

**Universitatea "Politehnica" din Timișoara**

**ing. Vasile Anghel**

**CERCETĂRI PRIVIND MODELE,  
METODE ȘI MIJLOACE DE  
MENTENANȚĂ INDUSTRIALĂ  
APLICATĂ ÎN DOMENIUL NUCLEAR**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
în domeniul Inginerie Industrială

Conducător științific:  
Prof. univ. dr. ing. George Drăghici

2009



---

## Cuvânt înainte

---

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Institutului Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice și Izotopice, ICSI Rm. Vâlcea, ca responsabil cu mentenanța la o instalație de detritiere nucleară de interes național, respectiv ca cercetător științific gradul III în cadrul Departamentului de Cercetare și Dezvoltare din cadrul ICSI.

O dizertație nu este doar rezultatul unei munci individuale. Ea nu ar fi putut să fie finalizată fără suportul și ajutorul:

- ☑ Conducătorului de doctorat, Prof. univ. dr. ing. George Drăghici, căruia i se cuvin mulțumiri deosebite pentru încrederea acordată, pentru suportul și îndrumarea continuă în domeniul ingineriei integrate;
- ☑ Conducerii Institutului de Cercetare și Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice și Izotopice, ICSI Râmnicu Vâlcea, Directorului General, Prof. univ. dr. fiz. Ioan Ștefănescu, căroră le adresez mulțumiri pentru responsabilitățile încredințate în cadrul ICSI Rm. Vâlcea, ca proiectant pentru echipamente criogenice, responsabil cu mentenanța la Instalația Nucleară de Detritiere, respectiv cercetător științific gr. III;
- ☑ Referenților științifici ai tezei de doctorat, căroră le sunt recunoscător pentru competența cu care au analizat și apreciat rezultatele muncii mele;
- ☑ Cercetătorilor pe care i-am întâlnit în diferite împrejurări, în special cu ocazia participării la conferințe naționale și internaționale, pentru interesul cu care au recepționat și evaluat cercetările prezentate;
- ☑ Agenției Naționale de Cercetare Științifică, pentru finanțarea prin Programul Național Cercetare de Excelență a proiectului "REȚEA PILOT DE CERCETARE-EXPERIMENTARE A UNUI NOU PROCES DE PRODUCȚIE BAZAT PE PREDICȚIA DEFECTELOR ON-LINE PENTRU MENTENANȚĂ INTEGRATĂ ȘI FIABILITATE, APLICABILE UNEI INSTALAȚII DE DETRITIERE", prin care s-a asigurat, în mare parte, suportul cercetărilor experimentale și aplicative în domeniul tezei.

Timișoara, mai 2009

Vasile ANGHEL

Soției mele Elena și copiilor Isabela-Ioana și Nicolaie-Alexandru

Anghel, Vasile

**Cercetări privind modele, metode și mijloace de mentenanță industrială aplicată în domeniul nuclear**

Cuvinte cheie:

mentenanță, risc, fiabilitate, diagnoză, prognostic, logică fuzzy, sistem expert

Rezumat:

Mentenanța reprezintă o zonă de afacere doar în condiții de siguranță. Relativ recent, mentenanța științifică a fost considerată ca o activitate fundamentală în domeniul nuclear și, cel puțin importantă, pentru restul întreprinderilor industriale.

Înțelegându-se această necesitate, metodologia de mentenanță holonică bazată pe risc (MHBR), propusă și implementată în prezenta teză, utilizează metode, tehnici și tehnologii noi, moderne, odată cu procesarea de date digitale sau computerizate, pentru fiabilizarea instalațiilor industriale, respectiv profitabilitatea întreprinderilor.

Teza constituie o aplicație metodologică a ingineriei integrate la managementul mentenanței, ca proces și ca produs. Modelul MHBR, pentru mentenanță inteligentă, reprezintă un demers original pentru mentenanța sistemelor complexe industriale și, în particular, a sistemelor nucleare, demers care este bazat pe concepția holonică.

## CUPRINS

Notății, abrevieri, acronime.....	7
Lista de tabele .....	9
Lista de figuri.....	10
<b>1. INTRODUCERE GENERALĂ .....</b>	<b>14</b>
1.1. Motivarea temei de cercetare.....	14
1.2. Obiectivele și structura tezei.....	16
<b>2. STADIUL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIUL MENTENANȚEI .....</b>	<b>18</b>
2.1. Introducere .....	18
2.2. Evoluții în domeniul mentenanței .....	18
2.2.1. De la întreținere și reparații, la mentenanță și inspecții bazate pe risc .....	18
2.2.2. Rolul mentenanței în ciclul de viață al produsului .....	20
2.2.3. Abordarea activității de mentenanță .....	23
2.2.4. Strategii de mentenanță .....	24
2.2.5. Tehnologii de mentenanță .....	26
2.3. Cercetări în domeniul mentenanței .....	29
2.3.1. Mentenanța bazată pe model .....	29
2.3.2. Simularea ciclului de viață pentru planificarea strategiei de mentenanță .....	30
2.3.3. Integrarea proiectării toleranțelor și a planificării mentenanței .....	31
2.3.4. Mentenanța de siguranță .....	32
2.3.5. Mentenanța bazată pe Web.....	33
2.4. Concluzii .....	34
<b>3. DEZVOLTAREA UNEI METODOLOGII DE MENTENANȚĂ ÎN DOMENIUL NUCLEAR.....</b>	<b>35</b>
3.1. Introducere .....	35
3.2. Strategia de mentenanță.....	36
3.3. Sistemul de management integrat al mentenanței.....	38
3.3.1. Sistemul holonic.....	38
3.3.2. Modelul holonic de mentenanță .....	40
3.4. Controlul proceselor în sistemul holonic de mentenanță .....	46
3.4.1. Concepte de bază .....	47
3.4.2. Detecția .....	50
3.4.3. Diagnoza holonică de mentenanță .....	52
3.5. Diagnoza holonică aplicată la sistemul criogenic nuclear.....	54
3.5.1. Instalația de detritiere nucleară.....	54
3.5.2. Sistemul holonic pentru controlul coldbox-ului de hidrogen .....	57
3.5.3. Sistemul holonic de monitorizare .....	62
3.6. Concluzii .....	64
<b>4. DEZVOLTAREA DE METODE ȘI MIJLOACE DE MENTENANȚĂ ÎN DOMENIUL NUCLEAR.....</b>	<b>66</b>
4.1. Introducere .....	66
4.2. Metoda de mentenanță bazată pe fiabilitate.....	66

4.2.1. Demersul metodei .....	66
4.2.2. Detecția defectelor cavitaționale bazată pe cunoștințe.....	71
4.2.3. Modelul de evaluare a compatibilității cu mediul informației holonice .....	74
4.2.4. Aspecte ale cavitației în instalația pilot CONTMENT .....	76
4.2.5. Considerații privind reglarea fuzzy a proceselor dinamice .....	87
4.3. Metoda de mentenanță bazată pe risc.....	95
4.3.1. Metodologii de analiză a riscului .....	97
4.3.2. Demersul metodei .....	99
4.3.3. Evaluarea hazardurilor .....	103
4.4. Metode de analiză a defectărilor.....	105
4.4.1. Analiza defectărilor în mentenanța holonică .....	105
4.4.2. Metoda AMDEC extinsă .....	107
4.4.3. Metode de alocare a fiabilității la sistemele complexe.....	114
4.5. Metoda de determinare a gradului de uzură.....	124
4.6. Metoda de determinare a gradului de siguranță.....	130
4.6.1. Determinarea gradului de siguranță operațional .....	130
4.6.2. Procesul holonic de fuzzificare .....	133
4.6.3. Cuantificarea setului de date de intrare .....	134
4.6.4. Baza de reguli fuzzy holonic.....	135
4.6.5. Defuzzificarea procesului holonic operațional .....	137
4.7. Concluzii .....	137
5. OPTIMIZAREA MENTENANȚEI ÎN DOMENIUL NUCLEAR .....	139
5.1. Introducere .....	139
5.2. Optimizarea stocului de siguranță.....	139
5.3. Programarea lucrărilor de mentenanță .....	149
5.3.1. Nivele de decizie .....	150
5.3.2. Stabilirea priorităților și optimizarea mentenanței .....	154
5.3.3. Studiu de caz: sistem expert pentru mentenanță holonică operativă.....	156
5.4. Optimizarea costului de mentenanță holonică operativă .....	164
5.5. Alocarea factorilor de nesiguranță la metoda arborilor de defectare .....	173
5.5.1. Metoda arborilor de defectare .....	173
5.5.2. Metoda arborilor de defectare fuzzy .....	175
5.5.3. Aplicarea analizei arborelui de defectare fuzzy la circuitul de alimentare cu hidrogen în instalația de separare criogenică.....	178
5.6. Concluzii .....	181
6. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ȘI PERSPECTIVE .....	182
6.1. Concluzii generale .....	182
6.2. Contribuții personale .....	185
6.3. Perspective de cercetare .....	186
BIBLIOGRAFIE .....	189

## Notații, abrevieri, acronime

2I	Ingineria integrată
AGREE	Grupul consultativ de fiabilitate a echipamentelor electrice
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
AMDECE	Analiza modurilor de defectare și evaluarea criticității extinse
AR	Augmented Reality
AHM	Arbore holonic mentenabil
BM	Breakdown Maintenance
CBM	Condition Based Maintenance
CH	Comanda holonică
CM	Condition Monitoring
COH	Conducere operativă holonică
CVPH	Ciclul de viață al produsului holonic
FBS	Function-Behavior-State
FDMSI	Fiabilitate, disponibilitate, mentenabilitate și siguranță integrată
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
GH	Globalizarea Holonică
HAZOP	Hazard and Operability
HAZOPA	Hazard și operabilitate automată
HM	Holarhie mentenabilă
HTM	Holon tehnologic de mentenanță
IDN	Instalația de detritiere nucleară
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Cost
LCU	Life Cycle Unit
LPCE	Liquid Phase Catalytic Exchange
LSHM	Legitatea structurii holonice mentenabile
MBF	Mentenanța bazată pe fiabilitate
MDC	Modulul de distilare criogenic
MEER	Modulul de evacuare efluenți radioactivi
MHBR	Mentenanță holonică bazată pe risc
MIC	Mentenanță integrată computerizat
MMH	Managementul mentenanței holistice
MO	Procese de execuție în mentenanță sau mentenanță operativă

MOM	Procese de management operativ în mentenanță
MP	Modulul de purificare
MSI	Modulul de schimb izotopic
MTD	Timpul mediu de detecție a defectării
MTTR	Timpul mediu de reparare
MTTF	Media timpului de testare a funcției
MTBF	Timpul între defectări
OMH	Organizație de mentenanță holistică
OSHM	Operaționalul structurii holonice mentenabile
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability and Safety-Integrity
RBI	Risk-Based Inspection
RBM	Risk-Based Maintenance
RTTEU	Resursele tehnice, tehnologice, economice și umane
RUM	Risc și upgrade mentenanță
SCF	Schema cunoașterii fuzzy
SHM	Structura holonică mentenabilă
SMEA	Service Mode Analysis or Service Modes and Effects Analysis
SM	Sisteme mentenabile
SMAHCM	Sistem multi-agent holonic de cooperare în mentenanță
SN	Sistem nuclear
TBM	Time Based Maintenance



## Lista de tabele

Tabelul 3.1	Răspunsuri ale holonului de diagnoză
Tabelul 3.2	Date caracteristice pentru cavitație
Tabelul 4.1	Clasificarea metodologiilor de analiză a riscului
Tabelul 4.2	Clasificarea demersului posibil pentru MHBR pe module
Tabelul 4.3	Fazele metodei AMDECE
Tabelul 4.4	Alocare fiabilitate exemplul 2
Tabelul 4.5	Alocare fiabilitate exemplul 3
Tabelul 4.6	Expresiile lingvistice pentru uzura membranelor
Tabelul 4.7	Simulare date intrare și rezultate grad uzură
Tabelul 5.1	Informații de intrare în procesul decizional
Tabelul 5.2	Valorile parametrilor pentru fiecare LM
Tabelul 5.3	Variabila lingvistică TMPM
Tabelul 5.4	Timpul predictiv de mentenanță minim rămas (TMMR)
Tabelul 5.5	Aprecierea realizării priorității LM pentru PMO
Tabelul 5.6	Matricea de inferență
Tabelul 5.7	Conectare valori la funcții de apartenență
Tabelul 5.8	Aprecierea priorității
Tabelul 5.9	Datele de intrare ferme
Tabelul 5.10	Aprecierea realizării TA
Tabelul 5.11	Variabila lingvistică NP
Tabelul 5.12	Variabila lingvistică de ieșire DE
Tabelul 5.13	Matricea de inferență DE
Tabelul 5.14	Selectarea echipamentului pentru LM

## Lista de figuri

- Fig. 1.1 Etapele iterative științifice ale metodologiei cercetării propuse
- Fig. 2.1 Percepția mentenanței în costul ciclului de viață
- Fig. 2.2 Circulația materialului pe parcursul ciclului de viață al produsului
- Fig. 2.3 Activități ale mentenanței
- Fig. 2.4 Structura pentru mentenanța ciclului de viață
- Fig. 2.5 Strategii de mentenanță
- Fig. 2.6 Factorii ce determină strategia de mentenanță
- Fig. 2.7 Curba progresivă a deteriorării
- Fig. 2.8 Procedura de planificare a strategiei de mentenanță
- Fig. 2.9 Tehnologiile actuale cele mai utilizate
- Fig. 2.10 Fazele monitorizării
- Fig. 2.11 Procedura de simulare a deteriorării aplicată la angrenajele roboților industriali
- Fig. 2.12 Model de simulare pentru evaluarea strategiei de mentenanță
- Fig. 2.13 Integrarea proiectării toleranțelor și a planificării mentenanței
- Fig. 2.14 Watchdog Agent
- Fig. 2.15 Conceptul sistemului de mentenanță bazat pe Web
- Fig. 3.1 Relația activităților și a concepțiilor de mentenanță
- Fig. 3.2 Modelul de bază al unui sistem holonic
- Fig. 3.3 Baza și arhitectura generală a holonului
- Fig. 3.4 Forma holonică: combinația de reguli fixate și strategii flexibile.
- Fig. 3.5 Structura holonică a sistemelor mentenabile.
- Fig. 3.6 Ciclul de viață al produsului
- Fig. 3.7 Arhitectura pentru managementul holistic de mentenanță
- Fig. 3.8 Arhitectura unui holon
- Fig. 3.9 Fazele metodei propuse de mentenanță holistică integrată
- Fig. 3.10 Structura holonului general de mentenanță
- Fig. 3.11 Procedura de diagnoză tradițională și holonică
- Fig. 3.12 Informație nesolicitată de funcționare
- Fig. 3.13 Formarea codului de viață (de stare). Structura holonului
- Fig. 3.14 Două nivele pentru codul de viață (stare)
- Fig. 3.15 Integrarea sistemelor informatice de mentenanță.
- Fig. 3.16 Instalația de detritiere nucleară de la ICSI, Rm. Vâlcea
- Fig. 3.17 Procesul tehnologic din IDN
- Fig. 3.18 Utilizarea IDN pentru cele două tipuri de reactoare
- Fig. 3.19 Procesul tehnologiei de proces, simplificat pentru IDN.
- Fig. 3.20 Conceptul holonic propus pentru sistemul integrat de control al instalației criogenice
- Fig. 3.21 Structura de coordonare a sistemului holonic propus la IDN
- Fig. 3.22 Sistemul de achiziție de date și conducere a procesului tehnologic
- Fig. 3.23 Sistemul de monitorizare proces pentru instalația de separare

- criogenică realizat cu software LabVIEW
- Fig. 3.24 Sistemul de monitorizare proces pentru instalația de schimb izotopic catalizat, realizat cu software LabVIEW
- Fig. 3.25 Schema de cunoaștere fuzzy reprezentând comportarea instalației de detritiere
- Fig. 4.1 Realizarea secvențială de la detecție la restabilirea procesului
- Fig. 4.2 Detecția și diagnosticarea defectelor cavitaționale bazată pe cunoștințe
- Fig. 4.3 Panoul frontal și secvență panou de control în LabVIEW aferent aplicației CONTMENT pentru punerea în evidență a defectelor predictive și cavitaționale.
- Fig. 4.4 Sistem expert fuzzy pentru mentenanță holonică
- Fig. 4.5 Monitorizare zgomot cavitațional
- Fig. 4.6 Managementul datelor achiziționate cu SAD-Twido
- Fig. 4.7 Instalația pilot CONTMENT pentru evaluări cantitative și calitative a cavitației la robinete de reglare
- Fig. 4.8 Schema detecției și diagnosticării defectelor
- Fig. 4.9 Detecția defectelor cavitaționale
- Fig. 4.10 Generarea funcțiilor de apartenență pentru defectele cavitaționale
- Fig. 4.11 Valoarea momentană de adevăr a mentenanței de prognostic la defectul de cavitație incipientă
- Fig. 4.12 Imaginea de ansamblu a unui robinet de reglare
- Fig. 4.13 Dependența debit  $Q$  – căderea de presiune pe robinetul de reglare  $\Delta P$ , în diferite regimuri de curgere
- Fig. 4.14 Câteva evenimente de cavitație și avertizare de defectare
- Fig. 4.15 Variația amplitudinii vibrației cu coeficientul de cavitație  $K$
- Fig. 4.16 Caracteristica pompei
- Fig. 4.17 Schema elementului obturator pentru definirea coeficientului de cavitație
- Fig. 4.18 Schema instalației hidraulice de diagnoză a ventilelor industriale la cavitație
- Fig. 4.19 Funcția de apartenență triunghiulară
- Fig. 4.20 Funcția de apartenență trapezoidală
- Fig. 4.21 Funcția de apartenență tip „clopot”
- Fig. 4.22 Modul de acțiune al operatorului fuzzy ȘI
- Fig. 4.23 Modul de acțiune al operatorului fuzzy SAU
- Fig. 4.24 Schema de principiu a unui regulator fuzzy
- Fig. 4.25 Definirea unui neuron fuzzy
- Fig. 4.26 Operația de complement neuro-fuzzy
- Fig. 4.27 Reguli de deducție neuro-fuzzy
- Fig. 4.28 Conversia regulilor de deducție neuro-fuzzy
- Fig. 4.29 Reglarea fuzzy directă a procesului.
- Fig. 4.30 Variația funcțiilor de apartenență pentru regulatorul fuzzy.
- Fig. 4.31 Variația mărimilor din proces și reglarea fuzzy
- Fig. 4.32 Reprezentare număr tehnici în funcție de tipul analizei de risc
- Fig. 4.33 Metodologia de mentenanță holistică bazată pe risc
- Fig. 4.34 Procesul de atribuire a riscului
- Fig. 4.35 Factorii dependenți de calitate pentru risc
- Fig. 4.36 Abordarea holistică pentru MHBR
- Fig. 4.37 Raport HOZOPA pentru instalația de schimb izotopic

- Fig. 4.38 Exemplu de realizare a arborelui de defectare pentru HAZOPA
- Fig. 4.39 Legătura dintre fiabilitate și stadiile realizării produselor
- Fig. 4.40 Etape în analiza AMDECE
- Fig. 4.41 Apariția evenimentului nedorit
- Fig. 4.42 Severitatea relatată ca "cost"
- Fig. 4.43 Costul așteptat ca măsură a riscului
- Fig. 4.44 Principalele rezultate operative ale AMDECE pentru MHBR
- Fig. 4.45 Procedura AMDECE de prognostic pentru ciclul de viață
- Fig. 4.46 Combinarea de metode pentru evaluare MHBR
- Fig. 4.47 Panoul frontal al aplicației de modelare și simulare AMDEC extinsă
- Fig. 4.48 Panoul frontal al aplicației de modelare și simulare mod de defectare
- Fig. 4.49 Diferitele stări asociate cu defectul întâmplător
- Fig. 4.50 Sistem compresor cu membrane
- Fig. 4.51 Schema unui sistem fuzzy
- Fig. 4.52 Structura generală a sistemului expert fuzzy
- Fig. 4.53 Graficul gradului de apartenență GM
- Fig. 4.54 Graficul gradului de apartenență U
- Fig. 4.55 Graficul gradului de apartenență PU
- Fig. 4.56 Reprezentarea și determinarea în software-ul LabVIEW a gradelor de apartenență corespunzător GM și PU
- Fig. 4.57 Valoarea gradului de uzură obținut cu metoda centrului de greutate
- Fig. 4.58 Reprezentare valori de intrare/ieșire pentru GM
- Fig. 4.59 Reprezentare valori de intrare/ieșire pentru PU
- Fig. 4.60 Tipologia riscului
- Fig. 4.61 Limitele abordărilor posibile pentru reducerea riscului nuclear
- Fig. 4.62 Modelul conceptual fuzzy pentru nivelul de risc la IDN
- Fig. 4.63 Simularea cuantificării variabilelor de intrare în simulatorul fuzzy holonic
- Fig. 4.64 Universul de discurs și funcțiile de apartenență pentru variabilele de intrare și ieșire simulate în LabVIEW
- Fig. 4.65 Baza de reguli fuzzy holonic cu LabVIEW
- Fig. 4.66 Procesul de inferență a) și defuzzificare b)
- Fig. 5.1 Demersul optimizării stocului de siguranță
- Fig. 5.2 Definirea priorității lucrărilor de mentenanță holonică operativă
- Fig. 5.3 Determinarea stocului de siguranță etapa 1 și 2
- Fig. 5.4 Determinarea stocului de siguranță etapa 3 și 4
- Fig. 5.5 Simularea și calculul costului total cu LabVIEW
- Fig. 5.6 Determinarea nivelului optim al stocului de siguranță cu LabVIEW
- Fig. 5.7 Procesul decizional în ansamblul sistemului holarhic
- Fig. 5.8 Reprezentarea gradelor de apartenență în panoul frontal din LabVIEW
- Fig. 5.9 Modelul general de operare al IDN
- Fig. 5.10 Ciclul dinamic al mentenanței holonice predictive
- Fig. 5.11 Generarea variabilelor de timp de buna funcționare și timp de reparare în regim dinamic
- Fig. 5.12 Ciclul dinamic al mentenanței holonice operative pentru un echipament
- Fig. 5.13 Optimizarea costului ciclului de mentenanță operativă bazat pe distribuția Weibull

- Fig. 5.14 Funcția de apartenență pentru conceptul „jos”
- Fig. 5.15 Funcția de apartenență pentru conceptul „înalt”
- Fig. 5.16 Tabel de date observate în regim dinamic aferente echipamentului
- Fig. 5.17 Evaluările datelor aferente echipamentului observate în regim dinamic
- Fig. 5.18 Reguli euristice pentru optimizarea costului de mentenanță a echipamentului critic
- Fig. 5.19 Reguli fuzzy euristice pentru optimizarea costului de mentenanță a echipamentului critic
- Fig. 5.20 Ieșirile pentru cost pentru observația 9 potrivit regulilor fuzzy euristice
- Fig. 5.21 Aplicarea operației logice SAU pentru cele 10 reguli fuzzy
- Fig. 5.22 Aplicarea defuzzificării pentru ieșire la observația 9
- Fig. 5.23 Panoul frontal pentru aplicația ADF aplicată la IDN
- Fig. 5.24 Un simplu arbore de defectare
- Fig. 5.25 Demersul ADF
- Fig. 5.26 Graficul arborelui de defectare la inactivitatea transmisiei și distribuției de hidrogen în instalația de distilare criogenică, din cadrul IDN
- Fig. 5.27 Simularea datelor și validarea rezultatelor la ex. din fig. 10.26 b
- Fig. 5.28 Valorile obținute pentru probabilitățile fuzzy ale ADF

# 1. INTRODUCERE GENERALĂ

## 1.1. Motivarea temei de cercetare

Ansamblul produselor concepute să asigure necesități ale omului sunt realizate folosind diverse surse de energie, între care energia electrică, respectiv *energia nucleară* (EN), ca forma cea mai rafinată și profitabilă de energie.

Utilizarea EN implică existența unor echipamente deosebit de complexe, care formează un *sistem nuclear* (SN), la care dependabilitatea sa este un termen generic, utilizat pentru descrierea performanței disponibilității de energie electrică și a factorilor de influențare, ca: performanța disponibilității, fiabilității și mentenabilității echipamentelor nucleare, respectiv a suportului pentru mentenanță inteligentă în continuă îmbunătățire.

Prin echipamente nucleare se înțelege ansamblul de echipamente complexe destinate procesării de fluide, care pot fi radioactive, pot efectua comenzi, protecții, reglaje, corelări de parametri, comutări, monitorizări și control automat al unor parametri, în scopul operării adecvate cerințelor de calitate impuse de autorizarea funcționării în domeniul nuclear.

Disponibilitatea de EN implică performanță pe parcursul ciclului de viață al SN, în condițiile asigurării siguranței de conducere operativă și exploatare la nivel științific evoluat.

Oricât de bine ar fi proiectate echipamentele nucleare, cu respectarea cerințelor de siguranță în funcționare, există probabilitatea ca și acestea să se defecteze. Deci, realizarea unei mentenanțe în continuă îmbunătățire este întotdeauna de actualitate.

În general, echipamentele defecte conduc la rezultate neprevăzute și nedorite, care, chiar dacă nu au un caracter catastrofic, creează disconfort, induc inconveniențe și generează pierderi care, în final, se materializează în costuri suplimentare deloc de neglijat. Nu se poate închipui, de exemplu, tehnica nucleară, echipamentele complexe, ca reactoarele nucleare sau sistemele de alimentare, control și reglare a parametrilor de proces, decât funcționând ireproșabil. Totodată, nu se pot ignora consecințele unei instalații de aer condiționat defecte dintr-o cameră de comandă sau chiar birou: operatorii sau salariații lucrează fără randament și cu riscuri mari de erori umane.

Remediarea situației, când se produc defecțiuni, și creșterea performanțelor poate fi obținută doar prin coordonarea unor activități pluridisciplinare și, potrivit conceptului de inginerie integrată, în care să fie incluse: cercetarea, proiectarea, construcția, instalarea, exploatarea, logistica, mentenanța, dezafectarea și/sau reciclarea, respectiv administrarea activităților respective.

Prezenta teză propune un demers multidisciplinar, interdisciplinar și multicriterial privind stadiul cunoașterii în domeniul mentenanței, prin realizarea unui transfer de cunoștințe de actualitate, care urmează a fi analizate și sistematizate după o strategie proprie, rezultată din logica tehnică formată în acest domeniu, pentru scopul final, de aplicabilitate sub forma unui proiect de mentenanță științifică în domeniul industrial. Astfel, s-a urmărit analiza

metodelor și a sistemelor de diagnostic și prognostic pentru identificarea celor mai adecvate soluții de mentenanță predictivă, preventivă și corectivă, cu scopul de a crește fiabilitatea operațională a echipamentelor nucleare.

Această preocupare pentru cercetarea în domeniul mentenanței este pe deplin justificată și de certă actualitate, din următoarele considerente:

- ☑ Echipamentele care fac obiectul studiului sunt aferente instalației de detritiere nucleară, de interes național, existentă în cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare Tehnologii Criogenice și Izotopice, ICSI Rm. Vâlcea; transferul tehnologiei de detritiere de la ICSI este deja demarat pentru instalația nucleară de la Cernavodă, motiv pentru care se urmărește și transferul de mentenanță pentru instalația de detritiere nucleară care se va realiza acolo;
- ☑ Până în prezent nu există studii pentru mentenanța instalațiilor de detritiere nucleare, care să trateze suficient de amplu și în detaliu impactul pe care îl are mentenanța și fiabilitatea acestor echipamente în condiții concrete de stare și exploatare;
- ☑ Cunoașterea modurilor de defectare, diagnoză și mentenanță, respectiv a indicatorilor de fiabilitate pentru SN, particularizate la echipamentele din *instalația de detritiere nucleară* (IDN), este vitală;
- ☑ Indicatorii de fiabilitate ai echipamentelor nucleare din cadrul SN pot fi determinați doar prin studii de prognostic și de fiabilitate operațională (pe baza comportării în exploatare), studiile de fiabilitate experimentală pentru instalațiile nucleare în funcțiune fiind prohibitive; ca atare, prezenta teză oferă un studiu experimental pentru procesul de mentenanță și mentenanța pentru produs (instalație mentenabilă), pe baza unui stand experimental de punere în evidență a defectelor de produs și cavitaționale, simulând condițiile dintr-o instalație de detritiere nucleară, unde accesul este constrâns de reglementările de funcționare în regim nuclear;
- ☑ Factorii de decizie din cadrul S.N. "Nuclear-Electrica" S.A. sunt tot mai convingși de oportunitatea economică a instituirii sistemului de mentenanță bazat pe fiabilitate, sistem practicat în țările cu energetică avansată, motiv pentru care cercetările din prezenta teză deschid noi variante de aplicare;
- ☑ Aspectele determinate de informații vagi ale mentenanței operative existente în domeniul nuclear motivează studiul logicii fuzzy în diagnostic și prognostic, urmărindu-se:
  - performanțe ale stării de funcționare, caracteristici, randament, consumuri, productivitate și operativitate de mentenanță;
  - evitarea controlată sau automată a situațiilor extreme care conduc la avarii;
  - monitorizarea predictivă referitor la vibrații, analizare ulei și uzură, termografie, în legătură cu modificările de stare, pentru detecția simptomelor, respectiv fundamentarea programului de mentenanță și reproiectarea optimizată;
- ☑ Rolul și importanța activității mentenanței la stadiul actual este determinat de cel puțin următorii factori:
  - sporirea perfecționării constructive și funcționale a noilor echipamente achiziționate, respectiv costul acestora;

- pierderile din ce în ce mai mari datorate defectărilor sau staționării echipamentelor, pentru intervenții operative de mentenanță;
- continua creștere a cheltuielilor de mentenanță și sporirea ponderii lor în costul produselor;
- numărul din ce în ce mai mare al ponderii personalului ocupat în activitățile de mentenanță, datorită complexității echipamentelor;
- necesitatea asigurării fiabilității echipamentelor, ca siguranță pentru om și mediul înconjurător.

Astfel, mentenanța integrată științific în ciclul de viață al produsului trebuie privită ca o investiție în viitor - idee pe care se bazează întreaga abordare a cercetării din această lucrare.

## 1.2. Obiectivele și structura tezei

Obiectivul principal urmărit în cadrul tezei de doctorat îl constituie demonstrarea faptului că modelul conceptual propus, de mentenanță integrată holistic, poate fi considerat o investiție în viitor, deci poate fi o sursă de profit în condițiile constrângerilor de calitate și siguranță a funcționării, în domeniul nuclear.

Obiectivele generale urmărite în domeniul cercetării pentru mentenanță inteligentă sunt determinate de: obiective de securitate, care pot fi exprimate printr-un coeficient de fiabilitate ridicată a echipamentelor susceptibile la „căderi” critice; obiective de disponibilitate pentru ansamblul IDN sau pentru echipamentele sale cheie; obiective vizând un anumit buget de mentenanță, respectiv obiective vizând reducerea la minim a costurilor de mentenanță și a costurilor non-eficacității echipamentelor, legate de mentenanță; obiective vizând optimizarea gestiunii pe termen lung și în regim dinamic a echipamentelor, în vederea optimizării costului global pe durata de viață a IDN.

Metodologia de cercetare folosită în lucrare poate fi descrisă ca un proces iterativ, prezentat în figura 1.1, care începe cu identificarea problemei sau procesului care trebuie investigat. Problema urmează să fie abordată în mod științific, pe baza cercetărilor bibliografice actuale. Studiul continuă cu o nouă abordare, despre cum se poate rezolva necesitatea diagnosticului și prognosticului incluzând teoriile existente, scopul, obiectivele și întrebările generate de cercetarea propusă. Metodologia a fost testată și verificată prin diferite studii de caz și experimente. Cadrul conceptual propus al managementului mentenanței poate facilita în mod concret și eficient luarea cu obiectivitate, și nu pe bază de intuiție, a deciziilor.

În capitolul 2 al tezei se pune în evidență evoluția în timp a politicii de mentenanță, pentru a înțelege unde se află preocuparea pentru mentenanță, la nivel național și internațional, în practica întreprinderilor industriale. Cunoștințele prezentate facilitează înțelegerea aspectelor tratate în capitolele următoare, privind nivelul de noutate și importanță pentru mentenanță și punerea în evidență a contribuțiilor în domeniu aduse de prezenta lucrare. Se efectuează astfel o sinteză, bazată pe cele mai apreciate rezultate ale cercetărilor științifice, privind stadiul tehnologiilor de mentenanță, punându-se în evidență progresele recente în domeniu.

În capitolul 3 se propune unei metodologii de mentenanță bazată pe risc,



posibil de aplicat în majoritatea întreprinderilor unde există cel puțin o constrângere de calitate și securitate reglementată asupra funcționării instalațiilor mentenabile. Această metodologie introduce în analiza deciziei pentru mentenanță conceptul holistic, care poate oferi noi perspective în procesul cunoașterii pentru mentenanță.

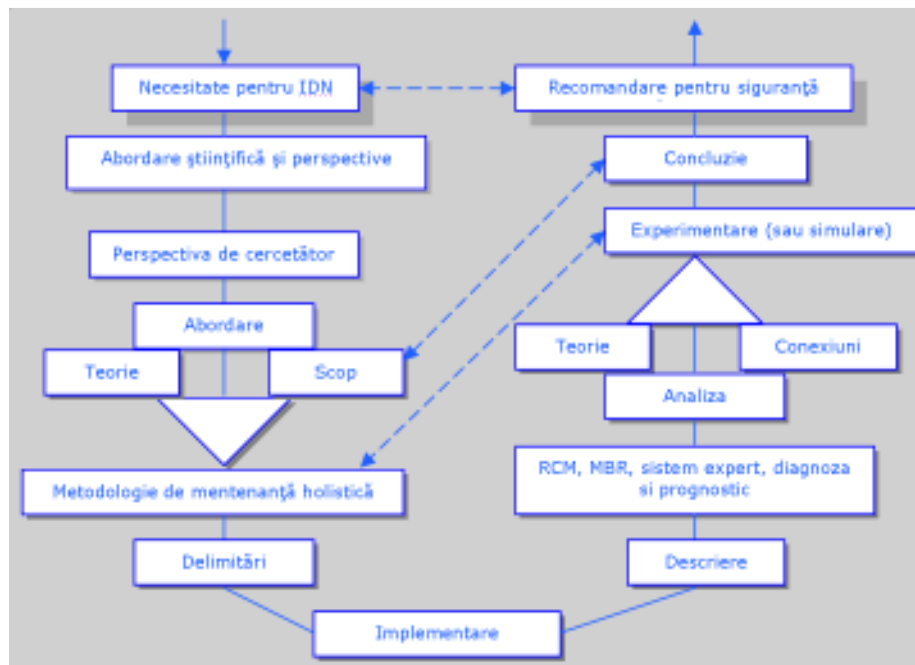


Fig. 1.1. Procesul iterativ al metodologiei de cercetare propuse

În capitolul 4 se detaliază metodologia de concepție holistică pentru mentenanță, prezentată în capitolul anterior, prin dezvoltarea modelului de *mentenanță holică bazată pe risc* (MHBR). MHBR include noi demersuri și metode specifice de analiză hazard, operabilitate, risc și analiză calitativă și cantitativă în regim dinamic, pentru obținerea obiectivului general propus. Astfel, centrul atenției este îndreptat spre problema prognosticului defectărilor, cercetările vizând "viața" produsului, care trebuie considerată ca un proces descris cu ajutorul unei bucle de autoreglare. Proiectarea, omologarea, asimilarea, producerea, exploatarea și mentenanța produsului sunt privite ca generatoare de informații despre fiabilitatea produsului, care, după o prelucrare și interpretare adecvată, servesc la fundamentarea deciziilor de ridicare a performanțelor în fiecare stadiu al ciclului de viață.

Pentru validarea MHBR, în capitolul 5 se propun diferite soluții de optimizare, ținându-se cont de particularitățile oferite de IDN din punct de vedere organizatoric, sub aspect tehnic, economic și uman.

## 2. STADIUL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIUL MENTENANȚEI

### 2.1. Introducere

Prezentul capitol pune în evidență evoluția în timp a politicii de mentenanță, pentru a se înțelege unde se află preocupările pentru mentenanță, la nivel național și internațional, în practica întreprinderilor industriale. Cunoștințele prezentate facilitează înțelegerea aspectelor tratate în capitolele următoare, nivelul de noutate și importanța a mentenanței, punerea în evidență a contribuțiilor aduse în domeniu de prezenta teză.

Se efectuează o sinteză, bazată pe cele mai relevante rezultate ale cercetărilor științifice, privind stadiul tehnologiilor de mentenanță, punându-se în evidență progresele înregistrate.

### 2.2. Evoluții în domeniul mentenanței

Tehnicile de mentenanță au trecut prin mari procese de metamorfoză. Creșterea complexității în procesele de fabricație, a varietății produselor cu impact de mentenanță asupra mediului, siguranței de personal, profitabilitatea afacerii și calitatea produselor, au determinat progrese în domeniul mentenanței.

#### 2.2.1. De la întreținere și reparații, la mentenanță și inspecții bazate pe risc

Politica de mentenanță are o evoluție în timp și poate fi prezentată ca: prima generație, generația a doua, generația a treia și generația recentă.

*Prima generație* aparține perioadei de timp dinaintea celui de-al doilea război mondial. Industriile nu erau foarte mult mecanizate. Echipamentele erau simple și re-proiectarea lor le făcea fiabile și ușor de reparat. Mașinile funcționau până se defectau, fără nici o predicție de defectare. Practicile tipice pentru mentenanță erau (Moubray, 1994), (Cooke, 2003):

- mentenanță de rutină;
- mentenanță reactivă (se repară când se strică);
- mentenanță corectivă.

Deci, mentenanța a fost percepută ca „întreținere” a unui utilaj, pentru a se asigura continuitatea producției. Cunoscuta publicație Larousse definește întreținerea ca fiind „acțiunea de păstrare a unui lucru în bună stare de funcționare”.

*A doua generație* reprezintă perioada între cel de-al doilea război mondial și anul 1970. Din anul 1950, în industria din SUA a apărut termenul de „mentenanță”; ulterior el s-a suprapus, progresiv, celui de întreținere și reparații, și în Europa occidentală (Deac, 2000). Larousse definește mentenanța ca

„ansamblul a tot ceea ce permite menținerea sau restabilirea unui sistem sau a unei părți a acestuia în stare de funcționare”.

În această perioadă, industriile devin tot mai complexe, cu mari dependențe de mașini. Costul mentenanței devine foarte mare, peste costul de operare. Politica de mentenanță adoptată (Khan, 2004) a fost:

- mentenanță preventivă planificată;
- mentenanță bazată pe timp;
- sistem de control și planificare pentru sarcini de lucru.

Această generație a fost critică, pentru că impunea adesea lucrări care se dovedeau a fi deloc necesare, întrerupeau operarea normală și, adesea, induceau nefuncționări datorate operațiilor de întreținere care lipseau.

Odată cu dezvoltarea ingineriei fiabilității, conceptul de mentenanță preventivă a fost implementat ca mentenanță bazată pe timp TBM (*Time-Based Maintenance*).

TBM s-a bazat pe așa numita „bathtub curve”, care reprezintă creșterea ratelor de defectare după o perioadă sigură de operare.

Constatându-se că în multe cazuri deteriorarea depinde nu doar de timp, ci și de o mulțime de alți factori, s-a ajuns la a recunoaște conceptul de mentenanță bazată pe condiții CBM (*Condition Based Maintenance*), concept apărut începând cu anul 1970, care propune dezvoltarea tehnicii de diagnostic a echipamentului. În acest caz, măsurile preventive sunt luate când simptomele defectărilor sunt recunoscute prin monitorizare și diagnoză. Prin urmare, dacă există o tehnică de diagnostic corectă pentru prevenirea defectărilor, CBM face posibilă luarea măsurilor specifice și corecte de mentenanță preventivă.

Totuși, CBM nu este întotdeauna cea mai bună metodă de mentenanță, în special din perspectiva costului efectiv. De exemplu, când defectările componentelor de echipamente nu sunt critice, se pot permite întreruperile, „penele”, la care acțiunile de mentenanță operativă BM (*Breakdown Maintenance*) sunt luate după ce defectările sunt detectate.

*Generația a treia*, între anii 1980 și 2000, evidențiază strategiile de mentenanță, fiind caracterizată (Cooke, 2003) de:

- continua creștere a complexității instalației;
- accelerarea utilizării automatizării;
- sistemul de producție „Just In Time”;
- realizarea de standarde de produs și service de calitate;
- mai multă legislație pe calitate de service.

Mentenanța bazată pe condiții (CBM), *mentenanța bazată pe fiabilitate* (MBF) și managementul mentenanței asistat de calculator au fost caracteristice ale acelei perioade. De la mijlocul anilor 1980, importanța selectării strategiilor de mentenanță specifică a fost bine cunoscută în diferite domenii industriale de activitate.

*Generația recentă*, după anul 2000, este cea în care metodologiile de mentenanță și inspecțiile bazate pe risc au început să apară și să câștige popularitate. Această generație este caracterizată, deci, de inspecții bazate pe risc și mentenanță în completare cu MBF și CBM.

La nivel național, mentenanța și siguranța sunt separate, fiind considerate ca activități independente. Cercetările din prezenta teză doresc să contribuie, prin metodologii originale de mentenanță holistică inteligentă (Anghel, 2001...2008), la integrarea riscului în mentenanță, pentru optimizarea capacității instalațiilor nucleare. Obiectivul general al procesului de mentenanță și de mentenanță a produsului este să crească profitabilitatea operării și să se

optimizeze costul ciclului de viață total, fără a fi compromisă siguranța. Planificarea mentenanței bazată pe analiza de risc minimizează probabilitatea de defectare a sistemului și a consecințelor. Ea ajută să se ia decizii corecte privind investițiile în mentenanță, și nu numai, în managementul instalației nucleare.

### 2.2.2. Rolul mentenanței în ciclul de viață al produsului

De-a lungul anilor, mentenanța a fost privită ca un demers de realizare de costuri (fig. 2.1, a) și nu ca un mijloc de realizare de profit (fig. 2.1, b).

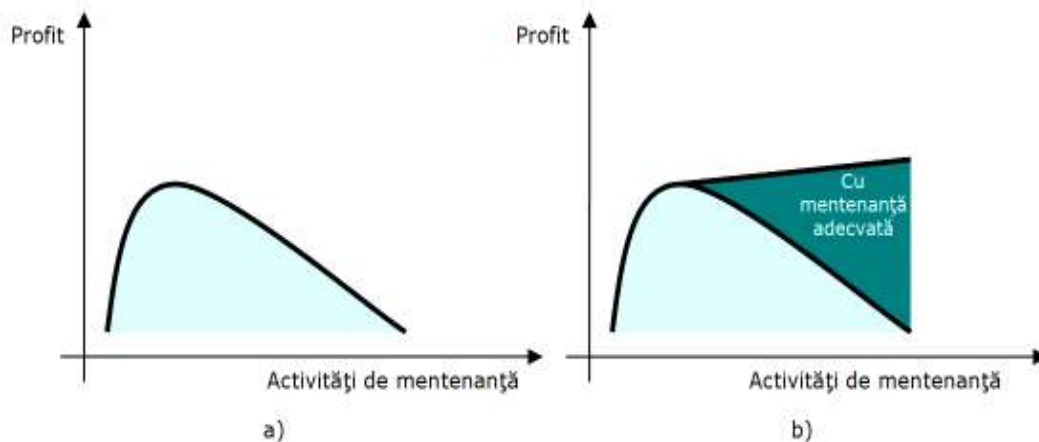


Fig. 2.1. Percepția mentenanței în costul ciclului de viață

În prezent se recunoaște faptul că activitatea de mentenanță este interdisciplinară, complexă și nu este un scop în sine, ci este o necesitate de care producția „suferă” și pe care financiarul o găsește prea „costisitoare”.

Dacă privim rolul mentenanței din perspectiva managementului ciclului de viață, realizăm că imaginile din figura 2.1 a și b sunt complet diferite. Scopul managementului ciclului de viață al produsului este să controleze toate condițiile asupra produsului, să furnizeze cerințele de funcționalitate de la beneficiar, concomitent cu realizarea unui profit minim, dar suficient, care va trebui, de altfel, să fie încorporat în produs.

Pentru a se realiza scopul de mai sus, managementul ciclului de viață pentru produsul fabricat aduce transformări în modelele de business, percepute de la companiile producătoare la furnizorii de mentenanță (Keller, 2003). Astfel, se dovedește faptul că mentenanța poate fi unul dintre cele mai importante servicii asociate managementului ciclului de viață pentru produs.

În aceste tipuri de business companiile vor putea vinde doar „utilizarea” produsului, iar clientul va plăti mai puțin, doar pentru utilizarea produsului achiziționat. În acest context, mentenanța efectivă va putea fi un beneficiu pentru companii, care vor crește profitul lor, reducând costurile de mentenanță, iar clientul se va bucura de îmbunătățirea calității pentru service (Seliger, 2002).

În contextul actual, managementul ciclului de viață al produsului dorește să susțină societatea din ziua de azi. Așadar, asistăm la o schimbare de paradigmă a producătorului, de la „cum se produce mai eficient” la „cum se produce asigurând satisfacția clientului și încorporând profit”. Producția de tip „closed-loop” a fost propusă ca soluție la această problemă (Kimura, 1995).

Conceptul de producție „closed-loop” poate fi explicat ca „reînnoire a funcțiilor de circulație a materialului furnizat”. Există multe moduri de circulare a materialului, descrise în figura 2.2 și denumite „comet circle” (Tani, 1999).

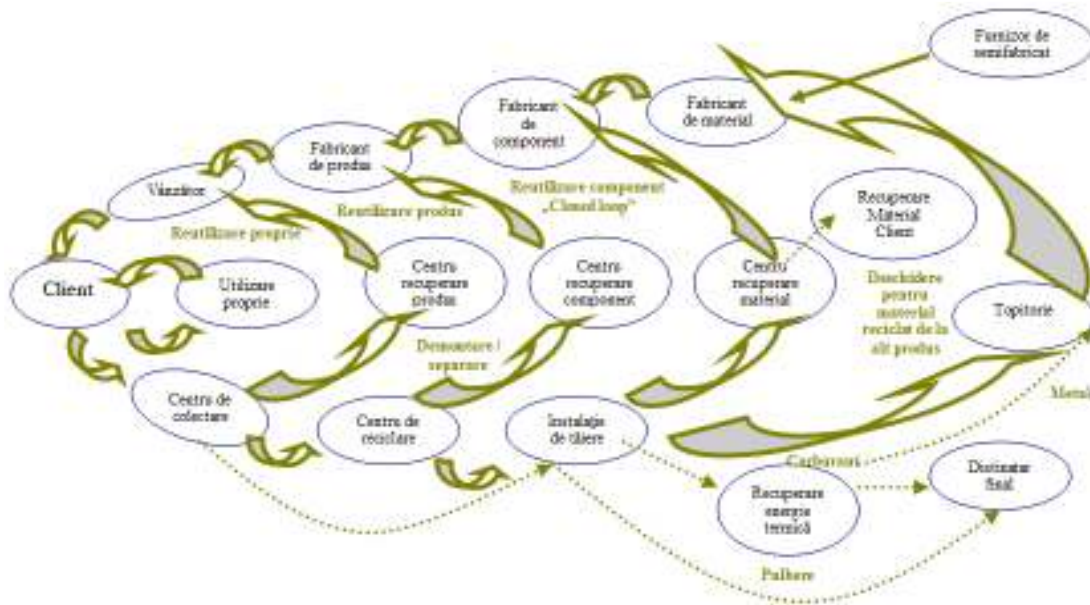


Fig. 2.2. Circulația materialului pe parcursul ciclului de viață al produsului, după (Tani, 1999)

Fiecare orbită din figura 2.2 corespunde opțiunii unui ciclu de viață pentru un produs considerat. Se observă, astfel, că mentenanța are un rol determinant în ciclul de viață al produsului, în interacțiunea sa cu întreprinderea, utilizatorul final și mediul înconjurător.

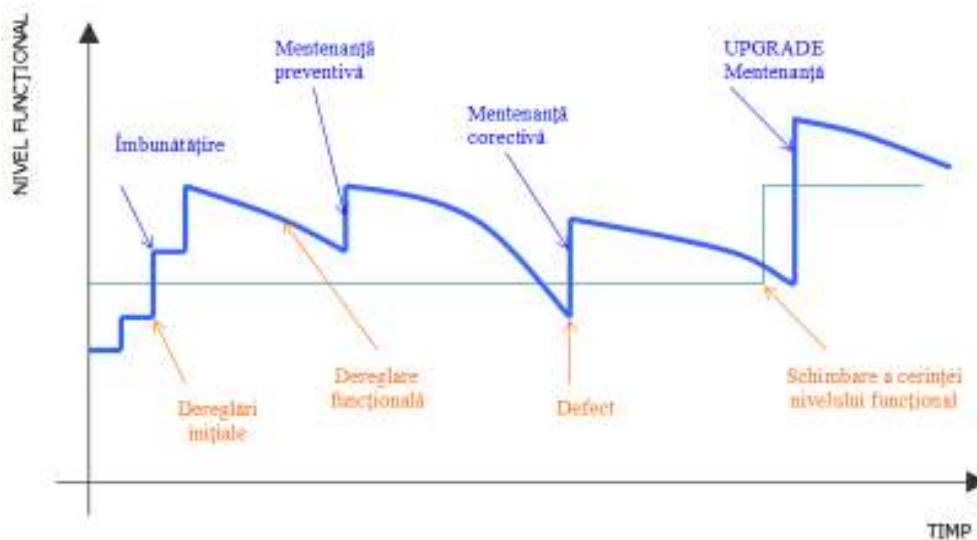


Fig. 2.3. Activități de mentenanță

Obiectivul mentenanței este să păstreze condițiile producției, deci să îndeplinească funcțiile cerute pe parcursul întregului ciclu de viață al produsului.

Așa cum s-a explicat anterior mentenanța este o parte importantă a managementului ciclului de viață, ale cărei scopuri sporesc ecoeficiența produsului (DeSimone, 1997).

Mentenanța, prin activitățile sale (fig. 2.3), face posibilă completarea lipsurilor între funcțiile cerute produsului și funcțiile realizate pe parcursul ciclului de viață, datorită deteriorării (uzării) sale.

Pentru completarea acestor lipsuri, mentenanța trebuie să realizeze următoarele activități:

- ☑ Proiectarea mentenabilității: se referă la îmbunătățirea proiectării prin evaluarea mentenabilității în faza de dezvoltare a produsului (*Design for Maintainability*) și furnizarea datelor de proiectare pentru planificarea strategiei de mentenanță și controlul sarcinilor de mentenanță;
- ☑ Planificarea strategiei de mentenanță: se referă la selectarea metodei de mentenanță pentru fiecare component al produsului;
- ☑ Controlul atribuției de mentenanță: se referă la planificarea și realizarea sarcinilor de mentenanță bazate pe o metodă aleasă;
- ☑ Evaluarea rezultatelor de mentenanță: se determină dacă planificarea metodei de mentenanță și controlul sarcinilor de mentenanță sunt adecvate;
- ☑ Îmbunătățirea mentenanței produsului: se realizează pe baza evaluării rezultatelor de mentenanță;
- ☑ Planificarea și realizarea demontării: se referă la sfârșitul ciclului de viață al produsului.

Activitățile de mentenanță menționate trebuie conduse în mod efectiv, pe tot parcursul ciclului de viață al produsului. Pentru aceasta vor fi luate în considerare următoarele aspecte:

- ☑ Adaptarea la schimbările variate din timpul ciclului de viață: schimbările sunt determinate de cerințele de operare, mediul de operare, funcțiunile cerute și chiar de produsul însuși;
- ☑ Flexibilitatea managementului mentenanței de a se adapta la aceste schimbări, deoarece metodele de mentenanță depind de acești factori.

Pentru implementarea cerințelor mentenanței ciclului de viață, descrise mai sus, se propune structura arătată în figura 2.4 (Takata, 1999).

În această structură, planificarea strategiei de mentenanță joacă un rol important. Această planificare implică selectarea strategiei de mentenanță dintre diferite opțiuni bazate pe evaluarea de probleme potențiale care pot surveni în timpul operării, respectiv evaluării defectelor și eficacitatea tehnologiilor de mentenanță, ca: BM, TBM și CBM. Planificarea strategiei de mentenanță servește ca un pod între faza de dezvoltare a produsului și faza de exploatare (operare). Ea obține date de proiectare și înregistrări de date din producție, din faza de dezvoltare și, astfel, determină strategia de mentenanță optimă pentru fiecare component al produsului.



Fig. 2.4. Structura pentru mentenanța ciclului de viață, după (Takata, 1999)

Așa cum se vede, în figura 2.4 sunt reprezentate trei cicluri (bucle) de feedback:

- Primul ciclu este al fazei de management a sarcinilor de mentenanță operaționale, care constă în sarcini de planificare pentru mentenanță operativă, sarcini de execuție, permițând evaluarea rezultatelor de mentenanță; aceasta este bucla de control a mentenanței operative de rutină;
- A doua buclă include planificarea strategiei de mentenanță; strategia de mentenanță poate fi îmbunătățită de observații ale fenomenelor actuale și ale acumulării cunoașterii în timpul ciclului de viață;
- A treia buclă include dezvoltarea produsului; această buclă este esențială pentru continua îmbunătățire a produsului în timpul ciclului de viață.

Aceste trei bucle furnizează un mecanism efectiv pentru adaptarea strategiei de mentenanță la schimbări variate, ca schimbări în condiții de operare, de mediu și, de asemenea, pentru continua îmbunătățire a produsului.

### 2.2.3. Abordarea activității de mentenanță

În etapa actuală, evoluțiile care se impun în abordarea activității de mentenanță în cadrul unităților industriale sunt determinate de trei tipuri principale de factori, și anume: factori tehnologici, factori economici și factori umani.

*Factorii tehnologici* sunt datorati „meatronics”, adică, pe de o parte ponderii electronicii și informaticii care a cuprins pe plan mondial atelierele și secțiile de producție, automatizarea fiind peste tot, iar pe de altă parte piesele mecanice, hidraulice, subansamblele electromecanice, care sunt din ce în ce mai fiabile, fiind din ce în ce mai puțin „consumatoare” de mentenanță. În schimb, toate acestea se pretează la noile tehnici de detectare ale defectelor (analiza vibrațiilor, analiza sonică, termografie etc.) care se dovedesc foarte eficiente pentru evidențierea punctelor slabe și prevenirea căderilor. Apare metoda

supravegherii și telesupravegherii echipamentelor în mod automat și riguros de precis.

*Factorii economici* sunt datorăți dorinței de competitivitate a întreprinderilor, din nevoia de reducere la minim a cheltuielilor de producție și mentenanță. Un aspect întâlnit pe plan mondial este dezvoltarea, în locul compartimentelor tradiționale de mentenanță din cadrul întreprinderilor industriale, a societăților de mentenanță capabile să execute numeroase activități. Mai suplă, flexibile, capabile să se adapteze noilor cerințe, societățile de mentenanță au vocația de „specialist” și asigură periodic prestații specializate, în funcție de necesități.

*Factorii umani* se referă la faptul că activitățile de mentenanță sunt condiționate de personalul implicat. Este vorba de personalul de mentenanță, dar în egală măsură și de cel de operare sau exploatare. Progresele sunt determinate de dificultățile noi apărute pentru persoanele implicate și de relațiile dintre acestea:

- ☑ Continua îmbunătățire a produsului, care se datorează faptului că, în general, este imposibil a proiecta un produs perfect. Din acest motiv, mentenanța trebuie să includă un mecanism de îmbunătățire continuă a produsului, bazat pe experiență și cunoaștere acumulată pe parcursul ciclului de viață. De asemenea, se au în vedere și acei factori tehnologici explicați anterior.
- ☑ Integrarea informației de mentenanță pentru oricare fază a ciclului de viață al produsului. De exemplu, este esențial să se cunoască situația operării reale și problemele întâlnite în operarea trecută. Pe de altă parte, pentru planificarea strategiei de mentenanță și a sarcinilor de control pentru mentenanță este necesar să se aibă datele de proiectare exacte.

#### 2.2.4. Strategii de mentenanță

Strategiile de mentenanță se clasifică după trei criterii (fig. 2.5): prevederea prelucrării datelor, oportunitatea de execuție a sarcinilor de mentenanță și tipul sarcinii.

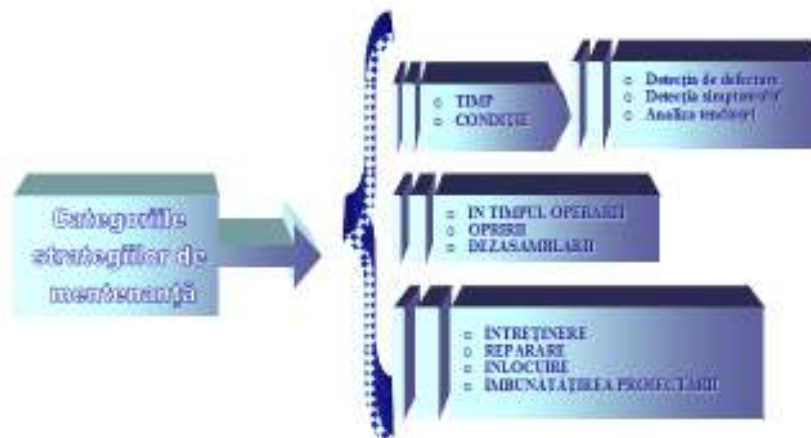


Fig. 2.5. Strategii de mentenanță



Între aceste opțiuni, strategia de mentenanță este selectată pentru fiecare component, bazat pe două feluri de evaluare (fig. 2.6): evaluare tehnologică și evaluare managerială.

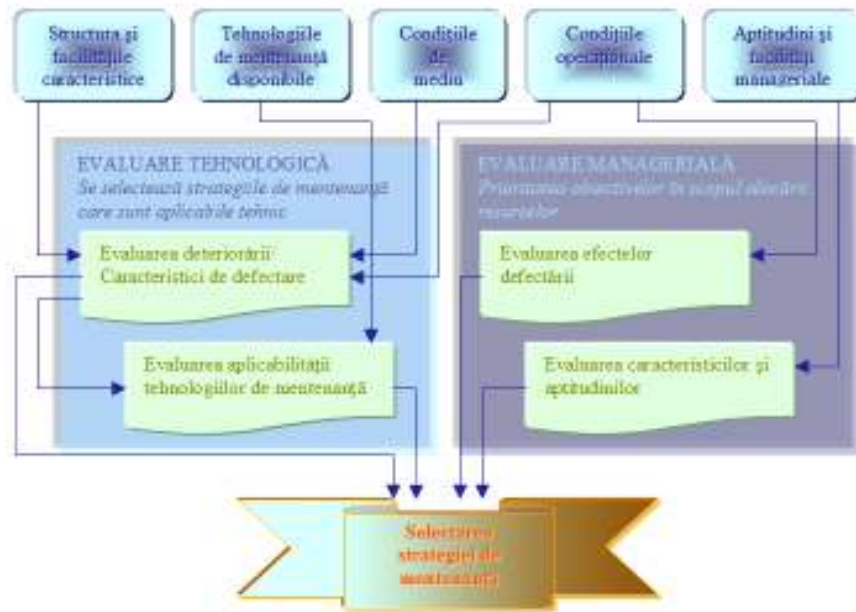


Fig. 2.6. Factorii care determină strategia de mentenanță

În evaluarea tehnologică trebuie considerați doi factori majori: primul factor implică caracteristica de deteriorare și defectarea rezultată, iar al doilea factor implică aplicabilitatea tehnologiilor de mentenanță.

