

IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI
Școala doctorală de Științe Fundamentale și Inginerești



TEZĂ DE DOCTORAT

- Rezumatul tezei de doctorat -

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA TEHNICILOR DE DIAGNOZĂ ÎN MENTENANȚA SISTEMELOR

Doctorand,

Ing. Alina MAROCA (PRICOPIE-FILIP)

Președinte:

Prof. dr. ing. Marian BARBU – decanul Facultății
de Automatică, Calculatoare, Inginerie Electrică
și Electronică

Conducător științific,

Prof. dr. ing. Sergiu CARAMAN

Membri:

Prof. dr. ing. Radu Emil PRECUP – membru
correspondent al Academiei Române

Prof. dr. ing. Liviu MICLEA

Prof. dr. ing. Laurențiu FRANGU

Seria : Ingineria sistemelor Nr. 8

GALAȚI 2021

Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul fundamental ȘTIINTE INGINEREȘTI

- Seria I 1: **Biotehnologii**
- Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**
- Seria I 3: **Inginerie electrică**
- Seria I 4: **Inginerie industrială**
- Seria I 5: **Ingineria materialelor**
- Seria I 6: **Inginerie mecanică**
- Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**
- Seria I 8: **Ingineria sistemelor**
- Seria I 9: **Inginerie și management în agricultură și dezvoltare rurală**

Domeniul fundamental ȘTIINTE SOCIALE

- Seria E 1: **Economie**
- Seria E 2: **Management**
- Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**

Domeniul fundamental ȘTIINTE UMANISTE ȘI ARTE

- Seria U 1: **Filologie- Engleză**
- Seria U 2: **Filologie- Română**
- Seria U 3: **Istorie**
- Seria U 4: **Filologie – Franceză**

Domeniul fundamental MATEMATICĂ ȘI ȘTIINTE ALE NATURII

- Seria C: **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINTE BIOLOGICE ȘI BIOMEDICALE

- Seria M: **Medicină**

Cuprins teză

INTRODUCERE	VII
INTRODUCTION	XII
ABREVIERI	1
LISTĂ FIGURI	2
LISTĂ TABELE	10
CAPITOLUL 1	11
1.1 Introducere	11
1.2 Aspecte privind fiabilitatea sistemului	13
1.2.1 Modelarea fiabilității	13
1.2.2 Indicatori de fiabilitate	15
1.2.3 Modelarea fenomenelor de defectare	16
1.3 Aspecte privind mentenanța sistemelor	18
1.3.1 Strategii de mentenanță neplanificată	19
1.3.2 Strategii de mentenanță planificată	20
1.3.3 Politici ale strategiilor de mentenanță preventive	20
1.3.4 Analiza proceselor de reînnoire	22
1.4 Aspecte privind detecția și diagnoza sistemelor	22
1.4.1 Tipuri de defecte.....	23
1.4.2 Metode de detecție a defectelor în sistemele tehnice.....	25
1.4.3 Metode de detecție a defectelor bazate pe redundanța hardware	26
1.4.4 Metodele de detecție a defectelor bazate pe model (redundanța software).....	27
1.4.5 Metode de generare a semnalelor reziduale pentru detecția defectelor	28
1.4.6 Metode de izolare a defectelor	33
1.4.7 Abordări în domeniul detecției defectelor și fiabilității sistemelor	41
1.5 Concluzii	46
CAPITOLUL 2	47
2.1 Introducere	47
2.2 Rolul și importanța elementului de execuție analizat în cadrul tezei de doctorat	47
2.3 Structura și funcționarea elementului de execuție	48
2.3.1 Subansamblele componente ale elementului de execuție.....	48
2.3.2 Modelul matematic al actuatorului	50
2.3.3 Modelul matematic al camerei pneumatice.....	52
2.3.4 Modelul matematic al valvei de control	53
2.4 Prezentarea benchmark-ului DAMADICS	53
2.5 Concluzii	55
CAPITOLUL 3	56
3.1 Introducere	56
3.2 Analiza elementului de acționare în regim staționar și dinamic	57
3.2.1 Determinarea caracteristicii statice.....	57
3.2.2 Caracteristica dinamică.....	58
3.3 Analiza funcționării normale a actuatorului în cadrul unui proces tehnologic	67
3.4 Analiza funcționării cu defect a actuatorului	70
3.5 Concluzii	87
CAPITOLUL 4	88
4.1 Introducere	88
4.2 Principii strategiei evolutive de reînnoire	88

4.3	Structura sistemului evolutiv de reînnoire	92
4.4	Particularizarea sistemului evolutiv de reînnoire pentru cazul actuatorului.....	94
4.5	Concluzii.....	96
CAPITOLUL 5.....		98
5.1	Introducere	98
5.2	Structura sistemului de diagnoză	98
5.3	Rețele neuronale artificiale	99
5.3.1	Definiție. Modelul neuronului artificial. Funcții de activare.	99
5.3.2	Arhitectura rețelelor neuronale.....	101
5.3.3	Algoritmi de învățare	105
5.4	Sistemul de detecție a defectelor	109
5.4.1	Modelarea procesului folosind rețele neuronale	109
5.4.2	Implementarea modelului realizat cu rețele neuronale în cadrul sistemului de detecție a defectelor	126
5.5	Rețeaua neuronală pentru estimarea gradului de uzură a sistemului	130
5.6	Concluzii.....	142
CAPITOLUL 6.....		143
6.1	Introducere	143
6.2	Modele Markov	143
6.3	Modelul Markov al actuatorului abordat ca studiu de caz.....	146
6.3.1	Determinarea și inițializarea modelului Markov al actuatorului. Integrarea modelului Markov în cadrul sistemului evolutiv de reînnoire	146
6.3.2	Studiu de caz - Validarea metodei prin simulare numerică	152
6.3.3	Procedura numerică de implementare a modelului de reînnoire	155
6.4	Actualizarea parametrilor modelului Markov de fiabilitate a actuatorului.....	157
6.5	Concluzii.....	158
CAPITOLUL 7.....		159
ANEXA 1		162
BIBLIOGRAFIE		167

Cuprins rezumat

INTRODUCERE	IV
CAPITOLUL 1	1
1.1 Introducere	1
1.2 Abordări în domeniul detecției defectelor și fiabilității sistemelor	2
CAPITOLUL 2	5
2.1 Structura și funcționarea elementului de execuție	5
2.1.1 Subansamblele componente ale elementului de execuție	5
CAPITOLUL 3	6
3.1 Introducere	6
3.2 Analiza elementului de acționare în regim staționar și dinamic	6
3.2.1 Determinarea caracteristicii statice	6
3.2.2 Caracteristica dinamică	6
3.3 Analiza funcționării normale a actuatorului în cadrul unui proces tehnologic	7
3.4 Analiza funcționării cu defect a actuatorului	10
3.5 Concluzii.....	10
CAPITOLUL 4	11
4.1 Introducere	11
4.2 Principiul strategiei evolutive de reînnoire	11
4.3 Structura sistemului evolutiv de reînnoire	13
4.4 Concluzii.....	14
CAPITOLUL 5	16
5.1 Introducere	16
5.2 Structura sistemului de diagnoză	16
5.3 Sistemul de detecție a defectelor	17
5.3.1 Modelarea procesului folosind rețele neuronale	17
5.3.2 Implementarea modelului realizat cu rețele neuronale în cadrul sistemului de detecție a defectelor	24
5.4 Rețeaua neuronală pentru estimarea gradului de uzură a sistemului	26
CAPITOLUL 6	32
6.1 Modelul Markov al actuatorului abordat ca studiu de caz.....	32
6.2.1 Determinarea și inițializarea modelului Markov al actuatorului. Integrarea modelului Markov în cadrul sistemului evolutiv de reînnoire	32
6.2.2 Studiu de caz - Validarea metodei prin simulare numerică	34
CAPITOLUL 7	37
BIBLIOGRAFIE.....	40

Introducere

Calitatea vieții moderne este puternic dependentă de disponibilitatea și funcționarea corectă a sistemelor tehnologice complexe. Procesele de fabricație, de exemplu, implică linii automate de fabricație, instalații tehnologice diferite interconectate între ele, care trebuie să își îndeplinească corect scopul per ansamblu pentru a asigura o producție continuă și de înaltă calitate. În aceeași măsură, sistemele financiare sunt astăzi dependente de funcționarea rețelelor de distribuție a energiei electrice și a celor de comunicație IT. În cazul acestora, un defect apărut la nivelul unei singure componente poate avea efecte majore asupra disponibilității întregului sistem. Cu toate că exemplele mai sus menționate fac parte din categoria sistemelor necritice, ele nepunând în pericol viața umană în cazul “căderii” lor, este de la sine înțeles modul în care defectarea acestora afectează calitatea vieții. În cazul sistemelor critice, a căror defectare pune în pericol nu numai viața umană, dar și mediul înconjurător, cu atât mai importantă este implementarea unor strategii de mentenanță care să mențină disponibilitatea echipamentului și să ofere timp adecvat de intervenție în vederea evitării eventualelor catastrofe.

Cu alte cuvinte, se constată astăzi că omenirea este dependentă de disponibilitatea sistemelor tehnologice și, prin urmare, este mai mult decât firesc să se investească din ce în ce mai mult în încercarea de a dezvolta strategii și politici de mentenanță cât mai eficiente.

Deși o lungă perioadă de timp agenții economici și-au concentrat atenția pe eficientizarea activității de producție în sine, considerând mentenanța a fi doar un “rău necesar” (o activitate care trebuie întreprinsă doar în cazul defectării instalației), odată cu accentuarea cercetărilor în domeniu și conturarea fiabilității și mentenanței ca domenii de sine stătătoare, aceștia conferă activității de mentenanță un rol central în activitatea de bază.

Astfel, mentenanța se constituie într-o preocupare la nivel de management, cu responsabilități nu numai la nivel de utilizator al instalației, ci a tuturor celor implicați în decizii atât la nivel economic, cât și la nivel productiv. Astăzi mentenanța este parte integrantă din managementul oricărei companii care dorește să se impună pe piață, având conexiuni și implicații în toate zonele de management [1]–[3]. Prin urmare, ceea ce se întâlnește în literatura de specialitate sub numele de „managementul mentenanței” ar trebui să acopere fiecare etapă din ciclul de viață a sistemului tehnic (instalații, mașini, echipamente și facilități), specificațiile, planificarea, funcționarea, evaluarea performanțelor și soluționarea problemelor apărute pe parcursul desfășurării procesului. Mai mult decât atât, managementul mentenanței presupune o integrare a strategiei de mentenanță cu strategiile tuturor celorlalte zone de management ale companiei. Impactul favorabil, de necontestat, pe care strategiile de mentenanță îl au asupra extinderii fiabilității sistemului/echipamentului, este documentat și demonstrat în lucrări precum: [4]–[6]. În [7] poate fi consultată o trecere în revistă detaliată a literaturii de specialitate, lucrări publicate în domeniul strategiilor de mentenanță, a modelelor de decizie dezvoltate în vederea alegerii strategiei de mentenanță adecvată unui anumit tip de echipament sau unei industrii particulare, a modelelor dezvoltate ca suport pentru implementarea strategiei de mentenanță – dovada concludentă a preocupării prezente în acest domeniu și a locului central pe care mentenanța îl ocupă actualmente în cadrul managementului organizațional.

Strategiile de mentenanță de ultimă oră folosesc sisteme de monitorizare a stării sistemelor în timp real, care permit o supervizare on-line a proceselor automate și, deci, identificarea defectelor în timp real. Această abordare permite o organizare eficientă a tuturor structurilor de management în vederea programării unei întreruperi a procesului și reînnoirii acestuia cu costuri colaterale minime (aprovizionare din timp a pieselor de schimb, pregătirea resursei umane necesară intervenției, reorganizarea activității de producție cu programarea altor activități care nu implică instalația tehnologică etc.), sau, în cazul sistemelor critice, o reconfigurare a sistemului și acțiuni imediate de restabilire a acestuia.

Pe de altă parte, sistemele de control automat au o importanță deosebită în controlul eficient al procesului tehnologic, în concordanță cu solicitările procesului, dar și cu eventualele deviații care pot apărea în timpul exploatării (defecte, modificări ale parametrilor etc.). Pentru ca sistemul automat de control să poată lua decizia corectă în sensul menținerii disponibilității sistemului și funcționării lui în limite acceptabile de performanță, este necesar un sistem de detecție și diagnoză performant.

Performanța unui sistem de diagnoză rezidă în următoarele aspecte:

- rapiditate: abilitatea sistemului de diagnoză de a detecta și de a identifica defectul cu întârzieri minime;
- robustețe: capacitatea de a distinge între o deviație de comportament a sistemului (defect real) și prezența perturbațiilor sau a variațiilor inevitabile ale parametrilor sistemului (alarmă falsă);
- sensibilitate: capacitatea sistemului de a îndeplini obiectivele de performanță în prezența incertitudinilor inerente de modelare și a incertitudinii datelor măsurate.

Obținerea tuturor acestor deziderate de la sistemul de detecție și diagnoză a defectelor (în lb. engl. FDI – Fault Detection and Isolation) este o sarcină complexă care implică multiple aspecte ce țin atât de specificul procesului tehnic și de priceperea proiectantului, dar, mai ales, de tehnologia implicată. De-a lungul timpului au fost dezvoltate diferite soluții pentru sistemele FDI, în literatura de specialitate putând fi găsite numeroase referințe pe această temă [8], [9].

Sub aspect generic, metodele de detecție și diagnoză a defectelor se împart în: metode care folosesc redundanța hardware (fizică) și metode care folosesc redundanța software (analitică). Redundanța hardware presupune utilizarea unor componente fizice de rezervă, conectate în paralel pentru măsurarea aceluiași semnal, în timp ce redundanța software presupune utilizarea unui model al procesului, care rulează în paralel cu acesta.

Metodele de detecție și izolare a defectelor bazate pe redundanța software sunt cele mai populare, existând numeroase materiale și cercetări care tratează în detaliu această temă [10], [11], acestea putând fi împărțite la rândul lor în metode bazate pe model sau metode bazate pe date euristice înregistrate din istoria de funcționare a procesului. Ideea de bază a metodelor de detecție și izolare a defectelor bazate pe model constă în utilizarea unui model matematic al procesului, care rulează în paralel cu procesul fiind condus de aceleași semnale de comandă și care furnizează estimări ale ieșirilor procesului, ce vor fi comparate cu ieșirile măsurate ale procesului real. Semnalul obținut se numește semnal rezidual și conține informația cea mai elocventă în ceea ce privește comportarea sistemului. Din evaluarea semnalului rezidual, folosind o logică de diagnoză, se extrage practic informația legată de tipul, locația și momentul apariției defectului. Performanțele acestor metode depind în mod exclusiv de "calitatea modelului" (de măsura în care în faza de proiectare a acestuia s-a ținut cont de toate aspectele implicate în dinamica procesului) și de corectitudinea măsurărilor. Incertitudinile de modelare și măsurătorile afectate de zgomot pot conduce însă la ratări ale sistemului FDI. Prin urmare, se intensifică cercetările în domeniul metodelor robuste în care să se realizeze o deosebire clară între deviațiile datorate defectelor și cele determinate de zgomote de măsură, erori de modelare sau variații ale parametrilor modelului [12].

În ultima decadă, ingineria sistemelor folosește inovațiile tehnicii de calcul și dezvoltă metode de detecție și diagnoză a defectelor care folosesc algoritmi inteligenți de diagnoză, bazați pe inteligența artificială (IA) și/sau tehnicile de învățare automată (machine learning) precum: rețele neuronale artificiale, sisteme expert, sisteme fuzzy, sisteme neuro-fuzzy, etc. existând și în această direcție numeroase materiale care pot fi consultate [13], [14].

Dacă am menționat rațiunile de ordin economic și de siguranță pentru care se justifică investiția în dezvoltarea unor strategii de mentenanță eficiente, nu trebuie uitată rațiunile legate de protecția mediului. Nu trebuie pierdut din vedere faptul că bunăstarea umană și prosperitatea, progresul tehnologic nu pot exista, nu pot avea sens decât în condițiile unui ecosistem sănătos în care operează. Având în vedere schimbările climatice din ultimii ani și

În mod deosebit fenomenele meteorologice extreme care au avut loc anul acesta, lumea academică emite un nou semnal de alarmă, mai puternic ca oricând, în ceea ce privește sănătatea precară a planetei care ne găzduiește. Propunerile Comisiei Europene conținute în directiva “8th Enviroment Action Programme” 2020/0300, stipulează măsuri concrete care vor trebui implementate la nivel global în perioada 2025 – 2030, în vederea tranziției către o economie “neutră din punct de vedere climatic, eficientă din punct de vedere a resurselor și regenerativă”. Între aceste măsuri, reducerea poluării precum și reutilizarea resurselor vor implica în mod indubitabil strategiile de mentenanță, estimându-se o creștere a interesului de cercetare în acest domeniu.

Unghiul din care este privită acum mentenanța este complet diferit față de începuturile acestui domeniu. Datorită tuturor rațiunilor menționate anterior, mentenanța a devenit astăzi o investiție care trebuie eficientizată mai degrabă, decât un cost care trebuie minimizat, fiind un domeniu în deplină expansiune care va atrage în continuare atenția atât a cercetătorilor, cât și a investitorilor.

În domeniul vast al strategiilor de mentenanță există numeroase cercetări și publicații științifice de actualitate, însă majoritatea dintre acestea tratează separat cele două aspecte: fie strategia de mentenanță, fie sistemul FDI. Principalul obiectiv al lucrării de doctorat este acela de a trata într-un mod integrat ambele aspecte menționate anterior. Astfel, se propune o soluție integrată cu rolul de a detecta defectele de funcționare ale instalației și, în același timp, de a stabili momentele optime de reînnoire ale acesteia. Calculul momentelor optime de reînnoire se face pe baza modelului Markov de fiabilitate a cărui parametri sunt furnizați de sistemul de detecție a defectelor.

Teza de doctorat aduce contribuții în domeniul strategiilor de mentenanță preventivă, realizând și implementând o strategie de mentenanță evolutivă aplicată pentru cazul particular al unui actuator, utilizat într-o instalație de fabricare a zahărului. *În cadrul tezei de doctorat au fost folosite singtagmele: actuator, element final de acționare sau element de execuție – toate acestea fiind sinonime folosite în literatura de specialitate și utilizate cu același sens.*

Lucrând în condiții dificile de mediu, alături de traductoare sau senzori, acestea sunt echipamentele cele mai predispuse la defectare din întreaga instalație tehnologică. Studii specializate relevă faptul că riscul de defectare al actuatorilor este mai mare decât cel al senzorilor [15], [16], reprezentând un procent de 40% din totalitatea defectelor care apar în instalațiile industriale și în sistemele de control aferente acestora [17].

Este astfel foarte importantă dezvoltarea unor sisteme performante de detecție a defectelor, care să identifice prezența defectelor încă din stadiul incipient al acestora, oferind astfel posibilitatea intervențiilor în timp util în vederea menținerii disponibilității actuatorului. În cadrul tezei de doctorat s-a dezvoltat o strategie optimă de mentenanță care utilizează un sistem de detecție și diagnoză a defectelor realizat cu rețele neuronale artificiale și un model statistic de degradare al sistemului. Teza de doctorat este structurată pe șapte capitole și o anexă, după cum urmează:

Capitolul 1, intitulat “*Stadiul actual privind diagnoza defectelor și a strategiilor de mentenanță*” prezintă o trecere în revistă a strategiilor de mentenanță și a tehnicilor de detecție și diagnoză a defectelor dezvoltate până la ora actuală, prezentând un stadiu al cercetărilor și realizând totodată o încadrare a temei de cercetare abordată în teza de doctorat în contextul vast al domeniilor amintite. Din perspectiva motivației temei aleasă spre cercetare în teza de doctorat, în Capitolul 1 sunt prezentate atât noțiuni de fiabilitate, cât și de mentenanță a sistemelor, încadrate în context economic. Eficiența oricărei strategii de mentenanță fiind evaluată pe baza costului ciclului de viață al echipamentului, o astfel de justificare este indispensabilă. În acest capitol sunt trecute în revistă, de asemenea, o serie de lucrări reprezentative pentru domeniul strategiilor de mentenanță și cel al sistemelor FDI.

Capitolul 2, intitulat “*Prezentarea elementului de execuție utilizat ca studiu de caz și a benchmark-ului DAMADICS*”, prezintă actuatorul pneumatic cu arc și diafragmă, ales ca

studiu de caz în vederea implementării strategiei de mentenanță preventivă propusă. Actuatorul ales spre studiu, deservește procesul de fabricare a zahărului din fabrica de zahăr Cukrownia Lublin S.A din Polonia. Sunt prezentate aici structura elementului de execuție, mărimile de comandă, precum și modelul matematic al acestuia. Tot aici este prezentată o descriere a benchmark-ului DAMADICS care reprezintă suportul tehnic pentru simularea și studiul diferitelor regimuri de funcționare ale actuatorului.

Capitolul 3, intitulat “*Analiza elementului de acționare în regim dinamic și staționar*” prezintă o analiză detaliată a regimurilor de funcționare ale unui actuator pneumatic cu arc și diafragmă. Este analizată aici influența mărimilor de intrare asupra dinamicii de funcționare a actuatorului în două situații: funcționarea normală și respectiv funcționarea cu defect a acestuia. Această analiză va folosi la generarea informațiilor necesare în vederea alegerii adecvate a seturilor de date aplicate pe intrarea actuatorului, precum și a scenariilor de funcționare utilizate în capitolul dedicat sistemului de diagnoză a defectelor.

Capitolul 4, intitulat “*Structura sistemului de mentenanță evolutiv*” prezintă soluția propusă în cadrul tezei de doctorat pentru proiectarea și implementarea unei strategii de mentenanță preventivă. Având ca și punct de plecare strategia de mentenanță prezentată în [18], în acest capitol este prezentată soluția propusă în teza de doctorat în termeni comparativi cu aceea de la care s-a pornit. Elementul inovativ introdus de această soluție constă într-o actualizare în timp real a *parametrilor* modelului Markov de degradare a echipamentului (viteza de uzură), cu valori estimate din regimul curent de funcționare a echipamentului. Actualizând direct parametrii de uzură ai modelului Markov (și nu furnizându-i acestuia corecții ale probabilităților de stare - precum în [18]), se așteaptă ca soluția propusă să asigure o precizie mai mare a subsistemului de fiabilitate al echipamentului.

Capitolul 5, intitulat “*Sistemul de detecție al defectelor*” prezintă soluția adoptată în cadrul tezei de doctorat pentru proiectarea sistemului de diagnoză din cadrul sistemului evolutiv de reînnoire. În cadrul acestui capitol, obiectivul constă în proiectarea unui sistem automat de diagnoză a defectelor, care să monitorizeze permanent starea sistemului, detectând apariția atât a defectelor majore, cât, mai ales, a celor cu evoluție graduală. Sistemul de diagnoză astfel proiectat, evaluează permanent starea de uzură a echipamentului și emite estimări periodice ale gradului de uzură - generând o alarmă în cazul în care aceasta depășește pragul minim acceptat ca fiind sigur pentru echipament și performanțele procesului tehnologic. În secțiunea 5.2 a capitolului 5 este prezentată metoda aleasă pentru realizarea unui astfel de sistem de diagnoză. Pornind de la particularitățile procesului ales ca studiu de caz, s-a ales și s-a argumentat - metoda de detecție a defectelor bazată pe calculul reziduurilor, utilizând un model neuronal. În acest sens, în secțiunea 5.3 a capitolului, se prezintă o introducere succintă în domeniul rețelelor neuronale artificiale, fiind prezentate aici arhitecturile rețelelor neuronale și algoritmi de antrenare existenți în literatura de specialitate, pentru ca în secțiunea 5.4 să fie prezentată proiectarea unei rețele neuronale pentru studiul de caz ales. Secțiunea 5.5 prezintă proiectarea rețelei neuronale pentru evaluarea gradului de uzură a echipamentului, iar secțiunea 5.6 sintetizează concluziile desprinse din procedura de antrenare, validare și testare a sistemului de detecție a defectelor astfel proiectat.

Capitolul 6, intitulat “*Sistemul de fiabilitate. Studiu de caz*” prezintă procedura de proiectare a modelului Markov de degradare a unui echipament, cu particularizare pe studiul de caz. Tot aici este aplicată și implementată strategia de mentenanță evolutivă propusă în cadrul tezei de doctorat pe cazul particular al elementului de execuție, fiind determinat timpul optim de reînnoire specific acestuia.

Capitolul 7, intitulat “*Concluzii finale*”, prezintă o sinteză a concluziilor desprinse în timpul cercetărilor realizate în cadrul tezei de doctorat, o trecere în revistă a contribuțiilor originale aduse în domeniul vast al strategiilor de mentenanță, precum și direcțiile ulterioare de cercetare.

Anexa 1 aduce completări referitoare la fenomenul frecării și al comportamentelor nedorite pe care prezența acestui fenomen le aduce cu sine în dinamica actuatorului.

Capitolul 1

Stadiul actual privind diagnoza defectelor și a strategiilor de mentenanță

1.1 Introducere

În contextul economic actual, în care competitivitatea agenților economici este mai acerbă ca oricând, accentul strategiilor de management organizațional este centrat la nivelul calității și costului produsului final. Din dorința obținerii unei profitabilități maxime, jucătorii economici de pe piață investesc mai mult ca oricând în dezvoltarea unei infrastructuri de management, care să asigure o valorificare maximă a resurselor cu un cost minim posibil. La nivelul cheltuielilor de producție, un procent important revine cheltuielilor cu activitățile de mentenanță. Costurile de mentenanță depind de specificul industriei și au fost evaluate ca reprezentând 15% ÷ 40% din costurile de producție [19], [20] sau chiar 70% din costul total de producție [21], [22].

O soluție pentru eliminarea întreruperilor neplanificate rezidă în executarea unor reînnoiri preventive, crescând astfel fiabilitatea sistemului în timp. Se pune însă problema cât de dese ar trebui să fie aceste reînnoiri. Realizarea activităților de mentenanță cu o frecvență redusă s-ar putea concretiza în întreruperi neașteptate care generează de fapt cele mai mari pierderi financiare de aproximativ trei, patru ori mai mari decât în cazul întreruperilor planificate, iar pe de altă parte, prea multă mentenanță, realizată cu o frecvență prea mare, s-ar concretiza tot într-o cheltuială considerabilă per total. Este necesară optimizarea acestor cheltuieli, în sensul de a determina frecvența optimă de realizare a activităților de mentenanță care să conducă la un maxim al fiabilității și a disponibilității sistemului.

