor electronice de înregistrare a semnalelor măsurate de la senzori, prin conectarea acestora la rețeaua de comunicare a autovehiculului CAN-BUS (Controller Area Network) și care permite accesul direct la datele transmise spre calculatorul de bord (ECU). Înregistrarea semnalelor pe o perioadă extinsă de timp (monitorizarea exploatării vehiculelor) pentru o flotă de 6 autovehicule permite o analiză cu caracter cert asupra parametrilor de exploatare.

- **Procesarea datelor:** implică implementarea unor algoritmi folosind mediul de programare/simulare, MATLAB/Simulink, pentru analiza datelor colectate în vederea formulării constrângerilor legate de ciclurile de exploatare a autovehiculelor aflate sub monitorizare.
- **Modelarea sistemului de frânare:** modelul matematic al sistemului de frânare și simularea funcției de ABS sunt implementate pornind de la caracteristicile de funcționarea a diferitelor componente.
- **Simulare statistică:** tehnica cunoscută sub numele de Monte-Carlo este adaptată pentru a identifica influența toleranțelor asupra performanțelor unui sistem mecatronic complex și constă în evaluarea modelului sistemului de frânare prin rularea acestuia folosind date de intrare cu caracter aleatoriu.
- **Modelarea motorului de curent continuu:** pentru obținerea caracteristicilor de funcționare ale motorului electric este folosit mediul de modelare Matlab-Simulink.
- **Proiectare CAD:** Pentru realizarea obiectivului propus în cadrul etapei de dezvoltare detaliate software-ul de proiectare VATIA V5 este folosit pentru obținerea geometriei motorului electric, în vederea folosirii acesteia pentru simularea diferitelor comportamente în funcționare folosind metoda elementului finit.
- **Simulare numerică:** constă în folosirea programelor software de analiză în element finit (COMSOL - Multiphysics) și implică folosirea modelului CAD, pentru care se determină caracteristica cuplului dezvoltat de motor pentru o rotație completă a motorului în diferite condiții de temperatură.

Cercetările dezvoltate în perioada de elaborare a tezei de doctorat, au un caracter teoretico-aplicativ, definit prin parcurgerea succesivă a etapelor de cercetare teoretică urmate de implementarea cu exemplificare, pentru a demonstra funcționalitatea platformei colaborative de analiză parametrică propusă ca model de dezvoltare a sistemelor mecatronice în industria automotive.

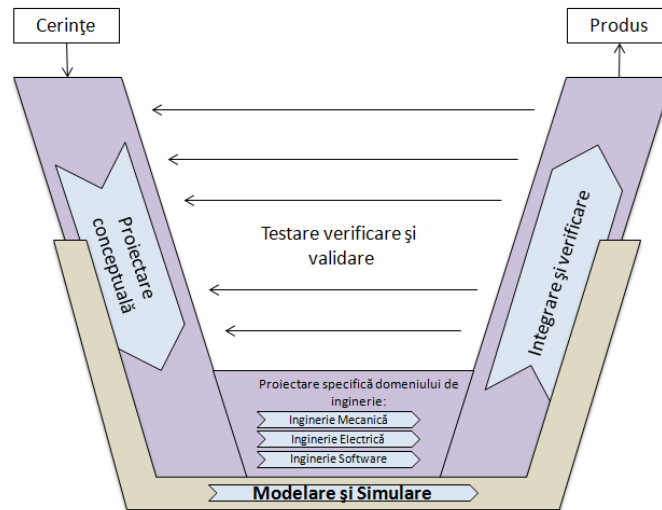
Abordarea tematicilor alese determinată necesitatea identificării unor bune practici (metode de lucru) care pot fi integrate într-o platformă colaborativă de analiză parametrică care să coreleze rezultate obținute din diferite etape de dezvoltare și care să contribuie la o mai bună identificare a soluțiilor de optimizare viitoare.

Modele de proiectare a sistemelor mecatronice

Pentru a face față provocărilor în proiectare în special datorită nivelului de complexitate tot mai mare a sistemelor mecatronice s-au căutat mereu noi modele pentru procesul de lucru pentru a obține o eficiență sporită în de proiectarea sistemelor mecatronice prin reducerea timpului de dezvoltare și de cost, precum și o îmbunătățire a calității de proiectare (reducerea erorilor de proiectare). Metodologiile moderne de proiectare adoptate sunt întâlnite în prezent în diferite departamente de cercetare ale companiilor (pentru echipamente în autovehicule, bunuri de larg consum și echipamente industriale) acestea bazându-se pe diferite modele de proiectare.

Modelul – VDI 2206

În prezent, modelul V a devenit un model de proces standard pentru dezvoltarea sistemelor mecatronice în multe companii industriale. Modelul V este împărțit în trei secțiuni principale (fig.2.7) și este descrisă schematic în forma literei V care îi dă și numele. Latura stângă, cu direcție de execuție de sus în jos, reprezintă secțiunea care corespunde cu descrierea caietului de sarcini și procesul de proiectare. Latura dreaptă cu direcția de parcurgere de jos în sus este secțiunea care conține etapele de integrare a diferitelor componente ale produsului precum și validare și testare.



Modelul VDI de dezvoltare a sistemelor mecatronice [VDI Guideline, 2003]

Metodologia de dezvoltare a sistemelor mecatronice în conformitate cu modelul VDI-2206, oferă un cadru util pentru proiectarea oricărui tip de sistem mecatronic. Acesta se compune în esență din trei elemente [Bathelt, 2005]:

- Modelul V la nivel de dezvoltare macro
- Un ciclu general de rezolvare a problemelor pe nivel micro
- Module de proces predefinite pentru abordarea problemelor recurente

Nivelul micro înseamnă secvențe de pași cu o durată de la câteva ore până la câteva luni. În orice caz, aceste secvențe nu reflectă designul complet a unui produs mecatronic, ci doar rezolvarea unei probleme specifice. Noțiunea de nivel macro se referă la etapele care vizează dezvoltarea completă a unui produs sau cel puțin unui sub-sistem major. VDI-2206 prevede și o procedură generală pentru pașii de dezvoltare la nivel micro, metodologia cunoscută sub numele de *ciclu de rezolvare a problemelor*. Acesta provine din ingineria sistemelor ca un ghid, pentru ingineri, care poate fi utilizat pentru rezolvarea problemelor apărute de-a lungul procesului de dezvoltare a sistemului mecatronic. Acest "ciclu de rezolvare a problemelor" poate fi aplicat la nivel micro în procesul de dezvoltare și este destinat în special pentru a sprijini inginerii în procesul de dezvoltare pentru a lucra pe o metodă previzibilă având posibilitatea de a defini cu claritate un plan de sarcini și sub-sarcini de lucru, dar și pentru a putea rezolva probleme apărute imprevizibil.

Sisteme mecatronice curente și aflate în dezvoltare în industria automotive

Tendința în continuă creștere de înlocuire a sistemelor clasice de acționare mecanice aflate în componența autovehiculelor cu sisteme de tip mecatronic a fost posibilă în urma dezvoltării deosebite înregistrate în domeniul electronicii (senzori cu precizie mare), a puterii de calcul (microcontrolere/procesoare) și a instrumentelor software din ultimii ani.

Sisteme mecatronice "x-by-wire" care au fost prima dată introduse în industria aeronautică în 1972 de către NASA pentru conceptul de avion F-8C Crusader sunt acum prezente și în industria auto pentru atât pentru funcțiile de confort cât și pentru funcțiile de securitate, astfel că sunt adoptate la scară largă următoarele:

- **sistemul *gas-by-wire*:**
 - a cărei funcționalitate este controlul amestecului de combustibil și aer în cazul motoarelor termice
- **sistemul *throttle-by-wire***
 - care constă într-un sistem care include detecția poziției pedalei de accelerație și trimite informația către motor, Engine Control Module (ECM)
- **sistemul *power-by-wire*:**
 - este una din cele mai folosite funcții de acționare mecatronică care cuprinde o serie de electronice periferice cu scopul de a reduce emisiile poluante, și înglobează de asemenea funcția de management al temperaturii motorului.
- **sistemul *ignition-by-wire*:**
 - funcție de oprire pornire prin simpla apăsare a unui buton.
- **sistemul de schimbare a treptelor de viteză, *shift-by-wire*:**
 - aduce ca beneficiu optimizarea schimbării vitezelor pentru transmisiile de tip automat, și ca rezultat reducerea emisiilor de CO₂. Îmbunătățește performanța și răspunsul transmisiilor de tip automat hidraulic, electro-mecanic, și cele cu dublu ambreiaj sau cele cu transmisie variabilă.

Există și alte sisteme **X-by-wire** pentru care se dorește adoptarea și implementarea la nivel de producție de serie, dar datorită funcționalităților care sunt cuplate direct cu considerații de siguranță în funcționare adoptarea lor nu a fost făcută sau încercările de adoptare s-au soldat cu eșecuri majore:

- **Sistemul de frânare *brake-by-wire*:**
 - aceasta tehnologie este valabilă pentru toate configurațiile de sisteme de frânare inclusiv sistemul complet electric. *Brake-by-wire* cuprinde sistemul de frânare electro-hidraulic, (EHB), electro-mecanic (EMB), și cel complet electric Full Electric Brake (FEB). Importante eforturi s-au făcut pentru comercializarea sistemului *brake-by-wire* în configurația EHB de către compania BOSCH GmbH, cu rezultate nu tocmai plăcute care s-au soldat cu rechemarea în service a 680 de mii de autovehicule Mercedes și Maybach.
- **Sistemul de direcție *steering-by-wire*:**
 - În momentul de față sistemul de direcție asistat electronic are pentru siguranță un sistem de acționare mecanic redundant care să acopere cazul unei defecțiuni electrice. Sistemul *steering-by-wire* se referă la un sistem de direcție asistat electronic complet, adică fără elemente mecanice acționate direct de șofer. Problema garantării funcționării unui astfel de sistem în orice condiții și siguranța în exploatare rămâne deschisă.
- **Sistemul de suspensie activ: *suspension-by-wire*:**

- se referă la o arhitectură formată din microcontrolere electronice și actuatore electro-mecanice controlate printr-o interfață software în scopul de a crește performanța autovehiculelor prin creșterea stabilității și o mai bună manevrabilitate, performanță care se dorește a fi atinsă în final fără redundanță mecanică. În momentul de față cel mai dezvoltat sistem de suspensii *by-wire semi-activ* este disponibil pentru vehicule din clasa Mercedes SL, BMW Seria 7 și VW Phaeton.

Avantajele acestei tendințe de înlocuire a sistemelor clasice cu sisteme acționate electric și comandate cu ajutorul microcontrolerelor/microprocesoarelor având în componența lor interfețe software și senzori de diferite tipuri sunt următoarele:

- reduce considerabil numărul de elemente ce se află în mișcare
- greutate redusă în comparație cu sistemele clasice
- teoretic, fără intervenții tehnice (precum lubriere și reglare)
- performanțe care duc la consum redus de combustibil, putere sporită precum și nivel redus de emisii poluante
- siguranță sporită datorită unui control dinamic mai eficient

Sistemelor mecatronice *by-wire* prezente în industria autovehiculelor este împărțită în două categorii, sisteme *by-wire* care sunt deja adoptate (fig. 2.5) și sisteme *by-wire* care sunt încă în dezvoltare – cercetare. Implementarea tehnologiilor *brake-by-wire* și *steering-by-wire* este dorită în continuare de către producătorii de autovehicule, dar stadiul actual al dezvoltării pentru aceste tehnologii nu îndeplinesc toate cerințele de siguranță, și nici cerințele economice de costuri scăzute, astfel că acestea nu au putut fi adoptate și introduse în producție de serie.

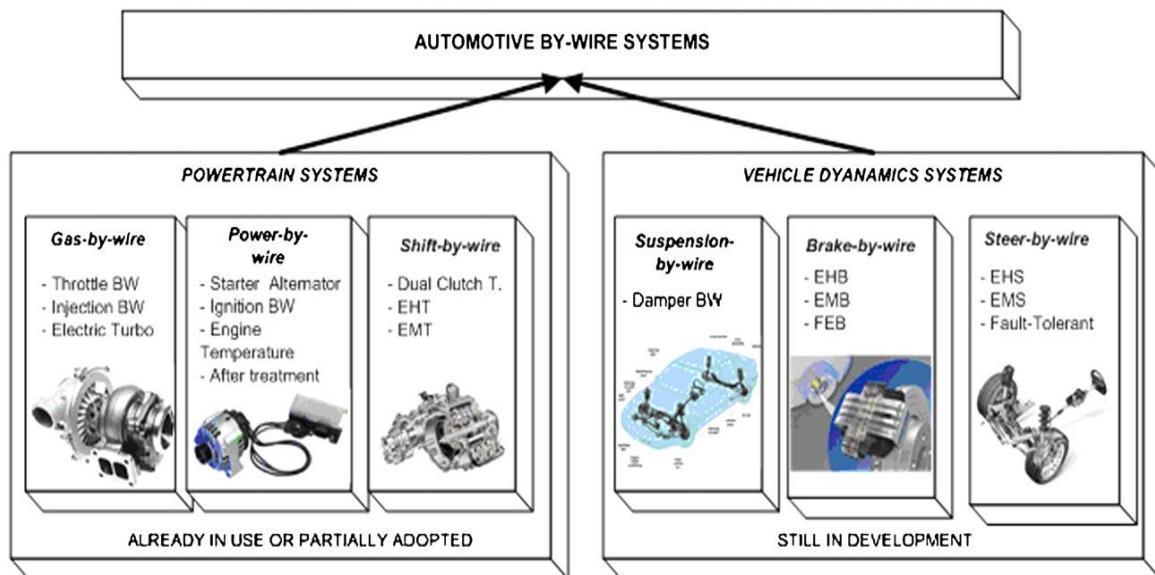


Figura 0.2 Sisteme mecatronice adoptate și sisteme aflate în dezvoltare în industria auto.

Concluzii

În acest capitol sunt prezentate sintetic pe de o parte aspecte privind particularitățile modelelor de proiectare a sistemelor mecatronice și anume posibilitățile de colaborare interdisciplinară în proiectare și pe de altă parte elementele sistemului mecatronic de frânare care este ales ca studiu de caz în această lucrare.

Mecatronica are la bază principiile ingineriei concurente impunând încă din momentul demarării proiectării unui produs munca într-o echipă care include ingineri de diferite specializări. Colaborarea permanentă pe parcursul proiectării este esențială, întrucât sistemul mecanic influențează sistemul electronic și invers. Sistemul electronic are un rol important în proiectarea unei structuri mecanice adecvate. Obținerea efectelor sinergetice poate fi realizată numai prin inginerie simultană.

Din analiza activităților executabile în mediile industriale la nivel de proiectare a sistemelor mecatronice, dar și din tendințele actuale de integrare a diferitelor discipline ingineresti, rezultă necesitatea dezvoltării de cercetări privind elaborarea unor platforme colaborative și implementarea acestora cu scopul depășirii limitelor de flexibilitate atinse de metodele actuale. Problematicile integrării diferitelor domenii ale ingineriei în mediile industriale de proiectare se orientează asupra analizei unor arii specifice de proiectare și a unor instrumente de proiectare software dedicate.