Deteriorarea poate induce schimbări în comportarea unui produs. Cunoașterea funcției de degradare este una din cele mai importante caracteristici de deteriorare și defectare. În figura 2.7 este ilustrată o degradare progresivă. Se observă că dacă  $T_n$  este nepredictibil, mentenanța bazată pe timp nu poate fi

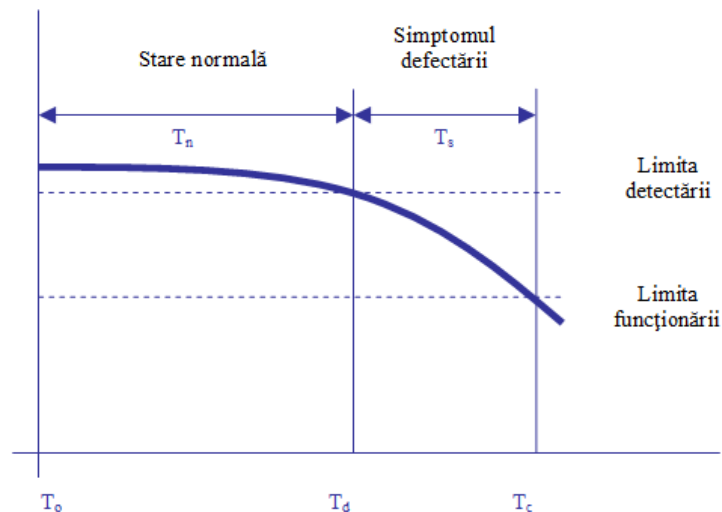


Fig. 2.7. Curba progresivă a deteriorării

aplicată. Pe de altă parte, dacă  $T_d$  este foarte scurt, nu poate fi adoptată mentenanța bazată pe condiția echipamentului.

Se constată că evaluarea tehnologică și evaluarea managerială sunt independente una de alta, dar ele trebuie să fie integrate pentru a obține strategia de mentenanță efectivă pentru întregul sistem. Figura 2.8 arată procedura generală pentru acest scop.

Pentru fiecare activitate a procedurii generale de planificare a strategiei de mentenanță se utilizează metode specifice de analiză și sinteză, respectiv modelare și simulare, cum de altfel se va exemplifica și în capitolele următoare.

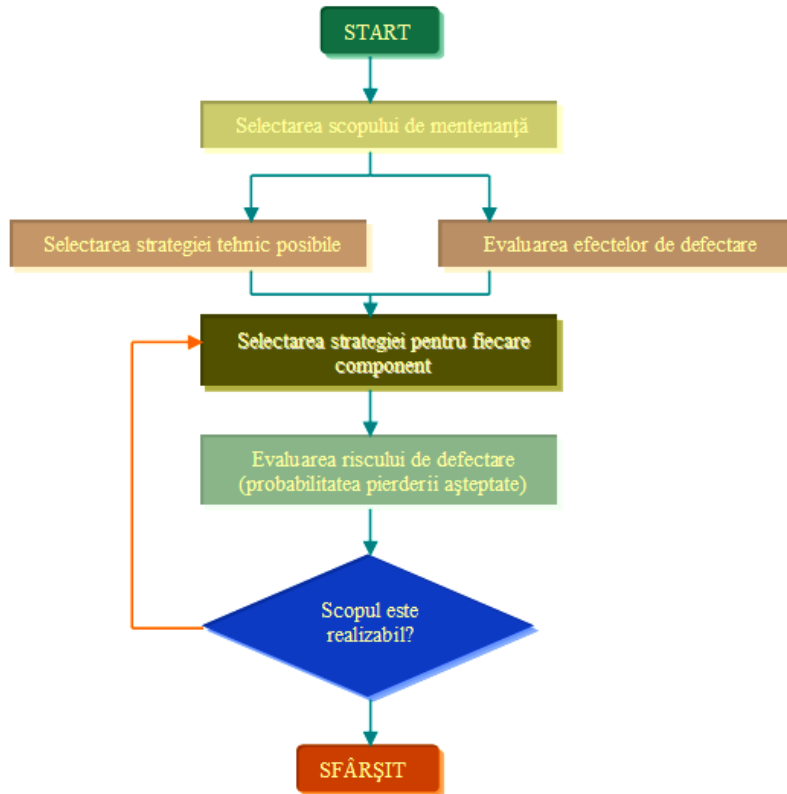


Fig. 2.8. Procedura de planificare a strategiei de mentenanță

### 2.2.5. Tehnologii de mentenanță

Pe parcursul ciclului de viață al unui produs, activitatea de mentenanță utilizează o varietate de tehnologii. În figura 2.9 sunt redate cele mai utilizate tehnologii de mentenanță. Pe coloană sunt reprezentate fazele ciclului de viață al produsului, iar pe rânduri tehnologiile asociate.

*Proiectarea pentru mentenanță* se bazează în primul rând pe teoria fiabilității, iar în al doilea rând pe datele de planificare, monitorizare și diagnoză. Deasemenea, analiza defectării este foarte importantă și cere expertiză. Chiar dacă FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) este cea mai populară metodă pentru analiza defectării, se constată că ea nu este folosită suficient de mult în

Tipuri	Proiectare pentru mentenanță	Planificarea mentenanței	Inspecție/ Monitorizare/ diagnoză	Tratamentul mijlocului de viață	Tratamentul de sfârșit de viață	Managementul ciclului de viață
Tehnologii						
Senzori, procesare de semnale, analiză chimică			Inspecție/ Monitorizare/ diagnoză		Condiție Diagnoză	
Analiza defectării Fizica defectării	Deteriorare evaluare, evaluare durată de viață, FMEA, FTA	Deteriorare evaluare, evaluare viață rămasă, FMEA, FTA	Analiza trendului		Deteriorare evaluare, evaluare viață rămasă	
Inteligență artificială, Managementul cunoașterii			Monitorizare/ diagnoză/ prognoză	Sistem suport pentru operare mentenanță de siguranță		Sistem de date istoric defectări sau deranjamente
Tehnologii bazate pe model	Deteriorare și simulare defect	Deteriorare și simulare defect	Monitorizare bazată pe model/ diagnoză/	Sistem suport pentru operare	Sistem suport pentru operare	
Ingineria fiabilității	Proiectarea fiabilității	RCM			Evaluare de viață rămasă	
Managementul riscului		RBM	RBI			
Bază de date, rețea	Deteriorarea și mecanismul defectării	Deteriorarea și mecanismul defectării	Monitorizare de la distanță, Diagnoză de la distanță	Tele-service		MP data, managementul ciclului de viață, Managementul datelor
Metodologii de proiectare	DIX (accesibilitate, asamblare, demontare), toleranță			Mentenabilitate, Service-abilitate	upgrade	
Automatizare, robotică				Robot pentru mentenanță	Demontare automată	
Factori organizaționali și umani, ingineria metodelor			TPM	TPM Sisteme suport operaționale	Sistem suport operativ	
Managementul mediului						LCA
Cost						LCC

Fig. 2.9. Tehnologii de mentenanță pe parcursul ciclului de viață

industrie. O soluție binevenită pentru a rezolva această problemă poate fi utilizarea calculatorului, Computer Aided FMEA (Russomanno, 1994), (Kimura, 2002).

Asamblarea și demontarea sunt operații de mentenanță corectivă sau reactivă. Așadar, pentru ca aceste operații să fie facile, trebuie să se crească eficiența, ceea ce înseamnă DFA&D (*Design for Assembly and Disassembly*) (Boothroyd, 1983), (Ohashi, 2002).

Pentru a fi considerat mentenabil, abilitatea pentru service este un concept complex de evaluare a unui produs. Pentru a se evalua costul de service pe ciclul de viață se folosesc concepte combinate de accesibilitate, asamblare și fiabilitate a componentelor. Pentru acesta se propune metoda SMA (*Service Mode Analysis*) sau SMEA (*Service Modes and Effects Analysis*) (Gershenson, 1992), (Di Marco, 1995).

*Planificarea mentenanței* se divide în strategia de planificare a mentenanței (partea de metode) și planificarea sarcinilor de mentenanță (partea operativă) (De Boer, 1997). Cea mai bine cunoscută metodologie este RCM dezvoltată în 1970. Mai recent, această metodologie este aplicată în diferite

instalații de producție, dar și în domeniul nuclear. În completare la RCM, RBI (*Risk-Based Inspection*) sau RBM (*Risk-Based Maintenance*) au atras atenția ca metode sistematice pentru planificarea strategiei de mentenanță, în special în domeniul nuclear. În timp ce RCM realizează o strategie a mentenanței bazată pe evaluarea calitativă a defectării, RBI/RBM utilizează riscul pentru prioritatea defectelor potențiale. Riscul este definit ca produsul probabilității de defectare pentru component și consecința lui. API (*American Petroleum Institute*) a stabilit o procedură pentru aplicarea RBI la hidrocarbon și industriile chimice de proces (API, 2000), (Engels-Lindemann, 2002).

*Sarcinile de mentenanță* se divid în trei categorii: identificarea condiției produsului (inspecția), monitorizarea și diagnoza; tratamentul mijlocului de viață; tratamentul de sfârșit de viață.

Identificarea condiției produsului (inspecția) este una din sarcinile majore ale mentenanței operative, nu doar pentru mentenanța bazată pe condiție, ci și pentru diagnoză, în cazul defectării. Scopul acestor sarcini sunt:

- ☑ să se verifice integritatea produsului;
- ☑ să se determine simptomele de defectare;
- ☑ să se analizeze cauzele defectării sau simptomele;
- ☑ să se prezică tendința în timp a condiției.

Termeni ca inspecție, monitorizare, diagnoză și prognoză sunt utilizați la reprezentarea acestor activități.

În timp ce inspecția implică observarea și înțelegerea stării curente a produsului, diagnoza și prognoza implică analiza de cauzalitate și anticipare a progresului de deteriorare, respectiv funcția de degradare. Pe de altă parte, monitorizarea implică observații continue sau periodice ale condiției produsului, pentru detectarea simptomelor sau defectelor. În orice caz, activitatea constă în trei faze (fig. 2.10): detectare, procesare și judecare (stabilire).

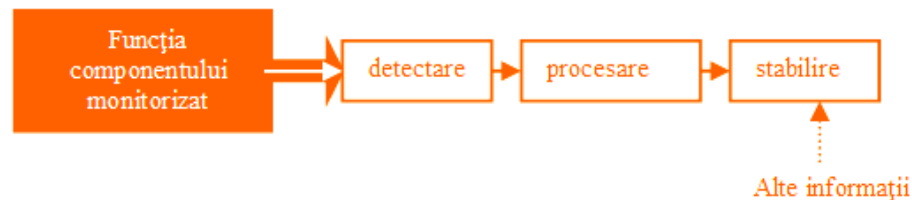


Fig. 2.10. Fazele monitorizării

La fiecare fază sunt aplicate tehnici variate. În faza de detectare sunt observați numeroși parametri fizici și chimici. În faza de procesare, când senzorul obține date în timp real, sunt aplicate tehnici variate de procesare a semnalelor pentru extragerea caracteristicilor, indicând starea condiției produsului (Suh, 1999). De asemenea, în această fază sunt utilizate tehnicile analizei chimice, ca analiza lubrifiantului și analiza particulelor de uzură.

În faza de stabilire, caracteristicile extrase de la semnal sunt interpretate pentru a se determina defectarea și/sau funcția de degradare. Pentru această stabilire vor fi necesare o serie de alte informații care vor trebui adăugate pentru a stabili cea mai bună soluție de mentenanță operativă.

În multe cazuri, dificultățile monitorizării și diagnozei vin de la lipsuri de informație. Pentru a acoperi acest neajuns se pot aplica tehnologii ca: RBR (*Rule-Based Reasoning*), CBR (*Case-Based Reasoning*), neuro-fuzzy. Bazat pe aceste tehnologii pot fi dezvoltate sisteme expert pentru diagnostic (Anghel, 2007),

(Chen, 2002), (Feldmann, 2001), (Hirschmann, 2002), (Jedrzejewski, 1996), (Majstorovic, 2003), (Zhou, 2000).

*Tratamentul mijlocului și sfârșitului de viață* cere cunoștințe deosebite și îndemânare. Pentru perfecționarea operatorilor de mentenanță operativă se folosesc tehnici de realitate virtuală (VR) sau teleservice. O altă cale pentru eficientizare este automatizarea și robotizarea operațiilor de mentenanță (Asama, 1986), (Rust, 1998), (Spur, 1986).

În completare la tehnologiile de mentenanță, pentru fiecare fază a ciclului de viață al produsului este nevoie de tehnologii de evaluare și conducere a ciclului de viață total. LCC (*Life Cycle Cost*) și LCA (*Life Cycle Assessment*) sunt principalele metode pentru evaluarea ciclului de viață al produsului. În multe cazuri, mentenanța pentru produs raportată la ciclul de viață este un mare avantaj, deoarece cuprinde o mare parte din viața produsului și, de asemenea, are un impact considerabil cu mediul (Westkaemper, 2000). Un alt punct important privind managementul mentenanței în ciclul de viață este furnizarea de informații de fond, care includ managementul datelor, colectarea datelor de disfuncționalități și mentenanță predictivă MP (*Maintenance Prevention*) (Takata, 1995).

## 2.3. Cercetări în domeniul mentenanței

Aceste cercetări includ tehnologii avansate, ca: modelarea 3D, managementul cunoașterii, simularea și tehnologiile web. Acestea aduc noi metode pentru implementarea mentenanței în ciclul de viață.

### 2.3.1. Mentenanța bazată pe model

Progresele în modelarea digitală contribuie la facilitatea operațională de analiză a deteriorării, FMEA, monitorizare, diagnoză și analiza demontării pentru reparații (van Houten, 1998 și 2000).

Modelul de produs trebuie să conțină nu doar informații referitoare la geometrie, ci și informații de comportare a produsului în diverse condiții de constrângeri și solicitări. Schimbările de comportament sunt evaluate, în principal, de fizica calitativă și intensiv computațională, utilizându-se, de exemplu, arborii de defectare (van Houten, 1998). Modelarea funcțională joacă un rol crucial pentru modelele calitative, un exemplu fiind modelul FBS (*Function-Behavior-State*) (Umeda, 1996).

Evaluarea deteriorării este elementul cheie în raționalizarea mentenanței, fiind necesară la fiecare fază a ciclului de viață al produsului. În timp ce FMEA implică analiza calitativă, simulările deteriorării și defectării fac posibilă analiza cantitativă. Procesul de deteriorare, ca uzură simulată și efectele asupra produsului, este evaluat pe baza modelului de produs. Deteriorarea este indusă de solicitările de mediu și operaționale. Datorită faptului că condițiile de operare și de mediu diferă pentru un același tip de echipament, deteriorarea va fi diferită, dar se poate obține o valoare medie care poate fi discutată. Pentru evaluarea deteriorării sub condiții de operare nestaționară este foarte importantă simularea deteriorării bazată pe model (van Houten, 1998 și 2000), (Takata, 1998), (Yamata, 2002). Figura 2.11 arată o procedură de simulare a deteriorării aplicată

angrenajelor dințate la roboții industriali. Sistemul evaluează solicitarea pe fiecare component a angrenajului, folosind un robot model. Apoi, deteriorarea este evaluată folosind modelul de uzură. Această deteriorare simulată a sistemului este aplicată la optimizarea condițiilor de operare sub care estimările pentru uzură pot fi reduse până la 50%, menținând același timp de funcționare.

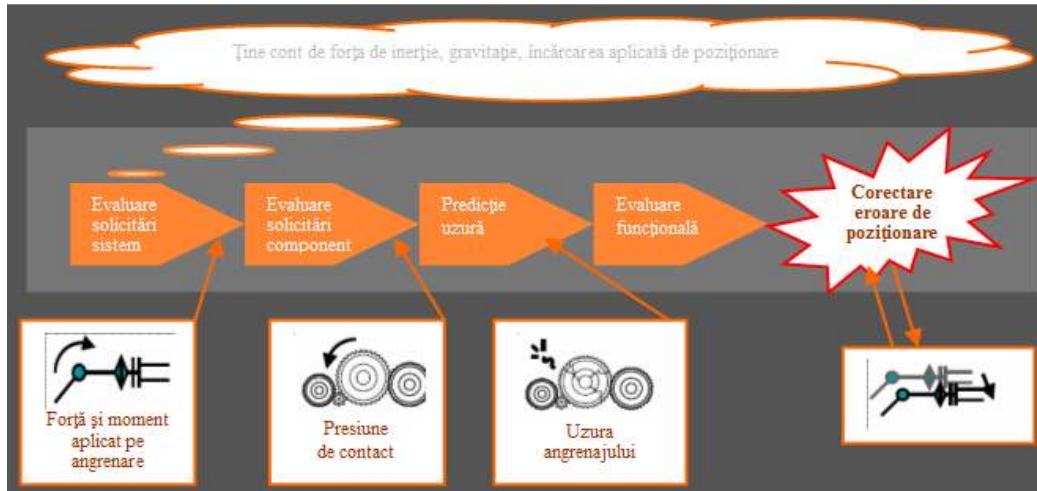


Fig. 2.11. Procedura de simulare a deteriorării aplicată la angrenajele roboților industriali

O tehnologie importantă pentru mentenanță o reprezintă aplicarea AR (*Augmented Reality*), care face posibilă existența modelelor de produs (Flaig, 1998), (Takata, 2001). Este o tehnologie importantă pentru educația și training-ul personalului de mentenanță operativă și, de asemenea, un ghid al operațiilor de mentenanță. Alături de abilități și transferul de know-how se poate realiza transferul de cunoștințe de la fabricantul de produs la utilizatorul de produs, care va trebui să mențină produsul corespunzător în utilizare.

### 2.3.2. Simularea ciclului de viață pentru planificarea strategiei de mentenanță

Selectarea strategiei de mentenanță proprie este importantă pentru realizarea mentenanței efective sau operaționale. În selectarea strategiei de mentenanță a fiecărui component este nevoie de optimizarea planului strategic de mentenanță, din perspectiva sistemului.

Evaluările necesare nu sunt facile, pentru că există mulți factori de influență ai mentenanței. Utilizarea modelelor de simulare acoperă această problemă (Kimura, 2003). În figura 2.12 este un exemplu de model de simulare pentru strategia de mentenanță. Simularea reprezintă o soluție performantă în mentenanță, prin acuratețea monitorizării sensibile complete și rapide, pentru furnizarea datelor personalului operativ de mentenanță.

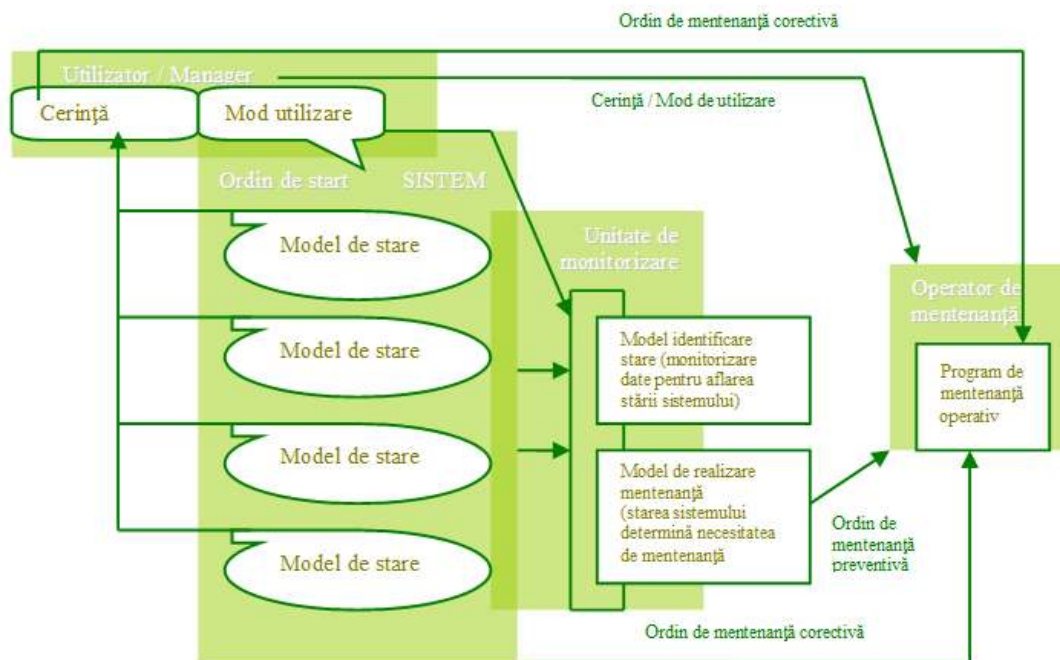


Fig. 2.12. Model de simulare pentru evaluarea strategiei de mentenanță

Ca software necesar simulării se recomandă LabVIEW, din motiv că oferă facilități de programare grafică și, în plus, se poate integra cu software baze de date, include software de monitorizare, achiziție și control, așa cum se va arăta și în metodele de simulare prezentate în capitolele următoare.

### 2.3.3. Integrarea proiectării toleranțelor și a planificării mentenanței

În timp ce proiectarea de produs alocă toleranțe și un domeniu acceptabil de variație a parametrilor care determină performanța produsului, mentenanța are grijă să reducă creșterea variațiilor acestor parametri în timpul deteriorării.

Deci, proiectarea toleranțelor și planificarea mentenanței sunt interconectate, deoarece ele sunt două opțiuni pentru conservarea performanței produsului: toleranțe strânse sau intensificarea mentenanței.

În trecut, proiectarea toleranțelor și planificarea mentenanței au fost activități separate. Datorită tehnologiilor recente de modelare și abordare pentru procese de fabricație multi-station (Ceglarek, 1996), (Jin, 1999), (Ding, 2000 și 2002) și proiectarea toleranțelor (Ding, 2000), (Rong, 2000), (Shiu, 2003), a fost propusă integrarea proiectării toleranțelor și a planificării mentenanței (Ding, 2000). Metodologia oferă înțelegerea răspunsului sistemului la intrări variabile și schimbările de performanță ale sistemului în timp real. Procedura acestei metodologii este ilustrată în figura 2.13.

Un exemplu de unitate inteligentă, numită „Watchdog Agent” este arătată în figura 2.14. Ea poate impune performanța referitor la degradare prin senzorii încorporați, predicția în viitor a deteriorării, diagnoza și modelarea statistică a

proceselor observate (Casoetto, 2003), (Djurdjanovic, 2002 și 2003), (Lee, 2003), (Ni, 2003).

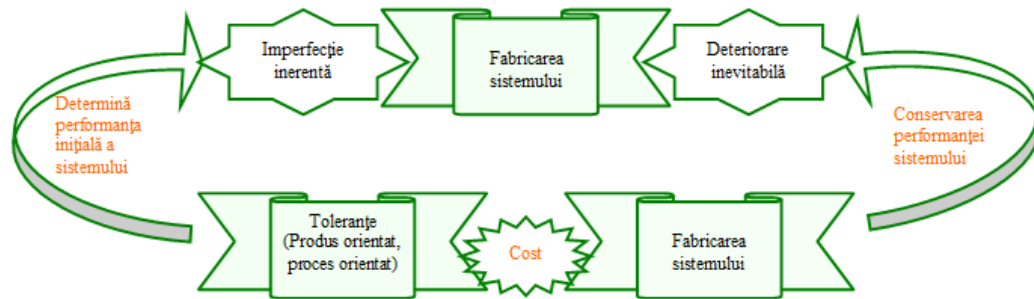


Fig. 2.13. Integrarea proiectării toleranțelor și a planificării mentenanței

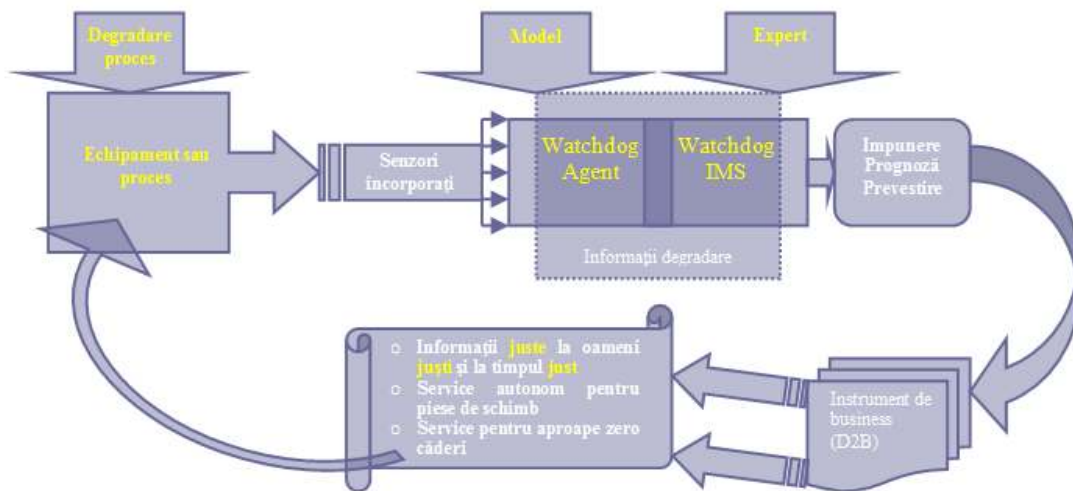


Fig. 2.14. Watchdog Agent

Un alt exemplu, numit LCU (*Life Cycle Unit*), achiziționează și utilizează date despre componente prin senzori integrați. Prototipul unității a fost implementat în amortizoare de șoc, mașini de spălat și vagoane de cale ferată (Buchholz, 2003), (Seliger, 2003).

### 2.3.4. Mentenanța de siguranță

În zilele noastre, cele mai multe produse au funcții de diagnostic de siguranță, încorporând un microprocesor. Cu toate că aceste funcții privesc mentenanța de siguranță, conceptul este extins și la reparația de siguranță, respectiv evoluția de siguranță. Un sistem mentenabil cu mentenanță de siguranță va fi echipat cu control și procesor inteligent, senzori și elemente de realizare a sarcinilor. În contrast cu sistemele biologice, sistemele mecanice sunt dificil de reparat. Dacă apare o defectare, produsul recunoaște autonom defectarea prin funcțiile proprii de diagnostic și încearcă să-și reconfigureze



starea, comportarea inițială sau de păstrare a funcției pierdute. Trei tipuri de tehnologii pentru mentenanța de siguranță au fost propuse în literatura de specialitate: controlul (Shimomura, 1995), funcția de redundanță (Umeda, 1994) și inteligența de grup/rețea (Kondoh, 1998).

### 2.3.5. Mentenanța bazată pe Web

Avansarea rapidă a comunicației și a tehnologiilor de rețea au avut un impact important printre tehnologiile de mentenanță, ca pentru oricare alt domeniu ingineresc. Acest impact poate fi divizat în două categorii: mentenanță de la distanță și service de mentenanță bazat pe Web.

Monitorizarea de la distanță și diagnoza au fost discutate începând din 1970, când tehnologia de transmitere a datelor se realiza prin linii de telefon. Recent, dezvoltarea Internetului și a tehnologiilor de comunicație wireless face posibilă punerea în practică a acestora pentru mentenanța sistemelor tehnice.

Tehnologia Internet face posibilă furnizarea de servicii variate de mentenanță, ca: monitorizarea de la distanță și diagnoza prin Net.

Accentul este pus pe furnizarea intrărilor pentru managementul ciclului de viață prin rețea, ca (Sihn, 2003), (Stender, 1998), (Stender, 2000), (Lee, 2003): deteriorarea și analiza defectării, estimarea vieții rămase, planificarea strategiei de mentenanță, managementul sarcinii de mentenanță, tratamentul de sfârșit de viață și managementul datelor ciclului de viață.

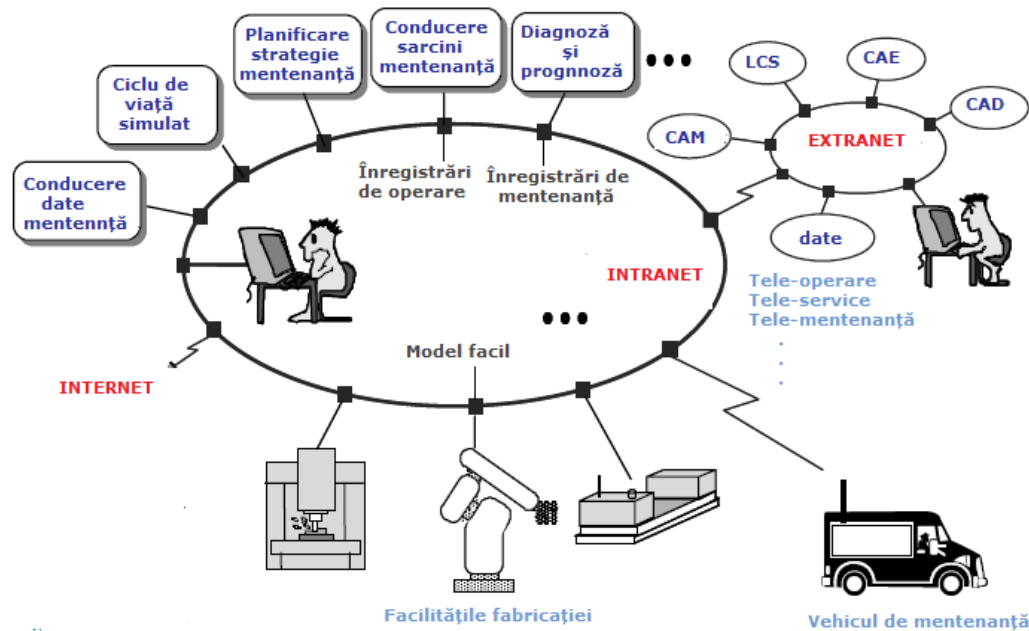


Fig. 2.15. Conceptul sistemului de mentenanță bazat pe Web

În figura 2.15 este propusă o platformă de mentenanță pentru service, care permite o implementare ușoară prin tehnologia Web. Platforma constă din: modulul de interfață, modulul datelor de transfer, instrumentele informatice inteligente și modulul de sincronizare (Chen, 2004).

## 2.4. Concluzii

În acest capitol s-a prezentat stadiul cunoașterii în domeniul mentenanței, care constituie un suport pentru cercetările care urmează a fi dezvoltate în următoarele capitole ale tezei.

Studiul efectuat a pus în evidență diferite strategii de mentenanță care pot fi dezvoltate și aplicate la nivel național, unde nivelul este departe de a fi considerat de "generație actuală".

Important de subliniat este rolul pe care mentenanța îl are din perspectiva managementului ciclului de viață și necesitatea de a "juca" acest rol și în cadrul întreprinderilor industriale românești. Acest rol se referă la continua schimbare, de la „întreținere”, care înseamnă pentru oameni și mașini „a suferi”, la o mentenanță științifică, care se traduce în „stăpânirea” de către operatorii umani a sistemelor tehnice din ce în ce mai complexe, în scopul de minimizare a materialului, a consumului de energie, în condiții de asigurare a securității și a mediului curat. Acest scop se poate atinge utilizând corect o mare varietate de metode, tehnici și tehnologii avansate, aplicabile cu succes în domeniul mentenanței, validând astfel necesitatea de a redefini rolul managementului mentenanței în cadrul managementului integrat al ciclului de viață.

Cercetarea bibliografică care a stat la baza analizei și sintezei prezentate evidențiază eforturile depuse la nivel mondial în domeniul mentenanței. Modelele, metodele și tehnicile evaluate de mentenanță au fost considerate ca fiind printre cele mai bune practici, de interes pentru metoda de mentenanță holonică propusă și dezvoltată în capitolele următoare.

# 3. DEZVOLTAREA UNEI METODOLOGII DE MENTENANȚĂ ÎN DOMENIUL NUCLEAR

## 3.1. Introducere

Prezentul capitol se bazează pe analiza și sinteza cunoștințelor în domeniul mentenanței industriale, prezentată în capitolul anterior, propunându-se o strategie și un model holonic pentru mentenanța nucleară, adăugând astfel o nouă practică la cele mai bune practici existente în mentenanță la nivel mondial.

Pornind de la constatarea că instalația sau echipamentul, chiar dacă este bine proiectat, nu va putea fi menținut în condiții de siguranță sau fiabile dacă nu este mentenabil la un nivel corespunzător, rezultă obiectivele generale ale procesului de mentenanță, pe baza cunoașterii defectelor și accidentelor, pentru realizarea siguranței posibile, cu cel mai redus cost.

Din practica instalațiilor nucleare, având în vedere obiectivele generale, s-a ajuns la concluzia că, conceptul de mentenanță bazată pe risc trebuie dezvoltat îndeosebi pentru componentele cu risc înalt și, de obicei, cu frecvență mărită la realizarea criteriului de risc tolerabil. Chiar dacă instalațiile nucleare complexe aflate în funcțiune au la bază un studiu de risc, care poate fi luat în calcul la proiectarea metodelor de mentenanță operative, demersul metodei care se propune face abstracție de acest lucru, referindu-se la instalații nucleare de tip nou, nerealizate încă la scară industrială, cum va fi instalația de detritiere nucleară pentru reactoarele de tip CANDU de la Cernavodă, realizată după tehnologia și experiența ICSI Rm. Vâlcea. Existența unui studiu de risc pentru o instalație nucleară reprezintă, în fapt, o simplificare a metodei propuse în acest capitol și detaliată în capitolele următoare, pentru implementarea unei mentenanțe științifice a sistemelor nucleare mentenabile.

În acest studiu se alocă ipotezele și condițiile specifice pentru demersul metodologic propus, pentru că este evident faptul că în cadrul întreprinderilor industriale procesul de mentenanță și mentenanța produsului se dezvoltă după considerente proprii ale politicilor manageriale, după *resursele tehnice, tehnologice, economice și umane* (RTTEU) existente și direcționate potrivit respectării unor constrângeri de calitate și conformitate reglementate și impuse din motive acceptate. În acest context, nu poate exista o rețetă generală pentru realizarea unei mentenanțe valabile la orice întreprindere, pentru că fiecare are particularitățile ei, care diferă, cel puțin prin RTTEU. Așadar, contribuțiile aduse la cunoașterea pentru mentenanță se referă la instalațiile nucleare, din motive de necesitate, dar și pentru că oferă cele mai complexe relații între RTTEU, completate cu cerințe foarte dure privind funcționarea echipamentelor mentenabile în domeniul nuclear, la care mentenanța este considerată fundamentală.

Prin acțiuni de simplificare și modificare reduse, metodologia propusă se poate adapta pentru mentenanța oricărui întreprinderi industriale.

Deci, se poate spune că mentenanța efectivă este esențială pentru operarea în siguranță a instalațiilor nucleare. Echipamentele trebuie să fie monitorizate, inspectate, testate, evaluate și menținute astfel ca funcțiile lor să fie conform cerințelor proiectate.

### 3.2. Strategia de mentenanță

Pentru strategia de mentenanță pot fi utilizate diferite concepte de mentenanță. În figura 3.1 sunt ilustrate relațiile între conceptele de mentenanță asociate activităților care furnizează baza unei bune strategii de mentenanță. Această strategie va fi suportată de programul de mentenanță.

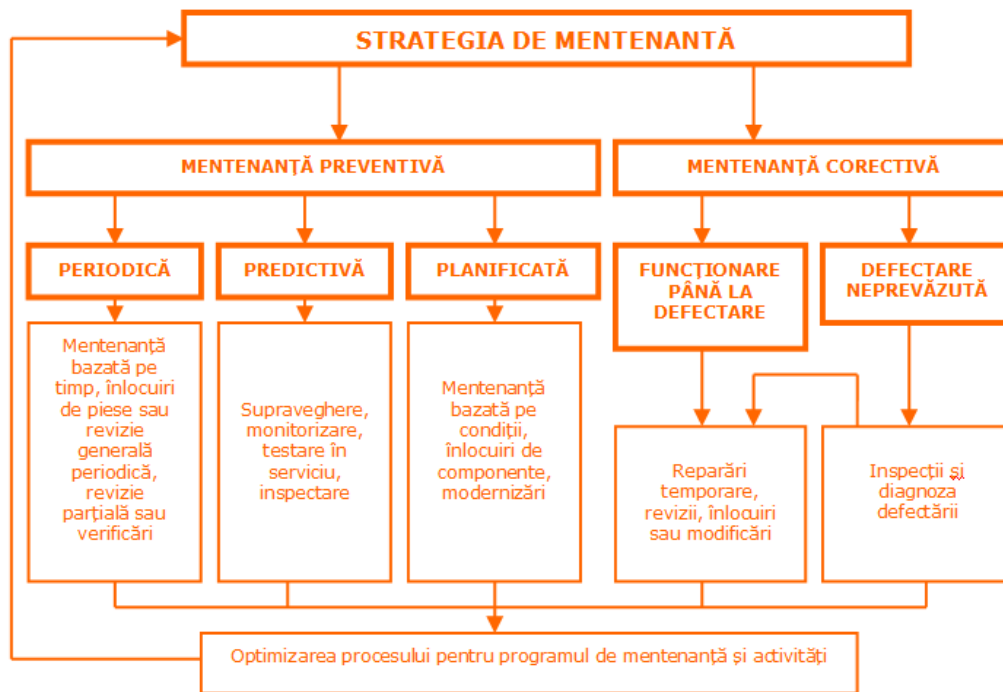


Fig. 3.1. Relația activităților și conceptelor de mentenanță

Majoritatea activităților de mentenanță sunt alocate la conceptul de mentenanță preventivă. Aceste activități de mentenanță pot rezulta, de exemplu, din analiza de siguranță, proiectare, cerințe de fiabilitate, coduri și standarde, experiență de operare, fiind realizate pe bază de timp, condiții actuale sau condiții predictive. În momentul când condițiile de performanță nu corespund funcțiilor din proiectare, vor fi efectuate acțiuni corective.

Rezultatele tuturor activităților de mentenanță vor crea un feedback prin procesul de optimizare generat pentru continua îmbunătățire a programului de mentenanță.

Pentru programul de mentenanță se va adopta un demers sistematic, în scopul de a identifica activitățile de mentenanță care vor fi realizate și la ce interval de timp. Pentru identificarea, selecția și frecvența activităților de mentenanță, va trebui să se țină cont cel puțin de următoarele:

- ☑ Importanța relativă a riscului la securitatea națională, viața și siguranța pentru personal și mediu;
- ☑ Baza tehnică pentru a demonstra că scopurile de siguranță și criteriul de performanță sunt descrise în licența de operare și documentațiile suport;
- ☑ Cerințele tuturor codurilor și standardelor industriei;
- ☑ Principiul protecției la radiație *As Low As Reasonably Achievable* (ALARA);
- ☑ Condițiile de operare și proiectare;
- ☑ Recomandările furnizorilor;
- ☑ Experiența de operare;
- ☑ Cerințele managementului de uzură.

Odată ce programul de mentenanță asigură că instalația respectă funcțiile de proiectare urmează ca strategia de mentenanță să fie axată pe analiza siguranței și proiectării. Dezvoltarea strategiei presupune o legătură strânsă între operarea de exploatare, operarea de mentenanță și organizarea proiectării, pentru a se asigura că strategia este bazată pe o înțelegere clară a filozofiei de proiectare și a detaliilor de folosire a instalației.

Rezultatele activităților de mentenanță pot fi utilizate ca feedback pentru modificări în programul de mentenanță sau în proiectare. Acestea trebuie să fie controlate în acord cu procedura de aprobare a licenței de operare.

Licența de operare va include activități de prevenire, detectare și reparare, ilustrate în figura 3.1. Activitățile preventive și corective pot fi combinate la diferite niveluri, pentru formarea strategiei de mentenanță potrivit obiectivelor programului de mentenanță.

Activitățile mentenanței preventive sunt periodice (bazate pe timp), planificate sau predictive. Rezultatele de la activitățile periodice sau activitățile predictive pot genera adăugări la activitățile planificate. Aceste activități vor trebui să includă standarde acceptate și legi aprobate, ca de exemplu prevederile legii 111/1996(r2) privind desfășurarea în siguranță, reglementarea, autorizarea și controlul activităților nucleare, avize de autorizare din partea Comisiei Naționale pentru Controlul Activităților Nucleare, Agenției Naționale pentru Activități Nucleare etc., pentru inspecții, impuneri, calibrări, testarea performanței și a funcționării.

Pentru mentenanța corectivă, autorizarea funcționării în domeniul nuclear o prevede ca fiind deosebit de necesară la realizarea diagnozei echipamentului. Procesul va include evaluarea impactului de defectare a echipamentului și prioritizarea lucrării de reparare, cu respectarea activităților de mentenanță programate.

Managementul uzurii sau îmbătrânirii determină un proces de detecție, atribuire și conducere a deteriorării. Tipul și frecvența activităților de mentenanță vor fi modificate la apariția unor defecte, ca: iradiere, coroziune, eroziune, oboseală, alte degradări de material.

Optimizarea activităților este un proces bazat pe rezultatele unor activități menționate în continuare (lista nu este exhaustivă):

- ☑ Defecte în operare;
- ☑ Găsirea de condiții;
- ☑ Defecte descoperite în timpul activităților de mentenanță;
- ☑ Frecvența defectărilor și informațiile relatate;
- ☑ Îmbunătățirea mentenabilității;
- ☑ Experiența operării în alte instalații.

Monitorizarea sistemelor tehnice complexe se va baza pe criterii de performanță care includ fiabilitatea, disponibilitatea, funcționarea, cerințele de performanță și ipotezele folosite în analiza de siguranță și proiectare.

Procesul de monitorizare și procedurile vor include monitorizarea condițiilor, supravegherea și testarea. Monitorizarea condițiilor include și utilizează echipamente specializate pentru activități predictive, ca: analiza vibrațiilor, zgomotelor, tribologie și termografie, exemple ale tehnicilor de *Condition Monitoring* (CM).

### 3.3. Sistemul de management integrat al mentenanței

Modelul propus pentru sistemul de management integrat al mentenanței introduce în analiza deciziei pentru mentenanță conceptul holonic (fig. 3.2), care are la bază, ca unitate cuantificabilă, holonul.

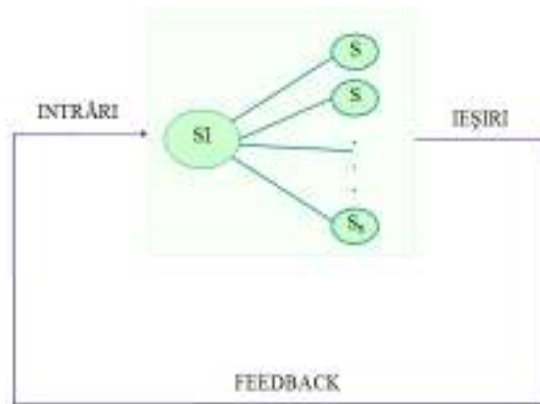


Fig. 3.2. Modelul de bază al unui sistem holonic

În continuare se va arăta cum se poate implementa un model holonic pentru decizie în mentenanța industrială.

#### 3.3.1. Sistemul holonic

În dezvoltarea teoriei generale a sistemelor, de la fundamentarea ei de către L. von Bertalanffy și până în prezent, se pot identifica două perioade (Burciu, 1999):

- ☑ între anii 1930-1980 s-a dezvoltat și îmbogățit concepția clasică asupra sistemelor;
- ☑ din anii '80 este dominantă concepția holonică, concepție care poate oferi noi perspective în procesul cunoașterii, inclusiv în mentenanță.

Termenul de holon a fost utilizat pentru prima dată de către Arthur Koestler (Koestler, 1967) în lucrarea sa "The Ghost in the Machine" (Duhul din mașină) și este o derivare a termenului "holos" din limba greacă, care înseamnă "un întreg dedus din părți". Utilizând noțiunea de holon, Koestler a fost primul care a scris despre sisteme operând în cadrul altor sisteme; ulterior, alți specialiști (Patrick, 1995) au preluat această noțiune, păstrând în linii generale

sensul inițial, deși termenul nu apare în dicționarele uzuale. În esență, un sistem holonic este un sistem de referință în cadrul căruia funcționează două sau mai multe sisteme autonome. Altfel spus, două sau mai multe sisteme autonome se pot integra, pe baza unor criterii bine definite, pentru a atinge obiective bine determinate, pentru a forma un nou sistem de referință, respectiv sistemul holonic. Noul sistem holonic având rolul de integrator, optimizează funcționarea și rezultatele atinse de sistemele încorporate.

În aparență, definirea sistemului holonic se apropie sau chiar se identifică față de unele dintre abordările privind sistemele clasice. În realitate, se poate vorbi doar de o comparabilitate între cele două noțiuni. Astfel, sistemul holonic integrează două sau mai multe sisteme autonome, adică  $n$  sisteme; funcție de valoarea lui  $n$  apar două situații distincte:

- ☑  $n=2$ , situație care constituie un caz particular al sistemului holonic, apropiat de sistemul clasic (se poate și suprapune complet);
- ☑  $n>2$ , situație care constituie cazul specific al sistemului holonic, unde diferențele față de sistemul clasic sunt reale și evidente.

Raportat doar la cazul specific ( $n>2$ ), se pot desprinde trăsăturile esențiale ale sistemului holonic, prin care acesta se diferențiază de sistemul clasic:

- ☑ sistemul holonic este, în toate cazurile, un sistem deschis;
- ☑ noțiunea clasică de sistem, aparent de "generalitate excesivă", rămâne valabilă, dar cu introducerea anumitor limitări în procesul de operare cu sisteme holonice;
- ☑ într-un sistem holonic, "desprinderea" și "atașarea" de sisteme autonome poate avea loc atât în plan abstract cât și în plan real, aspect care nu este valabil pentru sistemul clasic;
- ☑ între subsistemele componente ale unui sistem general și sistemele autonome ale unui sistem holonic există puncte de comparație, dar și diferențe reale (rol, funcții, proprietăți, optimizare etc.);
- ☑ optimizarea în cadrul sistemelor holonice vizează atât sistemele componente cât și sistemul de referință (integrator), aspect care nu este obligatoriu în cazul sistemului clasic;
- ☑ principial, la baza operării cu sisteme holonice se află distribuția unor sisteme autonome în cadrul sistemelor umane sau, mai precis, există un tip particular de holon, denumit sistemul activității umane, la care se raportează optimizarea tuturor celorlalte sisteme holonice.

Având în vedere specificul unui sistem holonic, prin comparație cu modelul de bază al unui sistem clasic deschis, se poate contura arhitectura generală a unui sistem holonic (fig. 3.3).

Concepția holonică constituie un pas înainte în dezvoltarea teoriei sistemelor; mai mult, influențele acestei concepții s-au făcut resimțite și în alte domenii, inclusiv în economie (spre exemplu, dezvoltările din teoria firmei, având ca rezultat firma holonică).

De regulă, holonii sunt integrați printr-un sistem informatic care este proiectat astfel încât să permită realizarea funcțiilor și atributelor holonice existente într-o structură holarhică. Forma holonică reprezintă o combinație de reguli fixe și strategii flexibile (fig. 3.4), în scopul atingerii unor obiective mixate comune.

Mai mulți holoni, adică un sistem de holoni care cooperează pentru realizarea unui scop sau obiectiv, se numește holarhie (Christensen, 1994).

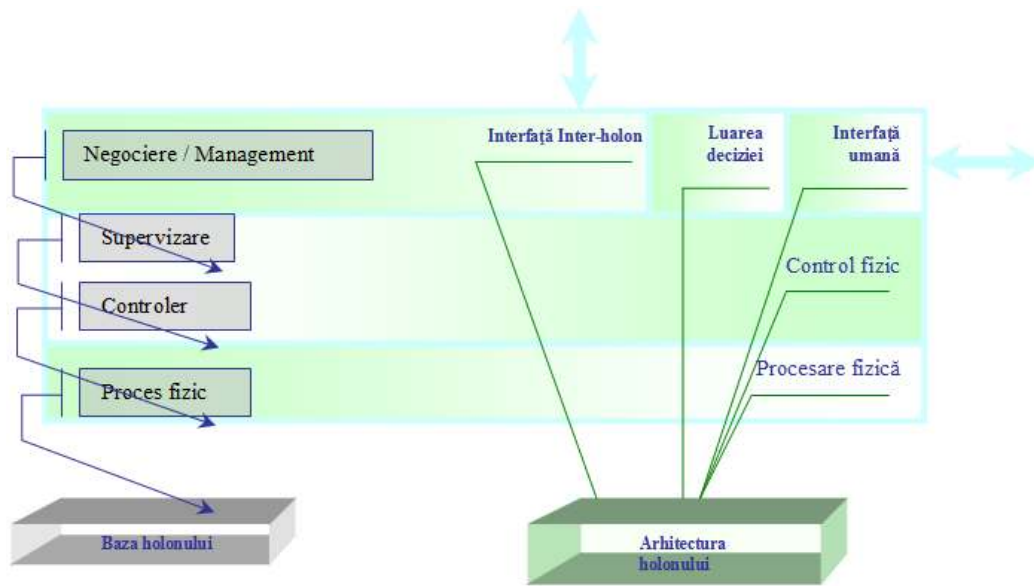


Fig. 3.3. Baza și arhitectura generală a holonului



Fig. 3.4. Forma holonică: combinația de reguli fixate și strategii flexibile

### 3.3.2. Modelul holonic de mentenanță

Conceptul propus de model holonic de mentenanță se bazează pe structura holonică a sistemelor mentenabile (fig. 3.5), în sensul teoriei dezvoltate de Koestler, termenul de „holon” fiind definit ca o combinație de cuvinte grecești: „holos”, care înseamnă „întreg” și sufixul „on”, care sugerează o particulă (proton, electron etc.) încontinuu observată „part of”.

*Holon tehnologic de mentenanță* (HTM). În încercarea de a media între atomism și holism, Arthur Koestler a plecat de la observația că în sistemul



natural, partea și întregul, în înțeles absolut, nu există. Așadar, se poate deduce, cu interes pentru metodologia de mentenanță propusă, că într-o structură de sistem tehnic, orice element structural este o parte a unui element de rang superior, dar, în același timp, este un întreg, ale cărui părți constitutive sunt elemente structurale de rang inferior. Dacă elementele componente ale unui sistem tehnologic de mentenanță au drept relație de ordine o relație de apartenență, atunci se propune ca un element al acesteia să se numească „holon tehnologic de mentenanță”. Atributele caracteristice ale unui holon tehnologic de mentenanță sunt: funcționarea autonomă și acordarea autonomă la perturbațiile și evoluțiile din mediul industrial.

*Structură holonice mentenabilă (SHM).* De exemplu, întreaga arhitectură hardware și software, „partea de automatizare” a sistemelor complexe care fac obiectul cercetării, se poate descompune în holoni, după modelul din figura 3.5. Deci, partea respectivă din sistemul tehnic de automatizare are o „structură holonice mentenabilă”.

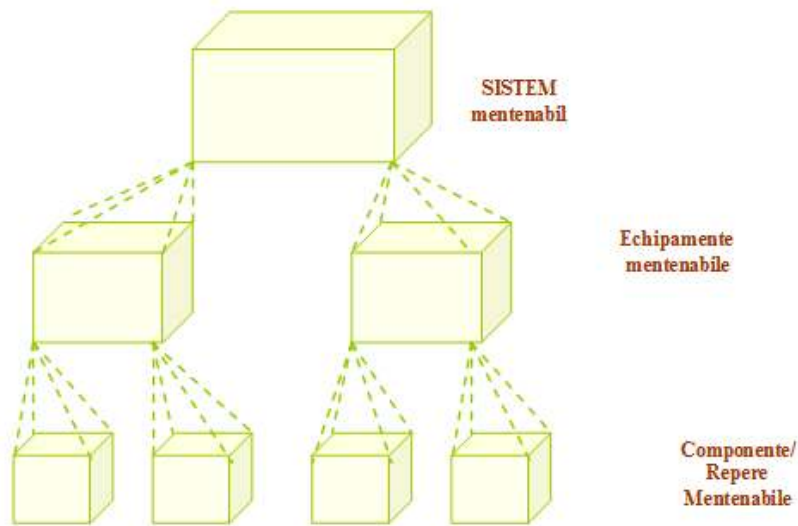


Fig. 3.5. Structura holonice a sistemelor mentenabile

Din punct de vedere structural, caracteristicile cele mai importante ale unei structuri holonice mentenabile sunt dezasamblarea și restaurarea funcțiilor inițiale, conform stării prevăzute.

*Arbore holonice mentenabil (AHM).* Sub aspectul apartenenței, structurile holonice mentenabile pot fi reprezentate printr-un arbore, având ca rădăcină structura (cadru mentenabil) în ansamblul ei (holonul mentenabil de cel mai înalt rang), iar ca frunze holonii mentenabili care nu mai pot fi divizați fără a se pierde atributele caracteristice ale unui holon tehnologic mentenabil. Această reprezentare se numește „arbore holonice mentenabil”.

*Legitatea structurii holonice mentenabile (LSHM).* Pe lângă relațiile de apartenență, între holonii mentenabili există și relații de interdependență, care reglementează modul intern de relaționare a structurii holonice mentenabile, precum și comportarea acesteia în relația cu mediul industrial în care funcționează. Totalitatea legităților pe care se bazează relațiile de interdependență dintre holonii mentenabili se numește „legitatea structurii holonice mentenabile”.

*Operaționalul structurii holonice mentenabile* (OSHM). Între holonii mentenabili există relații de conlucrare care asigură funcționarea structurii holonice în ansamblu, atunci când se îndeplinește sarcina primită. Baza de conlucrare este dată de atributele funcționale cu care este înzestrat fiecare holon mentenabil constituent al structurii. Funcție de scopul pentru care este creată structura holonică mentenabilă, atributele operaționale pot fi mai sintetice sau mai specifice. Atribute operaționale mai sintetice sunt, de exemplu: autonomia, cooperativitatea sau optimalitatea mentenanței operative. Atribute operaționale mai specifice sunt, de exemplu: demontarea după o anumită ordine sau calculul numeric de optimizare după un anumit algoritm. Ansamblul atributelor operaționale ale holonilor mentenabili constitutivi a fost numit „operaționalul structurii holonice mentenabile”.

Complexitatea lucrărilor de mentenanță pe care un holon pentru diagnoză și/sau un sistem de monitorizare inteligent le poate efectua și capacitatea acesteia de a se adapta la mediu industrial depind în mod esențial de operaționalul structurii holonice mentenabile a respectivului sistem de monitorizare și diagnosticare.

*Holarhie mentenabilă* (HM). Ansamblul format din arbore holonic mentenabil, legitatea și operaționalul, se numește „holarhie mentenabilă”. Holarhia mentenabilă poate fi considerată ca model descriptiv al unei structuri holonice mentenabile.

Noțiunile definite stau la baza abordării noului model holonic de mentenanță integrată în ciclul de viață al produsului.

Pentru înțelegerea modelului de mentenanță propus sunt precizate câteva noțiuni importante (unele consacrate), după cum urmează:

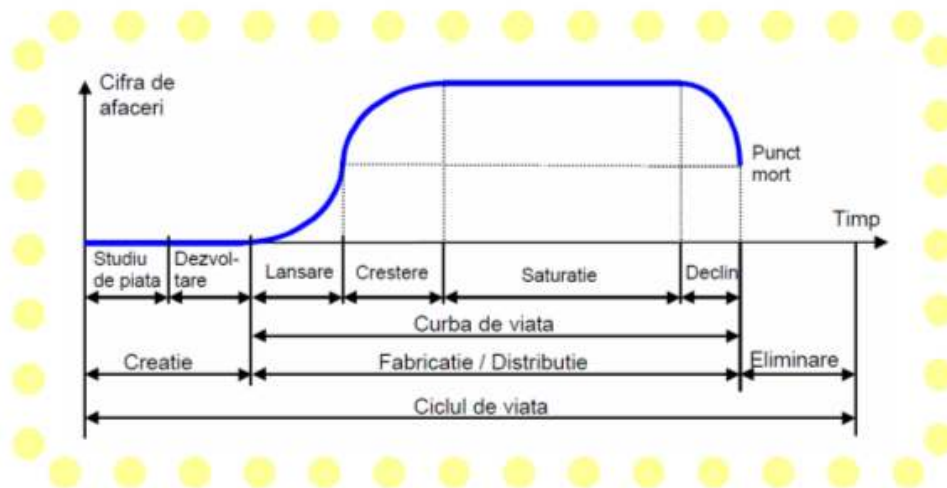


Fig. 3.6. Ciclul de viață al produsului (Drăghici, 1999)

*Ingineria integrată* (2I) (Drăghici, 1999) reprezintă un mod de organizare, ce permite concepția integrată și simultană a produsului, a proceselor de producție, mentenanță etc. asociate ciclului de viață (fig. 3.6). Ingineria integrată asigură luarea în considerare, încă de la definirea necesității, a tuturor fazelor ciclului de viață al produsului, începând cu concepția și terminând cu eliminarea sa, integrând problemele de calitate, termene, costuri, exigențe ale utilizatorului etc. Ingineria integrată este deci o metodologie care tinde să aducă

spre amonte cunoștințele specializate care intervin în aval de proiectare, ca: pregătirea fabricației, producția, comercializarea, mentenanța, reciclarea produselor, luând în considerație restricțiile pe care acestea le generează. Ea implică participarea efectivă, de la primele faze de concepție, a specialiștilor de diferite profesii. Pe scurt, concepția colaborativă sau co-concepția produselor și a proceselor asociate se desfășoară atât în spațiu, prin organizarea de întâlniri între experții diferitelor profesii, cât și în timp, prin organizarea mai degrabă paralelă decât succesivă a activităților. În acest mod se pune, în prezent, problema dezvoltării de noi produse, iar abordarea integrată asigură scurtarea termenelor de concepție și lansare a produselor, creșterea calității acestora, concomitent cu reducerea costurilor de producție.

*Ciclul de viață al produsului holonic* (CVPH) integrează activități conform ciclului de viață al produsului (Drăghici, 1999), începând de la percepția necesității produsului și până la eliminarea sa, dar care se derulează ca o succesiune de faze distincte (holonic): concepția, fabricația, distribuția, utilizarea, mentenanța și eliminarea produsului. Deci, mentenanța nu este tratată ca inclusă în utilizare, ci separat (holonic) de exploatarea sau operarea produsului, putând însă fi operată integrat și simultan.

*Managementul mentenanței holonice* (MMH). Pentru definirea MMH, se va face apel la: relațiile de management holonic ale mentenanței și procesele de management holonic ale mentenanței.

- ☑ *Relațiile de management holonic ale mentenanței* sunt raporturile care se stabilesc între componentele unui departament de mentenanță, între departamentele de mentenanță ale mai multor întreprinderi (care reprezintă un sistem), cât și între acestea, pe de o parte, și componentele altui sistem, în contextul materializării actului de management holonic. Ca sistem, departamentul de mentenanță este considerat, în general, compus din următoarele subsisteme:
  - subsistemul tehnologic de mentenanță;
  - subsistemul organizatoric de mentenanță;
  - subsistemul informațional de mentenanță;
  - subsistemul decizional de mentenanță;
  - subsistemul de metode și tehnici de management ale mentenanței (pentru relațiile operatorilor de mentenanță).