În acest scop este necesară o monitorizare continuă a stării sistemului care să faciliteze furnizarea informațiilor referitoare la probabilitatea de defectare a sistemului în corelație cu condițiile curente de exploatare și istoricul de funcționare și întreținere a acestuia. Având la dispoziție astfel de informații, se pot lua decizii adecvate în vederea menținerii disponibilității sau restabilirii sistemului. Monitorizarea stării sistemului în scopul optimizării unei strategii de mentenanță este o sarcină deosebit de complexă care presupune, pe de o parte, o analiză detaliată a sistemului automat de control al procesului tehnologic, a instalației tehnologice, a fenomenelor fizice implicate în dinamica funcționării instalației și, pe de altă parte, alegerea unei strategii de mentenanță adecvate procesului dar și structurii organizaționale. De-a lungul timpului s-au dezvoltat o serie de structuri/sisteme de mentenanță bazate pe monitorizarea stării sistemului. O enumerare a acestora, fără pretenția de a fi exhaustivă, poate fi găsită în [23].

Dezvoltarea unei strategii de mentenanță eficiente, evaluată atât pe baza considerentelor economice, dar mai ales a celor legate de siguranța utilizatorului, se bazează pe un sistem automat de control tolerant la defecte. Având în vedere faptul că sistemele de control sunt cele care realizează funcționarea cu performanțe impuse a proceselor, este esențial ca acestea să fie prevăzute cu sisteme performante de detecție a defectelor, precum și cu posibilități de reconfigurare sau ajustare a controlului, astfel încât să permită funcționarea echipamentului chiar și în condițiile apariției unui defect și prevenind totodată propagarea defectului către celelalte subansamble. O analiză detaliată a acestei problematice și o trecere în revistă a cercetărilor realizate în vederea proiectării unor sisteme tolerante la defect care să asigure stabilitatea sistemului și performanțele dorite, este prezentată în [24].

Un sistem automat de control tolerant la defecte presupune, în esență, realizarea a două obiective: detecția și izolarea defectului (problema diagnozei), urmată de reconfigurarea sistemului sau readaptarea/compensarea controlului. Succesul acestor obiective depinde esențialmente de performanța sistemului de detecție și izolare a defectelor (în lb. engl. FDI – Fault Detection and Isolation). Un sistem FDI performant trebuie să fie suficient de sensibil încât să detecteze defectele încă din stadiul lor incipient și, totodată, suficient de robust încât să poată discerne între defecte reale și cele false (apărute datorită zgomotelor de măsură sau incertitudinilor parametrice - variații ale parametrilor) și să poată realiza aceste sarcini cu rapiditate. În vederea realizării tuturor acestor deziderate, pragul de alarmare trebuie ales cu prudență, admitând un compromis minim în funcție de specificul procesului deservit.

A doua problemă care trebuie abordată este cea a analizei mentenanței și fiabilității sistemului. În mod evident, scopul este de a prelungi viața sistemului prin reparații periodice, ceea ce necesită o predicție cât mai exactă a timpului optim de reînnoire. Toate aceste aspecte fiind enumerate, devin evidente multiplele motive pentru care mentenanța sistemelor s-a constituit într-un domeniu distinct de cercetare având numeroase interdependențe atât cu domeniul economic, cât și cu cel ingineresc, valorificând progresele domeniului tehnologic din ultima perioadă. Domeniul mentenanței și fiabilității echipamentelor a căpătat o atenție deosebită din partea mediului academic, fiind dezvoltate, în ultima decadă, numeroase strategii și politici de mentenanță, modele de decizie care să sprijine agenții economici în alegerea unei anumite politici de mentenanță adecvată specificului activității lor, modele suport pentru implementarea strategiilor de mentenanță etc. În același timp, este important de amintit că ingineria sistemelor contribuie cu dezvoltarea unor sisteme de control automat tolerante la defecte, a unor sisteme FDI realizate cu tehnici computaționale noi, aducând, în acest fel, contribuții importante.

1.2 Abordări în domeniul detecției defectelor și fiabilității sistemelor

O cercetare de referință care abordează strategiile de mentenanță în ansamblul lor, s-a realizat chiar în cadrul colectivului din Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați. În [18], este propusă o strategie de reînnoire preventivă, de tip evolutiv. Principiul acestei strategii este rezultatul unor cercetări realizate de dr. ing. Mărășescu Nicolae sub îndrumarea profesorului Emil Ceangă și reprezintă o contribuție unică în domeniul mentenanței sistemelor automate.

Acest principiu este ilustrat în Fig. 1.30. Obiectivul strategiei evolutive de reînnoire este acela de a evalua starea sistemului și de a actualiza modelul de fiabilitate/degradare a sistemului, în timp real, astfel încât timpul optim furnizat să reflecte întotdeauna condițiile curente de exploatare. Așa cum se observă în Fig. 1.30, strategia evolutivă de reînnoire propusă, implică trei căi de prelucrare a informației, denumite după cum urmează: calea directă, calea rapidă și calea lentă.

Calea directă are ca punct de plecare modelul Markov de fiabilitate inițializat pe baza datelor preluate din bazele de date ale experților în domeniu. În absența celorlalte două căi de prelucrare a informației se obține o strategie de mentenanță clasică, în care parametrii modelului Markov nu sunt actualizați cu date din proces, ci sunt doar presetate cu anumite valori introduse de inginerii de exploatare. Timpul optim furnizat s-ar aplica direct ciclului curent de reînnoire.

Calea de reacție rapidă conține un sistem automat de diagnoză conceput în abordare statistică și un bloc de ajustare a parametrilor modelului Markov (BAP). Sistemul de diagnoză primește informații de la procesul real (sub forma unor vectori prelucrați ai măsurărilor din sistem) și are rolul de a estima cărei clase de stări, S_i , $i=1, \dots, n$, admisă la construcția modelului Markov, îi aparțin. Probabilitățile pe care le estimează blocul de diagnoză, \tilde{P} , sunt probabilitățile efective (conform realității fizice) ale stărilor sistemului. Probabilitățile P ale modelului Markov,

se modifică în conformitate cu parametrii modelului Markov și cu inițializarea vectorului de stare. La fiecare ciclu de diagnoză, blocul de ajustare a parametrilor Markov, modifică probabilitățile P ale modelului Markov, astfel încât acestea să fie cât mai apropiate de probabilitățile \tilde{P} , estimate de sistemul de diagnoză.

Calea lentă: un sistem de reînnoire care ar conține doar calea directă și cea rapidă ar pierde din vedere informații relevante despre starea echipamentului care pot fi culese în timpul operațiunilor efective de reînnoire. Acestea pot contribui cu informații esențiale pentru sistemul de diagnoză astfel încât acesta să poată determina o estimare a stării sistemului în corelație cu datele extrase din regimurile anterioare de funcționare a echipamentului.

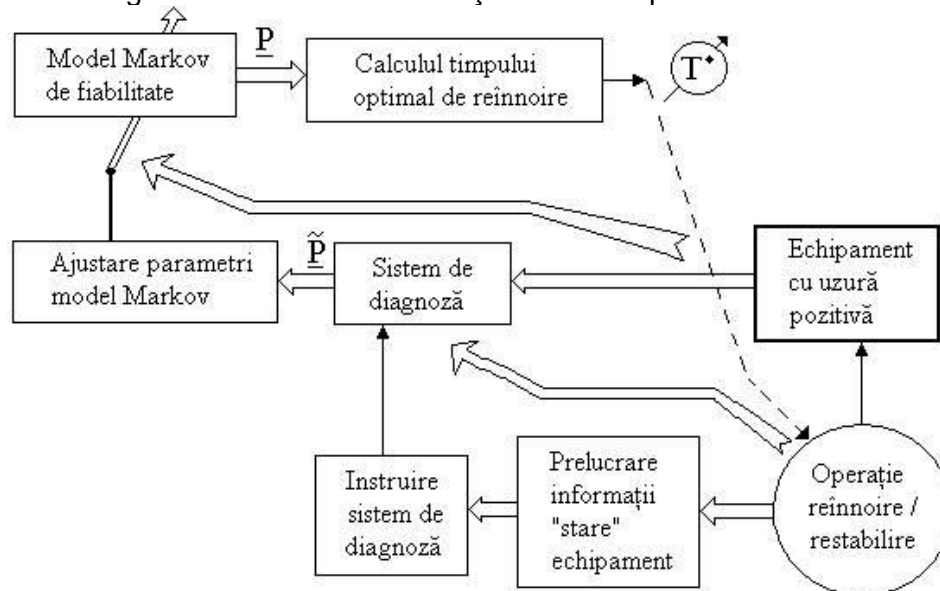


Fig. 1. 1 - Principiul strategiei evolutive de reînnoire – preluată din [18]

Sistemul evolutiv de reînnoire propus în [18] în vederea implementării principiului de reînnoire evolutiv, are structura prezentată Fig. 1.31 și este alcătuit din 3 subsisteme după cum urmează:

1. Subsistemul de reînnoire (SR)

Conține în structura sa următoarele blocuri:

- modelul Markov de fiabilitate (MM);
- modelul de reînnoire (MR);
- blocul de decizie (D).

Modelul Markov este modelul de fiabilitate al echipamentului. Structura sa este adoptată în funcție de natura și particularitățile echipamentului și de specificul procesului pe care îl deservește. Modelul Markov furnizează probabilitățile $P_i(t)$; $i = 1, 2, \dots$ astfel încât sistemul să se afle într-una din stările lui posibile la un moment dat (S_i).

Pe baza probabilităților de stare, $P_i(t)$, se calculează funcția de fiabilitate a sistemului, $R(t)$, și densitatea de probabilitate a timpului de funcționare, $f(t)$, care reprezintă intrările modelului de reînnoire (notat MR în Fig. 1.31). Modelul de reînnoire calculează și furnizează la ieșire funcția reînnoirii, $H(t)$, și funcția intensității reînnoirilor, $h(t)$. Pe baza acestor indicatori

statistici de fiabilitate, în cadrul blocului de decizie (D), pe baza criteriului de optimizare impus, se determină timpul optim de reînnoire T^* .

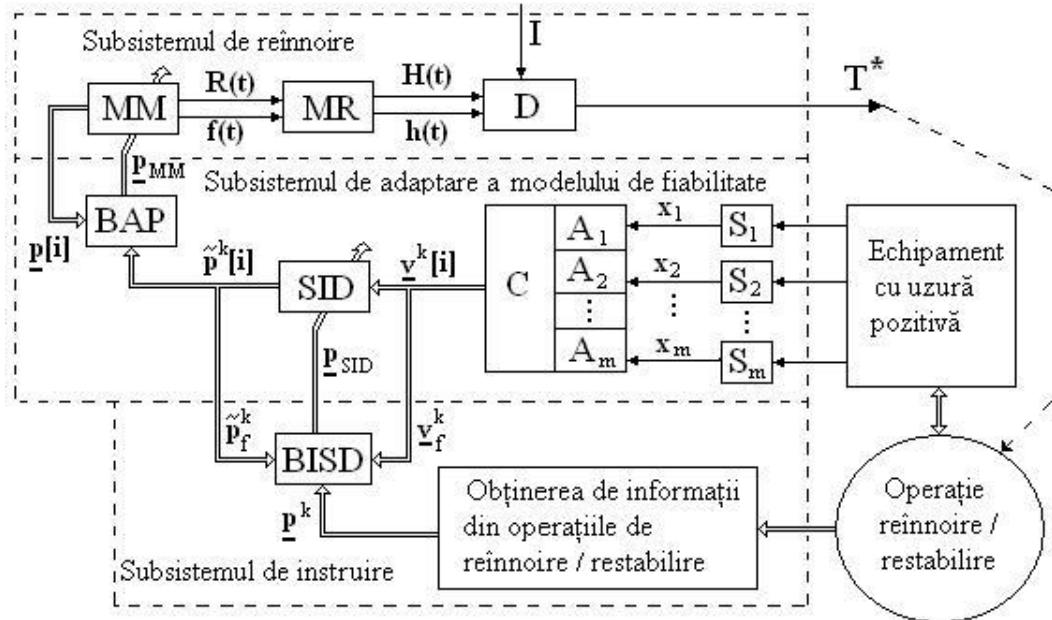


Fig. 1. 2 - Structura sistemului evolutiv de reînnoire – preluată din [18]

2. Subsistemul de adaptare a modelului Markov de fiabilitate (SAMF)

Subsistemul de adaptare a modelului Markov de fiabilitate (SAMF) este cel care furnizează către sistemul de reînnoire (SR) vectorul parametrilor curenți ai modelului Markov P_{MM} . Parametrii curenți ai modelului Markov sunt ajustați după fiecare ciclu de reînnoire de către blocul de adaptare a parametrilor (BAP) pe baza informațiilor furnizate de sistemul instruibil de diagnoză (SID). Acesta este realizat în abordare statistică și furnizează ciclic estimări ale probabilităților $\tilde{p}^k[i]$, stabilite pe baza prelucrării vectorilor $v^k[i]$ ai mărimilor măsurate din sistemul fizic supervizat, stabilite ca mărimi criteriu pentru diagnoză.

3. Subsistemul de instruire (SI)

Subsistemul de instruire folosește informațiile care se obțin privind starea efectivă a echipamentului, la fiecare reînnoire sau restabilire, completând lotul de instruire a sistemului de diagnoză astfel:

- la fiecare ciclu de reînnoire se rețin:
 - vectorul v_f^k - care reprezintă ultimul vector transmis la intrarea sistemului de diagnoză în cadrul ciclului curent de reînnoire (extras pe baza măsurărilor în timp real asupra procesului) și
 - vectorul p^k - obținut practic pe baza examinării stării fizice a echipamentului; vectorul p^k reprezintă "răspunsul ideal" pe care ar fi trebuit să îl dea sistemul de diagnoză;
- răspunsul efectiv al sistemului de diagnoză (SID) în ciclul curent de reînnoire, \tilde{p}_f^k , (corespunzător aplicării la intrare a vectorului v_f^k), se compară cu mărimea țintă p^k și, în funcție de eroarea rezultată, se ajustează vectorul parametrilor p_{SID} al sistemului instruibil de diagnoză;

Capitolul 2

Prezentarea elementului de execuție utilizat ca studiu de caz și a benchmark-ului DAMADICS

2.1 Structura și funcționarea elementului de execuție

2.1.1 Subansamblele componente ale elementului de execuție

Actuatorul ales pentru studiu este un actuator electro-pneumatic, cu arc și diafragmă, este alcătuit din:

- Valva/supapa de control/ventilul – utilizat pentru controlul debitului fluidelor. Schimbarea poziției supapei de control este realizată de către servomotor;
- Servomotorul pneumatic cu arc și diafragmă – este un dispozitiv acționat de un fluid, în cazul de față – aer comprimat. Fluidul acționează asupra diagramei flexibile pentru a imprima o mișcare liniară tije servomotorului. Servomotorul, prin acționarea tije, execută schimbarea poziției valvei de control (ventilului), acționând astfel asupra debitului de fluid;
- Poziționar-ul - este un dispozitiv utilizat pentru eliminarea erorilor de poziționare a tije, erori care pot fi generate de cauze interne și/sau externe precum: frecări, variații ale presiunii de alimentare, forțe hidrodinamice etc.

În schema din Fig. 2.2 este prezentată structura actuatorului, cu reprezentarea subansamblelor componente și a componentelor adiționale externe [78].

Schema sistemică generală a actuatorului este prezentată în Fig. 2.4.

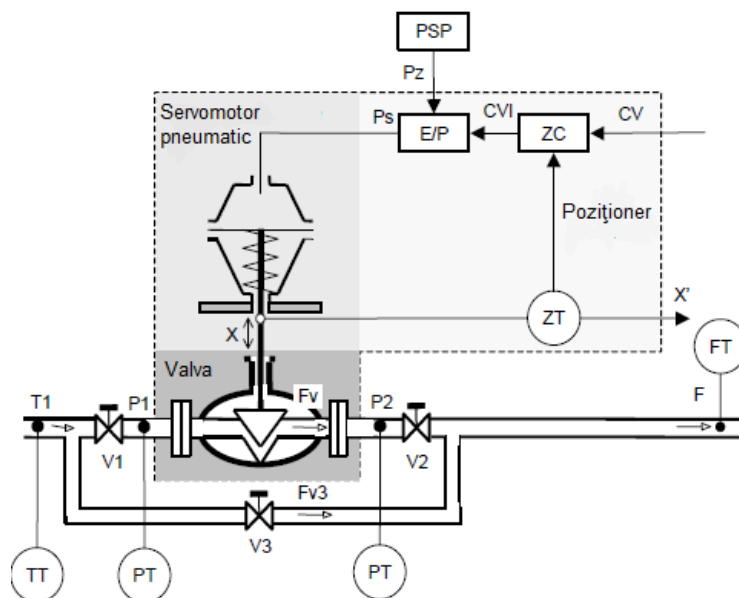


Fig. 2. 1 - Schema actuatorului cu reprezentarea subansamblelor componente și a mărimilor aferente – preluată din [78]

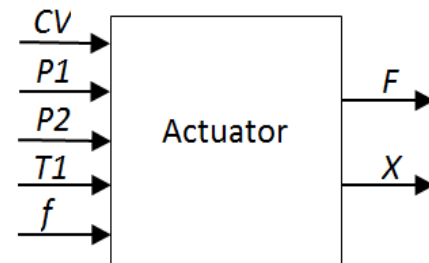


Fig. 2. 2 - Schema sistemică generală a actuatorului – preluată din [77]

Capitolul 3

Analiza elementului de acționare în regim dinamic și staționar

3.1 Introducere

În Capitolul 3 studiul s-a concentrat pe analiza funcționării unuia dintre cele trei elemente de execuție din cadrul instalației de fabricare a zahărului. În cele ce urmează s-a considerat că actuatorul funcționează în buclă deschisă și s-a realizat o analiză a funcționării acestuia considerând atât dinamica din interiorul camerei pneumatice (neglijând tipul de sarcină al elementului de execuție) cât și modul în care dinamica internă a elementului de execuție, se modifică atunci când acesta lucrează în cadrul unui proces tehnologic, fiind conectat la o sarcină externă.

3.2 Analiza elementului de acționare în regim staționar și dinamic

3.2.1 Determinarea caracteristicii statice

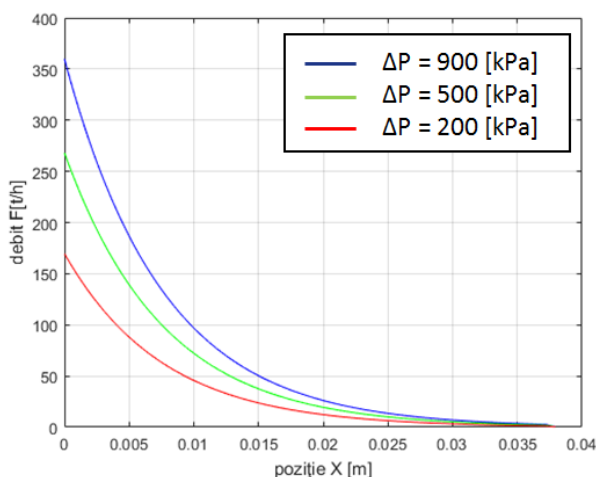


Fig. 3.1 - Caracteristica statică $F(X)$, în regim normal de funcționare

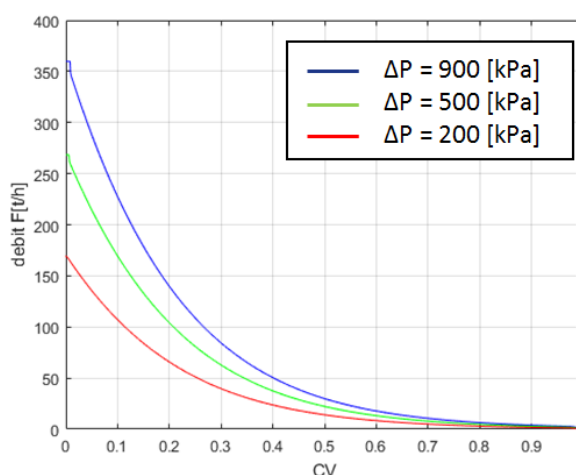


Fig. 3.2 - Caracteristica statică $F(CV)$, în regim normal de funcționare

Caracteristicile statice prezentate în Fig. 3.1 și 3.2 permit desprinderea unor informații esențiale pentru proiectarea modelului Markov aferent aplicației studiate, după cum urmează:

- valorile debitelor pe care actuatorul le poate asigura în cazul funcționării corecte (absența uzurii), pentru valori diferite ale diferențelor de presiune;
- corelația dintre valorile diferențelor de presiune și valoarea debitului asigurat în caz de funcționare corectă.

Modelul Markov aferent aplicației studiate va fi prezentat în Capitolul 6.

3.2.2 Caracteristica dinamică

În vederea studiului dinamicii de funcționare a actuatorului, atât pe cursa de urcare a tije servomotorului, cât și pe cea de coborâre, s-a considerat, ca scenariu de simulare, cazul în care tija servomotorului se află la jumătatea cursei sale complete (poziția 0.5 în valori normate) și s-a

aplicat la intrarea actuatorului o variație a semnalului de comandă CV , de tip impuls, cu valoarea 0.4 (comandând astfel deplasarea tijeii din poziția 0.5 în poziția 0.9 – ceea ce corespunde unei închideri a vanei într-un procentaj de 90% din cursa sa completă). Frontul crescător al semnalului CV s-a considerat la momentul $t = 200$ [sec.], iar cel descrescător la momentul $t = 350$ [sec.]. Pentru acest semnal de comandă, o diferență de presiune $\Delta P = 900$ [kPa] și o temperatură a lichidului $T = 43$ [°C], răspunsul actuatorului este prezentat în Fig. 3.3.

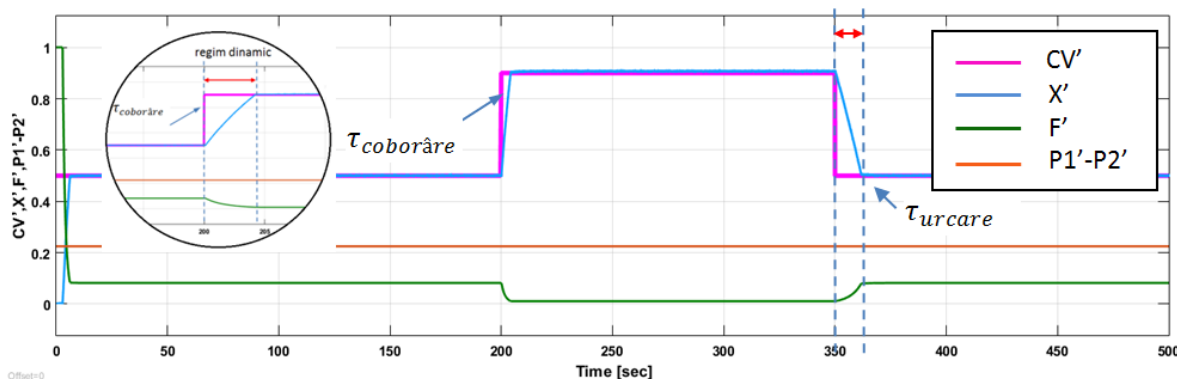


Fig. 3.3 - Răspunsul actuatorului pentru $\Delta CV' = 0.4$ (deplasare a tijeii din poziția 0.5 în poziția 0.9) în regim de funcționare “no fault”

Se observă, astfel, că actuatorul studiat are un comportament neliniar, având timpi de tranziție ai tijeii diferiți pentru cele două direcții de deplasare. Se observă că la o variație de 0.4 (o deplasare a tijeii între valorile 0.5 și 0.9 unități) a lui CV' , corespunde o deschidere a ventilului – deplasare a tijeii ventilului – de 0.39 (39.99% în valori absolute). Se observă, așadar, că tija servomotorului urmărește comanda CV foarte bine, eroarea staționară fiind, în acest caz, foarte mică.

3.3 Analiza funcționării normale a actuatorului în cadrul unui proces tehnologic

S-a conectat actuatorul la o sarcină, considerând această sarcină ca fiind un rezervor în care se acumulează lichid. Obiectivul procesului este ca rezervorul să asigure în permanență necesarul de lichid pentru restul fluxului tehnologic. Acest obiectiv înseamnă păstrarea nivelului din rezervor între două limite (minimă și maximă), prin intermediul debitului F . În Fig. 3.16 este reprezentat actuatorul în cadrul procesului, în buclă deschisă (fără reglarea nivelului în rezervor). Mărimile de intrare ale actuatorului sunt aceleași (a se vedea Fig. 2.4 din Capitolul 2), însă presiunile $P1$ și $P2$ sunt determinate acum de particularitățile și solicitările procesului.

În schema din Fig. 3.16 fluidul este pompat cu presiunea $P0$ spre actuator de către pompa de alimentare. Presiunea $P1$ depinde de presiunea din amonte, $P0$, și de debitul F . În mod evident, cu cât debitul F este mai mare, presiunea $P1$ va fi mai mică (se consideră $P0$ constantă). Presiunea $P2$ depinde atât de debitul F , cât și de sarcina h (nivelul lichidului din rezervor), așa cum se observă în schema sistemică din Fig. 3.17. Astfel, debitul de lichid corespunzător unei anumite poziții a tijeii servomotorului determină o variație de presiune atât în amonte cât și în aval de actuator. În procesul simulat în Fig. 3.17 presiunea $P2$ este modelată la nivelul blocului sarcinii hidraulice. A fost figurat un bloc de calcul separat doar pentru a pune în evidență interdependența fizică dintre debitul F și presiunea $P2$.