Analizând tipurile de modele de proiectare prezentate în literatura de specialitate, se poate concluziona faptul că importante sunt posibilitatea de proiectare concurențială, **colaborarea la nivel macro și colaborarea la nivel micro**. Modelul VDI-2206 este cel care oferă o orientare neutră pentru proiectarea unui sistem mecatronic și include o clasificare de abordare a proiectării la nivel macro, un ciclu general de rezolvare a problemelor pe nivel micro și module de proces predefinite pentru tratarea problemelor recurente. Modelul RLPF este împărțită în 4 nivele: nivelul de cerințe și analiză, nivelul de definire a funcțiilor, nivelul de logică și control software și de nivelul fizic, acesta fiind potrivită pentru proiectarea de diverse sisteme industriale mecatronice. Modelul ierarhic este o extensie a modelelor amintite prin stabilirea unor **interfețe de integrare** pentru modele micro dezvoltate în domenii diferite. Relevant pentru modelele de proiectare actuale este nivelul de **colaborare la nivel macro** în procesul de integrare și în mod special modelele dezvoltate pentru **integrarea la nivel micro**.

În urma analizei stadiului actual al cercetărilor de adaptare și implementare a modelelor de proiectare a sistemelor mecatronice în activități din medii industriale se evidențiază tendința de dezvoltare a acestora ca instrumente software, cu capacități evaluate de integrare și de interacțiune a diferitelor domenii ale ingineriei. În consecință, s-au elaborat obiectivele și metodologia de cercetare prezentate în subcapitolul 1.2 și, respectiv 1.4.

Platforma colaborativă de analiză parametrică - propunere

Platforma colaborativă de analiză parametrică pentru sisteme mecatronice în industria automotive are la bază standardul de dezvoltare al sistemelor mecatronice VDI-2206. Spre deosebire de acesta platforma propusă modifică cele două ramuri (proiectare conceptuală, integrare și verificare) adăugând noi elemente pentru dezvoltarea la nivel macro (*fig.3.1*) astfel că se impun:

- Procesul de analiză parametrică și simulare este prezent la toate nivelurile de proiectare pentru ambele ramuri de dezvoltare proiectare conceptuală cât și cea de integrare și verificare.
- Pentru fiecare nivel de dezvoltare sunt definite constrângeri ale sistemului / subsistemului / componentelor, baza rezultatelor din simulare și analiză.

- Suma constrângerilor din etapa de proiectare conceptuală este astfel consistentă și în corelație cu toate nivelurile superioare fiind folosite ca date de intrare pentru etapa de implementare (proiectare detaliată)
- Etapa de integrare conține pentru fiecare nivel activitățile specifice de testare și verificare prezente și în VDI 2206 dar unde în modelul propus este adăugat procesul de simulare și analiză a parametrilor sistemului pentru fiecare nivel în parte.
- Rezultatele testelor și simulărilor efectuate la fiecare nivel de integrare sunt folosite pentru a modifica constrângerile definite în etapele de dezvoltare precedente în vederea atingerii cerințelor impuse.

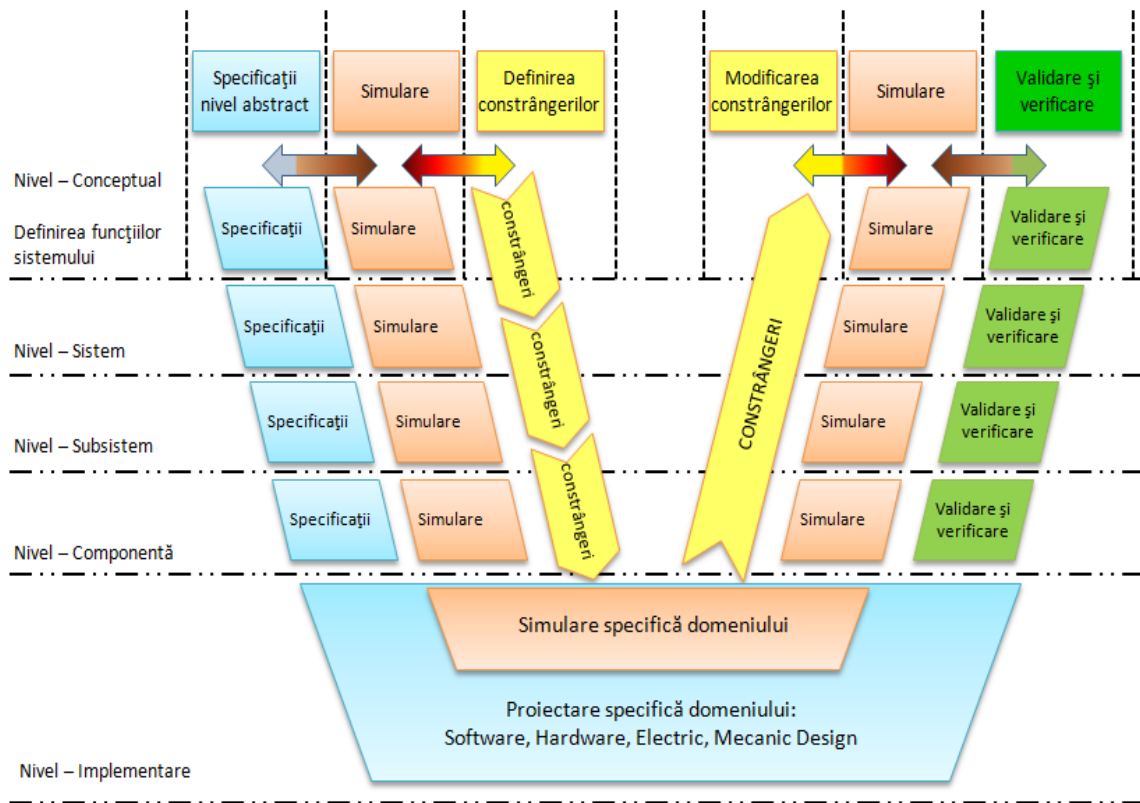


Figura 0.1 Model de proiectare propus.

Prin comparație cu modelul standard VDI-2206, modelul propus specifică analiza parametrilor la nivelele de definire conceptuală a funcțiilor, al sistemului și pentru validarea și verificarea acestora. De asemenea comunicarea între diferite nivele de proiectare este posibilă pentru proiectarea la nivel macro prin definirea constrângerilor sistemului. Aceasta folosește pentru comunicarea între nivelele de dezvoltare prin analiza parametrilor sistemului ce urmează a fi dezvoltat dar și la comunicare între diferite discipline ale ingineriei.

Prin acest model se urmărește definirea unui standard de proiectare specific domeniului de dezvoltare a sistemelor mecatronice în industria automotive. Acesta are scopul de a crește comunicarea la nivel macro între diferitele domenii ale ingineriei prin analiza diferiților parametri (externi și de sistem) la toate nivelele de dezvoltare și definirea constrângerilor într-un mod colaborativ și cu propagare bidirecțională între nivele de dezvoltare. Spre exemplu în industria autovehiculelor următoarele exemple de parametri sunt identificați ca fiind importanți:

Parametri externi :

- Influența șoferului prin modul de condus (condus sportiv, normal)
- Rata de exploatare urban / extraurban implică un anumit regim de viteză dat și de tipul de infrastructură (autostradă, drum național, condus urban)
- Temperatura prin zona geografică unde se exploatează vehiculul poate influența nivelul de uzură / km

Parametri ai sistemului:

- Componente mecanice – parametri constructivi și de material
- Componente Electrice/Electronice – parametri de funcționare în regim normal
- Software – parametri de funcționare normală au limite în relație directă cu temperatura de lucru, răspunsul sistemelor mecanice și electromecanice la controlul implementat în programele software
- Toleranțe de fabricație – parametri de toleranțe care pot afecta performanța sistemului și funcțiile acestuia

Din cele câteva exemplele enumerate mai sus se pot observa cele două mari clasificări, parametri externi (factori perturbatori) și parametri sistemului (parametrii constructivi). Aceștia pot influența încă de la începutul proiectării sistemului durata de dezvoltare, adică numărul ciclurilor macro efectuate pentru a ajunge de la un prototip de laborator la un sistem cu grad mare de maturitate pregătit pentru producție. Se mai pot observa aici și domeniile de inginerie diferite care compun un sistem mecatronic și parametri specifici acestora. Cu cât parametri sunt mai bine cunoscuți, clasificați și inter-conectați pe nivele și discipline aceștia pot duce la o reducere a numărului de macro-cicluri prin definirea riguroasă a constrângerilor. În figura 3.2 este prezentat modelul dezvoltat pe o scară lineară de sus în jos pentru a putea evidenția etapa de definire a constrângerilor în forma unei matrice care reprezintă:

- liniile prezintă împărțirea pe nivelele de dezvoltare (funcțiile sistemului, sistem, subsistem, implementare, integrare și validare)
- coloanele reprezintă constrângerile definite specific pentru fiecare domeniu de proiectare în parte
- modificarea constrângerilor are loc mai apoi în etapa finală în urma integrării tuturor elementelor sistemului a testării și validării acestuia.

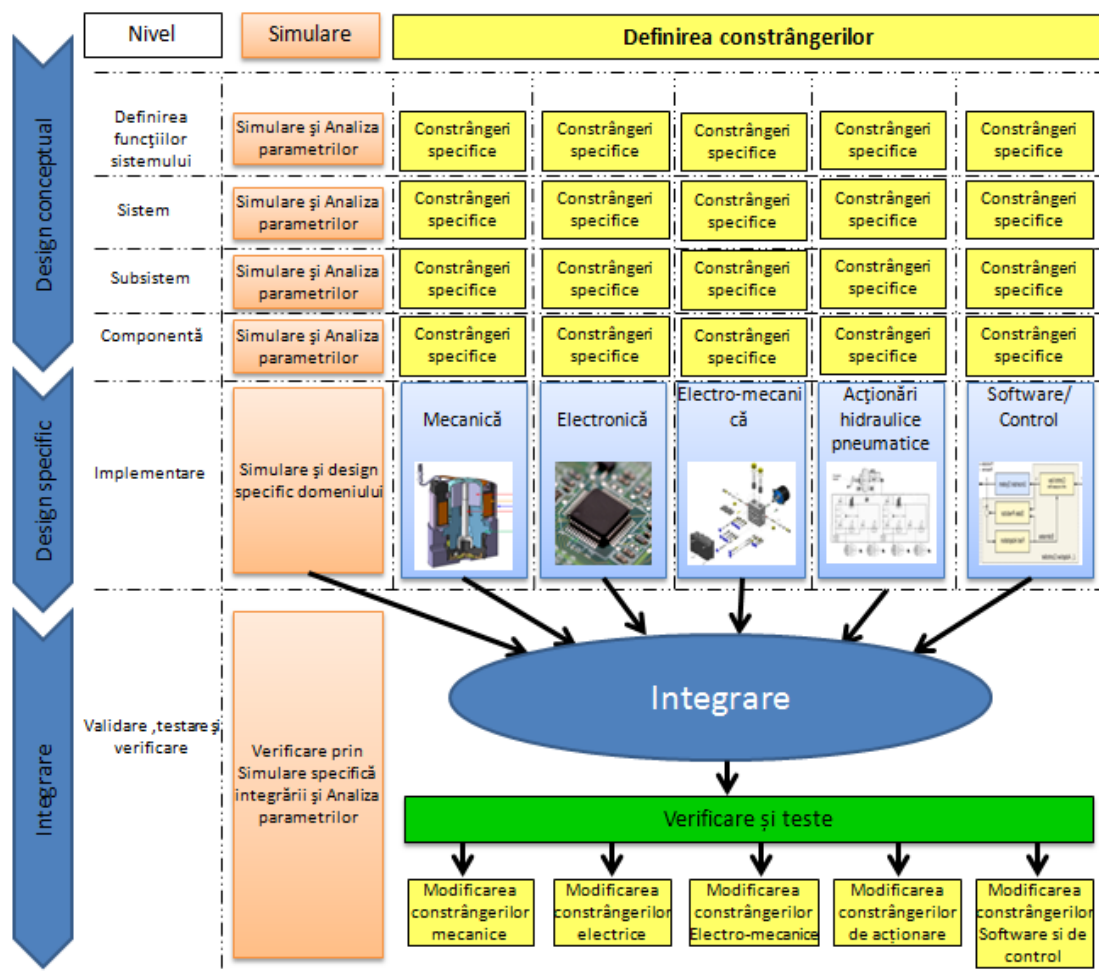


Figura 0.2 Matricea de constrângeri a modelului de dezvoltare.

În comparație cu modelul clasic VDI-2206 acest model propus are în componența sa următoarele elemente noi:

- Introducerea activității de analiză a parametrilor pentru nivelul de proiectare conceptuală a funcțiilor sistemului și efectuarea studiului de fezabilitate pentru acestea.
- Definirea constrângerilor ca ramură corelată cu activitatea de simulare și analiză parametrică pentru toate nivelele de dezvoltare.
- Introducerea activității de simulare în etapa de integrare și validare pentru toate nivelele și toate domeniile specifice.
- Modificarea și adaptarea constrângerilor pentru găsirea celui mai bun compromis în vederea optimizării ulterioare (trecere printr-un nou ciclu macro)

Platforma colaborativă – analiza parametrică pentru etapa de design conceptual la nivelul de definire a funcțiilor

În cadrul acestor cercetări este selectat ca studiu de caz analiza funcției de recuperare a energiei de frânare pentru autovehiculele de pasageri. Cercetările privind analiza parametrilor de exploatare pentru sistemul electronic de frânare au loc prin implementarea unui sistem de achiziție de date, pentru înregistrarea semnalelor măsurate de senzorii autovehiculelor. Post-procesarea datelor este realizată prin implementarea unui algoritm de analiză statistică folosind mediul de programare MATLAB iar rezultatele generate sunt sintetizate prin obținerea unor histograme și diagrame cu caracter cert asupra ciclurilor de operare și a condițiilor reale de exploatare ale autovehiculelor.

Înainte de începerea etapei de proiectare detaliată la acest nivel al dezvoltării (nivel conceptual se stabilesc constrângeri specifice în relație directă cu parametri externi de exploatare în mediu real. Acest studiu de analiză a parametrilor de exploatare determină definirea constrângerilor pentru următoarele etape de dezvoltare cum ar fi: limitele minime și maxime în care trebuie să se încadreze sistemul pentru ca funcțiile propuse să aibă eficiență maximă; estimarea frecvenței de activare a unei anumite funcții (impactul asupra sistemului) estimarea nivelului de uzură; definirea parametrilor de testare.

În cazul funcției de recuperare a energiei de frânare, în cadrul acestor cercetări este demonstrat modul în care pe baza analizelor parametrilor de exploatare sunt identificate constrângerile specifice (intervalul de viteză și nivelul de decelerație) pentru care sistemul trebuie să fie dimensionat, astfel încât recuperarea energiei să fie cât mai eficientă.

La finalizarea acestei etape rezultatul constă în identificarea parametrilor principali care au rol decisiv în funcționarea și eficiența unei anumite funcții a sistemului mecatronic. Aceste constrângeri vor reprezenta date de intrare pentru alte nivele de dezvoltare. Pentru definirea constrângerilor pentru parametri de proiectare ai sistemului analiza propusă ca metodă generală cuprinde următorii pași (*fig. 3.4*): Stabilirea unei flote de autovehicule care sunt exploatare în regim normal de utilizare, achiziția de date specifice sistemului mecatronic aflat sub observație, analiza parametrică prin metode statistice, definirea constrângerilor pentru diferiți parametri care pot aparține unor domenii de inginerie deferite.