- ☑ *Procesele de management holonic ale mentenanței* cuprind toate activitățile ce se desfășoară la nivel de sistem de mentenanță organizat holonic, care se materializează prin procese de lucru compuse din:
  - procesele de *mentenanța operativă*, prin care forța de muncă (operatorul de mentenanță) acționează nemijlocit asupra obiectelor de muncă sau ia contact direct cu obiectul specific de activitate al compartimentului de mentenanță;
  - procese de *management operativ în mentenanță*, prin care o parte a operatorilor de mentenanță acționează asupra celeilalte părți, în scopul direcționării spre un obiectiv de mentenanță comun.

În această concepție, MMH rezidă în studierea proceselor și relațiilor de management holistic ale mentenanței care au loc la nivel de organizație de mentenanță holistică, definindu-se următoarele noțiuni:

- ☑ *Organizația de mentenanță holistică* (OMH) este o holarhie externă (între compartimentele de mentenanță din cadrul firmelor, care pot fi distribuite geografic oriunde și în orice țară) sau o holarhie internă (în cadrul unei întreprinderi), care integrează totalitatea activităților de

interes pentru mentenanță. Fiecare compartiment de mentenanță reprezintă un holon, iar acești holoni cooperează între ei pentru creșterea performanței ciclului de viață al produsului mentenabil. Structura sistemelor de mentenanță holonice are la bază o ierarhie funcțională și repetabilă la toate nivelele, iar ca sistem informatic se propune un software de modelare grafică și metodologia orientată pe obiecte.

- ☑ *Sistemele mentenabile (SM)* sunt sisteme care pot beneficia de activități de mentenanță.
- ☑ *Conducerea operativă holonice (COH)* este acțiunea de mentenanță în urma căreia sistemul mentenabil are o evoluție în timp și spațiu, în condițiile unor constrângeri impuse.
- ☑ *Comanda holonice (CH)* este acțiunea prin care o funcțiune a sistemului mentenabil trece de la o valoare actuală la o valoare dată.
- ☑ *Globalizarea holonice (GH)* reprezintă răspândirea noutăților din domeniul industrial între diferite țări care contribuie la activitățile CVPH și adaptările manageriale, politice și chiar culturale care însoțesc această difuzare.

În cadrul prezentei teze, sistemul mentenabil este considerat ca o holarhie în care holonii sunt înzestrați cu autonomie (de exemplu, procesul de uzură a unui component din cadrul sistemului mentenabil), cooperativitate (de exemplu, informația de uzură "cooperează" cu starea componentului cu care interacționează fizic, respectiv oferă informații pentru caracterizarea stării globale a sistemului) și optimalitate (de exemplu, materialul din componența reperului monitorizat pentru uzură permite feedback către concepția și proiectarea lui, în sensul că oferă posibilitatea de a se stabili tratamentul termic optim care asigură rezistența la uzură).

Referitor la LSHM, aceasta se compune din legi comportamentale de natură mecanică, fizică, electrică, economică etc. sau de natură convențională, concretizate prin reguli de mentenanță manageriale provenite din concepția internă a managementului mentenanței integrate sau provenite din reglementări externe (de exemplu reglementările din domeniul nuclear).

Întreaga concepție holarhică a mentenanței integrate este orientată spre atingerea obiectivului fundamental, și anume managementul ciclului de viață al produsului, care are ca țintă o cât mai bună adaptabilitate a produsului la actualul mediu concurențial, în condițiile sporirii siguranței de funcționare.

În ceea ce privește mentenanța integrată în CVPH, aceasta se bazează pe adaptabilitate, care la rândul ei se bazează pe:

- a) management prin modelare holarhic atributivă, caracterizată de faptul că acordarea la exigențele și evoluțiile mediului are ca acțiune inițială evaluarea valorilor curente ale atributelor ce caracterizează performanța în operare a holarhiei, iar ca acțiune finală modificarea în consecință a LSHM, ținta fiind atingerea, în condițiile date, a nivelului maxim posibil în mentenanța pentru performanță în ciclu continuu de concepție și realizare a produsului ca holon superior, din perspectiva CVPH;
- b) perfecționare în timp real și on-line nesupervizată, ale cărei rezultate sunt utilizate pentru susținerea conducerii holarhic atributive, astfel încât să se asigure autonomia holonice a sistemului mentenabil, în ansamblul ei, iar de aici, capacitatea acesteia de a se integra în structuri holonice superioare, din perspectiva CVPH.

Managementul holistic al mentenanței (fig. 3.7) poate fi considerat ca un sistem multi-agent cu grade diferite de comunicare, coordonare și colaborare, incluzând și co-deciziile de actori pentru realizarea unor obiective comune.

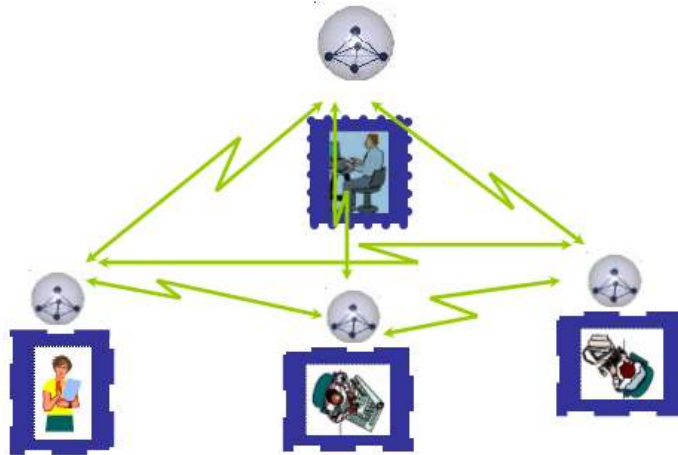


Fig. 3.7. Arhitectura pentru managementul holistic al mentenanței

Obiectivul principal operațional este de a obține mai multe organizații holonice, condiție necesară pentru viabilitate și durabilitate (în sensul dat de Koestler). Rezultă astfel un *sistem holonic multi-agent în mentenanță (SHMAM)*, dedicat pentru proceduri de mentenanță operativă, care implică  $n$  actori pentru  $p$  întreprinderi producătoare de echipamente mentenabile.

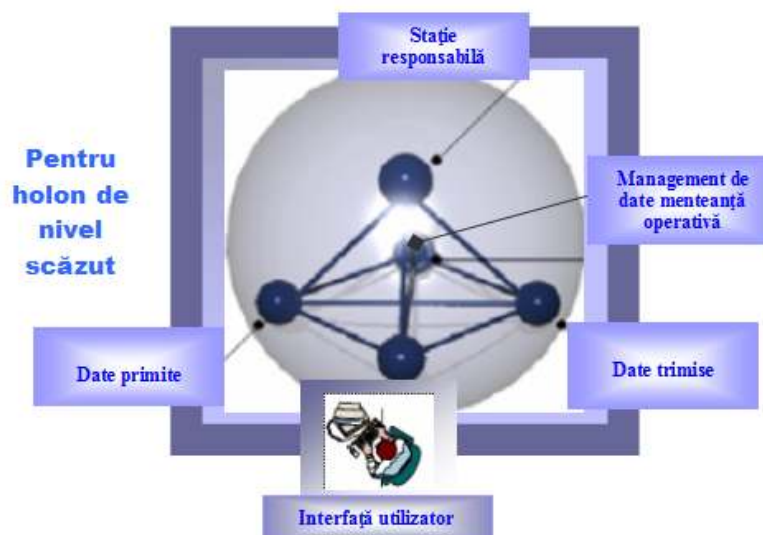


Fig. 3.8. Arhitectura unui holon

Procedura de cooperare în cadrul managementului holistic de mentenanță este conform figurii 3.8, unde s-au reprezentat modalitățile de cooperare ale unui holon de mentenanță operativă de nivel scăzut. Ea se adresează unei structuri ierarhice (fig. 3.9) de actori numiți agenți, care corespund realizării unor roluri specifice poziției responsabile pe care o au potrivit principiului holistic.

Este clar că integrarea la toate nivelurile ale holonului în cadrul structurii holonice se face informatizat și computerizat. Prin feedback-ul care îl primește, un holon trebuie să fie adaptat rapid la o evoluție continuă, în sensul de sporire a performanței în mentenanță.

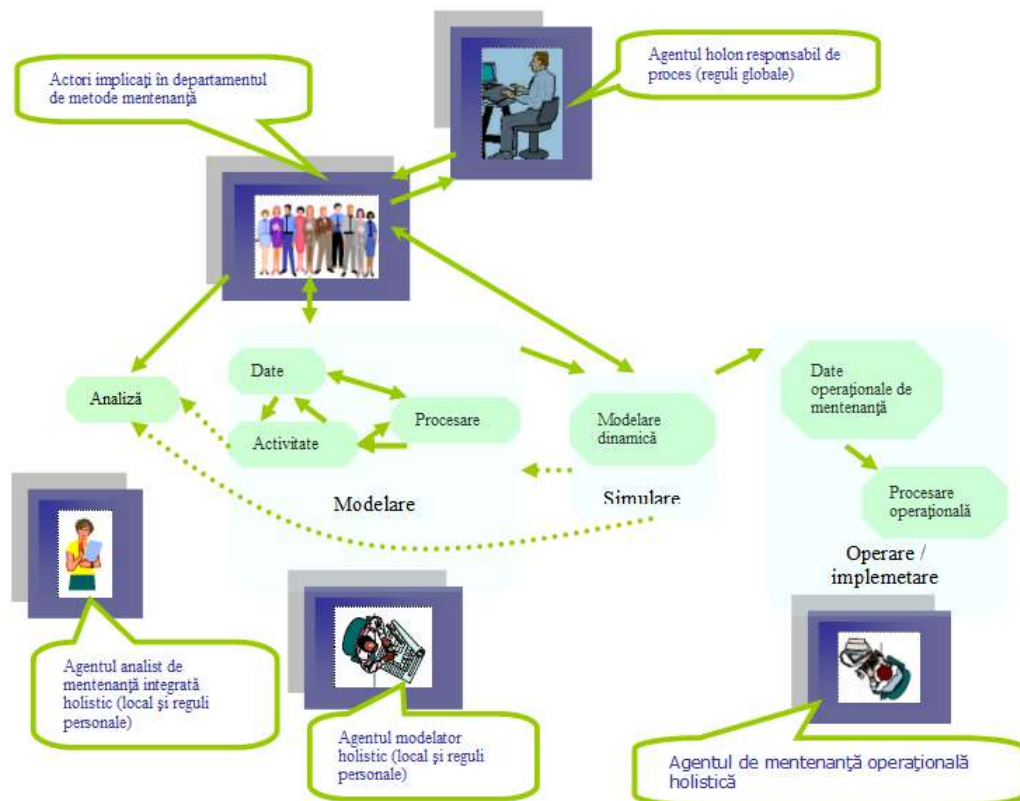


Fig. 3.9. Fazele metodei propuse de mentenanță holistică integrată (sistemul de mentenanță holonic multi-agent)

Pentru implementarea metodologiei holistice care conduce la modelul holonic pentru mentenanță integrată se propune software-ul de programare grafică NI Developer Suite, produs de National Instrument, USA, împreună cu toate pachetele (DSC, LabVIEW Real Time, Vibration Toolkit etc.) și varianta integrală SolidWorks. LabVIEW are avantajul existenței funcțiilor de programare necesare conducerii, analizei, modelării și proiectării de mentenanță operativă, cât și a funcțiilor de monitorizare, achiziției date și reglare a parametrilor de proces în cadrul întreprinderilor de tip proces, cum sunt cele nucleare. De asemenea, LabVIEW se integrează cu software baze de date și cu SolidWorks, pentru simulări și validări de mentenanță operativ-conceptuală.

### 3.4. Controlul proceselor în sistemul holonic de mentenanță

Mentenanța holonică se referă la o abordare modulară de conducere și operare a proceselor de mentenanță, caracterizată prin proprietăți de autonomie și cooperare.

În continuare se examinează mentenanța holonică operativă în contextul particular al întreprinderilor nucleare, cu procese de producție continue. Principalele obiective ale acestui demers sunt:

- ☑ Stabilirea concepției de *mentenanță integrată computerizată* (MIC) și utilizarea acesteia pentru a introduce funcții raționale principale în mentenanța holonică propusă;
- ☑ Demonstrarea cadrului de unificare pentru problemele de diagnoză și control la toate nivelele de mentenanță care pot fi utilizate în modelul de mentenanță holonic;
- ☑ Ilustrarea aceste abordări de control și diagnoză în contextul aplicării la o instalație de detritiere nucleară existentă la ICSI Rm. Vâlcea;
- ☑ Prezentarea unui plan de cercetare de mentenanță asociat cu sistemele de mentenanță holonice.

În contextul principiului holonic general, impactul tehnologiilor holonice a sistemelor de mentenanță va fi un subiect important de discuție în viitor. Influența asupra metodologiei propuse o au următoarele rezultate: agenții autonomi (Bussmann, 1994), (Szcerbicki, 1993), sistemele de comunicație distribuite (Tannenbaum, 1994), (Smith, 1980), controlul descentralizat, programarea orientată pe obiect (Betlem, 1994) și modele bazate pe diagnoză (Isermann, 1984), (Patton, 1989).

Arhitectura holonică a fost sugerată ca o posibilă bază pentru sistemele mentenabile ale viitorului. Termenul "mentenanță holonică integrată" implică o unitate în mentenanță care demonstrează caracteristicile duale de comportare: autonomă (când este cerută) și de abilitate de funcție cooperativă (când situația o cere), integrată în CVPH și continuu îmbunătățită prin control.

Scopul cercetării este dezvoltarea unei metodologii pentru diagnoza sistemelor nucleare complexe, prin mentenanță ca sistem holonic, în care defectările și problemele sunt analizate, modelate și propuse pentru implementare ca funcții standard ale sistemelor mentenabile.

### 3.4.1. Concepte de bază

În această secțiune se vor introduce câteva concepte de bază în probleme de diagnoză pentru mentenanță, care vor fi încorporate în demersul propus pentru mentenanța bazată pe risc, pe condiții și logică fuzzy.

Arhitectura propusă pentru structura unui holon de mentenanță (pentru simplificarea "structură holon") (fig. 3.10) constă din următoarele componente, care sunt integral autonome și cu comportare colaborativă:

- ☑ *Holon de procesare*, responsabil pentru execuția de algoritmi (de exemplu: control, planificare de mentenanță), modelare auxiliară și cerere de calcule subsidiare, specificate de o stare (o hartă) de funcții ale holonului de mentenanță;
- ☑ *Holon de negociere*, fundamental la operarea oricărui holon, care implementează attribute cheie de cooperare prin negociere. Fiecare holon are un scop global, iar pentru fiecare holon, prin tehnica optimizării negociată și distributivă, sunt determinate scopuri locale;
- ☑ *Holon de planificare/programare*, responsabil pentru activități asociate cu operarea sistemelor holonice în scop global, dat de parametrii de operare specificați pentru sistemul mentenabil considerat;

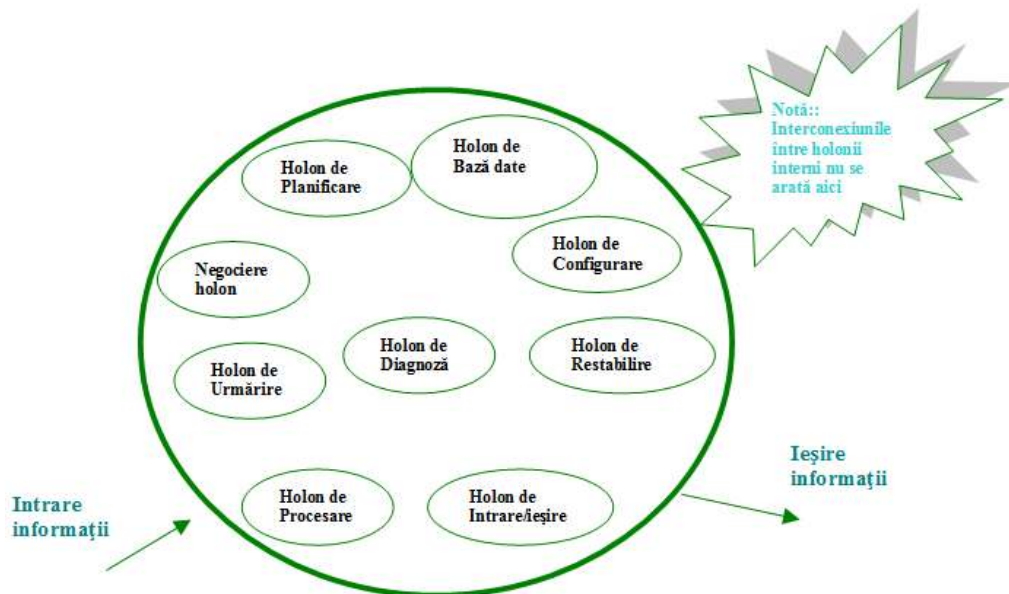


Fig. 3.10. Structura holonului general de mentenanță

- ☑ *Holon bază de date*, responsabil pentru tot istoricul de date și/sau informații realizat. Această informație poate fi apoi accesată pentru utilizare, reglaje, negociere, programare mentenanță operativă, monitorizarea condiției sau pentru orice informație care necesită date de istoric; în cadrul acestui holon va exista și baza de reguli necesară sistemului expert pentru mentenanță, propus în prezenta teză;
- ☑ *Holon de diagnostică*, component al sistemului holonic ce realizează o monitorizare a defectărilor și diagnozei pentru controlul holonului;
- ☑ *Holon de configurare*, realizează reconfigurarea cerută de sistem. El detectează adăugarea sau ștergerea de holoni sau obiective și adaugă intrări sau ieșiri, respectiv cod corespunzător;
- ☑ *Holon de restabilire*, furnizează performanța componentului și procesează managementul defectării;
- ☑ *Holon de intrare/ieșire*, fundamental pentru trecerea datelor sau informației în și afară din fiecare holon;
- ☑ *Holonul de urmărire*, responsabil pentru sincronizarea tuturor operațiilor secvențiale pentru holonul de bază.

Diagnoza unui echipament este descrisă, în general, prin trei etape: detecția, analiza și indicarea cauzei rădăcină.

Un model de diagnostică tradițională (Finch, 1990) și unul holonic sunt reprezentate în figura 3.11.

Modelul tradițional nu este aplicabil sistemelor holonice, pentru că există diferențe cheie, și anume: distribuirea sarcinilor și conceptul de ierarhie, iar PC-ul este programat să colecteze date, să detecteze probleme, fiecare holon fiind responsabil pentru informațiile de diagnostică.

Scopul principal este de a ști procedura de cunoaștere la fiecare nivel de holon, având în vedere că această cunoaștere este de două feluri:



- ☑ proces specific, care se referă la comportarea mentenanței particulare pentru configurarea sistemului;
- ☑ echipament specific, care se referă la caracteristicile particulare ale holonilor de mentenanță.

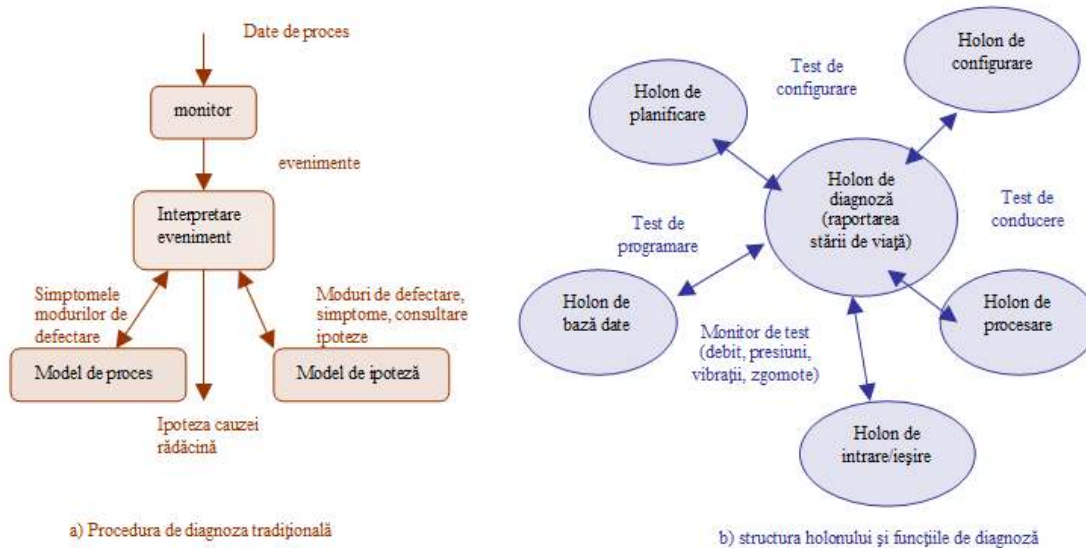


Fig. 3.11. Procedura de diagnoză tradițională și holonică

În figura 3.11 se observă că structura generică a holonului din figura 3.10 se interpretează din perspectiva mentenanței de diagnoză. Procesul holonic începe de la holonul de diagnoză, care va furniza date la holonul bază de date. Holonul bază de date negociază apoi cu holonii de planificare, proces, configurare și diagnoză (dacă holonii lor de diagnoză pot fi aplicabili), pentru stabilirea parametrilor de conducere a diagnozei de mentenanță. Odată ce acesta este complet, rezultatul diagnosticului este conectat la baza de date, care trimite starea diagnosticului la holonul de intrare/ieșire.

Pentru a ilustra cel mai bine această metodă, se va considera ca exemplificare o posibilă aplicare la instalația de detritiere nucleară de la ICSI Rm. Vâlcea, pentru procesul de răcire din coldbox-ul de hidrogen, de exemplu prin controlul unui ventil de laminare a deuteriului pentru obținerea temperaturilor criogenice avansate. În interiorul coldbox-ului, circuitul primar al deuteriului continuă pe următorul traseu: schimbător de căldură, unde este răcit până la 128,4°K de către hidrogenul epuizat, de la o coloană criogenică, apoi trece în alt schimbător din baia de azot lichid, unde se răcește până la cca. 70°K; în continuare este răcit într-un alt schimbător de căldură, apoi suferă o detentă într-un ventil de laminare, atingându-se temperatura de 25°K, fiind astfel lichefiat, după care se alimentează coloana de distilare criogenică și fierbătorul din blazul coloanei.

Pentru acest circuit important al instalației de separare criogenică, holonul de diagnoză va determina ceea ce va fi cerut pentru test pentru holonul de intrare/ieșire la monitorizarea debitului și poziției ventilului de laminare, care este scopul oricărei configurații și cerințe de programare a holonului responsabil. Holonul de proces conduce testul și trimite date către holonul bază de date, care permite compararea de date colectate cu modelul valvei de laminare (curba

caracteristică de debit). Acest holon va trebui să retrimite rezultatul comparării la holonul de diagnoză, care va trebui să ia decizia de a furniza viitoarea informație cerută de diagnoză și, astfel, va face un raport pentru starea de funcționare și de viață a coloanei de distilare echipată cu umplutură specială, în care deuteriul gaz circulează în contracurent cu deuteriul lichid.

Dacă starea va fi de defectare determinată, holonul de diagnoză va trebui să stabilească posibila cauză rădăcină (de exemplu, valva este blocată) din referința existentă în holonul bază date.

Notăția adoptată pentru descrierea holonilor la diferite funcții și nivele este:  $H(i,j,k,f(*))$  = nivelul  $i$ , numărul holonului  $j$ , legat la holonul părinte  $k$  (la nivelul  $i+1$ ), realizând funcția  $f(*)$ .

Ordinea funcțiilor holonice:

- $f(1)$  – holonul de procesare,
- $f(2)$  – holonul de negociere,
- $f(3)$  – holonul de programare,
- $f(4)$  – holonul bază de date,
- $f(5)$  – holonul de diagnoză,
- $f(6)$  – holonul de configurare,
- $f(7)$  – holonul de restabilire,
- $f(8)$  – holonul de intrare/ieșire,
- $f(9)$  – holonul de urmărire.

De exemplu, holonul de diagnostic, care formează o componentă a holonului coldbox hidrogen, poate fi notat  $H(3,1,2,f(5))$  și va indica nivelul 3, cu holonul numărul 1, fiind doar un holon de diagnoză  $f(5)$  conectat la holonul părinte, holonul coldbox 2.

### 3.4.2. Detecția

Detecția implică un semnal detectat, dar nu și urmărirea problemei în sistemul holonic. Metoda propusă pentru mediul holonic de mentenanță este utilizarea stării de viață indicată de fiecare holon pentru operare normală sau probleme potențiale. Starea de viață este rezultatul detecției locale a defectării în interiorul holonului, care poate fi rezolvată cu o varietate de instrumente sau analitic, cu redundanță tehnică (Isermann, 1984), (Patton, 1989).

Toți holonii calculează starea de viață. Starea de viață este o valoare indicată de 0 sau 1, unde 1 indică nedectare (sistem nou), în timp ce 0 indică indisponibilitatea pentru operare. O alternativă de abordare privind starea de viață a unui component privește trei stări: viață, moarte și nedeterminare. A treia stare este desemnată dacă sistemul de diagnostic este insuficient de abil să decidă starea de viață sau de defectare a sistemului.

Când starea de funcționare sau de defectare este detectată, semnalul este colectat de fiecare participant la diagnoză. Analiza care se va face este condusă de holonul cu cel mai înalt rang conectat la orice alarmă, egalizare sau funcție de programare pentru mentenanță. De exemplu, defectarea vanei de laminare pentru coldbox va fi menținută la un nivel local dacă nu pune în pericol operarea instalației de detritiere nucleare.

Un cod de semnal este dezvoltat de la două tipuri de interholoni de comunicare:

- Informație nesolicitată* – fiecare holon vecin continuă să furnizeze holonului de diagnostic starea de viață, ca rezultat (fig. 3.12);

- ☑ *Informație interogată* – holonul de diagnoză compilează informația de viață (funcționare) într-un singur nivel de cod, de exemplu (1,0,1,...), unde intrările sunt în aceeași ordine (fig. 3.13) ca a funcțiilor descrise anterior.

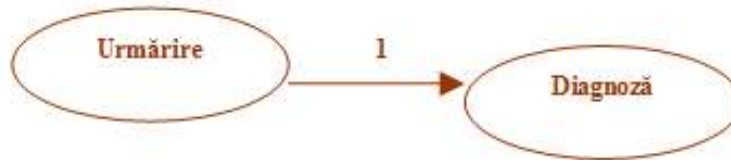


Fig. 3.12. Informație nesolicitată de funcționare

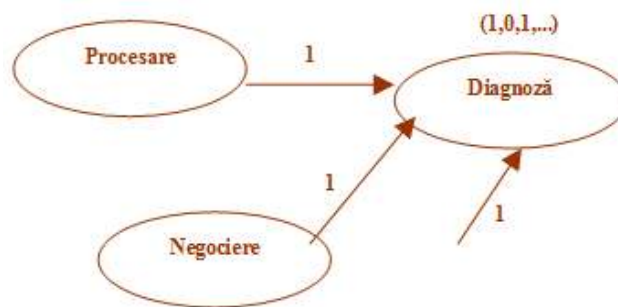


Fig. 3.13. Formarea codului de viață (de stare). Structura holonului

Un cod de viață (sau stare) ca (1,1,1,1,1...) indică siguranță în funcționare.

Între nivele, starea de viață se dezvoltă prin cerința de a identifica defectele particulare (fig. 3.14).

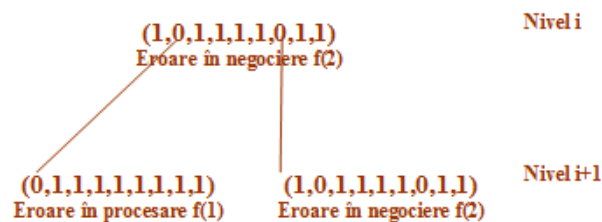


Fig. 3.14. Două nivele pentru codul de viață (stare)

În scopul dezvoltării metodologiei de mentenanță integrată în mediul holonic, vor fi specificate un set de principii pentru sistemul de coduri prezentate anterior:

- ☑ *Holonul de diagnoză*  $H(i+1,1,j,f(5))$  poate accepta starea cerută de la holonul de diagnoză superior  $H(i,1,k,f(5))$ , care va răspunde de starea de viață a holonului  $H(i,*,j,f(1 \text{ sau } 8))$  și care în cele mai multe cazuri va fi oricare holon de procesare sau holon de intrare/ieșire;
- ☑ *Holonul de diagnoză*  $H(i+1,1,j,f(5))$  poate interoga oricare din holonii de nivel  $H(i+1,*,f(5))$ , prin funcțiile lor de diagnoză, pentru informația

- de diagnoză în profunzime, în ordinea dezvoltării stării de viață apropiate;
- ☑ *Holonul de diagnoză*  $H(i+1,1,j,f(5))$  poate accepta mesaje nesolicitate, de la oricare nivele egale de holoni  $H(i,*,j,f(*))$ , detaliind starea lor de viață;
  - ☑ *Holonul de diagnostic*  $H(i+1,1,j,f(5))$  este responsabil pentru diagnoză și monitorizări de performanțe ale tuturor componentelor de holon  $H(i,*,j,f(1))$  sau holon  $H(i,*,j,f(8))$ ;
  - ☑ *Orice holon de diagnoză*  $H(i+1,1,j,f(5))$  va trimite mesaje de raportare a stării de viață la holonul de diagnostic superior  $H(i,j,k,f(5))$ , poziție în care mesajul poate fi prezentat pentru răspunsul apropiat (de exemplu: alarmă, compensare sau programare mentenanță);
  - ☑ *Starea holonului* va fi raportată fiecăruia ca stare de siguranță (1) sau nesiguranță (0), cu însoțirea codului de viață a fiecărui holon egal.

### 3.4.3. Diagnoza holonică de mentenanță

În această secțiune se va prezenta problema diagnozei pentru sistemele holonice mentenabile, atunci când detecția se realizează folosind procesul descris anterior.

Diagnoza în sistemul holonic descrie operațiile dedicate holonului de diagnoză, interpretând codul de stare furnizat, comparând codul, cu toate stocările de date în holonul bază de date și interogând holonii vecini pentru viitoarea informație cerută unic, determinată pentru a localiza defectul. Holonul de diagnoză este, de asemenea, responsabil pentru setarea stării de viață a holonului de nivel superior și furnizează informații de diagnostic, ca cerință de la nivelele superioare.

În continuare se prezintă o posibilă metodologie pentru tratarea defectului rezultat în nivelul de jos al componentului.

Se presupune că holonul a detectat o anomalie în comportare. Apar trei cazuri de diagnosticare a condiției de defect:

- ☑ un component al holonului de detecție;
- ☑ un subholon a holonului de detecție;
- ☑ o intrare a holonului de detecție.

În practică este nerealistic, pentru cost și configurare, ca holonul de detecție să aibă un număr mai mare decât suficient de senzori care să permită să izoleze condiția defectării la un singur candidat (component, subholon sau semnal de intrare).

Pentru demersul propus (fig. 3.15) se admit următoarele modele de cunoaștere pentru mentenanța operativă:

- ☑ Defectările caracteristice sau modurile de defectare (de exemplu: blocarea la deschiderea valvei, blocarea la închiderea valvei, care este comandată electric). Aceste informații vor fi specificate a priori și această cantitate de cunoștințe va fi moștenită de la clasa holonului generic;

- ☑ Contextul structural al holonului curent. Dacă se știe cum este conectat fizic un holon la alți holoni și dacă există un mecanism de predicție a comportării sistemului holonic, holonii siguri se pot implica dinamic sau dezvinovați.

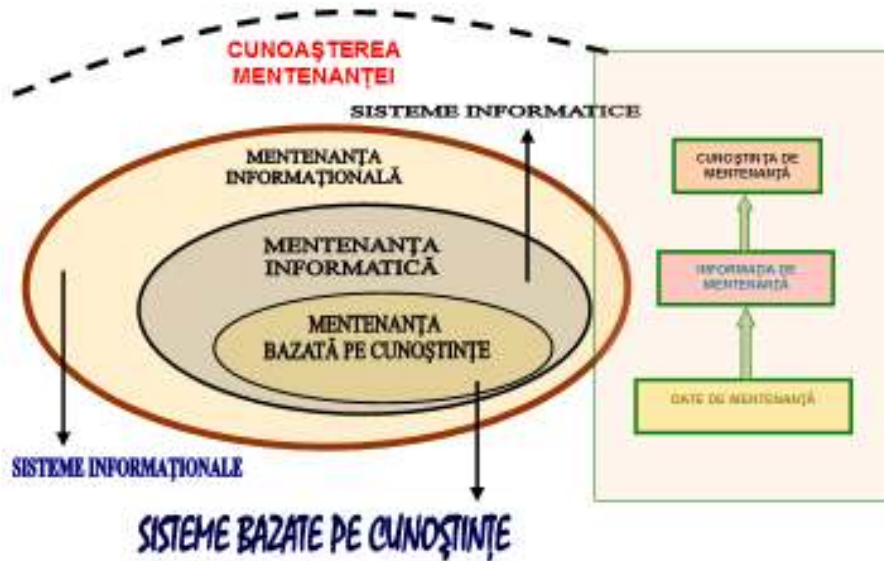


Fig. 3.15. Integrarea sistemelor informatice de mentenanță

Aceste două tipuri de informații cuprind informația care va fi adresată automat în specificația standard a sistemului holonic, descrisă în (McFarlane, 1995) și (Agre, 1994).

Problemele care pot apare în operare pot fi derivate din următoarele posibilități:

- ☑ Operare manuală de cunoaștere a erorilor procesului tehnologic la codul defectării;
- ☑ În timpul simulării și învățării codului caracteristic de eroare;
- ☑ Erorii „walk through” a procesului actual.

Aceste trei tipuri de informații pentru mentenanță pot fi utilizate la dezvoltarea codului asociat candidat și a problemelor pe care le include. Următoarea etapă este problema detecției la extragerea codului corect de defectare de la baza de date și înlăturarea posibilelor ambiguități.

Comunicarea stării de alarmă diagnosticată, a mentenanței și programării operațiilor etc. va depinde de nivelul holonului în structura holonică. La holonii de nivel inferior, diagnoza va fi transmisă la alți holoni de nivel superior, în scopul de a se determina locația exactă a defectărilor și a se determina compensarea apropiată sau acțiunile de reparație.

Condițiile de alarmă sunt generate de următoarele:

a) Nesolicitare – detectare locală a defectării care folosește standardul schemei de detecție a defectărilor, care sunt comunicate funcție de compararea condițiilor stării de viață cu limitele pragului. Acest demers este logic convențional la generarea condițiilor de alarmare și include: detecția disponibilității de resurse (fluid, electricitate etc.), detecția instrumentului defect, detecția condițiilor de operare anormale. Aceste condiții de defectare sunt, de obicei, asociate cu senzorii hardware standard, care sunt concepuți și proiectați să detecteze defectele de alimentare, instrumente sau componente.

b) Interogare – rezultat al interpretării codului de diagnostic, care desemnează starea de viață la sarcinile particulare. Acesta poate fi rezultatul interpretării informației de diagnostic.

Răspunsul sistemului de diagnoză este un exercițiu de luare a deciziei bazat pe grade de gravitate a condiției defectării, putând fi inițiale următoarele acțiuni din tabelul 3.1.

Tabelul 3.1. Răspunsuri ale holonului de diagnoză

Acțiune	Descriere
Degradarea performanței	Determină dacă sarcina poate conduce pe orice cale la o degradare a capacității
Reorganizare operații	Renegociază sarcina cu holonii apropiați, bazat pe noua valoare a stării de viață
Operare oprită	Defectul este acela că sarcina nu poate fi finalizată. Holonul raportează el însuși că nu mai poate continua și pasează controlul pentru alți holoni participanți, să rezolve prin negociere.
Corectarea programării mentenanței	Trimite noua stare de viață la holonul mentenanță și renegociază contractul de mentenanță. Aceasta determină, spre exemplu, momentul când componentele cer întreținere.
Diagnoza detaliată	Ca parte a negocierii contractului de mentenanță este de dorit testarea analizei codului, unde semnalul testat sau semnalul calibrat este trimis la instrumentul de reglare să determine caracteristica de operare a instrumentului.
Reconfigurarea sistemului	Permite operarea sistemului; aceasta poate implica reconfigurarea componentei hardware și software și utilizarea holonului redundant.
Teste de evaluare a performanței mentenanței on-line și în timp real	Poate implica perturbarea ieșirii controlului față de valorile cunoscute și măsurarea ieșirii, construind o tablă de rezultate care pot fi folosite să reordecizeze modelul, să determine condițiile de defectare ori condițiile de degradare.

### 3.5. Diagnoza holonică aplicată la sistemul criogenic nuclear

Metodologia de diagnoză holonică pentru mentenanță este aplicată la instalația de detritiere nucleară din cadrul ICSI Rm. Vâlcea. În realitate, funcția de diagnostic nu poate fi operată ca entitate izolată, dar, pentru simplitate, nu sunt luate în considerare mai multe funcții de operare.

#### 3.5.1. Instalația de detritiere nucleară

Instalația de detritiere nucleară (IDN) de interes național de la ICSI Rm. Vâlcea (fig. 3.16) dezvoltă două activități: procesarea apei grele și procesarea tritiului radioactiv.

Apa grea tritiată rezultă de la reactoarele tip CANDU existente la CNE PROD & CNE INVEST Cernavodă.

ICSI proiectează și patentează o tehnologie bazată pe schimbul izotopic catalitic și distilarea criogenică a hidrogenului și izotopilor lui.

Instalația se compune din mai multe module:

- ☑ Modulul de schimb izotopic (MSI);
- ☑ Modulul de purificare (MP);
- ☑ Modulul de distilare (MDC);
- ☑ Modulul de evacuare efluenți radioactivi (MEER).



Fig. 3.16. Instalația de detritiere nucleară de la ICSI Rm. Vâlcea

În cea mai mare parte, tritiul este produs ca urmare a activităților nucleare prin care se obține energia electrică. Din cauza proprietăților radioactive, tritiul este deosebit de nociv pentru mediul înconjurător și, implicit, pentru organismele vii.

Pe lângă proprietățile lui nocive, tritiul poate aduce imense beneficii omului dacă este folosit în scopuri pașnice. Astfel, prin reacția de fuziune între nucleul atomului de deuteriu și nucleul atomului de tritiu se eliberează o mare cantitate de energie. Această reacție de fuziune va fi sursa de energie a viitorului.

Este bine cunoscut faptul că, prin centrala nuclear-electrică de la Cernavodă, România este cea mai mare sursă de tritiu din Europa și printre cele mai importante din lume.

Concentrațiile de tritiu în moderatorul unui reactor CANDU au valori prea ridicate pentru a putea fi refolosit sau stocat inventarul de apă grea tritiată.

Costul stocării de lungă durată, pentru a permite dezintegrarea naturală a tritiului, va fi extrem de ridicat, astfel încât existența unei facilități de îndepărtare a tritiului este oportună în reducerea impactului radiologic global al centralei. Costurile de mentenanță vor fi reduse prin reducerea dozelor de operare pentru personalul expus profesional și pentru populație. O alternativă la această procesare a tritiului ar fi înlocuirea inventarului de apă grea al reactorului, care reprezintă un cost extrem de ridicat.

Iată de ce existența unei tehnologii de detritiere, cum este cea de la ICSI Rm. Vâlcea, pentru apa grea tritiată de la reactoarele CANDU sau producerea de tritiu pentru reactorul de tip ITER, care utilizează produsele acestei instalații, este extrem de importantă.

În continuare se va face o scurtă descriere a fazelor tehnologiei de proces din IDN, care constă, în principal, din schimbul catalitic în fază lichidă, cuplată cu

distilarea criogenică (LPCE-CD). Procesul tehnologic (fig. 3.17) cuprinde următoarele faze:

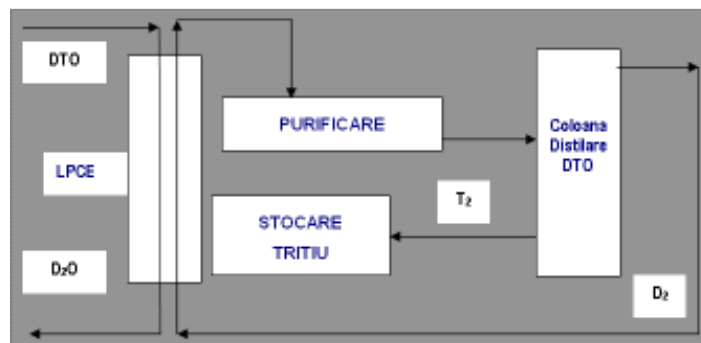


Fig. 3.17. Procesul tehnologic din IDN

- ☑ *Schimb izotopic (SI)*, în care se transferă tritiul din faza lichidă (apa grea tritiată) în fază gazoasă (deuteriu). Procesul de transfer al tritiului din apă în gaz are în vedere schimbul catalitic în faza lichidă (LPCE - *Liquid Phase Catalytic Exchange*). Această metodă folosește catalizatori specifici (hidrofobi) care permit contactul direct între apa lichidă și deuteriul gaz, pentru a efectua schimbul izotopic. Procesul LPCE permite schimbul catalitic la temperatura și presiunile camerei, ceea ce

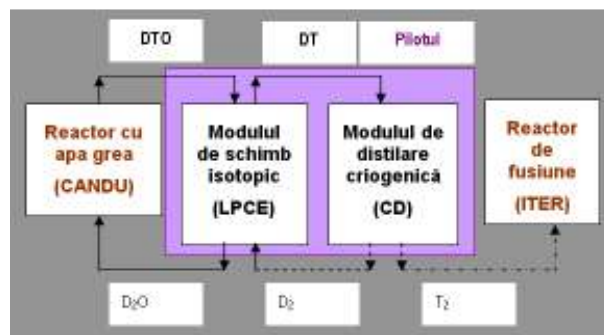
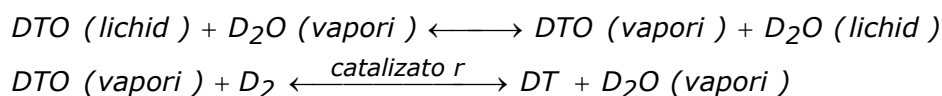


Fig. 3.18. Utilizarea IDN pentru cele două tipuri de reactoare

elimină necesitatea unor evaporatori și condensatori. Apa tritiată este alimentată prin partea superioară a coloanei catalitice și coboară în contracurent cu  $D_2$  gaz. Transferul de tritiu apare de la lichid la gaz până ce se satisface echilibrul izotopic natural. În coloana de schimb sunt implicate două reacții:



- ☑ *Purificare (P)*, în care deuteriul este ars într-un reactor catalitic pentru eliminarea oxigenului conținut, după care are loc o uscare avansată pe site moleculare. Această operație este necesară pentru a nu introduce



În distilarea criogenică, odată cu deuteriul tritiat, alte impurități care s-ar putea solidifica la temperaturi criogenice.

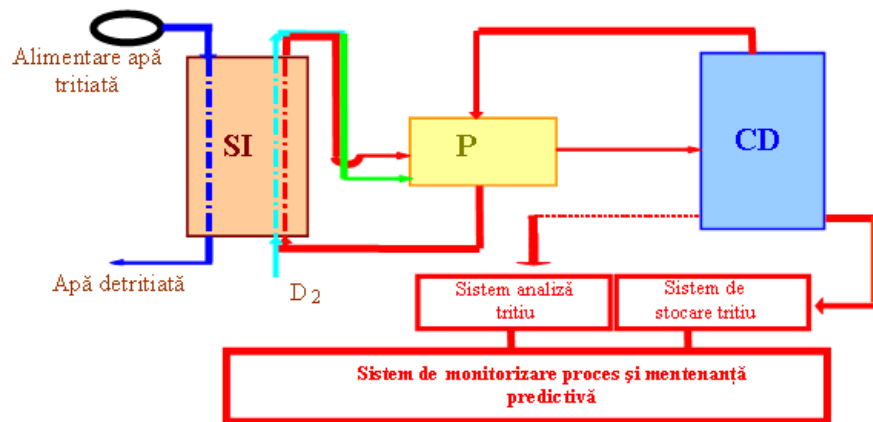


Fig. 3.19. Tehnologia de proces, simplificată a IDN

- ☑ *Distilare criogenică (DC)*, în care are loc separarea izotopilor de hidrogen (D, T) prin distilare criogenică, obținându-se tritium concentrat și deuteriu. Amestecul tritium-deuteriu obținut în blazul coloanei de distilare criogenică este stocat, iar deuteriul este reintrodus în circuit la modulul de schimb izotopic. Punctele de fierbere, destul de diferite ale speciilor izotopice ale hidrogenului, determină ca distilarea hidrogenului lichid să stea în centrul atenției, dat fiind factorii de separare înalți pe care-i oferă. Tehnologia este cunoscută și, deși necesită costuri mari pentru criogenie, este considerată ca cel mai bun proces "clasic" de îmbogățire a tritiului. Unitatea criogenică conține una sau mai multe coloane de distilare în zona unde tritiul este concentrat (în coloana finală) la 99%  $T_2$  gaz. Coloanele criogenice operează la aproximativ 20K. Refrigerarea necesară pentru a menține această temperatură este asigurată printr-o unitate de refrigerare, care folosește ca fluid de lucru hidrogenul. Este necesară o izolare termică excepțională pentru a menține un vid ridicat  $10^{-3}$  Pa sau mai bun.
- ☑ *Stocare tritium gaz*, unde tritiul gaz rezultat este îmbuteliat în stocatoare speciale (gettere), sub formă de deuterio-tritiură de titan.

### 3.5.2. Sistemul holonic pentru controlul coldbox-ului de hidrogen

Arhitectura propusă cuprinde holarhia holonilor care negociază fiecare la realizarea obiectivelor de performanță a sarcinii cerute.

Negocierea este distribuită de managementul de sarcini și realizarea de obiective locale pentru fiecare holon.

Potrivit concepției holonice asupra sistemelor, două sau mai multe sisteme autonome pot fi integrate (cu criterii și obiective precise), putându-se obține astfel un sistem holonic. Sistemul holonic de mentenanță permite optimizarea pe

două planuri (real și conceptual), atât pe sisteme componente cât și pe ansamblul sistemului integrator, devenit sistem de referință.

Conceptul holonic propus, al sistemului integrat de control pentru instalația criogenică (fig. 3.20), se bazează pe două proprietăți: autonomie pentru sistemul de monitorizare proces și sistemul de monitorizare mentenanță predictivă și integrarea informațională (prin cooperare), ca pentru doi holoni, într-o holarhie.

Informațiile celor doi holoni vor fi necesare pentru holonul de decizie de nivel superior (holon de control central).

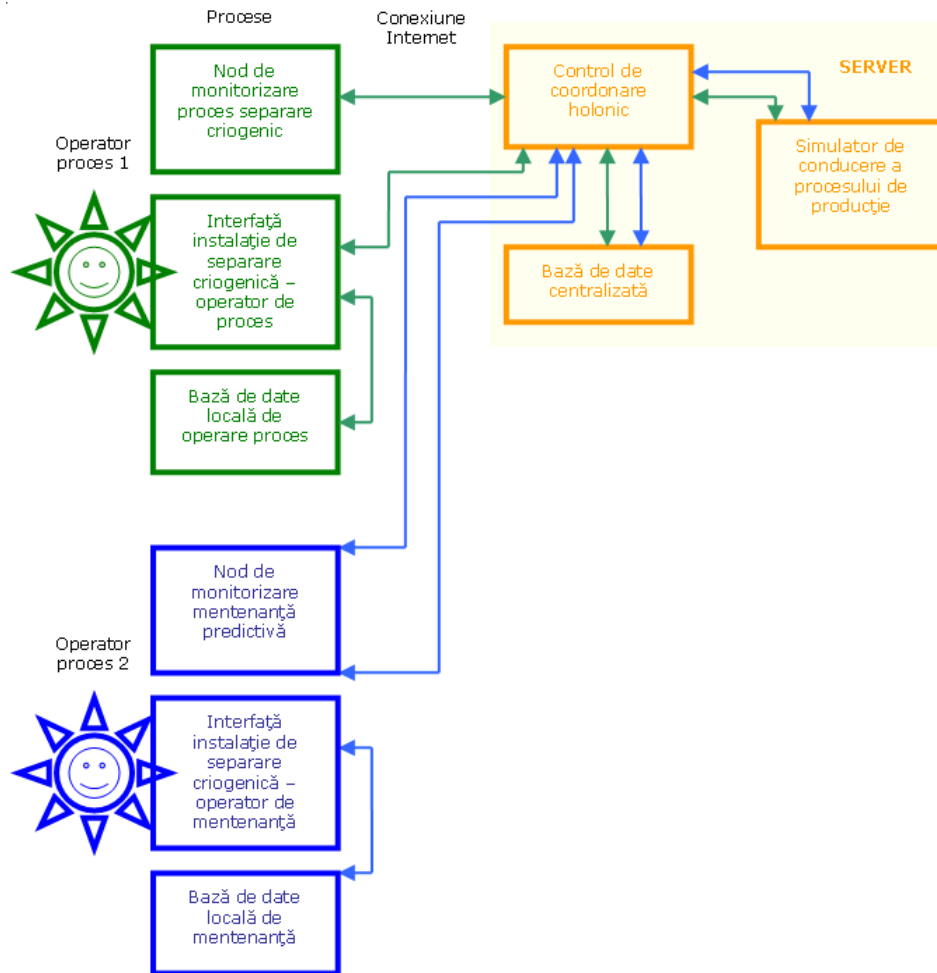


Fig. 3.20. Conceptul holonic propus pentru sistemul integrat de control al instalației criogenice

Sistemul de coordonare holonic (fig. 3.21) de monitorizare proces (parametri fizici de proces: temperatură, debit, presiune) și sistemul holonic de monitorizare mentenanță predictivă (vibrații, zgomot, cavitație, uzură) joacă un rol important în protecția mediului și dezvoltarea durabilă, prin noi tehnologii de reducere a riscului de accidente în cazul procesării tritiului la instalațiile nucleare.

*Sistemul de monitorizare proces (SMP)* se realizează cu un modul Compact FieldPoint și software LabVIEW, care include o parte grafică de control pentru toate componentele monitorizate on-line, așa cum este arătat în figura 3.21, pentru instalația de separare criogenică.

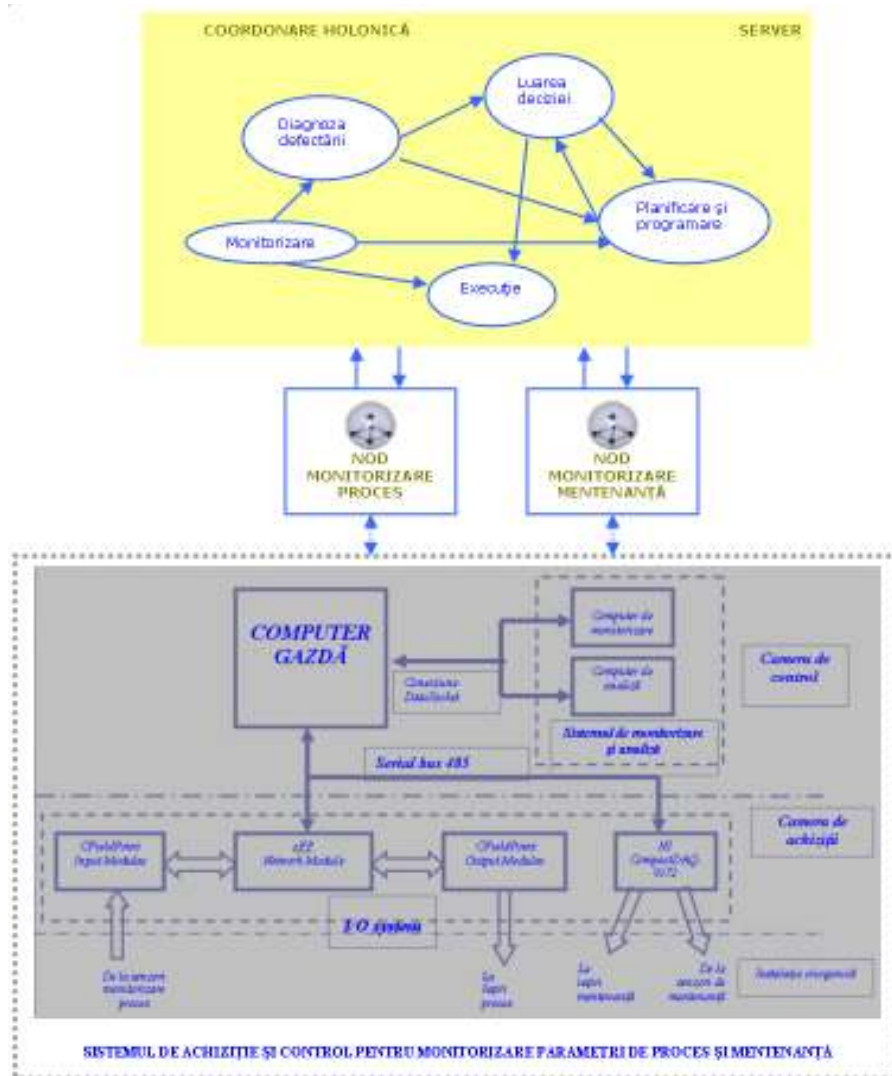


Fig. 3.21. Structura de coordonare a sistemului holonic propus la IDN

SMP este orientat spre urmărirea inventarului de tritium din IDN, inventar localizat în două zone:

- ☑ ca inventar mobil:
  - în LPCE, ca apă DTO, vapori DTO și gaz DT, deoarece sistemul de purificare poate fi considerat ca o extensie a LPCE, tritium în fază gazoasă, inclus în LPCE;
  - în CD, tritium în fază gazoasă (DT și  $T_2$ ), cea mai mare parte fiind în fază de lichefiere la 25K.
- ☑ ca inventar staționar, în stocatorul de tritium, reprezentat de gettere de tritium în coloana CD.

În scopul îmbunătățirii sistemului de operare și monitorizare a IDN de separare a tritiului și deuteriului, a fost realizat un sistem de achiziție de date și de conducere a procesului printr-un calculator de proces care are în componență următoarele echipamente:

- ☑ Multiplexor, pentru semnalele provenite de la senzorii montați în instalație, în vederea achiziționării datelor pe calculatorul de proces;
- ☑ Înregistrator tip Honeywell, pentru monitorizarea semnalelor provenite de la senzorii instalației;
- ☑ Detector portabil de scăpări, pentru urmărirea dinamică a stării de etanșitate în instalație;
- ☑ Calculator de comandă a proceselor tehnologice;
- ☑ Software achiziție de date și comandă a proceselor tehnologice.

Sistemul de achiziție de date și conducere a procesului tehnologic este prezentat în figura 3.22. Secvențele de operare a instalației de schimb izotopic și cea de separare criogenică ale sistemului de achiziții date de proces integrat sunt prezentate în figura 3.23 și figura 3.24.

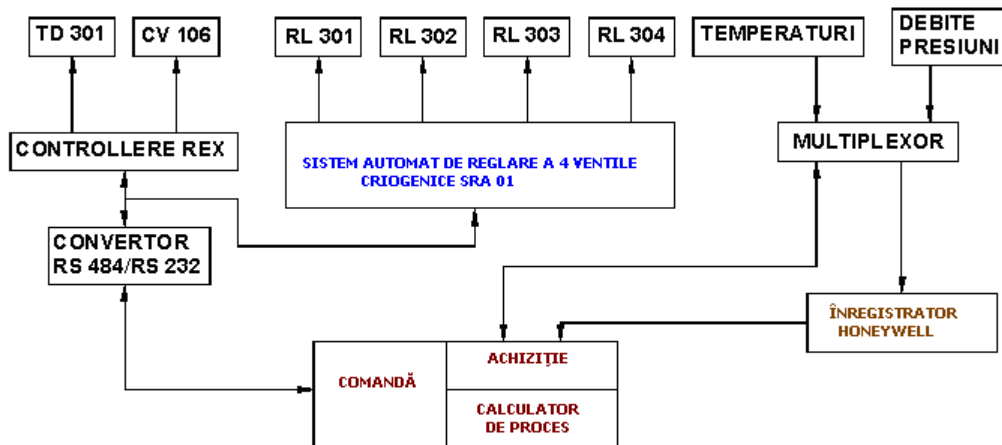


Fig. 3.22. Sistemul de achiziție de date și conducere a procesului tehnologic a IDN

Concepția de automatizare a sistemului de control-reglaj al instalației cuprinde:

- ☑ Camera de comandă, compusă din: calculator; 3 monitoare color aferente instalațiilor 100, 200, 300 și 800; tastatură;
- ☑ Cameră de achiziție date, compusă din: înregistrator analogic multipunct programabil, pentru urmărirea evoluției parametrilor importanți din instalația 100, 200, 300 și 800; sistem de achiziție date (multiplexor) pentru achiziția semnalelor analogice de la transmitere (analize, debite, nivele, presiuni, temperaturi) și transmiterea lor la nivelul central prin intermediul magistralei; sistem de măsură și achiziție a temperaturilor foarte scăzute din instalația de separare criogenică (sistemul este compus din module independente de citire a temperaturii și un controller de comunicație cu nivelul central prin intermediul magistralei); sistem automat de reglare a robinetelor de laminare din instalația de separare criogenică (sistemul este compus dintr-o unitate centrală și câte un regulator pentru fiecare robinet de laminare echipat cu motor pas cu pas; unitatea centrală comunică date sau primește comenzi de la calculatorul de proces prin intermediul unei magistrale și conduce permanent regulatoarele); regulatoare numerice monocanal, conectate la intrare direct cu transmitere din câmp, care

asigură reglarea automată neîntreruptă a diferiților parametri din proces (temperaturi, presiuni, debite) conform unui algoritm dat.

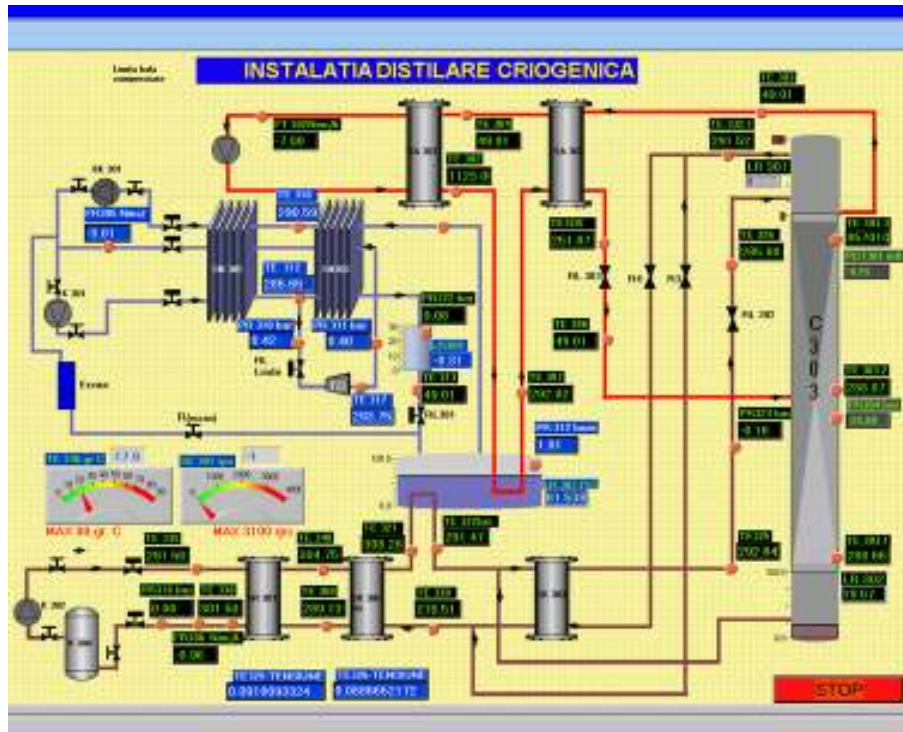


Fig. 3.23. Sistemul de monitorizare proces pentru instalația de separare criogenică, realizat cu software LabVIEW

Circulația de informații între camera de comandă și camera de achiziție date se face pe magistrale de date tip serial.