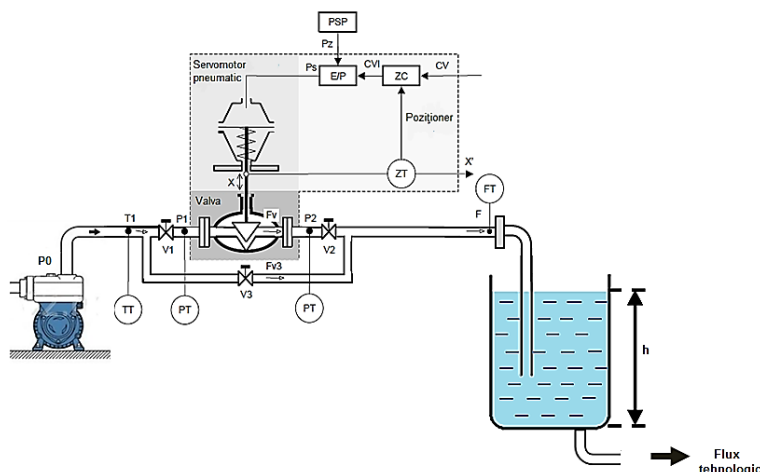


Fig. 3. 4 - Schema fizică a actuatorului în cadrul procesului considerat

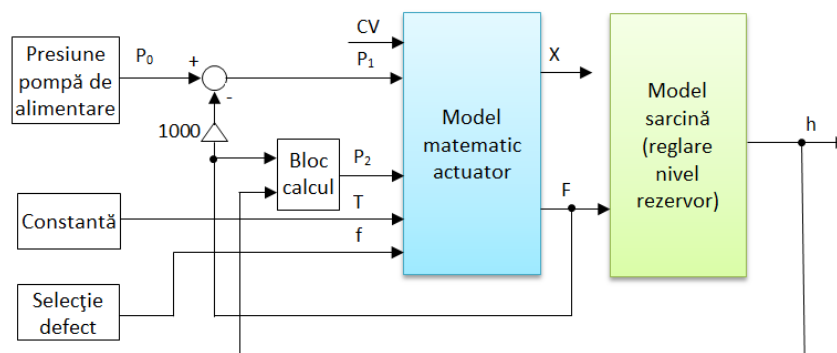


Fig. 3. 5 - Schema sistemică a actuatorului în sarcină

În continuare, au fost reluate scenariile de simulare pentru valori ale mărimilor de intrare în intervalele indicate de datele reale înregistrate în timpul funcționării unui astfel de actuator în cadrul instalației de fabricare a zahărului. În primul scenariu de simulare, s-a considerat că presiunea pompei de alimentare este constantă și că nivelul inițial al lichidului din rezervor este de 0.9 m ($h = 0.9$ m). Pentru a stabili intervalul în care poate varia diferența de presiune, ΔP , în cadrul acestui scenariu de simulare, s-au considerat situațiile în care vana este închisă în procent de 90% ($CV = 0.9$, Fig. 3.18) și, respectiv, închisă în procent de 10% ($CV' = 0.1$, Fig. 3.19). Ulterior, s-a repetat același scenariu de simulare pentru alte două valori ale presiunii de alimentare $P_0 = 2900$ [kPa] și respectiv $P_0 = 2500$ [kPa]. Rezultatele obținute sunt centralizate în tabelul 3.4.

Tabel 3. 1 - Rezultatele simulărilor pentru $h = 0.9$ m și diferite valori ale presiunii P_0

P_0 [kPa]	ΔCV	F	F [t/h]	$\Delta P'$	ΔP [kPa]	$\tau_{cobor\are}$ [sec.]	τ_{urcare} [sec.]
3195	0.9	0.011	3.94	0.231	924 kPa	10	28.1
	0.1	0.557	200	0.177	708 kPa	2.7	3.5
2900	0.9	0.009	3.22	0.158	632 kPa	8.1	26.5
	0.1	0.447	160.29	0.115	460 kPa	2	3.6
2500	0.9	0.006	2.15	0.059	236 kPa	5.6	25
	0.1	0.247	88.57	0.035	140 kPa	1.02	3.5

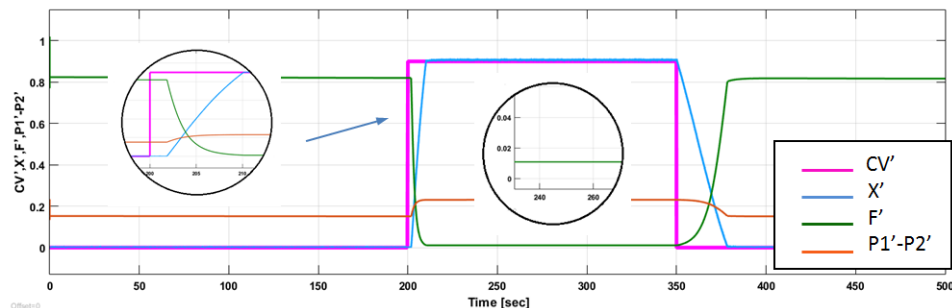


Fig. 3. 6 - Funcționarea actuatorului în cadrul procesului, pentru $CV = 90\%$, regim de funcționare normală (fără defect), cu $h = 0.9$ m și $P_0 = 3195$ [kPa]

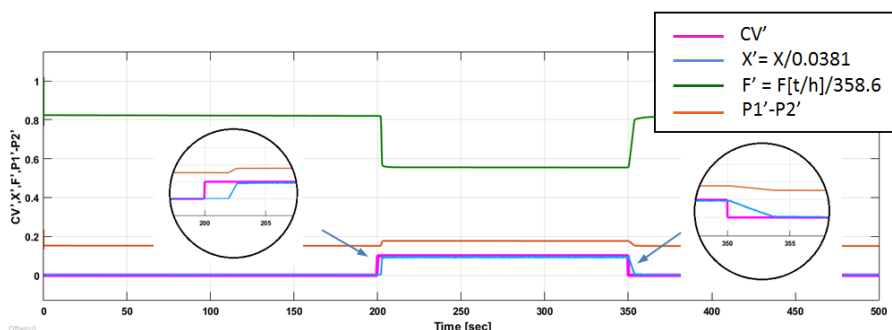


Fig. 3. 7 - Funcționarea actuatorului în cadrul unui proces, pentru $CV = 10\%$, regim de funcționare normală, $h = 0.9$ m, $P_0 = 3195$ [kPa]

Analizând în ansamblu datele obținute și centralizate în tabelul 3.4, se observă că dinamica funcționării actuatorului în cadrul procesului tehnologic este similară cu cea observată în cazul simulărilor realizate cu actuatorul neconectat la sarcină. Valorile debitelor și ale diferențelor de presiune se încadrează între aceleași limite: $\Delta P \in [140$ [kPa], 924 [kPa]], $F \in [2$ [t/h], 200 [t/h]].

În continuare, s-a studiat funcționarea actuatorului în cazul în care presiunea de alimentare P_0 este constantă iar înălțimea lichidului în cel de-al doilea rezervor se modifică. S-a studiat acest scenariu de simulare pentru diferite valori ale presiunii P_0 : 3195 [kPa], 2900 [kPa] și 2500 [kPa]. Rezultatele simulărilor au fost centralizate în Tabelul 3.5.

Tabel 3. 2 - Rezultatele simulărilor pentru un semnal de comandă $\Delta CV' = 0.9$, diferite înălțimi inițiale ale lichidului în cel de-al doilea rezervor

P_0 [kPa]	$\Delta CV'$	h	F	F [t/h]	$\Delta P'$	ΔP [kPa]	$\tau_{cobor\grave{a}re}$ [sec.]	τ_{urcare} [sec.]
3195	0.9	0.1	0.011	3.94	0.233	932	10	28.1
	0.9	0.9	0.011	3.94	0.231	924	10	28.1
	0.9	1.5	0.011	3.94	0.230	920	10	28.1
2900	0.9	0.1	0.009	3.22	0.16	640	8.2	27
	0.9	0.9	0.009	3.22	0.158	632	9.1	30
	0.9	1.5	0.009	3.22	0.156	624	8	27
2500	0.9	0.1	0.006	2.15	0.060	240	5.8	25
	0.9	0.9	0.006	2.15	0.059	236	5.6	25
	0.9	1.5	0.006	2.15	0.057	228	5.6	25

Din analiza rezultatelor din Tabelul 3.5, se observă că în cadrul procesului înălțimea lichidului din rezervor are o influență nesemnificativă asupra diferenței de presiune. Parametrul care influențează în mod semnificativ diferența de presiune este presiunea de alimentare de la pompa hidraulică, $P0$, iar acest lucru este în concordanță cu realitatea și particularitățile procesului tehnologic considerat și rolul actuatorului studiat în cadrul acestui proces.

3.4 Analiza funcționării cu defect a actuatorului

În vederea studiului regimului de funcționare al actuatorului în cazul apariției unui defect, s-a ales defectul $f2$, un defect cu evoluție lentă (depunerea graduală a sedimentelor de sare pe ventilul și/sau scaunul actuatorului), care să permită simularea funcționării sistemului în cazul unor grade diferite de uzură. S-a considerat același scenariu de funcționare ca la analiza funcționării dinamice fără defect și s-a considerat o instalare a defectului, o depunere a sărurilor în procent de 35%.

În Fig. 3.20 se poate observa că în momentul $t = 50$ [sec.], defectul $f2$ debutează și evoluează lent pe durata a 100 [sec.] ($t_{from} = 100 \text{ sec.}$), atingând intensitatea maximă de 35% indusă în cazul acestui scenariu ($f_s(\text{inf}) = 0.35$), la momentul $t = 150$ [sec.]. În acest interval de timp, sărurile se depun pe ventil, îngustând astfel gradual orificiul prin care trece lichidul. În consecință, debitul lichidului scade proporțional cu gradul de depunere a sărurilor pe durata întregului interval de timp în care acestea se depun. În momentul $t = 150$ [sec.], când intensitatea defectului $f2$ atinge maximum, debitul F' a scăzut de la valoarea 0.082 ($F = 29.40$ [t/h]) – valoare pe care o avea înainte de debutul defectului, până la valoarea 0.053 (corespunzător unui debit în valori absolute $F = 19.18$ [t/h]).

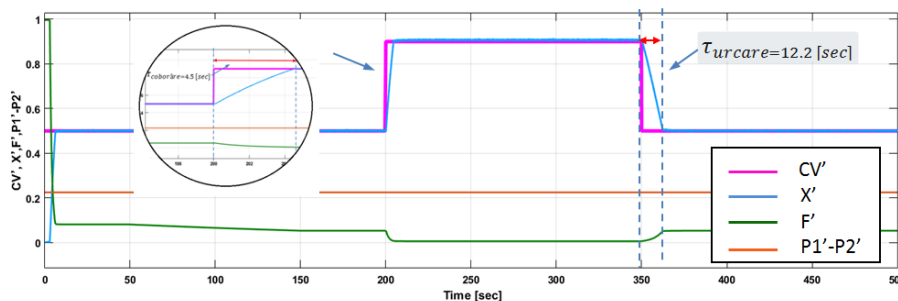


Fig. 3. 8 - Răspunsul actuatorului pentru comanda $\Delta CV = 40\%$ (deplasare a tijei din poziția 0.5 în poziția 0.9), defect $f2$ cu intensitatea 35%, dezvoltat în intervalul (50 [sec.] – 150 [sec.]

3.5 Concluzii

Concluziile desprinse din studiul detaliat al funcționării elementului de acționare realizat în cadrul acestui capitol pot fi sintetizate astfel:

- Presiunea din amonte ($P1$) va fi întotdeauna mai mare decât presiunea din aval ($P2$);
- Identificarea prezenței unui defect se face la nivelul debitului;
- În vederea identificării unui defect încă din stadiu incipient pentru orice grad de intensitate a defectului, se vor aplica scenarii în care comanda CV va deplasa tija în poziții mai mici de 80% din cursa completă;
- Pentru CV de valoare 90%, în vederea identificării defectului la nivelul debitului în faza de debut a acestuia, intensitatea maximă a defectului care poate fi aplicată este cea de 45%;
- În cazul unui semnal CV de valoare 100% (vană complet închisă) nu se va observa prezența defectului la nivelul debitului în faza de debut a acestuia (ci doar ulterior, când comanda CV va deveni mai mică).

Capitolul 4

Structura sistemului de mentenanță evolutiv de reînnoire

4.1 Introducere

Capitolul de față prezintă o strategie de mentenanță preventivă de tip evolutiv, înțelegând prin aceasta o strategie de mentenanță care facilitează cunoașterea în timp real a nivelului de fiabilitate a echipamentului, în conformitate cu condițiile actuale de exploatare, precum și determinarea unui timp optim de reînnoire în concordanță cu acestea.

4.2 Principiul strategiei evolutive de reînnoire

Principiul strategiei evolutive de reînnoire propus în teza de doctorat implică trei căi de prelucrare a informației, denumite la fel ca în [18]: *calea directă*, *calea rapidă* și *calea lentă*, reprezentate în Fig. 4.1.

Calea directă

Calea directă reprezintă practic implementarea modelului de fiabilitate a echipamentului. Punctul de plecare îl reprezintă modelul Markov de degradare a echipamentului ai cărui parametri sunt inițializați cu valori extrase din bazele de date în domeniu.

În absența celorlalte două căi de prelucrare a informației, s-ar obține o strategie de mentenanță clasică, în care parametrii modelului Markov nu ar fi actualizați cu date din proces, ci ar fi doar presetați cu anumite valori introduse de inginerii de exploatare. Timpul optim furnizat s-ar aplica, în acest caz, *direct* ciclului curent de reînnoire – de unde și denumirea buclei în discuție.

Calea rapidă

Calea de reacție rapidă propusă în teza de doctorat conține un sistem de diagnoză care procesează datele extrase din proces și furnizează informații referitoare la starea curentă a sistemului, necesare pentru actualizarea modelului Markov de fiabilitate. Sistemul automat de diagnoză primește informații în timp real de la procesul supervizat și are în esență rolul de a evalua în permanență starea sistemului, semnalând apariția unui defect de orice natură - fie acesta un defect inopinat sau incipient. În cazul detecției defectelor incipiente, sistemul de diagnoză are rolul de a discerne dacă defectul a depășit un anumit grad de intensitate maxim acceptat (acel grad de uzură considerat ca fiind "sigur" pentru sistem – care nu pune în pericol nici echipamentul și nici procesul pe care îl deservește) și de a genera o alarmă de avertizare în cazul atingerii acestuia. De asemenea, sistemul de diagnoză evaluează starea de uzură a echipamentului în timp real și furnizează ciclic valori estimate ale vitezei de uzură, \hat{v} . Dacă gradul de încredere al acestei estimări este considerat ca fiind satisfăcător, este determinată valoarea medie a vitezei de avans a uzurii și, cu o periodicitate impusă de inginerul proiectant, aceasta se actualizează în cadrul structurii modelului Markov.

Calea lentă

Un sistem de reînnoire care ar conține doar calea directă și cea rapidă ar pierde din vedere informații relevante despre starea echipamentului care pot fi culese în timpul operațiunilor efective de reînnoire/restabilire. Acestea pot contribui cu informații esențiale pentru modelul de degradare astfel încât acesta să poată furniza o estimare a stării sistemului în corelație cu date concrete extrase din regimurile anterioare de funcționare ale echipamentului.

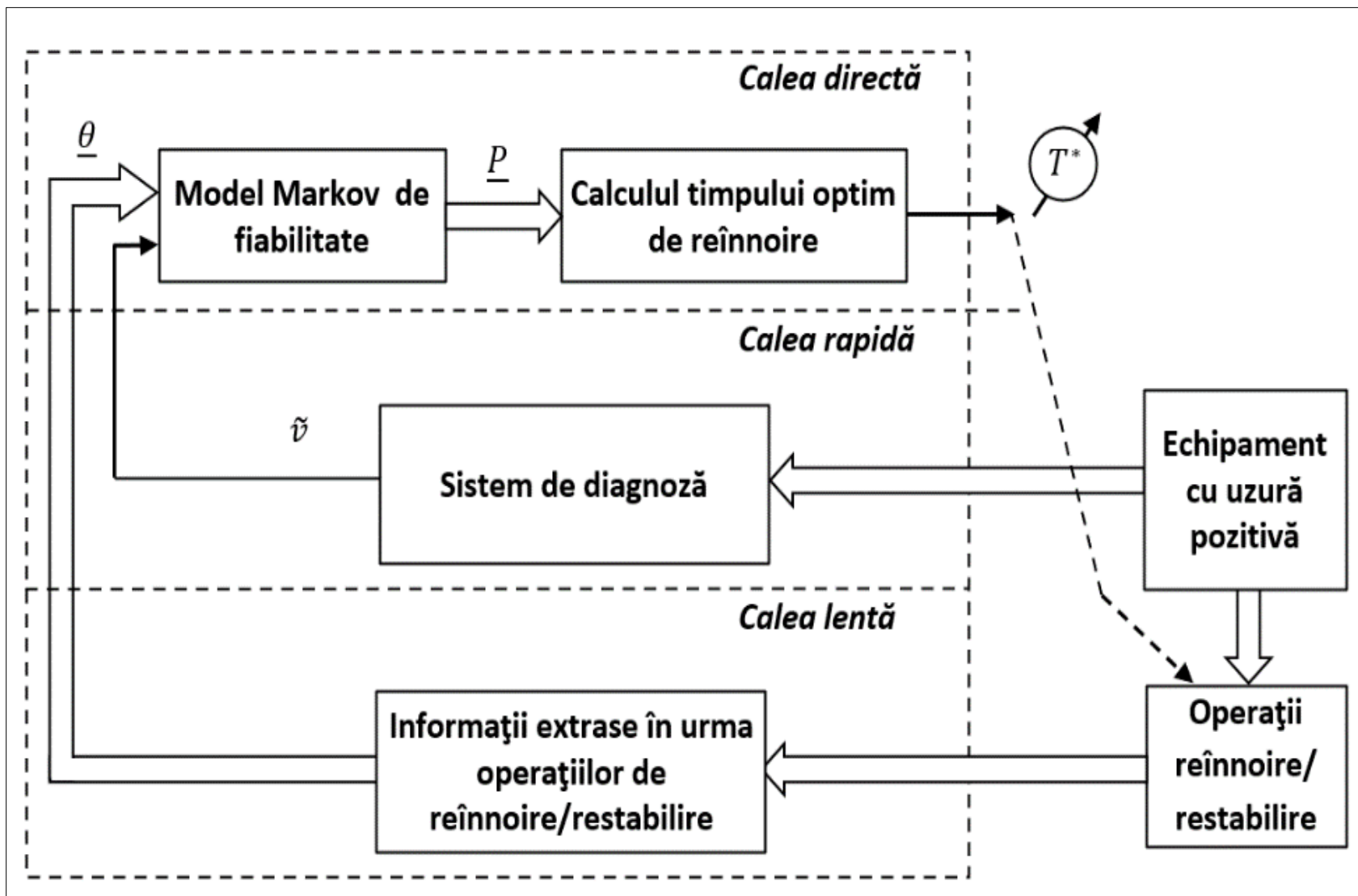


Fig. 4. 1 - Principiul strategiei evolutive de reînnoire

Calea lentă intervine în structura sistemului evolutiv de reînnoire, doar la începutul unui ciclu de funcționare, actualizând valorile tuturor parametrilor modelului Markov, stabilite pe baza constatărilor practice din ciclurile anterioare de reînnoire/restabilire.

4.3 Structura sistemului evolutiv de reînnoire

Sistemul evolutiv de reînnoire propus în cadrul tezei de doctorat, care pune în aplicare strategia prezentată în secțiunea anterioară, pentru cazul particular al actuatorului, are structura prezentată în Fig. 4.2 și este alcătuit din 3 subsisteme, după cum urmează:

1. Subsistemul de reînnoire (SR)

Conține în structura sa următoarele blocuri:

- modelul Markov de fiabilitate (MM);
- modelul de reînnoire (MR);
- bloc de decizie (D).

Modelul Markov este modelul de degradare a echipamentului. Structura sa este adoptată în funcție de particularitățile procesului tehnologic și de rolul pe care actuatorul îl îndeplinește în cadrul acestuia. Parametrii modelului Markov sunt inițializați atât pe baza cunoștințelor din exploatare, cât și pe baza informațiilor extrase din cercetările de fiabilitate în domeniu. Modelul Markov furnizează probabilitățile $P_i(t); i = 1, 2, \dots$, astfel încât sistemul să se afle într-una din stările lui posibile (S_i) la un moment dat. Aceste probabilități se obțin ca rezultat al integrării ecuațiilor de stare în care intervin parametrii modelului Markov – procedură prezentată în Capitolul 6. Pe baza probabilităților de stare, $P_i(t)$, se calculează funcția de fiabilitate a sistemului $R(t)$ și, mai departe, densitatea de probabilitate a timpului de funcționare, $f(t)$, care reprezintă intrările modelului de reînnoire (notat MR în Fig. 4.2). Modelul de reînnoire calculează și furnizează la ieșire funcția reînnoirii, $H(t)$, și funcția intensității reînnoirilor $h(t)$. Pe baza acestor indicatori statistici de fiabilitate, în cadrul blocului de decizie (D), utilizând criteriul de optimizare impus (I), se stabilește timpul optim de reînnoire T^* pentru echipamentul ales spre studiu.

2. Subsistemul de adaptare a modelului Markov de fiabilitate (SAMF)

Subsistemul de adaptare a modelului Markov de fiabilitate (SAMF) furnizează sistemului de reînnoire (SR) vectorul parametrilor curenți, \tilde{v} , care caracterizează viteza medie de uzură a echipamentului, corespunzătoare condițiilor curente de exploatare. Dacă se consideră că gradul de încredere al estimării sistemului FDI este unul bun, se stabilesc estimări corespunzătoare ale vitezei medii de uzură. Aceste informații sunt conținute în vectorul \tilde{v} și pot fi actualizate în structura modelului Markov, cu o periodicitate impusă de proiectant. După actualizarea parametrului *viteza medie*, se procedează la reintegrarea modelului Markov. În acest mod, timpul optim de reînnoire va fi stabilit în concordanță cu datele care reflectă regimul curent de funcționare al echipamentului.

În cadrul subsistemului de adaptare a modelului Markov de fiabilitate (SAMF), subsistemul de diagnoză îndeplinește următoarele roluri:

1. detectează apariția unui defect major și declanșează o alarmă de avertizare – caz în care se va face abstracție de timpul optim de reînnoire T^* și se va interveni cât mai curând în vederea restabilirii echipamentului;
2. detectează apariția unui defect incipient și discerne gradul acestuia;
3. declanșează alarma de avertizare în cazul în care gradul defectării incipiente depășește o anumită limită considerată sigură pentru funcționarea echipamentului;

4. evaluează gradul de uzură a echipamentului în timp real (pe baza prelucrării unor vectori \underline{y} ai mărimilor măsurate din sistemul fizic supervizat) și estimează viteza medie de uzură (informație conținută în vectorul \underline{v}) care intră în definirea parametrilor modelului Markov;
5. identifică tipul și momentul apariției defectului detectat.

Punctele 1 ÷ 4 au fost tratate în teza de doctorat și vor fi prezentate în Capitolul 5. Punctul 5 va fi abordat în cadru unor cercetări ulterioare.

3. Subsistemul de actualizare a modelului Markov

Subsistemul de actualizare a modelului Markov folosește informațiile privind starea efectivă/fizică a echipamentului, informații care se obțin în timpul examinărilor echipamentului la fiecare ciclu de reînnoire sau restabilire, completând astfel lotul de actualizare a modelului Markov cu valori ale tuturor parametrilor acestuia, stabiliți în conformitate cu starea reală fizică a echipamentului. Aceste informații sunt conținute în vectorul $\underline{\theta}$ și sunt impuse modelului Markov la începutul fiecărui nou ciclu de reînnoire. Vectorul parametrilor $\underline{\theta}$ conține informații legate de toți parametrii modelului Markov (nu numai viteza medie de uzură) după cum urmează: viteza de uzură, viteza de defectare, viteza medie și dispersia uzurii etc.

Odată cu ciclurile de reînnoire, baza de date din bucla lentă este populată cu informații despre echipament, extrase în urma constatărilor practice realizate în timpul operațiilor de reînnoire/restabilire. Aceste date reprezintă o contribuție importantă la ajustarea parametrilor din structura modelului Markov, astfel încât acesta să poată furniza estimări cât mai apropiate de condițiile curente de exploatare a echipamentului.

4.4 Concluzii

În Capitolul 4 este prezentată strategia de mentenanță dezvoltată în cadrul tezei de doctorat pentru cazul particular al actuatorului a cărei funcționare a fost descrisă în capitolul anterior. Soluția adoptată pentru implementarea strategiei de mentenanță propusă implică trei căi de procesare a informației, fiecare dintre acestea contribuind la actualizarea modelului Markov de degradare a echipamentului în așa manieră, încât stările estimate de acesta și indicatorii de fiabilitate corespunzători să fie stabilite în concordanță cu condițiile curente de exploatare.

În cadrul tezei de doctorat s-au adus contribuții la nivelul subsistemului de adaptare a modelului de fiabilitate (SAMF) – calea rapidă - și la nivelul subsistemului de reînnoire a modelului Markov – calea directă. În Capitolul 5 va fi prezentat sistemul automat de diagnoză al al actuatorului, pentru ca în Capitolul 6 să fie prezentat modelul Markov, determinarea indicatorilor de fiabilitate ai actuatorului și a timpului optim de reînnoire a acestuia.