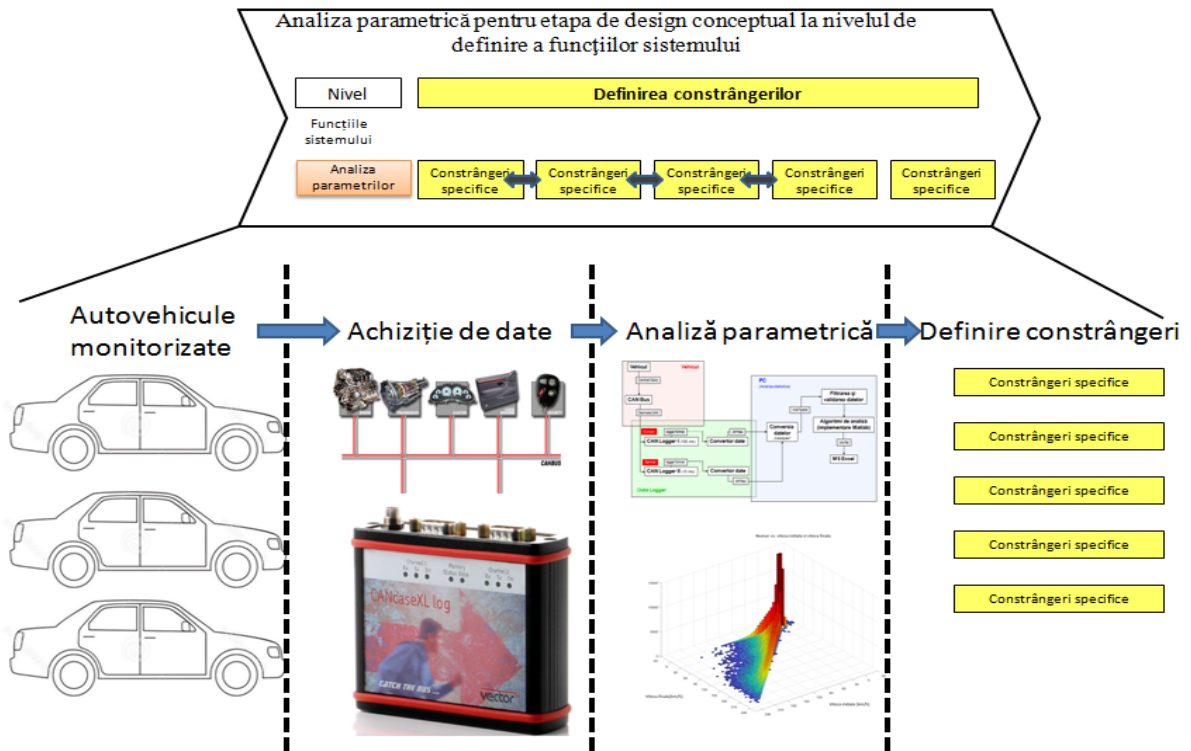


Figura 0.3 Etapele analizei parametrică pentru identificarea și definirea constrângerilor.

Rezultatele unor studii aprofundate prin monitorizarea aduc un plus de informații care sunt utile la nivelul de definirea a noi funcționalități a sistemului:

- evaluarea fezabilității unei noi propuneri pentru a aduce o îmbunătățire
- configurarea eficientă a testelor fizice în funcție de modul și durata de exploatare
- estimarea ciclului de viață a unui sistem sau componentă
- influența parametrilor externi asupra sistemului cum ar fi:
 - influența șoferului prin modul de condus (condus sportiv, normal)
 - rata de exploatare urban / extraurban implică un anumit regim de viteză dat și de tipul de infrastructură (autostradă, drum național, condus urban)
 - temperatura prin zona geografică unde se exploatează vehiculul poate influența mult tipul de uzură, nivelul de uzură / km
- predictibilitatea urmărilor în cazul producerii unei defecțiuni

Platforma colaborativă – analiza parametrică pentru etapa de integrare validare și testare la nivelul funcțiilor sistemului

În etapa de integrare sistemul cuprinde toate componentele sale și este trecut prin diferite nivele de validare și testare. Testarea la nivelul funcțiilor sistemului prin analiza performanțelor sistemului în cadrul platformei colaborative este efectuată înaintea intrării unui produs în producție sau a unui într-un nou ciclu macro. În această etapă se evaluează performanțele sistemului pentru fiecare funcționalitate a acestuia. Platforma colaborativă folosește baza de date

cu constrângeri definite în etapele de dezvoltare anterioare ca date de intrare pentru simularea și analiza performanței sistemului (fig. 3.5). De aici rezultatele analizei determină modificarea constrângerilor pentru optimizări ulterioare pentru asigurarea calității prin evaluarea impactului toleranțelor datorate producției în serie pentru componentele care compun sistemul mecatronic (mecanice, hidraulice, electrice și electronice)

Pentru exemplificare în această lucrare validarea și testarea se efectuează pentru funcția ABS a sistemului de frânare. Datele de intrare sunt obținute din baza de date a constrângerilor efectuate anterior pentru:

- Parametri constructivi ai sistemului mecatronic
- Parametri externi (factori perturbatori)
- Constrângeri definite în etapele de proiectare detaliată.

Etapele de analiză propuse în cadrul platformei pentru nivelul funcțiilor sistemului sunt evidențiate în (fig. 3.6) implică folosirea constrângerilor definite în etapele anterioare de dezvoltare ca date de intrare pentru simulare și analiză. Pasul doi, modelarea sistemului impune cunoașterea în detaliu a arhitecturii și componentelor sistemului După efectuarea simulărilor rezultatele sunt folosite pentru eventuale modificări ale constrângerilor pentru găsirea celui mai bun compromis în vederea atingerii obiectivelor cerute.

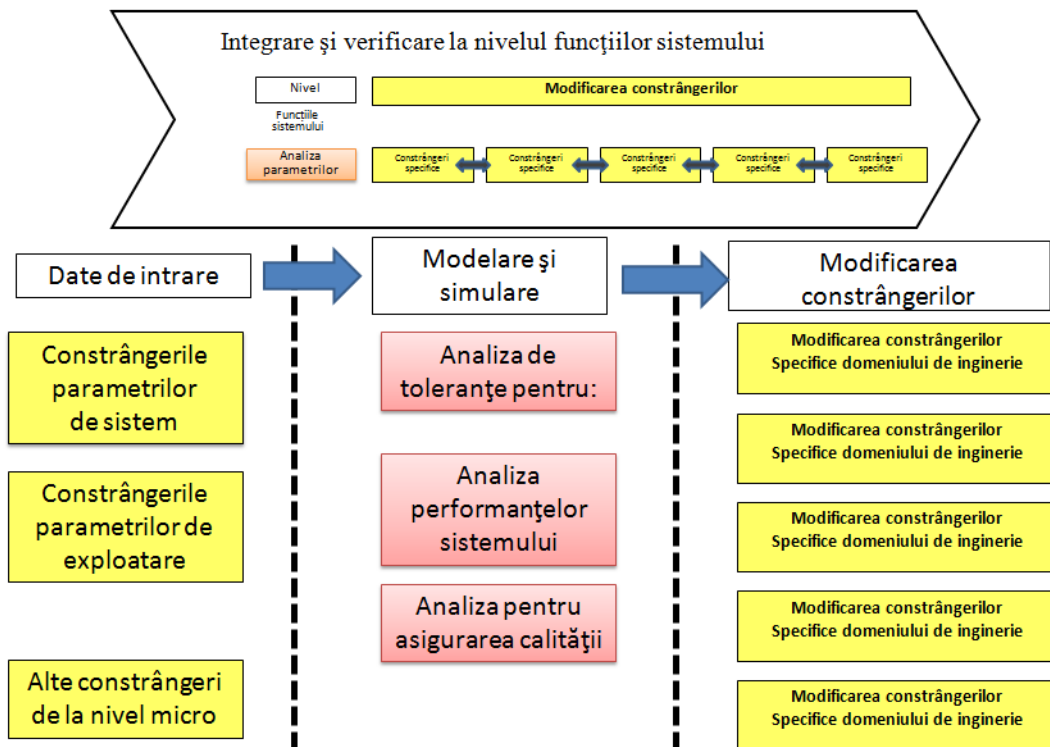


Figura 0.4 Etapele de analiză pentru etapa de validare și testare.

Platforma colaborativă – analiza parametrică pentru etapa de proiectare detaliată

În cazul etapei de implementare (proiectarea specifică domeniului de ingineriei) la nivelul de dezvoltare a componentelor, simularea este parte integrată a procesului de dezvoltare. Platforma colaborativă plasează folosirea constrângerilor specifice ca date de intrare pentru simulare iar mai apoi modificarea acestora dacă este cazul, în funcție de rezultatele obținute .

În cadrul acestei lucrări exemplificarea rolului platformei colaborative la nivelul de proiectare detaliată (fig. 3.8) este efectuat pentru motorul de curent continuu, parte componentă a sistemului de frânare care acționează pompa hidraulică în timpul funcțiilor de ABS. Simularea are loc în funcție de domeniul de inginerie astfel că, în acest caz este folosită simularea cu element finit pentru magnetism.

Parametri de intrare pentru simulare sunt dați de:

- Proiectarea specifică CAD – design (parametri de constructivi)
- Parametri funcționali (din evaluările de la nivelurile de analiză anterioare)
- Parametri externi (din evaluările de la nivelurile proiectare conceptuală)

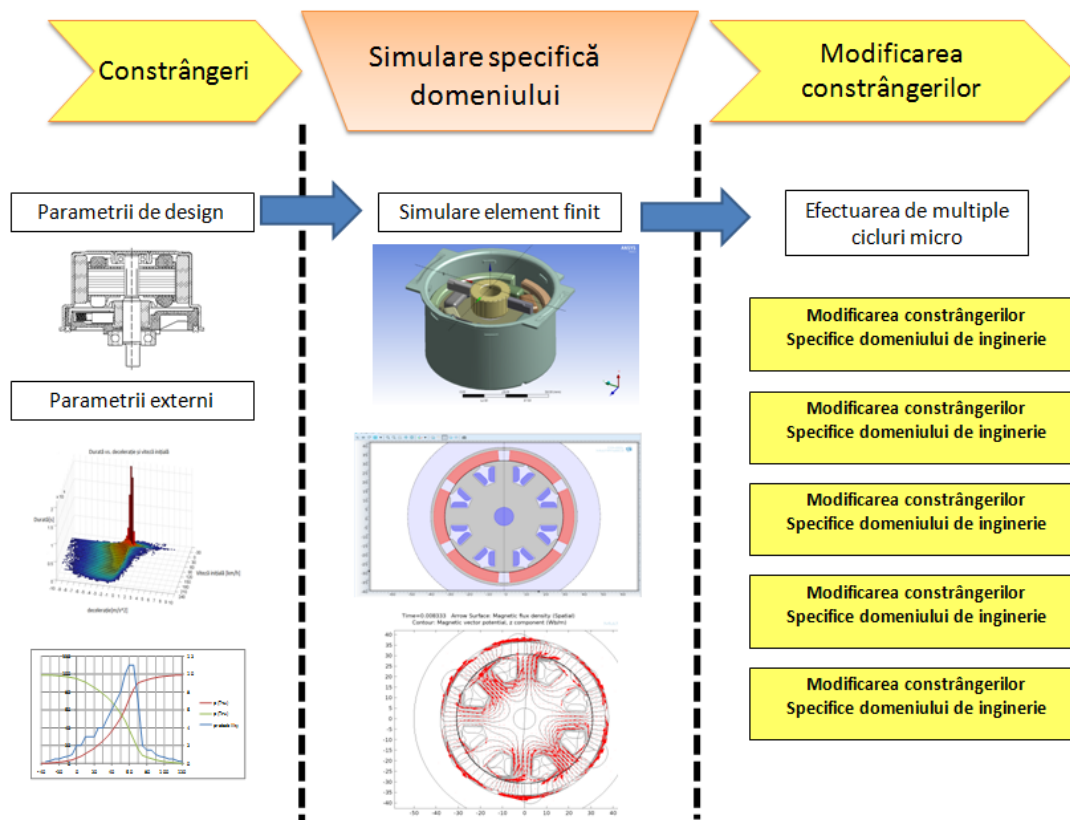


Figura 0.5 Etapele de analiză pentru etapa de proiectare detaliat.

2.1. Concluzii

Platforma propusă are o structură de lucru bazată pe principalele etape de proiectare și dezvoltare: proiectare conceptuală la nivel de sistem, proiectare detaliată la nivel de componentă, integrare, verificare și testare.

Caracterul colaborativ al acestei platforme reprezintă centralizarea parametrilor diferitelor componente a unui sistem mecatronic și folosirea lor în etapele dezvoltării. În urma proiectării la diferite nivele ale dezvoltării (sistem, subsistem, componentă), se definesc constrângeri de proiectare care sunt mai apoi evaluate pentru a putea fi validate sau modificate după caz. Platforma este dezvoltată cu scopul de a optimiza aspecte de colaborare interdisciplinare ce lipsesc în standardul VDI-2206 astfel că se impune:

- Definirea constrângerilor de proiectare prin analiza parametrilor sistemului pentru îmbunătățirea colaborării la nivel macro între diferite domenii ale ingineriei și diferite nivele de dezvoltare
- Implementarea activității de analiză parametrică la nivelul de definire a funcțiilor sistemului.
- Implementarea activității de simulare și analiză a funcțiilor sistemului (testare și verificare) prin folosirea constrângerilor definite în etapele precedente.
- Validarea sau modificarea constrângerilor impuse prin simulările efectuate la fiecare nivel de integrare în vederea atingerii cerințelor impuse.

În cadrul platformei propuse se impune definirea constrângerilor de proiectare corelată cu o etapă premergătoare de analiză și simulare pentru fiecare nivel al dezvoltării. Platforma colaborativă introduce un mod mai eficient de lucru utilizând ca proces un model axat pe centralizarea informațiilor referitoare la parametri sistemului mecatronic.

Scopul platformei este de a facilita utilizarea unor informații prin o mai bună coordonare care să ușureze identificarea deciziilor optime astfel încât, sistemul proiectat să fie obținut prin efectuarea unui număr cât mai mic de cicluri macro de dezvoltare.

Contribuții privind proiectarea conceptuală la nivelul funcțiilor sistemului.

La acest nivel al dezvoltării (nivel conceptual) se stabilesc constrângeri specifice în relație directă cu parametri externi de exploatare în mediu real. Acest studiu de analiză a parametrilor de exploatare determină definirea constrângerilor pentru următoarele etape de dezvoltare. Pentru funcția de recuperare a energiei de frânare, în cadrul acestor cercetări sunt identificate constrângerile specifice (intervalul de viteză și nivelul de decelerație) pe baza analizelor parametrilor de exploatare. Sistemul este dimensionat încă din primele etape de proiectare astfel încât recuperarea energiei să fie cât mai eficientă. Pentru aceasta analiza propusă cuprinde următorii pași (*fig. 4.1*):

- Stabilirea unei flote de autovehicule care sunt exploatate în regim normal de utilizare
- Achiziția de date prin rețeaua de comunicare sistemelor electronic CAN-bus
- Analiza parametrilor externi și interni ai sistemului prin metode statistice
- Definirea constrângerilor de proiectare pentru diferiți parametri ce aparțin componentelor sistemului și care fac parte din domenii de inginerie deferite

Lista semnalelor care sunt înregistrate prin intermediul rețelei de comunicare CAN-Bus sunt prezentate în tabelul 4.1 împreună cu unitățile de măsură din coloana a doua.

Tabel 0.1 Denumirea și unitățile de măsură pentru semnalele înregistrate.