Calculatorul PC cu monitoarele aferente are rolul de stație de operare și monitorizare a procesului tehnologic, îndeplinind următoarele funcțiuni:

- ☑ afișarea on-line a schemelor sinoptice, cu valori instantanee ale parametrilor analogici și digitali;
- ☑ intervenția în proces prin comenzi autorizate (parolă), pentru modificarea comenzii la reglatoare în regim manual, modificarea referinței și a parametrilor de acord pentru bucla de reglare;
- ☑ modificarea algoritmului de reglare pentru robinetele de laminare;
- ☑ fixarea și modificarea limitelor de alarmare a parametrilor tehnologici;
- ☑ alcătuirea ecranelor cu evoluția în timp a parametrilor din proces (ecrane istoric);
- ☑ alcătuirea ecranelor de semnalizări și mesaje pentru operator etc.;
- ☑ preluarea ecranelor de la sistemul de securitate și protecție;
- ☑ protecția instalației, care cuprinde sistemul de securitate și protecție ce asigură funcționarea în condiții de securitate a instalației, pune în evidență, prin alarmări optice și acustice, stările anormale de funcționare a instalației, declanșează sistemele de interblocare și oprește procesul tehnologic pe module.

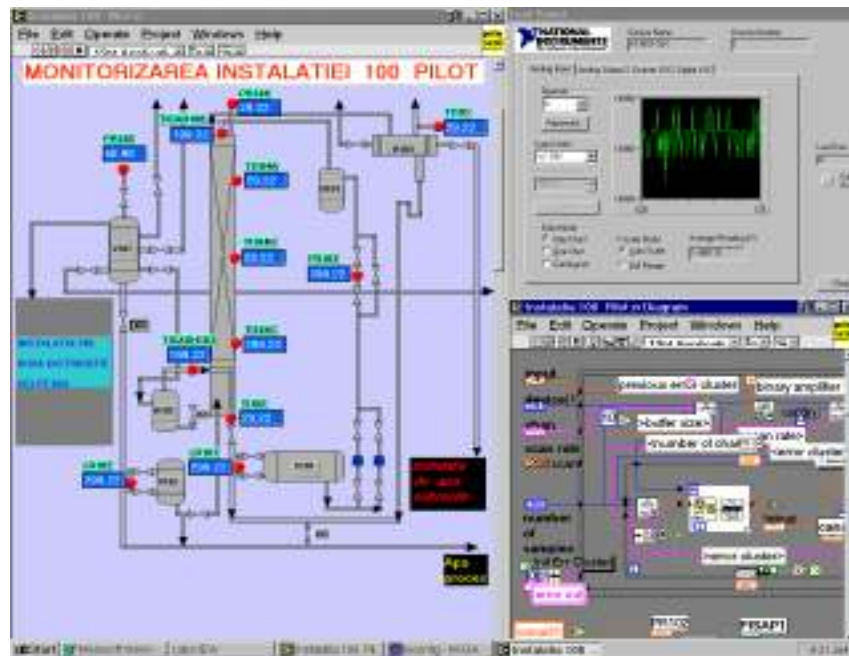


Fig. 3.24. Sistemul de monitorizare proces pentru instalația de schimb izotopic catalizat, realizat cu software LabVIEW

### 3.5.3. Sistemul holonic de monitorizare

Arhitectura sistemului holonic propus, prezentat în figura 3.21, are următoarele componente:

- ☑ Interfața grafică în LabVIEW între operator și instalație, bazată pe Web, pentru configurarea și simularea procesului;
- ☑ Baza de date locală a scenariilor alternative și a configurațiilor (experții din IDN examinează și evaluează);
- ☑ Un sistem de simulare (realizat în spațiul operării);
- ☑ Baza de date comprehensivă (caracteristici de performanță a instalației, inclusiv capacități de reparație, frecvență de mentenanță și cost);
- ☑ Coordonarea holonică și controlul, care furnizează capacitatea de a utiliza comunicația distribuită pentru luarea deciziei între elemente variate ale sistemului, furnizează controlul și coordonarea activităților.

Sistemul holonic are o arhitectură multistrat, cu nivelul inferior reprezentând instalația de proces mentenabilă, nivelul de mijloc reprezentând nodurile de proces operative, iar nivelul superior fiind reprezentat de nodul de management pentru mentenanță.

Modelul holonic propus se bazează pe *schema cunoașterii fuzzy* (SCF) care poate modela sistemele complexe, care au schimbări după legi neliniare în timp, caracteristice mentenanței predictive.

SCF constă din concepte pentru comportarea sistemului mentenabil în regim dinamic și în timp real, care vor fi detaliate în capitolele următoare.

În această secțiune va fi prezentat modelul SCF pentru o parte simplă a instalației de detritiere (fig. 3.25), pentru a pune în evidență procedura de dezvoltare.

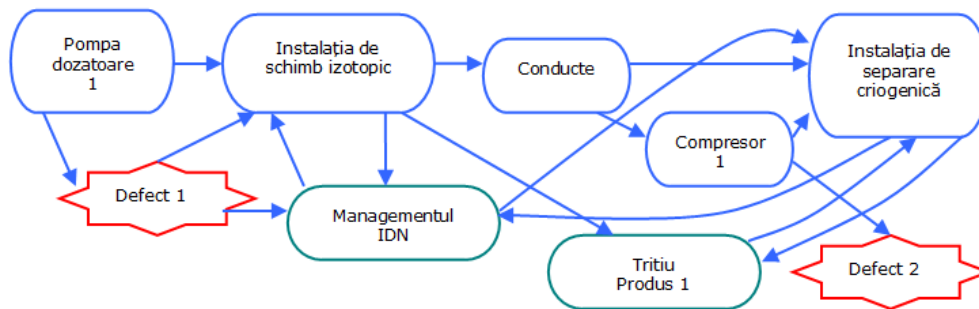


Fig. 3.25. Schema de cunoaștere fuzzy reprezentând comportarea instalației de detritiere

SCF constă din câteva concepte care reprezintă factori principali privind stările și variabilele instalației, fiind dezvoltat pe baza experienței de operare și mentenanță a IDN:

- ☑ *Concept 1*: starea instalației 1, de schimb izotopic;
- ☑ *Concept 2*: starea conductelor din instalația criogenică nucleară;
- ☑ *Concept 3*: starea instalației 2, de separare criogenică;
- ☑ *Concept 4*: starea produsului final al celor două instalații;
- ☑ *Concept 5*: calitatea produsului final – managementul instalației;
- ☑ *Concept 6*: apariția defectului la instalația 1 - pompa dozatoare;
- ☑ *Concept 7*: apariția defectului la instalația 2 - compresorul cu membrană metalică.

Din experiența dobândită în cadrul operării și mentenanței se cunoaște corelarea între aceste concepte și se poate descrie influența unui concept pentru altul, relațiile lor de cauzalitate cu gradele fuzzy.

Deci, se poate descrie care sunt procesele de influență, pozitive sau negative, în comparație cu situațiile normale. Fiecare relație cauzală printre concepte poate fi reprezentată de un centru de prioritate. Influențele între concepte sunt descrise de variabile lingvistice. Fiecare interconectare este descrisă de variabile fuzzy, apoi corespondența apartenențelor fuzzy sunt combinate și integrate întruna singură, care este defuzzificată într-o singură valoare numerică.

În cadrul instalației de detritiere nucleară se oferă, astfel, o metodă de control inteligent supervizat, prin utilizarea metodologiei de control fuzzy, care ia în considerare diferiți factori și relațiile lor. Structura propusă este prezentată în figura 3.25, unde supervisorul este modelat ca SCF și constă din sub-SCF. Fiecare din aceste sub-SCF realizează acțiuni speciale pentru instalație, la nivelul cel mai de jos:

- ☑ Un SCF este pentru monitorizarea instalației;
- ☑ Un altul este folosit pentru diagnoza defectării;
- ☑ Următorul este utilizat pentru luarea deciziei;
- ☑ Altul este utilizat pentru planificarea acțiunilor la IDN;
- ☑ Ultimul SCF descrie comenzile de execuție și le trimite la instalație.

Marea parte din modelul tradițional existent pentru diagnoză este aplicabil la sistemele holonice, diferența fiind în distribuția sarcinilor și conceptul ierarhic.

Funcțiile diagnostic în sistemele holonice vor fi parte integrală a sistemului și fiecare holon va fi responsabil pentru alimentarea cu informații comune de stare de către holonul diagnoză apropiat.

Spre exemplu, pentru holonul circuit de apă grea detritiată, potrivit figurii 3.26, se consideră testarea unei valve de control pentru debit și presiune, cu posibilă detectare a existenței cavitației, identificată de o aplicație numită CONTMENT, în cadrul aplicațiilor integrate de mentenanță holonică predictivă pentru IDN.

Holonul de diagnoză va determina ce este cerut pentru test și va cere holonului de intrare/ieșire monitorizarea debitului, presiunii și poziției valvei de reglare (comandată electric). În acest caz se aplică algoritmul de modificare a debitului și presiunii, iar dacă este necesar, reconfigurarea valvei.

Holonul de procesare conduce testul și retrimite date la holonul bază de date. Holonul de diagnostic primește informații de la holonul de procesare și realizează o comparație a stării curente cu o stare de funcționare normală, realizată anterior, și decide starea pentru vană.

Dacă este determinată starea de defectare, atunci holonul de diagnoză va fi capabil să determine cauza rădăcină posibilă (de exemplu: conductă fisurată sau valvă defectă, existența cavitației etc.) din referința existentă în holonul bază de date.

### 3.6. Concluzii

Având în vedere necesitatea de mentenanță, determinată și de considerentele că nu există nici o activitate umană care să se poată bucura de zero risc și nici un echipament cu zero rată de defectare, metodologia propusă pentru mentenanța sistemelor complexe industriale și, în particular, a sistemelor nucleare, bazată pe concepția holonică, reprezintă o variantă de abordare științifică a mentenanței bazată pe risc și pe condiții, oferind demersul pentru continua îmbunătățire a procesului de decizie în mentenanță.

Această concepție conduce către specificația de mentenanță a unui sistem holonic multi-agent, care oferă un bun compromis între distribuția cunoașterii pentru mentenanță și centralizarea controlului.

Metoda propusă pentru detecția și diagnosticarea defectelor, bazată pe logica fuzzy, asigură un cadru sistematic de prelucrare a mărimilor aleatoare vagi și a cunoștințelor vagi despre proces. În sistemele de conducere automată a proceselor, cu referire la domeniul nuclear, cu cât nivelul de incertitudine din proces este mai mare, cu atât logica fuzzy este mai utilă pentru detecție și diagnosticare la nivele din ce în ce mai înalte. Supravegherea proceselor nucleare necesită o prelucrare masivă a unor baze de cunoștințe cantitative și calitative. În acest caz, logica fuzzy este deosebit de atractivă pentru generarea simptomelor cu așa numitele praguri fuzzy, simptome care pot fi observate și descrise lingvistic. De asemenea, logica fuzzy este utilizată în special în raționamente aproximative privind defectele de proces cavitaționale, cu baze de reguli fuzzy cu multiple nivele, în structuri de generare a așa numitelor simptome cu ramificații.

Pe baza experimentelor realizate, regulatorul fuzzy se proiectează astfel încât, pentru orice situație intervenită în proces să poată fi evitată starea de operare în cavitație a robinetelor de reglare, considerate ca sistem holonic complex (mecanic-hidraulic-electronic) mentenabil.



Dacă riscul pentru mentenanță reprezintă probabilitatea de a ajunge într-un pericol posibil, el poate exprima un criteriu de apreciere calitativă, dar și cantitativă a realizării unei acțiuni, arătând măsura în care aceasta poate să producă efecte nedorite, materializate prin daune asupra omului, a echipamentelor tehnice sau a mediului înconjurător.

## **4. DEZVOLTAREA DE METODE ȘI MIJLOACE DE MENTENANȚĂ ÎN DOMENIUL NUCLEAR**

### **4.1. Introducere**

După studiul diverselor metodologii de mentenanță industrială prezentate în capitolele anterioare, respectiv noua metodologie de *mentenanță holonică bazată pe risc* (MHBR), în continuare se are în vedere dezvoltarea de metode și mijloace pentru implementarea modelului propus la instalațiile nucleare.

Aceste metode și mijloace vor fi dezvoltate potrivit condițiilor specifice de aplicare la IDN mentenabilă.

Astfel, se aduc contribuții la modelul MHBR, prin realizarea de: metodă bazată pe fiabilitate, care are în vedere defectele de cavitație; dezvoltarea metodologiei de mentenanță holonică bazată pe risc, care, așa cum se va vedea în continuare, include noi demersuri și metode specifice de analiză și evaluare calitativă și cantitativă pentru prognosticul și diagnosticul în mentenanță, continuând cu metode de analiză a defectărilor, referitor la determinarea gradului de uzură în sistemele complexe și a gradului de siguranță pentru fiabilizarea IDN.

Ca mijloace de mentenanță utilizate se va folosi un sistem expert fuzzy integrat, bazat pe modelări și simulări în regim dinamic, cu integrarea de software LabVIEW și hardware ca sistem de achiziții date, control și monitorizare proces.

### **4.2. Metoda de mentenanță bazată pe fiabilitate**

Scopul cercetării este de a propune o nouă metodă de mentenanță bazată pe fiabilitate aplicată la instalația ce procesează apă grea pentru detecția și predicția fenomenului de cavitație întâmplătoare în interiorul dispozitivelor dinamice, de exemplu robinete de reglare.

#### **4.2.1. Demersul metodei**

Demersul metodei pleacă de la considerentul că dacă se cunoaște structura unui proces, parametrii pot fi obținuți experimental prin metode de estimare și identificare a proceselor (Chiang, 2001).

Când defectul de cavitație este detectat, identificarea defectului, diagnoza defectului și procesul de reparare sunt realizate secvențial, ca în figura 4.1.

Schema detecției și diagnosticării defectelor bazată pe cunoștințe (de proces și de produs) se prezintă în figura 4.2.

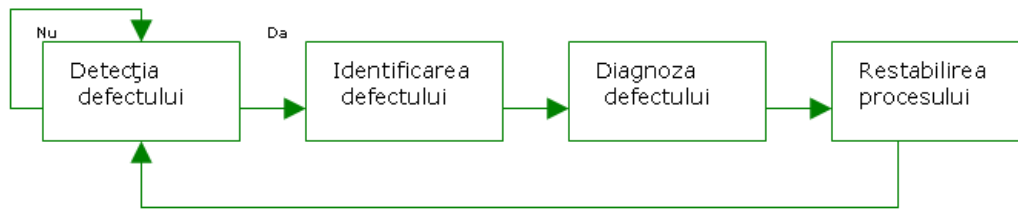


Fig. 4.1. Realizarea secvențială de la detecție la restabilirea procesului

Prin sistemul de achiziții date de proces (presiuni, debite, temperaturi) și sistemul de achiziții date de mentenanță predictivă (vibrații, zgomote) se generează simptome care se supun diagnosticării, rezultând posibile defecte cavitaționale diagnosticate, în cadrul sistemului holonic considerat.

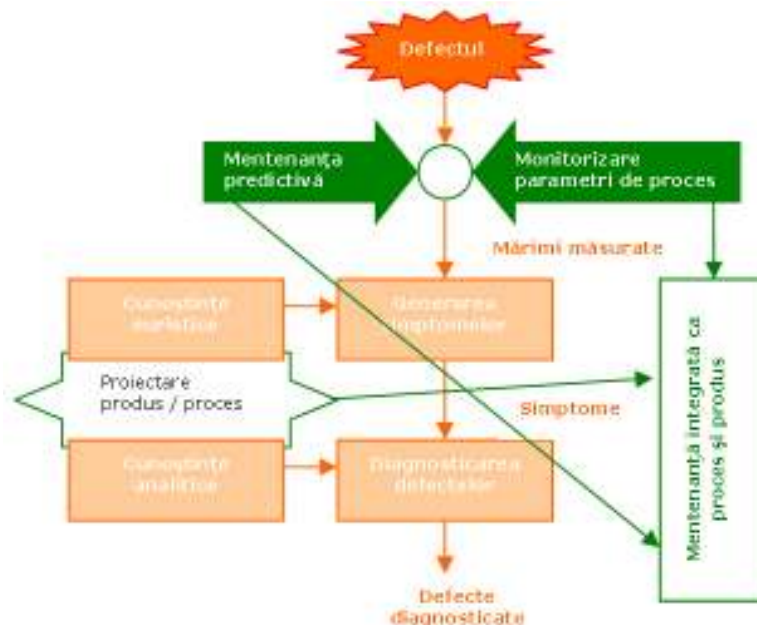


Fig. 4.2. Detecția și diagnosticarea defectelor cavitaționale bazată pe cunoștințe

Astfel principalele sarcini pot fi împărțite în:

- detecția defectelor cavitaționale prin generarea de simptome;
- diagnosticarea defectelor.

Generarea simptomelor poate fi analitică sau euristică.

Demersul metodei pentru defectele cavitaționale constă în determinarea fiabilității on-line în raport cu detecția defectelor de cavitație. Metoda poate fi extinsă și la alte dispozitive critice de la orice instalații industriale la care există posibilitatea apariției defectelor cavitaționale. Etapele conceptuale ale metodei conduc la obținerea timpului de defect probabil, care poate fi cunoscut prin mentenanță predictivă, determinând timpul de alarmă pentru începerea intervențiilor de mentenanță operațională pe nivele de complexitate. Pentru modelare matematică și simulare este utilizat software-ul LabVIEW.

Aplicația software din figura 4.3, utilizând parametrii mășurați (vibrații, zgomote, temperaturi, presiuni, turații) și parametrii tehnici fuzzy, va realiza mentenanța predictivă (avertizarea asupra apropierii momentului defectării).

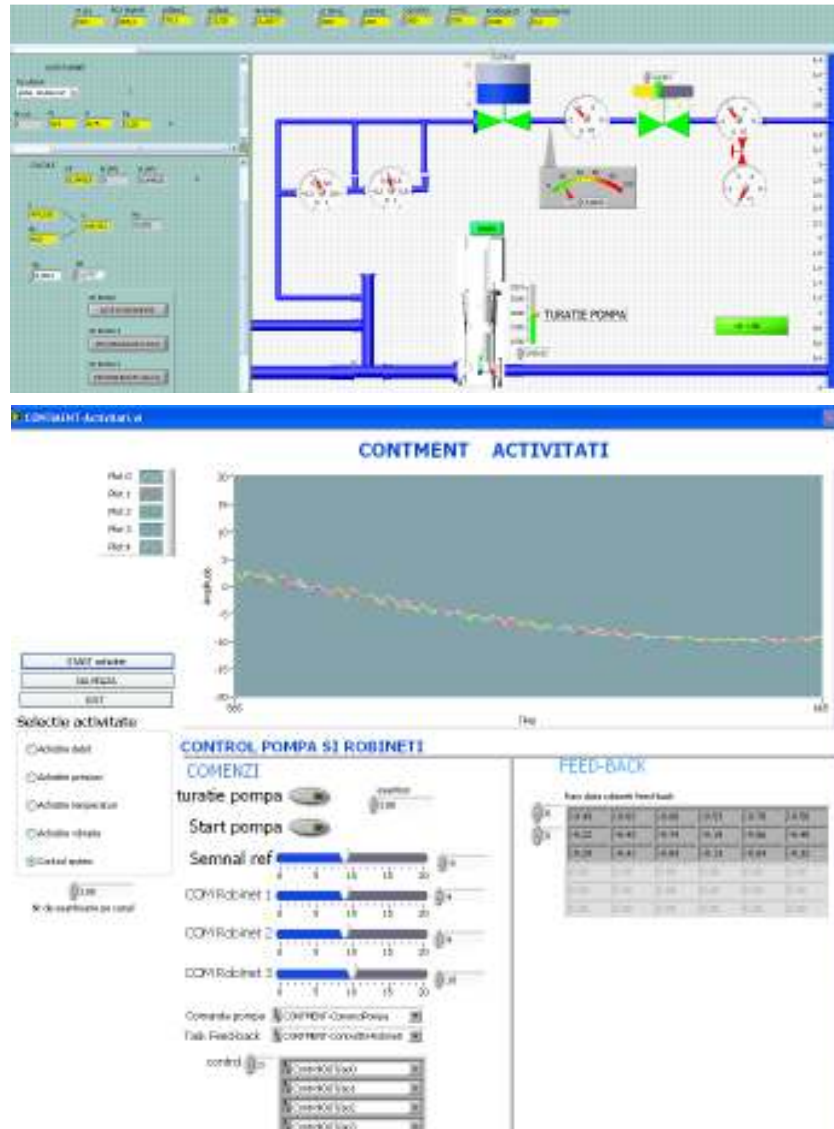


Fig. 4.3. Panoul frontal și secvență panou de control în LabVIEW aferent aplicației CONTMENT pentru punerea în evidență a defectelor predictive și cavitaționale

Pentru stocarea datelor experimentale s-a realizat un algoritm de comunicare cu baze de date relaționale, după concepția din figura 4.4.

Stabilirea defectului cavitațional se face prin monitorizare mentenanță predictivă, respectiv măsurarea zgomotului pe care îl produce, de exemplu, lichidul prin electrovană (fig. 4.5), precum și prin analiza de vibrații (variabile de stare). Prin logica fuzzy se cuantifică gradul de severitate al defectului.

Managementul datelor se realizează cu LabVIEW sau, pentru redundanță, cu hardware adecvat și software SAD-Twido (fig. 4.6). Prin variabilele de control se procedează la ieșirea din starea de cavitație, utilizându-se sistemul de

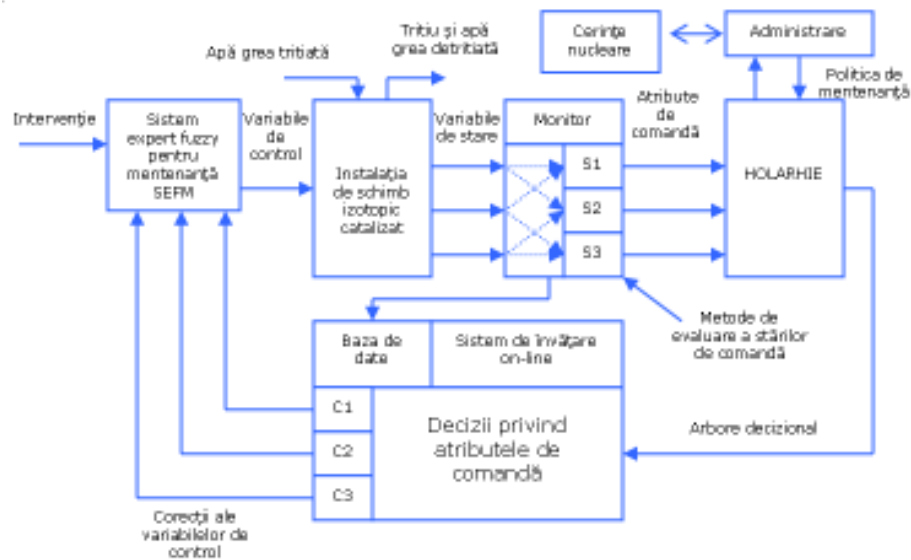


Fig. 4.4. Sistem expert fuzzy pentru mentenanță holonică

învățare, respectiv luarea deciziei pentru atributele de comandă. Atributele de comandă realizează continua îmbunătățire a prognosticului pentru programarea lucrărilor de mentenanță, în raport direct cu politica de mentenanță și reglementările aferente privind constrângerile de funcționare existente în domeniul nuclear.

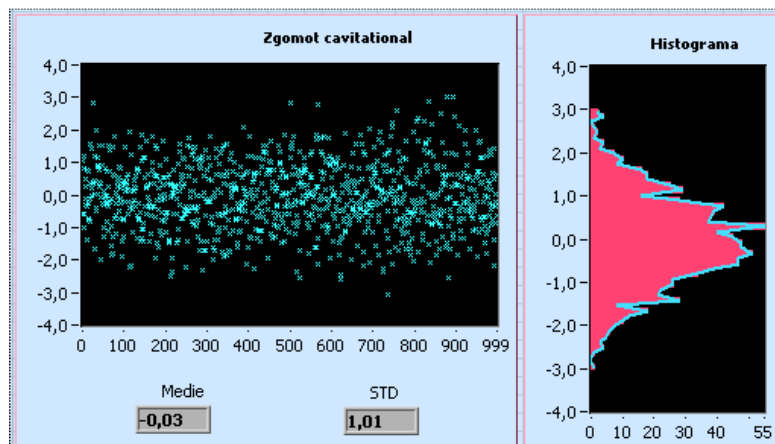


Fig. 4.5. Monitorizare zgomot cavitațional

Instalația tehnologică (fig. 4.7) este alcătuită dintr-un tunel hidrodinamic în circuit închis, la care componentele sunt: rezervorul cu nivel liber, pompa de tip CRE fabricație Grundfos, conducta de aspirație, conducta de refulare, manometrele absolute, debitmetrul, robinetul cu comandă electromagnetică de testat, manometrele diferențiale pentru măsurarea pierderilor de sarcină hidraulică liniare și a pierderilor de sarcină hidraulică locală pe robinet.



Fig. 4.6. Managementul datelor achiziționate cu SAD-Twido

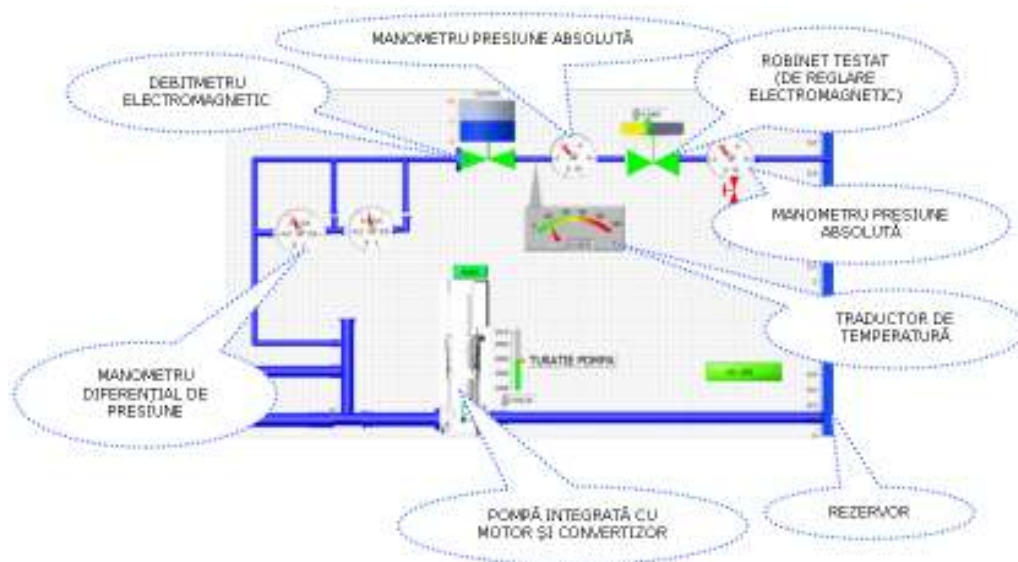


Fig. 4.7. Instalația pilot CONTMENT pentru evaluări cantitative și calitative a cavității la robinete de reglare

Metoda predictivă a cavității se bazează pe acțiunea 1 de detecție dinamică a cavității la un robinet de reglare și pe acțiunea 2 de diagnoză a cavității la același robinet de reglare. S-a ales robinetul de reglare pentru că reprezintă unul dintre cele mai importante și mai frecvente elemente de execuție prin care se modifică debitul unui fluid. Totodată, fiind un dispozitiv mecanic care realizează o funcție hidraulică de proces și care poate fi comandat electronic prin funcții de automatizare, se consideră un sistem mecano-hidraulic-electronic. Acest dispozitiv de automatizare fiind conectat direct la proces, trebuie să-și păstreze caracteristicile statice și dinamice în condiții de presiune și temperatură ridicate, medii agresive, nocive etc. Deci, pentru înțelegerea metodelor propuse în cadrul metodologiei bazate pe risc, robinetul de reglare va fi tratat ca un

sistem complex cu funcție de securitate, ceea ce corespunde realității, având în vedere studiul de caz pentru IDN.

Datele de intrare pentru acțiunea 1 sunt date de semnalele de la senzori și traductori, respectiv pentru parametri de proces, ca: presiune, debit, temperatură, turație pompă și comandă în curent sau tensiune a robinetului de reglare. Aceste date sunt tratate în regim dinamic. În timpul procesului, detecția dinamică scanează în mod continuu sistemul. Când apare defectul sau degradarea prin existența condițiilor de cavitație pentru robinet, alarmarea se produce datorită depășirii toleranței stabilite anterior privind defectele cavitaționale.

Datele de intrare ale sistemului de diagnoză vor fi gradele de apartenență ale fiecărui mod de operare dat de acțiunea 1. Prin intrările din exterior cu informații calitative și cantitative se îmbunătățește diagnoza, astfel că ieșirile vor fi ca o listă de posibile cauze, interpretate fuzzy și ordonate de un grad de credibilitate și severitate potrivit metodologiei propuse de MBR. Acest rezultat va ajuta managerul de mentenanță să evalueze un plan de acțiuni pentru mentenanță operativă.

Metoda de bază pentru detecția și diagnoza cavitației reprezintă, de fapt, condiția impusă de supravegherea apariției cavitației și este determinată de măsurarea semnalului de vibrație și de zgomot, respectiv calcularea parametrului simptom din semnalul de vibrație și zgomot.

#### 4.2.2. Detecția defectelor cavitaționale bazată pe cunoștințe

Funcțiile potrivit schemei din figura 4.8, pentru acțiunea de detecție și diagnosticare a defectelor sunt următoarele:

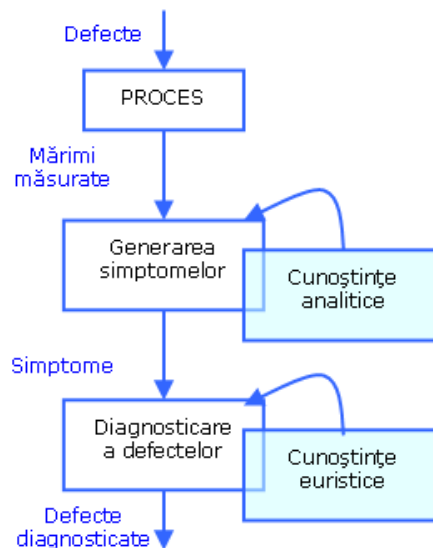


Fig. 4.8. Schema detecției și diagnosticării defectelor

- Monitorizare: măsurile măsurate sunt verificate privind toleranțele și se generează alarme pentru operatori;

- ☑ Protecția automată: în cazul în care procesul ajunge într-o stare periculoasă, funcția de monitorizare inițiază automat o contraacțiune adecvată;
- ☑ Supervizarea cu diagnosticarea defectelor: pe baza valorilor măsurate ale mărimilor din proces se fac calcule și se generează simptome, iar prin intermediul schimbărilor detectate, se realizează o diagnosticare a defectelor și se iau decizii pentru contracarare.

Generarea analitică a simptomelor (fig. 4.9) se bazează pe cunoștințe analitice despre tehnologia de proces din cadrul instalației, dar și din procesul de mentenanță predictivă, respectiv mentenanță corectivă, care implică cunoașterea foarte bine a proiectării sistemului tehnic, fiind utilizată pentru producerea unor informații analitice cantitative.

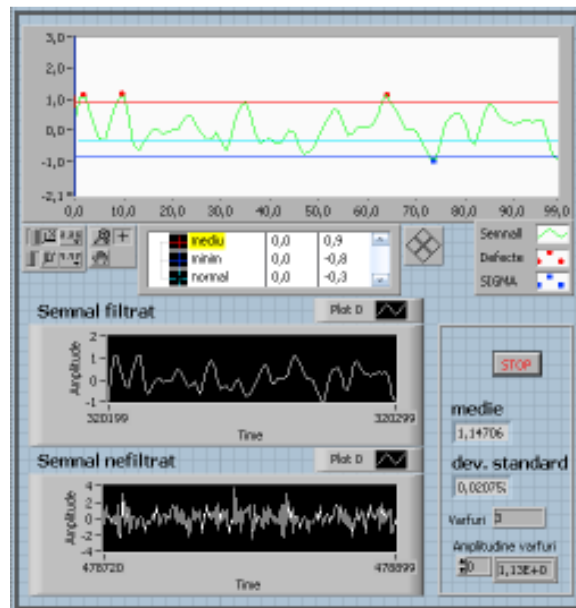


Fig. 4.9. Detecția defectelor cavitaționale

Pe baza mărimilor măsurate din proces, prin verificarea valorii limite a semnalelor măsurate direct, se realizează o prelucrare a datelor pentru generarea valorilor caracteristice primare, când valorile caracteristice depășesc toleranțele semnalelor. Asupra semnalelor măsurate direct se efectuează o analiză de semnal, cum ar fi: analiza de corelație, analiza spectrală, analiza modelelor cu metoda mediei cu autoregresie. Valorile caracteristice sunt: amplitudinea de vibrație, frecvența de zgomot, determinarea uzurii, termografie sau parametrii de proces ai modelului.

Analiza procesului se poate face prin utilizarea metodelor matematice ale proceselor împreună cu estimarea parametrilor, estimarea stărilor sau ecuații de paritate. Valorile caracteristice în acest caz sunt: parametrii, mărimile de stare sau reziduurile. Se compară comportarea curentă cu comportarea normală a procesului nedefectat și se aplică metode de detecție a schimbărilor și clasificare. Simptome analitice ale defectelor sunt schimbările rezultate ale semnalelor măsurate direct și ale modelelor semnalelor proceselor.

Generarea euristică a simptomelor se utilizează suplimentar față de generarea cu informații cuantificabile și se face utilizând informații calitative



obținute de la operatori umani. Valorile caracteristice euristice se obțin prin observarea de către operatorii de mentenanță a manifestării sistemelor tehnice, prin: zgomote, vibrații etc.

Sursa de informații euristice despre sistemul tehnic mentenabil, respectiv procesul de operare, o constituie istoricul procesării instalației, descrisă sub forma acțiunilor de întreținere, reparații, defecte anterioare și durate de utilizare sau sarcini cu care a fost încărcat procesul. La acestea se pot adăuga date statistice obținute pe baza experienței cu același proces sau procese similare. Simptomele euristice pot fi reprezentate în acest mod ca și variabile lingvistice, cum ar fi: mic, mediu, sau aproximativ în jurul unei anumite valori.

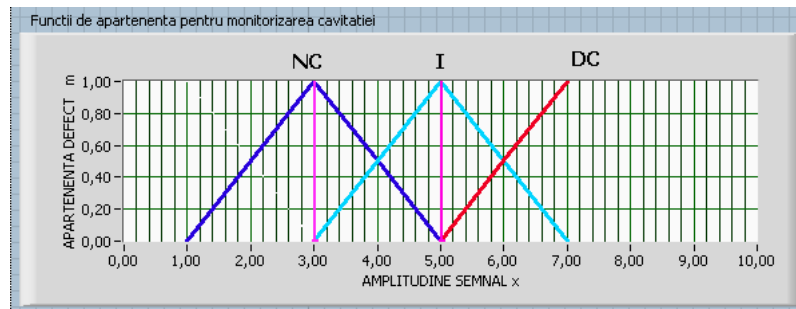
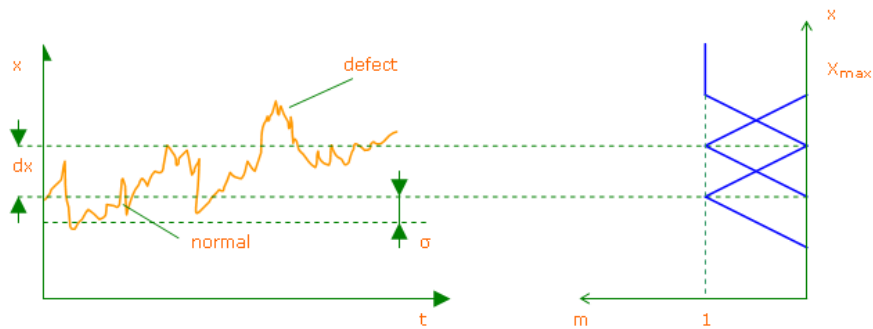


Fig. 4.10. Generarea funcțiilor de apartenență pentru defectele cavitazionale

Un exemplu pentru ilustrarea acestui mod de tratare fuzzy a unei mărimi stocastice  $x$  se prezintă în figura 4.10. În acest caz se utilizează un prag fix  $x_{max}$  și se face un compromis între detecția unor defecte mici și alarmele false. Pentru o distribuție gaussiană a abaterilor  $dx$  ale mărimii  $x$ , cu o marjă a tuturor valorilor cuprinsă, de exemplu, între 70 și 96%, este specifică utilizarea unor funcții de apartenență de tip triunghiular  $m(x)$  cu centrele în valoarea medie și în valoarea minimă. Se obține o reprezentare a simptomelor deviațiilor, de la valorile medii și standard.

Prin realizarea unei corelații a valorii curente  $m(x)$  cu funcția de apartenență a simptomului se obține o măsură graduală a depășirii unui prag fuzzy.

Pentru prelucrarea informațională unitară a simptomelor, în abordarea bazată pe logica fuzzy se utilizează funcțiile de apartenență  $m(x) \in [0,1]$  din definiția mulțimilor fuzzy.

În teoria securității și fiabilității de funcționare a sistemelor tehnice se utilizează și abordarea probabilistică a apariției defectelor (Lindqvist, 2006),

(Pena, 2006), simptomelor analitice și euristice, acestea fiind reprezentate într-o manieră unificată, prin numere de încredere între 0 și 1.

Aceste simptome sunt intrări pentru sistemele fuzzy bazate pe inferență. Simptomele sunt asociate între ele prin operatori ȘI și SAU. Pe baza cunoștințelor euristice, disponibile sub forma modelelor euristice ale proceselor, se pot dezvolta diferite strategii de diagnosticare prin raționamente fuzzy.

În final, scopul diagnosticării se atinge prin luarea unei decizii legate de defect, în care se specifică tipul, dimensiunea, locul și momentul la care a apărut.

Prin utilizarea strategiei activării regulilor fuzzy se realizează o potrivire a faptelor cu premisele și se trage o concluzie bazată pe consecințele logice. Astfel, cu simptomele  $dx$  ca intrări, posibilele defecte se determină utilizând cauzalități euristice.

În general, simptomele trebuie considerate ca fapte nesigure. Astfel, este posibilă o reprezentare într-o formă unificată a tuturor simptomelor observate ca funcții de apartenență  $m(x)$  ale unor mulțimi fuzzy în intervalul  $[0,1]$ .

#### 4.2.3. Modelul de evaluare a compatibilității cu mediul informației holonice

În cadrul impreciziei se pune problema măsurării, în care informația holonică descrie o stare de fapt reală a sistemului mentenabil. În acest context se impune gradarea apartenenței reprezentării la starea reală.

Astfel, fie informația de detecție la cavitație, formată din mulțimea de date  $D_i$ , exprimate în limbajul grafic LabVIEW, cu semnificațiile:  $C_i$ , care determină aspectele  $A_j$  de necavitație, cavitație incipientă, cavitație dezvoltată și supercavitație. Matematic, se poate scrie:

$$Inf_{cav} = \begin{pmatrix} D_i \\ C_i \end{pmatrix}_{L \rightarrow labVIEW} \quad (4.1)$$

unde  $L$  reprezintă formularea în limbaj natural a stării sistemului evaluat privind defectele de proces, transpuse corespunzător simulării în limbajul LabVIEW.

Deci  $inf_{cav}$  reprezintă un text a cărui valoare de adevăr  $V(inf_{cav})$  ia valori în intervalul  $[0,1]$ :  $V(inf) \in [0,1]$ , iar aspectele  $A_j$ , reprezintă formule fuzzy, valorile lor de adevăr aparținând aceluiași interval  $[0,1]$ .

În aceste condiții, un aspect  $A_j$ , privit ca o propoziție se spune că este valid (consistent) dacă  $V(A_j) \geq \frac{1}{2}$  și nonvalid (inconsistent) dacă  $V(A_j) \leq \frac{1}{2}$ .

Analog, informația  $inf_{cav}$  este validă dacă  $V(inf_{cav}) \geq \frac{1}{2}$  și nonvalidă dacă  $V(inf_{cav}) \leq \frac{1}{2}$ .

Determinarea consistenței informației  $inf_{cav}$  în raport cu mediul/sistemul, având în vedere valorile de adevăr ale aspectelor integrate, se realizează în contextul teoretic al logicii fuzzy (Kruse, 1995), considerând regulile de stabilire a valorilor de adevăr în compunerea aspectelor:

- compunere prin conjuncție logică,

$$V(A_j \wedge A_g) = \min(V(A_j), V(A_g)); \quad (4.2)$$

compunere prin disjuncție logică,

$$V(A_j \vee A_g) = \max(V(A_j), V(A_g)); \quad (4.3)$$

negație,

$$V(\neg A_j) = 1 - V(A_j). \quad (4.4)$$

Exemplificând pentru instalația pilot CONTMENT, informația *invcav* la un moment dat este: „Robinetul de reglare se află la momentul inițial în stare de funcționare corespunzătoare, iar defectarea parțială (datorată cavitației incipiente) sau totală (din pricina cavitației dezvoltată) urmează după un timp de 100 ore”.

Aspectele informației *inf cav* sunt:

A1 – „Sistemul se află la momentul inițial în stare de funcționare corespunzătoare”;

A2 – „Defectarea parțială (datorată cavitației incipiente) sau totală (din pricina cavitației dezvoltată) urmează după un timp de 100 ore”.

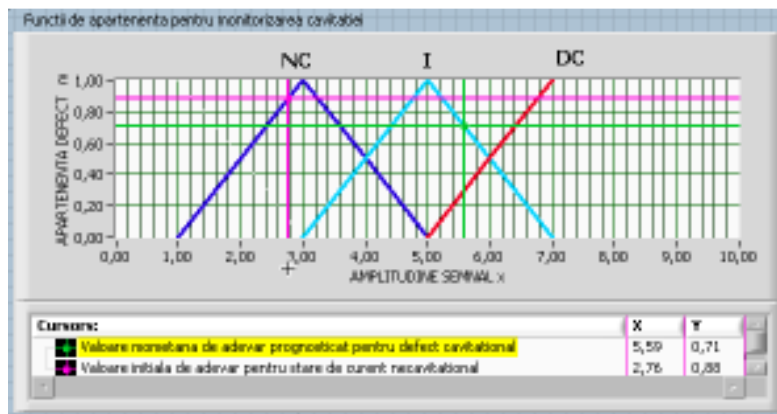


Fig. 4.11. Valoarea momentană de adevăr a mentenanței de prognostic la defectul de cavitație incipientă

Conform figurii 4.11 se presupune că valorile de adevăr admise pentru A1 și A2 sunt  $V(A_1) = 0,88$ , respectiv  $V(A_2) = 0,71$ , prin urmare, aspectele sunt valide din perspectiva logicii fuzzy.

Informația *inf cav* este construită din aspectele A1 și A2, prin combinația logică de conjuncție, astfel încât valoarea sa de adevăr este conform relației:

$$V(\text{inf cav}) = V(A_1 \wedge A_2) = \min(V(A_1), V(A_2)) = 0,71 \quad (4.5)$$

Rezultă că *inf cav* este validă, gradul de validitate, respectiv de compatibilitate cu starea de fapt a robinetului de reglare, este 0,71.

#### 4.2.4. Aspecte ale cavității în instalația pilot CONTMENT

Se consideră un domeniu  $D$  determinat de interiorul robinetului de reglare prin care se procesează fluidul presupus incompresibil, de densitate  $\rho_0$  la momentul  $t_0$ . Frontiera domeniului  $\partial D$  este alcătuită din suprafața liberă  $L$  și suprafața solidă  $S$ , fixă sau mobilă, de ecuație  $f(x, y, z, t) = 0$ . Presiunea pe suprafața liberă  $L$  este:

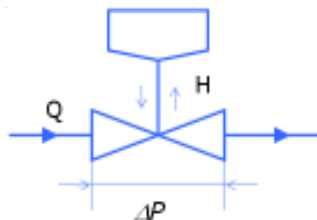
$$p(L) = p_0 = ct. \quad (4.6)$$

Ipotezele adoptate sunt:

- ☑ contactul perete solid-lichid este o legătură unilaterală, deoarece lichidul nu traversează peretele, dar se poate desprinde, deci  $f(x, y, z, t) \geq 0$ ;
- ☑ incompresibilitatea lichidului este, de asemenea, o legătură unilaterală, pentru că se opune micșorării volumului de lichid din  $D$ , dar permite dilatarea lui;
- ☑ cavităția incipientă presupune vaporizarea unei cantități infime de lichid și, astfel, lichidul se „dilată”;
- ☑ reacțiunea asociată legăturii de incompresibilitate este presiunea și se verifică în  $D$  inegalitatea  $p \geq p_{cr}$ ,  $p_{cr}$  fiind presiunea de apariție a cavității;
- ☑ la momentul inițial se consideră cunoscut câmpul vitezelor  $\vec{v}(\vec{r}, t_0)$ ;
- ☑ ecuațiile de mișcare ale lichidului sunt ecuațiile Euler scrise sub forma

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \text{grad} \frac{v^2}{2} - \vec{v} \times \text{rot} \vec{v} + \frac{1}{\rho} \text{grad} p = \vec{F} \quad (4.7)$$

O privire globală asupra unui robinet de reglare, împreună cu principalele mărimi asociate, este prezentată în figura 4.12.



H - este cursa obturatorului sistemului de strangulare; Q - debitul fluidului;  $\Delta P$  - căderea de presiune pe robinetul de reglare.

Fig. 4.12. Imaginea de ansamblu a unui robinet de reglare

La modificarea deplasării  $H$  a obturatorului sistemului de ștrangulare rezultă o variație a debitului  $Q$ , cât și a căderii de presiune  $\Delta P$ . Dacă se notează cu  $\zeta$ , coeficientul de pierdere al robinetului de reglare, se poate demonstra că există relația:

$$\Delta P = f(\zeta, Q) \quad (4.8)$$

La căderi mici de presiune pe robinet sau la secțiuni mici, curgerea are loc în regim laminar, caracterizat prin dependența liniară între debit și căderea de presiune. Această dependență corespunde zonei I (fig. 4.13). La aceeași deschidere a robinetului de reglare, pe măsură ce căderea de presiune crește, se obține o creștere a debitului, respectiv a vitezei de curgere, astfel încât la o anumită valoare a căderii de presiune se ajunge la o curgere în regim de trecere (zona II). Dacă pierderea de presiune pe robinet este crescută în continuare, se atinge regimul de curgere turbulent, cunoscut sub numele de curgere normală (zona III).

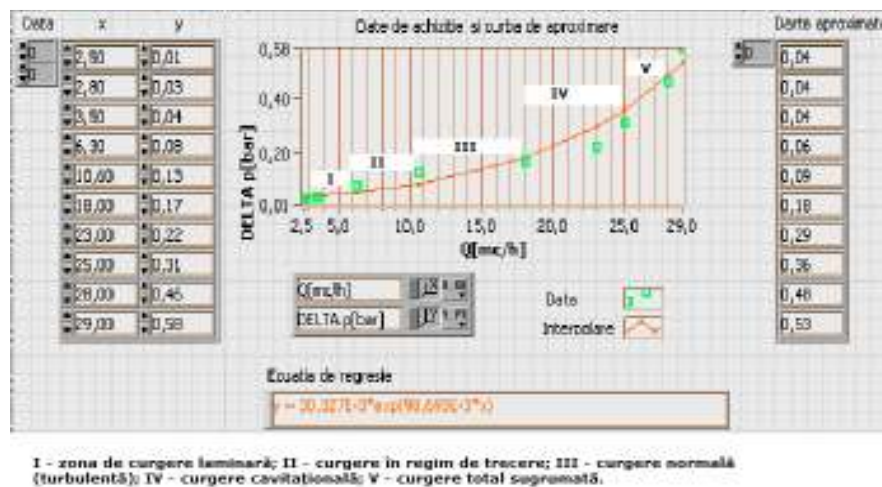


Fig. 4.13. Dependenta debit  $Q$  – căderea de presiune pe robinetul de reglare  $\Delta P$ , în diferite regimuri de curgere

La pierderi mari de presiune pe robinet, în zona de ștrangulare maximă are loc o asemenea scădere a presiunii încât se atinge presiunea de vaporizare  $p_v$ . Deoarece este atinsă presiunea de vapori a lichidului, începe procesul de vaporizare.

După trecerea din vena contracta are loc fenomenul de recuperare a presiunii, astfel încât se ajunge la niveluri de presiune  $p_2$  superioare de vapori  $p_v$ , fapt pentru care bulele de vapori formate în zona venei contracta sunt condensate brusc, sub forma unor implozii, a unor colapsuri.

Acest mecanism, numit cavitație, compus din două etape, vaporizare în vena contracta și condensare bruscă, produce zgomot și vibrații care conduc la distrugerii fizice ale robinetului și ale conductei din aval. Curgerea cavitațională corespunde zonei IV, unde, printre altele, nu se mai respectă dependența pătratică dintre viteză și presiune.

Bulele de vapori care se formează în zona vena contracta ocupă un volum mai mare decât lichidul din care s-au format. Dacă diferența de presiune pe robinet este crescută în continuare, ponderea bulelor de vapori crește până când volumul amestecului devine atât de mare încât robinetul nu mai permite trecerea

unui debit superior de fluid. Această stare este numită în literatura de specialitate „curgere sugrumată”, debitul de fluid având valoarea maximă  $Q_{max}$ .

În ipoteza confirmată, că bulele de cavitație apar în centrele vârtejurilor desprinse de pe organul obturator al robinetului, frecvența de formare a acestora este dată de numărul *Strouhal*:

$$S_h = \frac{f \cdot D_e}{V} , \quad (4.9)$$

unde  $D_e$  este diametrul echivalent al secțiunii de curgere, iar  $V$  este viteza în acea secțiune. Într-o primă aproximație se poate considera că

$$D_e \cong D \quad \text{și} \quad V = \frac{4Q}{\pi D^2} . \quad (4.10)$$

Din experiențele efectuate pe robinete de reglare  $Dn10$ ,  $Dn30$  și  $Dn50$ , vitezele de la stadiul incipient până la curgere strangulată variază de la simplu la dublu. Cum pentru  $Re > 103$ ,  $Sh$  tinde la 0,21, rezultă că intervalul de frecvențe  $f$  pentru un tip de bule cavitaționale este relativ redus, ceea ce micșorează precizia determinărilor. Intensitatea zgomotelor produse de implozie variază, în schimb în limite mari și sunt mai ușor de identificat stadiile de evoluție. Pe de altă parte, nu tot spectrul de bule suferă implozie și, astfel, se poate produce distrugerea conductei în aval de organul obturator. Estimând intensitatea atacului cavitațional prin vibrațiile specifice ale „generatorului” de cavitație și ale conductei din aval, s-a constatat existența unui maxim al acestora la o anumită viteză (evidențiat și prin monitorizarea predictivă la zgomote), rezultând astfel debitele de la care există riscul distrugerilor cavitaționale.

Achiziția de date pentru proces se realizează în timp real, iar datele achiziționate se pot afișa la intervale de 10 secunde, cu înregistrarea timpului de achiziție, ca bază de referință pentru toate măsurătorile efectuate, ca să poată fi analizate la același timp.

Ca urmare, obiectivul operațional devine răspunsul la întrebarea: poate fi anticipată cavitația în instalația de detriere nucleară (IDN) din cadrul ICSI Rm. Vâlcea?

Marea problemă a cavitației în sistemele hidraulice este că nu există metode convenționale pentru detecția și predicția lor. Detecția cavitației incipiente va trebui realizată cu destul timp înainte pentru a comanda măsurile de prevenire și corectare a parametrilor de proces dependenți, respectiv oprirea instalației, dacă este necesar. Tot acest demers de măsuri care trebuie luate este realizat de sistemul de automatizare al instalației.

Pentru ca detecția să fie posibilă sunt folosite două metode avansate. Prima metodă constă în utilizarea de senzori acustici în banda de 1MHz și dinamic 80dB, pentru o filtrare de vibrații grosolane care apar la funcționarea standului. A doua metodă este aplicarea estimării parametrului Bayesian, care face posibilă separarea „weak signals” de „strong signals”. Estimarea parametrului Bayesian se obține cu un *sistem de achiziții date* (SAD).

Un obiectiv important al cercetării a fost acela de a furniza detecția defectelor cavitaționale, care are la bază mentenanța bazată pe condiții. Defectele catastrofale pe care le poate provoca apariția cavitației în instalația de proces pot fi evitate simplu, prin schimbarea punctului de operare a sistemului.

Tehnica este de a identifica modelul matematic neliniar care stă la baza procesului.

Estimarea parametrului Bayesian este utilizată pentru identificarea modelului care descrie aceste date. Este cunoscut că prin analiza Bayesiană a datelor se obține o ecuație neliniară diferențială a procesului, care poate fi rezolvată.

Se obține deci o funcție care descrie emisia acustică (EA) a bulelor cavitaționale. Acest tip de analiză este complet necunoscut în practica convențională a mentenanței predictive sau a mentenanței bazate pe condiții (CBM).

Estimarea parametrului Bayesian descrie câteva modele de funcții. Cu această tehnică, din caracteristica distinctivă a efectului fizic poate rezulta unul sau mai mulți parametri. Acesta este într-un concept general „feature vector” a recunoașterii modelului convențional. Toți parametrii neliniari sunt incluși în argumentul funcției de probabilitate; parametrii amplitudine sunt implicit în funcțiile modelului. Astfel, pentru un singur termen oscilatoriu, modelul poate fi:

$$\{1, \cos(\omega t), \sin(\omega t)\} \text{ sau } \{1, \cos(2n\omega t k), \sin(2n\omega t k)\} \quad (4.11)$$

unde  $k$  este un factor de scală care convertește  $t$  întreg în microsecunde.

De exemplu, se consideră un model de zgomot liniar:

$$\{1, \cos(2n\omega t k + ak^2 t^2), \sin(2n\omega t k + ak^2 t^2)\} \quad (4.12)$$

Deci, sunt 3 parametri neliniari expliți ( $a$ ,  $k$  și  $\omega$ ) și 3 parametri de amplitudine impliți. Parametrul  $k$  este cunoscut, iar ceilalți 2 parametri neliniari conduc la optimizarea problemei în  $\omega$ ,  $a$  – plane.

În general, dacă sunt  $m$  parametri neliniari necunoscuți, problema devine a căuta în spațiul dimensional  $m$  pentru „peak” a funcției „probabilitate”, care este o distribuție *Student*, computațională de la proiecția de date:

$$S_t = [1 - (d.m / d.d)]^{(m-n)/2} \quad (4.13)$$

unde  $d.m$  este proiecția de date pe model, iar  $d.d$  este proiecția de date însăși.

#### *Rezultate experimentale*

Frecvența folosită pentru conectarea datelor este de la 10 kHz la 200 kHz. Rata de eșantionare este de 10 milioane pe secundă.

De exemplu, pentru 18,04249 m<sup>3</sup>/h, amplitudinea este normalizată la 1, valoarea de vârf. Axa timpului este în unități de  $\mu$ sec.

Modelul este:

$$\{e^{-\gamma t} \cos(\omega t k + ak^2 t^2), e^{-\lambda t} \sin(\omega t k + ak^2 t^2)\},$$

deci  $k=1$ ,  $\omega=0,08$  și  $a=-0,0009$ , iar  $\gamma=0,006$ .

La un cadru tipic pentru date capturate la 18,04 m<sup>3</sup>/h, cu maximum de amplitudine de aproximativ 20,000 μV, timpul este de 2000 μsec și rezultă câteva evenimente cavitaționale ca în figura 4.14.

Probabilitatea este computerizată pentru fiecare 240 puncte date. Sunt calculați parametri neliniari și liniari pentru model, acoperirea fiind dată de determinarea probabilității în dB.

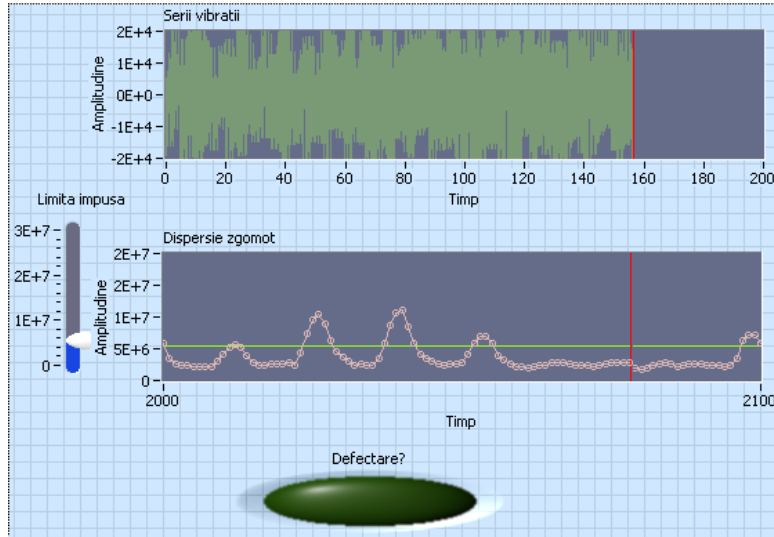


Fig. 4.14. Câteva evenimente de cavitație și avertizare de defectare

Analiza preliminară determină câteva concluzii rezonabile:

- amortizarea zgomotului poate fi caracteristica distinctivă a cavitației;
- pragul de cavitație, ca zgomot puternic, este o apariție comună;
- sub pragul cavitației amortizarea zgomotului este rară, dar nu inexistentă;
- amplitudinea amortizării zgomotului anunță că începerea cavitației este o bifurcație catastrofică;
- amortizarea zgomotului este ușor de detectat și greu de confundat cu alte semnale, atunci când este utilizată estimarea parametrilor Bayes;
- aceste concluzii au utilitate în două aspecte de detectare a cavitației:
  - când cavitația apare brusc, ca răspuns la o mică creștere a debitului, fiind un puternic indicator de început de cavitație;
  - când zgomotul slab amortizat, la un debit dat, apare ca un precursor al cavitației.

Accelerațiile de vibrație au fost măsurate folosind analiza de spectru FFT, cu o medie a frecvenței cuprinsă între 1Hz și 5kHz. S-a obținut astfel relația între RMS vibrație și coeficientul de cavitație  $K$  (fig. 4.15):

$$A_{RMS} = \frac{a_{RMS}}{\frac{P_u}{\rho} + \frac{V^2}{2}} \quad [1/m] \quad (4.14)$$

unde:

$A_{RMS}$  este raportul între r.m.s. valoarea accelerației vibrației și energia totală contra curentului;



$a_{RMS}$  – r.m.s. valoarea accelerației vibrației [ $m/s^2$ ];  
 $P_u$  – presiune contra curentului [ $P_a$ ];  
 $V$  – viteza medie a apei în conductă [ $m/s$ ].