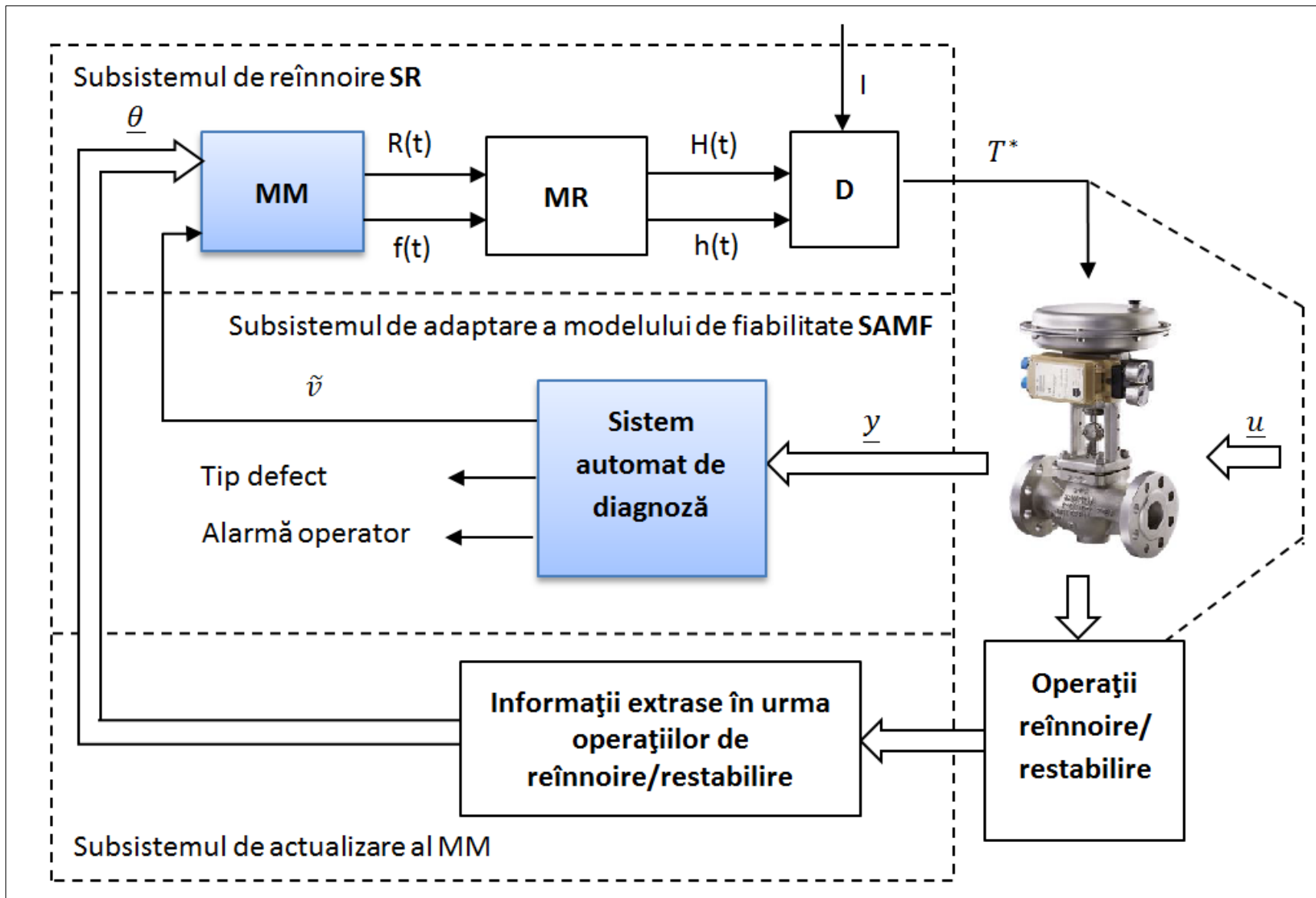


Fig. 4. 2 - Structura sistemului evolutiv de reînnoire

Capitolul 5

Sistemul de detecție al defectelor

5.1 Introducere

În Capitolul 5 este prezentată soluția adoptată pentru sistemul de diagnoză din cadrul structurii sistemului evolutiv de reînnoire – prezentat în capitolul anterior, ca metodă propusă în vederea implementării strategiei de mentenanță evolutivă, pentru cazul particular al unui actuator.

5.2 Structura sistemului de diagnoză

Sistemul de diagnoză din cadrul strategiei de mentenanță evolutivă propusă în teza de doctorat are structura prezentată în Fig. 5.1:

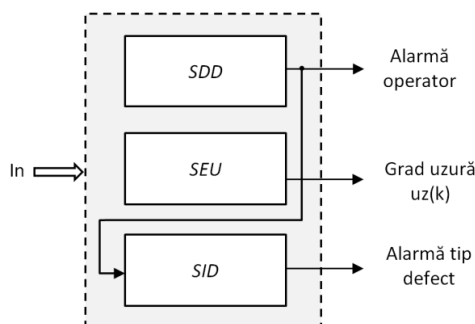


Fig. 5. 1 - Structura sistemului de diagnoză

Sistemul de diagnoză primește la intrare date măsurate din procesul real și, pe baza prelucrării acestora, realizată la nivelul subsistemului specific, îndeplinește următoarele funcții:

- la nivelul subsistemului SDD – identifică apariția unui defect în sistem și generează un semnal de alarmare al operatorului;
- la nivelul subsistemului SEU – evaluează și estimează gradul de uzură al sistemului;
- la nivelul subsistemului SID – identifică tipul defectului și momentul apariției acestuia.

În cadrul tezei de doctorat, din perspectiva realizării și implementării unei strategii de mentenanță evolutivă, care furnizează timpul optim de reînnoire pentru un anumit echipament, deci care se modifică în concordanță cu starea de uzură a echipamentului, cercetarea s-a focalizat pe partea de detecție a defectelor și de evaluare a gradului de uzură a echipamentului – deci pe primele două subsisteme din alcătuirea sistemului de diagnoză.

Pentru proiectarea sistemului de diagnoză care să îndeplinească funcțiile mai sus menționate s-a utilizat metoda bazată pe modelul procesului. Descrierea schematică a metodei de detecție a defectelor pe bază de model este prezentată în Fig. 5.2.

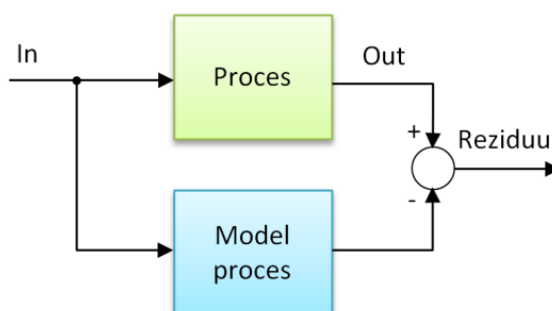


Fig. 5. 2 - Sistemul de detecție a defectelor

În cadrul tezei de doctorat, pentru proiectarea sistemului de detecție a defectelor pe bază de model, s-a decis modelarea procesului diagnosticat folosind rețele neuronale.

5.3 Sistemul de detecție a defectelor

5.3.1 Modelarea procesului folosind rețele neuronale

A. Rețea neuronală antrenată cu date din regimul dinamic

a) Configurarea rețelei neuronale cu date din regimul dinamic:

Obiectivul prezentului capitol este acela de a dezvolta un model neuronal care să aproximeze procesul de funcționare a actuatorului studiat. Acesta va fi ulterior utilizat în structura sistemului de detecție a defectelor. Modelul matematic al actuatorului conține modelul matematic al vanei și cel al poziționarului prezentate în Capitolul 2. Se vor nota cu $u(k)$ - vectorul intrărilor procesului și, respectiv, cu $y(k)$ - vectorul ieșirilor procesului, conform Fig. 5.11.



Fig. 5. 3 - Modelul procesului cu intrările $u(k)$ (4 mărimi de intrare) și ieșirea $y(k)$ (2 mărimi de ieșire)

Vectorul intrărilor procesului, $u(k)$, conține 4 semnale care determină dinamica actuatorului, după cum urmează: semnalul de comandă (CV), presiunile din amonte și respectiv aval de vană (P1 și P2) și temperatura lichidului controlat. Vectorul ieșirilor procesului, $y(k)$, conține 2 semnale: poziția tijei servomotorului - $X(k)$ și debitul corespunzător acestei poziții - $F(k)$.

Structura rețelei neuronale pentru instruire este cea din Fig. 5.14. Instruirea rețelei neuronale s-a făcut offline, valorile vectorului $y(k-1)$ ("ținta" rețelei) fiind obținute prin simularea modelului procesului din cadrul benchmark-ului DAMADICS.

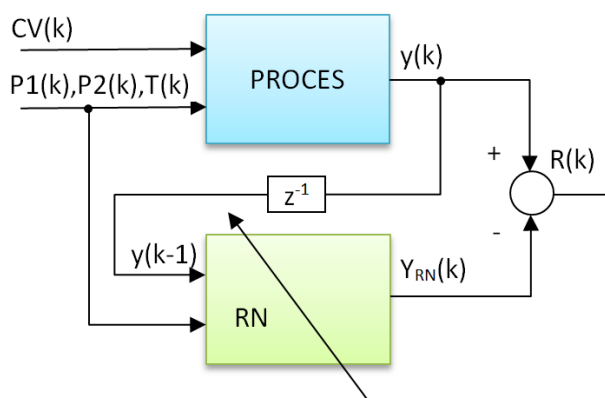


Fig. 5. 4 - Structura rețelei neuronale pentru etapa de instruire

Numărul de straturi ascunse ale rețelei neuronale a fost ales în urma unui proces iterativ de încercări. S-a constatat că arhitectura care modelează cel mai bine neliniaritățile procesului, este cea care conține 3 straturi ascunse, fiecare cu un număr de neuroni după cum urmează: primul strat ascuns - 10 neuroni, al doilea strat - 12 neuroni, al treilea strat - 12 neuroni.

b) Rezultatele antrenării rețelei neuronale cu date în regim dinamic:

Rezultatele instruirii rețelei neuronale sunt prezentate în Fig. 5.16 și 5.17.

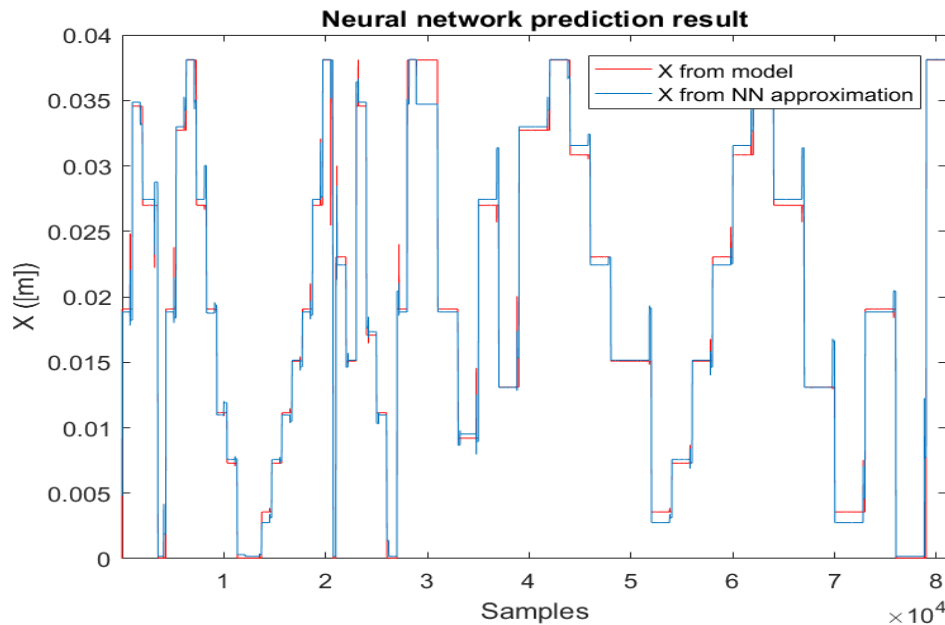


Fig. 5. 5 - Rezultatele predicției rețelei neuronale deplasarea tijei X [m]

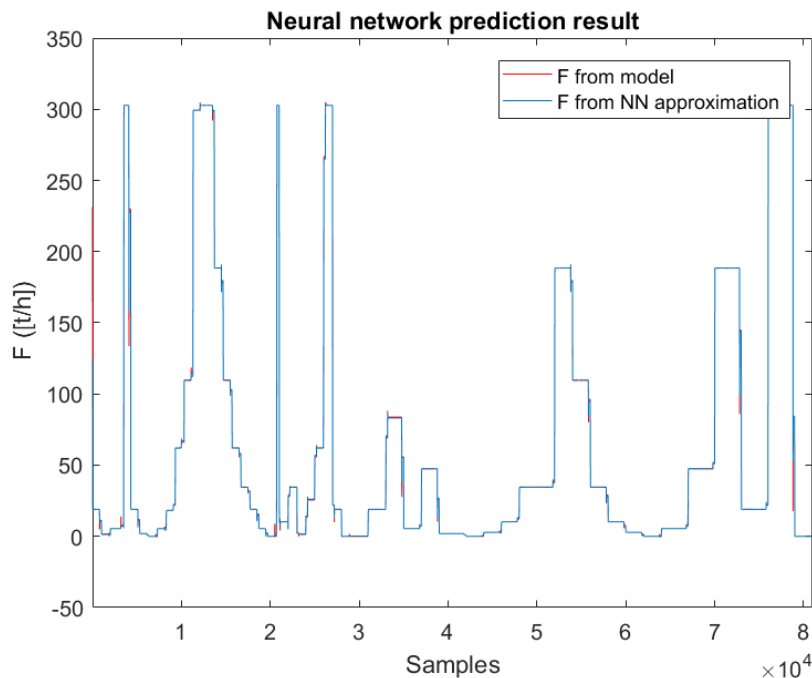


Fig. 5. 6 - Rezultatele predicției rețelei neuronale pentru debitul de fluid F [t/h]

Din Fig. 5.16 și 5.17 se poate observa că rețeaua neuronală aproximează mai bine debitul de fluid F [t/h] decât deplasarea tijei X [m]. Explicația rezidă în faptul că cele două “ținte” ale rețelei neuronale au unități de măsură diferite și game de variație diferite ca ordin de mărime între ele.

c) Rezultatele validării rețelei neuronale antrenată cu date în regim dinamic:

Pentru testarea capacității de generalizare a rețelei neuronale antrenate, se va aplica pe intrarea acesteia un nou set de date, complet diferit de cel utilizat la antrenare. Rezultatele obținute la ieșirea rețelei neuronale sunt prezentate în Fig. 5.19.

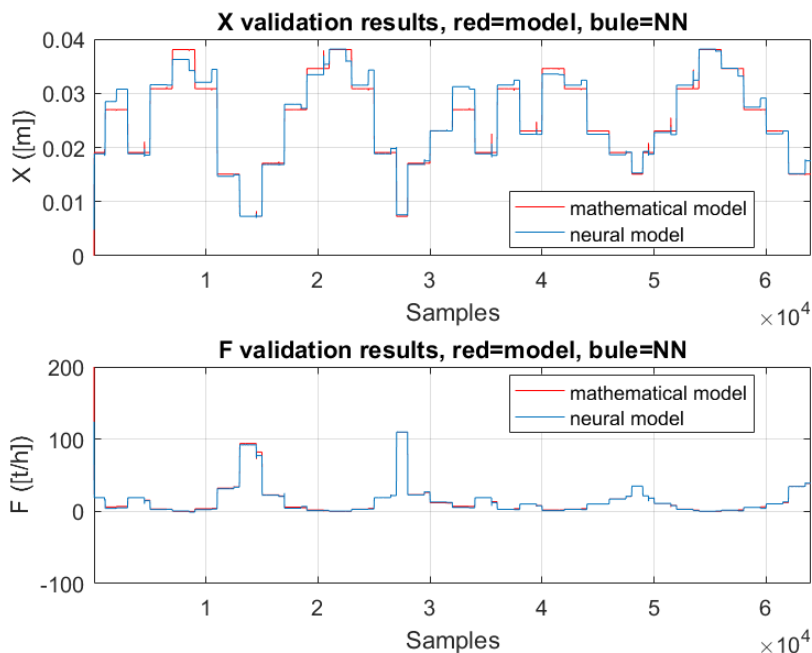


Fig. 5.7 - Rezultatele validării – pentru X [m] și, respectiv, F [t/h]

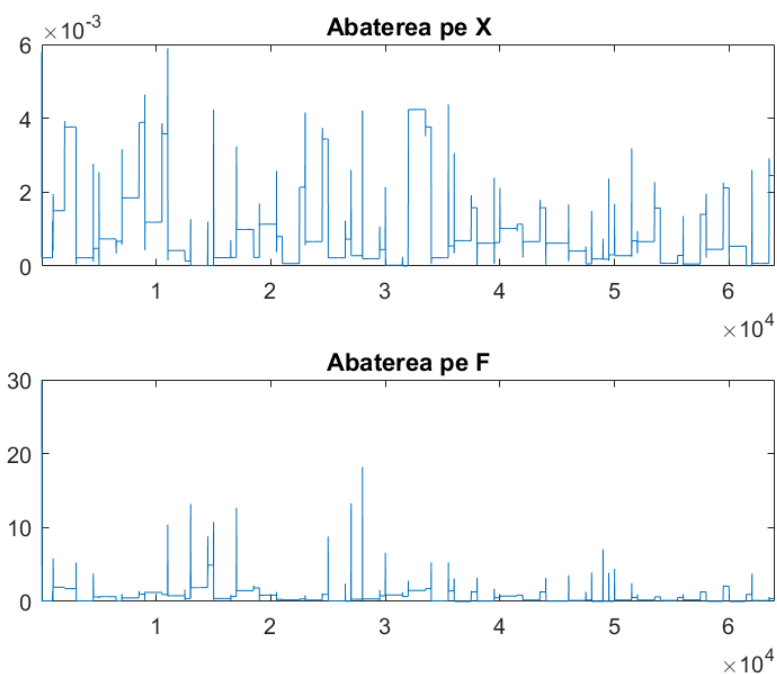


Fig. 5.8 - Abaterea lui X și, respectiv F , obținută ca diferență în modul între ieșirile modelului matematic și cele ale rețelei neuronale

În continuare, se pune problema capacității rețelei neuronale astfel proiectată și antrenată de a detecta apariția unui defect. În acest scop, s-a indus în setul de date de pe intrarea actuatorului defectul f_2 , la momentul 13500 [sec.], cu intensitatea 70%, atingerea intensității fiind realizată într-un interval de 300 [sec.]. S-a comparat, pe de o parte, ieșirea modelului matematic (ieșirea DAMADICS) fără defect cu ieșirea acestuia cu defect (Fig. 5.21) și, pe de altă parte, ieșirea modelului matematic (DAMADICS) cu defect cu ieșirea rețelei neuronale antrenate (Fig. 5.22). Din rezultatele simulărilor prezentate în Fig. 5.22 se poate observa că la momentul 13500 [sec.] rețeaua neuronală detectează defectul apărut, precum și modificările ulterioare ale semnalului de debit pentru toate pozițiile tijei servomotorului după momentul instalării defectului.

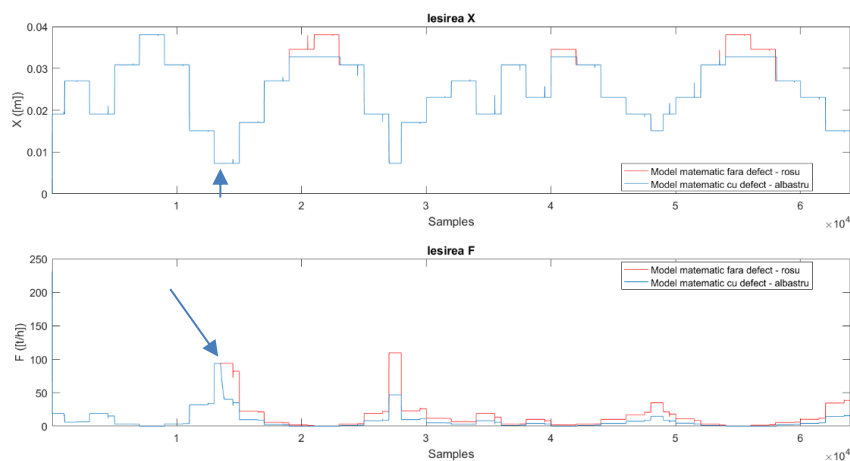


Fig. 5. 9 - Comparație între ieșirile modelului matematic cu defect (albastru) și ieșirile modelului matematic fără defect (roșu)

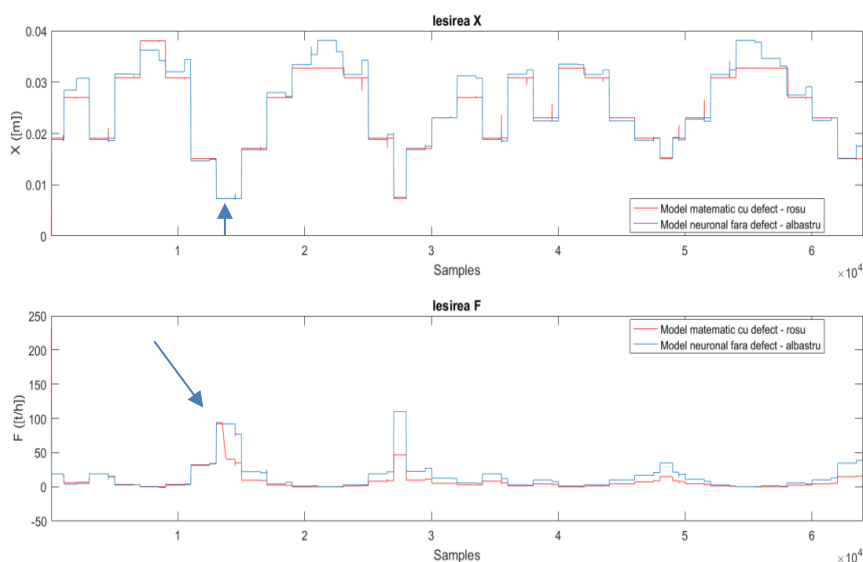


Fig. 5. 10 - Comparație între ieșirile modelului neuronal (albastru) și ieșirile modelului matematic cu defect (roșu)

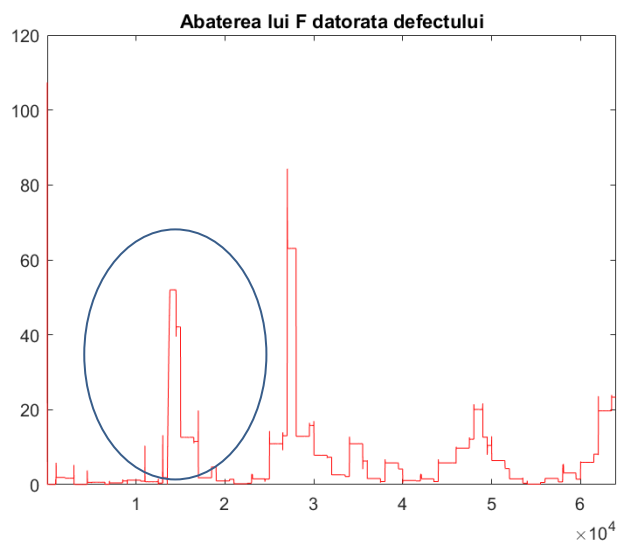


Fig. 5. 11 - Reziduu pe F obținut ca diferență în modul dintre ieșirea F a modelului matematic cu defect și ieșirea F a rețelei neuronale

În Fig. 5.23 este prezentat reziduul pe F , calculat ca diferență în modul între ieșirea F a modelului matematic (DAMADICS) în care s-a indus defectul și ieșirea F a rețelei neuronale antrenată cu date înregistrate din funcționarea normală a actuatorului. Din Fig. 5.23 se observă că abaterile calculate pe F , în momentul apariției unui defect, cresc de la valoarea 18 [t/h] (cazul fără defect – Fig. 5.20) la 55 [t/h] (Fig. 5.23). În continuare în Fig. 5.23 se observă că reziduul ajunge la zero datorită valorilor mici ale debitului (când nu se poate detecta defectul – concluzie din Capitolul 3) și crește apoi la valoarea de aproximativ 90 [t/h] datorită faptului că acoperirea cu săruri este foarte mare nepermițând obținerea debitului cerut.

La încercarea de a repeta validarea rețelei neuronale și cu alte seturi de date, s-a observat că între ieșirea procesului cu defect și ieșirea estimată de rețeaua neuronală se obțin de fiecare dată abateri diferite și chiar mai mari. În aceste condiții, se pune problema dacă nu cumva rețeaua neuronală, astfel antrenată, va semnala apariția unui defect chiar și atunci când acesta nu s-a produs în realitate. Acest comportament este practic determinat de regimul dinamic, care de fiecare dată va furniza valori diferite pentru aceleași poziții ale tijei servomotorului. Modelul matematic agregat conține, așa cum s-a menționat anterior, modelul poziționerului și cel al vanei. Modelul poziționerului are un regim dinamic de durată mai mare decât cel al vanei, determinând astfel o dinamică mai lentă și deci, valori (în regim dinamic) care contribuie la obținerea unor abateri diferite (chiar mai mari). Pentru a elimina acest inconvenient s-a decis antrenarea rețelei neuronale cu date din regimul staționar.

B. Rețea neuronală antrenată cu date în regim staționar

a) Configurarea rețelei neuronale antrenată cu date din regimul dinamic

Rețeaua neuronală în regim staționar are structura prezentată în Fig. 5.26. Spre deosebire de cazul anterior (în care rețeaua a fost antrenată cu date în regim dinamic), de data aceasta valoarea curentă a poziției X , în regim staționar, este intrare a rețelei.

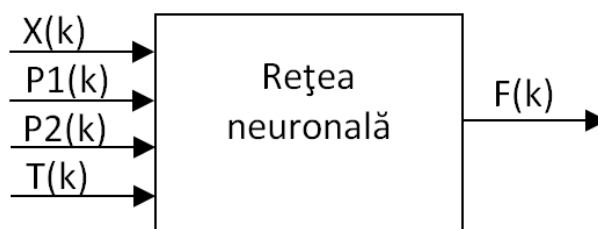


Fig. 5. 12 - Structura rețelei neuronale în regim staționar

b) Rezultatele antrenării rețelei neuronale cu date din regimul staționar

Rezultatul instruirii rețelei neuronale cu date în regim staționar este prezentată în Fig. 5.28 iar în Fig. 5.29 este prezentată eroarea medie pătratică.