SEMNIIFICAȚIE SEMNAL	UNITATE
Timp	secunde
Data	zi/luna/an
Ora	0-24
Minut	0-60
Luna	0-12
Secundă	0-60
An	20XX
Turația motorului	rpm
Treapta de viteză	1-7
Contact	ON/OFF
Unghiul volanului	grade
Starea pedalei de frână	ON/OFF
Accelerația longitudinală	m/s ²
Accelerația laterală	m/s ²
Unghiul în jurul axei de rotație al vehicolului	grade
Viteză roată față stînga	rpm
Viteză roată față dreapta	rpm
Viteză roată spate stînga	rpm
Viteză roată spate dreapta	rpm
Temperatura exterioară	°C

Datele colectate, implementarea procesării și analizei acestora

Datele colectate provin de la o flotă compusă din 6 autovehicule care au fost monitorizate pe o perioadă îndelungată de timp cantitativ descrisă prin numărul de kilometri parcurși și zilele de observație corespunzătoare. Tabelul detaliat 4.2 prezintă date tehnice generale ale autovehiculelor aflate sub observație dar și specificii asupra perioadei de observație.

Tabel 0.2 Date tehnice și durata de observație

Producător (OEM)	Model	Nr. De viteze	Durata de observație/zile	Distanță parcursă/km	Tip motor	Putere/kw	Capacitate cilindrică/cm ³
Daimler AG	C 320	5	821	71,308	Otto	160	3,199
Daimler AG	C 200 K	5	618	38,980	Otto	135	1,796
Daimler AG	C 320 CDI	7	798	54,257	Diesel	165	2,987
Daimler AG	C 220	5	245	28,711	Diesel	125	2,148
Daimler AG	C 220	5	449	51,783	Diesel	125	2,148
Daimler AG	C 220	5	186	13,494	Otto	160	3,199

Post-procesarea datelor implică implementarea unui program software dezvoltat în această cercetare folosind mediul de programare MATLAB pentru analiza detaliată în vederea formulării de concluzii referitoare la obiectivele propuse. Funcțiile principale ale acestui software de analiză sunt:

- Conversia datelor în formatul specific cu extensia ".mat", și validarea acestora prin implementarea unor filtre care să detecteze și elimine posibile fișiere corupte
- Analiza fiecărui fișier înregistrat în parte care este trecut prin toate analizele implementate.
- Generarea automată a unui raport sub formă de document Excel cu rezultatele numerice ale analizelor și graficele aferente acestora.

Rezultatele Analizei generale a manevrelor de frânare

Un prim sumar al analizei manevrelor de frânare este prezentat în tabelul 3.4. Pe durata monitorizării numărul total de frânări este de 324.159 mii, care corespunde în total la aproximativ 500 de ore de frânare și unei valori medii de 108 frânări/oră de funcționare. Dacă se i-a în considerare totalul distanței parcurse se obține o valoare medie de 1.8 frânări/km.

Tabel 0.3 Sumar al analizei generale a manevrelor de frânare

Nume	Valoare	Unitate
Timpul total înregistrat	2998:02:50	hh:mm:ss
Distanța parcursă	180,244	km
Număr de frânări	324,160	număr
Număr de frânări per km	1.80	număr
Număr de frânări per oră	108.12	număr
Timpul total al frânărilor	1,805,179	s
Timpul total al frânărilor	501:26:19	hh:mm:ss

Pentru a face o analiză detaliată asupra sistemului de frânare pornind de la rezultatele obținute în histograma din figura 4.12, s-a adoptat clasificarea frânărilor în mai multe categorii definite în funcție de starea de mișcare a vehiculului în momentul apăsării pedalei de frână și momentul în care aceasta este eliberată. Astfel că s-au definit următoarele categorii:

- **Frânare în mers:** Vehiculul se află în mișcare la momentul acționării pedalei de frână și rămâne în mișcare până la eliberarea ei.
- **Frânare până la oprire:** Vehiculul se află în mișcare la momentul în care pedala de frână este apăsată, și ajunge la viteză zero în momentul în care frâna este eliberată;
- **Frânare în timpul staționării:** Vehiculul se află pe loc (viteză 0km/h) când pedala de frâna este acționată și viteza tot zero când pedala de frâna este eliberată (comportament de frânare în timpul staționării la semafor);
- **Oprire și pornire:** Vehiculul se află în mișcare și ajunge la viteză zero, reaccelerează și frânează, eliberează frâna când vehiculul se mișcă deja (tipic pentru autovehiculele cu transmisie automată);

- **Pornire cu pedala de frână apăsată:** Vehiculul se află pe loc cu viteză zero când frâna este apăsată și aceasta este eliberată când vehiculul se mișcă deja (tipic pentru autovehiculele cu transmisie automată);

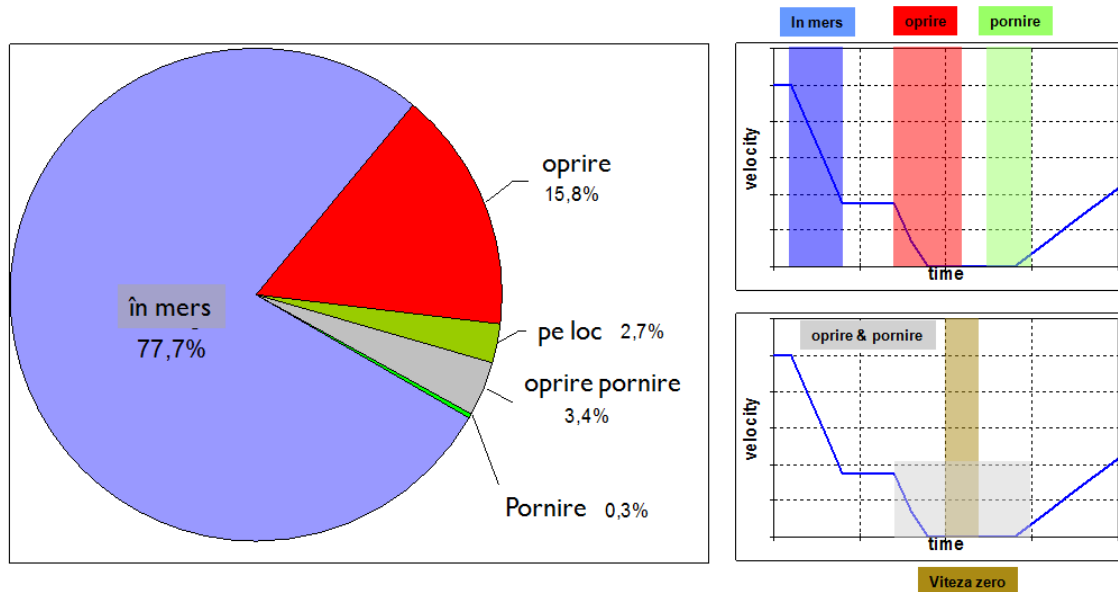


Figura 0.1 Clasificarea manevrelor de frânare în funcție de starea de mișcare.

Din analiza implementată rezultă următoarele date (*fig.4.13*):

- 77,7% din frânări fac parte din prima categorie și anume ”frânare în timpul deplasării” unde viteza inițială de deplasare a vehiculului (momentul apăsării pedalei de frână) și cea finală (momentul eliberării pedalei de frână) sunt diferite de zero.
- În procentaj de 15,8% din totalul frânărilor, viteza finală a autovehiculului este zero, iar celelalte trei categorii însumează 6,5% din frânări

Analiza detaliată asupra funcției de recuperării energiei de frânare

Vehiculele hibride precum și de vehicule complet electrice, folosesc tehnologia de recuperare a energiei de frânare pentru a crește autonomia cât mai mult posibil. La frânarea în cazul unui vehicul convențional mare parte din energia cinetică este transformată în căldură. Manevrelor de frânare sunt o sursă de disipare de energie prin transformarea energiei cinetice în căldură.

Folosind sisteme clasice de frânare etrier - plăcuțe de frână - disc, energia cinetică este transformată în căldură care la rândul ei este disipată în atmosferă. Tendința de dezvoltare în industria autovehiculelor este de a recupera energia cinetică mai ales în cazul celor autovehiculelor electrice, astfel că folosind datele colectate s-a implementat evaluarea tipurilor de frânări spre identificarea de noi informații cu privire la eficiența recuperării energiei de frânare.

Vehicule hibride și electrice sunt echipate cu generatoare pentru a recupera o parte din energia cinetică și transferată ca energie electrică într-o baterie instalată la bordul vehiculului. Întrebările care se pun sunt "Cât de eficiente sunt sistemele de frânare recuperative?" și "Cum poate fi îmbunătățite?".

Pentru a frâna cu ajutorul generatoarelor decelerarea vehiculului aflat în mișcare este produsă cu ajutorul unui motor electric care funcționează în regim de generator. În multe dintre manevrele de frânare decelerarea produsă de generator este suficientă pentru reducerea vitezei vehiculului. Totuși există și situații pentru care este necesar mai mult cuplu de frânare decât generatorul poate furniza (de exemplu o frânare bruscă) astfel că decelerarea suplimentară este produsă de sistemul clasic de frânare.

Punctul cheie al sistemelor de frânare recuperativă pentru maximizarea eficienței de recuperare de energie este **interacțiunea dintre sistemul clasic de frânare și cel de frânare cu ajutorul generatorului**. În figura 4.16, decelerația care poate fi produsă cu diferite tipuri de generatoare este prezentată în raport cu viteza de deplasare a autovehiculului. Cuplul maxim de frânare este disponibil pentru intervale de viteze mici și acesta variază în funcție de puterea generatorului.

Pentru anumite situații, adică la viteze mari sau viteză foarte mici de sub 20km/h, cuplul de frânare dezvoltat de generator nu este suficient pentru a produce decelerarea dorită, ceea ce înseamnă că sistemul clasic de frânare trebuie să intervină. Prin frânarea cu frâne de fricțiune convenționale o parte a energiei cinetice, care ar putea fi recuperate se pierde.

Problema creșterii eficienței recuperării energiei cinetice cu ajutorul sistemelor de frânare este adaptarea lor astfel încât să poată acoperi cât mai multe dintre manevrele de frânare efectuate de către șofer în exploatarea reală de zi cu zi.

Luând în considerare limitările în cuplu oferit de generatoare și cuplului de frânare necesar frânărilor din datele colectate, acest studiu propune o analiză statistică prin care să se determine intervalul în care cele mai multe evenimente de frânare au loc și clasificarea statistică parametrilor importanți

- identificare vitezei vehiculului la momentul în care manevra de frânare începe
- identificare vitezei vehiculului la momentul în care manevra de frânare se termină
- care este durata acestor frânări și clasificarea lor. (cât de lungă este frânarea)
- nivelul de decelerare în timpul frânării (valoare medie, valoare maximă)

Din analiza anterioară (fig.4.13) se observă că o categorie importantă o ocupă frânările în timpul deplasării 77.7% și cele care ajung la viteză finală zero (oprire) 15,8%. Aceste două

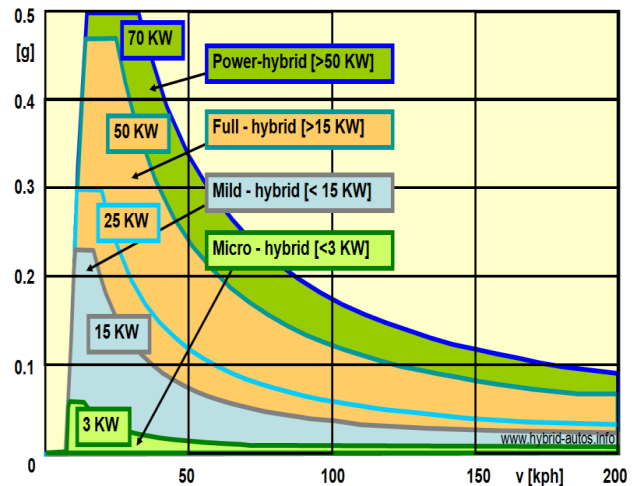


Figura 0.2 Caracteristica de decelerare a generatoarelor electrice pentru diferite puteri

categoriile reprezintă 93,5% din total iar pentru acestea recuperarea energiei cinetice poate avea sens. Din acest procent nu pentru toate frânările se poate recupera energia cinetică dar pentru a determina care este intervalul de viteze în care au loc cele mai multe manevre de frânare dar și care este durata acestora s-a elaborat histograma care corelează următoarele trei informații:

- Durata manevrei de frânare (timpul în secunde de la momentul apăsării și până la momentul eliberării pedalei de frână)
- Viteza inițială (viteza la momentul acționării pedalei de frână)
- Viteza finală (viteza la momentul eliberării pedalei de frână)

Tabel 0.4 Sumar al clasificării manevrelor de frânare în funcție de viteza de deplasare la momentul frânării

Tipul de frânare	Viteza inițială [km/h]	Viteza finală [km/h]	Numărul de frânări	Numărul de frânări [%]	Durata [s]	<i>Durata în procente[%]</i>
Total	>0	>0	248971	100%	1394650.1	100%
Oprire	<10	0	4965	2%	4282.9	0.31%
Oprire	>5	0	17563	7.05%	40981.4	2.94%
În mers	>20	>5	141436	56.81%	323320	23.18%
În mers	>20	>10	135422	54.39%	295980.3	21.22%
În mers	>20	>20	118271	47.50%	242684.4	17.40%
În mers	>30	>30	99334	39.90%	201948.1	14.48%
În mers	>60	>30	66602	26.75%	168345.3	12.07%
În mers	>60	>40	63432	25.48%	157076.7	11.26%

Din această analiză rezultă ca cel mai mare procent din categoriile definite, și anume 56,81% dintre frânări o reprezintă frânările pentru care viteza inițială are valoarea de peste 20[km/h] și viteza finală mai mare de 5[km/h]. Acesta este intervalul de viteze pentru care energia cinetică a vehiculului poate fi recuperată prin intermediul generatorului. Eficiența acestuia urmează a fi investigată în funcție de valorile de decelerare din timpul frânărilor, care pot fi sau nu în limitele constructive ale generatorului.

Pentru categoria de 2% care reprezintă intervalul de manevre de frânare unde viteza inițială are valoarea sub 10km/h și viteza finală de 0 km/h, recuperarea energiei nu se poate face datorită limitărilor constructive ale generatoarelor. Pentru aceste manevre de frânare decelerarea este produsă prin intervenția sistemului clasic de frânare.

În continuarea analizei manevrelor de frânare s-a elaborat un studiu referitor la valoarea medie a decelerației în timpul manevrei de frânare astfel că, s-a implementat identificarea:

- decelerației medii pentru fiecare frânare în parte
- vitezei inițiale a vehiculului.
- numărului de frânări aparținând aceleiași categorii de viteză și decelerație

și corelarea acestor mărimi în histograma clasificării manevrelor de frânare în funcție de viteza inițială și decelerația medie (fig 4.19)

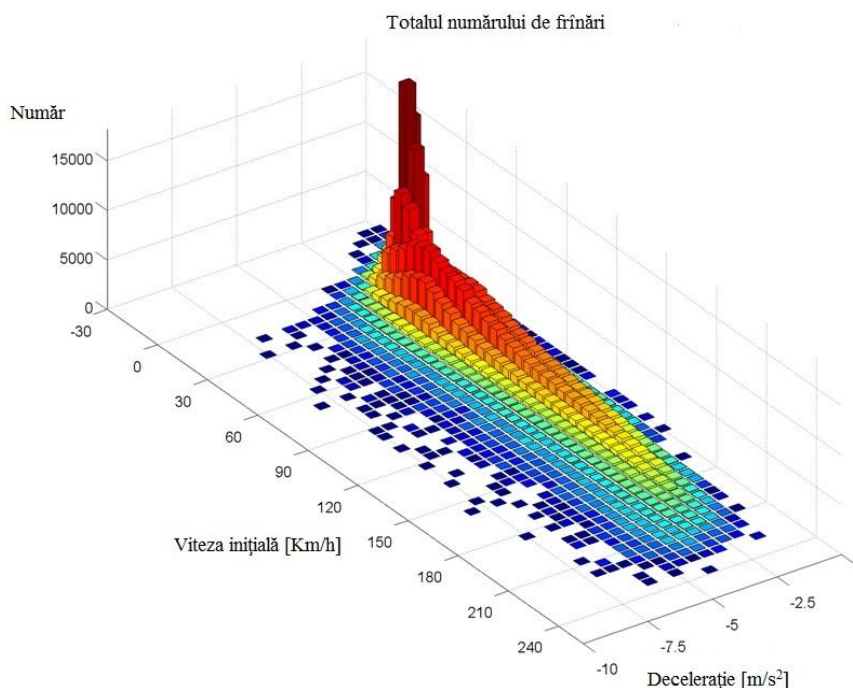


Figura 0.3 Histograma clasificării manevrelor de frânare în funcție de viteza inițială și decelerația medie.