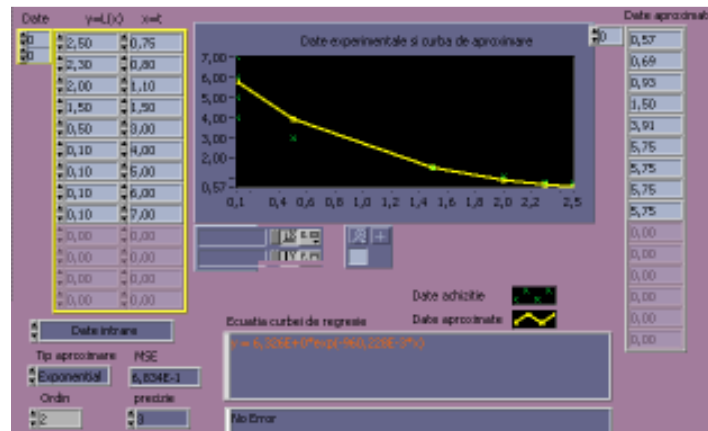


Fig. 4.15. Variația amplitudinii vibrației cu coeficientul de cavitație  $K$

Tabelul 3.2. Date caracteristice pentru cavitație

$A_{RMS} \times 10^{-1}$	$K$	$N$ [mm]
2,5	0,75	10
2,3	0,8	7
2,0	1,1	3
1,5	1,5	3
0,5	3	3; 2
0,1	4; 5; 6; 7	2; 1

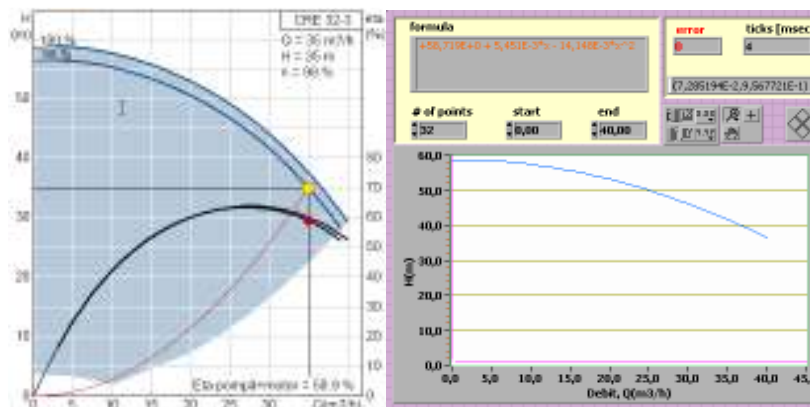


Fig. 4.16. Caracteristica pompei

Se observă că relația între vibrație și coeficientul de cavitație  $K$  descrește exponențial.

Pompa folosită în instalație este centrifugă verticală, multietajată în linie, pentru instalare în sisteme de conducte și montare pe fundație, cu posibilitatea de a funcționa la diferite turații, cu ajutorul unui convertor static de frecvență.

Turația maximă a motorului electric este de 2919 rot/min. În figura 4.16 sunt prezentate caracteristicile de sarcină ale pompei  $H = f(n, Q)$  la diferite turații.

În instalație se folosesc robinete de reglare cu clapetă, cu diametrul nominal DN50, a cărui caracteristică de debit este dată în funcție de diferite deschideri,  $Q = f(a, \Delta p)$ .

Caracteristica pompei este dată de următoarea ecuație, în funcție de debitul  $Q$  și de turația  $n$  la care este antrenată pompa:

$$P = \rho g H = A_2 Q_0^2 + A_1 n Q_0 - A_0 n^2 \quad (4.15)$$

Calitățile hidrodinamice ale unui robinet sunt date de următorii parametri:

a) Coeficientul de debit  $K_v$  sau de rezistență hidraulică locală  $\zeta$ , definiți prin relațiile:

$$Q = K_v \sqrt{\Delta p} \quad (4.16)$$

$$\Delta p = \zeta \rho \frac{v^2}{2} \quad (4.17)$$

Coeficientul  $K_v$  este dimensional și în prospectele firmelor este dat în  $m^3/h$  pentru o cădere de presiune pe robinet  $\Delta p = 1$  bar și fluid de lucru apă. Coeficientul  $\zeta$  este adimensional, iar  $\rho$  reprezintă densitatea lichidului și  $v$  viteza medie amonte de robinet.

b) Coeficientul de cavitație; cel mai utilizat este coeficientul de cavitație Thoma:

$$\sigma = \frac{p_{am} - p_v(t^\circ)}{\rho v^2 / 2} \quad (4.18)$$

sau coeficienții definiți cu parametri amonte și/sau aval

$$K_f = \frac{\Delta p}{p_{am} - p_v}; \quad K_d = \frac{p_{am} - p_v}{p_{av} - p_v}; \quad K_m = \frac{\Delta p}{p_{av} - p_v} \quad (4.19)$$

în care:

$p_{am}$ ,  $p_{av}$  și  $p$  sunt presiunile absolute amonte și aval de robinet,

$p_v$  – presiunea de vaporizare,

$\Delta p$  - căderea de presiune pe robinet.

Coeficienții definiți de relația (4.19) nu sunt independenți

$$K_d = \frac{1}{1 - K_f} \quad (4.20)$$

$$K_m = \frac{K_f}{1 - K_f} \quad (4.21)$$

și au fost definiți în funcție de interesul utilizatorului, fără a avea o bază teoretică. Astfel, dacă ei corespund cavității incipiente, rezultă, la un debit și un robinet dat, presiunea din amonte, din aval sau combinații ale acestora la care apare cavităția.

c) Nivelul de zgomot, care pentru a fi redus la limite acceptabile sau prevăzute de standarde necesită uneori construcții speciale ale capului și organului de închidere al robinetului.

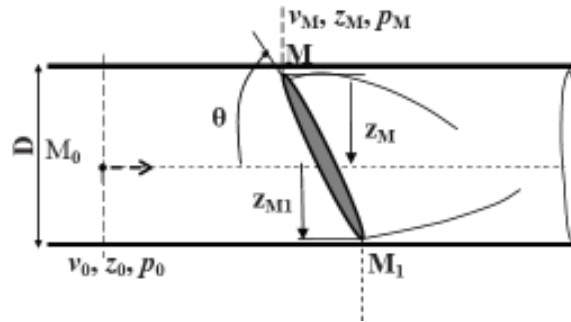


Fig. 4.17. Schema elementului obturator pentru definirea coeficientului de cavitatie

Determinarea parametrilor de cavitatie specifici robinetului din instalație în mișcare permanentă între punctul M0 și M potrivit figurii 4.17, are la bază relația lui Bernoulli, ceea ce duce la:

$$\frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} + z_0 = \frac{p_M}{\gamma} + \frac{v_M^2}{2g} + z_M + h_p \quad (4.22)$$

Se definește astfel rezerva de cavitatie,  $\sigma_{rez}$

$$\sigma_{rez} = \frac{p_{min} - p_v}{\rho v_0^2 / 2} \quad (4.23)$$

Coeficientul de cavitatie al instalației este definit ca:

$$\sigma_{inst} = \frac{p_0 - p_v}{\rho v_0^2 / 2} \quad (4.24)$$

În ipoteza că  $p_M = p_{min}$  și  $v_M = v_{max}$  valoarea coeficientului de cavitatie este:

$$\sigma_c = \frac{v_{max}^2}{v_0^2} - 1 + \frac{z_M - z_0}{v_0^2 / 2g} + \frac{h_p}{v_0^2 / 2g} \quad (4.25)$$

Din relațiile (4.23), (4.24) și (4.25) se obține:

$$\sigma_{rez} = \sigma_{inst} - \sigma_c \quad (4.26)$$

Din relația (4.26) rezultă următoarele stadii ale fenomenului de cavitație:

$$\begin{aligned} \sigma_{rez} > 0, \quad \sigma_{inst} > \sigma_c, & \text{ noncavitație;} \\ \sigma_{rez} = 0, \quad \sigma_{inst} = \sigma_c, & \text{ cavitație incipientă;} \\ \sigma_{rez} < 0, \quad \sigma_{inst} < \sigma_c, & \text{ dezvoltarea cavitației;} \\ \sigma_{rez} \ll 0, \quad \sigma_{inst} \ll \sigma_c, & \text{ supercavitație.} \end{aligned}$$

Relația (4.26) are o bază teoretică prin care se diferențiază coeficientul de cavitație al instalației  $\sigma_{inst}$  de coeficientul de cavitație  $\sigma_c$ , care la temperatură constantă depinde de numărul Froude  $Fr$ , definit ca

$$\frac{z_M - z_0}{v_0^2 \cdot 2g} = \frac{2}{Fr} \quad (4.27)$$

de numărul Reynolds,  $Re$  și de rugozitatea relativă  $k/D$  din pierderea de sarcină hidraulică liniară  $h_p$ , pe distanța  $L_{MM0}$

$$\sigma_c = f(Fr, Re, k/D, L) \quad (4.28)$$

În cazul robinetului clapetă (fig. 4.17) s-a determinat că între coeficienții de cavitație asociați secțiunii  $M$ ,  $\sigma_M$ , și  $M_1$ ,  $\sigma_{M1}$ , există relația:

$$\sigma_{rezM} < \sigma_{rezM1} \quad (4.29)$$

Cavitația începe deci în secțiunea IV. Intre coeficienții  $\sigma_c$  și  $K_v$ , respectiv  $\xi$  există o dependență naturală: expunerea la cavitație este cu atât mai mică cu cât la același debit coeficientul  $K_v$  este mai mare, respectiv coeficientul de pierdere de sarcină hidraulic locală pe robinet  $\xi$  este mai mic.

În continuare se propune reglarea poziției aparatului obturator al ventilului și reglarea debitului în instalație astfel încât funcționarea ventilului să se facă în afara condițiilor de apariție a cavitației în instalație, evitându-se astfel defectarea lui.

În figura 4.18 se prezintă schema instalației hidraulice de diagnoză a ventilelor industriale la cavitație. Se observă prezența regulatorului fuzzy de debit pentru reglarea debitului, prin modificarea turației pompei, printr-un variator de turație (VTP). Se observă și prezența regulatorului de poziție pentru modificarea poziției elementului obturator specific ventilului, folosind acționarea electrică a robinetului.

Modelul matematic neliniar asociat instalației este:

$$P = A_2 Q_0^2 + A_1 n Q_0 + A_0 n^2 \quad (4.30)$$

$$Q = C_d A(\alpha) \sqrt{\Delta p} \quad (4.31)$$

Notând  $P = \Delta p = R Q^2$  se obține:

$$R = \frac{1}{C_d^2 A(\alpha)^2} \quad (4.32)$$

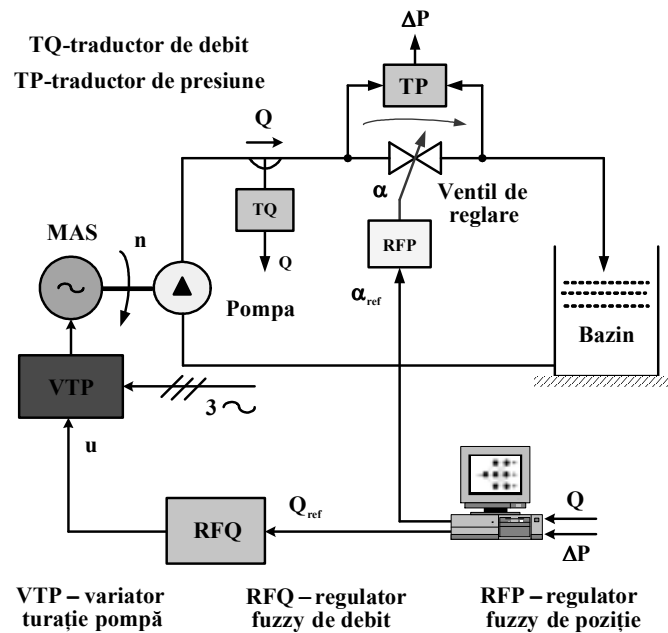


Fig. 4.18. Schema instalației hidraulice de diagnosticare a ventilelor industriale la cavitație

Din relațiile de mai sus, prin înlocuiri, va rezulta:

$$R Q_0^2 = A_2 Q_0^2 + A_1 n Q_0 - A_0 n^2 \quad (4.33)$$

Se liniarizează relația de mai sus prin dezvoltarea în serie Taylor în jurul soluției  $(p, q, n)$ , cu:

$$P = P_0 + p; \quad Q = Q_0 + q; \quad N = n_0 + n \quad (4.34)$$

Astfel,

$$R(Q_0 + q)^2 = A_2(Q_0 + q)^2 + A_1(n_0 + n)(Q_0 + q) - A_0(n_0 + n)^2 \quad (4.35)$$

și

$$P = q(-2A_2 + A_1 n_0) + (A_1 Q_0)n + 2A_0 n_0 n \quad (4.36)$$

Înlocuind  $\alpha_1 = (-2A_2 + A_1 n_0) < 0$  și  $\alpha_2 = A_1 Q_0 + 2A_0 n_0 > 0$  se obține ecuația liniarizată a caracteristicii pompei, respectiv:

$$\Delta P = \alpha_1 \Delta q + \alpha_2 \Delta n \quad (4.37)$$

cu

$$\Delta q = -\frac{\alpha_2}{\alpha_1} \Delta n = \left| \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right| \Delta n \quad (4.38)$$

și

$$\Delta p = \alpha_2 \Delta n \quad (4.39)$$

O altă posibilitate de exprimare neliniară a caracteristicii instalației este de a scrie variația de presiune din instalație ca o dependență de rezistența hidraulică a instalației  $R$  și debitul din instalație  $Q$ . Rezistența hidraulică a instalației variază în funcție de aria de curgere  $A(\theta)$ , a cărei configurație se schimbă odată cu unghiul  $\theta$  al obturatorului vanei. Astfel,

$$P = R \cdot Q^2 = f(R, Q) \quad (4.40)$$

unde:

$$R = \frac{1}{C_d^2 A^2(\theta)} = \frac{K}{A^2(\theta)} = f(\theta) \quad (4.41)$$

Derivata totală a caracteristicii instalației, dezvoltată în jurul punctului de echilibru  $(0,0)$ , este:

$$dP = \frac{\partial f}{\partial R} dR + \frac{\partial f}{\partial Q} dQ \quad (4.42)$$

În diferențe finite, relația de mai sus devine

$$\Delta P = Q_0^2 \Delta R + 2R_0 Q_0 \Delta Q \quad (4.43)$$

unde:

$$dR = \frac{\partial f}{\partial \theta} d\theta = -\frac{2 \cdot K \cdot A(\theta)}{A^4(\theta)} d\theta = -\frac{2}{A^3(\theta)} d\theta \quad (4.44)$$

În diferențe finite, pentru punctul de echilibru avem:

$$\Delta R = -\frac{2}{A^3(\theta)} \Delta \theta \quad (4.45)$$

Cu aceste dezvoltări, se obține forma liniară a instalației:

$$\Delta P = -\frac{2Q_0^2}{A^3(\theta)} \Delta\theta + 2R_0Q_0\Delta Q \quad (4.46)$$

Dacă se egalează cele două forme liniarizate obținute, relațiile (4.37) și (4.46), atunci:

$$-\frac{2Q_0^2}{A^3(\theta)} \Delta\theta + 2R_0Q_0\Delta Q = \alpha_1\Delta Q + \alpha_2\Delta n \quad (4.47)$$

respectiv

$$(\alpha_1 - 2R_0Q_0)\Delta Q = -\frac{2Q_0^2}{A^3(\theta)} \Delta\theta - \alpha_2\Delta n \quad (4.48)$$

Așadar, relația obținută facilitează modelarea reglării fuzzy pentru evitarea defectelor de proces cavitaționale.

#### 4.2.5. Considerații privind reglarea fuzzy a proceselor dinamice

Regulatorul cu logica fuzzy este definit prin trei elemente principale:

- fuzzificare: convertirea valorilor crisp de intrare în valori fuzzy, adică mulțimi de valori descrise lingvistic;
- baza de reguli de deducție: convertirea valorilor lingvistice de intrare și a valorilor lingvistice de ieșire;
- defuzzificare: convertirea valorilor lingvistice de ieșire în valori crisp de ieșire.

Pentru optimizarea unui *RLF* este necesară cunoașterea acestor trei elemente în raport cu intrările și ieșirile sistemului. Prin optimizarea *RLF* se urmărește ajustarea funcțiilor de apartenență și a setului de reguli de deducție. O metodă de proiectare este „trial and error”, care are dezavantajul că durează mult și este definită pentru *RLF* cu sute de reguli. O altă metodă constă în transpunerea *RLF* într-o rețea neurală și în optimizarea acesteia printr-o metodă de instruire, după care se poate reveni la structura *RLF*.

Utilizarea reguletoarelor bazate pe logica fuzzy nu necesită cunoașterea unui model exact pentru procesele reglate și pot fi aplicate cu succes și proceselor cu neliniarități esențiale.

În conducerea fuzzy se pornește de la formularea acțiunilor de reglare, cu ajutorul unor reguli lingvistice de forma:

$$DACĂ (premise) \quad ATUNCI (concluzia) \quad (4.49)$$

în care *premise* conține o serie de condiții, care sunt satisfăcute, iar *concluzia* conține comenzile care trebuie aplicate în cazul validării *premisei*.

Acest tip de comandă bazată pe cunoștințe devine foarte utilă pentru conducerea proceselor complexe, la care este dificilă determinarea unui model

matematic precis, în schimb un operator uman poate conduce acest proces bazându-se pe experiența sa.

Așadar, spre deosebire de sistemele clasice, în care acțiunile de reglare se bazează pe mărimi ferme, cu valori numerice bine precizate, sistemele cu logică fuzzy folosesc o caracterizare calitativă a proceselor, exprimată lingvistic, pe care o adaptează permanent în funcție de modul de evoluție a acestor procese.

Un proces tehnic este descris prin mărimi fizice, care iau valori reale, precise, bine determinate într-un domeniu de valori. Descrierea unei anumite situații, a unui fenomen sau a unui procedeu conține, în general, expresii vagi, cum ar fi: câtva, mult, adesea, rar, cald, frig, departe, aproape, mic, mare etc. Expresii de acest gen formează valori ale *variabilelor lingvistice* din logica fuzzy. Pentru a permite tratarea numerică, aceste atribute trebuie definite cu ajutorul unor *funcții de apartenență*.

Logica fuzzy a fost introdusă pentru a trata matematic informațiile vagi. Reprezentarea matematică a informației vagi are la bază introducerea funcției de apartenență ca o măsură a apartenenței unui element la o mulțime sau la o valoare lingvistică. Modelarea lingvistică constă în asocierea unei mărimi fizice unei variabile lingvistice, cu mai multe valori lingvistice, pe baza cărora se vor putea asocia și diverse funcții de apartenență.

În teoria clasică a mulțimilor se poate spune cu precizie dacă un element aparține sau nu unei mulțimi. Fie  $X$  o mulțime cu elemente  $x \in X$  și  $A$  o submulțime a sa,  $A \subset X$ . Funcția caracteristică a lui  $A$  este:

$$\mu_A : X \rightarrow \{0,1\} \quad \mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{dacă } x \in A \\ 0 & \text{dacă } x \notin A \end{cases} \quad (4.50)$$

În teoria mulțimilor vagi, între apartenență și non-apartenență a unui element la o mulțime există o serie de situații intermediare cu o reprezentare continuă. Asemenea mulțimi, la care apartenența nu este clar delimitată, dar este definită progresiv printr-o funcție continuă, se numesc mulțimi fuzzy. Fie  $X$  o mulțime clasică, care mai poartă numele de univers de discurs.

Fiecare submulțime  $A \subset X$  este caracterizată de o funcție:

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (4.51)$$

numită *funcție de apartenență*, care stabilește gradul de apartenență al unui element din  $X$  la mulțimea fuzzy respectivă.

Dacă  $X$  este un univers de discurs și  $x \in X$ , mulțimea fuzzy  $A$  definită pe  $X$ , se poate scrie ca o mulțime de perechi ordonate de forma:

$$A = \{x, \mu_A(x) / x \in X\} \quad (4.52)$$

În general, funcțiile de apartenență corespunzătoare unei valori lingvistice se pot reprezenta sub formă grafică, analitică sau numerică. Cele mai răspândite funcții de apartenență sunt:

☑ funcția de apartenență triunghiulară, figura 4.19:

$$\mu = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (4.53)$$



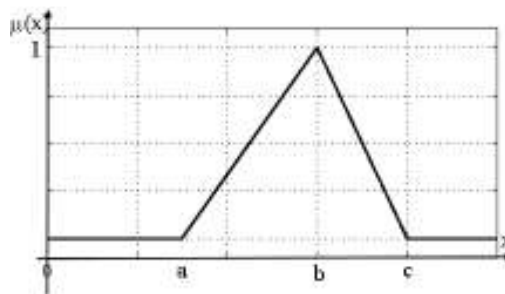


Fig. 4.19. Funcția de apartenență triunghiulară

- ☑ funcția de apartenență trapezoidală, figura 4.20:

$$\mu = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (4.54)$$

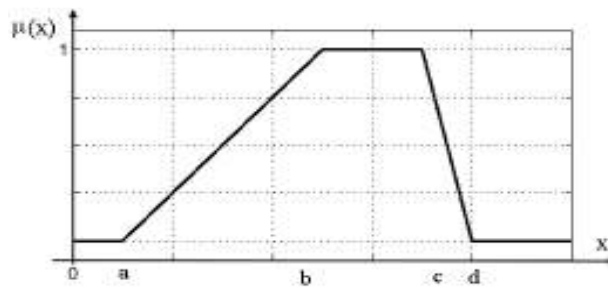


Fig. 4.20. Funcția de apartenență trapezoidală

- ☑ funcția de apartenență de tip Gauss, figura 4.21:

$$\mu = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.55)$$

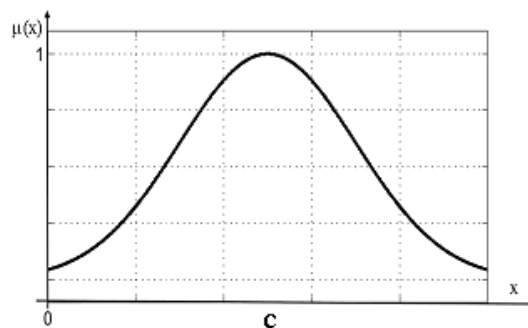


Fig. 4.21. Funcția de apartenență tip „clopot”

Prelucrarea informației fuzzy, adică a termenilor lingvistici, se face prin intermediul operatorilor de conectare specifici teoriei mulțimilor fuzzy. Dintre

aceștia cei mai semnificativi sunt operatorul logic fuzzy și operatorul logic SAU. Intersecția a două mulțimi se evaluează prin relația:

$$\mu(x) = (\mu_{x1} \cap \mu_{x2})(x) = \min(\mu_{x1}, \mu_{x2}), (\forall) x \in X \quad (4.56)$$

Funcția de apartenență a intersecției este ilustrată grafic în figura 4.22. Acest operator prezintă proprietățile de comutativitate și asociativitate deosebit de importante pentru prelucrarea informației fuzzy.

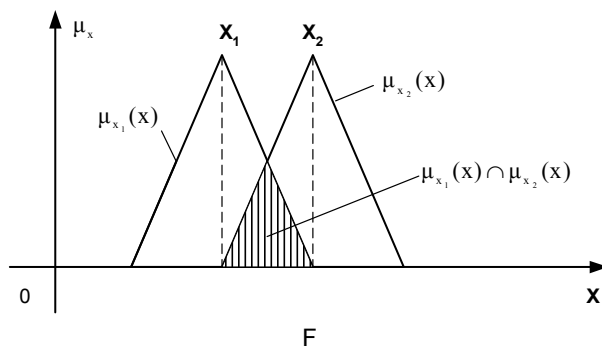


Fig. 4.22. Modul de acțiune al operatorului fuzzy SI

Operatorul logic SAU se mai numește și conectorul SAU și corespunde reuniunii unor mulțimi fuzzy conform relației:

$$\mu = \mu_{x1} \cup \mu_{x2} : X \rightarrow [0,1] \quad (4.57)$$

Evaluarea acestui operator se face cu relația:

$$\mu(x) = (\mu_{x1} \cup \mu_{x2})(x) = \max(\mu_{x1}, \mu_{x2}), (\forall) x \in X \quad (4.58)$$

Aplicarea relației (4.58) este ilustrată în figura 4.23. Conectorul SAU și operatorul de evaluare aferent prezintă, de asemenea, proprietățile de comutativitate și asociativitate.

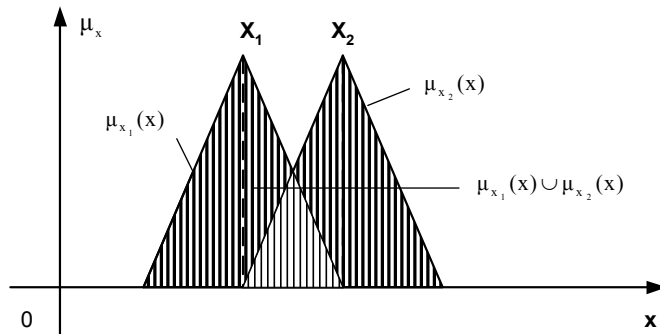


Fig. 4.23. Modul de acțiune al operatorului fuzzy SAU

În teoria mulțimilor fuzzy se definesc și alți operatori logici, dar care au un grad mai restrâns de utilizare în conducerea fuzzy a proceselor.

În cazul reglării fuzzy, algoritmi de reglare convențională sunt înlocuiți printr-o serie de reguli lingvistice de forma *DACĂ (premise) ATUNCI (concluzie)*. Astfel, se obține un algoritm euristic care poate lua în considerare experiența operatorului uman pentru conducerea proceselor.

În aceste condiții, logica fuzzy se poate aplica cu succes la conducerea proceselor dinamice. Configurația de bază a unui regulator fuzzy este reprezentată în figura 4.24.

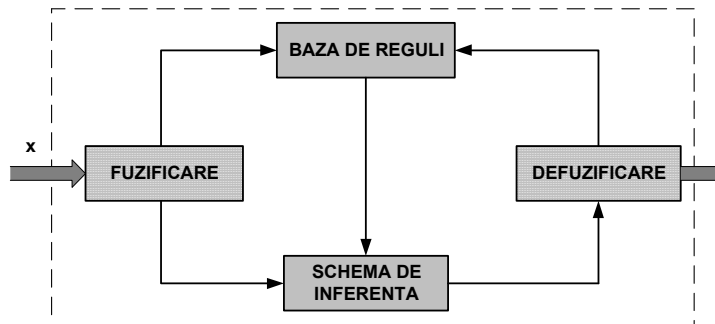


Fig. 4.24. Schema de principiu a unui regulator fuzzy

Se observă că un regulator fuzzy (RF) este alcătuit din următoarele blocuri funcționale:

- ☑ *Baza de reguli.* Aceasta este alcătuită din toate regulile *dacă-atunci*. În premise sunt introduse valorile de intrare  $x$ , astfel încât să se poată decide care regulă poate fi utilizată și care nu și în ce mod anume poate fi utilizată. Ieșirile regulilor care au fost activate sunt puse împreună și trimise spre interfața de defuzzificare. Această bază de reguli este formulată de către un expert în conducerea procesului respectiv.
- ☑ *Fuzzificarea.* Aceasta înseamnă convertirea valorilor crisp de intrare în valori fuzzy, adică mulțimi de valori descrise lingvistic; deci mărimile de intrare nu sunt mulțimi fuzzy, ci valori reale precise. Astfel ele trebuie fuzzificate, adică acestora trebuie să li se atribuie valori fuzzy. Aceste valori fuzzy se introduc în premisele *dacă - atunci*. Ca rezultat se determină care regulă poate fi activată împreună cu gradul de apartenență rezultat de la fiecare regulă. Acest grad depinde de cât de mult intrarea și premisele regulii corespund una alteia.
- ☑ *Blocul de inferență.* În acest bloc se realizează, pe baza informațiilor fuzzificate, evaluarea bazei de reguli în vederea obținerii concluziei vagi.
- ☑ *Defuzzificarea.* Mulțimea fuzzy care trebuie defuzzificată are o formă foarte complicată, deoarece ea este o combinație de câteva mulțimi cu grade de apartenență limitate. Scopul interfeței de defuzzificare este de a găsi o singură valoare reală precisă  $u$  care să cuprindă mulțimea fuzzy de ieșire.

În domeniul reglării fuzzy s-au dezvoltat numeroase structuri de reglare, care se bazează pe teoria logicii fuzzy.

Etapile dezvoltării unui regulator fuzzy pot fi rezumate astfel:

- ☑ analiza structurală și funcțională a procesului de reglare în vederea cunoașterii comportării acestuia la diverse semnale de intrare și perturbații;
- ☑ modelarea matematică a procesului condus, simularea acestuia pe calculator și compararea cu eventuale date experimentale;
- ☑ alegerea schemei de reglare, a numărului și tipurilor de regulatoare fuzzy folosite;
- ☑ stabilirea mărimilor de intrare și ieșire din regulator, domeniile de variație a acestora;
- ☑ definirea termenilor lingvistici asociați mărimilor de intrare și ieșire și definirea funcțiilor de apartenență corespunzătoare;
- ☑ stabilirea bazei de reguli care realizează conectarea premiselor de concluzii, în acord cu descrierea lingvistică a comportării regulatorului;
- ☑ alegerea tipului de inferență și a metodei de defuzzificare în funcție de caracteristicile și performanțele dorite pentru procesul condus;
- ☑ simularea în buclă deschisă a comportării regulatorului;
- ☑ simularea pe calculator a întregului sistem de reglare automată;
- ☑ acordarea regulatorului pentru optimizarea funcționării sistemului de reglare;
- ☑ implementarea practică a regulatorului fuzzy, care se poate face software sau hardware;
- ☑ validarea soluției și integrarea regulatorului în aplicația practică precum și acordarea finală a acestuia în vederea optimizării conducerii procesului.

Pentru convertirea fuzzificării, se consideră că funcțiile de apartenență sunt triunghiulare, pentru că în acest mod se pot reprezenta mai ușor valorile crisp de intrare. Astfel se poate defini un neuron fuzzy, figura 4.25, unde ponderea se definește prin relația:

$$z_i = 1 + \gamma_i |x - x_i|, \quad (4.59)$$

unde  $\gamma_i > 0$  și  $x_i$  o valoare arbitrară.

Pentru convertirea regulilor de bază, dacă se folosește regula "IF A THEN B", cu funcțiile de apartenență  $\mu_A(x)$  și  $\mu_B(y)$ , atunci mulțimea fuzzy rezultată pe universul  $A \times B$ , definită prin

$$R = \{(x, y), \mu_R(xy), x \in A, y \in B\} \quad (4.60)$$

are o funcție de apartenență, care de exemplu prin metoda MIN este

$$\mu_R(xy) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (3.61)$$

dacă însă avem mai multe reguli, atunci prin operația OR. Pentru ieșirea RLF se obține:

$$\mu_G(y) = \max \min\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)]\} \quad (4.62)$$

Operația de generare a regulilor include operația de MAX, MIN care pot fi implementate de neuroni. De exemplu, operația de complement sau de negare fuzzy este definită prin:

$$\mu_{A^c} = 1 - \mu_A \quad (4.63)$$

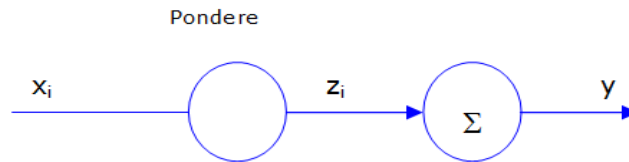


Fig. 4.25. Definirea unui neuron fuzzy

Această operație de negare fuzzy poate fi implementată prin schema din figura 4.26.

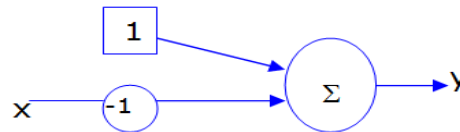


Fig. 4.26. Operația de complement neuro-fuzzy

Schemele pentru implementarea cu neuroni a operațiilor fuzzy MIN și MAX au la bază folosirea mai multor neuroni, care se reprezintă prin simbolurile din figura 4.27.

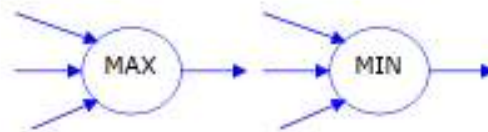


Fig. 4.27. Reguli de deducție neuro-fuzzy

Deci reprezentarea conversiei regulilor de deducție, figura 4.28, include operații logice fuzzy de MIN pentru fiecare regulă și însumarea efectelor acestor reguli prin operația MAX.

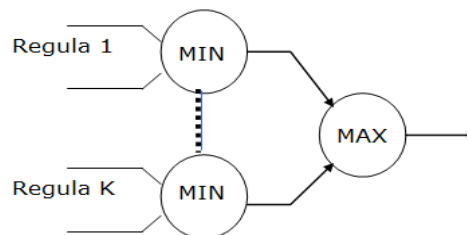


Fig. 4.28. Conversia regulilor de deducție neuro-fuzzy

Pentru conversia operației fuzzy logice de defuzzificare se consideră că pentru defuzzificare, se adoptă metoda centrului de arie, adică valoarea crisp a ieșirii care este dată de relația:

$$y = (\sum_i y_i \mu_i(y_i)) / (\sum_i y_i \mu_i). \quad (4.64)$$

Ca studiu de caz ne vom referi la reglarea fuzzy a turației pompei cuplată la standul de cavitație, pentru care se adoptă schema de principiu din figura 4.29.

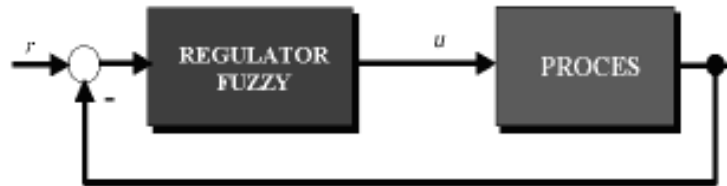


Fig. 4.29. Reglarea fuzzy directă a procesului

Pentru aceasta a fost elaborat un program de simulare, în baza căruia s-au obținut rezultatele prezentate în figura 4.30.

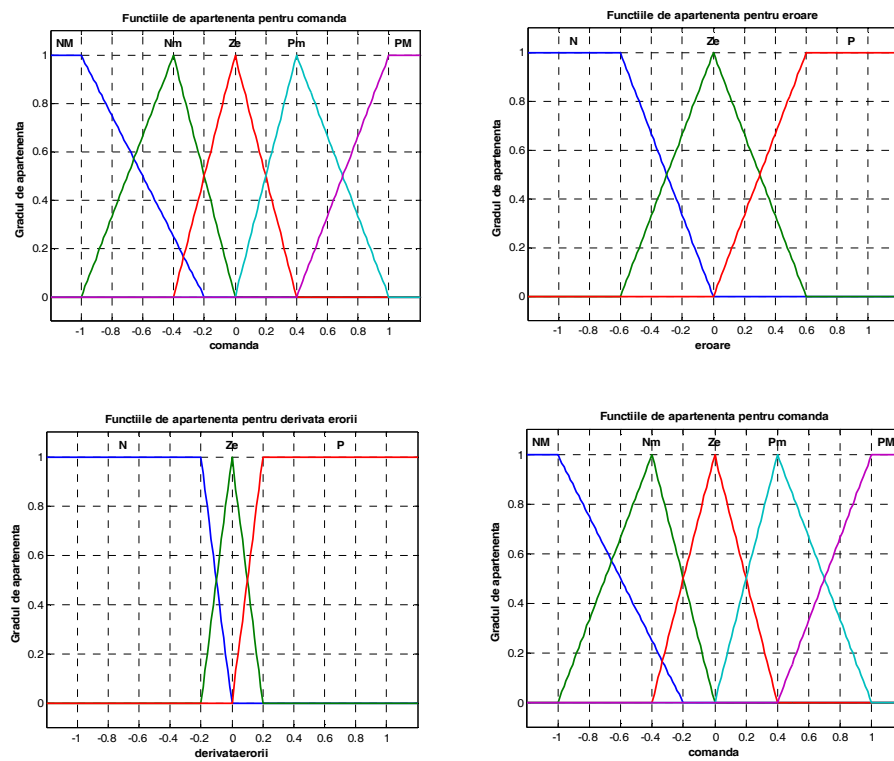


Fig. 4.30. Variația funcțiilor de apartenență pentru regulatorul fuzzy

Regulatorul fuzzy folosit în instalația experimentală CONTMENT pentru verificarea ventilelor industriale la cavitație va funcționa astfel încât ventilul de reglare să funcționeze în afara domeniului de cavitație conform caracteristicii de cavitație. Adică dacă în instalație se cere un debit, numit debit de referință  $Q_{ref}$ ,

la o poziție  $\alpha_1$  a obturatorului ventilului (vanei) căderea de presiune pe ventil va fi  $\Delta P_1$  iar funcționarea ventilului se face în regim de cavitație. Pentru a ieși din acest regim, regulatorul fuzzy de poziție va schimba poziția obturatorului la un unghi  $\alpha_1$  pentru care prin instalație vom avea un alt debit, pe care însă regulatorul fuzzy de debit (coroborat cu regulatorul fuzzy de poziție) îl va corecta schimbând turația pompei prin variația de turație, astfel încât debitul în instalație să rămână cel de referință.

Având în vedere cele mai sus menționate s-au realizat programe numerice în mediul de simulare LabVIEW. Rezultatele simulărilor sunt prezentate în continuare.

S-au făcut simulări numerice pentru estimarea parametrilor sistemului hidraulic dat (instalația experimentală CONTMENT). Plecând de la funcția de transfer de ordinul doi, continuă, asociată instalației

$$H_c(s) = \frac{1}{10s^2 + 6s + 1} \quad (4.65)$$

s-a evaluat funcția de transfer discretă,

$$H_d(z) = \frac{0,0004z + 0,0004}{z^2 - 2z + 0,9} \quad (4.66)$$

După estimările făcute pentru sistemul hidraulic în urma cărora s-a determinat funcția de transfer discretă a instalației care modelează funcționarea ventilului de reglare în condițiile evitării inițierii fenomenului de cavitație, s-au făcut simulări numerice pentru o reglare analogică a sistemului în care parametrul de reglare este debitul.

După simulările obținute pentru sistemul hidraulic al ventilului de reglare funcționând în instalație în afara incipienței fenomenului de cavitație având procesul tehnologic reglat cu regulator analogic, se construiește un regulator fuzzy având două intrări, o ieșire și 9 reguli.

Rezultatele obținute din simularea unui sistem cu comanda fuzzy pentru reglarea debitului în instalațiile hidraulice de testare a ventilelor industriale, pentru testarea condiției la cavitație folosind un regulator fuzzy cu 9 reguli pentru care variația funcțiilor apartenența pentru derivata erorii și pentru comanda sunt date în figura 4.31.

Rezultatele obținute pot fi extinse pentru alte tipuri de ventile la alte diametre nominale ce funcționează în instalații la care fluidul vehiculat este altul decât apa.

### 4.3. Metoda de mentenanță bazată pe risc

Prezentul studiu are scopul de a detalia metodologia de concepție holică pentru mentenanță prezentată anterior, prin dezvoltarea metodei de mentenanță holică bazată pe risc (MHBR). Metoda, așa cum se va vedea în continuare, include noi demersuri și metode specifice de analiză calitativă și cantitativă pentru obținerea obiectivului general propus.

Premiza de la care se pleacă o constituie faptul că o instalație, chiar dacă va fi bine proiectată, nu va putea fi menținută în condiții de siguranță sau fiabilitate dacă nu este mentenabilă la un nivel corespunzător.

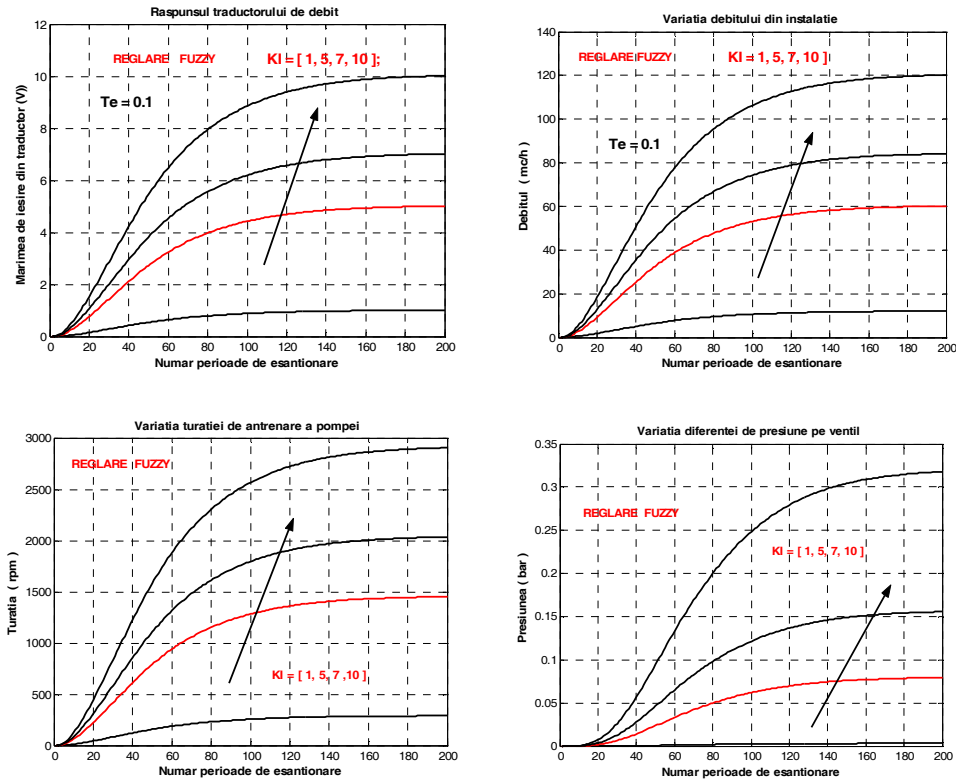


Fig. 4.31. Variația mărimilor din proces și reglarea fuzzy

Obiectivele operaționale ale procesului de mentenanță holonic propus este de realizare a siguranței, cu cel mai redus cost posibil, făcând uz de cunoașterea defectelor și accidentelor. Conceptul de mentenanță holonic bazat pe risc a fost dezvoltat pentru componentele cu risc înalt și cu frecvență mărită la criteriul de risc tolerabil. MHBR furnizează un instrument pentru planificarea mentenanței și luarea deciziei pentru a reduce probabilitatea de defectare a echipamentului și consecințele acesteia. În acest studiu, analiza riscului și metodologia propusă pentru mentenanța bazată pe risc este utilizată pentru identificarea și clasificarea factorilor de influență predictibili la nesiguranță, respectiv care afectează calitatea.

Elementele critice, ca siguranța instalației, calitatea producției și creșterea costului pentru departamentul de mentenanță, pot reprezenta de la 15 la 70% din totalul costului de operare (Bevilacqua, 2000). Din aceste considerente, schimbările majore pe care inginerii de mentenanță trebuie să le implementeze în strategiile lor, trebuie să conducă la maximizarea disponibilității și eficienței echipamentului, controlul deteriorării echipamentului, asigurarea operării în condiții sigure de mediu.

De subliniat este faptul că trebuie să existe o legătură strânsă între calitatea producției (operare) și mentenanță, deoarece calitatea producției depinde de condiția echipamentului. Deci, în scopul de minimizare a frecvenței și



a consecințelor defectării sistemului este necesară planificarea pentru mentenanță. MHBR, este concepută pentru a studia toate modurile de defectare, determinându-se asocierea riscului cu acele moduri de defectare care minimizează apariția riscului înalt.

### 4.3.1. Metodologii de analiză a riscului

Există peste 60 de metodologii de analiză a riscului, de la o varietate de referințe. De asemenea, metodologiile și tehnicile de analiză a riscului sunt clasificate în: deterministe, probabilistice și o combinație de abordări probabilistice și deterministe (tab. 4.1).

Tabelul 4.1. Clasificarea metodologiilor de analiză a riscului

Tipul metodei	Deterministic	Probabilistic	Combinat
Cantitative	Analiza erorii de acțiune; checklist; analiza hazardului de concepție; analiza defectării, orientate pe scop; hazard și operabilitate (HAZOP); Failure Mode Effect Analysis (FMEA); operabilitatea hazardului uman (Human HAZOP); sistem de identificare a hazardului (HAZID); diagrama logică conducătoare; operabilitate și hazard optim (Opt HAZOP); analiza de siguranță a nivelului instalației (PLSA), analiza preliminară a riscului; analiza hazardului de proces (PHA); Reliability Block Diagram (RBD); analiza tacurilor; Analiza Ce dacă?; analiza Sneak; matrice de risc.	Tehnica Delphi, judecata de expert, clasificare rapidă	Analiza accidentului maxim credibil; operabilitate și hazardul culturii de siguranță (SCHAOP); analiza structurală de fiabilitate (SRA).
Cantitative	Index hazard accident; index hazard reacții chimice; index expunere chimică (CEI); index expunere la foc (FEI); index expunere la explozie și foc (FEDI); identificare	Analiza arborilor de evenimente (ETA); analiza arborilor de defectare (FTA); rețele Petri; Probabilistic Fault Tree (PROFAT); Fuzzy Fault Tree	Metoda de analiză sistematică a analizei de risc (MOSAR); analiza cantitativă de risc (QRA); analiza rapidă de risc; analiza riscului

	hazard și clasificare (HIRA); pierderea anuală fracțională (IFAL); index de risc reactiv (RRI); index hazard grad siguranță (SWeHI); index de toxicitate (TDI);	Analysis; risc integral.	probabil (PRA); studiul internațional de grup pe risc (ISGRA); atribuirea riscului optim (ORA); metodologia IDEF.
Semi-cantitative	Analiza efectului domino; analiza protecției de nivel (LOPA); index de risc predictiv; organizare de viață a lumii (WHO); numărul priorității de risc	IAEA-TECDOC-727; Maintenance Analysis; Semi-Quantitative Fault Tree Analysis; Short Cut Risk Assessment	Analiza siguranței; analiza criticității și a efectului modului de defectare (FMECA); facilitatea riscului de revizie (FRR)

Metodele deterministice iau în considerare producția, echipamentul și cuantifică consecințele pentru ținte variate: oameni, mediu și echipament.

Această abordare admite că întâmplarea de hazard și consecințele sunt cunoscute și sigure.

Metodele probabilistice sunt bazate pe probabilitatea de frecvență a aparițiilor de hazard sau potențiale accidente. Acestea se clasifică în calitative, cantitative și semi-cantitative, ca în tabelul 4.1.

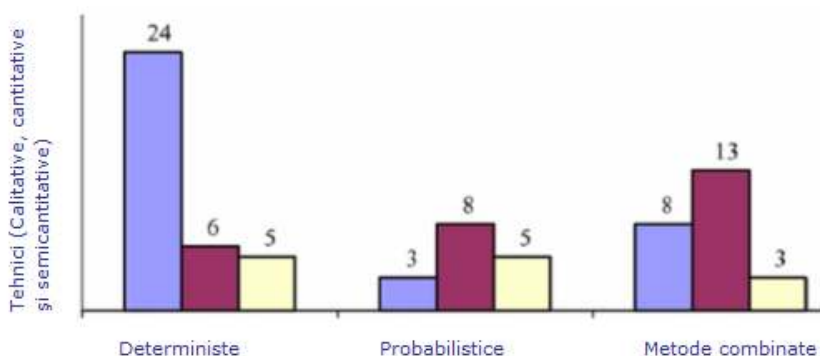


Fig. 4.32. Reprezentare număr tehnici funcție de tipul analizei de risc

În clasificarea din tabelul 4.1, majoritatea din metode sunt deterministe ca în figura 4.32. Astfel, dintre 75 studii de cercetare, 35 sunt deterministe, în timp ce 16 și 24 sunt probabilistice. Din 35 de studii deterministe, 24 au folosit tehnici calitative de evaluare în timp ce tehnici semicantitative și cantitative au fost adoptate pentru 8 și 3 studii, respectiv din 16 studii considerate probabilistice, 3 utilizează tehnici calitative, în timp ce 8 și 5 sunt cantitative și semicantitative.

Tehnicile pentru grupul deterministic și calitativ utilizează etapa de identificare a hazardului în procesul de atribuire a riscului.

Tehnicile categorisite ca deterministe și cantitative au, în principal, indici de hazard pentru atribuirea rapidă și ușoară a riscului. Cele mai multe tehnici categorisite în probabilistice și cantitative aplică cuantificarea probabilității, a scenariilor de accident și defectul evenimentului de top.

### 4.3.2. Demersul metodei

Scopul principal al metodei MHBR este să reducă riscul rezultat ca și consecință a defectării facilităților de operare. Activitățile prioritare de mentenanță sunt bazate pe cuantificarea riscului în timpul defectării componentelor, deci riscul total poate fi minimizat folosind MHBR.

Cadrul MHBR, este format din două faze principale: aprecierea riscului și planificarea mentenanței holonice bazate pe risc.

Metodologia MHBR constă din șase module, figura 4.33.

Riscul poate fi definit ca o pierdere așteptată sau o defectare asociată cu apariția evenimentelor nedorite. Pentru identificarea riscului sunt folosite diferite tehnici (tab. 4.1) care implică detectarea amenințărilor potențiale, estimarea probabilității lor (număr de evenimente/interval de timp) și estimarea consecințelor (impact/eveniment). Combinarea acestor estimări reprezintă riscul (impact/interval de timp) asociat cu activitatea evaluată.

Aprecierea riscului integrează fiabilitatea și analiza de consecințe și încercă să răspundă la următoarele întrebări:

- Ce poate conduce la greșeli?
- Cum poate fi greșit?
- Care este probabilitatea incidentului?
- Care vor fi consecințele?

*Atribuirea riscului* (fig. 4.34), poate fi cantitativă sau calitativă. Riscul cantitativ atribuit este realizat de estimarea frecvenței și a consecințelor. Atribuirea riscului cuantificat este acceptat când este rezonabil și practicabil în termeni de disponibilitate a informațiilor și a datelor. Atribuirea riscului calitativ este aplicabil când riscul este mic, binecunoscut și nu este localizat în vecinătatea dezvoltării de posibile incompatibilități. O simplă descriere a tipurilor de accidente majore, consecințele și probabilitatea lor, este realizată suficient de bine în standarde specifice. Rezultatele sunt reprezentate în formă de matrice risc, unde probabilitatea și consecința reprezintă axele. În succesiune, pentru a lua decizii propriu-zise de mentenanță, sunt necesare studiul atent de analiză a riscului, abordările și rezultatele lor.

Identificarea hazardului, analiza consecinței inițiale și estimarea factorilor de risc determină factori care sunt foarte importanți și care vor trebui luați în considerare în luarea deciziei (Brown, 2003). Diagrama cauzelor și efectelor pentru afectarea calității de analiză a riscului este arătată în figura 4.35.

Factorii dependenți de calitatea analizei de risc sunt:

1. Identificarea hazardului și analiza consecințelor inițiale:
  - Analiza de hazard preliminară;
  - Informare și date;
  - Metoda.
2. Estimarea riscului:
  - Metoda;
  - Estimarea frecvenței;
  - Estimarea consecinței;
  - Analiza funcțională (identificarea funcțiilor critice a sistemului);
  - Nesiguranța și analiza de sensibilitate.
3. Rezultate:
  - Calitative;
  - Cantitative.

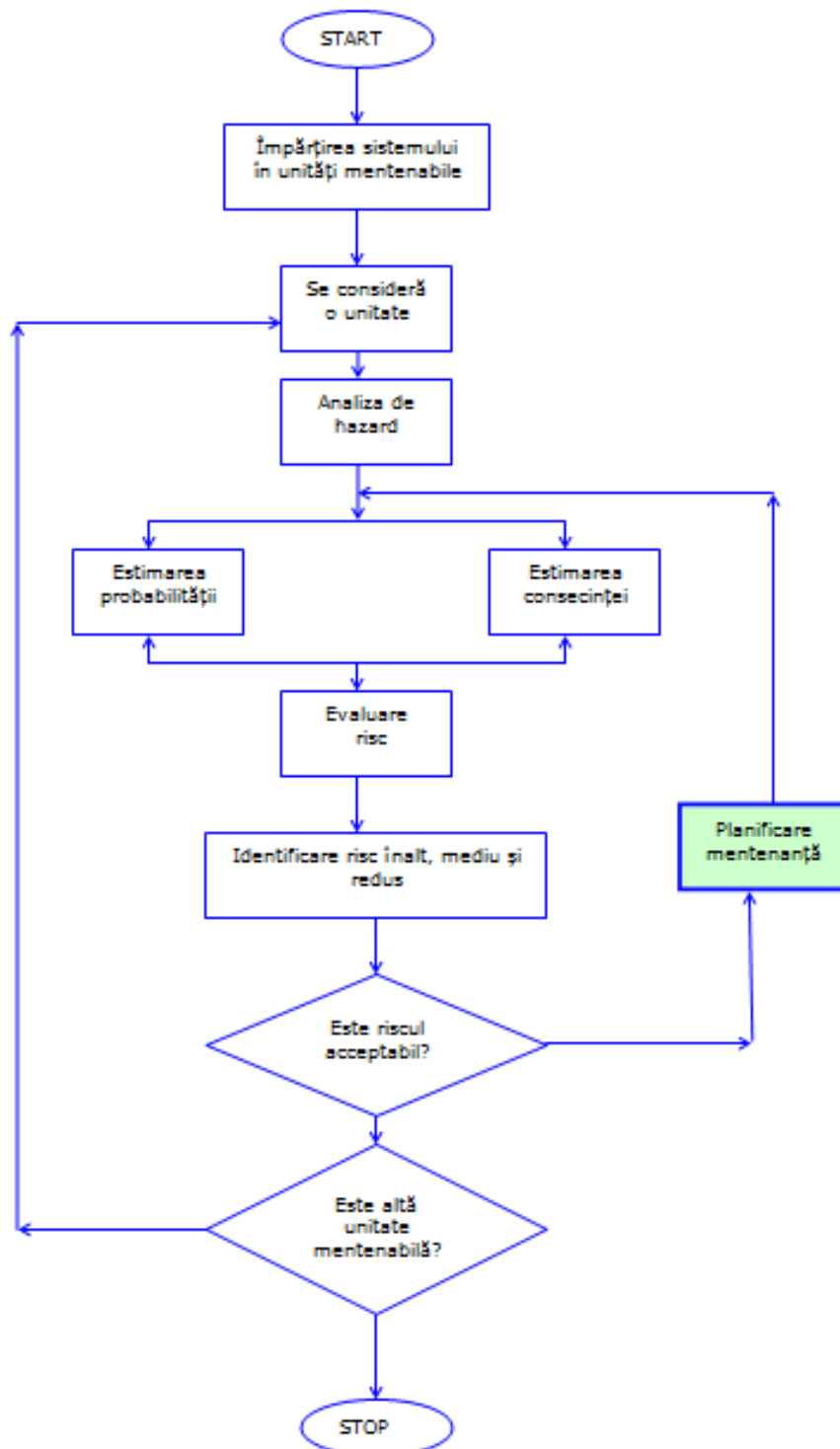


Fig. 4.33. Metodologia de mentenanță holistică bazată pe risc

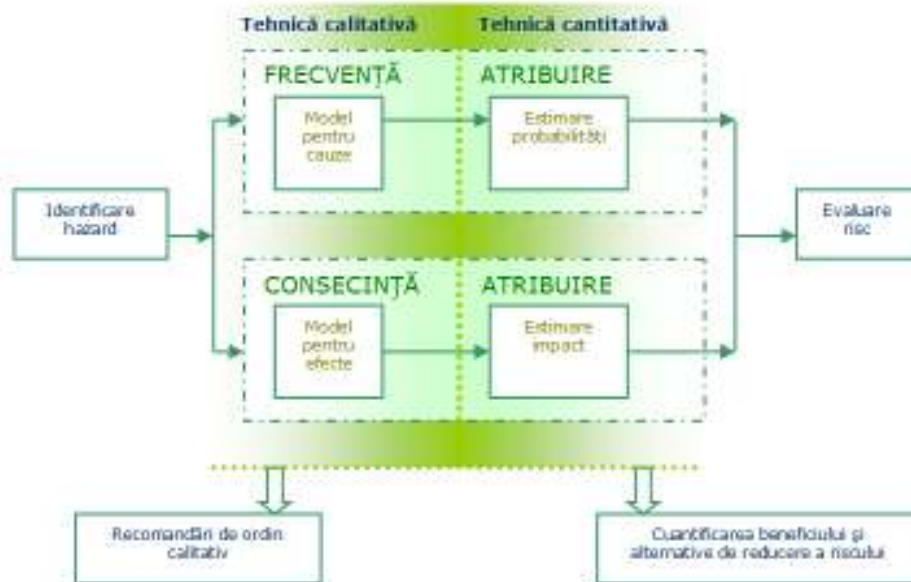


Fig. 4.34. Procesul de atribuire a riscului

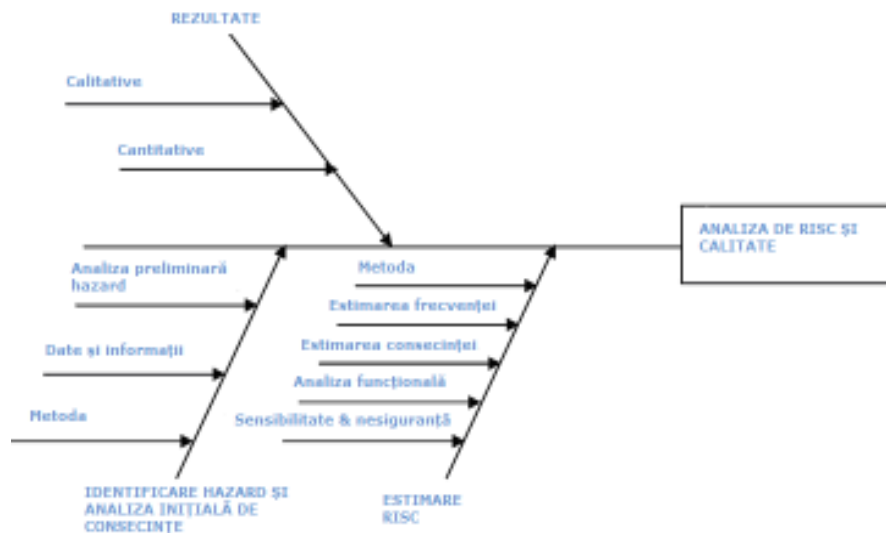


Fig. 4.35. Factorii dependenți de calitate pentru risc

Planificarea mentenanței trebuie să stabilească cel mai mic risc pentru criteriul de acceptare și reducere a probabilității de defectare. Metoda analizei arborelui de defectare este utilizată în calcularea intervalului de mentenanță bazată pe risc.

Tabelul 4.2. Clasificarea demersului posibil pentru MHBR pe module

Module	Modele și tehnici
Analiza hazardului	Scenariu de accident maxim credibil (MCAS);

(dezvolta-rea scenariului de defectare)	dezvoltarea arborelui de evenimente;
Estimarea consecințelor	Modele de surse, modelele intensității de impact, modelele gazului toxic, modelele de foc și explozii; opinia expertului.
Estimarea probabilităților	Analiza arborilor de defect (AD), analiza arborilor de defect probabilistic (PROFAT); opinia expertului.
Estimarea riscului	Fuzzy logic; matricea de risc; produs simplu de probabilitate de defectare și pierderea defectării.
Acceptarea riscului	Cel mai jos posibil rezonabil, ALARP, USEPA criteriul de acceptare.
Planificarea mentenanței	Analiza defectării inverse; procesul ierarhic analitic (AHP).