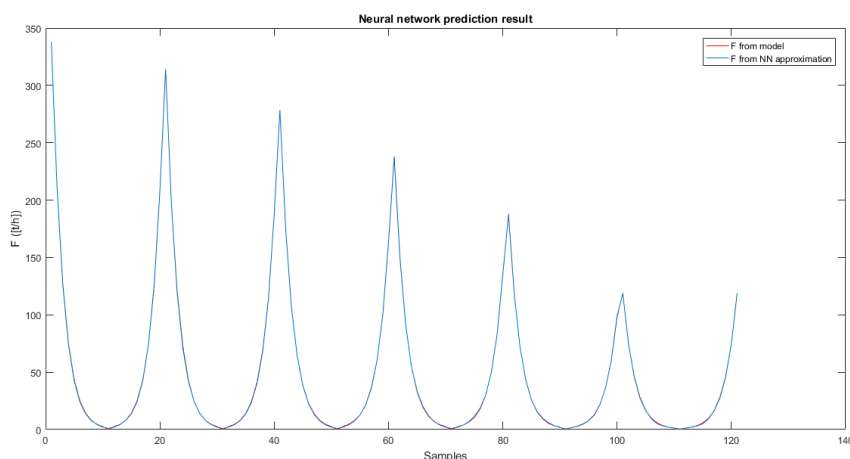


Fig. 5. 13 - Rezultatele predicției rețelei neuronale pentru F [t/h]

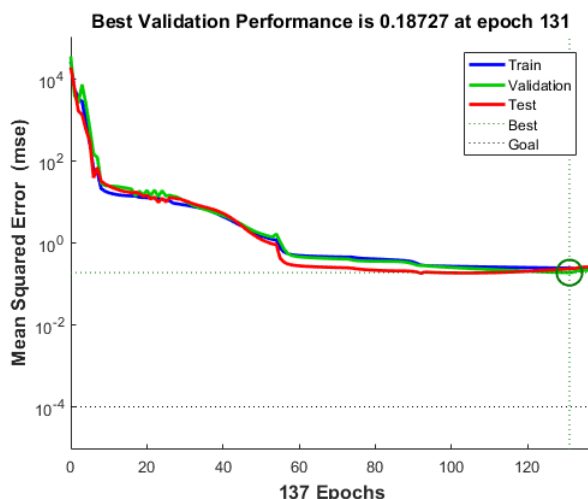


Fig. 5. 14 - Eroarea medie pătratică obținută ca urmare a antrenării rețelei neuronale cu date în regim staționar

Din Fig. 5. 28 se observă că rețeaua neuronală aproximează ieșirea procesului cu foarte mare precizie. Acest lucru este confirmat și în Fig. 5.29 unde se observă că eroarea medie pătratică este mică (0.18727) pentru toate cele trei seturi în care rețeaua a împărțit datele de antrenare (antrenare, testare și validare) fiind atinsă la iterația 131 (dintr-un total de 137 de iterații).

c) Rezultatele validării rețelei neuronale în regim staționar

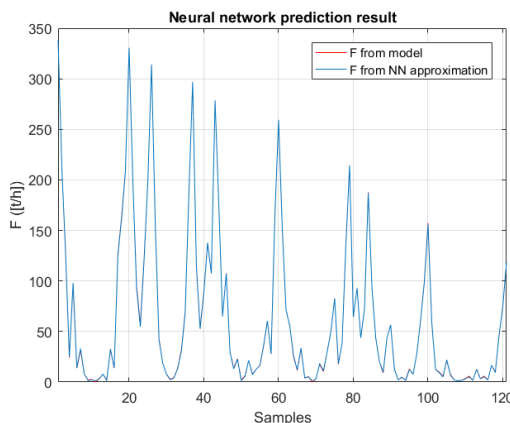


Fig. 5. 15 - Rezultatele validării rețelei neuronale pentru F [t/h]

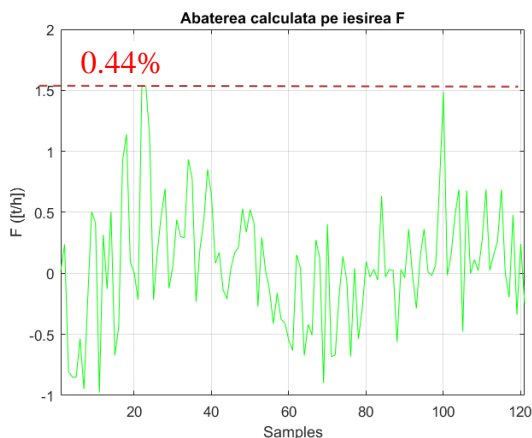


Fig. 5. 16 - Abaterea pe F obținută ca diferența dintre ieșirea rețele neuronale la validare și ieșirea la antrenarea rețele neuronale

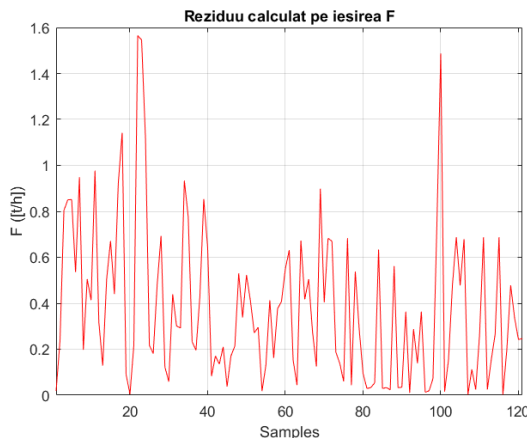


Fig. 5. 17 - Reziduu pe F obținut ca modul al diferenței dintre ieșirea rețele neuronale la validare și ieșirea la antrenarea rețele neuronale

Rezultatele validării rețelei neuronale – prezentate Fig. 5.36 demonstrează faptul că rețeaua neuronală antrenată la pasul anterior are o capacitate mare de generalizare, reușind să aproximeze, pentru noul set de date, cu o precizie la fel de mare ca și la antrenare. Abaterea dintre ieșirea rețelei neuronale la validare și ieșirea rețelei neuronale la antrenare are valori mici (0.44% în Fig. 5.37). Reziduul calculat ca modul al acestei diferențe are o valoare maximă de aproximativ 1.6 [t/h] (Fig. 5.38) ceea ce, raportat la valoare maximă a debitului (338 [t/h]), reprezintă o valoare foarte mică.

Pe baza rezultatelor obținute, se poate concluziona că rețeaua neuronală antrenată cu date obținute în regim staționar al actuatorului aproximează cu precizie comportarea actuatorului, având o capacitate mare de generalizare. În continuare, având în vedere că, de obicei, datele înregistrate în exploatare sunt afectate de zgomot, se va verifica dacă rețeaua neuronală își păstrează aceste performanțe chiar și în cazul datelor afectate de zgomot.

Pentru validarea rețelei în cazul semnalelor afectate de zgomot de măsură, s-a adăugat un zgomot cu distribuție normală. Astfel, mărimii de ieșire X i s-a adăugat un zgomot de amplitudine 0.0001 [m] iar mărimii F [t/h] un zgomot de amplitudine 1 [t/h]. Datele de la ieșirea actuatorului, afectate de zgomot, sunt prezentate în Fig. 5.40. În Fig. 5.39 este prezentată schema utilizată pentru validarea rețelei neuronale, pentru cazul semnalelor din proces afectate de zgomot.

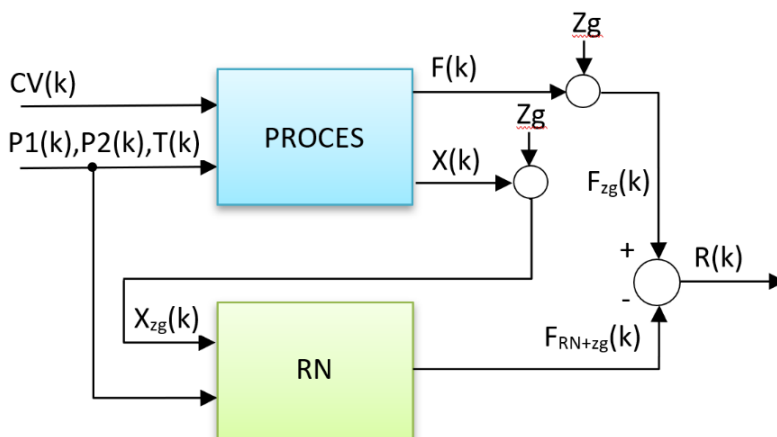


Fig. 5. 18 - Schema pentru validare rețelei neuronale în cazul semnalelor de antrenare afectate de zgomot de măsură

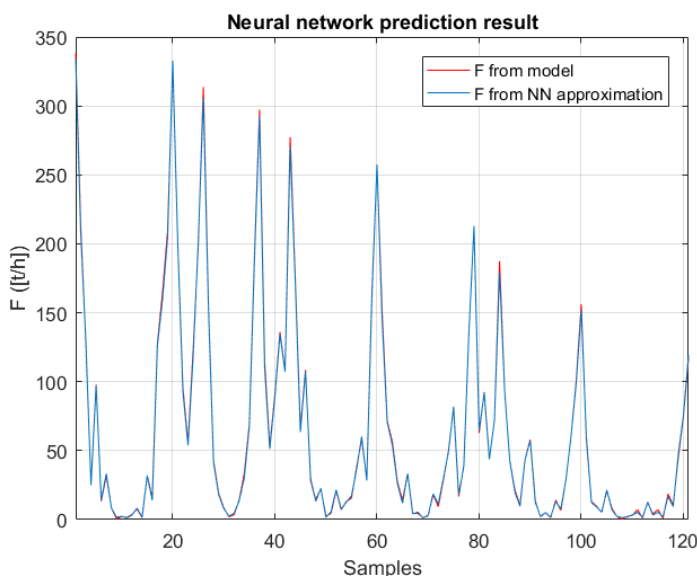


Fig. 5. 19 - Ieșirea estimată de rețeaua neuronală – date de intrare afectate de zgomot

Din Fig. 5.41 se observă că rețeaua neuronală aproximează semnalul de ieșire al procesului cu precizie ridicată, chiar și în cazul afectării acestuia de zgomot.

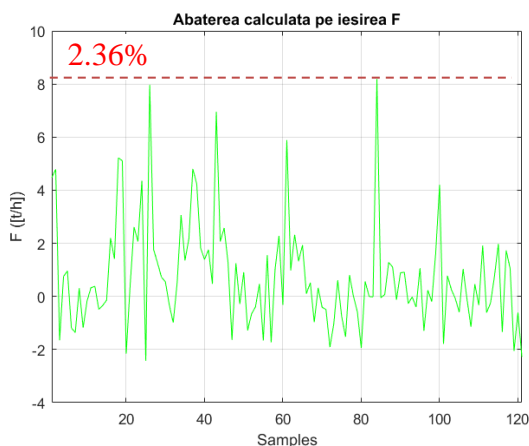


Fig. 5. 20 - Abaterea calculată ca diferență între ieșirea procesului și ieșirea aproximată de rețeaua neuronală, pentru cazul în care semnalele sunt afectate de zgomot

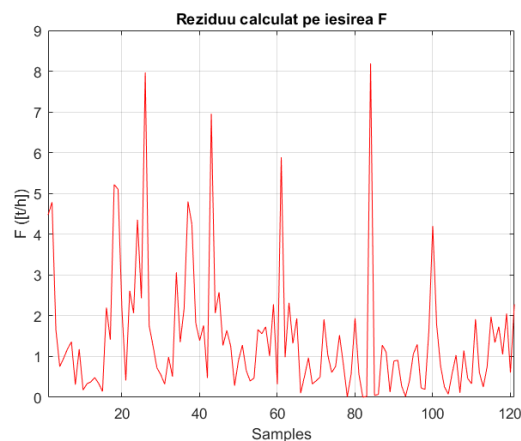


Fig. 5. 21 - Reziuul calculat ca modulul diferenței între ieșirea procesului afectată de zgomot și ieșirea aproximată de rețeaua neuronală

Din Fig. 5.42 se observă ca abaterea pe F (diferența dintre ieșirea estimată de rețeaua neuronală și ieșirea procesului) crește față de cazul anterior (unde era 0.44%) însă rămâne redusă și în acest caz, respectiv 2.36% din valoarea maximă a lui F . În consecință, reziuul are o valoare nu cu mult mai mare față de cazul fără zgomot (8.2 [t/h] în Fig 5.43 față de 1.6 [t/h] - Fig. 5.37). În concluzie, rețeaua neuronală antrenată cu valori în regim staționar ale mărimilor procesului, aproximează procesul în funcționare normală cu o precizie bună, chiar și în cazul semnalelor afectate de zgomot de măsură. În consecință, rețeaua neuronală în regim staționar va fi utilizată în cadrul sistemului de detecție a defectelor.

5.3.2 Implementarea modelului realizat cu rețele neuronale în cadrul sistemului de detecție a defectelor

Pentru stabilirea pragului de alarmare, se va lua în considerare valoarea abaterii determinate de eroarea de modelare + zgomotul de măsură (determinate în secțiunile anterioare), precum și cea determinată de defectul analizat.

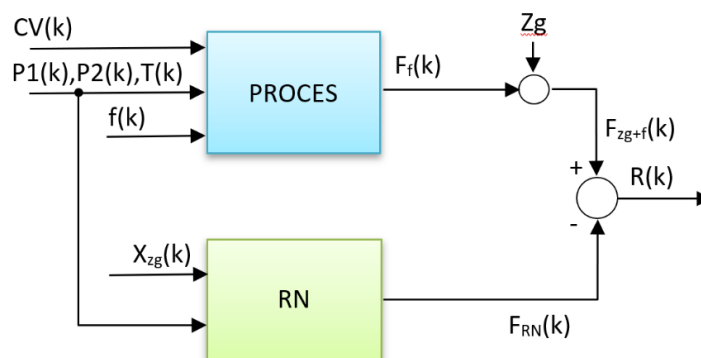


Fig. 5. 22 - Schema de detecție a defectului utilizând rețeaua neuronală

Pentru calculul reziuului în cazul apariției unui defect s-a utilizat schema din Fig. 5.44. Rețeaua neuronală este cea antrenată anterior. În procesul tehnologic s-a indus defectul f_2 – depunere de săruri pe ventilul și/sau scaunul vanei. Așadar, s-a considerat același set de date pe intrarea procesului, afectat de aceleași ponderi ale zgomotului care a fost aplicat la intrarea benchmarkului DAMADICS în cazul de studiu anterior (validarea rețelei neuronale cu zgomot). În plus, s-a indus defectul la momentul $t = 250$ [sec.], cu o intensitate de 70% ($f_s = 0.70$), dezvoltat pe un interval de 50 [sec.] ($Fdt = 50$ [sec.]).

Ieșirea rețelei neuronale antrenată cu date înregistrate în funcționare normală a actuatorului este prezentată în Fig. 5.47. Se observă o diferență considerabilă între semnalul generat de rețeaua neuronală (albastru) și cel înregistrat la ieșirea procesului afectat de

defect (roșu). Abaterea are în acest caz, valori negative pentru întreg setul de eșantioane (Fig. 5.48).

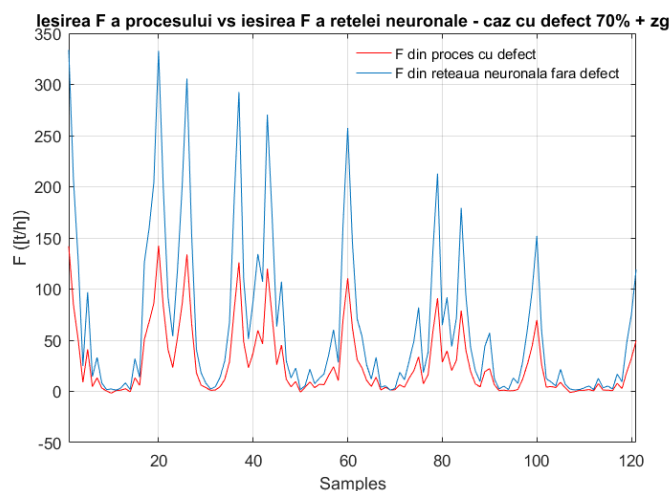


Fig. 5.23 - Ieșirea rețelei neuronale versus ieșirea procesului afectat de defect

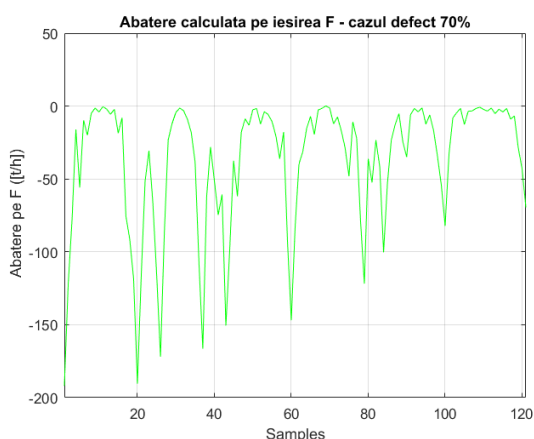


Fig. 5.24 - Abaterea standard calculată ca diferență între ieșirea procesului afectat de defect și ieșirea rețelei neuronale (antrenată și validată cu date fără defect)

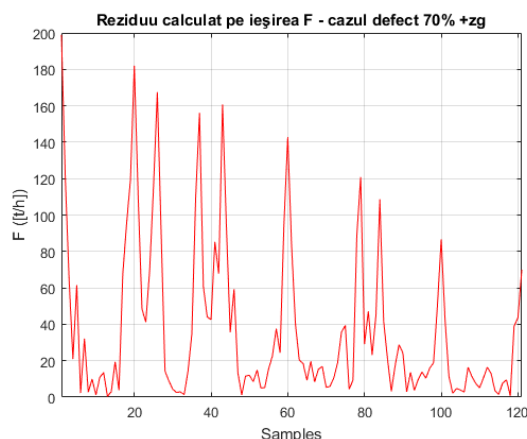


Fig. 5.25 - Reziduu calculat ca modulul diferenței între ieșirea procesului afectat de defect și ieșirea rețelei neuronale (antrenată și validată cu date fără defect)

În Fig. 5.49 se observă că, în prezența unui defect în proces, valoarea reziduuului crește de la 8 [t/h] în cazul fără defect (Fig. 5.45) la o valoare de peste 180 [t/h] în cazul cu defect). În concluzie, schema aplicată pentru detecția defectelor, semnaleză apariția unui defect în procesul studiat, încă din stadiu incipient.

Stabilirea pragului de alarmare

În vederea stabilirii pragului de alarmare s-a indus în proces defectul f_2 cu diferite grade de intensitate, după cum urmează: 0%; 10%; 15%; 30%; 45%; 60%; 70%; 75% și 90%. Pentru toate aceste grade de intensitate ale defectului, s-au calculat și înregistrat reziduurile.

Pentru cazul studiat, în alegerea pragului de detecție și generarea alarmei, s-a considerat un grad de uzură acceptată sub 10%, adică un grad de uzură care nu afectează buna funcționare a procesului. Pragul de alarmare a fost ales funcție de valoarea cea mai mare a reziduuului obținută pentru intensitatea de 10% a defectului. Din Fig. 5.51 se observă că această valoare este 40 [t/h].

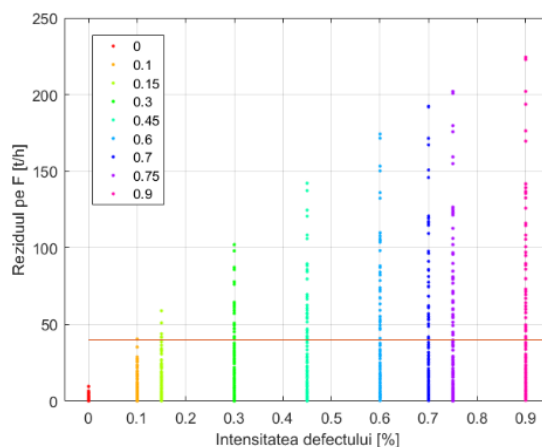


Fig. 5. 26 - Setarea pragului de alarmare pentru uzură a sistemului peste 10% (linia orizontală de culoare maro este pragul de alarmare)

5.4 Rețeaua neuronală pentru estimarea gradului de uzură a sistemului

În vederea proiectării unui sistem de mentenanță cu reînnoire preventivă a cărei structură este prezentată în detaliu în Capitolul 4, este necesar un instrument care să evalueze permanent starea sistemului și să estimeze gradul de uzură a acestuia. În acest scop, pot fi abordate două soluții, ambele având beneficii și, respectiv, inconveniente. Rămâne la latitudinea inginerilor de exploatare și/sau mentenanță să abordeze soluția adecvată procesului tehnologic precum și structurii organizatorice a secției de producție. Astfel, evaluarea permanentă a funcționării actuatorului, precum și estimarea gradului de uzură pot fi realizate în două variante:

1. Folosind o rețea neuronală similară cu cea care a fost proiectată pentru sistemul de detecție a defectului (care are ca mărimi de intrare: $X(k)$, $P1(k)$, $P2(k)$, $T(k)$, ținta fiind reprezentată de $F(k)$) și considerând, de data aceasta, ca intrare a rețelei neuronale inclusiv intensitatea defectului, $f(k)$, prezentată în Fig. 5.52.

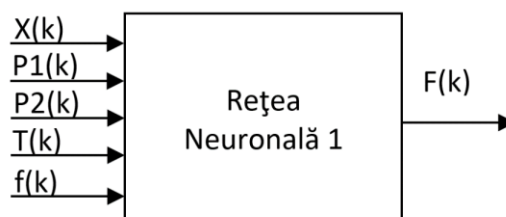


Fig. 5. 27 - Structura rețelei neuronale în regim staționar pentru uzură – varianta 1

2. Utilizând o nouă rețea neuronală, care va avea ca mărimi de intrare: $X(k)$, $P1(k)$, $P2(k)$, $F(k)$, iar ținta va fi reprezentată de intensitatea defectului/gradul uzurii $f(k)$, ca în Fig. 5.53.

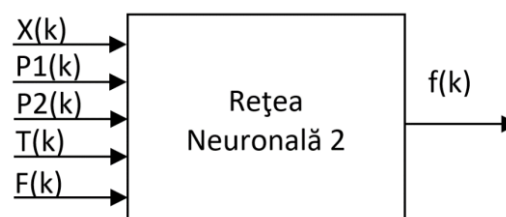


Fig. 5. 28 - Structura rețelei neuronale în regim staționar pentru determinarea gradului uzură – varianta 2

În lucrarea de față, s-a optat pentru varianta 2 care oferă direct gradul de uzură.

În primă instanță, s-a pornit de la un set de date de 800 de eșantioane extras din setul de date care s-a folosit anterior la validarea rețelei neuronale în regim staționar. Cercetările realizate au demonstrat că arhitectura de rețea neuronală cea mai adecvată dinamicii datelor procesului este o rețea de tip feedforward cu un singur strat ascuns și 7 neuroni.

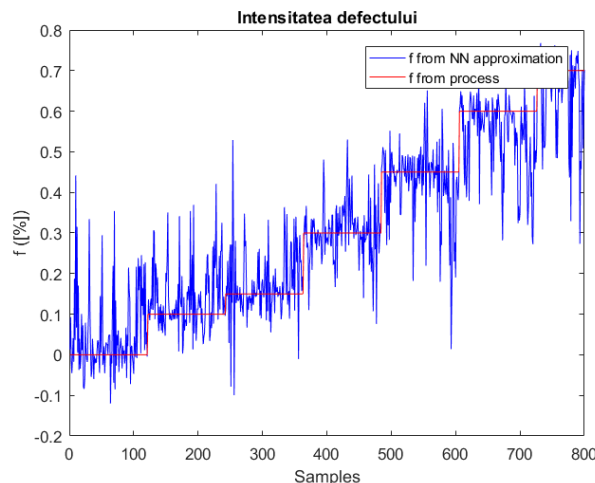


Fig. 5.29 - Leșirea rețelei neuronale pentru evaluarea gradului de uzură a sistemului

La o simplă privire a Fig. 5.55, care reprezintă ieșirea rețelei neuronale și a Fig. 5.56 care reprezintă valoarea erorii de aproximare a rețelei neuronale, se poate observa că rețeaua neuronală astfel antrenată nu reușește să învețe din exemplele aplicate pe intrarea ei. Din cercetările ulterioare (arhitecturi diferite ale rețelei neuronale și/sau algoritmi de învățare diferiți) și din analiza succesivă a performanțelor rețelelor neuronale și, în mod special, din reprezentarea erorilor de măsură grupate funcție de valorile debitului măsurat (Fig. 5.57) s-a observat că, de fiecare dată, erorile de aproximare ale rețelei neuronale au frecvență mai mare și valori mai mari în zona debitelor mici ($F_{\text{măsurat}} < 50$ [t/h]).

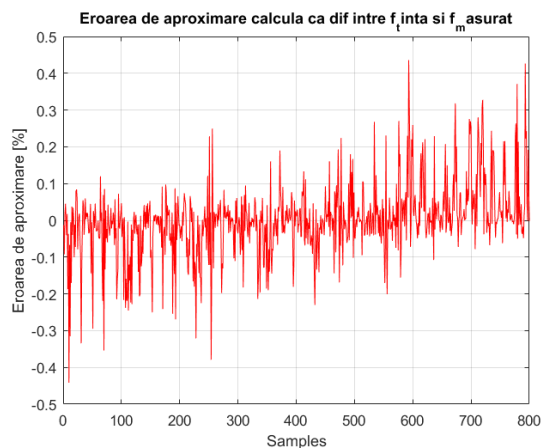


Fig. 5.30 - Eroarea de aproximare a rețelei pentru uzură

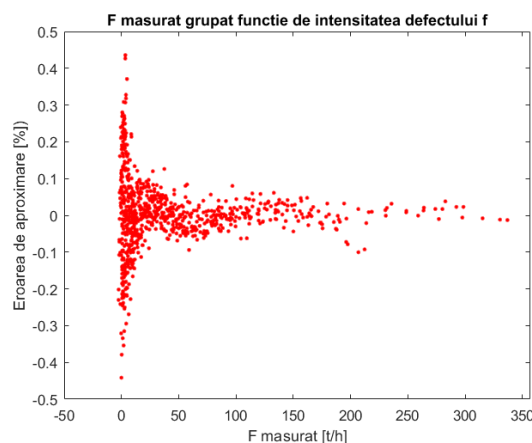


Fig. 5.31 - Eroarea de aproximare a RN grupată funcție de F măsurat din proces

Această constatare este practic în concordanță cu rezultatele și concluziile desprinse în Capitolul 3 care tratează analiza funcționării actuatorului, acolo unde s-a observat că, la nivelul debitelor mici defectul nu poate fi sesizat. Urmare a acestei constatări și în virtutea faptului că la stabilirea pragului de alarmare în secțiunea anterioară, s-a considerat orice valoare a debitului mai mică de 40 [t/h] ca fiind uzură acceptabilă, s-a decis în continuare că, la antrenarea rețelei neuronale pentru evaluarea gradului de uzură, să fie luate în considerare date din proces care corespund doar debitelor cu valori mai mari de 50 [t/h].

După eliminarea datelor care corespundea unor valori ale debitelor mai mici de 50 [t/h] din setul de antrenare și s-a reantrenat rețeaua neuronală s-au obținut rezultatele prezentate în Fig. 5.58 ÷ 5.63.

Din Fig. 5.58 se poate observa că rezultatele antrenării rețelei neuronale cu acest set de date se îmbunătățesc considerabil. Rețeaua neuronală poate aproxima acum cu precizie gradul de uzură a actuatorului, erorile de aproximare (Fig. 5.59, Fig. 5.60) având acum valori mici iar densitatea de repartiție a erorii de măsură este acum egală (nu se mai concentrează în jurul debitelor mici – Fig. 5.61).