Tabelul 4.5 este structurat în funcție de cinci categorii de frânare după nivelul mediu al decelerației în timpul frânării pentru evidențierea rezultatelor obținute. Rezultatele indică faptul că intervalul de decelerație $[0.1 - 0.2]g$ este cel mai important ca număr de frânări reprezentând 51,27% din totalul numărului de manevre de frânare.

Tabel 0.5 Sumar al analizei manevrelor de frânare după nivelul de decelerare.

CATEGORII DE DECELERARE	NUMĂR DE FRÂNĂRI	ÎN PROCENTE [%]
total	323874	100%
0 - 0.1g	81413	25,14%
> 0.1 - 0.2g	166037	51,27%
> 0.2 - 0.3g	64700	19,98%
> 0.3 - 0.4g	9007	2,78%
> 0.4g	1871	0,58%

Din această analiză rezultă că pentru 94% din durata tuturor frânărilor, nivelul decelerației se află distribuit în intervalul $[0, 2]m/s^2$ de unde se poate concluziona că recuperarea energiei de frânare înafara acestui interval nu își are scopul deoarece sunt foarte puține manevre de frânare care să aibă decelerări unde valorile să depășească intervalul acesta. În figura 4.21 este suprapus peste caracteristicile de decelerare produse de un motor electric care funcționează în regim de generator, intervalul rezultat ca fiind optim pentru recuperarea energiei de frânare și unde 85% din totalul frânărilor au loc.

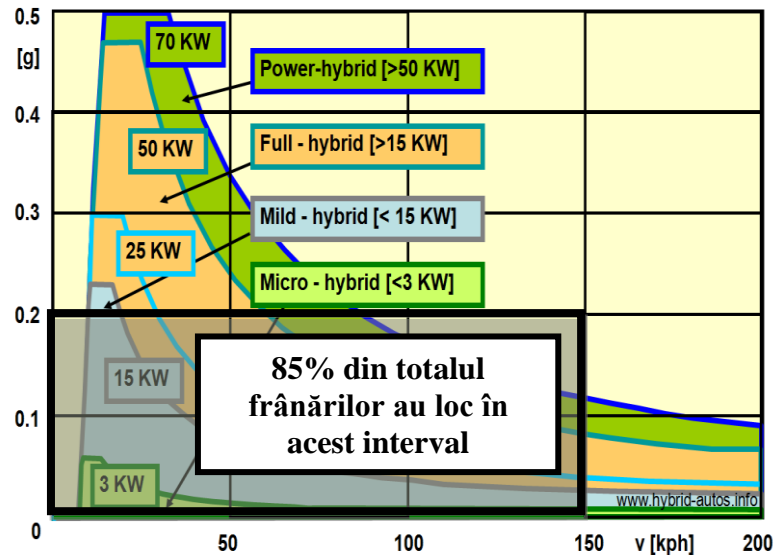


Figura 0.4 Intervalul identificat ca fiind optim pentru recuperarea energiei de frânare.

În acest capitol parametri de exploatare al autovehiculelor sunt analizați prin diferite clasificări statistice. Pentru funcția de recuperare a energiei de frânare o analiză mai amănunțită este realizată pentru identificarea parametrilor funcționali optimi. Constrângerile care rezultă din acest studiu și ordinele de mărime sunt identificate conform noului model de dezvoltare și a analizei parametrice la nivelul de definire a funcționalităților astfel că sunt definite clasificări pentru dimensionarea corectă a componentelor ce alcătuiesc sistemul mecatronic:

Parametri generali:

- regimul de viteză în exploatarea vehiculelor
- regim de temperatură
- durata ciclurilor de pornire/oprire ale motorului
- accelerație și decelerație longitudinală
- accelerație laterală (dreapta - stânga).

Parametri manevrelor de frânare:

- clasificarea manevrelor de frânare în funcție de viteza de deplasare
- identificare vitezei vehiculului la momentul în care manevra de frânare începe
- identificare vitezei vehiculului la momentul în care manevra de frânare se termină
- durata acestor frânări și clasificarea lor. (timpul de frânare)
- nivelul de decelerare în timpul frânării (valoare medie, valoare maximă)

Parametri funcției de recuperare a energiei de frânare:

- pentru 85% din totalul frânărilor, nivelul mediu al decelerației se află distribuite în intervalul $[0, 2]m/s^2$ pe intervalul de viteză $[0,150]km/h$
- rezultate indică cu precizie intervalul de viteze și nivelul de decelerare unde este optimă recuperarea energiei de frânare.

Acest studiu bazat pe procesarea statistică a datelor măsurate în exploatarea autovehiculelor definesc constrângeri care au ca scop dimensionarea corectă a componentelor principale ale sistemului mecatronic încă de la începutul proiectării. Are loc astfel eliminarea unor cicluri macro pentru optimizări ulterioare și se ajunge mai rapid la un grad de maturitate mai mare pentru sistemul aflat în dezvoltare.

Contribuții privind etapa de integrare validare și testare la nivelul funcțiilor sistemului

Acest capitol propune evaluarea performanțelor funcției de ABS a sistemului electronic de frânare prin folosirea modelării și simulării la nivelul validării și testării funcțiilor sistemului în etapa de integrare. Rezultatele testării prin simulare pot determina modificarea constrângerilor în vederea optimizării ulterioare sau menținerea lor prin validare (fig. 5.2).

La nivelul funcțiilor sistemului în etapa validării și testării este *asigurarea calității pentru* funcția de ABS a sistemului electronic de frânare prin:

- **evaluarea impactului toleranțelor datorate producției în serie** pentru componentele care compun sistemul mecatronic (mecanice, hidraulice, electrice și electronice)
- analiza influenței **parametrilor externi din timpul exploatării**.

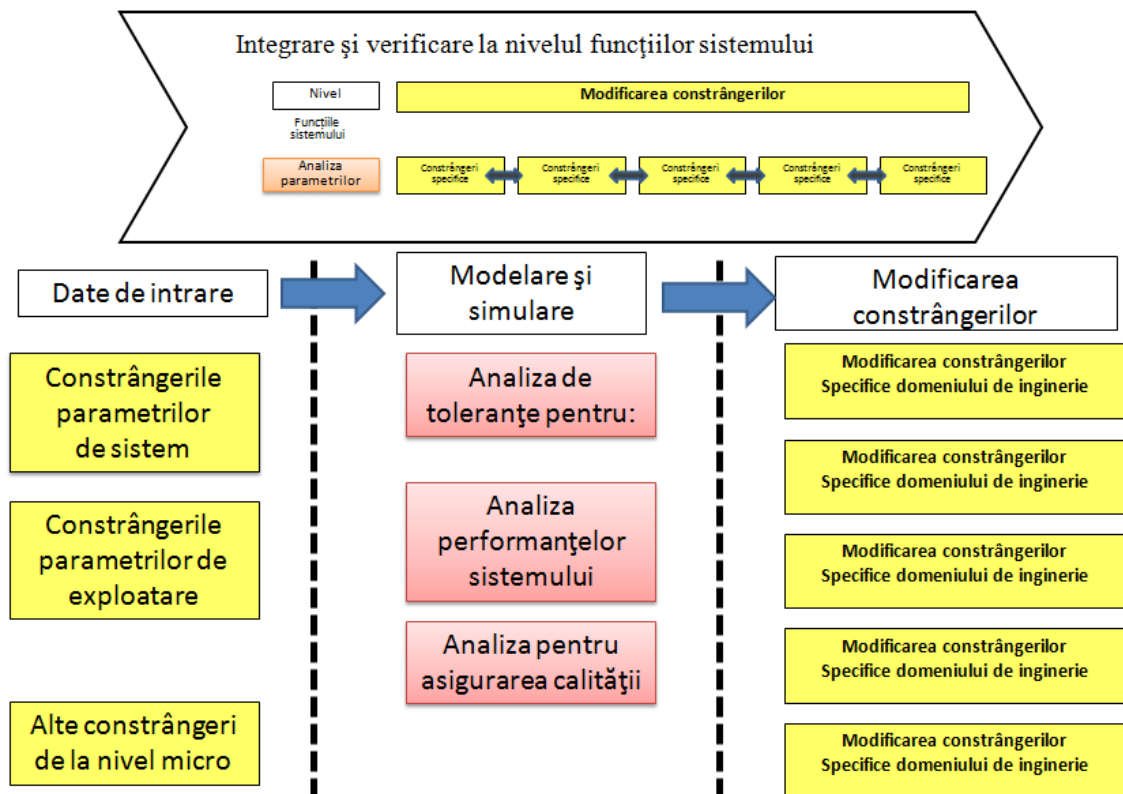


Figura 0.1 Etapele de analiză pentru validare și testare la nivelul funcțiilor sistemului

Funcționarea neconformă este definită ca fiind obținerea de performanțe sub limita minimă de siguranță, coordonarea inefficientă a sistemului în timpul funcționării sau pur și simplu oprirea sa din funcționare.

Limitarea posibilităților prin care sistemul electronic de frânare poate crea riscuri funcționarea neconformă cu cerințele de siguranță se poate face printr-o analiză detaliată a gradelor de libertate (abaterile de dimensiune pentru fiecare componentă) pe care un sistem mecatronic de acest tip le poate avea. Obiectivul acestui capitol are ca pași principali modelarea sistemului și folosind metode probabilistice de analiză parametrică simularea și estimarea riscurilor de neconformitate care pot apărea datorită producției în serie. Modificarea

constrângerilor definite în etapele anterioare poate fi făcută mai apoi în următorul ciclu macro al proiectării.

În comparație cu testele fizice simularea la acest nivel poate estimata cu o acuratețe mare performanța și calitatea sistemului de frânare pentru un eșantion mare de unități produse folosind resurse puține și un costuri reduse.

Analiza toleranțelor folosind modelarea și simularea

Analiza de toleranțe a sistemul hidraulic de frânare pornește de la analiza următorului scenariu de exploatare:

- În timpul unei manevre de frânare unde funcția de ABS este activată, presiunea în circuitul hidraulic poate atinge presiuni în intervalul 200-300 bari.
- Se dorește ca prin evaluarea toleranțelor în corelație cu factorii perturbatori exteriori, să se cunoască cât de mare este influența acestora asupra performanțelor sistemului de frânare.

Prin evaluare toleranțelor cu ajutorul metodei statistice de tip Monte Carlo se dorește obținerea evaluării performanțelor sistemului în exploatare cât mai aproape de realitate pentru un eșantion de 1 milion de unități de produse. Evaluarea din punct de vedere statistic a unui eșantion de unități de frânare are ca scop determinarea variației maxime posibile în funcționare aferente unei manevre de ABS în timpul frânării unde sistemul efectuează controlul presiunii în roți cu ajutorul valvelor electro-mecanice care sunt acționate de către ECU (unitatea electronic de control). Parametrul de referință calculat este presiunea limită a sistemului ($P_{limită}$). Presiunea limită este parametrul folosit în specificații de design și care caracterizează pentru sistemul de față presiunea maximă împotriva căreia sistemul poate să acționeze (închidă) valva electro-mecanică.

Identificarea limitelor sistemului:

- Toate componentele sistemul electronic de frânare pentru vehicule de pasageri, sunt localizate și pot fi analizate din design. În proiectare sunt deja definite limite în ceea ce privește toleranțele de producție iar din măsurători experimentale pe diferite eșantioane se obțin date statistice referitoare la distribuțiile lor.
- Variațiile în funcționare datorate factorilor perturbatori externi cum ar fi condițiile de mediu, temperatură sunt stabilite de producător în limite care să asigure funcționarea în regim de siguranță sporită.

Identificarea secțiunilor din sistem:

- O secțiune într-un sistem este considerată o parte a sistemului în care o formă de energie este transformată în altă formă de energie, de exemplu curent electric transformat în lucru mecanic la care se adaugă și pierderile aferente, de exemplu căldură disipată de bobină la trecerea curentului electric.

Descrierea toleranțelor sistemului și a gradelor de libertate

Sistemul mecatronic aflat în evaluare cuprinde un număr mare de componente într-o arhitectură complexă (fig. 5.3). Designul unei astfel de sistem se face în conformitate cu anumite

cerințe, de obicei prin împărțirea în secțiuni a sistemului, de exemplu, mecanică, hidraulică, electronică și software. Pentru fiecare secțiune a sistemului se definesc condițiile la limită de funcționare, care sunt alese după cele mai bune analize și cunoștințe din practica existentă în scopul de a îndeplini cerințele de nivel cât mai înalt și care stau la baza fazei de proiectare.

Procesul de alegere a parametrilor de design pentru fiecare secțiune, constă în a considera în calcul toleranțele componentelor fiecărei secțiuni, pentru care trebuie garantată funcționarea în deplină conformitate cu cerințele de performanță definite.

În sistemele mecatronice cu un număr foarte mare de componente active care au toleranțe, probabilitatea ca prin combinație a tuturor toleranțelor să se atingă condiția de funcționare la limită scade proporțional cu numărul tot mai mare de componente. Valorile de toleranță în sine sunt de obicei distribuite din punct de vedere statistic, ceea ce înseamnă că fiecare valoare într-o limită de toleranță nu există cu aceeași probabilitate.

Un dispozitiv de acționare mecatronic poate fi evaluat pentru fiecare parametru funcțional în parte. Parametrul care face obiectul evaluării trebuie să fie clar definit. De exemplu, ar putea fi precizia de control sau de putere, în anumite condiții.

- Pentru definirea unui parametru poate fi folosit o valoare existentă (de exemplu, dintr-o specificație tehnică), care poate fi în mod clar identificată și măsurată sau pentru care o bază de date există deja
- Valoarea parametrului trebuie să fie o caracteristică a dispozitivului de acționare aflat în evaluare. Acceptarea deviației de la această valoare în sistem trebuie discutată separat și de obicei nu depinde exclusiv de un singur element din sistem.