Pentru planificarea MHBR se propune o metodologie holistică (fig. 4.35), unde atribuirea riscului și siguranței în industriile de proces, cum sunt și cele nucleare, se bazează pe atribuirea de hazarduri majore. Metodologia propusă poate fi considerată ca o abordare holistică care integrează diferite aspecte în evaluarea riscului și siguranța sistemelor, incluzând opinia experților și analiza riscului.

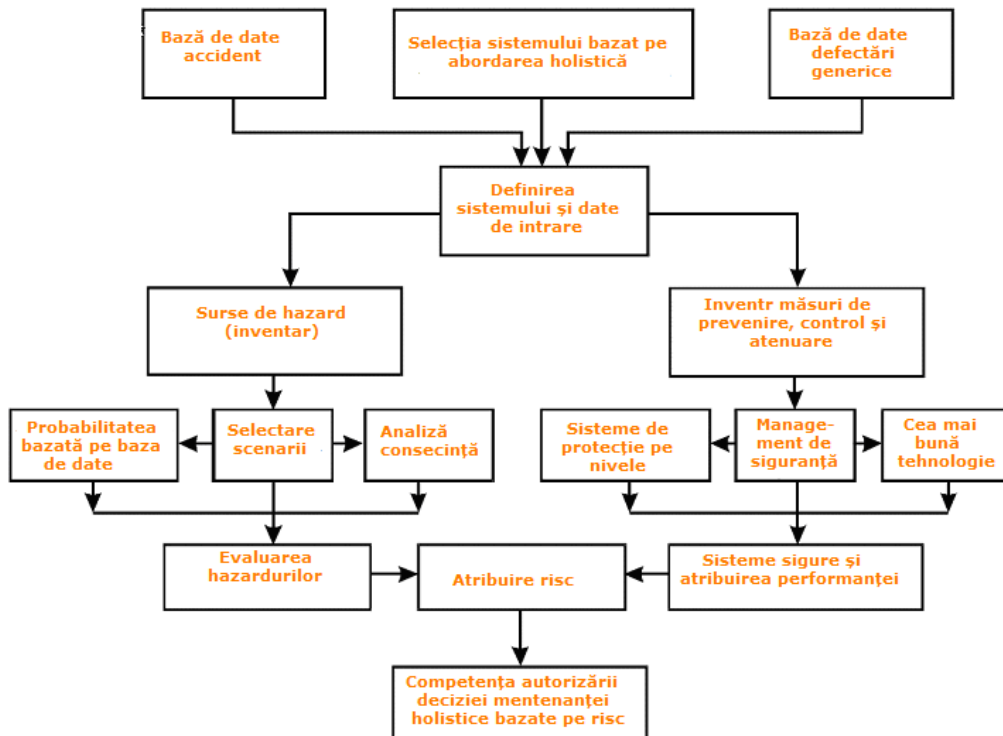


Fig. 4.36. Abordarea MHBR

Privind abordarea holistică a MHBR (fig. 4.36) se pot distinge următoarele etape:

*Analiza hazardului.* Analiza hazardului este făcută pentru identificarea scenariului de defectare. Scenariul defectării este bazat pe caracteristicile

operaționale ale sistemului, condițiile fizice sub care se operează, geometria sistemului și aranjamentele de siguranță.

*Aprecierea probabilității.* Obiectivul este de a calcula probabilitatea de apariție a defectului nedorit. Se calculează frecvența defectului sau probabilitatea defectului pentru perioada definită de timp.

*Aprecierea consecinței.* Obiectivul este să se cuantifice consecințele potențiale a credibilității scenariului de defectare. Consecințele pot fi: pierderea producției, pierderea bunurilor, pierderi de mediu, pierderi de vieți și pierderea siguranței.

*Estimarea riscului.* Riscul este estimat pentru fiecare unitate, bazat pe rezultate ale analizei de consecință și analiza defectării probabilistice.

*Acceptarea riscului.* Riscul calculat este comparat din nou cu criteriul de acceptare a riscului. Dacă orice unitate de risc depășește criteriul de acceptare, mentenanța este cerută la reducerea de risc.

*Planificarea mentenanței.* Planificarea mentenanței este adoptată la reducerea riscului.

### 4.3.3. Evaluarea hazardurilor

Pentru evaluarea hazardurilor din cadrul IDN se propune un demers integrat de MHBR, numit HAZOPA (*Hazard și Operabilitate Automată*).

Cerințele pentru siguranța instalațiilor nucleare determină, în prealabil, clarificarea următoarelor aspecte:

- descrierea instalației, a operării și a sistemelor importante pentru funcția de securitate și siguranță;
- descrierea funcționărilor anterioare cu ușurință;
- descrierea sistemului de management sub condiții normale și de urgență;
- verificarea experienței de operare recente, incluzând doza de radiație asimilată de operatori, scurgerea radioactivă, starea instalației și a echipamentului;
- evaluarea riscurilor afectate de funcționările cu ușurință;
- verificarea potrivirii instalației, prin comparație cu standardele de proiect curente.

Metoda HAZOPA, utilizată pentru identificarea hazardurilor asociate cu funcționările, este determinată de studiile de *hazard și operabilitate* cunoscute sub numele de HAZOP (Kletz, 1997), sau HAZID (McCoy, 1999). Această metodologie a fost dezvoltată pentru a demonstra siguranța în instalațiile chimice.

Pentru mentenanța bazată pe risc, respectiv pentru fundamentarea deciziilor, potrivit metodologiei de mentenanță holonică, se propune integrarea metodei HAZOPA, care se va realiza sub o nouă tehnologie software, fiind benefică îndeosebi pentru instalațiile cu funcții de securitate deosebită.

Toate instalațiile nucleare trebuie să demonstreze, încă din primele etape ale ciclului lor de viață, că vor putea fi operate în condiții de siguranță. Acest lucru o va putea realiza și metoda propusă, numită HAZOP Automată (HAZOPA).

Spre deosebire de metoda clasică HAZOP, metoda HAZOPA presupune includerea în demersul de evaluare analitic și sistemic a datelor cu caracter predictiv aparținând mentenanței de diagnostic și prognostic, respectiv a datelor de monitorizare vibrații, zgomote, uzură, termografie etc.

Metoda HAZOPA se poate implementa de o echipă de specialiști având ca suport comun software integrat, pentru a furniza metode de analiză a funcționării, determinarea cazurilor în care defectele sau defectările pot apare și consecințele acestor defectări.

Toți membrii echipei trebuie să cunoască domeniul instalației sau funcțiunilor pe care le reprezintă. De obicei, echipa este formată din 4...6 persoane, reprezentanți ai departamentelor de tehnologie proces și operare, a departamentului de mentenanță și un secretar, conduse de un lider, care în mod normal trebuie să fie independent de echipa de proiectare, competent pentru a face modificări sau pentru managementul instalației. Alți reprezentanți vor putea fi apelați la asistarea expertizelor adiționale ce vor putea fi cerute, de exemplu: fizicieni, proiectanți, ingineri de instrumentație și control, cercetători pe diverse domenii de interes.

Metoda HAZOPA studiază sistematic toate stadiile importante ale operării sau secțiuni ale proceselor din instalație.

Pentru fiecare stadiu se consideră:

- Posibilele căi în care pot apărea schimbări în operare (acestea se referă la deviații);
- Cum pot apărea aceste deviații la identificarea de evenimente inițiate determinate de cauze;
- Care sunt consecințele în cazul apariției deviațiilor;
- Ce control managerial sau fizic este necesar pentru prevenirea deviației sau atenuarea consecințelor (acestea se referă la măsuri de „safeguards”).

Prin suportul software și hardware, metoda HAZOPA examinează pas cu pas toate echipamentele, pentru cunoașterea deviațiilor de la condițiile normale de funcționare și a defectelor care pot apărea. Raportul în regim dinamic temporal (Anghel, 2006) ce se va obține (fig. 4.37) va include toate deviațiile, cauzele lor, consecințele în performanța echipamentelor, analizele acestor consecințe, protecții implementate (activ și/sau pasiv), sugestii.

Avantajele metodei HAZOPA sunt:

- reduceri semnificative de timp și efort față de metoda HAZOP;
- realizarea studiului mult mai ușor și detaliat;
- minimizarea influenței factorului uman.

În mod uzual, metoda HAZOP nu ia în considerare durata și amplitudinea deviației generate în timpul operării (de exemplu: temperatura, compoziția, debitul de fluide) sau mentenanței predictive.

Inconvenientul acestui aspect deosebit de important este rezolvat prin analiza HAZOPA, care ia în calcul modelul matematic cel mai apropiat al funcțiunii de tehnologie de proces sau mentenanță predictivă și operațională, deci modelul care aproximează foarte bine partea de experiment real sau virtual, prin simulare adecvată. Într-un astfel de model, existența deviației poate fi ușor încorporată, putând fi investigate posibilele consecințe.

Metoda HAZOP Automată este utilizată pentru identificarea hazardurilor asociate cu tehnologia de operare și mentenanță, la instalația de schimb izotopic din cadrul IDN.

Demersul aplicării metodei HAZOPA (fig. 4.37) se subdivide pentru fiecare etapă de la 1 la 8, modelarea și simularea realizându-se cu diferite metode calitative și/sau cantitative, ca: AMDEC Automat, RBD, arbore de defectare fuzzy.



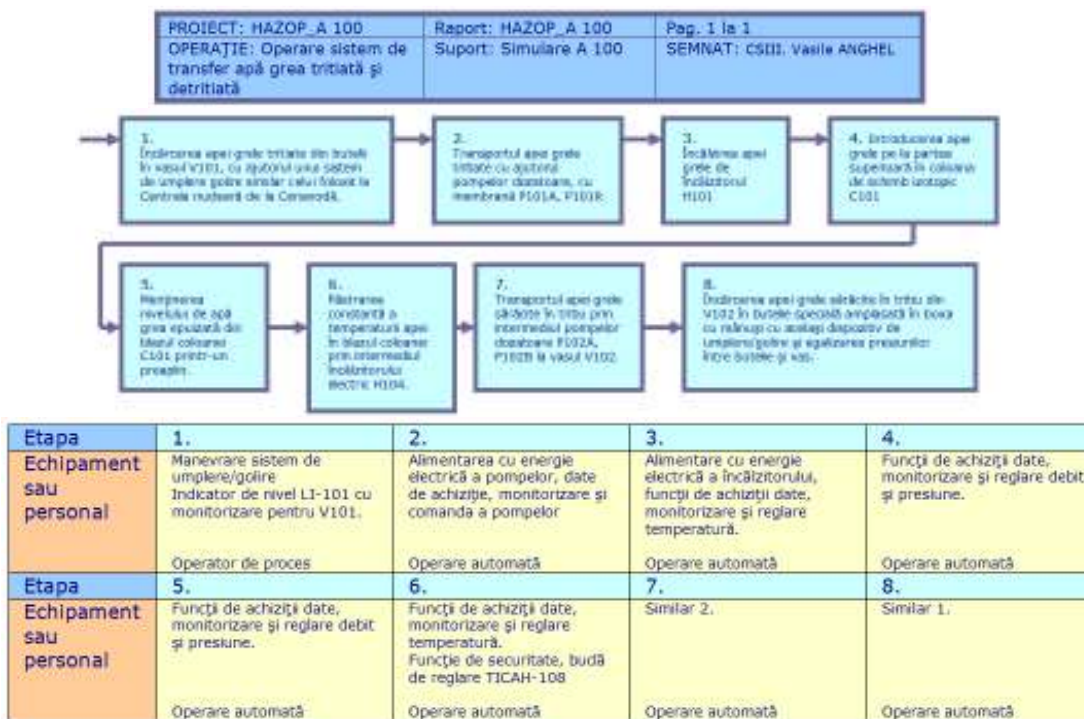


Fig. 4.37. Raport HOZOPA pentru instalația de schimb izotopic

De exemplu, pentru realizarea arborelui de defectare la etapa 2 se procedează conform figurii 4.38, putându-se vedea demersul obținerii cauzei rădăcină. În această etapă este supusă analizei de hazard defectul posibil la o pompă dozatoare pentru transportul apei grele tritiate. Pornind de la această ipoteză a evenimentului, evidențiat ca efect, se determină succesiv cauza producerii acestuia și se identifică cauza rădăcină.

Rezultă astfel că mentenanța holonică bazată pe metoda HAZOPA face posibilă integrarea funcțiilor de concepție-proiectare-operare și mentenanță operativă, realizând astfel obiectivul operațional de mentenanță de prognostic integrată holonic.

## 4.4. Metode de analiză a defectărilor

### 4.4.1. Analiza defectărilor în mentenanța holonică

În acest subcapitol se prezintă contribuții în domeniul analizei defectărilor sistemelor nucleare, rezultate din detalierea metodologiei MHBR, având în vedere faptul că mentenanța industrială bazată pe risc, deci și pe fiabilitate, trebuie să fie abordată ca și concepție integrată pe parcursul ciclului de viață, care vizează un produs tehnic mentenabil.

În acest demers, fiabilitatea este utilizată pentru a stabili probabilitatea că un component sau un sistem funcționează. Un sistem cu fiabilitate mare este un sistem robust și determină cerințe minime de mentenanță.

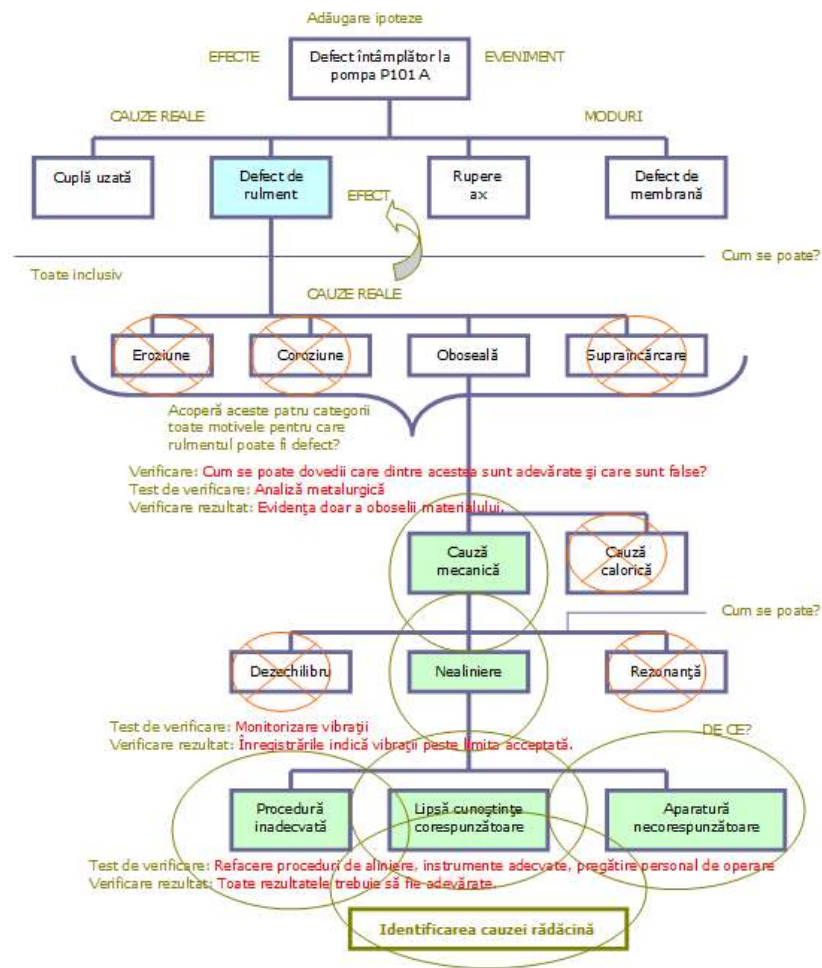


Fig. 4.38. Exemplu de realizare a arborelui de defectare pentru HAZOPA

Centrul atenției îl constituie "viața" produsului (sistem sau component), care trebuie considerată ca un proces descris cu ajutorul unei bucle de autoreglare.

Proiectarea, omologarea, asimilarea, producerea, exploatarea, mentenanța produsului sunt privite ca niște generatoare de informații despre fiabilitatea produsului, care - după o prelucrare și interpretare adecvată - servesc la fundamentarea deciziilor de ridicare a performanțelor în fiecare studiu al ciclului de viață (fig. 4.39.).

Abordarea produsului complex ca sistem necesită compararea "ieșirilor" cu "intrările", adică a performanțelor realizate cu anumite resurse, a efectelor economice ale unui grad de fiabilitate sporit, cu cheltuielile integrale (directe și indirecte) făcute pentru realizarea acestuia.

Tratarea sistematică mai înseamnă că produsul este văzut ca sistem cu structură complexă, compus din numeroase elemente (subansambluri, detalii etc.), componente între care există conexiuni și interdependențe diverse și multiple. Buna funcționare a produsului complex este rezultatul bunei funcționări a tuturor subansamblurilor componente. Subansamblurile, la rândul lor, se

compun din blocuri, până ce acest proces de descompunere identifică piesele, reperete etc. care au, într-adevăr, valoare operațională în gestiunea fiabilității.



Fig. 4.39. Legătura dintre fiabilitate și stadiile realizării produselor

Problema analizei relațiilor de legătură dintre defectările subsistemelor/ componentelor și defectarea sistemului se poate aborda atât inductiv cât și deductiv. O analiză inductivă pornește de la un set de condiții de defectare a componentelor, care conduc în final la identificarea consecințelor posibile. Se poate spune că acest mod de abordare este de genul "Ce se întâmplă dacă?", pe când analiza deductivă se utilizează pentru identificarea relațiilor cauzale care conduc la un mod specific de defectare al sistemului, adică un mod de abordare de genul "Ce poate cauza acest lucru?". Analiza arborilor de defectare este un exemplu de analiză deductivă a unui sistem. Metodele inductive sunt aplicate pentru a determina posibilele stări de defectare ale sistemului, iar metodele deductive pentru a scoate în evidență cum pot apărea aceste stări.

#### 4.4.2. Metoda AMDEC extinsă

Metoda de analiză a defectărilor, efectelor și criticității extinsă (AMDECE) reprezintă un instrument de evaluare a instalațiilor în fază de proiect sau în fază inițială, sub aspectul fiabilității și riscului. Metoda poate fi aplicată atât pentru produs cât și pentru proces, ca sistem. Metoda constă în determinarea modurilor potențiale de defectare a tuturor componentelor sistemului și efectele acestor defectări asupra subsistemelor/sistemului.

Principalii pași în realizarea acestei analize sunt arătați în figura 4.40.

Metoda AMDECE se caracterizează prin atribuirea cantitativă a riscului de identificare a defectelor. Cele trei faze ale metodei se prezintă în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3. Fazele metodei AMDECE

Faze	Întrebare	Ieșire
Identificare	Ce poate fi greșit?	Descrierea defectului cauze-moduri defectare-efecte
Analiza	Cum este acceptabil	Numărul de prioritate a

	defectul? Care sunt consecințele?	riscului NPR = Probabilitatea de apariție x Severitatea x Detectarea
Soluții	Ce poate fi făcut? Cum se poate elimina cauza? Cum se poate reduce severitatea?	Prin soluție de reproiectare. Plan de testare Schimbări în fabricație. Dovedind eroarea etc.

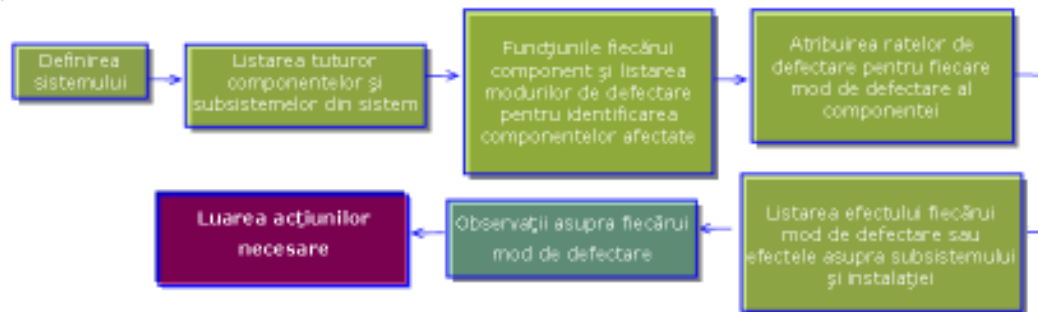


Fig. 4.40. Etapele metodei AMDECE

AMDECE calculează numeric valorile de criticitate totală, rezultând priorități, de exemplu: Numărul de Prioritate a Riscului (NPR) = Apariția Evenimentului (AE) X Severitatea (S) X Detectarea (D).

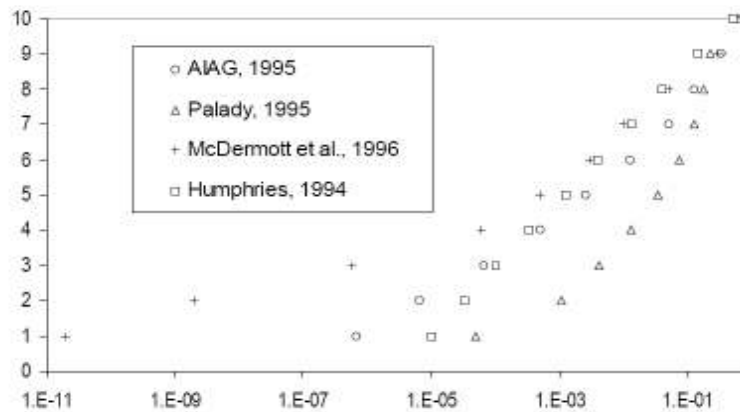


Fig. 4.41. Apariția evenimentului nedorit

*Apariția Evenimentului (AE)*: cât de probabilă este cauza și modul de defectare privind apariția?

*Severitatea (S)*: cât de serios este impactul efectului de sfârșit?

*Detectarea (D)*: cât de dificil este de detectat cauza și modul de defectare?

Apariția evenimentului este dată de probabilitate, ca în figura 4.41, iar severitatea este relatată în termeni de "cost", ca în figura 4.42.

Petru MHBR este important de a cunoaște termenul de "risc". Acesta se referă la:

- ☑ Probabilitatea de defectare (Hauptmanns și Werner, 1991);
- ☑ Expunerea la întâmplare de pagube și pierderi (Morgan și Henrion, 1988);

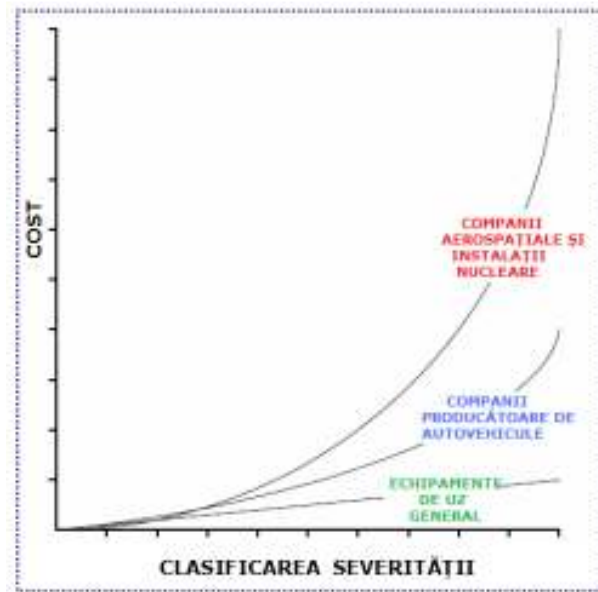


Fig. 4.42. Severitatea în termeni de "cost"

- ☑ Posibilitatea de pierderi și pagube (Webster's Dictionary, 1998).

Elementele riscului sunt: "întâmplarea", care reprezintă universul probabilității și "pierderea", care are ca măsură acceptată costul. Măsura de risc cea mai preferată este "Costul Așteptat" (CA)=(probabilitatea)x(cost).

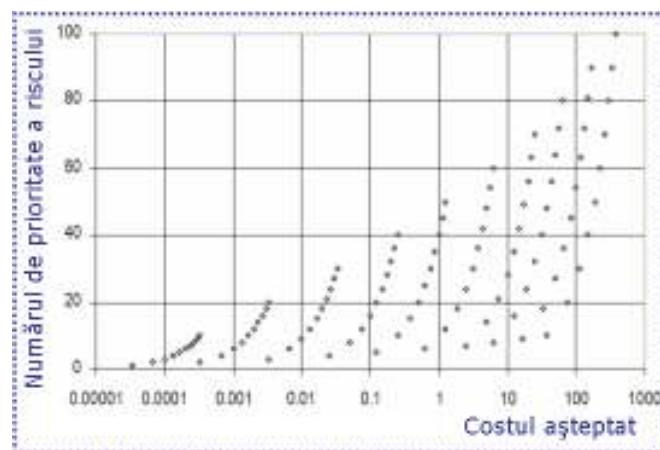


Fig. 4.43. Costul așteptat ca măsură a riscului

Pentru demersul AMDECE trebuie cunoscut scenariul defectării, care reprezintă un lanț de cauze și evenimente ce conduc la rezultate operative, conform figurii 4.44. Prin scenariul defectării se poate obține o evaluare de

pronostic, ca în figura 4.45, ce ajută la etapa de evaluare a MHBR aplicată la ciclul de viață al instalației nucleare considerate.

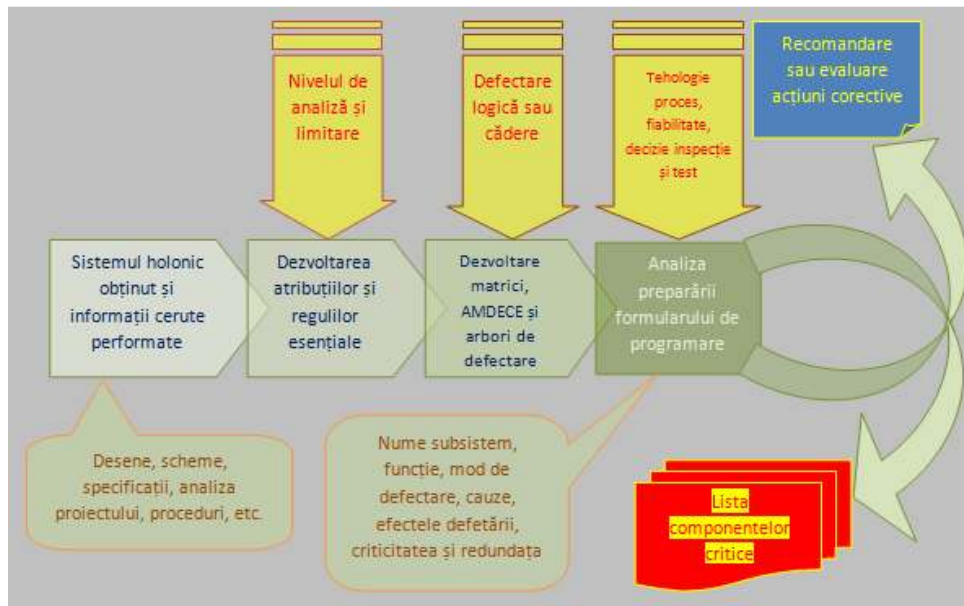


Fig. 4.44. Principalele rezultate operative ale AMDECE pentru MHBR

Procedura operațională pentru MHBR cuprinde:

- Analiza sistemului;
- Determinarea funcțiunii tuturor componentelor;
- Crearea schemei funcționale și diagramei bloc de fiabilitate;
- Documentarea pentru toate interacțiunile cu mediul înconjurător și misiunile sistemului;

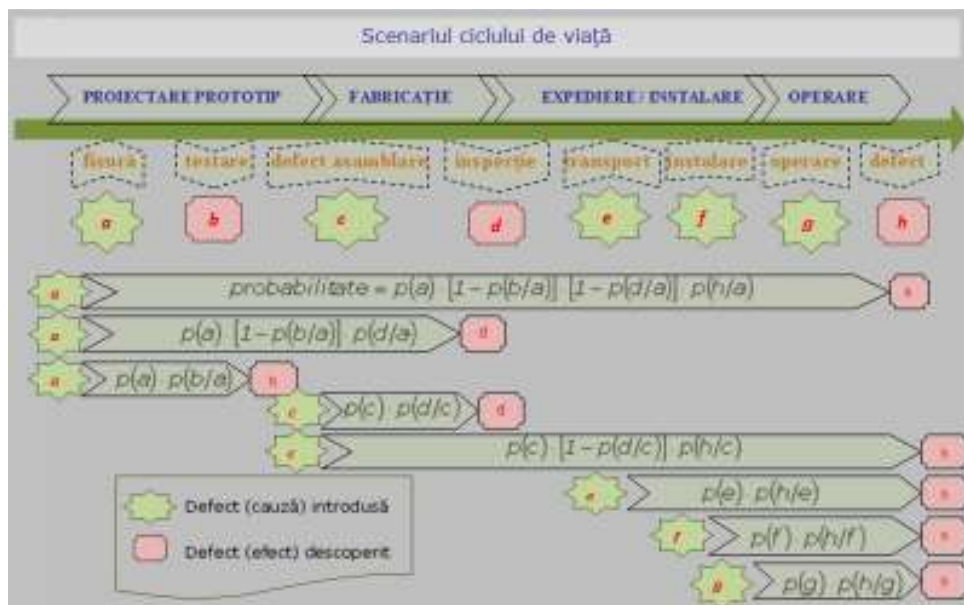


Fig. 4.45. Procedura AMDECE de progostic pentru ciclul de viață

☑ Identificarea modurilor potențiale pentru fiecare component.  
Stabilirea efectului de defectare pe nivelul următor al sistemului impune:

- ☑ Determinarea metodelor de detectare a defectelor;
- ☑ Determinarea existenței modurilor de defectare comune;
- ☑ Determinarea criticității defectului, rangul defectului;
- ☑ Dezvoltarea listei de componente critice;
- ☑ Acțiuni corective/reținere rațională;
- ☑ Furnizarea convenabilă de sisteme de urmărire sau acțiuni corective.

Principalele avantaje ale AMDECE sunt:

- ☑ Identificarea sistematică a modurilor de defectare și a cauzelor credibile;
- ☑ Focalizarea atenției pe defecte singulare critice și nivele de redundanță;
- ☑ Acceptarea riscului rațional pentru cauze/moduri de defectare critice;
- ☑ Controlul managementului elementelor critice, procedurilor asociate, specificațiilor și proceselor;
- ☑ Furnizarea unei singure liste cu toate componentele critice asociate cu proiectul dat.

Diferența între AMDEC și AMDECE este faptul că AMDECE ia în considerare scenariul defectării de-a lungul ciclului de viață, iar evaluarea nu se face doar prin NPR, ci potrivit procedurii sistematizate din figura 4.45.

Pentru abordarea AMDECE în cadrul demersului holistic se propune combinarea unor metode. Astfel, AMDECE se combină cu matrici realizate și stabilite cu metoda entropiei, aplicată în mentenanța operativă (Anghel și Drăghici, 2008), matrici care în prealabil sunt completate și cu date despre componente, funcțiuni, procesele și cerințele aferente acestora. Deasemenea, AMDECE se combină și cu metoda arborilor de defectare, respectiv arbori de defectare fuzzy (Anghel, 2007), după platforma metodologică propusă în figura 4.46.

Diagrama propusă în figura 4.46 arată că cele trei metode pot fi efectiv combinate prin utilizarea datelor de la una la cealaltă, rezultatul ducând la o fiabilitate mult îmbunătățită prin feedback-ul care se creează.

Integrarea software pentru MHBR, după metodologia propusă, s-a realizat cu LabVIEW 8.6 (National Instrument), așa cum se prezintă în figura 4.47 și figura 4.48, ca studiu de caz la IDN, pentru realizarea matricilor de clasificare, a arborilor de defectare și a metodei AMDECE.

Aplicarea AMDECE se referă la un echipament dinamic (booster compresor) utilizat în instalația 300, de separare a tritiului și deuteriului.

Calculul coeficientului de risc (criticitate) se face utilizând valori estimate prin acordare de punctaje pentru:

- ☑ indicele de probabilitate de apariție sau frecvență;
- ☑ indicele de severitate sau gravitate;
- ☑ indicele de detectare, utilizând standardele agreate în domeniul nuclear.

Relațiile interdependente ce se creează din punctul de vedere al mentenanței holistice, respectiv pentru MHBR, se bazează pe capacitatea deciziei, mentenabilitate și disponibilitate operațională și funcțională.

Capacitatea deciziei este utilizată de capacitatea managementului organizării de mentenanță holistică, în măsură să stabilească cele mai bune măsuri de remediu după detectarea defectului. O organizație cu un timp lung între detecția defectului și reparație are un nivel scăzut a capacității deciziei.

Mentenabilitatea este utilizată la calcularea probabilității că timpii de reparație pentru obiectivul preferat nu vor depăși un nivel acceptat. Reparația implică de obicei ieșirea din operare, deci interesul va fi pentru minimizarea timpului de reparare. Timp lung pentru reparare va însemna o mentenabilitate redusă.

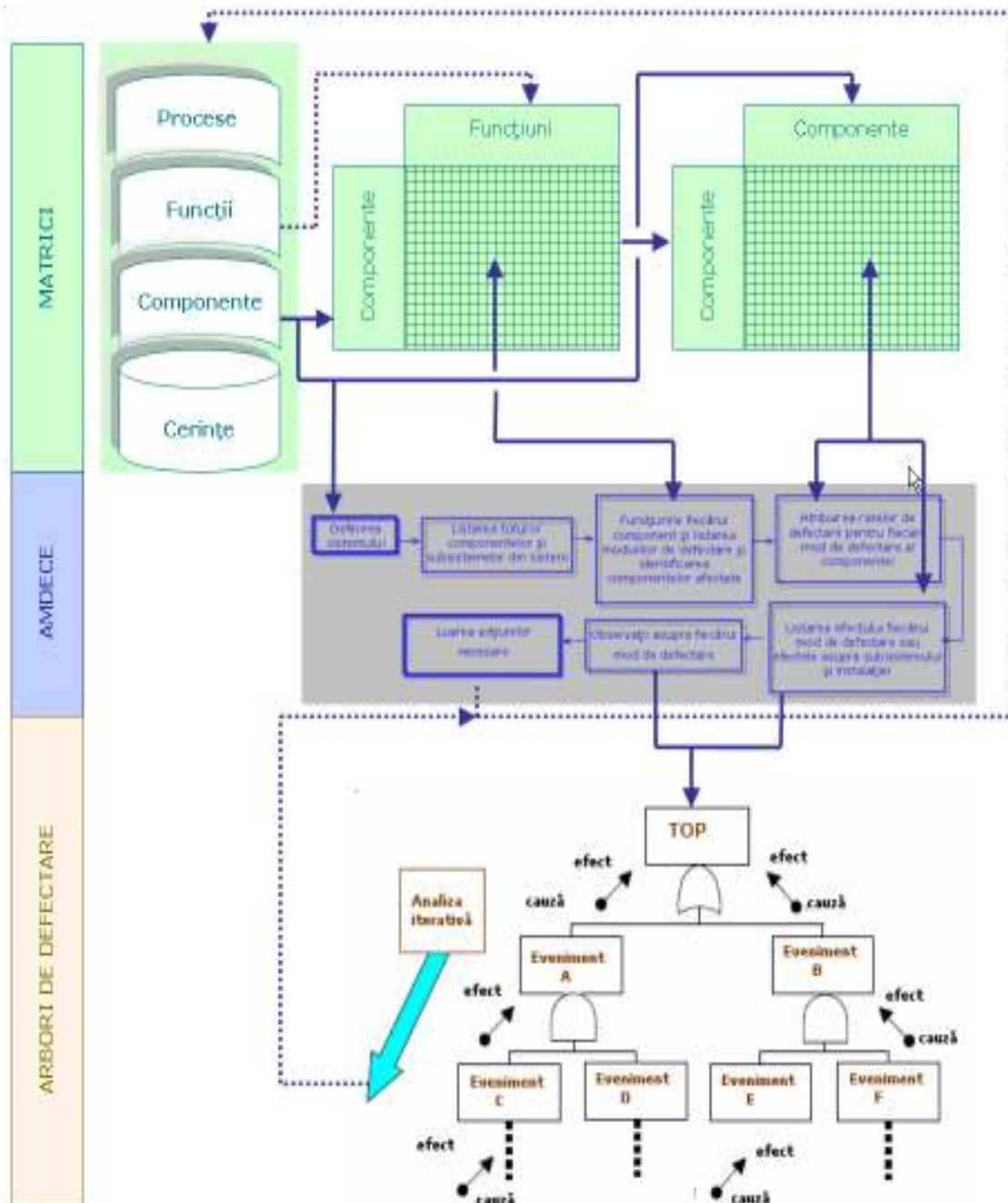


Fig. 4.46. Combinarea de metode pentru evaluarea MHBR



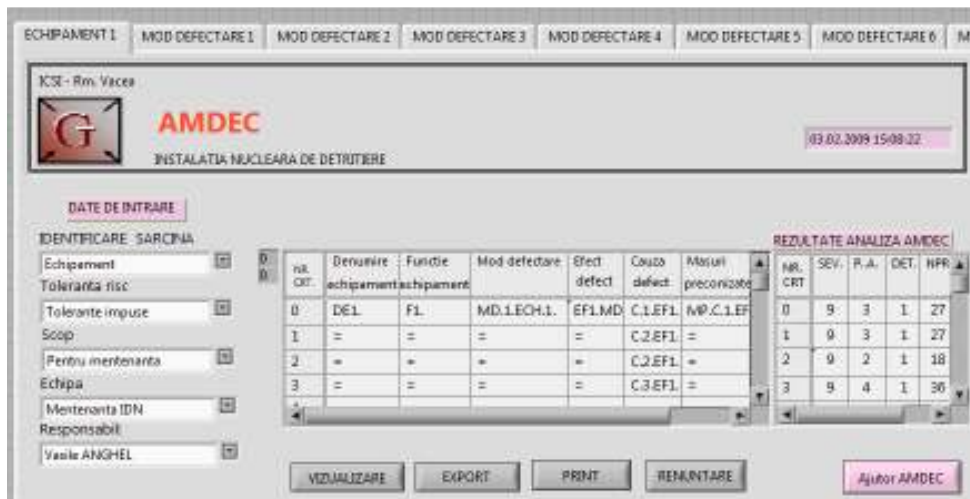


Fig. 4.47. Panoul frontal al aplicației de modelare și simulare AMDEC extinsă

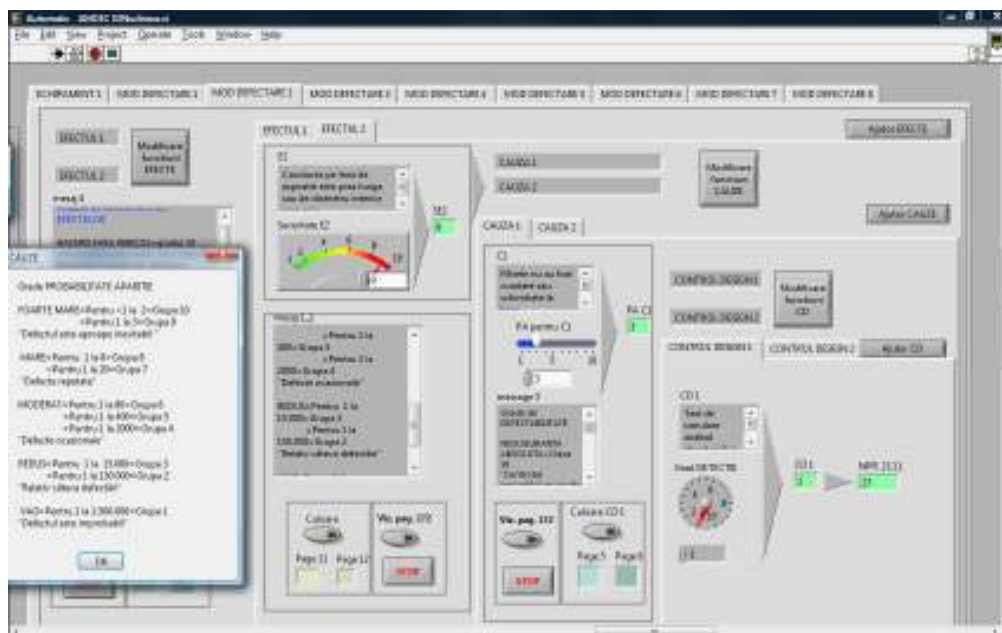


Fig. 4.48. Panoul frontal al aplicației de modelare și simulare mod de defectare

Disponibilitatea operațională este utilizată la calcularea timpului de operare a sistemului, în relație cu timpul destinat operării și mentenanței.

Este important de arătat capabilitatea tehnică de a menține în operare sistemul în timp ce mentenanța este evitată. Sistemul care trebuie să iasă din operare pentru timp lung de reparare va fi caracterizat de o disponibilitate operațională de nivel scăzut. Un sistem cu o fiabilitate redusă, dar cu un nivel ridicat de disponibilitate operațională, indică un management eficient de mentenanță realizat.

Disponibilitatea funcțională este utilizată la cuantificarea capacității sistemului de a fi în operare, menținându-se în același timp un nivel dorit de funcționare.

Pe baza cercetărilor întreprinse se va arăta că raporturile interdependente și interdisciplinare pentru mentenanța integrată sunt determinate de același obiectiv general de calitate, tradus ca o calitate dinamică prin fiabilitate, mentenabilitate, disponibilitate și siguranță în funcționare.

#### 4.4.3. Metode de alocare a fiabilității la sistemele complexe

Se propune explicarea raporturilor interdependente și cerințele privind managementul modernizării pentru mentenanță, prin noi concepții de alocare a fiabilității pentru parcursul ciclului de viață a unui produs tehnic complex, cu referire la instalația de detritiere nucleară (IDN) (Anghel, 2006).

##### Alocarea fiabilității

Fiabilitatea este definită prin probabilitatea ca sistemul să funcționeze la timpul  $t$  fără nici o intervenție de mentenanță. Fiabilitatea este caracteristica tehnică a sistemului dependentă de abilitatea soluției tehnice de a menține sistemul în stare de operare, chiar dacă apar defectări.

Timpul de decizie pentru mentenanța operativă reprezintă o variabilă de timp între detecția defectării și începutul reparării. În unele lucrări, acest timp este inclus în timpul alocat nefuncționării.

Diferitele etape asociate cu defectul întâmplător în timpul perioadei de stare a sistemului, pot fi reprezentate pe o axă a timpului (fig. 4.49), unde:

- ☑ MTD – media timpului de detecție a defectării;
- ☑ MTTR - media timpului de reparare;
- ☑ MTTF - media timpului de testare a funcției utilizată pentru calcularea disponibilității funcționale;
- ☑ MTBF - media timpului de bună funcționare între defectări.

Defectul trebuie să fie detectat, dar această acțiune nu este întotdeauna atât de simplă cum pare. Cauza defectului trebuie să fie diagnosticată înainte de a trece la acțiune. Înlocuirile sau reparațiile trebuie făcute cu grijă. În final trebuie făcută o verificare a funcționării după măsurare.

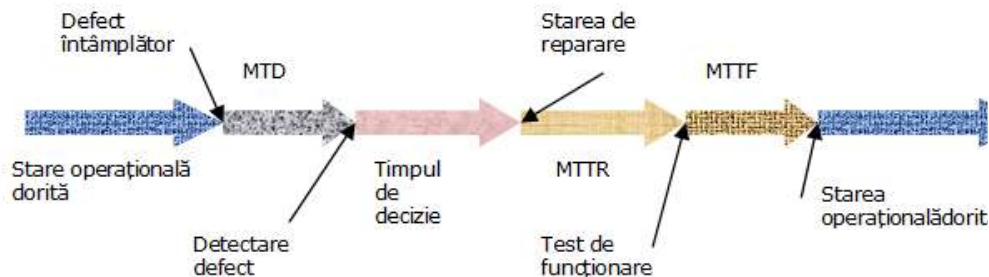


Fig. 4.49. Diferitele stări asociate cu defectul întâmplător

Media timpului de luare a deciziei este timpul alocat pentru diagnoza defectării, stabilindu-se măsurile care se vor lua și inițializarea reparării.

Alocarea fiabilității este utilizată pentru translatarea în scopuri de fiabilitate și disponibilitate la nivelul subsistemului, până la nivelul componentului, chiar dacă sistemele sunt reparabile.

Scopul fiabilității reprezintă, de exemplu, timpul de bună funcționare sau rata defectării. Valoarea pentru MTBF reprezintă valoarea minimă cerută, iar în cazul ratei de defectare este valoarea maximă permisă.

Pentru sistemele nereparabile scopul poate fi valoarea certă pentru media timpului total de funcționare, rata de defectare sau fiabilitate.

Pentru sistemele reparabile scopul poate fi o valoare cerută pentru disponibilitate, număr de defectări, *media timpului de bună funcționare* (MTBF) sau *media timpului total de reparare* (MTTR). În general, un scop poate fi translatat în alt scop. De exemplu, dacă scopul este ca fiabilitatea pentru un sistem tehnic considerat să fie de 99% pentru 1000 ore, scopul privind rata de defectare va fi de 0,00001 pe oră și scopul MTTF este de 10000 ore.

Următoarea etapă va trebui să fie procedura de realizare a scopului. Pentru sistemele nereparabile rata de defectare a subsistemelor se poate reduce prin eliminarea sau reducerea cazurilor de moduri ale defectării. Pentru sistemele reparabile, scopul se poate realiza prin reducerea oricăreia dintre rata de defectare sau durata de oprire pentru reparație, pentru restaurarea procesului defectării. Timpul de reparație poate fi redus prin eliminarea logisticii sau introducerea metodelor de îmbunătățire a reparațiilor. Rezultatele metodelor de alocare sunt scopurile pentru rata de defectare a subsistemului, rata de reparare, fiabilitate și disponibilitate. În cele din urmă, trebuie identificată abordarea rațională de translatare a scopului de la nivelul sistemului la nivelul subsistemului. De aceea, procedura de alocare bazată pe modificări depinde de cantitatea de informații disponibile caracteristice sistemului care influențează procesul de îmbunătățire.

Există câteva metode de alocare a fiabilității pentru sistemele nereparabile, cele mai folosite fiind:

- ☑ Metoda Equal Apportionment (MIL-HDBK-338B);
- ☑ Metoda ARINC (MIL-HDBK-338B);
- ☑ Metoda AGREE (MIL-HDBK-338B);
- ☑ Metoda Boyd (Boyd, 1992).

Metodele sunt prezentate în câteva publicații și sunt incluse în pachetele de software pentru fiabilitate. La acestea se pot adăuga câteva metode de alocare prezentate în (Kapur, 1977), (Kececioglu, 1991). Doar câteva metode sunt însă disponibile pentru sistemele reparabile, chiar dacă cele mai multe sisteme sunt reparabile. Metodele existente sunt limitate și nu se pot considera aplicabili orice factori. Cea mai populară metodă pentru realizarea nivelului dorit de disponibilitate este prin atribuire de egală disponibilitate la componentele sistemului. Componenta alocării disponibilității și valoarea specificată MTTR sunt folosite la calcularea valorii MTTF alocate. Această metodă consideră componentele defectate ca fiind încă în operare, chiar dacă sistemul este defect.

Abrevierile și notațiile folosite la modelarea alocării fiabilității:

MTF (MTTF - *Mean Time To Failure*) - media timpului de funcționare până la defectare (în unele publicații se numește media timpului înainte de defectare);

MTR (MTTR - *Mean Time To Repair*) - media timpului de reparație;

MTID (MTBF - *Mean Time Between Failures*) - media timpului între defectări;

AGREE (*Advisory Group of Reliability of Electronic Equipment*) - grupul consultativ de fiabilitate a echipamentelor electrice;

$n$  – numărul de subsisteme în sistem;  
 $A_s$  – scopul disponibilității sistemului;  
 $A_i$  – disponibilitatea sistemului  $i$ ;  
 $U_i = 1 - A_i$  - nedisponibilitatea elementului  $i$ ;  
 $\mu_i$  – rata de reparare a subsistemului  $i$ ;  
 $\lambda_i$  – rata de defectare a subsistemului  $i$ ;  
 $\gamma_i$  – MTTR a subsistemului  $i$ ;  
 $\sigma_i$  - contribuția nedisponibilității sistemului  $i$ , unde  $\sigma_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ .

NOTĂ: Indicele  $s$  indică scopul, iar indicele  $c$  și  $a$  indică valoarea curentă și alocată.

Următoarele ipoteze stau la baza demersului de alocare a fiabilității:

- Toate componentele din sistem sunt în serie;
- Distribuțiile de defectare și reparare ale componentelor sunt exponențiale;
- Rata de defectare și reparare este constantă;
- Componentele nu funcționează în timpul defectării sistemului.

În continuare se prezintă metodele de alocare ale fiabilității și propunerile pentru sistemele reparabile.

### Metoda de alocare a fiabilității la sistemele reparabile

Metoda de alocare a fiabilității la sistemele reparabile atribuie disponibilități egale pentru toate sistemele pentru care scopul poate fi atins. Această metodă este similară metodei Equal Apportionment, unde ratele de defectare sunt alocate pentru toate subsistemele. Această metodă se bazează pe următoarea ecuație de determinare a disponibilității subsistemului:

$$A_i = (A_s)^{\frac{1}{n}} \quad (4.67)$$

Expresia este validă doar dacă componentele nefiabibile sunt în continuă operare, atunci când sistemul este defect. Cu această prezumție, disponibilitatea sistemului este produsul disponibilității subsistemelor:

$$A_s = \prod_{i=1}^n A_i \quad (4.68)$$

unde:

$$A_i = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i} = \left(1 + \frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)^{-1} = (1 + \sigma_i)^{-1} \quad (4.69)$$

Se determină mai întâi  $\sigma_i$ , apoi  $\lambda_i$ :

$$\sigma_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i} = \frac{U_i}{A_i} = \left(\frac{1}{A_i} - 1\right) \quad (4.70)$$

$$\lambda_i^a \equiv \lambda_i = \sigma_i \cdot \mu_i$$

Se consideră sistemul serie format din componentele compresorului din figura 4.50: platoul de comprimare de joasă presiune (B), platoul de înaltă presiune (C) și subsistemul piston (D).

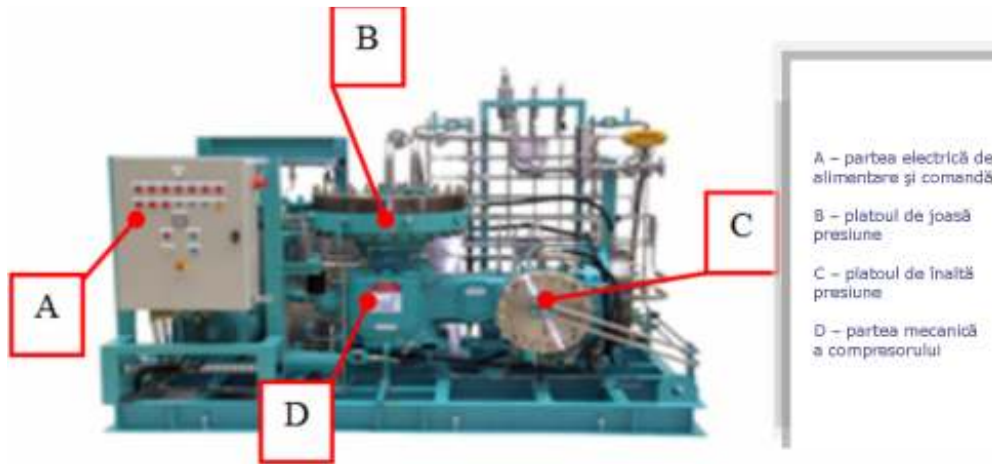


Fig. 4.50. Sistem compresor cu membrane

Din datele de istoric ale compresorului reiese că ratele de reparare sunt:  $\mu_A = 0.1$ ,  $\mu_B = 0.2$  și  $\mu_C = 0.3$  pe oră. Scopul disponibilității compresorului este cerut a fi de 0,9.

Rezultă că alocarea ratei de defectare pentru fiecare subsistem va fi:

$$A_i = (0,9)^{\frac{1}{3}} = 0,9655 \quad (4.71)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{0,9655} - 1 = 0,0357 \quad (4.72)$$

Deci alocarea ratei de defectare pe oră este:

$$\begin{aligned} \lambda_A &= 0,0357 \cdot 0,1 = 0,00357 \\ \lambda_B &= 0,0357 \cdot 0,2 = 0,00715 \\ \lambda_C &= 0,0357 \cdot 0,3 = 0,01072 \end{aligned} \quad (4.73)$$

Modificarea propusă este de a se va folosi o expresie diferită pentru disponibilitatea sistemului:

$$A = \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{A_i}\right)^{-1} = \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}\right)^{-1} = \left(1 + \sum_{i=1}^n \sigma_i\right)^{-1} \quad (4.74)$$

Dacă se doresc disponibilități egale pentru fiecare subsistem, rezultă:

$$A_S = (1 + n \cdot \sigma)^{-1} \quad \text{și} \quad \sigma_i = \sigma = \frac{\left(\frac{1}{A_S} - 1\right)}{n} \quad (4.75)$$

În final, ecuația alocării ratei de defectare este:

$$\lambda_j = \sigma_j \cdot \mu_j \quad (4.76)$$

Deci, pentru exemplul 1, alocările ratei de defectare pe oră sunt:

$$\begin{aligned} \lambda_A &= 0,0037 \\ \lambda_B &= 0,0074 \\ \lambda_C &= 0,0111 \end{aligned}$$

Diferența între rezultate la metoda existentă și cea propusă este 3,6%. Procentul crește cu creșterea numărului de subsisteme nedisponibile.

#### *Metoda Equal Apportionment*

Pentru sistemele reparabile, alocarea de egală disponibilitate nu înseamnă alocarea de rate de defectare egale. În același timp, când nu există multe informații pentru ratele de defectare ale subsistemelor, iar complexitatea implică reducerea ratelor de defectare a subsistemului, este logic să atribuim rate de defectare egale pentru toate subsistemele.

Modificarea propusă conduce la următoarea relație:

$$\lambda_j = \lambda^a, \text{ pentru toate subsistemele } i.$$

Deci,

$$A_S = \left( 1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i} \right)^{-1} = \left( 1 + \lambda^a \sum_{i=1}^n \frac{1}{\mu_i} \right)^{-1} \quad (4.77)$$

$$\lambda_i^a = \lambda^a = \frac{\left( \frac{1}{A_S} - 1 \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\mu_i}}$$

Pentru exemplul considerat, alocarea ratei de defectare la fiecare subsistem este 0,006 pe oră.

#### *Metoda ARINC*

Pentru sistemele nereparabile, această metodă consideră că ratele de defectare curente ale subsistemelor sunt cunoscute. Ratele de defectare curente pot fi obținute din standarde pentru predicția ratei de defectare. Pentru ca scopul ratei de defectare să fie atins, această metodă reduce ratele de defectare ale subsistemului cu un procentaj egal. Se cer eforturi egale la reducerea ratei de defectare de procentaje egale ale ratelor de defectare.

Același concept se va aplica la sistemele reparabile. Când ratele de reparare sunt neschimbate, reducerea ratelor de defectare ale subsistemului de procente egale conduce, de asemenea, la reducerea nedisponibilității sau contribuției de nedisponibilitate de egal procentaj.

Modificarea propusă, când se reduc ratele de defectare în egale procentaje, pentru toate subsistemele  $i$ :

$$r = r_i = \frac{\lambda_i^a}{\lambda_i^c} \quad (4.78)$$

unde  $r$  este factorul de reducere a ratei de defectare. Deci,

$$A_S = \left( 1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i^a}{\mu_i} \right)^{-1} = \left( 1 + r \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i^c}{\mu_i} \right)^{-1} \quad (4.79)$$

$$\lambda_i^a = \lambda^a = \frac{\left( \frac{1}{A_S} - 1 \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i^c}{\mu_i}} \quad (4.80)$$

$$\lambda_i^a = r \cdot \lambda_i^c \quad (4.81)$$

#### Metoda AGREE

Această metodă ia în considerație complexitatea (număr de module în fiecare subsistem) și importanța fiecărui subsistem. Modificarea acestei metode la sistemele reparabile este mai dificilă, deoarece timpii de misiune pentru fiecare subsistem, cât și pentru sistem, se atribuie diferit. Aceasta este aplicabilă când sistemul realizează câteva funcții, iar fiecare funcție cere doar un subset de subsisteme.

La aplicarea acestei metode la sistemele reparabile se va considera procentul de timp de funcționare pentru fiecare subsistem folosit, numit ciclu de serviciu. Importanța fiecărui subsistem este indicată de criticitatea funcționalității subsistemului.

Dacă factorul de importanță este 1, defectarea subsistemului nu poate fi tolerată. Dacă este 0, defectarea subsistemului nu va avea impact. Deci, rata de defectare alocată este invers proporțională cu factorul de importanță.

Notății:

$n$  – numărul de subsisteme;

$m_i$  – numărul de elemente în subsistemul  $i$ ;

$w_i$  – factorul de importanță pentru subsistemul  $i$ ;

$p_i$  – ciclu de serviciu;

$M$  – numărul total de module (componente) în sistem;

$\mu_i$  – rata de reparare a subsistemului  $i$ , egală cu rata de reparare a fiecărui

element în subsistemul  $i$ ;

$\lambda_i$  – rata de defectare a subsistemului  $i$ ;

$\alpha_i$  – rata de defectare pentru fiecare element în subsistemul  $i$ .

$$\gamma_i = \frac{\alpha_i}{m_i}$$

Dacă ciclul de serviciu și factorul de importanță este egal cu 1, metoda AGREE alocă rate de defectare egale pentru toate elementele din sistem. Dacă ciclul de serviciu nu este egal cu unu, se vor alocă rate de defectare efective egale pentru toate elementele. Rata de defectare efectivă este produsul ratei de defectare și a ciclului de serviciu. La alocarea ratelor de avarie efective egale, vor

trebui ajustate ratele de defectare ale subsistemului de împărțirea lor la ciclul de serviciu. Similar, se poate ajusta alocarea în acord cu factorii de importanță.

Pentru sistemele reparabile se pot alocă ratele de defectare efective egale printre toate elementele. Această abordare ignoră efectele timpilor de reparare. Media timpului de reparație poate fi considerat ca severitate pentru defectul subsistemului. Deci, strategia va trebui să aloce contribuții egale de nedisponibilitate, considerând ajustarea pentru factorii de importanță, ca ciclul de serviciu.