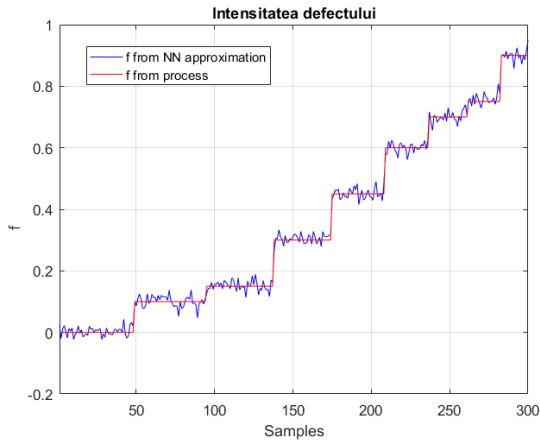


Fig. 5.58 - Leșirea rețelei neuronale pentru evaluarea gradului de uzură a sistemului

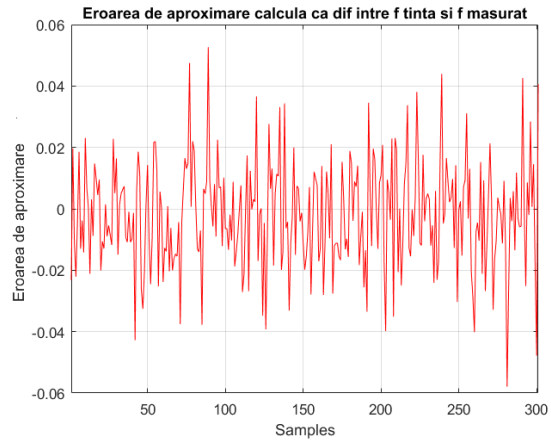


Fig. 5.59 - Eroarea de aproximare a rețelei pentru estimarea uzurii

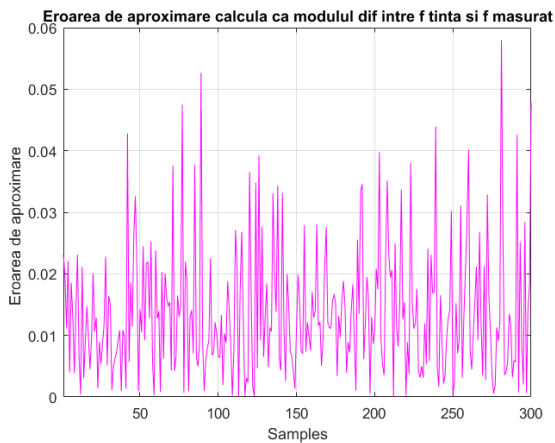


Fig. 5.60 - Eroarea de aproximare a RN, ca modul din diferența $f_{\text{tintă}}$ și $f_{\text{măsurat}}$

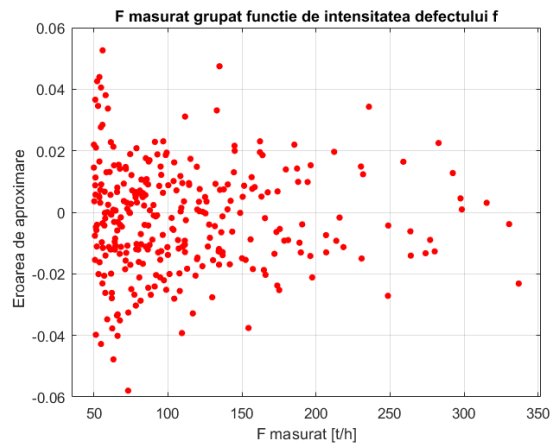


Fig. 5.61 - Eroarea de aproximare a rețelei pentru estimarea uzurii

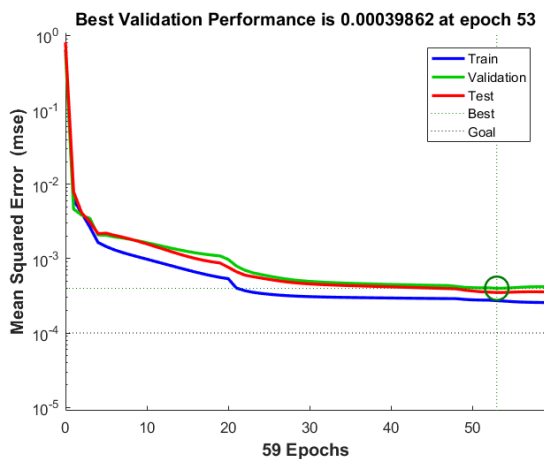


Fig. 5.32 - Eroarea medie pătratică

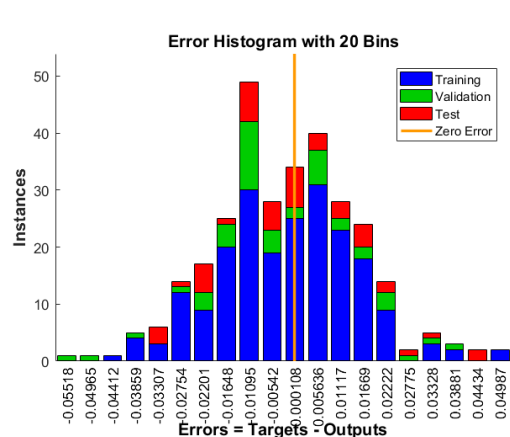


Fig. 5.33 - Histograma erorilor

Indicatorii de performanță ai rețelei neuronale, Fig. 5.62 ÷ 5.63, reflectă aceeași precizie a rezultatului observat în Fig. 5.58. Totuși, deși eroarea medie pătratică este mică pentru toate cele trei seturi de date în care rețeaua a divizat datele aplicate pe intrarea sa (antrenare, validare și testare), un aspect care se observă și trebuie menționat aici constă în faptul că aceste erori sunt totuși diferite între ele: eroarea medie pătratică pentru seturile de testare și validare este totuși mai mare decât eroarea medie pătratică obținută pe setul de antrenare. Acest rezultat preconizează oarecum rezultatele care se vor obține la validarea rețelei astfel antrenate și care vor fi prezentate în continuare.

S-a procedat, așadar, la validarea acestei rețele neuronale și s-a constatat că rețeaua neuronală nu validează datele aplicate pe intrarea sa. Rezultatul validării este prezentat în Fig. 5.65, iar performanțele rețelei sunt prezentate în Fig. 5.66 ÷ 5.69.

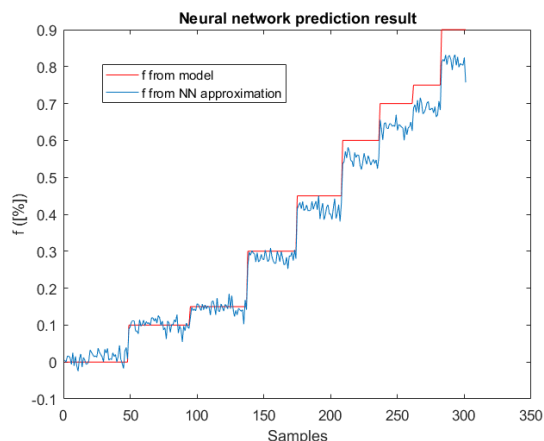


Fig. 5.34 - Ieșirea rețelei neuronale pentru determinarea gradului de uzură la validare

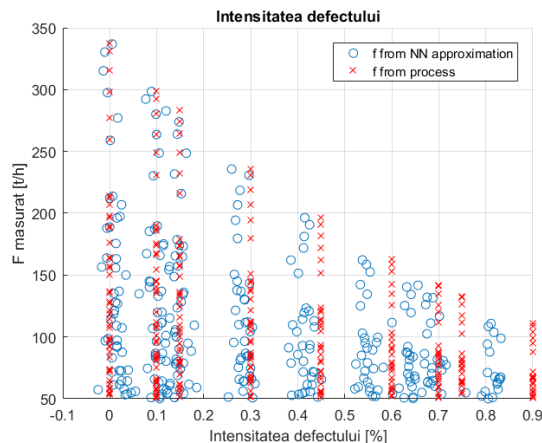


Fig. 5.35 - Valoarea măsurată a debitului din proces (roșu) versus valoarea debitului aproximat de rețea (albastru) grupat în funcție de intensitatea defectului

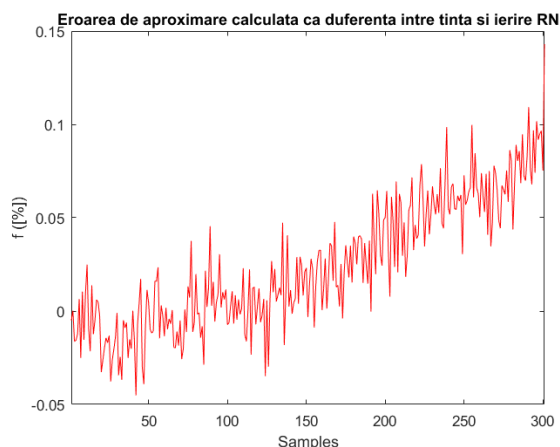


Fig. 5.67 - Eroarea de aproximare a rețelei pentru determinarea gradului de uzură

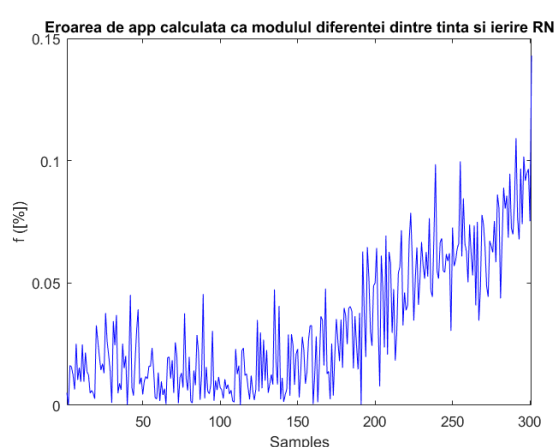


Fig. 5.36 - Eroarea de aproximare a RN ca modul din diferența $f_{\text{țintă}}$ și $f_{\text{măsurat}}$

Din Fig. 5.65 se observă că rețeaua neuronală nu validează corect pentru situații corespunzând la intensități mari ale defectului. Analizele efectuate în continuare au dus la concluzia că rețeaua neuronală nu se instruește corect în cazul în care gradul de uzură depășește valoarea de aproximativ 30% (a se vedea Fig. 5.65). Acest lucru se întâmplă datorită faptului că, extrăgând din setul de date de instruire valorile corespunzătoare unui debit $F < 50$ [t/h] și unor diferențe mari de presiune, acesta a rămas cu un număr de date neechilibrat pe întreg intervalul de variație a gradului de uzură [0, 100%]. În mod practic, numărul de date de instruire a scăzut înspre valori mari ale gradului de uzură, $f > 30$. Altfel spus, rețeaua neuronală nu are suficiente exemple ca să învețe în cazul în care gradul de uzură depășește valoarea de 30%.

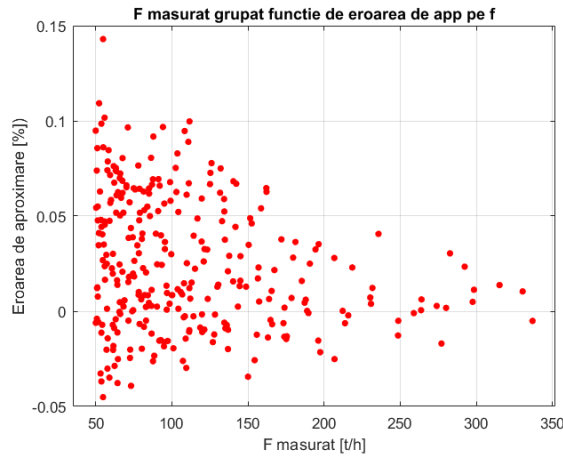


Fig. 5. 37 - Eroarea de aproximare a rețelei pentru determinarea gradului de uzură grupată în funcție de $F_{\text{măsurat}}$

După „echilibrarea” setului de date, astfel încât rețeaua să primească pentru învățare un număr similar de exemple pentru tot intervalul de variație a intensității defectelor, s-a reluat procedura de instruire și validare a rețelei neuronale, obținându-se următoarele rezultate (Fig. 5.70 – 5.75).

Instruirea rețelei neuronale:

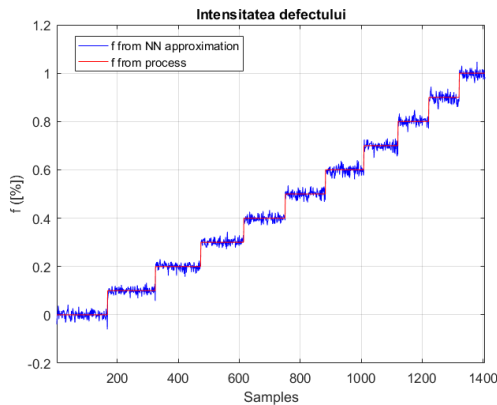


Fig. 5. 38 - Ieșirea rețelei neuronale pentru determinarea gradului de uzură

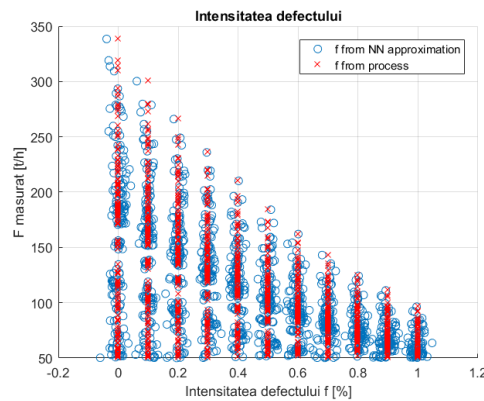


Fig. 5. 39 - $F_{\text{măsurat}}/F_{\text{aproximat}}$ grupat în funcție de intensitatea defectului

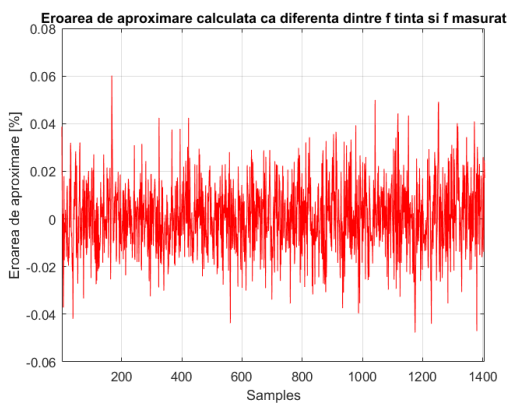


Fig. 5. 40 - Eroarea de aproximare pentru determinarea gradului de uzură

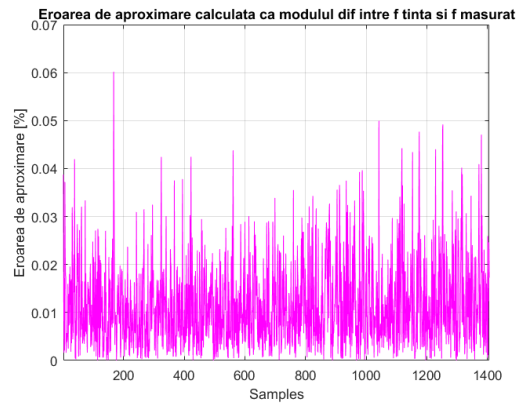


Fig. 5. 41 - Eroarea de aproximare a rețelei în modul (diferența $f_{\text{țintă}}$ și $f_{\text{măsurat}}$)

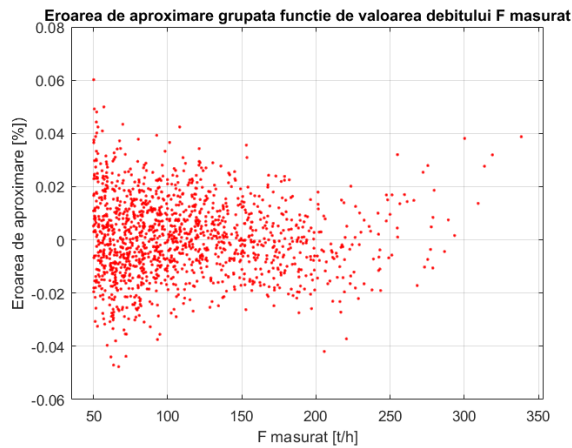


Fig. 5. 42 - Eroarea de aproximare a rețelei pentru determinarea gradului de uzură grupată în funcție de $F_{\text{măsurat}}$

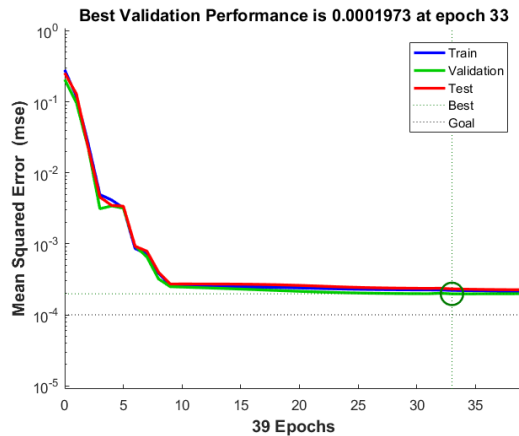


Fig. 5. 43 - Variația erorii medii pătratice

Validarea rețelei neuronale

Rezultatele validării sunt prezentate în Fig. 5.77 ÷ 5.80, acestea reflectând faptul că rețeaua neuronală are acum o capacitate de generalizare foarte bună, precizia de aproximare fiind, de asemenea, foarte bună.

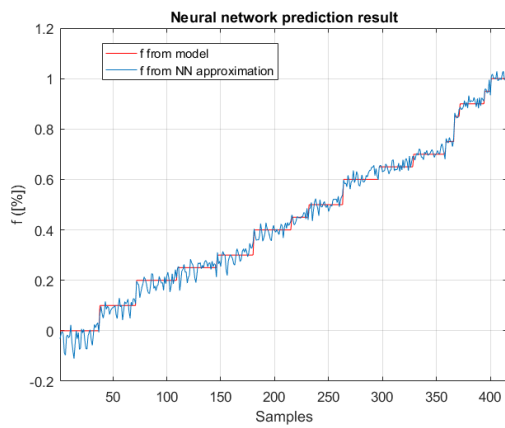


Fig. 5. 44 - Ieșirea rețelei neuronale pentru determinarea gradului de uzură

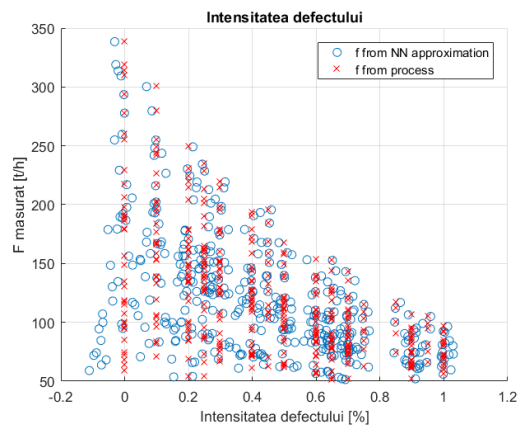


Fig. 5. 45 - $F_{\text{măsurat}}/F_{\text{aproximat}}$ grupat în funcție de intensitatea defectului

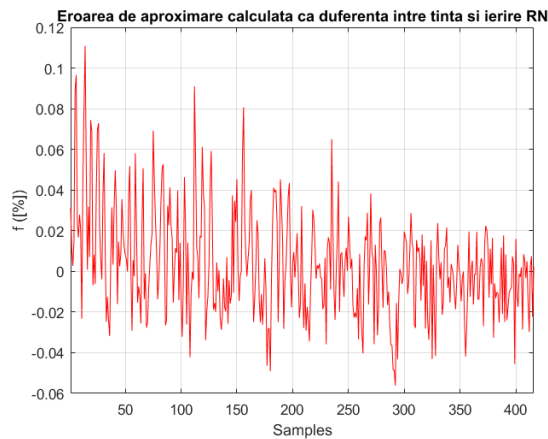


Fig. 5. 46 - Eroarea de aproximare a rețelei pentru determinarea gradului de uzură

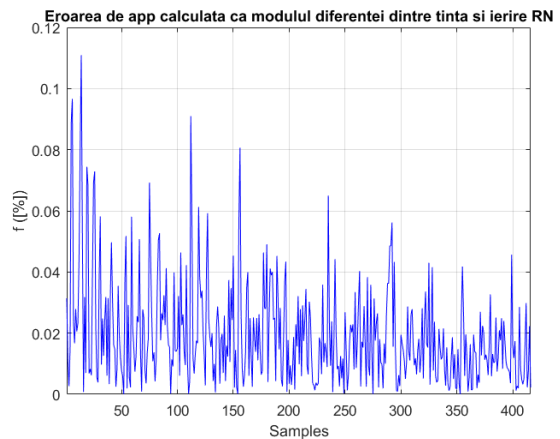


Fig. 5. 47 - Eroarea de aproximare a RN ca modul din diferența $f_{\text{țintă}}$ și $f_{\text{măsurat}}$

Capitolul 6

Sistemul de fiabilitate. Studiu de caz.

6.1 Modelul Markov al actuatorului abordat ca studiu de caz

6.2.1 Determinarea și inițializarea modelului Markov al actuatorului. Integrarea modelului Markov în cadrul sistemului evolutiv de reînnoire

Modelul Markov de ordinul 2 în timp discret are structura prezentată în Fig. 6.3. De menționat aici că pe arcele de tranziție între stări au fost trecute probabilitățile de tranziție pe durata timpului discret, T_e , pentru care a fost determinat modelul. Pentru simplitate, toți parametrii care caracterizează modelul Markov se consideră pentru ciclul de reînnoire curent.

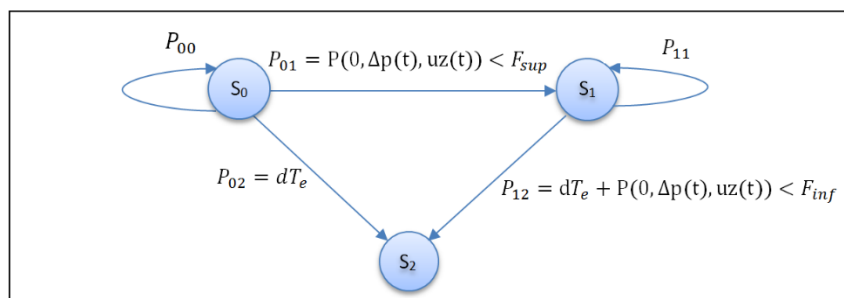


Fig. 6. 1 - Modelul Markov de ordinul 2 în timp discret al actuatorului

Pentru definirea stărilor echipamentului, s-a considerat că echipamentul funcționează în buclă de reglare a debitului (prin urmare stările sale relevante vor fi definite în funcție de debit) și s-au considerat următoarele informații cunoscute din exploatare:

1. Defectarea apare ca urmare a mai multor fenomene, dintre care unul este uzura progresivă la care este supus echipamentul, iar celelalte sunt accidentale, imprevizibile;
2. În studiul de caz de față s-a considerat că uzura intervine prin depunerea progresivă de săruri pe scaunul sau pe tija valvei;
3. Defectarea prin înfundarea vanei este un proces impredictibil, care se produce aproape instantaneu și nu este influențat de mărimile măsurabile. Totuși, caracteristicile statistice ale acestui proces pot fi influențate de starea de uzură;
4. Din punct de vedere a mentenanței echipamentului, stările care prezintă importanță sunt următoarele:
 - starea 0 (nou): vana se află în starea "nou" și asigură debitul maxim cerut de instalație (notat aici F_{sup}), chiar și la valoarea minimă a diferenței de presiune $\Delta p_{min} = P_1 - P_2$, la temperatura de referință (uzuală);
 - starea 1 (uzură): vana nu asigură debitul maxim F_{sup} , pentru orice valoare a diferenței de presiune, dar asigură debitul minim necesar pentru funcționarea sigură a echipamentului (notat aici cu F_{inf}), pentru orice valoare a diferenței de presiune, mai mare decât Δp_{min} ;
 - starea 2 (de defect): echipamentul este în pericol de defectare, deoarece vana nu mai poate asigura debitul minim, de siguranță, F_{inf} , pentru unele valori ale diferenței de presiune, mai mari decât Δp_{min} .

S-au făcut următoarele ipoteze simplificatoare:

- A. Perioada de eșantionare, în care se presupune că starea nu se schimbă, este T_e . Legătura dintre variabila timp continuu t (timpul de lucru al vanei) și varianta timpului discret este exprimată prin relația (6.34)

$$t = k \cdot T_e \quad (6.34)$$

- B. Mărima prin care se descrie uzura, este notată cu $uz(t)$ și este considerată o variabilă aleatoare în intervalul $[0,1]$. Dacă uzura de tipul celei alese pentru studiul de caz s-ar instala uniform, adică viteza de depunere a sărurilor ar fi o constantă, atunci aceasta ar putea fi modelată prin relația (6.35) dacă produsul $v \cdot t < 1$:

$$uz(t) = v \cdot t \quad (6.35)$$

în care v este viteza de uzură (de depunere a sărurilor). Valoarea ei are semnificația de inversul duratei de viață a vanei, în ipoteza că nu există defectare accidentală.

- C. Defectarea accidentală (prin înfundare), pornind din starea 0, este modelată conform cu relația (6.36):

$$P_{02} = d \cdot T_e \quad (6.36)$$

în care:

- P_{02} – este probabilitatea de defectare în intervalul de timp dintre momentele $kT_e \dots (k+1)T_e$;
- d – rata de defectare accidentală, pe durata T_e .

- D. Probabilitatea de trecere între stările 0 și 1 este formulată ca fiind probabilitatea ca debitul maxim asigurat de vană să fie mai mic decât F_{sup} . Presupunând că, în regim staționar, debitul este descris de relația (6.37) în care s-a neglijat efectul temperaturii (pentru simplitate):

$$F = F(X, \Delta p, uz) \quad (6.37)$$

în care F - este debitul de fluid care curge prin vană, X – poziția tijei servomotorului; Δp – diferența de presiune și, ținând cont că debitul maxim prin vană apare atunci când tija servomotorului este ridicată complet, deci $X = 0$, se poate defini probabilitatea echipamentului de a trece din starea 0 în starea 1 prin relația (6.38):

$$P_{01} = P(F(0, \Delta p(t), uz(t)) < F_{sup}) \quad (6.38)$$

- E. Probabilitatea echipamentului de a trece din starea 1 în starea 2 este reprezentată de suma probabilităților de defectare accidentală și probabilitatea ca debitul maxim asigurat de vană să fie mai mic decât F_{inf} , când uzura nu a ajuns la maxim:

$$P_{12} = d * T_e + P(F(0, \Delta p(t), uz(t)) < F_{inf}) \quad (6.39)$$

dacă suma din membrul drept este subunitară. În caz contrar, $P_{12} = 1$.