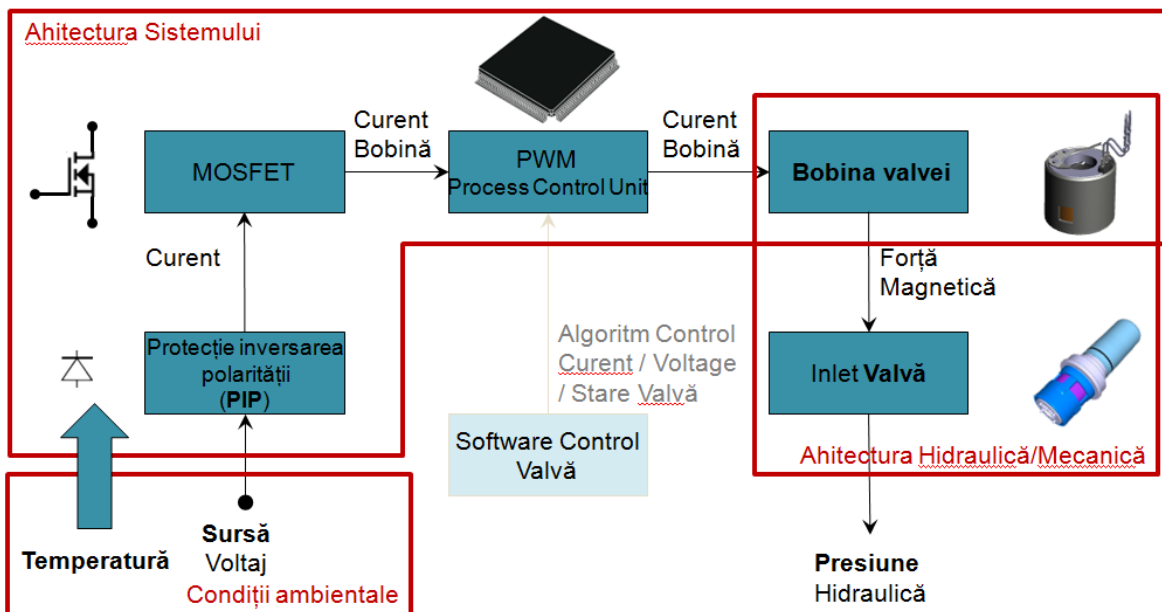


Figura 0.2 Arhitectura sistemului mecatronic clasificat pe categorii de componente.

- $U=10.0V$

Simularea de tip probabilistic folosind metoda Monte-Carlo

Simularea de tip Monte-Carlo este implementată pentru evaluarea modelului sistemului de frânare dezvoltat. Valorile parametrilor de intrare sunt generate folosind distribuțiile probabilistice pentru fiecare parametru în parte. Prin metoda de simulare Monte-Carlo parametri

de intrare sunt aleși în mod aleatoriu și modelul este rulat. La fiecare iterație a modelului un nou set de parametri este folosit ca date de intrare. Simularea urmează un model particular definit în pașii următori:

- 1) Definirea domeniului de variație pentru fiecare parametru
- 2) Generarea valorilor în funcție de distribuția probabilistică pe domeniul definit
- 3) Efectuarea iterațiilor folosind parametrilor definiți
- 4) Obținerea rezultatului

Simulare 4) Simulare toleranțe introduse statistic → pentru componente și factori externi la limită

- P_{limit} : Simularea presiunii limită la care valva poate fi acționată pentru valori ale toleranțelor alese aleator în condiții de exploatare la limită
- $ABS_{eșuat}$: Simularea numărului de manevre ABS care pot eșua în condițiile stabilite de exploatare
- Componentele sistemului: valorile toleranțelor sunt alese aleator din distribuția statistică (rezistență, pierderi de curent, toleranțe mecanice)
- Factori externi: Temperatură $T=100^{\circ}C$, Timp pre-încălzire 10s, tensiune sursă $U=10.0V$

Simulare 5) Simularea condițiilor la limită → componente și factori externi introduși statistic

- P_{limit} : Simularea presiunii limită la care valva poate fi acționată pentru valori ale toleranțelor sistemului maxime și valori statistice pentru condițiile de exploatare.
- $ABS_{eșuat}$: Simularea numărului de manevre ABS care pot eșua în condițiile stabilite de exploatare
- Componentele sistemului: cazul ce mai defavorabil (rezistență omică maximă, pierderi de curent maxime, toleranțe de producție maxim admise)
- Factori externi: valorile parametrilor factorilor externi sunt aleși aleator din distribuția statistică ($T_{ambient}$, pre-încălzire, tensiune $U_{sursă}$)

În tabelul 5.4 sunt prezentate toate tipurile de simulări propuse pentru evaluarea toleranțelor sistemului de frânare în funcție de tipul de intrări folosite.(parametrii cu valori fixe sau variabile aleatoriu)

Tabel 0.1 Valorile parametrilor simulărilor cu parametri fixați.

Toleranțe incluse	Simulare 1	Simulare 2	Simulare 3	Simulare 4	Simulare 5	Simulare 6
Componente mecanice /electrice / hidraulice	Toleranțe la limită	Toleranțe la limită	Nominal	Statistic	Statistic	Toleranțe la limită
Temperatura ambientală / habitacul motor	100°C 110°C	60°C	100°C	100°C	Statistic	Statistic
Preîncălzirea componentelor	Timp 10s	-	Timp 10s	Timp 10s	Statistic	Statistic
Voltaj sursă de tensiune	10.0V 9.0V	13V	10.0V	10.0V	Statistic	Statistic
Comparație cu ΔP	Calc. P_{limit}	Calc. P_{limit}	Calc. P_{limit}	ΔP Tabel	ΔP Tabel	ΔP Tabel

Rezultatele simulării

În tabelul 5.5 sunt prezentate valorile toleranțelor sistemului cât și a parametrilor externi pentru fiecare tip de simulare în parte. Pentru fiecare din ipoteze rezultatul simulării reprezintă valoarea presiunii limită împotriva căreia electro-valva poate fi acționată. Peste aceste valori ale presiunii se consideră că acționarea valvei nu v-a mai avea loc astfel că o manevra de ABS nu v-a mai putea avea loc.

Tabel 0.2 Valorile parametrilor simulărilor cu parametri fixați.

Toleranțe incluse în calcul	Simulare 1a	Simulare 1b	Simulare 2	Simulare 3
Componente mecanice / electrice / hidraulice	Toleranțe la limită	Toleranțe la limită	Toleranțe la limită	Nominal
Temperatura ambientală / habitacul motor	100°C	110°C	60°C	100°C
Preîncălzirea componentelor	Timp (10s)	Timp (10s)	Fără	Timp (10s)
Voltaj sursă de tensiune	10V	9V	13V	10.0V
Rezultat	Calc. P_{limit}	Calc. P_{limit}	Calc. P_{limit}	Calc. P_{limit}

Rezultatele obținute în urma celor patru simulări sunt prezentate în graficul din figura 5.19 unde se pot observa cele patru limite de presiune obținute care sunt 210bar, 160bar, 390bar, 230bar.

Primele 3 simulări (1a, 1b, și 2) au loc în aceleași condiții ale toleranțelor mecanice hidraulice și electrice și anume prin setare lor la evaluarea maximă admisă. Rezultatele acestor trei simulări arată presiunea maximă la care valva electromagnetă poate fi acționată în cazul unei manevre de ABS und valva este acționată. Din figura 5.19 se observă că pentru simularea 2, la o valoare a tensiunii de 13V și o temperatură de 60°C presiunea maximă este de 390bar asigurând faptul că o unitate de frânare aflată în astfel de condiții valva de ABS v-a putea fi efectuată fără probleme. Pentru temperaturi mai mari 100°C respective 110°C rar întâlnite în exploatarea normală limita presiunii la care valva poate fi acționată nu scade sub valoarea de 160 de bari.

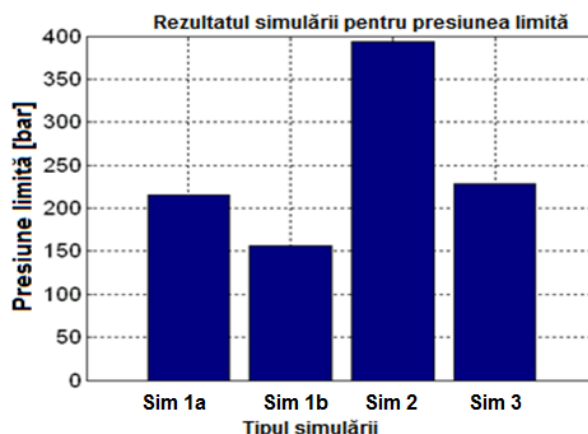


Figura 0.3 Presiunea maximă la care poate fi acționată valva de ABS.

În cazul simulării numărul trei, valorile toleranțelor mecanice, hidraulice și electrice sunt fixate la valorile lor nominale. Prin această simulare se dorește evaluarea performanței unei unități ABS ideale în condiții grele de exploatare și anume: temperatura ajunge la 100°C; tensiune de alimentare scăzută 10V. Presiunea maximă la care valve poate fi acționată este de 230 bari asigurând de asemenea o limită confortabilă având în vedere că presiunea maximă în timpul celor mai multe frânări nu depășește 150 de bari.

Simularea de tip Monte-Carlo presupune inserarea valorilor parametrilor folosind distribuțiile probabilistic ale acestora, astfel că rezultatele vor arăta care este presiunea limită la care valva de ABS poate fi acționată pentru un eșantion de un milion de unități de frânare diferite.

Simularea 4:

În cazul simulării numărul patru valorile pentru toleranțele sistemului sunt generate după distribuția lor și combinate aleator. Pentru această simulare modelul a fost rulat de un milion de ori de fiecare dată parametri pentru toleranțe fiind aleși aleator din distribuțiile lor.

În această simulare pentru parametri externi valorile de temperatură, voltaj tensiune, preîncălzire sunt păstrați ficși (tab. 5.6) urmărindu-se astfel doar influența toleranțelor sistemului asupra performanțelor.

Tabel 0.3 Valorile parametrilor simulării cu parametri statistici.

Toleranțe incluse în calcul	Simulare 4
Componente mecanice /electrice / hidraulice	Statistic
Temperatura ambientală / habitacul motor	100°C
Preîncălzirea componentelor	Timp 10s
Voltaj sursă de tensiune	10.0V

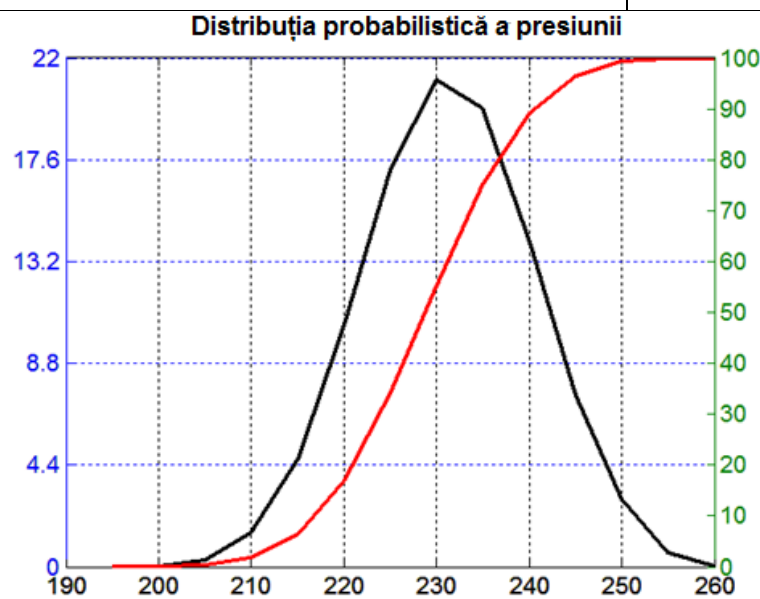


Figura 0.4 Distribuția valorilor presiunii limită pentru simularea 4

În această configurație a simulării se poate observa care este influența toleranțelor sistemului pentru o temperatură de lucru de 100°C și o tensiune de alimentare fixă de 10V. Din graficul distribuției probabilistic obținute (*fig. 5.20*) se observă că presiunea limită variază între valori de 200 și 260bar. Aceste valori sunt bune, deoarece limita inferioara maxim acceptată de producătorii auto este în jurul valorii de 160 de bari.

Simularea 5:

Această configurație presupune inserarea în calcul a valorilor generate statistic pentru parametri externi la fel ca și pentru toleranțelor sistemului (*tab. 5.7*). Această simulare este cea mai apropiată de realitate astfel că, se obține performanța a un milion de unități ABS produse și aflate în condiții de exploatare cât mai reale.

Tabel 0.4 Valorile parametrilor simulării cu parametri inserați statistic.

Toleranțe incluse în calcul	Simulare 5
Componente mecanice /electrice / hidraulice	Statistic
Temperatura ambientală / habitacul motor	Statistic
Preîncălzirea componentelor	Statistic
Voltaj sursă de tensiune	Statistic

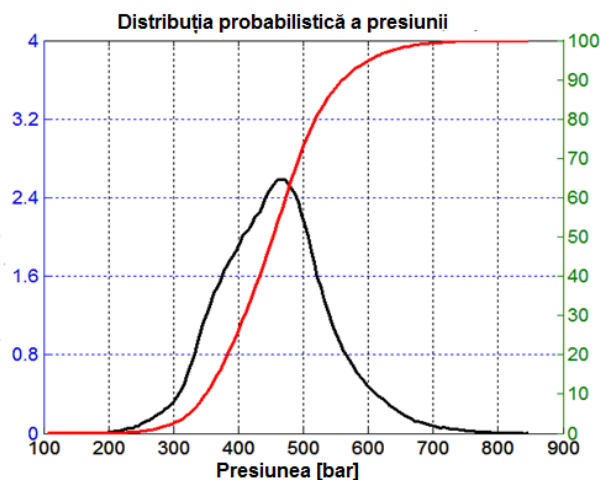


Figura 0.5 Distribuția valorilor presiunii limită pentru simularea 5

Graficul obținut pentru această simulare (*fig. 5.21*) reprezintă distribuția tuturor presiunilor maxime la care valva de ABS poate fi acționată pentru un milion de unități de frânare în condiții de producție cât mai apropiate de realitate și condiții de exploatare cât mai reale. Din rezultate se poate observa că minimumul presiunii este în jurul valorii de 200bar și maximumul poate atinge la peste 800 de bari. Maximumul nu este o valoare realistă deoarece curentul prin valvă este

limitat în mod real, pentru protecția bobinei dar graficul simulării a fost păstrat pentru a putea compara influența parametrilor asupra sistemului.

Simularea 6:

Această configurație a simulării (tab 5.8) are ca scop obținerea de informații referitoare la performanțele unei unități de frânare, ABS pentru care toleranțele componentelor sunt valori maxime acceptate iar valorile parametrilor perturbatori externi sunt variați statistic. Rezultatul simulării arată care sunt performanțele unei unități de frânare care din punct de vedere calitativ se află la limita de acceptare.

Tabel 0.5 Valorile parametrilor simulării cu parametri de intrare generați aleator.

Toleranțe incluse în calcul	Simulare 6
Componente mecanice / electrice / hidraulice	Toleranțe la limită
Temperatura ambientală / habitacul motor	Statistic
Preîncălzirea componentelor	Statistic
Voltaj sursă de tensiune	Statistic

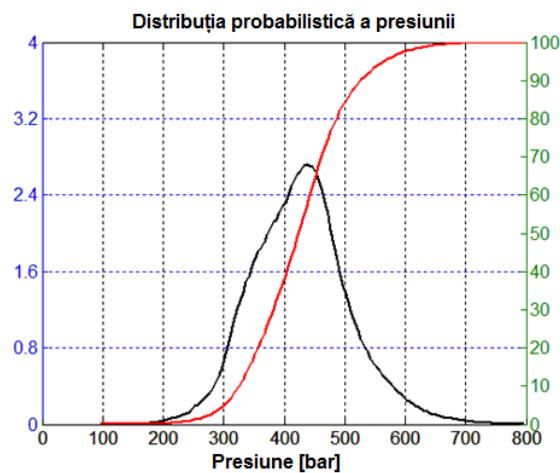


Figura 0.6 Distribuția valorilor presiunii limită pentru simularea 6

Din graficul obținut (*fig. 5.22*) se poate observa că distribuția probabilistică a presiunii limită nu diferă foarte mult față de simularea anterioară de unde rezultă faptul că pentru o unitate de frânare care din punct de vedere calitativ al toleranțelor se află la limita de acceptare, în condițiile de exploatare reale doar un număr de sub 0,1% au o performanță sub limita de 200bar. Se poate concluziona ca o astfel de unitate ABS poate fi acceptată fără probleme ca și componentă a unui automobil respectând normele de siguranță în vigoare.