Modificări propuse: fie  $\lambda_i^e$  și  $\sigma_i^e$  rata de avarie efectivă și contribuția la nedisponibilitatea subsistemului  $i$ . Deci,

$$U_i^e = \frac{\lambda_i^e}{\mu_i} \quad (4.82)$$

Dacă  $\alpha_i^e$  și  $Q_i^e$  sunt rata de avarie efectivă și contribuția de nedisponibilitate a fiecărui element în sistemul  $i$ , atunci:

$$\begin{aligned} \lambda_i^e &= m_i \cdot \sigma_i^e \\ Q_i^e &= \frac{\alpha_i^e}{\mu_i} = \frac{U_i^e}{m_i} \end{aligned} \quad (4.83)$$

Alocarea de nedisponibilități efective egale pentru toate elementele conduce la următoarele relații:

$$\begin{aligned} Q^e &= Q_i^e \text{ pentru toate } i \\ M \cdot Q^e &= U_s \\ Q_i^e &= Q^e = \frac{U_s}{M} \\ U_i^e &= m_i \cdot Q_i^e = m_i \cdot \frac{U_s}{M} \end{aligned} \quad (4.84)$$

Considerând factorul de importanță și ciclul de serviciu, rezultă:

$$U_i^e = p_i \cdot w_i \cdot \frac{\lambda_i}{\mu_i} \quad (4.85)$$

$$\lambda_i^a \equiv \lambda_i = \frac{U_s m_i \mu_i}{M p_i w_i} \quad (4.86)$$

Tabelul 4.4. Alocare fiabilitate exemplul 2

Subsistem	$m_i$	$w_i$	$p_i$
A	2	0,8	0,5
B	3	0,9	0,75



C	5	1,0	1,0
---	---	-----	-----

Dacă  $U_s=0,1$  și  $M=10$ , rezultă că alocările ratelor de defectare sunt:

$$\begin{aligned}\lambda_A &= 0,005 \\ \lambda_B &= 0,009 \\ \lambda_C &= 0,015\end{aligned}\quad (4.87)$$

#### Metoda BOYD

Este o combinație a metodelor Equal Apportionment și ARINC. Pentru aplicarea metodei trebuie cunoscute ratele de defectare curente ale subsistemelor. Pentru sistemul nereparabil, dacă rata de defectare a sistemului curent este mai mare decât scopul ratei defectării, acesta se împarte în două părți bazate pe factorii de pondere specificați. Alocațiile sunt apoi realizate individual, folosind aceste două metode. În final, rata avariei alocate este suma ratelor de defectare obținute de la aceste două metode și o constantă care consideră limita factorului de siguranță. Dacă este cerută limită de siguranță 10%, factorul de siguranță este  $(1-10)/100 = 0,9$ .

Modificări propuse: pentru aplicarea acestei metode la sistemul reparabil, se va împărți scopul de disponibilitate al sistemului între aceste două metode. Deoarece contribuțiile la nedisponibilitatea sistemului sunt aditive, este logic să se distribuie scopul disponibilității bazat pe contribuțiile nedisponibilității.

Notății:

$K$  – limita metodei Equal Apportionment;

$0 \leq K \leq 1$

$1-K$  – limita metodei ARINC;

$M$  – factorul limitei de siguranță;

$\lambda_i^a(E)$  - rata defectării alocată pentru subsistemul  $i$  folosind metoda Equal Apportionment;

$\lambda_i^a(A)$  - rata defectării alocată pentru subsistemul  $i$  folosind metoda ARINC;

$\lambda_i$  - rata de defectare a subsistemului  $i$ ;

$A_s(E)$  - scopul disponibilității pentru metoda Equal Apportionment ;

$A_s(A)$  - scopul disponibilității pentru metoda ARINC.

Trebuie notat că pentru sisteme serie reparabile, rata de avarie este proporțională cu timpul de nedisponibilitate.

Se consideră  $D \equiv \sigma$  timpul de oprire pentru avarie pe unitatea de timp de operare. Deci,

$$D = \sum_{i=1} \frac{\lambda_i}{\mu_i} \quad (4.88)$$

$$A_s = (1 + D)^{-1}$$

$$D = \left( \frac{1}{A_s} - 1 \right) \quad (4.89)$$

Cu limita de siguranță, scopul pentru  $D$  va fi  $D_s$ :

$$D_S = M \cdot \left( \frac{1}{A_S} - 1 \right) \quad (4.90)$$

$$\begin{aligned} D_S(E) &= K \cdot D_S \\ D_S(A) &= (1 - K) \cdot D_S \end{aligned} \quad (4.91)$$

Deci, disponibilitatea scopurilor pentru alocări este:

$$\begin{aligned} A_S(E) &= [1 + D_S(E)]^{-1} \\ A_S(A) &= [1 + D_S(A)]^{-1} \end{aligned} \quad (4.92)$$

Utilizând aceste scopuri de disponibilitate se pot aloca rate de defectare pentru fiecare subsistem folosind metodele Equal Apportionment și ARINC.

În final, rata defectării alocate pentru subsistem  $i$  este:

$$\lambda_i^a = \lambda_i^a(E) + \lambda_i^a(A) \quad (4.93)$$

### Metoda de alocare a fiabilității la sistemele nucleare complexe

Toate metodele discutate fac schimbări doar asupra ratelor de defectare. Astfel, când se dorește o disponibilitate mare, se va concentra atenția și asupra reducerii timpului de reparație. Eliminând timpii morți de amânare nenecesari se ajunge la reducerea timpilor de reparație.

Se propune o metodă de alocare pentru rata de avarie și reparație. Metoda se bazează pe minimizarea efortului total pentru cerințele de disponibilitate ale sistemului nuclear.

Fie  $x_i$  și  $y_i$  factorii complecși de reducere a ratei de avarie și a timpului de reparație a subsistemului  $i$ , unde  $0 < x_i, y_i \leq 1$ . Aceasta înseamnă că pentru o valoare  $d_i$ , efortul cerut la reducerea ca durată a ratei de avarie  $(x_i)^{d_i}$  este echivalent cu efortul cerut la reducerea timpului de reparație  $(y_i)^{d_i}$ . Când reducerea generală în contribuția nedisponibilității subsistemului  $i$  este  $r_i$ , aceasta conduce la următoarele alocări:

$$\begin{aligned} d_i &= \frac{\ln(r_i)}{\ln(x_i y_i)} \\ \lambda_i^a &= \lambda_i^c \cdot (x_i)^{d_i} \\ \gamma_i^a &= \gamma_i^c \cdot (y_i)^{d_i} \end{aligned} \quad (4.94)$$

Procedura de implementare propusă: se aranjează ca nedisponibilitatea pentru etichetarea subsistemelor să fie în ordine descrescătoare.

Se determină numărul  $k$ , unde  $k$  este valoarea maximă a lui  $j$ , astfel că:

$$\sigma_i > \phi_j \equiv \frac{D_g - \left( \sum_{i=j+1}^{n+1} \sigma_i \right)}{j}, \text{ unde } \sigma_{n+1} = 0 \text{ și } D_s = \frac{U_s}{A_s}.$$

Alocațiile pentru reducerea nedisponibilității sunt:

$$r_i = \begin{cases} \frac{\sigma_0}{\sigma_i^c}, \text{ pentru } & i < k \\ 1, \text{ pentru } & i \geq k \end{cases} \quad (4.95)$$

În final, alocările sunt conform ecuațiilor (4.93):

$$\lambda_i^a = \sqrt{r_i} \cdot \lambda_i^c \quad \text{și} \quad \gamma_i^a = \sqrt{r_i} \cdot \gamma_i^c \quad (4.96)$$

Se consideră sistemul compresor (fig. 4.50) compus din subsistemele: A, B, C, D. Scopul disponibilității sistemului este de 0,9. Informațiile adiționale pentru alocări sunt (tab. 4.5):

Tabelul 4.5. Alocare fiabilitate exemplul 3

Subsiste m	$\lambda_i^c$	$\mu_i^c$	$\gamma_i^c$	$x_i$	$y_i$
A	0,002	0,0 1	100, 0	1,0	1,0
B	0,002	0,0 2	50,0	1,0	0,7 5
C	0,004	0,2	5,0	0,5	0,7 5
D	0,005	0,5	2,0	0,7 5	0,5

Deci,

$$\sigma_A = 0,2; \sigma_B = 0,1; \sigma_C = 0,02; \sigma_D = 0,01 \text{ și } D_s = 0,0526 \quad (4.97)$$

Aceasta va conduce la următoarea ordine:  $\sigma_A \geq \sigma_B \geq \sigma_C \geq \sigma_D$

Mai departe,  $k=2$  (sau  $k=B$ ) și  $\sigma_0 = 0,0135$ . De aici,

$$r_A = 0,0135 / 0,2 = 0,0677$$

$$r_B = 0,0135 / 0,1 = 0,135$$

$$r_C = 0,0135 / 0,02 = 0,677$$

$$r_D = 1$$

Bazat pe aceste rezultate, este nevoie de a îmbunătăți doar subsistemele A, B și C. Deoarece  $x_A = y_A = 1$ , va trebui utilizată ecuația (4.96) pentru subsistemul A. Deci,  $d_B = 6,95$  și  $d_C = 0,397$ . În final, alocările pentru ratele de defectare și reparare sunt:

$$\lambda_A^a = \sqrt{0,0677} \cdot (0,002) = 0,00052$$

$$r_A^a = \sqrt{0,0677} \cdot (100) = 26,02$$

$$\lambda_B^a = (1,0)^{6,95} \cdot (0,002) = 0,002$$

$$\gamma_B^a = (0,75)^{6,95} \cdot (0,01) = 6,77$$

$$\lambda_C^a = (1,0)^{0,396} \cdot (0,002) = 0,003$$

$$\gamma_B^a = (0,75)^{0,391} \cdot (0,01) = 4,46$$

## 4.5. Metoda de determinare a gradului de uzură

Pentru determinarea gradului de uzură în cadrul mentenanței holonice a sistemelor complexe, cum sunt cele nucleare, se folosește logica fuzzy. Soluția propusă se referă îndeosebi la echipamentele dinamice, unde cel puțin două componente din structura holonică a unui echipament sunt supuse uzării. Diagnoza comportării componentelor supuse uzării impune concepția și realizarea unui sistem expert fuzzy pentru uzură.

Logica fuzzy se utilizează cu rezultate deosebite în diferite domenii, astfel că în domeniul diagnozei se folosesc sisteme de control care ajută operatorul să ia decizia cea mai bună, într-un timp record, prin utilizarea computerelor și a tehnologiilor computaționale din ce în ce mai avansate.

După decizia de proiectare a sistemului fuzzy, prima etapă constă în colectarea de reguli de tip "dacă-atunci". În general, aceste reguli sunt colectate cu ajutorul experților (Anghel, 2006).

Așa cum se poate vedea în figura 4.51, modelul de sistem expert fuzzy are ca intrări și ieșiri valori numerice. La fuzzificare, valorile de intrare determină valorile gradului de apartenență. Valorile fuzzy obținute sunt procesate în mecanismul de inferență. De aici, valorile de ieșire fuzzy sunt obținute utilizând baza de reguli și sunt trimise unității de defuzzificare. Din această unitate de defuzzificare se obține valoarea finală numerică z.

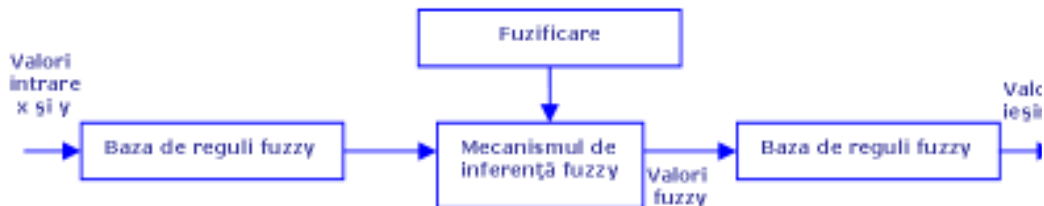


Fig. 4.51. Schema unui sistem fuzzy

Ca suport se vor folosi datele colectate de la echipamentele dinamice din instalația de detritiere nucleară (IDN) din cadrul ICSI Rm. Vâlcea, pentru două componente care pun în evidență uzura: scăderea presiunii de ulei și grosimea unui element de uzură al echipamentului (membrană metalică), care va fi pusă în evidență de particulele metalice cu aceeași compoziție chimică, aflate în ulei. Pentru exemplificare se consideră cazul unui compresor de tip volumic, cu două trepte de comprimare dispuse în L. Mișcarea de la motorul electric la volant se transmite prin intermediul curelelor trapezoidale, mecanismul bielă-manivelă și piston. Pistonul nu comprimă gazul. Mișcarea pistoanelor este transmisă la membranele metalice prin câte o transmisie hidrostatică (pe fiecare treaptă de

comprimare), echipată cu o pompă compensatoare și un limitator de presiune. Ungerea mecanismului bielă-manivelă se face cu uleiul deversat de limitatorul de presiune.

Logica fuzzy este utilizată de *sistemul expert fuzzy pentru mentenanță de uzură* (SEFMU) la aplicarea strategiei de control lingvistic dependentă de cunoașterea echipamentului și a funcției sale de degradare prin uzură.

Presiunea de ulei și efectul sedimentării particulelor de uzură în uleiul monitorizat la compresor este arătată lingvistic în tabelul 4.6.

Tabelul 4.6. Expresiile lingvistice pentru uzura membranelor

U		GM		
		Mică	Medie	Mare
PU	Ușoară	Redusă	Redusă	Mare
	Medie	Medie	Medie	Mare
	Rapidă	Medie	Mare	Foarte mare

PU –presiune ulei;  
 GM – grosime membrană;  
 U – uzura.

Structura generală a unui sistem expert fuzzy este redată în figura 4.52.

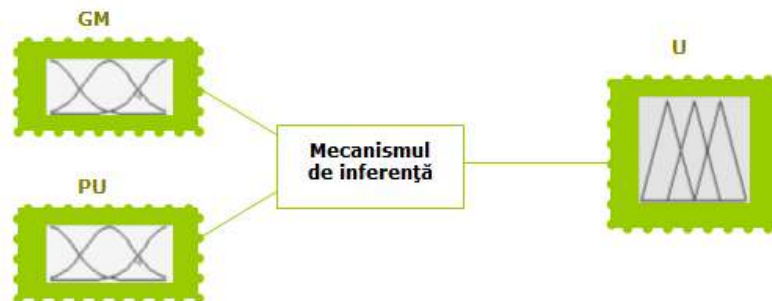


Fig. 4.52. Structura generală a sistemului expert fuzzy

Prin fuzzificare se stabilește apartenența unei valori ferme din mulțimea de bază, care este definită de variabila lingvistică, la unul sau mai mulți termeni lingvistici care caracterizează mulțimea fuzzy.

Fuzzificarea se realizează prin calculul funcțiilor de apartenență, iar defuzzificarea se realizează prin metoda centrului de greutate. Se utilizează implicația de tip Mamdani, conectarea regulilor realizându-se prin operatorul MAX.

Pentru realizarea fuzzificării se folosesc expresiile lingvistice de mai jos:

- ☑ Parametrii de intrare: GM - mică, medie, mare  
 PU - ușoară, medie, rapidă
- ☑ Parametrii de ieșire: U - mică, medie, mare și foarte mare.

Expresiile lingvistice ale variabilelor de intrare și ieșire sunt determinate cu ajutorul unui expert în mentenanța operațională a compresorului.

În general, variabila  $x^*$  aparține gradului de apartenență a mulțimii  $A$ , în condițiile (Wang, 1997):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|x_1 - x_1^*|}{b_1}\right) * \dots * \left(1 - \frac{|x_n - x_n^*|}{b_n}\right); & \text{dacă } |x_1 - x_1^*| \leq b_1 \\ 0, & \text{alte} \end{cases} \quad (4.98)$$

Seturile fuzzy se formează în acord cu formula, unde  $i=1,2,3,\dots,n$ .

$$\begin{aligned} \mu_{Mică}(x) &= \{1/0 + 0,67/1 + 0,33/2 + 0/3\} \\ \mu_{Medie}(x) &= \{0/0 + 0/1 + 0,5/2 + 1/3 + 0,5/4 + 0/5\} \\ \mu_{Mare}(x) &= \{0/0 + 0/1 + 0/2 + 0/3 + 0,5/4 + 1/5\} \end{aligned} \quad (4.99)$$

Gradele de apartenență ale GM, PU și U sunt în figurile 4.53, 4.54 și 4.55.

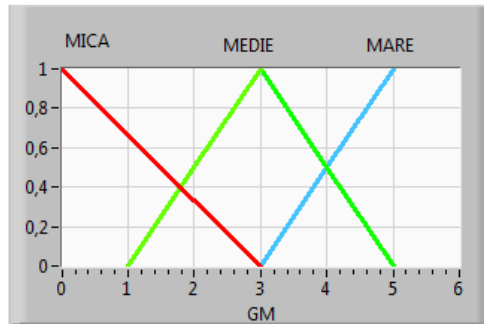


Fig. 4.53. Graficul gradului de apartenență GM

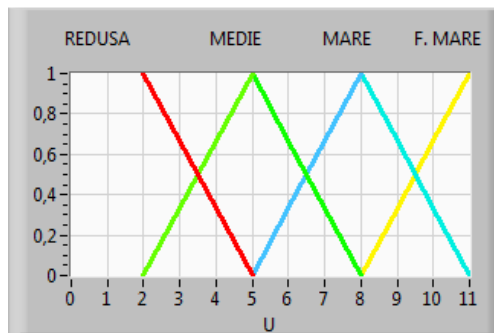


Fig. 4.54. Graficul gradului de apartenență U

Corespunzător tabelului 4.6, se pot forma nouă reguli fuzzy, iar fiecare regulă va furniza o ieșire validă.

Regula 1: Dacă  $x$  este mică și  $y$  este ușoară atunci  $z$  este redusă

Regula 2: Dacă  $x$  este mică și  $y$  este medie atunci  $z$  este medie

.....

Regula 8: Dacă  $x$  este mare și  $y$  este medie atunci  $z$  este mare

Regula 9: Dacă  $x$  este mare și  $y$  este rapidă atunci  $z$  este foarte mare

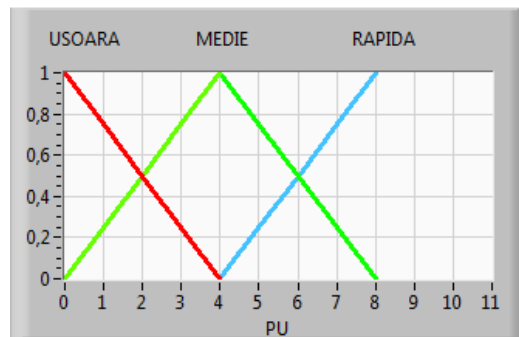


Fig. 4.55. Graficul gradului de apartenență PU

Pentru obținerea valorii de ieșire se utilizează mecanismul Mamdani, (Mamdani, 1977). Validarea valorii  $\varphi$  pentru fiecare regulă, corespunzător regulii max-min, este arătat în continuare.

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \min(\text{mică}(x), \text{usoară}(y)) \\ \varphi_2 &= \min(\text{mică}(x), \text{medie}(y)) \\ &\dots\dots\dots \\ \varphi_8 &= \min(\text{mare}(x), \text{medie}(y)) \\ \varphi_9 &= \min(\text{mare}(x), \text{rapidă}(y))\end{aligned}\quad (4.100)$$

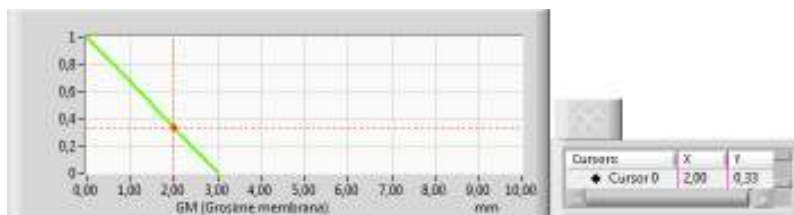
Maximul gradului de validitate este calculat cu formula:

$$\varphi_{1,2,\dots,n} = \max(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n) \quad (4.101)$$

În procesul de defuzificare, valoarea exactă  $z$  se obține cu "centrul de greutate" în acord cu gradul de validitate.

Valoarea de ieșire corespunzătoare valorilor de intrare sunt obținute de la proiectarea sistemului expert fuzzy, arătat ca în exemplul din figura 4.56.

Gradele de apartenență privind grosimea membranei (mm), potrivit valorilor de intrare, respectiv media presiunii de ulei (calculată, de exemplu, la fiecare oră ce acționează asupra membranelor, monitorizată on-line și în timp real) sunt reprezentate în figura 4.56, simulate pentru  $GM = 2$  mm și  $PU = 50$  bar.



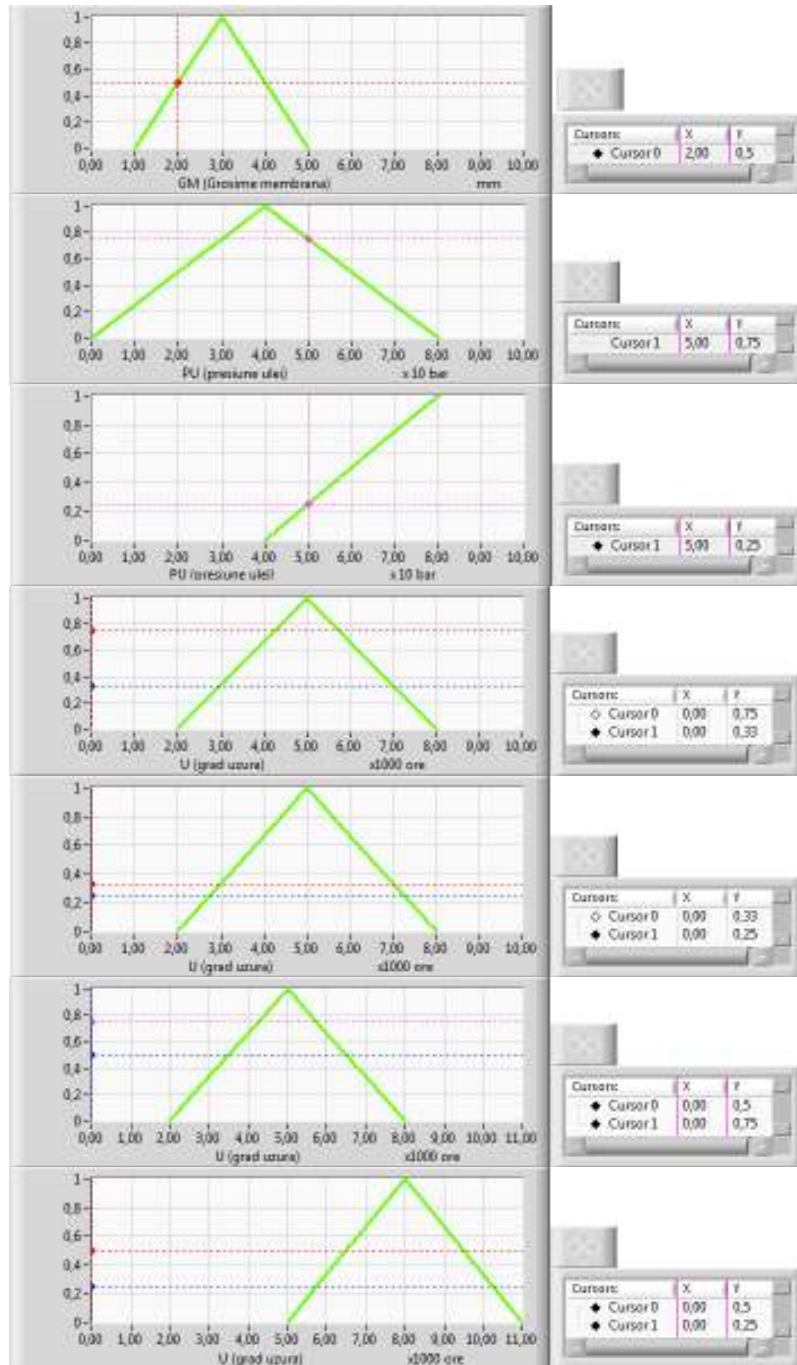


Fig. 4.56. Reprezentarea și determinarea în software-ul LabVIEW a gradelor de apartenență corespunzător GM și PU

Potrivit relațiilor (4.98)...(4.101), gradul de uzură determinat cu metoda centrului de greutate va rezulta ca în figura 4.57, cu abscisele  $x_i$ , corespunzătoare apartenențelor determinate, ordonatele  $w_i$ , corespunzătoare, 6 fiind cuantificarea valorii gradului de uzură multiplicat cu 1000, pentru obținerea valorii numărului de ore necesar, după care se va realiza lucrarea de mentenanță de nivel operativ pentru schimbarea uleiului încărcat cu particule de uzură.



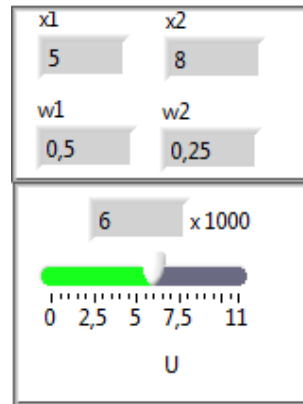


Fig. 4.57. Valoarea gradului de uzură obținut cu metoda centrului de greutate

Valoarea centrului de greutate este dată de formula:

$$CG = \frac{\int_a^b F(x) \cdot x dx}{\int_a^b F(x)} \quad \text{sau} \quad CG = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{w_i} \quad (4.102)$$

Pentru determinarea lucrărilor de mentenanță operativă privind schimbarea uleiului la compresoare cu membrane metalice, simulând pentru mai multe date de intrare, pentru diferite grosimi de membrane, respectiv pentru diferite tipodimensiuni de compresoare cu membrane metalice, s-au obținut datele din tabelul 4.7.

Tabelul 4.7. Simulare date intrare și rezultate grad uzură

Variabile de intrare		Variabile de ieșire U (mg)	
GM (mm)	PU (bar)	Schimbare ulei recomandat de fabricant (ore)	Schimbare ulei obținut de la SEFUN (ore)
0,5	12	3500	3083
1,5	27	4000	3506
2	50	6500	6000
4	78	8500	8322

Potrivit reprezentărilor din figura 4.58 și figura 4.59 se observă că sistemul expert fuzzy pentru evaluarea uzurii prin mentenanță proactivă și predictivă oferă capacitatea de a reduce în timp cheltuielile de mentenanță corectivă, spre deosebire de mentenanța preventivă bazată pe timp, prin alocarea informațiilor din cărțile tehnice ale echipamentelor, respectiv de la fabricanți.

Astfel, se poate determina relația între recomandările făcute de fabricanții de echipamente dinamice complexe, datele experimentale obținute prin aplicarea metodei de mentenanță predictivă (cazul monitorizării uleiului) și conectarea

sistemului expert prin același software LabVIEW folosit pentru achiziție de date și monitorizare.

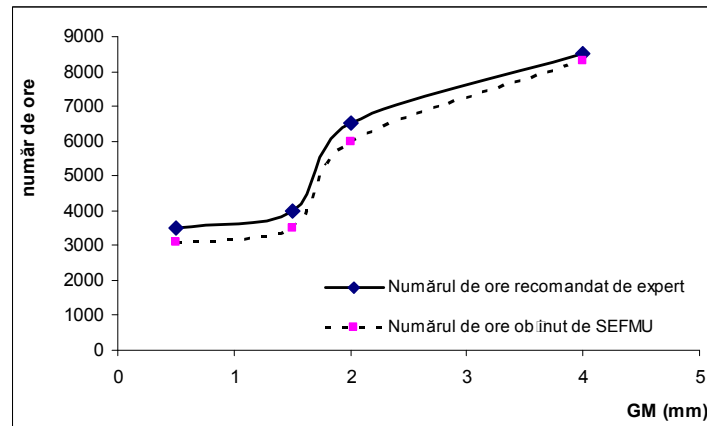


Fig. 4.58. Representare valori de intrare/ieșire pentru GM

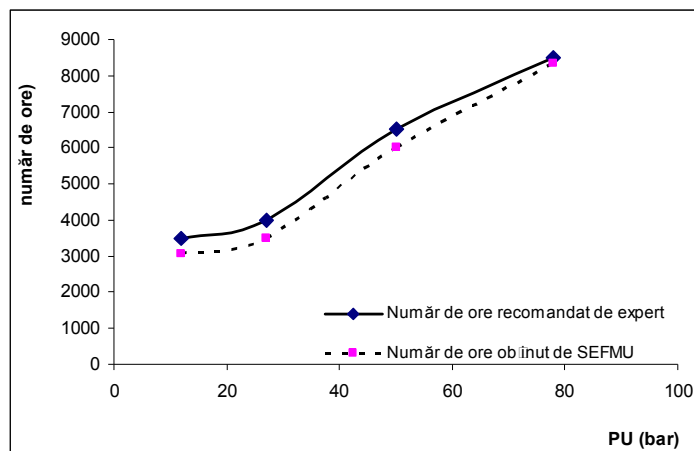


Fig. 4.59. Representare valori de intrare/ieșire pentru PU

SEFMU propus consideră că trecerea unui echipament din starea de funcționare în starea de defectare se realizează în mai multe etape, fiecare etapă fiind caracterizată de o anumită performanță. Se constată că SEFMU reduce considerabil cheltuielile de mentenanță corectivă. Sistemul expert se poate extinde și pentru alți parametri de monitorizare care fac obiectul mentenanței predictive, ca: vibrația, zgomotele și cavitația (Anghel, 2007 și 2008).

## 4.6. Metoda de determinare a gradului de siguranță

### 4.6.1. Determinarea gradului de siguranță operațional

Demersul determinării gradului de siguranță operațional la sistemele complexe nucleare se bazează pe suportul deciziei în activitatea de mentenanță

operativă integrată cu activitatea de operare, pentru monitorizarea stării de viață a sistemului tehnic mentenabil.

Acest demers reprezintă metoda pentru *risc și upgrade mentenanță* (RUM), care conduce la realizarea obiectivului general de fiabilizare a instalației nucleare, în ansamblul ei (Anghel, 2008).

Această fiabilizare se traduce în fapt prin cunoașterea calității dinamice pe care o are sistemul nuclear în timp real.

Aceasta presupune ca un rezultat cuantificabil determinarea nivelului de

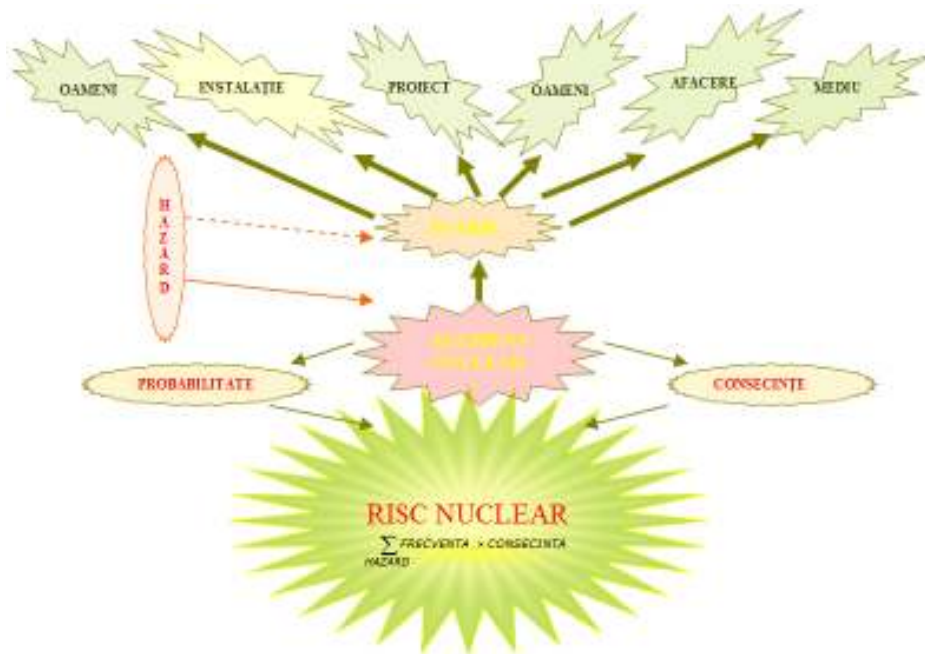


Fig. 4.60. Tipologia riscului

risc al instalației nucleare.

Riscul poate fi definit ca o amenințare care poate să exploateze eventualele slăbiciuni ale sistemului tehnic. Riscul este un eveniment care așteaptă să se întâmple. Pentru a se preîntâmpina apariția unui eveniment care să afecteze securitatea sistemului nuclear trebuie luate măsuri specifice. Aceste măsuri poartă denumirea de măsuri de securitate.

Se pot enumera următoarele categorii de măsuri de securitate:

- hardware;
- software;
- proceduri de operare specifice;
- controlul și contorizarea accesului;
- testarea procedurilor;
- securitatea personalului;
- măsuri de securitate la nivel de structuri fizice, clădiri, zone sau alte bunuri.

Analiza de risc presupune un proces de identificare a riscurilor de securitate, determinarea amplitudinii riscurilor, precum și identificarea zonelor cu risc mare și care trebuie securizate.

Din expresia matematică a riscului, conform figurii 4.60, rezultă că abordarea pentru controlul riscului se poate face pe trei căi (fig. 4.61):

- ☑ Abordarea A - reducerea frecvenței hazardului la valori joase;
- ☑ Abordarea B - reducerea consecințelor la valori joase;
- ☑ Abordarea C - reducerea riscului.

Din cele de mai sus rezultă că analiza de risc face parte din ansamblul de măsuri care poartă denumirea de *managementul riscului*. Managementul riscului pentru mentenanță poate fi definit ca totalitatea metodelor și mijloacelor de

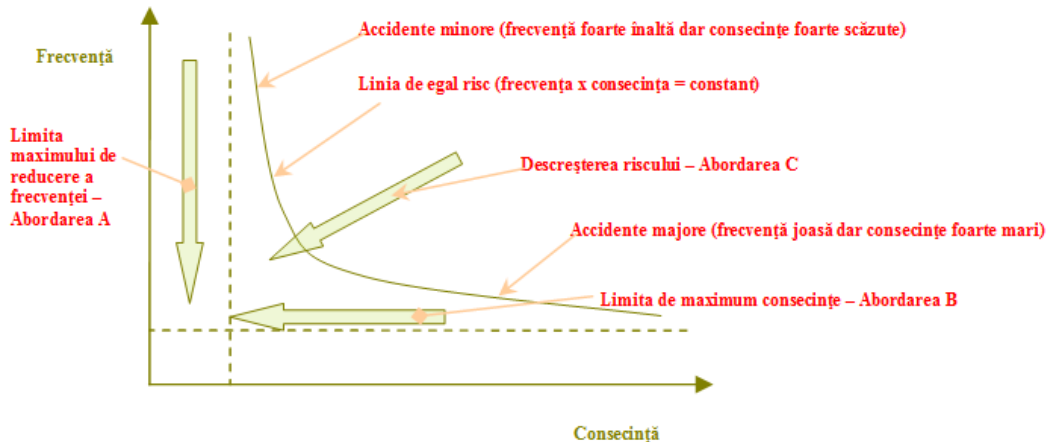


Fig. 4.61. Limitele abordărilor posibile pentru reducerea riscului nuclear

mentenanță folosite pentru identificare, control, eliminare sau minimizare a evenimentelor care pot afecta resursele sistemului.

În acest cadru, managementul riscului pentru mentenanță include următoarele:

- ☑ Identificarea echipamentelor (holoni) cu cea mai înaltă rată de defectare;
- ☑ Identificarea instalațiilor care au probleme particulare;
- ☑ Identificarea instalațiilor cu posibile piese de schimb ce pot fi disponibile altor instalații;
- ☑ Selectarea furnizorilor de echipamente pentru modificări de instalații bazate pe componente mai fiabile;
- ☑ Optimizarea inventarului de piese schimb bazat pe ratele de defectare, istoria reparațiilor și intervențiilor, respectiv prognosticul mentenanței pentru cazurile de incertitudine și imprecizie în mentenanță;
- ☑ Programarea și definirea preventivă a activităților de mentenanță predictivă;
- ☑ Furnizarea intrării la studiile disponibilității instalației nucleare;
- ☑ Furnizarea datelor pentru programele de mentenanță bazate pe fiabilitate.

În acest context se propune o metodă de determinare a gradului de siguranță pentru situații care apar frecvent în domeniul nuclear, determinate de incertitudine și imprecizie (Anghel, 2007), metodele folosite pentru situațiile certe în domeniul nuclear fiind procedurate și standardizate.

Metoda de determinare a gradului de siguranță se bazează pe logica fuzzy, și este benefică funcțiilor de diagnoză și prognoză ale mentenanței operaționale structurate holarhic. Principiile logicii fuzzy au fost aplicate în domenii diferite. În prezent se va aplica în domeniul mentenanței, pentru evaluarea riscului la IDN.

Se vor analiza 3 date de intrare:

- Problema operațională (vibrația);
- Probabilitatea de defectare;
- Consecința criticității.

Modelul de concepție al metodei este sintetizat în figura 4.62.

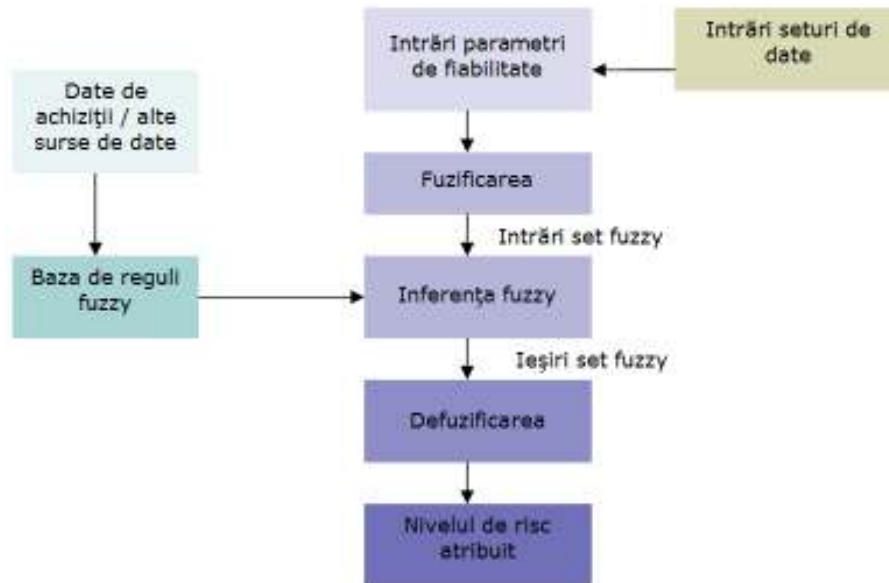


Fig. 4.62. Modelul conceptual fuzzy pentru nivelul de risc la IDN

#### 4.6.2. Procesul holic de fuzzificare

Inițial, regulile sunt în formă de valori numerice exacte, iar pentru baza de reguli fuzzy sunt necesare valori lingvistice, deci va trebui un proces de convertire din valori cantitative exacte în valori de intrare, ca set de date la valorile lingvistice adoptate. Acest proces se numește fuzzificare.

Pentru procesul de fuzzificare este necesar să se specifice universul de discurs și funcțiile de apartenență. Funcția de apartenență decide caracteristica setului fuzzy și reprezintă forme speciale, în exemplul considerat fiind forme triunghiulare.

Regulile fuzzy în estimarea gradului de risc (R) se realizează utilizând două variabile: probabilitatea de defectare sau cădere (P) și efectele sau consecințele (C) datorate defectărilor echipamentelor din structura holică considerată.

Parametrii de intrare vor trebui să cuantifice problemele interne și defectările existente pentru obiectivul tehnic considerat mentenabil (fig. 4.63).

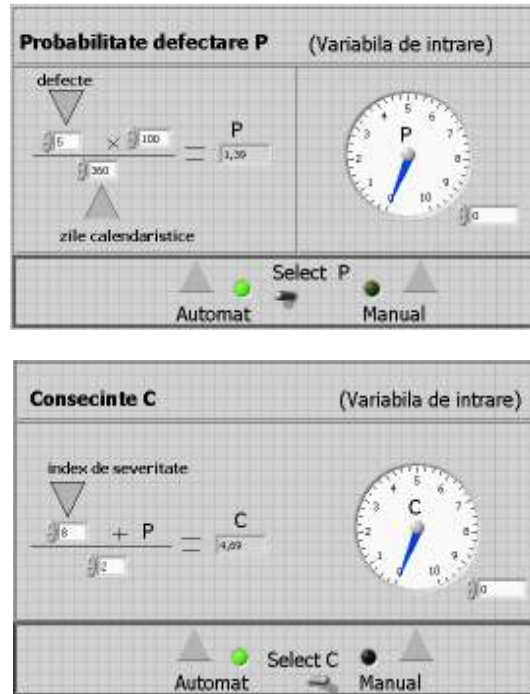


Fig. 4.63. Simularea cuantificării variabilelor de intrare în simulatorul

### 4.6.3. Cuantificarea setului de date de intrare

Valoarea probabilității este direct raportată la numărul de înregistrări de probleme apărute în operare, înregistrate și monitorizate prin analiza de vibrații. Astfel:

$$P = \frac{\text{cantitatea\_de\_defectari\_raportate}}{360} \times 100 \quad (4.103)$$

Pe de altă parte, consecințele datorate severității defectării aparținând problemei operaționale considerate, depind de valoarea  $P$ .

$$C = \frac{\text{estimarea\_gradului\_de\_efecte} + P}{2} \quad (4.104)$$

Parametrul de intrare  $P$  este cuantificat în cinci termeni lingvistici, parametrul de intrare  $C$  în patru termeni lingvistici, iar parametrul de ieșire  $R$  în cinci termeni lingvistici, între 0 și 10, care se vor nota cu  $P=\{P_i\}$ , cu  $i=1\dots5$  și  $C=\{C_i\}$ , cu  $i=1\dots4$ , iar ieșirea gradul de siguranță (sau risc) se va nota cu  $R=\{R_i\}$ , cu  $i=1\dots5$ .

Funcția de apartenență se va nota corespunzător parametrilor utilizați, cu  $\mu_P(t)$ ,  $\mu_C(t)$  și  $\mu_R(t)$ .

Bazat pe un univers de discurs și funcții de apartenență, seturile fuzzy pot fi construite ca în figura 4.64.

#### 4.6.4. Baza de reguli fuzzy holonic

După cuantificarea datelor de intrare, valorile lingvistice pot fi determinate de funcțiile de apartenență. Utilizând funcțiile de apartenență care au fost create și baza de reguli fuzzy, ieșirile posibile ale gradului de siguranță (R) poate fi găsit în baza de reguli fuzzy (fig. 4.65). Pentru diferite perechi de date de intrare vor fi găsite diferite ieșiri pentru nivele de siguranță de la aceleași reguli de bază.

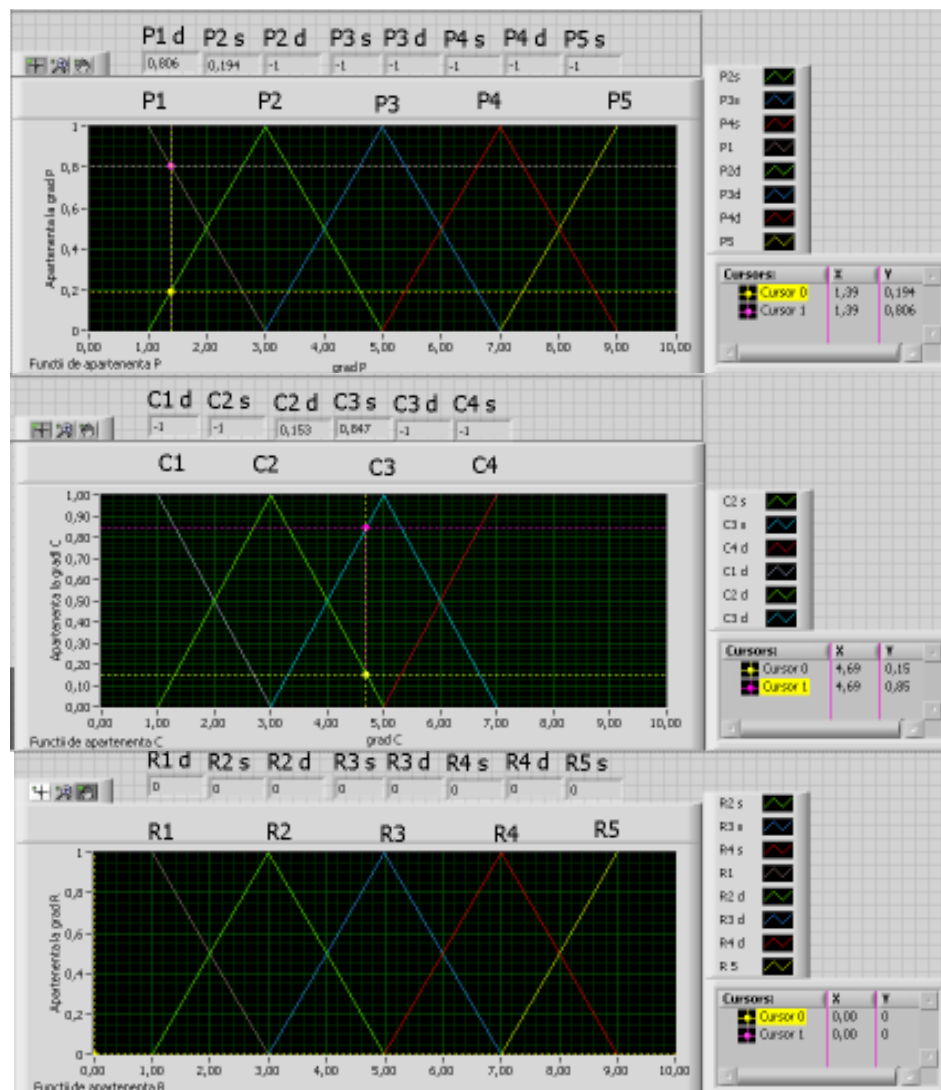


Fig. 4.64. Universul de discurs și funcțiile de apartenență pentru variabilele de intrare și ieșire simulate în LabVIEW



P1 (sau FS) – foarte scăzută  
 P2 (sau S) – scăzută  
 P3 (sau Me) – medie  
 P4 (sau Ma) – mare  
 P5 (sau FM) – foarte mare

C1 (sau B) – bun  
 C2 (sau PT) – puțin tolerabil  
 C3 (sau T) – tolerabil  
 C4 (sau NT) – netolerabil

R1(sau FS) – foarte scăzut  
 R2(sau S) – scăzut  
 R3 (sau Me) – mediu  
 R4(sau Ma) – mare  
 R5(sau FM) – foarte mare

Fig. 4.65. Baza de reguli fuzzy holonic cu LabVIEW

Valorile variabilelor lingvistice ale intrărilor și ieșirilor sunt descrise în cuvinte, ca: bun, puțin tolerabil etc. (fig. 4.66).

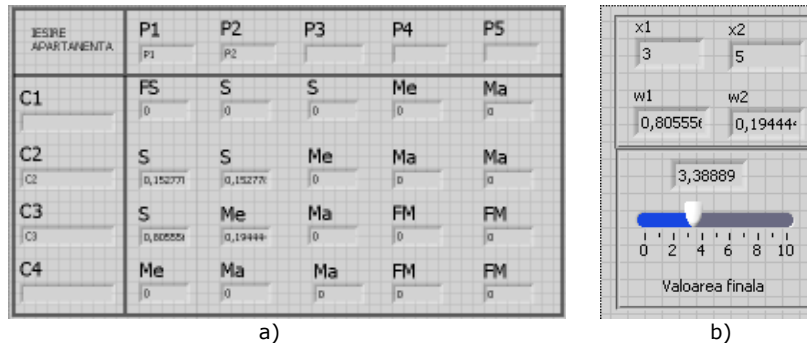


Fig. 4.66. Procesul de inferență (a) și defuzificare (b)

O regulă fuzzy completă este scrisă astfel:

“DACĂ ( $P$ ) este foarte scăzută ȘI ( $C$ ) este puțin tolerabilă ATUNCI ( $R$ ) este scăzut”.

Regulile fuzzy sunt bazate pe dezvoltarea analizei de fiabilitate și risc.

După cuantificarea datelor de intrare, valorile lingvistice pot fi determinate de funcțiile de apartenență.

Din figura 4.64 se observă procesul de inferență pentru problema operațională (vibrație). Pentru exemplificare, dacă problema operațională determină valorile (1,39), aceasta determină un set de două valori (0,194 și 0,806), respectiv (4,69) determină valorile (0,85 și 0,15).

Procesul de inferență pentru problema operațională va fi conform figurii 4.66.a), aplicându-se operatorul MIN-MAX. Astfel, pentru funcția de apartenență a lui  $R$  rezultă valorile  $w_1=0,666$  și  $w_2=0,333$ .

Pentru fiecare regulă implicată în procesul de evaluare, aplicarea operatorului fuzzy dă rezultate ca și cele din figura 4.66.



Se observă că:

- Implicațiile sunt implementate pentru fiecare regulă;
- Valoarea de apartenență dată de operatorul fuzzy ȘI ( $\mu_R$ ) în etapa anterioară devine valoare de apartenență pentru ieșirea nivelului de consecințe ale defectării ( $R$ ).
- Ieșirile regulilor sunt combinate într-un singur set fuzzy.
- În această etapă, toate cele patru reguli sunt combinate într-un singur set de apartenență pentru ( $R$ ).

Este utilizată metoda MAX. Rezultă că maximul valorii pentru aceeași ieșire  $\mu_R$  este pentru regula 2 (0,666).

#### 4.6.5. Defuzzificarea procesului holonic operațional

Aceasta va conduce la o singură valoare de ieșire pentru  $R$ . În procesul de defuzzificare se utilizează metoda centrului de greutate. Acest proces este simulat în LabVIEW.

Procesul de defuzzificare la rezultatul agregat ieșirii  $R$ , utilizând centrul de greutate, este prezentat în figura 4.66.b.

Formula matematică a centrului de greutate este:

$$D_y = \frac{\sum x_i \cdot w_i}{\sum w_i} \quad (4.105)$$

unde:

$D_y$  reprezintă centrul de defuzzificare a valorii singulare (crisp) de ieșire, care reprezintă ( $R$ ) în demersul propus;

$x_i$  - valoarea centrului de greutate a valorii lingvistice ( $i$ );

$w_i$  - valoarea de apartenență a setului de valori fuzzy ( $i$ ).

Utilizând rezultatul determinat în pasul de agregare și ecuația (4.105), valoarea finală (crisp) poate fi obținută ca:

$$D_y = \frac{(3,0,805) + (5,0,194)}{0,805 + 0,194} = 3,388 \quad (4.106)$$

Rezultatul defuzzificării este dat de 3,388, care înseamnă că  $R$  este estimat ca fiind în regiunea dintre nivel de risc scăzut și nivel de risc mediu.

Utilizând predicția riscului (nivelului de siguranță), decizia pentru mentenanță poate da un răspuns mai aprofundat pentru măsurile de mentenanță holonică preventivă.

#### 4.7. Concluzii

Pentru aplicarea metodologiei MHBR trebuie ținut cont de multiple variabile care depind de particularitățile fiecărei instalații nucleare sau, mai general, fiecărei instalații industriale care adoptă acest model. Astfel, MHBR propusă este determinată de necesitățile existente pentru IDN, potrivit reglementărilor, prin autorizarea funcționării în regim nuclear. Ca urmare, au fost stabilite și realizate

metode și mijloace suport pentru decizie ca mentenanță evoluată, în domeniul prognosticului și diagnosticului, care vor permite lărgirea bazei de cunoștințe integrate pe parcursul ciclului de viață al instalației.

În acest sens se realizează metode și mijloace cu caracter combinat, bazate pe fiabilitate și mentenanță bazată pe condiții, respectiv mentenanță predictivă, pentru defectările de proces cavitaționale realizându-se un stand experimental pentru evaluări calitative și cantitative de cavitație.

Pentru defectările datorate uzurii aleatoare se realizează un sistem expert fuzzy pentru evaluarea uzurii, care oferă posibilitatea de a reduce în timp cheltuielile de mentenanță corectivă, spre deosebire de mentenanța preventivă bazată pe timp, prin alocarea informațiilor din cărțile tehnice ale echipamentelor, respectiv de la producători.

Astfel, prin același software LabVIEW folosit pentru achiziție date și monitorizare (Anghel, 2007) se determină relația între recomandările făcute de fabricanții de echipamente dinamice complexe, datele experimentale obținute prin aplicarea metodei de mentenanță predictivă (cazul monitorizării uleiului) și conectarea sistemului expert. Sistemul expert pentru uzură se bazează pe faptul probat de realitate (din datele de istoric a IDN) că trecerea unui echipament din starea de funcționare în starea de defectare se realizează în mai multe etape, fiecare etapă fiind caracterizată de o anumită performanță.

Potrivit concepției holistice a MHBR, pentru necesitatea de apreciere și evaluare a riscului datorat incertitudinii informațiilor, cu interes pentru planul strategic și obiectivele de operare a IDN, se realizează o metodă de mentenanță bazată pe risc care facilitează obținerea unui program de mentenanță operativ în regim dinamic temporal (Anghel, 2008).

Ca rezultat al predicției, metoda propusă poate fi considerată ca o metodă de evaluare a măsurilor care se vor lua pentru continua îmbunătățire pe parcursul ciclului de viață al instalației considerate.

Folosind software-ul LabVIEW și suport hardware adecvat, pentru operarea IDN rezultă o calitate dinamică a sistemului mentenabil, datorită monitorizării variabilelor (vibrații, zgomote, uzură, parametri fizici de proces), realizându-se astfel prognoza și diagnoza defectelor de proces și a defectelor de produs.

Metodele prezentate în acest capitol asigură performanță în mentenanța nucleară, ca scop operațional final.

## **5. OPTIMIZAREA MENTENANȚEI ÎN DOMENIUL NUCLEAR**

### **5.1. Introducere**

Activitatea de mentenanță este foarte importantă în sistemele ce procesează fluide radioactive, cum este cazul IDN. Este necesar ca echipamentele să funcționeze fără defectări neașteptate. Mentenanța preventivă cuprinde un set de activități care se desfășoară înainte ca defectarea să se producă.

Efectele mentenanței preventive asupra sistemelor productive sunt studiate de mulți cercetători. Cheung și Hausman (1997) studiază optimizarea pieselor de schimb în raport cu defectele întâmplătoare ale echipamentelor. Hsu-Hua Lee (2004) evaluează efectul investițiilor financiare adaptabile ca raport cost/beneficiu pentru mentenanță. Yao, Xie ș.a. (2005) studiază legătura mentenanței preventive cu politica producției, ca aspect stochastic. Zequeira, Prida și Valdés (2004) prezintă un model pentru determinarea optimă între perioada de mentenanță preventivă sau corectivă și inventarul de piese schimb pentru facilitarea producției.

În acest capitol se prezintă diverse metode de modelare și simulare privind stocul de siguranță, programarea lucrărilor de mentenanță, analiza cantitativă și calitativă a defectărilor, acestea formând un tot unitar ca cele mai bune practici integrate în mentenanța holonică preventivă bazată în special pe incertitudine, ca o caracteristică a echipamentelor nucleare complexe.

### **5.2. Optimizarea stocului de siguranță**

În prezentul subcapitol se dorește creșterea disponibilității echipamentelor din IDN printr-o mentenanță eficientă, propunându-se optimizarea stocului. Informațiile de istoric privind mentenanța corectivă pentru echipamentele complexe, alături de informațiile de mentenanță predictivă, ca monitorizare ulei, vibrații, zgomote etc., precedate de metodele de prognostic și diagnostic, determină politica de realizare și justificare a stocului optim.

Așa cum s-a menționat anterior, siguranța este o măsură critică pentru instalațiile nucleare. În plus, deciziile în mentenanță au efect asupra siguranței. Astfel, este imperativ ca alocarea mentenanței să se facă în condiții de profitabilitate și fără aspect advers pentru siguranță. Problema optimizării, în condiții de siguranță și profitabilitate, este deosebit de importantă pentru domeniul nuclear, astfel încât cercetările din prezentul capitol doresc să contribuie la dezvoltarea acestei problematice tehnico-economice pentru MHBR la IDN. Cu alte cuvinte, se urmărește ca operarea IDN să nu mai "sufere" de "mentenanță", iar "finanziarul" să nu mai găsească mentenanța „prea costisitoare”.

Demersul optimizării propuse se bazează pe schema sugestivă din figura 5.1, particularizată pe problema defectelor de proces cavitaționale studiate și prezentate anterior, ca demers experimental cu ajutorul instalației pilot (stand CONTMENT), dar și prin validare cu software LabVIEW.

În figura 5.1, modulul de siguranță este reprezentat de sistemul expert fuzzy pentru comanda robinetului de reglare electromagnetic pentru evitarea defectelor cavitaționale. Astfel, modulul de siguranță va primi date de la modulul de mentenanță predictivă, ca rată de defectare, prin evidențierea alarmelor datorate căderilor sau depășirii limitelor impuse la monitorizarea de vibrații și/sau zgomote.

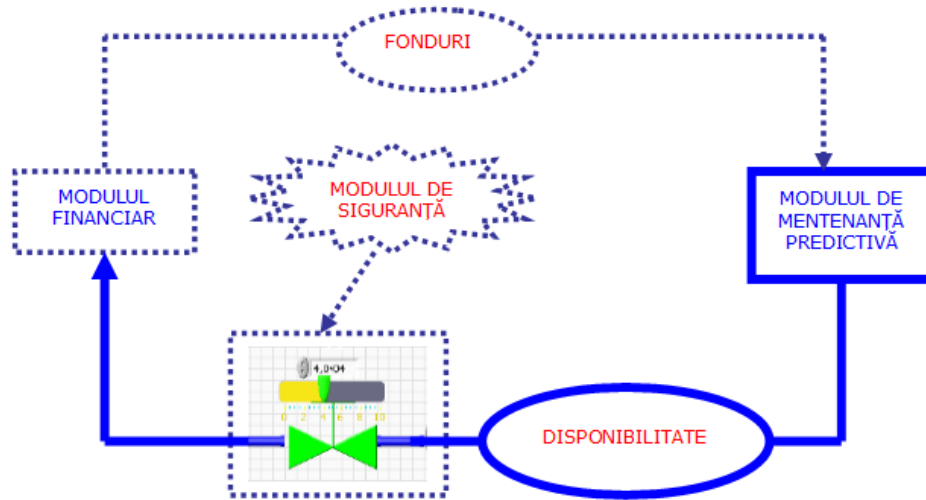


Fig. 5.1. Demersul optimizării stocului de siguranță

Astfel, în cazul în care holonul de diagnoză din cadrul modulului de mentenanță predictivă stabilește cauza defectării, respectiv defectul robinetului de reglare (a subansamblului de acționare sau a subansamblului de comandă și automatizare), prin holonul de programare și planificare se stabilesc lucrările de mentenanță operativă, lansate ca ordine de lucru, respectiv stocul de piese necesar, iar în final se corectează stocul de siguranță existent inițial. Astfel, se va asigura în timp real numărul de piese de schimb pentru subansamblele defecte, care au determinat, de exemplu, apariția cavitației sau blocarea robinetului.

Se calculează mai întâi *factorul de capacitate* (FC) pentru modulul de siguranță, apoi disponibilitatea pentru modulul de mentenanță.

La modul general, problema de optimizare pentru modulul de siguranță poate fi determinată de următoarea funcție obiectiv:

$$FC_i = f(M_{i11}, M_{i12}, \dots, M_{i1k}, M_{i2k}, \dots, M_{i2k}, \dots, M_{ij1}, \dots, M_{iJK}) \quad (5.1)$$

unde  $FC_i$  este factorul de capacitate în anul  $i$  și  $M_{ijk}$  este alocarea mentenanței pentru activitatea de mentenanță  $k$  ( $1 \leq k \leq K$ ) sistemului component  $j$  în anul  $i$ .

Constrângerea parametrului de control  $M_{ijk}$  este:  $0 \leq M_{ijk} < \infty$ , pentru  $i, j, k$ .

$$\sum_j \sum_k M_{ijk} = M_i, \text{ pentru toți } i \text{ și } FC(M_i) \leq CF_{STD.}, \text{ pentru toți } i.$$

$CF_{STD}$  este valoarea cerută prin standard (de exemplu NUREG 1.174).