Ținând cont de cele 5 ipoteze de mai sus, se poate trece la integrarea modelului, în forma recursivă astfel:

$$P_0(k+1) = P_0(k)[1 - P_{01}(k) - P_{02}(k)] \quad (6.40)$$

$$P_1(k+1) = P_0(k) \cdot P_{01}(k) + P_1(k)[1 - P_{12}(k)] \quad (6.41)$$

$$P_2(k+1) = 1 - P_0(k+1) - P_1(k+1) \quad (6.42)$$

Relația (6.42) nu se integrează. Ea rezultă din primele două relații conform condiției dată de relația (6.10).

Inițializarea stărilor sistemului se face cu: $P_0(0) = 1, P_1(0) = 0$.

Din integrarea sistemului, rezultă probabilitățile ca vana să se afle în fiecare dintre cele 3 stări posibile ale sale: 0, 1 și, respectiv, 2. La integrare sunt necesare: valoarea perioadei de eșantionare (T_e), valorile numerice ale parametrilor și cele două probabilități din relațiile (6.38) și (6.39), care depind de expresia debitului F . Valorile numerice ale parametrilor modelelor probabilităților au fost obținute, în cazul de față, din rezultatele simulărilor cu modelul DAMADICS.

În vederea definirii probabilităților de stare ale echipamentului, este necesară exprimarea ratelor/vitezelor de uzură, respectiv defectare care intră în definirea relațiilor (6.36) și (6.37).

S-a ales ipoteza conform căreia viteza de uzură este o variabilă aleatoare iar rata de defectare accidentală este dependentă de uzura momentană. Această ipoteză este intuitivă, dacă ne gândim la particulele solide care circulă prin vană, și care este mai probabil să producă înfundare pe măsură ce depunerea de săruri îngustează spațiul de trecere prin vană. Relația aleasă, între rata de defectare și uzură este cea din (6.43):

$$d(t) = d_0 + d_1 \cdot uz(t) = d_0 + d_1 \cdot v_{med} \cdot t \quad (6.43)$$

Probabilitățile de tranziție descrise prin relațiile (6.36) și, respectiv, (6.38), fiind condiționate de proprietățile statistice ale variabilelor aleatoare vor fi descrise acum de relațiile (6.44) și (6.45):

$$P_{02} = T_e(d_0 + d_1 \cdot t \cdot \int v \cdot p_v(x) \cdot dx) = T_e(d_0 + d_1 \cdot t \cdot v_m) \quad (6.44)$$

unde: $p_v(\cdot)$ – funcția densitate de probabilitate a vitezei de uzură, v

$$P_{01} = P(F(0, \Delta p, uz) < F_{sup}) = \iint_A p_{\Delta p, v}(x, y) \cdot dx \cdot dy \quad (6.45)$$

și unde: $p_{\Delta p, v}(\cdot, \cdot)$ – este funcția densitate de probabilitate combinată, a celor două variabile aleatoare, Δp și v , A este aria în planul $(\Delta p, v)$ în care este îndeplinită condiția $F(0, \Delta p, uz) < F_{sup}$.

Variabilele aleatoare, Δp și v , sunt independente una față de cealaltă, și, prin urmare, funcția densitate de probabilitate combinată poate fi exprimată ca produsul funcțiilor densitate de probabilitate a celor două variabile. Prin urmare, relația (6.45) poate fi exprimată conform (6.46):

$$P_{01} = \iint_A p_{\Delta p}(x) \cdot p_v(y) \cdot dx \cdot dy \quad (6.46)$$

Integrala funcțiilor densităților de probabilitate din relația (6.46), nu este o funcție elementară. Astfel că ar fi dificil sau chiar imposibil de găsit o soluție analitică a acesteia. În asemenea cazuri, poate fi obținută o soluție prin discretizarea ariei A și a funcțiilor densitate de probabilitate.

În lumina noilor ipoteze, relația (6.39), care definește probabilitatea de tranziție a echipamentului din starea nou, în starea cu uzură, P_{12} , va fi înlocuită de relația:

$$P_{12} = \iint_B p_{\Delta p}(x) \cdot p_v(y) \cdot dx \cdot dy + T_s \cdot (d_0 + d_1 \cdot t \cdot v_m) \quad (6.47)$$

unde B este aria în planul $(\Delta p, v)$, în care condiția $F(0, \Delta p, uz) < F_{inf}$, este îndeplinită.

Relațiile de mai sus (6.44), (6.46) și (6.47) permit acum integrarea modelului Markov și anticiparea probabilităților stărilor. Acestea sunt folosite pentru calculul funcțiilor de fiabilitate și costului mediu de exploatare, pe filiera: $R(t) \rightarrow f(t) \rightarrow h(t) \rightarrow H(t)$.

6.2.2 Studiu de caz - Validarea metodei prin simulare numerică

S-a considerat:

- Perioada de eșantionare: $T_e = 1$ oră;
- Viteza de sedimentare depinde de debitul lichidului, temperatură, concentrația de sare și presiunea de intrare. Cum presiunea și compoziția lichidului sunt variabile aleatoare, viteza de uzură nu poate fi decât o variabilă aleatoare la rândul său;
- Astfel, viteza de uzură, v , a fost considerată o variabilă aleatoare, distribuită normal, cu media $v_m = \frac{1}{6000} [h^{-1}]$ și abaterea standard $\sigma = \frac{0.25 \cdot v_m}{3}$. Funcția densitate de probabilitate are aspectul din Fig. 6.4 (curba marcată cu roșu), valoarea abscisei fiind normalizată prin raportare la media distribuției;
- Parametrii modelului defectării accidentale, d_0 și d_1 , au fost considerați niște constante, rezultate din ciclurile anterioare de reînnoire. Valorile numerice considerate sunt: $d_0 = 1/8000 h^{-1}$, $d_1 = 1/1000 h^{-1}$. Pentru o valoare fixă a ratei de uzură, $v = v_m$, valorile alese pentru d_0 și d_1 determină o evoluție a ratei de defectare accidentală ca în Fig. 6.5;
- Diferența de presiune a fost considerată o variabilă aleatoare, distribuită uniform, între limitele $\Delta p_{min} = 200 [kPa]$ și respectiv $\Delta p_{max} = 600 [kPa]$;

- $F_{sup} = 140$ t/oră (extrase din rezultatele simularilor cu modelul DAMADICS și din experiența inginerilor de exploatare);
- $F_{inf} = 100$ t/oră (obținute în același mod - din rezultatele simularilor cu modelul DAMADICS și din experiența inginerilor de exploatare);
- C_{pv} – costul reînnoirilor preventive (programate) – 350 \$;
- C_f – costul reînnoirilor neprogramate – 1000 \$

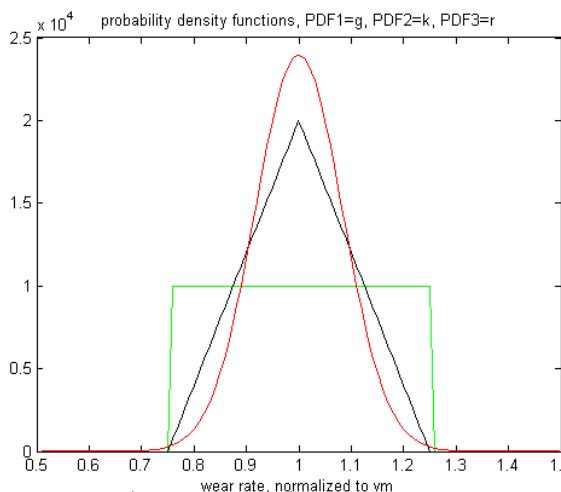


Fig. 6. 2 – Funcții densitate de probabilitate pentru viteza de uzură

Pentru ilustrarea simplă a integrării modelului, s-a mai făcut o ipoteză referitoare la probabilitățile de trecere între stările cu acumulare de uzură (relațiile (6.38) și (6.39)):

- A. Se va parametriza dependența debitului lichidului, F , în ipoteza că tija este complet ridicată ($X = 0$), ca funcție de variabilele Δp și uz . Ca exemplu, caracteristicile statice ale vanei au o alură ca în Fig. 6.7 (pentru un grad de uzură de 35%) și, respectiv, Fig. 6.8 (pentru un grad de uzură de 70%).

O relație care aproximează suficient de bine $F = F(0, \Delta p, uz)$, este:

$$B. F(0, \Delta p, uz) = C \cdot \sqrt{\Delta p / \Delta p_{min}} \cdot (1 - a \cdot uz + b \cdot uz^2) \quad (6.48)$$

unde: $C = F(0, \Delta p_{min}, 0\%)$, $a = 1.2$, $b = 0.5$.

Cu valorile numerice alese mai sus, se integrează modelul descris de relațiile (6.40) și (6.41), folosind probabilitățile de tranziție date prin relațiile (6.44), (6.46) și (6.47), și se obține o evoluție a probabilităților stărilor cu alura prezentată în Fig. 6.9. Din grafic se poate observa că starea vanei se degradează continuu, datorită uzurii. Totuși, dacă nu are loc defectarea accidentală (S_2), după 1600-1700 de ore, vana trece în starea 1 (S_1 - satisfăcătoare/nepericuloasă pentru echipament). După 3000 de ore de funcționare, probabilitatea de defectare a vanei tinde la 1.

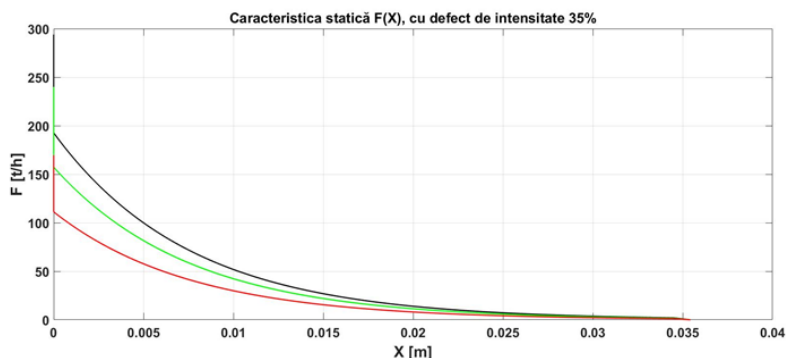


Fig. 6. 4 – Caracteristica statică $F(X)$, pentru defect de intensitate 35%

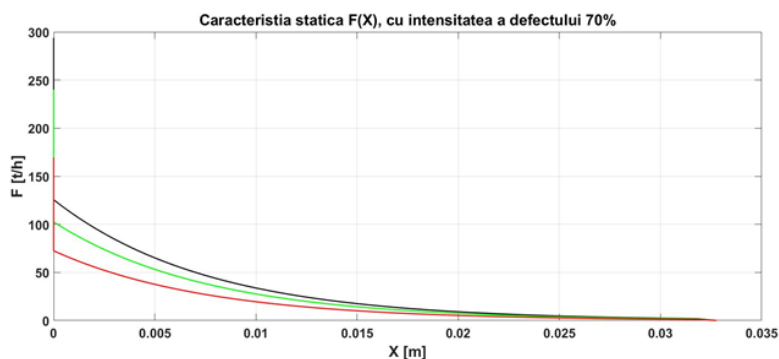


Fig. 6. 5 – Caracteristica statică $F(X)$, pentru defect de intensitate 70%

Funcția de reînnoire obținută, $H(t)$, a actuatorului, are alura prezentată în Fig. 6.10.

Se poate observa în Fig. 6.10 că funcția de reînnoire nu mai are o evoluție liniară. Prin urmare, ponderea ei în valoarea costului mediu de mentenanță variază odată cu timpul de operare, lucru care este evidențiat în Fig. 6.11 în care a fost simulată o familie de funcții cost. În Fig. 6.11 se observă că reducerea costului reînnoirii preventive conduce, de asemenea, la descreșterea timpului optim de reînnoire.

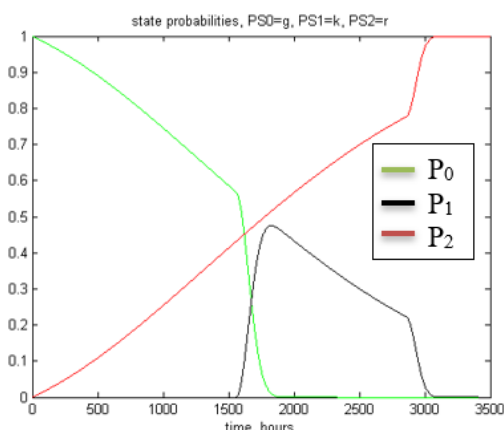


Fig. 6. 6 – Evoluția probabilităților de stare pentru modelul Markov de ordinul 2 al actuatorului (S_0 – starea nou; S_1 – starea cu uzură; S_2 – defectare)

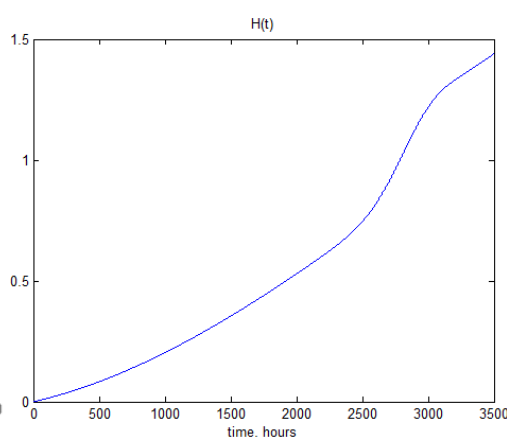


Fig. 6. 7 – Funcția de reînnoire, $H(t)$

Din Fig. 6.12 în care s-a reprezentat timpul optim de reînnoire funcție de raportul C_{pv}/C_f se poate observa că pentru valori mai mari de 0.4 ale raportului C_{pv}/C_f , (pentru valorile numerice considerate în acest studiu de caz) timpul optim tinde să rămână constant.

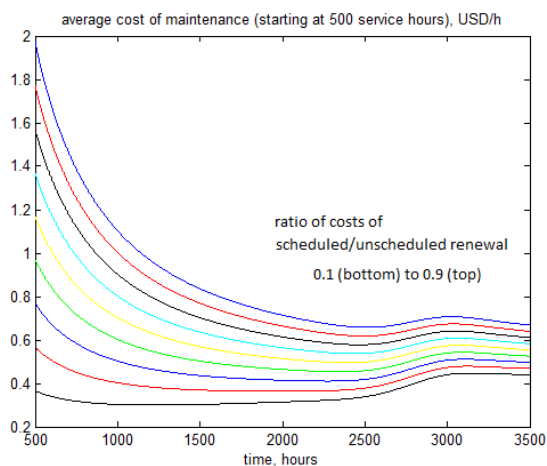


Fig. 6. 8 – Familia funcțiilor cost versus timp de operare între reînnoirile preventive

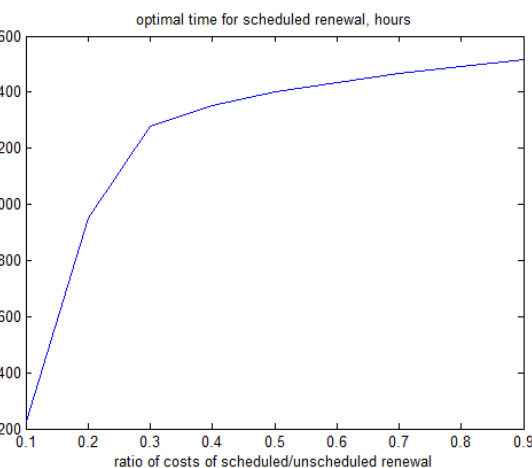


Fig. 6. 9 – Timpul optim de reînnoire ca funcție de raportul C_{pv}/C_f

Capitolul 7

Concluzii finale

În prezenta teză de doctorat, se propune o strategie de mentenanță preventivă, care furnizează timpul optim de reînnoire la care se recomandă oprirea procesului și efectuarea activităților de reînnoire. În vederea predicției timpului optim de reînnoire, stabilit în funcție de maximul posibil de informație în ceea ce privește starea echipamentului, în concordanță cu condițiile curente de exploatare, se propune o strategie de reînnoire evolutivă. În cadrul acestei strategii, parametrii modelului Markov de fiabilitate sunt actualizați în funcție de informațiile obținute în timp real în regimul curent de funcționare a echipamentului (în timpul ciclului curent de reînnoire) dar și în funcție de informațiile constatate în timpul ciclurilor anterioare de reînnoire sau restabilire. Astfel, strategia propusă furnizează un timp optim de reînnoire care evoluează odată cu gradul de uzură a echipamentului, actualizându-se corespunzător acestuia.

Sistemul evolutiv de reînnoire, care pune în aplicare strategia propusă, utilizează trei căi de informație (calea directă, calea rapidă și calea lentă) care concurează la ajustarea parametrilor modelului Markov în așa manieră, încât timpul optim de reînnoire furnizat să fie stabilit cu cât mai mare precizie, în corelație cu condițiile curente de exploatare a echipamentului.

În cadrul tezei de doctorat eforturile de cercetare au fost focalizate pe trei direcții principale, după cum urmează:

- proiectarea unei strategii de mentenanță *integrată*, care să determine timpul optim de reînnoire pentru un echipament afectat de uzură pozitivă;
- dezvoltarea în cadrul strategiei integrate de mentenanță a unui sistem de diagnoza a defectelor;
- dezvoltarea unui model de fiabilitate a echipamentului care să reflecte în timp real starea de uzură a echipamentului.

Sistemul automat de diagnoză, din cadrul sistemului evolutiv de reînnoire, supervizează continuu starea echipamentului, având rolul de a semnaliza orice modificare a acesteia și de a furniza parametrii de uzură curenți (necesari actualizării modelului de fiabilitate a echipamentului).

În cadrul sistemului de reînnoire evolutiv, sistemul de diagnoză intervine la nivelul buclei directe și îndeplinește următoarele roluri:

1. detectează și semnalizează apariția bruscă a unui defect;
2. detectează apariția defectelor cu evoluție graduală încă din stadiul lor incipient și discerne gradul acestora;
3. declanșează o alarmă de avertizare în cazul în care defectul cu evoluție graduală depășește pragul maxim acceptat ca fiind sigur pentru funcționarea echipamentului și desfășurarea neperturbată a procesului;
4. evaluează permanent gradul de uzură a echipamentului și estimează viteza medie de uzură caracteristică condițiilor curente de exploatare;
5. identifică tipul și momentul apariției defectelor.

În cadrul tezei de doctorat, corespunzător eforturilor de cercetare focalizate pe aspectele enumerate mai sus, s-au abordat și identificat soluții tehnice pentru punctele 1-4, urmând ca punctul 5 să fie abordat în cadrul unor cercetări ulterioare.

În cazul aplicației practice aleasă ca studiu de caz în cadrul tezei de doctorat, și anume cel al unui echipament cu uzură pozitivă, se dorește alarmarea pentru cazul în care uzura depășește un anumit nivel considerat acceptabil – în sensul că nu pune în pericol echipamentul și/sau procesul tehnologic pe care îl deservește. În acest sens, s-au făcut o

serie de recomandări privind alegerea pragului de alarmare, astfel încât sistemul de detecție să poată avea performanțe bune în ceea ce privește detecția defectelor încă din stadiu incipient (timp de reacție mic), să poată discerne situațiile reale de alarmare (adică să reducă numărul de alarme false) chiar și în cazul în care măsurătorile din proces sunt afectate de zgomot. Regimul dinamic al actuatorului necesită un model mai amplu fiind afectat de multe incertitudini. Pentru a reduce probabilitatea alarmelor false, s-a profitat de faptul că regimul tranzitoriu nu este relevant pentru tipurile de defecte considerate (depuneri de săruri + înfundarea vanei). Ca urmare, atât pentru scopul detectării defectelor, cât și pentru cel al estimării uzurii curente (cazul depunerii de săruri în vană) s-a optat pentru un model neuronal care să reprezinte doar regimul staționar. Evident, acesta este antrenat cu date obținute doar în regim staționar. Pentru alte tipuri de defecte (cum ar fi cele legate de poziționare), modelarea regimului dinamic rămâne necesară.

Detecția defectului se realizează pe baza metodei reziduurilor calculate ca modul al diferenței dintre ieșirea procesului supravegheat și ieșirea modelului acestui proces pentru condiții normale de funcționare. Pentru validarea metodei de detecție a defectelor, obiectul fizic a fost simulat folosind benchmark-ul DAMADICS. Modelul procesului fizic în condiții normale de funcționare, precum și estimatorul stării de uzură s-au realizat folosind câte o rețea neuronală. Alegerea acestui tip de model este justificată de eficiența rețelelor neuronale în modelarea neliniarităților proceselor, cât și de faptul că acestea nu necesită cunoștințe a priori legate de legăturile care guvernează procesul. Așa cum s-a constatat, fenomenele fizice implicate în dinamica actuatorului (frecare, fenomene pneumatice etc.) sunt imprevedibile și necontrolabile determinând neliniarități ale dinamicii actuatorului și, implicit, ale procesului pe care îl deservește.

Referitor la aceste rețele neuronale, se pot face următoarele comentarii: rezultatele cercetărilor au arătat faptul că trebuie acordată o atenție deosebită alegerii setului de date pentru antrenare datorită unor restricții impuse de funcționarea actuatorului. Analiza funcționării acestuia a arătat faptul că, la valori mici ale debitului de fluid cerute de sarcină, sistemul nu poate detecta defecte generate de depunerea de săruri. De asemenea, s-a dovedit necesitatea alegerii unui număr echilibrat de exemple de antrenare care să acopere întregul domeniu al diferenței de presiune și la valori mari ale debitului de fluid, astfel încât capacitatea de aproximare a rețelei să fie cât mai apropiată de realitate.

Cercetările realizate în cadrul tezei de doctorat, evidențiază, de asemenea, faptul că eficiența strategiei de mentenanță nu depinde doar de performanța sistemului de diagnoză ci și de determinarea corectă și alegerea adecvată a parametrilor modelului de fiabilitate a echipamentului. O alegere inadecvată a parametrilor modelului Markov poate conduce la indicații eronate ale sistemului de reînnoire, afectând eficiența întregii strategii de mentenanță. În ceea ce privește modelul Markov, la începutul fiecărui ciclu de reînnoire parametrii modelului Markov de fiabilitate sunt ajustați (dacă este cazul) pe baza valorilor mărimilor măsurate la fiecare operație de reînnoire sau restabilire, și anume: nivelul de uzură constatată, durata de funcționare până la acea operație, natura acelei operații (cauzată de un defect sau planificată). Se obține astfel un sistem de reînnoire evolutiv, care furnizează ciclic timpi optimi de reînnoire în corelație atât cu datele înregistrate în timp real din procesul fizic, cât și cu valorile acestor parametri constatați efectiv în timpul operațiilor de reînnoire/restabilire.

Contribuții originale ale tezei de doctorat

În cadrul tezei de doctorat pot fi evidențiate o serie de contribuții originale în domeniul strategiilor de mentenanță preventivă, după cum urmează:

1. Analiza funcționării actuatorului, atât prin prisma proceselor fizice care îi influențează dinamica, cât și a defectelor care pot apărea la nivelul acestuia. Această analiză a stat la baza dezvoltării sistemului de diagnoză;
2. Proiectarea unei rețele neuronale care aproximează comportarea actuatorului în condiții normale de funcționare;
3. Realizarea unui estimator al stării curente de uzură bazat pe o rețea neuronală;

4. Proiectarea unui sistem instruibil de detecție a defectelor bazat pe metoda reziduurilor, care poate detecta defecte cu diferite intensități;
5. Validarea metodei de detecție a defectelor cu model neuronal prin simulări numerice pentru diferite grade ale defectului indus și în prezența zgomotelor care afectează funcționarea actuatorului;
6. Determinarea modelului Markov pentru actuatorul utilizat ca studiu de caz în lucrare;
7. Modelarea degradării actuatorului, pentru două tipuri de defecte specifice (depunerea de săruri + înfundarea vanei);
8. Parametrizarea funcțiilor de probabilitate care apar în modelul Markov de fiabilitate;
9. Metodă de reevaluare în timp real a timpului optim de reînnoire în cadrul strategiei de mentenanță de tip evolutiv implementată;
10. Validarea metodelor implicate de sistemul de reînnoire evolutiv pe un studiu de caz din industrie (un element de execuție utilizat într-un proces de fabricare a zahărului).

Direcții viitoare de cercetare

Cercetările demarate în cadrul prezentei teze de doctorat pot fi continuate în următoarele direcții:

- proiectarea de noi algoritmi, prin care sistemul automat de diagnoză să detecteze mai multe tipuri de defecte
- proiectarea unui modul pentru izolarea defectelor – în vederea completării sistemului de diagnoză a defectelor

Diseminarea rezultatelor

Rezultatele obținute ca urmare a cercetărilor realizate în cadrul tezei de doctorat au fost publicate în următoarele articole științifice:

1. A. Pricopie, L. Frangu, S. Caraman, "A preventive maintenance strategy for an actuator using Markov models", *21th IFAC World Congress, Germany, July 11-17, 2020a*.
2. A. Pricopie, L. Frangu, S. Caraman, "A Markov model to predict wear status of the vehicle tires", *8th Edition of SCDS-UDJG, 18th and 19th of June 18-19, Galati, 2020b*.
3. A. Pricopie, L. Frangu, S. Caraman, "An improved degradation model for preventive maintenance", *24th International Conference on System Theory, Control and Computing, Iași, 2020*
4. Laurențiu Luca, Alina Pricopie, Marian Barbu, George Ifrim, Sergiu Caraman, "Control Strategies of Phosphorous Removal in Wastewater Treatment Plants", *ICTCS, Sinaia, Romania, 2019*
5. Laurențiu Luca, Alina Pricopie, Iulian Vasiliev, Marian Barbu, Sergiu Caraman, "Fuzzy-Optimal Control Strategies for a Wastewater Treatment Plant", *ICSTCC 2020 - The 24rd International Conference on System Theory, Control and Computing, October 8-10, Sinaia, Romania, 2020*
6. Iulian Vasiliev, Laurențiu Luca, Marian Barbu, Alina Pricopie, Sergiu Caraman, "Mathematical Model of a Collecting and Wastewater Treatment Integrated System", *25th International Conference on System Theory, Control and Computing, Iași, 2021*

Primele 3 lucrări conțin rezultatele cercetărilor obținute pe partea de proiectarea și parametrizarea a modelului Markov al actuatorului. Rezultatele științifice obținute pe partea de sistem automat de diagnoză realizat cu rețele neuronale vor fi publicate în cadrul unui articol într-o revistă de specialitate indexată Q1/Q2.