În următorul pas al evaluării performanța sistemului de frânare este corelată cu anumiți parametri externi:

- Temperatura ambientală (compartiment motor)
- Voltaj sursă de alimentare (baterie)
- Diferența de presiune $\Delta P = 200\text{bar} - P_{\text{limită}}$

Valoarea de 200Bar reprezintă presiune maximă pe care un șofer o poate exercita în timpul frânării. Sistemul de frânare trebuie să poată să închidă valvele de ABS împotriva acestei presiunii limită. Axa Z din figura 5.24 și 5.25 reprezintă această diferență de presiune ΔP .

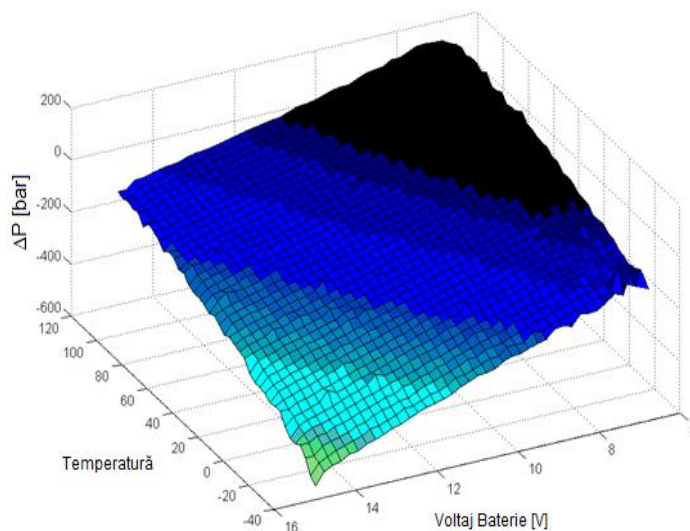


Figura 0.7 Valorile presiunii limită corelată cu temperatura și tensiunea.

În figura (5.24) suprafața de culoare neagră reprezintă valorile de presiune pentru care sistemul nu poate acționa valvele de ABS împotriva presiunii create de șofer (200bar). Din grafic de observă că acest fenomen apare doar la corelarea unui voltaj de alimentare scăzut și temperatură ridicată.

În cazul în care limita de presiune este variată statistic după distribuția valorilor presiunii creată de un șofer în exploatarea reală, se poate observa în figura 5.25 că valorile care depășesc presiunea maximă la care valve poate fi acționată sunt mai reduse. Suprafața de culoare neagră este mult mai mică ceea ce arată că în exploatarea în viața reală, condițiile ca o valvă să nu poată fi acționată se întrunesc mai rar pentru aceleași toleranțe.

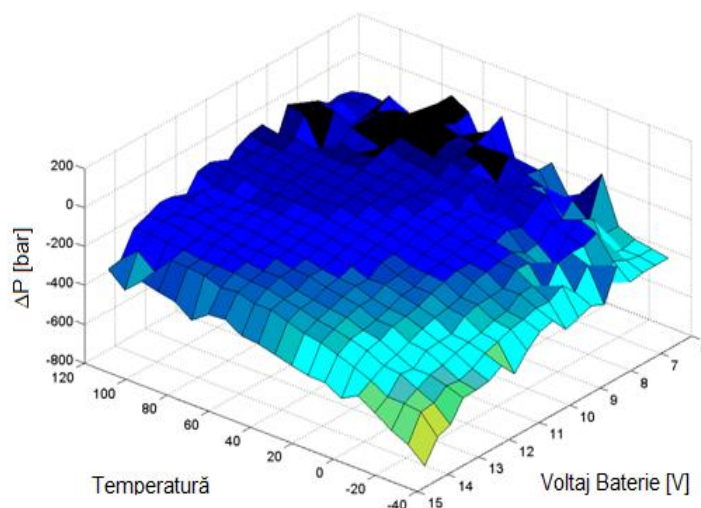


Figura 0.8 Valorile presiunii limită corelată cu temperatura și voltajul sursei

În acest capitol se descrie evaluarea performanțelor funcției de ABS a sistemului electronic de frânare prin folosirea modelării și simulării la nivelul validării și testării funcțiilor sistemului în etapa de integrare.

Platforma colaborativă folosește baza de date cu constrângeri definite în etapele de dezvoltare anterioare ca parametri de intrare pentru simularea și analiza performanței sistemului. De aici rezultatele analizei determină modificarea constrângerilor pentru optimizări ulterioare pentru asigurarea calității prin evaluarea impactului toleranțelor datorate producției în serie pentru componentele care compun sistemul mecatronic (mecanice, hidraulice, electrice și electronice)

Simularea de tip Monte-Carlo este o metodă de evaluare iterativă a modelelor deterministice care folosesc seturi de numere aleatoare ca parametri de intrare. Această metodă a fost implementată pentru funcția de ABS a sistemului de frânare, care implică mai mulți parametri variabili și care are ca scop estimarea performanței sistemului pentru un eșantion de un milion de unități produse. Un astfel de studiu este relevant în activitatea de control al calității prin analiza impactului toleranțelor datorate producției în serie.

Contribuții privind proiectarea detaliată la nivelul componentelor

Platforma colaborativă de analiză parametrică pentru sisteme mecatronice propusă plasează activitatea de simularea ca fiind direct corelată cu *folosirea constrângerilor specifice domeniului* ca date de intrare pentru *proiectare modelare și simulare la nivel micro* și ca rezultat modificarea acestora în urma evaluării în funcție de rezultatele obținute.

În cadrul acestui capitol motorul de curent continuu, parte componentă a sistemului de frânare care acționează pompa hidraulică în timpul funcțiilor de ABS și ESP este analizată pentru a exemplifica rolul platformei colaborative la nivelul de proiectare specifică (implementare). Simularea specifică are loc în funcție de domeniul de proiectare astfel că în acest caz este folosită simularea cu element finit pentru magnetism. Parametri pentru modelare și simulare sunt dați de:

- Proiectarea specifică CAD – design (parametri constructivi)
- Parametri funcționali (din evaluările de la nivelurile de analiză anterioare)
- Parametri externi (din analize de la nivelurile proiectare conceptuală)

Obiectivele simulării sunt de evaluarea constrângerilor definite în etapele anterioare:

- **Constrângeri ale parametrilor funcționali:** din măsurătorile analizei temperatura în habitacul motor are limite între valorile $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ și $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pentru aceste valori ale temperaturii motorul electric trebuie să păstreze aceiași performanțe adică aproximativ aceiași valoare a cuplului pe care îl dezvoltă.
- **Constrângeri ai parametri constructivi:** pornind de la motorul electric existent evaluarea performanțelor în funcționare pentru diferite nivele de sarcină constituie o analiză parametrică care poate duce la modificarea parametrilor constructivi existenți. Prin simulare

se dorește identificarea valorile maxime ale intensității curentului prin motor și valoarea vitezei de rotație pentru diferite valori de sarcină.

Simularea numerică folosind metoda elementelor finite

Numeroase fenomene fizice întâlnite în știință și inginerie pot fi matematic descrise prin ecuații diferențiale cu derivate parțiale (EDDP). În general, rezolvarea acestor ecuații prin procedee clasice analitice este aproape imposibilă pentru forme geometrice arbitrare. Metoda elementelor finite (MEF) este un procedeu numeric prin care EDDP pot fi rezolvate aproximativ. Metoda elementelor finite are la bază alegerea unor funcții de aproximare pentru rezolvarea EDDP. Modelarea cu elemente finite (EF) este utilizată în diferite domenii pentru rezolvarea problemelor de analiză statică sau dinamică: mecanica solidului deformabil, mecanica fluidelor, electromagnetism. Simularea numerică cu elemente finite are un impact important asupra etapelor de proiectare a proceselor mecanice, termice, electrice și combinații ale acestora, simulând cât mai apropiat de realitate comportamentul fizic. Cu ajutorul programelor de simulare numerică și a modelelor numerice bine implementate se pot face estimări cu grad mare de precizie referitoare la modul de funcționare unor elemente ale unui produs astfel încât optimizarea acestora poate fi făcută încă dinaintea producerii primului prototip. Analiza FEM poate fi împărțită în patru etape:

- Pre-procesare:

Acesta este etapa în care un program CAD cu ajutorul căruia se modelează geometria pentru care problema matematic descrisă prin ecuații diferențiale cu derivate parțiale trebuie să fie rezolvată, precum și definirea proprietăților materialelor și condiții limită. Fișiere CATIA pot fi importate pentru a facilita analiza geometriilor existente.

- Discretizarea geometriei:

Este partea esențială a procesului de analiză cu element finit. În FEM, domeniul ales este subdivizat sau "discretizat" în regiuni mici, numite "cu element finit". De exemplu, în aplicațiile 2D, domeniul total este discretizat în zone finite, cum ar fi triunghiuri. Puncte care definesc triunghiurile sunt "noduri" sau "gradul de libertate", în timp ce triunghiul sine este "elementul". Ansamblul de elemente se numește "mesh, adică plasă".

- Solver-ul

Are un set de fișiere de date care descriu problema și rezolvă ecuațiile lui Maxwell relevante pentru a obține valorile pentru câmpul magnetic prin domeniul ales.

- Rezultatele

Sunt partea de post-procesare, aceasta este partea de grafică a programului de analiză cu elemente finite și care afișează forma câmpurilor magnetice și forma de contur care rezultă. Programul permite de asemenea utilizatorului de a obține grafice pentru diferite cantități de interes definite.

Componente motorului electric (*fig. 6.8*) care produc cuplul electro-magnetic și anume: statorul împreună cu magneții permanenți, rotorul împreună cu înfășurările acestuia, sunt modelate folosind programul software CATIA specializat pentru activitatea de proiectare asistată de calculator.

Pornind de la elementele motorului electric fiecare componentă a acestuia este proiectată. Pentru analiza 2D cu ajutorul elementelor finite este necesar ca din modelul CAD 3D să fie extrasă secțiunea acestuia. Secțiunea motorului (*fig. 6.9*) astfel este obținută din modelul 3D. După obținerea secțiunii motorului electric modelul CAD este importat în programul de simulare COMSOL-Multiphysics (*fig. 6.10*). Reprezentarea 2D a motorului conține toate componentele

care iau parte la producerea cuplului electro-mecanic și anume, cei 6 poli magnetici poziționați pe stator, rotorul cu cele 8 bobinele și miezul rotoric (fier).

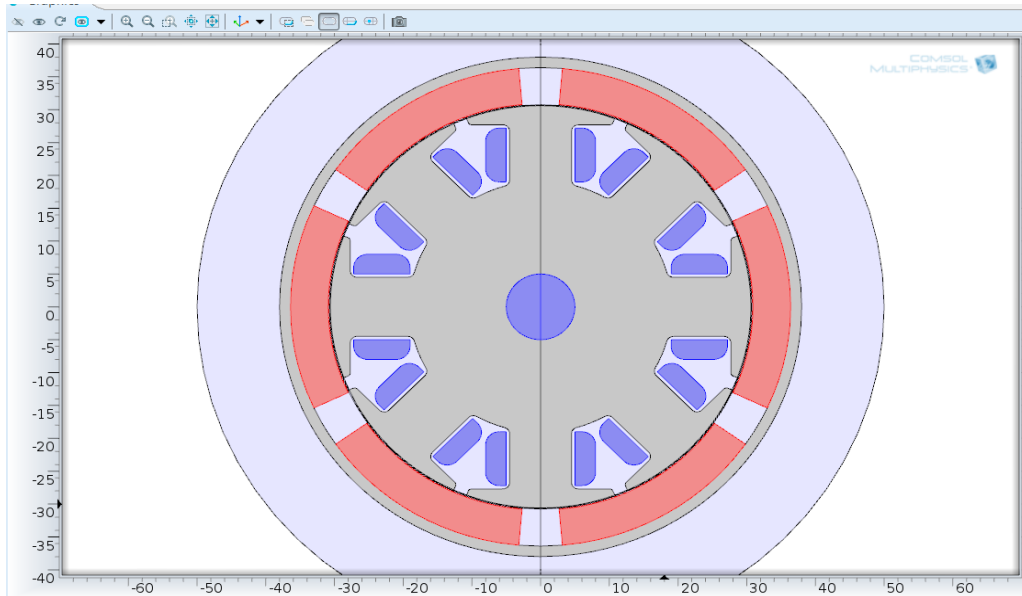


Figura 0.1 Secțiunea motorului electric importată în COMSOL.

În etapa de modelare următorul pas presupune definirea fiecărui element din geometrie astfel încât programul de simulare să poate recunoaște entitățile reprezentate în secțiune și să poată rezolva corect ecuațiile diferențiale ce definesc fenomenele electromagnetice. În cazul bobinelor rotorice în această etapă s-au stabilit convențiile de semn (*fig. 6.11*) pentru sensul curentului. Acesta parcurge fiecare bobină în parte astfel că pentru cele opt bobine rotorice este indicată polaritatea tensiunii respectiv direcția curentului astfel că, marcat cu semnul "x" este reprezentată direcția curentului în planul hârtiei și cu punct direcția curentului în afara planului hârtiei.

După stabilirea direcției curentului prin înfășurările bobinelor s-a stabilit și polaritatea câmpului magnetic dezvoltate de acestea astfel că parcurgerea bobinei rotorice printr-un curent de la dreapta la stânga aceasta va avea polaritatea „N” (nord) în direcția exterioară rotorului iar pentru direcția inversă polaritatea exterioară rotorului va fi „S” (sud).

Polaritatea magneților permanenți este stabilită conform construcției motorului. Motorul are în componența lui șase perechi de poli distribuiți simetric în jurul rotorului și a căror direcție de polarizare alternează nord respectiv sud.

Direcția curentului de parcurgere a bobinelor este obținută prin examinarea înfășurărilor și a conexiunilor cu colectorul motorului. Curentul intră în rotor prin intermediul uneia dintre perii, parcurge toate bobinele rotorului în direcțiile prezentate în figura 6.11 și iese prin intermediul celeilalte perii, închizând astfel circuitul. Primul punct de contact cu armatura este prin segmentul colectorului cu care peria este în contact la un moment dat, dar din moment ce interconexiunile între bobinele individuale sunt efectuate la fiecare segment de comutare, de fapt curentul trece prin toate bobinele prin intermediul tuturor segmentelor colectorului în drumul său prin intermediul armăturii.

Când periele ating două segmente de comutare atunci bobinele corespunzătoare acestora sunt scurtcircuitate astfel încât acestea nu mai sunt parcurse de curent electric și în loc de opt bobine producătoare de lucru mecanic vor exista doar șase iar ca efect rezultat cuplul dezvoltat al motorului oscilează. Nedorita variație a cuplului apare datorită comutației la momentul în care

bobinele sunt scurtcircuitate. În figura 6.12 periiile sunt poziționate pe doua segmente care conectează bobinele 4 și 8 astfel că acestea sunt scurtcircuitate (reprezentate cu culoarea gri), deci nu sunt energizate și astfel nu produc câmp magnetic prin urmare nu participă la crearea de cuplu.

Materialele utilizate la construcția circuitelor magnetice ale mașinilor electrice se pot caracteriza după raportul intensității câmpului magnetic (H) și densitatea câmpului magnetic (B), factorul de proporționalitate fiind permeabilitatea magnetică a mediului respectiv μ (caracteristica de magnetizare).