De menționat faptul că lucrarea 2 a obținut premiul I la Conferința Școlilor Doctorale Galați, 2020.

Bibliografie

- [1] V. Deac, "The Modern Approach to Industrial Maintenance Management," *Inform. Econ.*, vol. 14, no. 2, pp. 133–144, 2010.
- [2] B. Al-Najjar, "The lack of maintenance and not maintenance which costs: A model to describe and quantify the impact of vibration-based maintenance on company's business," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 107, no. 1, pp. 260–273, 2007, doi: 10.1016/j.ijpe.2006.09.005.
- [3] B. Al-Najjar, "An approach for continuous reduction in," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 4–20, 1996, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1108/13552519610130413%5CnDownloaded>.
- [4] J. Endrenyi *et al.*, "The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 638–646, 2001, doi: 10.1109/59.962408.
- [5] L. Bertling, R. Eriksson, and R. N. Allan, "Relation between preventive maintenance and reliability," *IEEE Trans. Power Syst.*, no. step 7, pp. 0–5, 2001.
- [6] A. Thawkar, P. Tambe, and V. Deshpande, "A reliability centred maintenance approach for assessing the impact of maintenance for availability improvement of carding machine," *Int. J. Process Manag. Benchmarking*, vol. 8, no. 3, pp. 318–339, 2018, doi: 10.1504/IJPMB.2018.092891.
- [7] R. S. Velmurugan and T. Dhingra, *Maintenance strategy selection and its impact in maintenance function: A conceptual framework*, vol. 35, no. 12. 2015.
- [8] A. Mouzakis, "Classification of fault diagnosis methods for control systems," *Meas. Control (United Kingdom)*, vol. 46, no. 10, pp. 303–308, 2013, doi: 10.1177/0020294013510471.
- [9] D. Miljković, "Fault Detection Methods : A Literature Survey," *MIPRO, 2011 Proc. 34th Int. Conv. Opatija, Croat. 23-27 May, 2011*, no. June, 2011.
- [10] S. X. Ding, *Model-based Fault Diagnosis Techniques*, 2008th ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [11] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems*, 2006th ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [12] J. Chen and R. Patton, *ROBUST MODEL-BASED FAULT DIAGNOSIS FOR DYNAMIC SYSTEMS*. Springer-Science+Bussines Media, B.V, 1999.
- [13] V. Palade and C. Bocaniala, *Computational Intelligence in Fault Diagnosis*, 2006th ed., no. 5. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [14] P. Krzysztof, *Artificial Neural Networks for Modelling and Fault Diagnosis of technical Processes*, 2008th ed., vol. 404. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [15] M. Bartyś and B. Hryniewicki, "The trade-off between the controller effort and control quality on example of an electro-pneumatic final control element," *Actuators*, vol. 8, no. 1, 2019, doi: 10.3390/act8010023.
- [16] S. Close, "Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis. Technical Report EAS 16/06-010 R001," Available on-line: <https://manualzz.com/doc/18430541>, p. 31.
- [17] M. Bartyś, "Single acting electro-pneumatic positioner," *PAK*, vol. 55, no. 3, pp. 186–189, 2009.
- [18] N. Mărășescu, *Teză de doctorat – "Sisteme de înaltă fiabilitate bazate pe tehnici de diagnoză și predicție."* Universitatea "Dunărea de Jos", Facultatea de Inginerie

- Electrică și Electronică, Școala doctorală "Inginerie electrică și Electronică", Galați, 1999.
- [19] S. K. Pinjala, L. Pintelon, and A. Vereecke, "An empirical investigation on the relationship between business and maintenance strategies," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 104, no. 1, pp. 214–229, 2006, doi: 10.1016/j.ijpe.2004.12.024.
- [20] A. Davies, *Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology*, 1998th ed. Springer-Science+Bussines Media, B.V, 1998.
- [21] S. Mostafa, J. Dumrak, and H. Soltan, "Lean Maintenance Roadmap," *Procedia Manuf.*, vol. 2, no. February, pp. 434–444, 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.076.
- [22] A. Sarkar, D. Kumar, and B. Sarkar, "The Maintenance Strategy Selection of a Gas Turbine Power Plant System," *J. Inf. Oper. Manag.*, vol. 2, no. 1, pp. 9–16, 2011.
- [23] R. Kothamasu, S. H. Huang, and W. H. Verduin, "System health monitoring and prognostics - A review of current paradigms and practices," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 28, no. 9, pp. 1012–1024, 2006, doi: 10.1007/s00170-004-2131-6.
- [24] Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems," *Annu. Rev. Control*, vol. 32, no. 2, pp. 229–252, 2008, doi: 10.1016/j.arcontrol.2008.03.008.
- [25] V. Cătuneanu and A. Mihalache, *Bazele teoretice ale fiabilității*. București: Editura Academiei Republicii Socialiste România, 1983.
- [26] A. Van Horenbeek, L. Pintelon, and P. Muchiri, "Maintenance optimization models and criteria," *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, vol. 1, no. 3, pp. 189–200, 2010, doi: 10.1007/s13198-011-0045-x.
- [27] N. Gorjian, L. Ma, M. Mittinty, P. Yarlagadda, and Y. Sun, "A review on degradation models in reliability analysis," *Eng. Asset Lifecycle Manag. - Proc. 4th World Congr. Eng. Asset Manag. WCEAM 2009*, no. September, pp. 369–384, 2009, doi: 10.1007/978-0-85729-320-6_42.
- [28] N. D. Singpurwalla, "Survival in dynamic environments," *Stat. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 86–103, 1995, doi: 10.1214/ss/1177010132.
- [29] K. S. Trivedi, K. Vaidyanathan, and D. Selvamuthu, *Markov chain models and applications*. Elsevier Inc., 2015.
- [30] I. Martinescu and I. Popescu, *Analiza fiabilitatii si securitatii sistemelor*. Brașov: Editura Universitatii Transilvania Brasov, 2002.
- [31] I. P. S. Ahuja and J. S. Khamba, *Total productive maintenance: Literature review and directions*, vol. 25, no. 7. 2008.
- [32] H. Wang and H. Pham, *Reliability and Optimal Maintenance*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [33] L. Pintelon and A. Parodi-herz, "Maintenance: An Evolutionary Perspective Maintenance: An Evolutionary Perspective," no. January 2008, pp. 21–48, 2015.
- [34] M. Ben-Daya and S. O. Duffuaa, "Overview of Maintenance Modeling Areas," *Maintenance, Model. Optim.*, pp. 3–35, 2000, doi: 10.1007/978-1-4615-4329-9_1.
- [35] P. Poo' r, D. Z' eni' s' ek, and J. Basl, "Historical overview of maintenance management strategies: Development from breakdown maintenance to predictive maintenance in accordance with four industrial revolutions," *Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manag.*, no. July, pp. 495–504, 2019.
- [36] D. Chesworth, "Industry 4.0 Techniques as a Maintenance Strategy (A Review Paper)," *Researchgate.net/publication/322369285*, no. January, pp. 0–8, 2018, doi: 10.13140/RG.2.2.18116.32644.
- [37] M. Rausand and H. Arnljot, "System Reliability Theory - Models, Statistical Methods

- and Applications.” John Wiley & Sons, Inc., Publications, 2004.
- [38] J. J. Gertler, “Survey of Model-Based Failure Detection and Isolation in Complex Plants,” *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 8, no. 6, pp. 3–11, 1988, doi: 10.1109/37.9163.
- [39] J. I. E. Chen, “Robust residual generation for model-based fault diagnosis of dynamic systems,” no. January, pp. 1–293, 1995.
- [40] M. Blanke and M. Kinnaert, *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
- [41] R. S. Sharma, L. Dewan, and S. Chatterji, “Fault Diagnosis Methods in Dynamic Systems: A Review,” *Int. J. Electron. Electr. Eng.*, vol. 3, no. 6, pp. 465–471, 2015, doi: 10.12720/ijeee.3.6.465-471.
- [42] A. S. Willsky, “A survey of design methods for failure detection in dynamic systems,” *Automatica*, vol. 12, no. 6, pp. 601–611, 1976, doi: 10.1016/0005-1098(76)90041-8.
- [43] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and S. N. Kavuri, “A review of process fault detection and diagnosis part II: Qualitative models and search strategies,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 3, pp. 313–326, 2003, doi: 10.1016/S0098-1354(02)00161-8.
- [44] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S. N. Kavuri, “A review of process fault detection and diagnosis part I: Quantitative model-based methods,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 3, pp. 293–311, 2003, doi: 10.1016/S0098-1354(02)00160-6.
- [45] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S. N. Kavuri, “A review of fault detection and diagnosis. Part III: Process history based methods,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, pp. 327–346, 2003.
- [46] R. Isermann, “Model-based fault-detection and diagnosis - Status and applications,” *Annu. Rev. Control*, vol. 29, no. 1, pp. 71–85, 2005, doi: 10.1016/j.arcontrol.2004.12.002.
- [47] P. M. Frank, “Analytical and qualitative model-based fault diagnosis - A survey and some new results,” *European Journal of Control*, vol. 2, no. 1, pp. 6–28, 1996, doi: 10.1016/S0947-3580(96)70024-9.
- [48] R. J. Patton, F. J. Uppal, and C. J. Lopez-toribio, “Soft Computing Approaches to Fault Diagnosis for Dynamic Systems: A Survey,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 33, no. 11, pp. 303–315, 2000, doi: 10.1016/s1474-6670(17)37377-9.
- [49] S. R. Naidu, E. Zafiriou, and T. J. McAvoy, “Use of Neural Networks for Sensor Failure Detection in a Control System,” *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 10, no. 3, pp. 49–55, 1990, doi: 10.1109/37.55124.
- [50] B. M. Pfeiffer and R. Isermann, “Criteria for successful applications of fuzzy control,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 7, no. 3, pp. 245–253, 1994, doi: 10.1016/0952-1976(94)90052-3.
- [51] P. M. Frank and N. Kiupel, “Fuzzy supervision and application to lean production,” *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 24, no. 10, pp. 1935–1944, 1993, doi: 10.1080/00207729308949605.
- [52] S. Heo and J. H. Lee, “Fault detection and classification using artificial neural networks,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 18, pp. 470–475, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.09.380.
- [53] D. R. Hush, C. T. Abdallah, G. L. Heileman, and D. Docampo, “Neural networks in fault detection: A case study,” *Proc. Am. Control Conf.*, vol. 2, no. June, pp. 918–921, 1997, doi: 10.1109/acc.1997.609660.
- [54] P. Frank, “Fault Diagnosis in Dynamic System Using Analytical and Knowledge-based Redundancy - A Survey and Some New Results,” *1990 Int. Fed. Autom. Control*, vol. Automatica, pp. 459–474, 1990, doi: 10.1109/ROBIO.2011.6181275.

- [55] Arinton E., "Teză de doctorat – 'Utilizarea rețelelor neuronale în diagnoza defectelor pentru procese dinamice neliniare,'" *Univ. "Dunărea Jos", Fac. Ing. Electr. și Electron. Școala Dr. "Inginerie Electr. și Electron.", 2010.*
- [56] E. Chow and A. Willsky, "Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems," *IEEE Trans. Autom. Control.* vol. 29, no. 7, pp. 603-614, vol. 29, no. 7, pp. 603–614.
- [57] J. Gertler and D. Singer, "A new structural framework for parity equation-based failure detection and isolation," *Automatica*, vol. 26, no. 2, pp. 381–388, 1990, doi: 10.1016/0005-1098(90)90133-3.
- [58] J. Gertler, "Analytical Redundancy Methods in Fault Detection and Isolation - Survey and Synthesis," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 24, no. 6, pp. 9–21, 1991, doi: 10.1016/s1474-6670(17)51119-2.
- [59] J. Gertler, "Diagnosing parametric faults: from parameter estimation to parity relations," *Proc. Am. Control Conf.*, vol. 3, pp. 1615–1620, 1995, doi: 10.1109/acc.1995.529780.
- [60] R. J. Patton and J. Chen, "Review of parity space approaches to fault diagnosis," *IFAC Symp. Ser.*, vol. 24, no. 6, pp. 65–81, 1992, doi: 10.1016/s1474-6670(17)51124-6.
- [61] R. Lsermann, "SUPERVISION, FAULT-DETECTION AND FAULT-DIAGNOSIS METHODS-AN INTRODUCTION," 1997.
- [62] K. J. Hunt, D. Sbarbaro, R. Zbikowski, and P. J. Gawthrop, "Neural networks for control systems-A survey," *Automatica*, vol. 28, no. 6, pp. 1083–1112, 1992, doi: 10.1016/0005-1098(92)90053-1.
- [63] S. Leonhardt and M. Ayoubi, "Methods of fault diagnosis," *Control Eng. Pract.*, vol. 5, no. 5, pp. 683–692, 1997, doi: 10.1016/S0967-0661(97)00050-6.
- [64] Miron M., "Teză de doctorat - 'Contribuții privind diagnoza proceselor de tratare a apelor uzate utilizând rețele neuronale,'" *Univ. "Dunărea Jos", Fac. Ing. Electr. și Electron. Școala Dr. "Inginerie Electr. și Electron.", 2018.*
- [65] P. R. N. da Silva, H. A. Gabbar, P. Vieira Junior, and C. T. da Costa Junior, "A new methodology for multiple incipient fault diagnosis in transmission lines using QTA and Naïve Bayes classifier," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 103, no. June, pp. 326–346, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.05.036.
- [66] R. Isermann, "Model-Based Fault Detection and Diagnosis - Status and Applications," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 37, no. 6, pp. 49–60, 2004, doi: 10.1016/s1474-6670(17)32149-3.
- [67] Basri, E.I., Abdul Razak, I.H., Ab-Samat, H. and Kamaruddin, S. (2017), "Preventive maintenance (PM) planning: a review", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 23 No. 2, pp. 114-143. <https://doi.org/10.1108/JQME-04-2016-0014>.
- [68] Y. Peng, M. Dong, and M. J. Zuo, "Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: A review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 50, no. 1–4, pp. 297–313, 2010, doi: 10.1007/s00170-009-2482-0.
- [69] F. Yang, C. M. Kwan, and C. S. Chang, "Multiobjective evolutionary optimization of substation maintenance using decision-varying Markov model," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, 2008, doi: 10.1109/TPWRS.2008.922637.
- [70] F. Yang and C. S. Chang, "Optimisation of maintenance schedules and extents for composite power systems using multi-objective evolutionary algorithm," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 3, no. 10, pp. 930–940, 2009, doi: 10.1049/iet-gtd.2009.0172.
- [71] Z. X. Wang, C. S. Chang, F. Yang, and W. W. Tan, "Adaptive type-2 fuzzy maintenance advisor for offshore power systems," *Conf. Proc. - IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, pp. 4520–4526, 2009, doi: 10.1109/ICSMC.2009.5346899.

- [72] H. A. Nozari, S. Nazeri, H. D. Banadaki, and P. Castaldi, "Model-free fault detection and isolation of a benchmark process control system based on multiple classifiers techniques—A comparative study," *Control Eng. Pract.*, vol. 73, no. June 2017, pp. 134–148, 2018, doi: 10.1016/j.conengprac.2018.01.007.
- [73] L. F. Mendonca, J. M. . Sousa, and J. M. . Sa da Costa, "An architecture for fault detection and isolation based on fuzzy methods q," vol. 36, pp. 1092–1104, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2007.11.009.
- [74] J. Mohd, M. A. Hussain, M. O. Tade, and J. Zhang, "Expert Systems with Applications Artificial Intelligence techniques applied as estimator in chemical process systems – A literature survey," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 14, pp. 5915–5931, 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2015.03.023.
- [75] F. Dima, "Tehnologia Zaharului," *Ed. Univ. "Dunărea Jos" Galați Fac. Știința și Ing. Aliment.*, 2008.
- [76] V. Zăpodeanu and I. Băisan, "Operații unitare și procese în industria alimentară," *Univ. Teh. „Gh. Asachi” Iași Fac. Mec.*, 2021.
- [77] M. Bartys, J. Calado, R. Patton, and J. Quevedo, "Introduction to the DAMADICS actuator FDI benchmark study," *IEE Colloq.*, no. 179, 2001, doi: 10.1049/ic:20010220.
- [78] M. Syfert, M. Bartys, and J. Queved, "Benchmark Definition," *Numer. Simul. Oscil. Convect. Low-Pr Fluids*, pp. 3–8, 2002, doi: <http://diag.mchtr.pw.edu.pl/damadics>.
- [79] M. Bartyś and M. Syfert, "Data description file," *Manuscr. Http//Diag. Mchtr. Pw. Edu. Pl/Damadics*, pp. 1–15, 2002, doi: DAMADICS Information Website.
- [80] M. G. and P. L. H. Olsson, K.J. Astrom, C. Canudas de Wit, "[H.Olsson ect.] Friction models and friction compensation [1998] .pdf," *European Journal of Control*, no. 4. pp. 176–195, 1998.
- [81] Ioan I. ȘTEFĂNESCU Nicolae P. DIACONU, *Practica lubrifierii tribosistemelor industriale*, vol. 53, no. 9. 2009.
- [82] I.-D. Geonea, "Tribologie, notiuni teoretice si aplicatii de laborator," *Univ. din Craiova, Fac. Mec.*, 2018.
- [83] B. Bhushan, *Introduction to tribology*, vol. 31, no. 2. John Wiley & Sons, Ltd., Publications, 2013.
- [84] C. A. Coulomb, "Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties, et la roideur des cordages," vol. In *Mém. Ma*, pp. 161–342, 1785.
- [85] S. de las Heras, "Improving gas dynamic models for pneumatic systems," *Int. J. Fluid Power*, vol. 4, no. 3, pp. 47–56, 2003, doi: 10.1080/14399776.2003.10781174.
- [86] T. Sorsa, H. N. Koivo, and H. Koivisto, "Neural Networks in Process Fault Diagnosis," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 21, no. 4, pp. 815–825, 1991, doi: 10.1109/21.108299.
- [87] J. M. F. Calado, J. Korbicz, K. Patan, R. J. Patton, and J. M. G. Sá Da Costa, "Soft computing approaches to fault diagnosis for dynamic systems," *Eur. J. Control*, vol. 7, no. 2–3, pp. 248–286, 2001, doi: 10.3166/ejc.7.248-286.
- [88] I. A. Basheer and M. Hajmeer, "Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application," *J. Microbiol. Methods*, vol. 43, no. 3, pp. 3–31, 2000.
- [89] O. I. Abiodun, A. Jantan, A. E. Omolara, K. V. Dada, N. A. E. Mohamed, and H. Arshad, "State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey," *Heliyon*, vol. 4, no. 11, p. e00938, 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00938.
- [90] M. T. Hagan, H. B. Demuth, M. H. Beale, and O. de Jesus, *Neural Network Design*. 2nd Edition, eBook.
- [91] I. N. da Silva, D. H. Spatti, R. A. Flauzino, L. H. B. Liboni, and S. F. dos Reis Alves,

- Artificial neural networks: A practical course*. Springer International Publishing Switzerland, 2017.
- [92] I. B. Ciocoiu, *Curs "Adaptative Signal processing."* Facultatea de Electronică, Telecomunicații și tehnologia Informației, Universitatea Tehnică din Iași, Romania.
- [93] A. K. Jain, J. Mao, and K. M. Mohiuddin, "Artificial neural networks: A tutorial," *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 29, no. 3, pp. 31–44, 1996, doi: 10.1109/2.485891.
- [94] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, "Learning representations by back-propagating errors," *Nature*, vol. 323, no. 6088, pp. 533–536, 1986, doi: 10.1038/323533a0.
- [95] I. Jung, L. Koo, and G. N. Wang, "Two States Mapping Based Time Series Neural Network Model for Compensation Prediction Residual Error," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1060, pp. 174–177, 2008, doi: 10.1063/1.3037046.
- [96] M. Alsmadi, K. Omar, S. Azman, and M. Noah, "Back Propagation Algorithm : The Best Algorithm Among the Multi-layer Perceptron Algorithm Cultural Heritage Repository View project Robotic Project View project," *IJCSNS Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur.*, vol. 9, no. 4, pp. 378–383, 2009, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/301953002>.
- [97] S. Sapna, "Backpropagation Learning Algorithm Based on Levenberg Marquardt Algorithm," pp. 393–398, 2012, doi: 10.5121/csit.2012.2438.
- [98] Wen Jin, Zhao Jia Li, Luo Si Wei, and Han Zhen, "The improvements of BP neural network learning algorithm," pp. 1647–1649, 2002, doi: 10.1109/icosp.2000.893417.
- [99] W. Saputra, T. Tulus, M. Zarlis, R. W. Sembiring, and D. Hartama, "Analysis Resilient Algorithm on Artificial Neural Network Backpropagation," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 930, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/930/1/012035.
- [100] M. Riedmiller and H. Braun, "Direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm," *1993 IEEE Int. Conf. Neural Networks*, pp. 586–591, 1993, doi: 10.1109/icnn.1993.298623.
- [101] D. W. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," *J.Soc.Indust.Appl.Math.*, vol. 11, no. 2, pp. 431–441, 1963.
- [102] Aldrich .C (2002), *Exploratory Analysis of Metallurgical Process Data with Neural Networks and Related Methods*. Elsevier Science, British Library Cataloguing in Publication Data, Netherlands, Vol.1, pp.56-57.
- [103] S. Basterrech, S. Mohammed, G. Rubino, and M. Soliman, "Levenberg - Marquardt training algorithms for random neural networks," *Comput. J.*, vol. 54, no. 1, pp. 125–135, 2011, doi: 10.1093/comjnl/bxp101.
- [104] Z. Liang and A. K. Parlikad, "A Condition-Based Maintenance Model for Assets With Accelerated Deterioration Due to Fault Propagation," vol. 64, no. 3, pp. 972–982, 2015.
- [105] M. Giorgio, M. Guida, and G. Pulcini, "An age- and state-dependent Markov model for degradation processes," *IIE Trans.*, vol. 43, no. October 2014, pp. 621–632, 2011, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/0740817X.2010.532855>.
- [106] T. M. Welte, J. Vatn, and J. Heggset, "Markov State Model for Optimization of Maintenance and Renewal of Hydro Power omponents," 2006.
- [107] A. Pricopie, L. Frangu, R. Vilanova, and S. Caraman, "A preventive maintenance strategy for an actuator using Markov models," *IFAC Pap.*, vol. 53, no. 2, pp. 784–789, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.831.
- [108] A. Pricopie, L. Frangu, M. Miron, and S. Caraman, "An improved degradation model

- for preventive maintenance,” *24th Int. Conf. Syst. Theory, Control Comput. Iași*, no. 2006, pp. 483–488, 2020.
- [109] S. C. Alina Pricopie, Laurențiu Frangu, “A Markov model to predict wear status of the vehicle tyres,” *Ann. Univ. “Dunarea Jos” Galați, Fascicle III Electrotech. Electron. Autom. Control Informatics*, vol. ISSN 2344, 2020, [Online]. Available: <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/eeaci/issue/view/354>.
- [110] J. C. Mare, “Friction modelling and simulation at system level: A practical view for the designer,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, vol. 226, no. 6, pp. 728–741, 2012, doi: 10.1177/0959651812441749.
- [111] B. Armstrong-Helouvry, P. Dupont, and C. Canudas de Wit, “A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction,” *Automatica*, vol. 30, no. 7, pp. 1083–1138, 1994.
- [112] Y. F. Liu, J. Li, Z. M. Zhang, X. H. Hu, and W. J. Zhang, “Experimental comparison of five friction models on the same test-bed of the micro stick-slip motion system,” *Mech. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 15–28, 2015, doi: 10.5194/ms-6-15-2015.
- [113] P. Niranjana, S. Karinka, K. V. S. S. S. Sairam, A. Upadhya, and S. Shetty, “Friction modeling in servo machines: a review,” *Int. J. Dyn. Control*, vol. 6, no. 3, pp. 893–906, 2018, doi: 10.1007/s40435-017-0353-3.
- [114] H. Olsson, “Control Systems with Friction. PhD thesis,” *Dep. Autom. Control, Inst. Technol. Lund, Sweden*, 1996.
- [115] D. Karnopp, “Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems,” *Trans. ASME—Journal Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 107, no. 1, pp. 100–103, 1985.
- [116] P. R. Dahl, “A Solid Friction Model,” *Tech. Report, Aerosp. Corp. El Segundo*, vol. 158, 1968.
- [117] P. Dahl, “Solid friction damping of spacecraft oscillations,” *AIAA Pap. No.75-1104 Present. AIAA Guid. Control Conf. Bost. Mass*, 1975.
- [118] P. R. Dahl, “Solid friction damping of mechanical vibrations,” *AIAA J.*, vol. 14, no. 12, pp. 1675–1682, 1976, doi: 10.2514/3.61511.
- [119] P.-A. Bliman and M. Sorine, “Friction modeling by hysteresis operators. application to Dahl, sticktion and Stribeck effects,” *Proc. Conf. “Models Hysteresis”, Trento, Italy*, 1991.
- [120] P.-A. Bliman and M. Sorine, “A system theoretic approach of systems with hysteresis. Application to friction modelling and compensation compensation,” *Proc. Second Eur. Control Conf. Groningen, Netherlands*, pp. 1844–49, 1993.
- [121] P.-A. Bliman and M. Sorine, “Easy-to-use realistic dry friction models for automatic control,” *Proc. 3rd Eur. Control Conf. Rome, Italy*, pp. 3788–3794, 1995.
- [122] M. A. Krasnoselskij and A. V. Pokrovskij, *Systems with hysteresis*. Springer, New York, 1980.
- [123] A. Visintin, *Differential Models of Hysteresis*. Ed. Springer, 1994.
- [124] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K. J. ÅSTRÖM, and P. LISCHINSKY, “A new model for control of systems with friction,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 40(3), pp. 419–425, 1995.