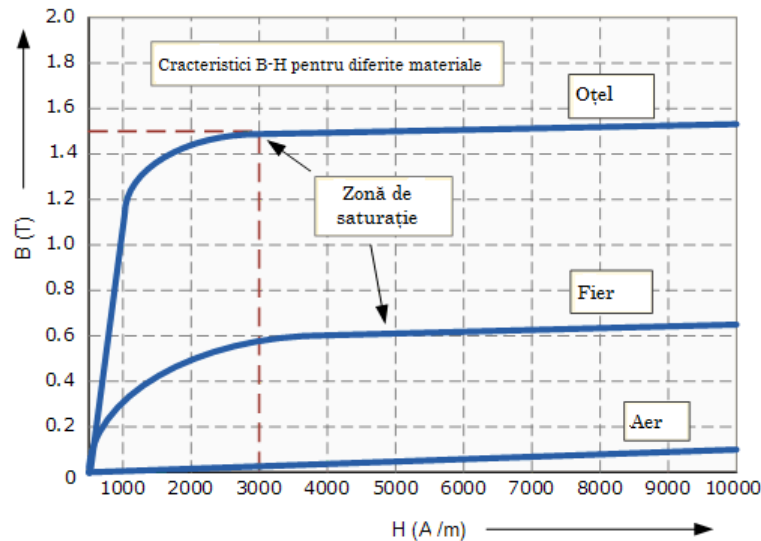


Figura 0.2 Caracteristici B-H pentru Oțel, Fier, Aer.

Setul de curbe de magnetizare din figura 6.13 reprezintă un exemplu al relației dintre B și H pentru fier, oțel și aer. Fiecare tip de material are propriul set de curbe de histerezis magnetic. Din caracteristicile de permeabilitatea magnetică se observă că densitatea de flux crește în funcție de intensitatea câmpului până când se ajunge la o anumită valoare limită de unde ea nu mai poate crește devenind aproape constantă chiar dacă intensitatea câmpului (H) continuă să crească.

Acest lucru se datorează faptului că există o limită a valorii de densitate a fluxului magnetic (B) care poate fi generată prin material și că la saturație toate liniile de câmp prin material sunt perfect aliniate. Orice creștere suplimentară nu va avea nici un efect asupra valorii iar punctul de pe grafic în care densitatea de flux atinge limita este numită zonă magnetică de saturație. De asemenea cunoscut sub numele de saturarea miezului și în exemplul din figura 6.13 punctul de saturație al curbei de oțel începe la aproximativ 3000 amperi-spire pe metru.

Fenomenul de saturație apare pentru că aranjamentul haotic aleator a structurii moleculare de bază ai materialului devin aliniați odată ce materialul este magnetizat. Deoarece intensitatea câmpului magnetic (H) crește, această structură moleculară devine tot mai aliniată până când se ajunge la o aliniere perfectă producătoare de densitate maximă de flux (B). O creștere suplimentară a intensității câmpului magnetic (H) datorită unei creșteri a curentului electric care parcurge bobina va avea puține sau nici un efect peste o anumită limită.

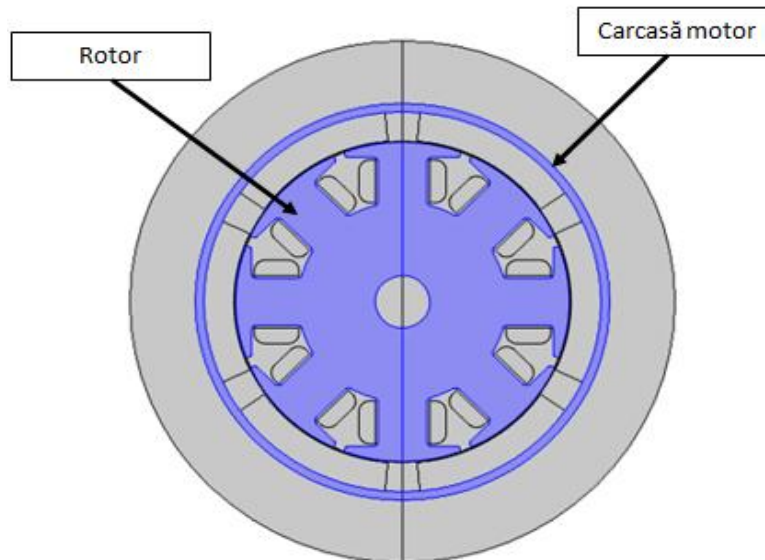


Figura 0.3 Elementele geometriei pentru care curba B-H pentru oțel este folosită.

Următorul pas care trebuie întreprins când se elaborează un model cu elemente finite (EF) este cel al discretizării structurii, adică trecerea de la continuul fizic al materialului din care este executată structura, la modelul geometric discret pentru care se va face analiza cu elemente finite (FEA). Prin discretizarea unei structuri se înțelege sub-împărțirea acesteia într-un număr de elemente finite sau rețea de puncte de integrare numerică interconectate în nodurile lor exterioare. În cadrul acestei operații se aleg tipurile de elemente finite care vor fi utilizate și se stabilește repartiția lor pe domeniul discretizat, rezultând astfel numărul, dimensiunea și forma acestora.

Pentru secțiunea bidimensională se utilizează pentru modelare elemente finite triunghiulare. Elementele triunghiulare asigură posibilități mai largi în ceea ce privește aproximarea geometriei conturilor, în timp ce elementele patrulare reproduc mai corect distribuția de tensiuni. Conform celor mai bune practici în discretizarea geometriilor este indicată să se utilizeze elemente cât mai apropiate de triunghiul echilateral. Nu se recomandă utilizarea triunghiurilor cu unghi foarte obtuz sau a elementelor patrulare prea alungite. Discretizarea trebuie să se realizeze, pe de o parte, printr-o rețea cât mai simplă și cât mai uniformă de linii și (sau) suprafețe pentru ca elaborarea modelului, prelucrarea și interpretarea rezultatelor să fie cât mai comode. Pentru rețele relativ uniforme efortul de elaborare al modelului se poate reduce considerabil prin utilizarea generării automate a nodurilor și elementelor.

Pe de altă parte, nu este totdeauna posibil ca rețeaua să fie uniformă, deoarece structura poate avea zone în care există discontinuități geometrice sau regiuni în care este necesar un volum mai mare de informații și deci de mai multe noduri și elemente. Este cazul acelor zone în care gradientii tensiunilor sunt relativ mari. În aceste zone discretizarea trebuie să fie mai fină decât pentru restul structurii.

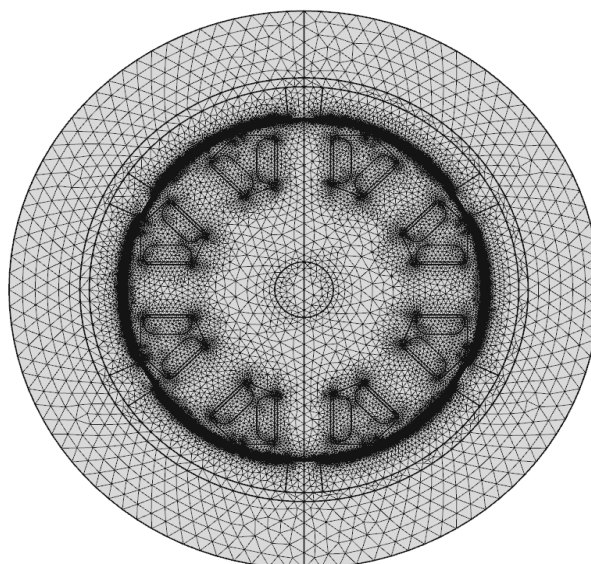


Figura 0.4 Discretizarea secțiunii motorului electric.

Concluzii, contribuții proprii și noi direcții de cercetare

Până în prezent, multe eforturi au fost depuse pentru crearea unor modele de proiectare și suport software aferent care să aducă avantaje prin îmbunătățirea comunicării inter-disciplinare în proiectarea sistemelor mecatronice. Cu toate acestea, după evaluarea diferitelor modele de proiectare din punctul de vedere al facilităților de colaborare între domenii diferite ale ingineriei pe care acestea le oferă, se evidențiază că unele deficiențe în colaborarea multi-disciplinară la nivelul de management al schimbului de informații între diferite domenii ale ingineriei dar și lipsa instrumentelor software integrate. Întrebarea principală la care prezenta lucrare răspunde este: Cum se poate îmbunătăți proiectarea sistemelor mecatronice pentru dezvoltarea mai rapidă și eficientă în medii industriale de dezvoltare? Încă de la început, platformele colaborative au fost concepute pentru realizarea integrării mai multor domenii de inginerie sub aceleași model de proiectare.

Teza de doctorat are un caracter multidisciplinar, construindu-se în baza unor concepte din domenii precum proiectarea sistemelor mecatronice, matematică, fizică, electro-mecanică, statistică, modelare și simulare.

În ideea îmbunătățirii proceselor de proiectare și dezvoltare a sistemelor mecatronice în industria automotive, este propusă implementarea și folosirea unei platforme de analiză parametrică cu specific colaborativ între diferite domenii ale ingineriei. Aceasta este bazată pe modelul standard de dezvoltare a sistemelor mecatronice VDI2206. Astfel, sunt concepute, dezvoltate și implementate două metode de analiză parametrică pentru nivelul de proiectare conceptuală, atât pentru dezvoltarea funcțiilor unui sistem mecatronic cât și pentru testarea și validarea acestora într-un ciclu macro al dezvoltării. De asemenea, în lucrare sunt prezentate contribuții ale platformei de analiză parametrică referitoare la dezvoltarea la nivel de proiectare detaliată. Pentru validarea platformei propuse, studiul de caz este efectuat pe sistemul electronic de frânare al autovehiculelor de pasageri pentru funcția de recuperare a energiei de frânare, precum și pentru funcția de ABS. Tehnicile propuse aici folosesc metode de achiziții de date,

algoritmi de analiză statistică, simularea de tip Monte-Carlo, simularea cu element finit și proiectare CAD.

În această lucrare, se aduc contribuții la dezvoltarea metodelor proiectare a sistemelor mecatronice prin creșterea nivelului de colaborare inter-disciplinară la nivel micro și macro (exemplificare aplicată unui sistem mecatronic) prin adoptarea unor diferite tehnici de proiectare într-un proces de lucru colaborative astfel încât să introducă un mod mai eficient de lucru utilizând un model axat pe centralizarea informațiilor referitoare la parametri unui sistem mecatronic și de a facilita utilizarea unor informații în mod coordonat, consecvent care să identifice ușor deciziile optime. De asemenea îmbunătățește calitatea procesului de proiectare, ceea ce face posibilă reducerea numărului de testări experimentale necesare pentru a punerea unui prototip în producție de serie.

În primul pas al cercetărilor este analizat comportamentul dinamic și ciclurile de funcționare pentru o flotă de șase autovehicule aflate sub observație, iar mai apoi cercetarea este extinsă pentru analiza sistemului de frânare. Sistemul de achiziție de date folosit pentru măsurarea semnalelor fizice este compus din echipamente electronice specifice conectate la rețeaua de comunicare CAN-BUS a autovehiculelor. Datele achiziționate sunt mai apoi procesate folosind un algoritm de analiză dezvoltat în MATLAB care folosește 2 tipuri de histogramme pentru evidențierea detaliată a rezultatelor. Funcția de recuperare a energiei de frânare este evaluată ca o posibilă nouă funcționalitate a sistemului. Pentru aceasta se efectuează analiza parametrică și definirea constrângerilor prin identificarea intervalului optim de recuperare a energiei cinetice.

Teza continuă cu analiza impactului toleranțelor asupra performanțelor funcției de ABS a sistemului de frânare pentru etapa de validare și testare. Toleranțele datorate producției de serie, la care se adaugă impactului factorilor perturbatori externi, pot influența negativ performanțele sistemului. Din punct de vedere al asigurării calității se dorește cunoașterea procentului de neconformitate pentru un eșantion reprezentativ de sisteme produse. În acest scop este dezvoltat modelul sistemului de frânare incluzând toate componentele sale (electrice mecanice și hidraulice) și este definit domeniul de variație pentru fiecare parametru, împreună cu distribuțiile probabilistice corespunzătoare. Mai apoi analiza toleranțelor este efectuată folosind tehnica de simulare de tip probabilistic Monte-Carlo pentru diferite condiții de exploatare.

În cadrul platformei colaborative de analiză parametrică este abordată și etapa de proiectare detaliată și dezvoltarea la nivel de componentă a sistemului. Pentru aceasta s-a realizat proiectarea CAD folosind CATIA V5 pentru motorul de curent continuu, componenta a sistemului de frânare folosită pentru acționarea pompei hidraulice. Analiza parametrică este realizată prin modelarea și simularea în mediul Matlab – Simulink, dar și printr-un model avansat care folosește metoda elementului finit și a mediului de simulare COMSOL - Multiphysics. Scopul urmărit a fost de a demonstra fezabilitatea platformei colaborative prin folosirea constrângerilor definite în diferite nivelele superioare de proiectare. Rezultatele analizei indică influența parametrilor asupra cuplului electro-magnetic dezvoltat de motor. Variația cuplului contribuie la modificări în performanța sistemului studiat urmând ca parametrii motorului să fie modificați prin schimbarea constrângerilor sau menținuți prin validarea lor.

Contribuții proprii

Prezenta teză de doctorat are un caracter inovativ aducând o serie de contribuții originale în ceea ce privește etapele principale ale dezvoltării sistemelor mecatronice în industria autovehiculelor.

Pornind de la o metodologie de cercetare care acoperă aspecte variate legate de scopul și obiectivele tezei, în urma cercetărilor efectuate precum și a rezultatelor obținute se sintetizează următoarele contribuții proprii:

1. Analiza critică a asupra **modelelor actuale în domeniul proiectării sistemelor mecatronice** precum și nivelul actual în dezvoltarea unor platforme software colaborative de proiectare pentru diferite discipline și domenii ale ingineriei.
2. Analiza stadiului actual în domeniul **sistemelor mecatronice în industria producătoare de autovehicule** cu accent asupra noilor tehnologii „by-wire” și a sistemului electronic de frânare în automobilul modern.
3. **Propunerea unei platforme colaborative multidisciplinare bazat pe standardul de dezvoltare a sistemelor mecatronic VDI-2206** prin adăugarea unor elemente de comunicarea inter-disciplinară la nivel macro al ciclului de dezvoltare și exemplificarea folosirii modelului pentru diferite nivele de dezvoltare atât pentru ramura de proiectare cât și pentru cea de integrare și validare.
4. **Definirea modalității de analiză parametrică pentru ramura de proiectare conceptuală la nivelul funcțiilor sistemului** pentru funcția de recuperare a energiei de frânare. Analiza se bazează pe procesarea și interpretarea datelor achiziționate de la vehicule aflate în exploatare astfel încât prin metode de analiză statistică să poată fi identificate constrângeri de proiectare care să ducă la proiectarea optimă a sistemului încă de la începutul dezvoltării pentru evitarea efectuării a multor cicluri macro de proiectare. În exemplul folosit s-a identificat intervalul optim pentru recuperarea energiei de frânare pe bază statistică în funcție de modul de exploatare a vehiculelor aflate sub observație.
5. Proiectarea și analiza parametrică pentru ramura de **integrare verificare și testare la nivelul funcțiilor sistemului** pentru asigurarea calității prin evaluarea impactului toleranțelor datorate producției în serie pentru componentele care compun sistemul mecatronic (mecanice, hidraulice, electrice și electronice)
6. Exemplificarea folosirii constrângerilor definite la diferite nivele (sistem/subsistem/funcții) pentru etapa **de proiectarea detaliată**.