În acest context, se conectează costul mentenanței alocate la rata de defectare a componentului. Cunoașterea ratei de defectare pentru fiecare component permite calculul probabilității de defectare a sistemului (sau  $FC$ ) utilizând metoda *arborilor de defectare fuzzy* (ADF) prezentată în acest capitol.

Pentru definirea priorității fondurilor alocate se întocmește un tabel realizat în software LabVIEW ca în figura 5.2, care va fi utilizat în modulul de mentenanță.

COMPONENT	LUCRARE MENTENANTA	COST, U.M	BENEFICIU: VAR(RD)
1	LM.1.1: dec. servomotor	0	0
	LM.1.2: dem. servomotor	0	0
	LM.1.3: varif. si test	0	0
	LM.1.4: mont. si test.	0	0
2	LM.2.1: dem. el. inchidere	0	0
	LM.2.2: verif. el. inchidere	0	0
	LM.2.3: inloc. el. inchidere	0	0
	LM.2.4: mont. el. inchidere	0	0
3	LM3.1: demontre PLC.	0	0

Fig. 5.2. Definirea priorității lucrărilor de mentenanță holonică operativă

Pentru modulul de mentenanță se consideră analiza doar pentru cazul electrovanei, celelalte echipamente care intră în structura funcțională a instalației pilot CONTMENT având o abordare similară.

Astfel, se poate obține următoarea buclă principală (BP), dependentă de fiabilitate: (CV, SM, EIR), unde CV este comanda vanei, SM - servomotor, EIR - element închidere robinet.

A doua buclă secundară (BS) include componentele de proces (AF, AEV) unde AF - alimentare fluid și AEV - alimentare în curent sau tensiune a comenzii electrovanei.

Sistemul este astfel 100% disponibil dacă toate cele trei componente ale buclei principale și cele ale buclei secundare sunt disponibile.

Parametrul care caracterizează disponibilitatea sistemului în model este factorul de capacitate dat de expresia:

$$FC = \left[ 1 - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (I_{BP})_i \right] \cdot [1 - I_{BS}] \quad (5.2)$$

unde  $(I_{BP})_i$  este indisponibilitatea componentului  $i$  din BP, iar  $(I_{BS})$  este indisponibilitatea din BS.

Având în vedere că electroventilul poate fi doar în două stări de disponibilitate sau indisponibilitate, indisponibilitatea poate fi exprimată în termeni de disponibilitate:

$$(I_{BP})_i = 1 - (D_{BP})_i \quad (5.3)$$

Fiecare din componentele BP poate cauza defectarea electrovanei. De aceea, se consideră aceste componente ca fiind în serie, iar disponibilitatea va fi:

$$(D_{BP})_i = \prod_{j=1}^3 (D_{BP})_{i,j} = \prod_{j=1}^3 (1 - (I_{BP})_{i,j}) \quad (5.4)$$

unde  $(D_{BP})_{i,j}$  înseamnă disponibilitatea componentului  $j$  a buclei primare  $i$ .

Componentul indisponibil, caracterizat de MTTR, poate fi exprimat:

$$(I_{BP})_{i,j} = \frac{MTTR_{i,j}}{MTTR_{i,j} + MTBF_{i,j}} \quad (5.5)$$

$$MTBF_{i,j} = \frac{1}{RD_{i,j}}$$

unde RD este rata de defectare.

Rezultă că disponibilitatea buclei principale poate fi exprimată astfel:

$$(D_{BP})_i = \prod_{j=1}^3 (D_{BP})_{i,j} = \prod_{j=1}^3 (1 - (I_{BP})_{i,j}) \quad (5.6)$$

$$= \prod_{j=1}^3 \left[ 1 - \frac{MTTR_{i,j}}{MTTR_{i,j} + MTBF_{i,j}} \right] \quad (5.7)$$

$$= \prod_{j=1}^3 \frac{1}{MTTR_{i,j} \cdot RD_{i,j} + 1}$$

Similar, pentru bucla secundară:

$$D_{BS} = \prod_{k=1}^2 \frac{1}{MTTR_k \cdot RD_k + 1} \quad (5.8)$$

În final, factorul de capacitate va fi:

$$FC = \left\{ 1 - \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \left[ 1 - \prod_{j=1}^3 \frac{1}{MTTR_{i,j} \cdot RD_{i,j} + 1} \right] \right\} \cdot \prod_{k=1}^2 \frac{1}{MTTR_k \cdot RD_k + 1} \quad (5.9)$$

După cum se cunoaște, caracterizarea fiabilității unui echipament este numită *rată de defectare* (RD), fiind calculată ca inversa sumei dintre media timpului între defectări (MTBF) și media timpului de reparare (MTTR).

$$RD = \frac{1}{MTBF + MTTR} \quad (5.10)$$

Considerând MTTR constant, rezultă următorul lanț de dependențe:

$$MTBF \propto \frac{1}{RD} \propto \text{Fiabilitate} \propto \text{Efort mentenanța predictivă} \propto \text{Fonduri} \quad (5.11)$$

care pune în centrul atenției continua îmbunătățire a MHBR, prin determinarea corectă și în regim dinamic a fiabilității sistemului mentenabil IDN, realizarea de cele mai bune practici pentru mentenanță holonică operațională și, nu în ultimul rând, justificarea științifică a fondurilor alocate mentenanței IDN.

În cadrul reducerii fondurilor pentru mentenanța corectivă, în același timp cu asigurarea securității de operare și mentenanță, se propune o metodă de determinare a stocului de piese de schimb optim pentru asigurarea disponibilității IDN, ca o constrângere corectă existentă la IDN.

Pentru determinarea mărimii optime a stocului de siguranță se are în vedere fenomenul uzurii aleatoare a pieselor componente ale sistemelor tehnice mentenabile considerate.

Se va urmări ajustarea fenomenelor de apariție a căderilor, prin utilizarea datelor de la holonul de istoric pentru evidența căderilor sau o repartitie de probabilitate cunoscută care să aproximeze foarte bine căderile (defectările) pieselor.

Pentru simplificare, în continuare se va vorbi numai despre numărul de evenimente (defectări) care au loc într-un interval de timp  $t$ , datorate fenomenului de uzură aleatoare a robinetului de reglare electromagnetică, fie datorită uzurii elementului de închidere, fie datorită fenomenelor cavitaționale, sau datorită existenței ambelor moduri de defectare.

Se consideră un interval de timp  $dt$  foarte mic (la limită infinit mic) și se presupune că probabilitatea realizării în cursul acestui interval de timp a unui singur eveniment  $p_1(dt)$  este proporțională cu  $dt$ , adică:

$$p_1(dt) = n \cdot dt \quad (5.12)$$

în care mărimea  $n$  este denumită, de obicei, intensitate. În general, intensitatea poate să depindă de timp, însă se presupune că ea este constantă.

Pentru ca în timpul  $dt$  să aibă loc două evenimente, este necesar ca după primul eveniment, în cursul timpului care a mai rămas până la sfârșitul intervalului  $dt$ , să aibă loc cel de-al doilea eveniment. Probabilitatea fiecăruia dintre aceste cazuri este dată de o relație de forma (5.12.), fiind un infinit mic de ordinul întâi, datorită lui  $dt$ .

Având în vedere independența statistică a celor două evenimente, probabilitatea  $p_2(dt)$  de realizare a celor două evenimente este egală cu produsul probabilităților lor, adică va fi un infinit mic de ordinul doi în raport cu  $dt$ . În mod analog ne convingem că probabilitățile  $p_3(dt)$ ,  $p_4(dt)$  ș.a.m.d., de realizare a 3, 4 ș.a.m.d. evenimente în cursul intervalului de timp  $dt$  sunt infiniti mici de ordinul trei, patru ș.a.m.d. De aceea, în egalitatea evidentă

$$p_0(dt) + p_1(dt) + p_2(dt) + p_3(dt) + \dots = 1,$$

care exprimă faptul că în intervalul de timp  $dt$  are loc cu certitudine un număr oarecare de evenimente. Se pot neglija termenii de la ordinul doi în sus, rezultând

$$p_0(dt) = 1 - p_1(dt),$$

care împreună cu relația (5.12) dă:

$$p_0(dt) = 1 - ndt. \quad (5.13)$$

Condiția (5.13) exprimă faptul că în cursul unui interval de timp de mărime nulă nu poate avea loc nici un eveniment, deci:

$$p_1(0) = p_2(0) = \dots = p_k(0) = 0 \quad (5.14)$$

Calcularea probabilității  $p_k(t)$  se începe cu cel mai simplu caz, cel al probabilității  $p_0(t)$ , pentru ca în cursul intervalului de timp  $t$  să nu aibă loc nici un eveniment. Se consideră pentru început un interval de timp  $t+dt$  nu prea mare și se calculează  $p_0(t+dt)$ .

Pentru ca în intervalul  $t+dt$  să nu aibă loc nici un eveniment, este necesar și suficient să nu existe nici un eveniment, atât în intervalul  $t$ , cât și în intervalul  $dt$ .

Datorită independenței statistice a evenimentelor care au loc în intervale independente (nesuprapuse), probabilitatea realizării simultane a celor două cazuri este egală cu produsul probabilităților fiecărui caz în parte, deci:

$$p_0(t+dt) = p_0(t) \cdot p_0(dt) = p_0(t) \cdot (1 - ndt) \quad (5.15)$$

Pe de altă parte, cu o precizie până la termenul de ordinul  $(dt)^2$ :

$$p_0(t+dt) = p_0(t) + \frac{dp_0(t)}{dt} dt \quad (5.16)$$

Rezultă:

$$\frac{dp_0(t)}{dt} dt + n \cdot p_0 = 0 \quad (5.17)$$

Rezolvând ecuația (5.17) cu condiția inițială (5.14), se obține:

$$p_0(t) = e^{-nt} \quad (5.18)$$

Se calculează acum  $p_k(t)$ , presupunând  $k \geq 1$ . Ca și mai înainte, se calculează pentru început  $p_k(t+dt)$ . Pentru ca în intervalul  $t+dt$  să aibă loc  $k$  defectări, este necesar și suficient să se realizeze unul dintre următoarele cazuri:

- în intervalul  $t$  au avut loc  $k$  evenimente, în  $dt$  nici unul;
- în intervalul  $t$  au avut loc  $k-1$  evenimente, în  $dt$  un eveniment;
- în intervalul  $t$  au avut loc  $k-2$  evenimente, în  $dt$  2 evenimente;

.....



- în intervalul  $t$  nu a avut loc nici un eveniment, în  $dt$  au avut loc  $k$  evenimente.

Datorită independenței statistice a evenimentelor ce au loc în intervalele nesuprapuse, rezultă:

$$p_k(t + dt) = p_k(t) \cdot p_0(dt) + p_{k-1}(t) \cdot p_1(dt) + p_{k-2}(t) \cdot p_2(dt) + \dots + p_0(t) \cdot p_k(dt) \quad (5.19)$$

Neglijând infiniții mici de ordinul doi și mai mare, relația de mai sus devine:

$$p_k(t + dt) = p_k(t) \cdot p_0(dt) + p_{k-1}(t) \cdot p_1(dt), \quad (5.20)$$

adică:

$$p_k(t + dt) = p_k(t) \cdot (1 - n \cdot dt) + p_{k-1}(t) \cdot n \cdot dt \quad (5.21)$$

Pe de altă parte:

$$p_k(t + dt) = p_k(t) + \frac{dp_k(t)}{dt} \cdot dt \quad (5.22)$$

Comparând cele două expresii ale lui  $p_k(t+dt)$ , pentru probabilitatea  $p_k(t)$ , care trebuie rezolvată impunând condițiile anterioare, după simplificările corespunzătoare se obține ecuația diferențială:

$$\frac{dp_k}{dt} + np_k = np_{k-1} \quad (5.23)$$

În ecuația (5.23), înlocuind succesiv  $k = 1, 2, 3, \dots$  și ținând cont de relația (5.24), se obțin probabilitățile  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$  ș.a.m.d. Se poate verifica că, soluția sistemului de ecuații (5.22) și (5.20) este:

$$p_k(t) = \frac{(nt)^k}{k!} e^{-nt} \quad (5.24)$$

Notând  $nt = m$ , care este o mărime constantă pentru un interval  $t$  fixat și o intensitate  $n$  constantă, relația (5.20) devine:

$$p_k = \frac{m^k}{k!} e^{-m} \quad (5.25)$$

care reprezintă legea de distribuție Poisson.

Rezultatul obținut poate fi interpretat în două moduri:

- Considerând un număr foarte mare de sisteme tehnice complet identice, compuse din piese identice, în cursul unui interval de timp  $t$ , primul sistem tehnic (echipament) înregistrează  $k_1$  defecte, al doilea  $k_2$  defecte ș.a.m.d. Atunci, valorile  $k_1, k_2, \dots$  sunt distribuite după legea Poisson.
- Considerând numai un singur sistem tehnic și o singură piesă,

mentenanța predictivă bazată pe monitorizare va înregistra un număr  $k_1, k_2, k_3, \dots$  de căderi în cursul unui număr mare de intervale de timp egale între ele.

Dacă intensitatea  $n$  este constantă, deci parametrul  $m$  este constant, valorile  $k_i$  vor fi distribuite, de asemenea, după legea Poisson (5.21).

O mărime care reprezintă un număr de defectări (variabilă în raport cu un anumit factor - timp), este distribuită Poisson dacă satisface condițiile:

1. este un număr întreg și pozitiv, inclusiv zero;
2. într-un interval foarte mic al domeniului de variație se poate produce un singur eveniment sau nici unul (probabilitatea producerii a două sau mai multe evenimente în acest interval este nulă);
3. probabilitatea producerii unui singur eveniment într-un asemenea interval foarte mic este proporțională cu mărimea intervalului.

De aici, rezultă pentru dispersie:

$$\sigma^2 = \langle k^2 \rangle - \langle k \rangle^2 = m^2 + m - m^2 = m \quad (5.26)$$

Deci, parametrul  $m$  al distribuției Poisson reprezintă speranța matematică  $\langle k \rangle$  a variabilei aleatoare, precum și dispersia  $\sigma^2$ .

Repetarea de  $n$  ori, în condiții identice, a măsurării directe a numărului de defectări, care reprezintă o mărime distribuită Poisson, oferă un set de valori numerice  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$ , evident unele valori putându-se repeta. Probabilitatea  $P$  a realizării simultane a tuturor celor  $n$  valori individuale este egală cu produsul probabilităților individuale:

$$P = e^{-m} \frac{m^{k_1}}{k_1!} \cdot e^{-m} \frac{m^{k_2}}{k_2!} \cdot \dots \cdot e^{-m} \frac{m^{k_n}}{k_n!} = \prod_{i=1}^n e^{-m} \frac{m^{k_i}}{k_i!} \quad (5.27)$$

a cărei valoare nu poate fi calculată datorită necunoașterii parametrului  $m$ .

În ipoteza plauzibilității maxime, drept estimat al parametrului  $m$  se consideră acea valoare pentru care funcția  $P$  atinge maximum. Atunci, estimatul parametrului  $m$  al distribuției se obține din condiția:

$$\frac{\partial \ln P}{\partial m} = 0 \quad (5.28)$$

Logaritmând relația (5.27), se obține:

$$\ln P = -nm + \ln m \sum_{i=1}^n k_i - \sum_{i=1}^n \ln k_i! \quad (5.29)$$

Derivând în raport cu  $m$

$$\frac{\partial \ln P}{\partial m} = -n + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n k_i \quad (5.30)$$

Astfel, din condiția (5.28) se obține estimatul

$$m^* = est(m) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i = k_m \quad (5.31)$$

care este un estimat consistent și nedepășat.

Deci, conform relației (5.31), estimatul parametrului  $m$  al distribuției Poisson este media aritmetică  $k_m$  a șirului de valori obținute prin monitorizare (mentenanță predictivă).

Având în vedere procesul de uzură aleatoare, se recomandă distribuția Poisson, în ce privește raționamentul economic ce se propune va rămâne același pentru orice altă distribuție determinată ca și caracteristică altor moduri de defectare.

Pentru optimizarea stocului de siguranță se propune un nivel optim al stocului de rezervă care să minimizeze costul total determinat de mărimea stocului de piese de rezervă.

În cazul când stocul este mai mare decât necesar, speranța excedentului ( $Ee$ ) este dată de relația:

$$Ee = \sum_{k=0}^{S_s} (S_s - k) \frac{e^{-m} m^k}{k!} \quad (5.32)$$

în care:

$S_s$  este stocul de siguranță;

$k$  - variabilă aleatoare reprezentând numărul de căderi ale piesei;

$M$  - numărul mediu de căderi.

În cazul în care stocul este mai mic decât cel necesar (numărul de piese care ar cădea este mai mare decât numărul pieselor din stocul de siguranță), speranța deficitului ( $Ed$ ) este dată de relația:

$$Ed = \sum_{k=S_s+1}^{\infty} (k - S_s) \frac{e^{-m} m^k}{k!} \quad (5.33)$$

Mărimea optimă a stocului se obține minimizând costul total ( $C_t$ ), dat de expresia:

$$C_t = C_S \sum_{k=0}^{S_s} (S_s - k) \frac{e^{-m} m^k}{k!} + C_C \sum_{k=S_s+1}^{\infty} (k - S_s) \frac{e^{-m} m^k}{k!} \quad (5.34)$$

unde:

$C_s$  este costul de stocare, care cuprinde suma cheltuielilor ce trebuie efectuate în timpul staționării pieselor de schimb în stoc, și anume: cheltuieli cu primirea, recepția, transportul în interiorul depozitului de piese, manipularea, depozitarea propriu-zisă, conservare, evidență; efortul mobilizării fondurilor financiare aferente, dobânzi, taxe, impozite etc.; cheltuieli cu amortizarea spațiilor de depozitare, a dotărilor aferente, cheltuieli cu plata salariilor lucrătorilor care își desfășoară activitatea în cadrul depozitelor de piese de schimb.

$C_c$  - costul căderii sau a indisponibilității echipamentului (pierderile posibile datorită stagnării echipamentului din cauza lipsei în stoc a pieselor necesare).

Spre exemplu, pentru o piesă componentă a unui sistem tehnic mentenabil din cadrul unei instalații nucleare se cunosc datele de intrare, conform figurii 5.3.

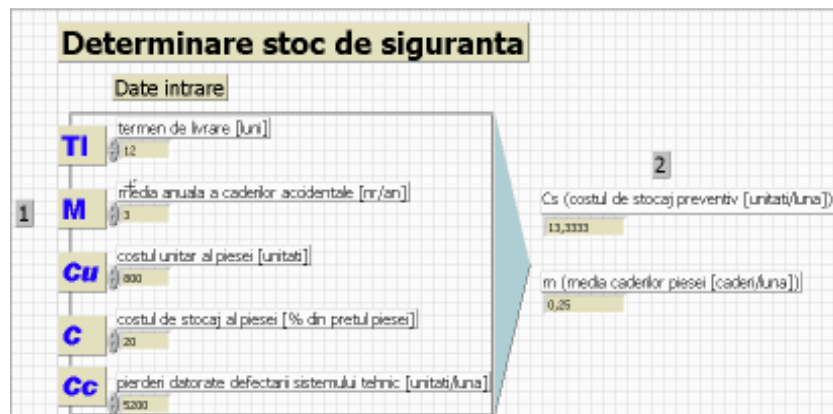


Fig. 5.3. Determinarea stocului de siguranță, etapa 1 si 2

nr. de defectari	$k$	$P(k)$
0	$k_0$	$P(k_0)$
1	$k_1$	$P(k_1)$
2	$k_2$	$P(k_2)$
3	$k_3$	$P(k_3)$
4	$k_4$	$P(k_4)$
5	$k_5$	$P(k_5)$
6	$k_6$	$P(k_6)$

probabilitatea de a avea  $k$  defectari

Fig. 5.4. Determinarea stocului de siguranță etapa 3 si 4

$S_s$	$C_t$
0	$C_{t0}$
1	$C_{t1}$
2	$C_{t2}$
3	$C_{t3}$
4	$C_{t4}$
5	$C_{t5}$

5: simulare nr. de piese existente in stoc  
6: calculul costului total

Fig. 5.5. Simularea și calculul costului total cu LabVIEW

Pe baza datelor de intrare (pasul 1) se obțin valorile pentru  $C_s$  și  $m$  (pasul 2). Probabilitățile de a avea  $k$  scoateri din funcțiune, având în vedere repartiția Poisson, vor fi conform figurii 5.4. Simulând numărul de piese existente în stoc și calculând costul total conform relației corespunzătoare, va rezulta conform figurii 5.5.

Rezultă deci, că pentru un nivel de stoc de siguranță mai mare de 2 piese, costul total crește, nivelul optim al stocului de siguranță fiind de 2 piese, nivel pentru care costul total este minim (fig. 5.6).

### 5.3. Programarea lucrărilor de mentenanță

Concepția și conducerea proceselor de mentenanță sunt două aspecte ale mentenanței integrate (partea de metode de mentenanță și partea de mentenanță operativă) care au o contribuție bine definită în noua abordare a MHBR, în general, și a mentenanței holonice operaționale în mod particular.

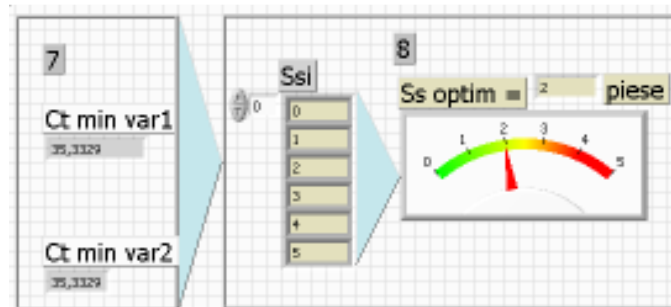


Fig. 5.6. Determinarea nivelului optim al stocului de siguranță cu LabVIEW

În abordarea holonică a problematicii legate de ordonarea mentenanței se apelează la două categorii principale: reguli de prioritate și criterii de optimizare, acestea determinând în ultimă instanță obiectivul (ținta) procesului de ordonare pentru realizarea lucrărilor de mentenanță.

Deciziile care se referă la ordonare au în vedere obiectivele tehnico - economice (criteriile de optimizare), care de fapt sunt ținte ale procesului de ordonare. Aceste obiective pot fi atinse folosind în cele mai multe cazuri o singură regulă de prioritate.

În acest studiu se propune o procedură de ordonare a mentenanței care utilizează un sistem decizional de tip multiatribut, construit cu ajutorul mulțimilor fuzzy.

Notații folosite:

$T$  - orizontul de planificare (timpul de mentenanță disponibil);

$t$  - momentul la care trebuie luată decizia;

$N$  - numărul de lucrări de mentenanță operativă ( $LM$ ), datorate ordinelor de lucru generate de funcția de responsabilitate operațională a Compartimentului de Mentenanță din IDN, în cadrul managementului holistic;

$i$  - indicele  $LM$  (sau pentru  $OL$ );

$OL$  - ordin de lucru mentenanță;

$j$  - indicele operației de mentenanță ( $OM$ );

$j(t)$  - operația  $OM$  următoare aferentă  $LM_i$ , în condițiile în care toate  $OM_j$ , unde  $1 \leq j < j(t)$ , au fost executate;

$TP_{ij}$  - timpul de realizare la  $OM_j$  a  $LM_i$ ;

$TO_i$  - numărul total de operații necesare realizării  $LM_i$  ( $1 \leq j \leq TO_i, \forall i$ );

$TT_i$  - timpul total de realizare al  $OL_i$

$$TT_i = \sum_j TP_{ij}, j=1, TO_i \quad (5.35)$$

$RO_i(t)$  - numărul de operații rămase pentru realizarea  $LM_i$ , la momentul  $t$ ;  
 $RM_i(t)$  - timpul de mentenanță rămas la momentul  $t$ , în cazul  $LM_i$ ;  
 $R_{ij}$  - momentul la care  $LM_i$  este gata pentru execuția  $OM_j$ ;  
 $R_{i1}$  - momentul la care  $LM$  este gata de operare în sistem;  
 $C_i$  - momentul la care  $LM_i$  a fost realizată complet și iese din evidența sistemului de mentenanță holonică operativă;  
 $d_i$  - termenul de predare a  $LM_i$ ;  
 $L_i$  - întârzierea  $LM_i$ ;

$$L_i = C_i - d_i \quad (5.36)$$

$T_i$  - întârzierea  $LM$  peste termenul de planificare:

$$T_i = \max(0, L_i) \quad (5.37)$$

$F_i$  - intervalul de timp pe care  $LM$  îl petrece în sistem

$$F_i = C_i - R_{i1} \quad (5.38)$$

$S_i(t)$  - regula rezervei de timp

$$S_i(t) = d_i - R_{ij} - TT_i \quad (5.39)$$

$s_i$  - rezervă de timp statică:

$$s_i = d_i - R_{i1} - TT_i \quad (5.40)$$

### 5.3.1. Nivele de decizie

În contextul procedurii de ordonanțare bazată pe mulțimi fuzzy, regulile de prioritate au fost clasificate în funcție de nivelul decizional considerat.

Procesul decizional se desfășoară pe două nivele ierarhice:

- Nivelul I - selectarea  $LM$  care urmează să fie operată în sistemul holonic de mentenanță;
- Nivelul II - selectarea echipamentului la care urmează să fie realizată  $LM$ .

#### Nivelul I - selectarea $LM$

La acest nivel decizional se va apela la regulile de prioritate utilizate în problemele de ordonanțare abordate în mod clasic. Aceste reguli sunt grupate în trei categorii:

- I.a) Reguli de prioritate care depind de  $LM$ ;
- I.b) Reguli de prioritate care depind și de  $OM$ ;
- I.c) Reguli de prioritate care depind de unele momente variabile în timp.

*I.a) Reguli de prioritate care depind de LM*

I.a.1) Se selectează LM cu cel mai apropiat termen de programare, adică:  $\min Z_i$ , unde

$$Z_i = d_i \quad (5.41)$$

I.a.2) Se selectează LM cu cea mai mică rezervă inițială de timp (cea mai mică valoare a rezervei statice), adică:  $\min Z_i$ , unde

$$Z_i = s_i \quad (5.42)$$

I.a.3) Se selectează LM cu cel mai mic raport dintre timpul total pe care LM îl realizează în sistem și rezerva inițială:  $\min Z_i$ , unde

$$Z_i = \frac{d_i - R_{i,1}}{TT_i} \quad (5.43)$$

I.a.4) Se selectează LM cu cel mai mare timp total de operare:  $\max Z_i$ , unde

$$Z_i = TT_i \quad (5.44)$$

I.a.5) Se selectează LM cu cel mai mic timp total de operare:  $\min Z_i$ , unde

$$Z_i = Tt_i \quad (5.45)$$

I.a.6) Se selectează LM care este prima gata pentru realizare:  $\min Z_i$ , unde

$$Z_i = R_{i,j}, i \in N_{i,j} \quad (5.46)$$

I.a.7) Se selectează LM cel mai costisitor:  $\max Z_i$ , unde

$$Z_i = VP_i \quad (5.47)$$

*I.b) Reguli de prioritate care depind și de OM*

I.b.1) Se selectează LM cu cel mai mic timp de realizare la OM următoare  $\min Z_i$ , unde

$$Z_i = Tp_{ij} \quad (5.48)$$

I.b.2) Se selectează LM cu cel mai mare timp de operare pentru OM următoare:  $\max Z_i$ , unde

$$Z_i = TP_{ij} \quad (5.49)$$

I.b.3) Se selectează LM cu cel mai mic timp de operare rămas:  $\min Z_i$ , unde

$$Z_i = Rp_i \quad (5.50)$$

I.b.4) Se selectează LM cu cel mai mare timp de operare rămas:  $\max Z_i$ , unde

$$Z_i = RP_i \quad (5.51)$$

I.b.5) Se selectează LM cu cel mai mic raport dintre timpul de execuție al OM imediat (următoare) și timpul total de operare:  $minZ_i$ , unde

$$Z_i = \frac{TP_{ij}}{TT_i} \quad (5.52)$$

I.b.6) Se selectează LM cu cel mai mic produs dintre timpul de execuție al operației imediat (următoare) și timpul total de operare:  $minZ_i$ , unde

$$Z_i = TP_{ij} \times TT_i \quad (5.53)$$

I.b.7) Se selectează LM cu cel mai mare raport dintre timpul de execuție al operației imediate (următoare) și timpul total de operare:  $max Z_i$ , unde

$$Z_i = \frac{TP_{ij}}{TT_i} \quad (5.54)$$

I.b.8) Se selectează LM cu cel mai mare produs dintre timpul de execuție al operației imediate (următoare) și timpul total de operare:  $maxZ_i$ , unde

$$Z_i = TP_{ij} \times TT_i \quad (5.55)$$

I.b.9) Se selectează LM cu cel mai mic număr de OM rămase de:  $minZ_i$ , unde

$$Z_i = RO_i \quad (5.56)$$

I.b.10) Se selectează LM cu cel mai mare număr de operații rămase de executat:  $maxZ_i$ , unde

$$Z_i = RO_i \quad (5.57)$$

I.b.11) Se selectează LM cu cea mai mică valoare a rezervei de timp:  $minZ_i$ , unde

$$Z_i = s_i \quad (5.58)$$

I.b.12) Se selectează LM cu cel mai mic raport dintre rezerva de timp și numărul de operații rămase nerealizate:  $minZ_i$ , unde

$$Z_i = \frac{S_i}{RO_i} \quad (5.59)$$

I.b.13) Se selectează LM cu cel mai mic raport dintre rezerva de timp și timpul total de mentenanță:  $minZ_i$ , unde



$$Z_i = \frac{S_i}{TT_i} \quad (5.60)$$

I.b.14) Se selectează LM cu cel mai mic raport dintre rezerva de timp și timpul de mentenanță rămas:  $\min Z_i$ , unde

$$Z_i = \frac{S_i}{RM_i} \quad (5.61)$$

*I.c) Reguli de prioritate care depind de unele momente variabile în timp*

I.c.1) Se selectează LM care a intrat primul în sistemul de planificare pentru mentenanță al echipamentului:  $\min Z_i$ , unde

$$Z_i = R_{ij}, i \in N_{ij} \quad (5.62)$$

### **Nivelul al II-lea - selectarea echipamentului (E)**

După desemnarea LM cu prioritatea maximă se va alege echipamentul pentru care aceasta va fi realizată, pornindu-se de la premisa că există mai multe echipamente în cadrul IDN la un moment dat, pentru care să se execute o anumită OM pentru LM considerată.

Criteriile care vor sta la baza procesului decizional pentru desemnarea E sunt grupate astfel:

II.a) Criterii care se referă la echipamentul (E) propriu-zis;

II.b) Criterii care se referă la piese de schimb pentru mentenanță;

II.c) Criterii care se referă la dispozitivele de transport.

*II.a) Criterii care se referă la E propriu-zis*

II.a.1) Se selectează E pentru care timpul de mentenanță este cel mai mic (TM):  $\max Z_i$ , unde

$$Z_i = TM_k \quad (5.63)$$

II.a.2) Se selectează E la care LM se poate face în condiții maxime de siguranță SM:  $\max Z_i$ , unde

$$Z_i = SM_k \quad (5.64)$$

II.a.3) Se selectează E care presupune timpi auxiliari minimi - AUX:  $\min Z_i$ , unde

$$Z_i = AUX_k \quad (5.65)$$

În categoria timpilor auxiliari vor fi considerați: timpii de reglare, timpii de fixare, timpii de ajustare.

II.a.4) Se selectează E la care există experiența umană cea mai mare EU:  $\max Z_i$ , unde

$$Z_i = EU_k \quad (5.66)$$

### II.b) Criterii care se referă la piese de schimb

II.b.1) Se selectează E care are cel mai mare număr de piese de schimb și consumabile necesare LM în magazia proprie de service:  $maxZ_i$ , unde

$$Z_i = NS_k \quad (5.67)$$

II.b.2) Se selectează E ale cărei piese de schimb și consumabile sunt cel mai ușor de achiziționat:  $minZ_i$ , unde

$$Z_i = APS_k \quad (5.68)$$

### II.c) Criterii care se referă la modalitatea de transport a pieselor de schimb

II.c.1) Se selectează modalitatea de transport care asigură un timp de transport minim - TTR:  $minZ_i$ , unde

$$Z_i = TTR_k \quad (5.69)$$

Timpul de transport se consideră compus din: timpul de ambalare a pieselor, timpul de transport propriu-zis de la furnizor la beneficiar și timpul de la recepție la echipament.

## 5.3.2. Stabilirea priorităților și optimizarea mentenanței

Indiferent de nivelul decizional, etapele care urmează să fie parcurse sunt cele prezentate în figura 5.7.

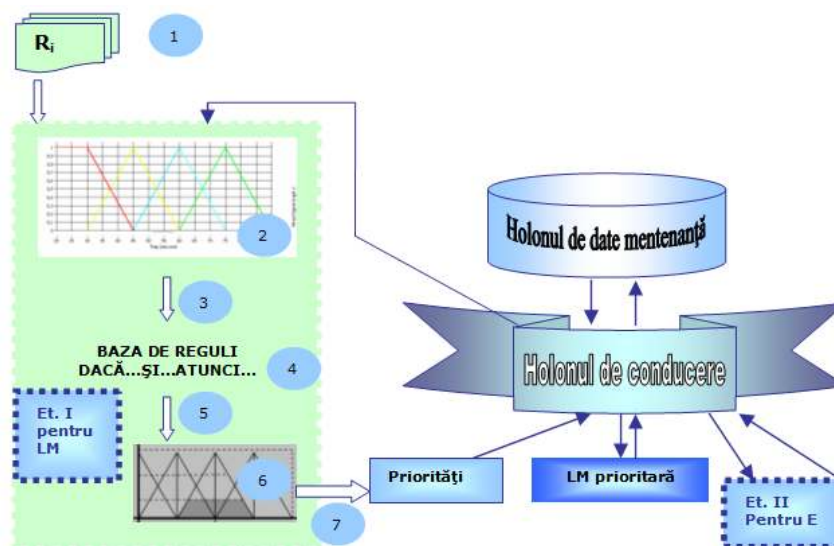


Fig. 5.7. Procesul decizional în ansamblul sistemului holonic

Procesul decizional, în ansamblu, este descris în figura 5.7. Se pun în evidență următorii pași, specifici atât nivelului I cât și nivelului II:

- 1 - intrări ferme;
- 2 - fuzzificare;
- 3 - intrări fuzzificate;
- 4 - schema de inferență;
- 5 - concluzie (vagă);
- 6 - defuzzificare;
- 7 - ieșire fermă.

### **Reguli de prioritate. Criterii de evaluare**

Pot fi luate în discuție, la un moment dat, mai multe reguli de prioritate. Aceste reguli se vor defini ca *intrări* în sistemul decizional (fig. 5.7). Intrările în sistemul decizional reflectă starea sistemului de mentenanță la momentul în care se pune problema stabilirii ordinii de realizare a LM, caracterizând fiecare LM care solicită operarea în sistem. Pentru un sistem decizional bazat pe mulțimi fuzzy intrările poartă denumirea de *criterii de evaluare*.

### **Variabile lingvistice. Grade lingvistice**

Lucrările de mentenanță care reclamă operarea pe un anumit subsistem holonic vor fi tratate ca *variante posibile*.

Fiecărui criteriu *i* se asociază o variabilă lingvistică, care va desemna "Evaluarea variantei *i* în criteriul *j*".

Pentru fiecare variabilă lingvistică se definesc *grade lingvistice* sau *termeni lingvistici*. Aceștia vor servi la caracterizarea "vagă" a informațiilor ferme.

### **Funcții de apartenență**

Corelația dintre *valorile ferme*, ale *variabilei lingvistice* și gradele lingvistice considerate se realizează prin intermediul *funcțiilor de apartenență*. Acestea pot să aibă diferite forme de reprezentare (Preitl și Precup, 1997), (Sofron ș.a., 1998). Valorilor ferme le vor corespunde anumite valori ale *gradului de apartenență*, în funcție de gradul lingvistic (termenul lingvistic) la care acestea sunt raportate. Stabilirea gradelor de apartenență se face prin procesul de fuzzificare.

### **Stabilirea metodei de conectare a diverselor valori ale funcțiilor de apartenență**

Până în faza aceasta s-a pus în evidență modalitatea în care valorile ferme ale mărimilor de intrare caracteristice unei LM, respectiv a unui echipament pot fi fuzzificate. În continuare va trebui ca aceste valori ale gradelor de apartenență (intrări fuzzificate) să poată fi agregate. Inferența se face cu ajutorul unei *baze de reguli*. Regulile, denumite și *reguli de inferență*, au forma generală:

*DACĂ (premise) ATUNCI (concluzia)*

Concluzia rezultată este o informație vagă exprimată prin intermediul unor *grade lingvistice (termeni lingvistici)* care sunt asociate variabilei lingvistice ce descrie vag ieșirea din sistemul de fuzzificare, dacă este îndeplinită premisea.

După evaluarea regulilor active se va trece la conectarea valorilor funcțiilor de apartenență rezultate în urma evaluării fiecărei reguli active.

Rezultatul inferenței este valoarea vagă a mărimii de ieșire.

Metoda de conectare este metoda MAX- MIN.

### Defuzificarea propusă

Variabila de ieșire din procesul de inferență va avea o valoare care va depinde de valorile variabilelor de intrare. Dar, valorile variabilelor de intrare au fost fuzzificate (sunt vagi), de aceea și valorile variabilelor de ieșire vor fi vagi. Folosindu-se metoda centrul de greutate se va obține în final o valoare singulară.

### 5.3.3. Studiu de caz: sistem expert pentru mentenanță holică operativă

#### Nivelul I. SELECTAREA LM

Pentru punerea în evidență a metodei propuse, din totalitatea celor prezentate anterior se vor lua în considerare doar câteva reguli de prioritate pentru cele două nivele, pentru simplu motiv că demersul de modelare și simulare rămâne valabil în cazul tuturor regulilor.

Astfel, se prezintă modul de aplicare a procedurii decizionale bazată pe mulțimi fuzzy și mentenanță predictivă prin monitorizare de vibrații și date de istoric. Se vor pune în evidență fazele procesului decizional corespunzătoare celor două nivele:

- selectarea *lucrării de mentenanță* (LM);
- selectarea subansamblelor mentenabile considerate independente din punct de vedere structural și funcțional în cadrul unui echipament complex.

Într-un sistem compus din trei subansamble mentenabile ale unui echipament complex vor fi operate două lucrări de mentenanță. Se pune problema care dintre cele două tipuri de lucrări de mentenanță are prioritate mai mare.

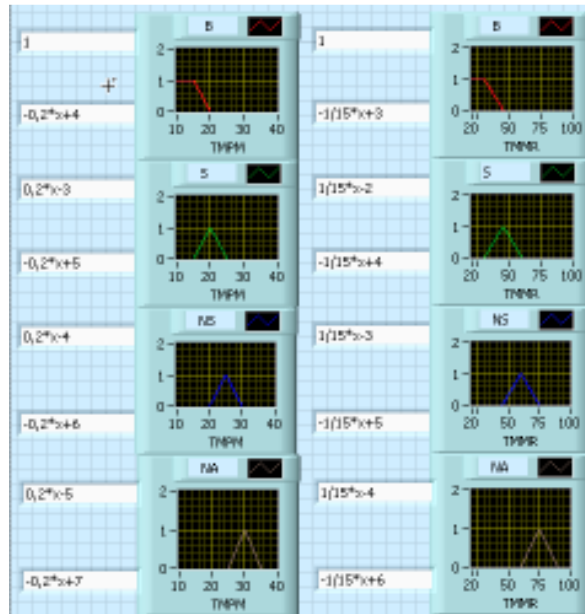


Fig. 5.8. Reprezentarea gradelor de apartenență în panoul frontal din LabVIEW

Sunt de făcut două LM, funcție de măsurarea de vibrații pentru trei subansamble din cadrul unui echipament dinamic complex (subansamble diferite) și funcție de timpul tehnic de mentenanță operativă (ex.: revizie parțială).

Se cunosc legile de repartitie funcție de comportarea la vibrații a celor trei subansamble și încadrarea acestora ca timpi predictivi de mentenanța operativă. În stabilirea acestor timpi se iau în considerare limitele domeniilor pentru vibrații ale subansamblelor considerate potrivit recomandărilor reglementate în domeniu.

Folosind logica fuzzy se face o ierarhizare a LM pe subansamble considerate.

Din datele de istoric privind evoluția subansamblelor considerate se calculează probabilistic un timp optim de mentenanță după criteriul economic, care se compară cu datele obținute pentru timpii de mentenanță prioritari și se stabilește repartizarea celor două lucrări de mentenanță operativă în programul de mentenanță fundamentat anual pentru echipamentul considerat.

### Datele de intrare în procesul decizional

Informațiile care intră în procesul decizional sunt cuprinse în tabelul 5.1. Aceste informații reprezintă o exemplificare pentru o situație în timp real și se referă la timpii de mentenanță predictivă pentru fiecare subansamblu de echipament și a fiecărui tip de lucrare de mentenanță (LM).

Tabelul 5.1. Informații de intrare în procesul decizional

Timp de mentenanță predictivă (ore)	Subansamblul S1	Subansamblul S2	Subansamblul S3
LM1	(160,0+650,0)	(220,0+460,0)	(312,6+691,6)
LM2	(234,1+731,3)	(260,0+500,0)	(186,2+324,4)

### Reguli de prioritate

Pentru selectarea LM vor fi utilizate două reguli de prioritate, acestea urmând să devină criterii de selecție și, în ultimă instanță, variabile lingvistice. Cele două reguli sunt:

1. Timpul de mentenanță preventiv maxim (TMPM). Se selectează LM cu cel mai mare timp operativ de mentenanță la lucrarea următoare de revizie;
2. Timpul de mentenanță rămas minim (TMMR), pe baza monitorizării de vibrații și analiză spectrală, respectiv enveloping.

Prioritate finală va fi formată din valorile obținute prin defuzzificare în ordine descrescătoare pentru TMMR, urmate de valorile în ordine descrescătoare pentru TMPM, obținute prin defuzzificare.

### Domenii de valori ale regulilor în raport cu care se selectează LM

Pentru timpul de mentenanță cel mai lung al unei LM la operația următoare de mentenanță operativă, domeniul de valori adoptat este:  $TMPM=[100;350]$  ore. Pentru cel mai scurt timp de mentenanță predictiv (TMMR) rămas, domeniul de valori este:  $TMMR=[200;900]$  ore.

### Variabile lingvistice folosite

Se vor adopta următoarele variabile lingvistice:

- Timp preventiv maxim (TPPM);
- Timp predictiv de mentenanță minim rămas (TMMR).

### Procedura de calcul a parametrilor de intrare în procesul decizional

Etapele de calcul sunt:

- Calculul timpului de mentenanță operativ total
- Calculul parametrilor TPPM și TMMR

Valorile parametrilor sunt prezentate în tabelul 5.2.

Tabelul 5.2. Valorile parametrilor pentru fiecare LM

LM	Parametrul	Subansamblul S1	Subansamblul S2	Subansamblul S3
LM 1	TMPM1 [ore]	160,0	220,0	312,6
	TMMR1[ore]	650,0	460,0	691,6
LM 2	TMPM2 [ore]	234,1	260,0	186,2
	TMMR2[ore]	731,3	500,0	324,4

### Gradele lingvistice ale variabilelor lingvistice. Funcții de apartenență.

Pentru variabila lingvistică TPPM gradele lingvistice, domeniul de valori specific fiecărui grad lingvistic și tipul funcțiilor de apartenență sunt centralizate în tabelul 5.3.

Tabelul 5.3. Variabila lingvistică TPPM

Grade lingvistice TPPM	Domeniul	Tipul funcției de apartenență
Bun-B	[100;200]	Trapezoidală
Satisfăcător-S	[150;250]	Triunghiulară
Nesatisfăcător-NS	[200;300]	Triunghiulară
Neacceptabil-NA	[250;350]	Triunghiulară

Funcțiile de apartenență asociate fiecărui grad lingvistic pentru TPPM și TMMR sunt prezentate în figura 5.8. De asemenea, se pun în evidență valorile funcțiilor de apartenență corespunzătoare diverselor grade lingvistice, pentru valorile ferme ale variabilelor lingvistice TPPM și TMMR.

Pentru variabila lingvistică TMMR, gradele lingvistice, domeniul de valori specific fiecărui grad lingvistic și tipul funcțiilor de apartenență sunt centralizate în tabelul 5.4.

Tabelul 5.4. Timpul predictiv de mentenanță minim rămas (TMMR)

Grade lingvistice TMMR	Domeniul	Tipul funcției de apartenență
Bun-B	[200;450]	Trapezoidală
Satisfăcător-S	[300;600]	Triunghiulară
Nesatisfăcător-NS	[450;750]	Triunghiulară
Neacceptabil-NA	[600;900]	Triunghiulară

Domeniul de valori al mărimii de ieșire este:  $PMO=[1;10]$ . Pentru variabila lingvistică PMO (prioritate mentenanță operativă), gradele lingvistice, domeniul de valori specific fiecărui grad lingvistic și tipul funcțiilor de apartenență sunt centralizate în tabelul 5.5.

Tabelul 5.5. Aprecierea realizării priorității LM pentru PMO

Grade lingvistice PMO	Domeniul	Tipul funcției de apartenență
Foarte mică- Fm	[20;45]	Trapezoidală
Mică- m	[30;60]	Triunghiulară
Medie - Me	[45;75]	Triunghiulară
Mare - M	[60;90]	Triunghiulară

### Matricea de inferență pentru demersul propus

Matricea de inferență este prezentată în tabelul 5.6 și reprezintă sintetic dependența dintre intrările și ieșirile în procesul de fuzzificare.

Tabelul 5.6. Matricea de inferență

PMO		TMPM			
		B	S	NS	NA
TMMR	B	Fm	Fm	m	m
	S	Fm	m	Me	Me
	NS	m	Me	M	M
	NA	m	Me	M	M

Se vor pune în evidență regulile active, corespunzătoare perechii  $LM_i/S_i$ .

Având în vedere valorile efective ale mărimilor de intrare, din cele 16 reguli de inferență posibile, considerăm că sunt active doar două. În acest caz se formează regulile corespunzătoare matricei de inferență:

Dacă  $TMPM1\_S1$  este  $B$  și  $TMMR1\_S1$  este  $NS$  atunci  $PMO1$  este  $m$  (1)

Dacă  $TMPM2\_S1$  este  $NS$  și  $TMMR2\_S1$  este  $NA$  atunci  $PMO2$  este  $M$  (2)

Regulile formate se vor înțelege după exemplul următor: DACĂ variabila  $TMPM$  a lucrării de mentenanță  $LM1$ , la subansamblul  $S1$  este "Bun" ȘI variabila  $TMMR$  a lucrării  $LM1$  pentru același subansamblu este "Nesatisfăcător" ATUNCI variabila de ieșire  $PMO1$  este "Mică" (pentru regula 1).

### Stabilirea metodei de conectare a diverselor valori ale funcțiilor de apartenență aplicată

Metoda de conectare este metoda MAX-MIN. În general, această metodă se definește astfel:

Fie  $R1$  și  $R2$  două relații vagi, unde :

$$R1: X \times Y \rightarrow [0,1];$$

$$R2: Y \times Z \rightarrow [0,1];$$

Conectarea (compunerea) relațiilor vagi  $R1$  și  $R2$  în forma:

$$R1 \circ R2: X \times Z \rightarrow [0,1] \text{ se evaluează conform relației:}$$

$$\mu_{R1oR2}(x,z) = \text{MAX}(\text{MIN}(\mu_{R1}(x,y), \mu_{R2}(x,z))), \quad cu(x,z) \in XxZsiy \in Y \quad (5.70)$$

Tabelul 5.7. Conectare valori la funcții de apartenență

S1	S2	S3
LM1		
TMPM1_S1	TMPM1_S2	TMPM1_S3
TMMR1_S1	TMMR1_S2	TMMR1_S3
LM2		
TMPM2_S1	TMPM2_S2	TMPM2_S3
TMMR2_S1	TMMR2_S2	TMMR2_S3

### Defuzzificarea aplicată

Defuzzificarea permite trecerea de la aprecierea vagă a mărimii de ieșire la o valoare fermă a acesteia. Pentru defuzzificare se utilizează, în acest caz, metoda centrului de greutate (Preitl și Precup, 1997), (Sofron ș.a., 1998).

Se aplică formula:

$$A_f = \frac{\sum_{i=1}^r w_i c_i I_i}{\sum_{i=1}^r w_i I_i}, \quad (5.71)$$

unde:

- $A_f$  este aprecierea finală;
- $r$  - numărul de reguli active;
- $w_i$  - ponderea (credibilitatea) regulii  $i$ ;
- $I_i$  - aria suprafeței mulțimii fuzzy de ieșire corespunzătoare regulii  $i$ ;
- $c_i$  - abscisa centrului de greutate al suprafeței mulțimii fuzzy de ieșire corespunzătoare regulii  $i$ .







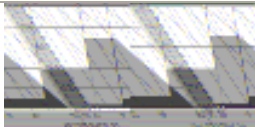

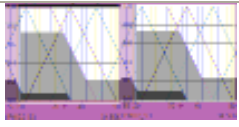





În tabelul 5.7 este rezultatul privind stabilirea metodei de conectare a diverselor valori ale funcțiilor de apartenență pentru determinarea priorității lucrărilor de mentenanță operative.

### Centralizarea datelor nivel I

În urma aplicării procedurii decizionale pentru fiecare din cele trei subansamble în cazul operării celor două tipuri de lucrări de mentenanță datele obținute sunt centralizate în tabelul 5.8.

Tabelul 5.8. Aprecierea priorității

	S1	S2	S3
	60	20,9	32,7
LM1			
PRIORITATE			
	35	69,8	17,6
LM2			
PRIORITATE			

Pentru LM aflate în așteptare se aplică procedura descrisă mai sus, rezultă un *șir de priorități* fiecare termen al șirului reprezentând prioritatea unuia dintre lucrările de mentenanță aflate în așteptare. Șirul astfel rezultat va fi ordonat, obținându-se ordinea de intrare a OL pentru lucrările de mentenanță operativă.

### Nivelul II. SELECTAREA ECHIPAMENTULUI (E)

Selectarea echipamentului se va face urmând aceeași procedură ca și cea descrisă în paragraful anterior pentru prioritatea LM. Vor fi prezentate elementele specifice acestui nivel decizional.






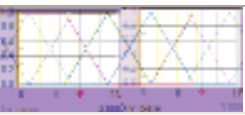
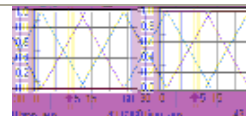
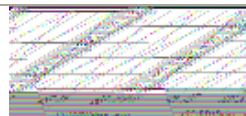


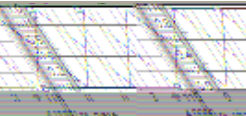
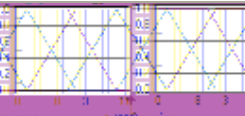
#### 1. Datele de intrare în procesul decizional

Pentru selectarea echipamentului la care se vor face operațiile de mentenanță ale LM prioritare se vor utiliza două criterii:

- Se selectează mașina la care există piesele de schimb cele mai multe necesare realizării LM;
- Se selectează echipamentul mentenabil care presupune timpi auxiliari minimi pentru intervențiile de mentenanță operativă.

Datele care se vor procesa pentru luarea deciziei sunt cele din tabelul 5.11.

Tabelul 5.9. Datele de intrare ferme

Timpul auxiliari (min)	LM1		
	E1	E2	E3
	25	35	21,8
			
Nr. piese de schimb (buc)	6	8	3
			
LM2			
E1			
E2			
E3			
43,6	32,2	19,6	
			
2	4	5	
			

### Centralizarea datelor nivel II

Criteriului *timp auxiliari*, i se asociază variabila lingvistică *Timp Auxiliar* (TA) având atributele prezentate în tabelul 5.10.

Tabelul 5.10. Aprecierea realizării TA

Grade lingvistice TA (min)	Domeniul	Tipul funcției de apartenență
Mic- m	[0;12;24]	Trapezoidală
Mediu- Md	[12;36]	Triunghiulară
Mare - M	[24;48]	Triunghiulară
Foarte mare - FM	[36;48;60]	Trapezoidală

Criteriului *număr de piese de schimb* i se asociază variabila lingvistică *Număr Piese NP* având atributele prezentate în tabelul 5.11.

Tabelul 5.11. Variabila lingvistică NP

Grade lingvistice NP	Domeniul	Tipul funcției de apartenență
Redus-R	[0;2;2;4;4]	Trapezoidală
Mediu-Md	[2;2;6;6]	Triunghiulară

Mare-M	[4,4;8,8]	Triunghiulară
Foarte mare-FM	[6,6;8,8;11]	Trapezoidală

Mărimii de ieșire din procesul decizional i se asociază variabila lingvistică Disponibilitate Echipament (DE) cu variabilele lingvistice și atributele prezentate în tabelul 5.12.

Tabelul 5.12. Variabila lingvistică de ieșire DE

Grade lingvistice DE	Domeniul	Tipul funcției de apartenență
Foarte mică-m	[0;40]	Triunghiulară
Mică-m	[20;60]	Triunghiulara
Medie-Md	[40;80]	Triunghiulara
Mare	[60;100]	Triunghiulară


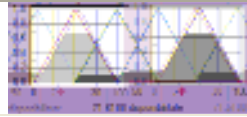




Tabelul 5.13. Matricea de inferență DE


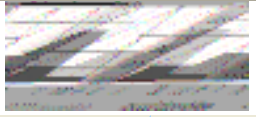

DE		TA			
		m	Md	M	FM
NP	R	Fm	Fm	m	m
	Md	Fm	m	Md	Md
	M	m	Md	M	M
	FM	m	Md	M	M

Rezultatele procesului decizional destinat selectării echipamentului la care să se realizeze prima lucrare de mentenanță holonică operativă LM1, respectiv LM2 sunt prezentate în tabelul 5.14.

Rezultă că utilizarea sistemelor decizionale de tip multiatribut bazate pe mulțimi fuzzy în procedurile de ordonare a lucrărilor de mentenanță operative oferă noi posibilități de dezvoltare a acestora. Aceste posibilități se referă la folosirea simultană a unui număr mai mare de criterii în raport cu care să se facă stabilirea priorității de programare mentenanță, cât și selecția echipamentelor și a personalului care vor fi incluse în programul operațional de mentenanță.

Tabelul 5.14. Selectarea echipamentului pentru LM

		LM1		
		E1	E2	E3
		54,070	71,6120	30,4
ED				
PRIORITATE				

LM2		
E1	E2	E3
42,2560	49,8390	92
		
5	4	1

#### 5.4. Optimizarea costului de mentenanță holonică operativă

Demersurile utilizate pentru optimizare costuri sunt diverse (Braun, 2002). Pentru IDN se consideră particularitatea că sistemul de producție este de tip proces și serial. Pentru punerea în evidență a metodei operative de optimizare a costului de mentenanță, reprezentând de fapt o caracteristică a MHBR, se consideră două instalații principale ce procesează fluide în cadrul IDN. Se consideră astfel instalația de schimb izotopic (instalația de purificare este inclusă în această instalație, fiind o extensie a schimbului izotopic catalizat) și instalația de separare criogenică, monitorizate predictiv la uzură, pentru care se impune stabilirea deciziei privind semi-inventarul și inventarul fluidelor procesate.

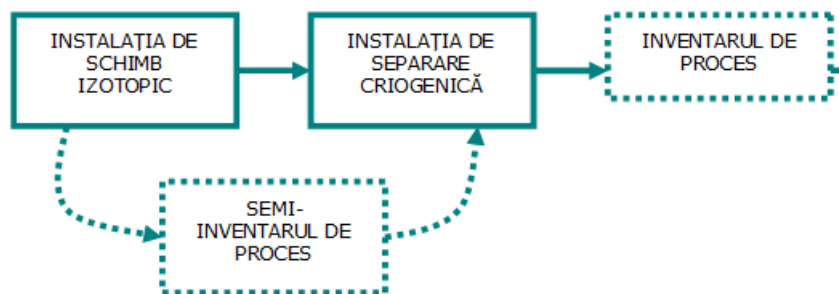


Fig. 5.9. Modelul general de operare al IDN

Avându-se în vedere că inventarele de proces (fig. 5.9) sunt monitorizate în timp real, rezultă că la orice moment se poate cunoaște cantitatea producției. Pentru ca să se cunoască în timp real (și/sau prognosticat) valoarea producției pentru obiective operaționale de eficientizare și competitivitate, trebuie cunoscut în prealabil costul (și/sau prognosticat) de mentenanță. Acest obiectiv constituie o necesitate și este rezolvată prin contribuțiile aduse ca metodă de optimizare a costului de mentenanță total pentru IDN.

În condițiile în care variabilele de intrare determinate de mentenanța holonică operativă de procesare programată pot avea diferite stări în regim dinamic și în timp real, acestea vor determina, la rândul lor, evenimente pe nivelele de alarmare, ca rezultate ale monitorizării uzurilor prin mentenanța predictivă (fig. 5.11), după modelele descrise anterior.

Toți parametrii determinați sunt în acord cu datele stabilite în prealabil și în mod dinamic din programarea lucrărilor de mentenanță, inventarul necesar realizării acestora și timpul necesar pentru realizare a lucrărilor de mentenanță, bazat pe MTBF dinamic.

Pentru exemplificare se consideră cazul unui echipament dinamic din cadrul IDN.

Se consideră cazul în care echipamentul considerat este critic, determinat prin metodele precedente, HAZOP Automată și AMDECE, pentru reducerea dimensiunii unor modelări repetate.

Urmând ciclul arătat în figura 5.10, condiția sistemului este bazată pe predicția evoluției parametrilor fizici de proces în cadrul stabilirii unor limite pentru detecția propusă, analiza și corectarea problemelor înainte de apariția defectului. Parametri fizici sunt măsurați în mod continuu sau periodic.

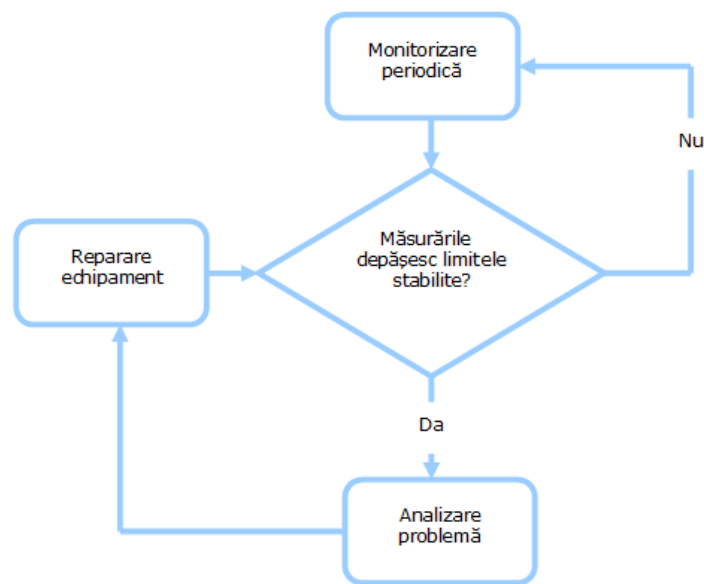


Fig. 5.10. Ciclul dinamic al mentenanței holonice predictive

Dacă măsurătorile depășesc anumite limite este analizată imediat cauza. De exemplu, un semnal de vibrație poate fi luat la un echipament dinamic rotativ. O analiză a acestui semnal poate determina localizarea unei probleme prezente ca dezechilibru, nealinieră, rezonanță, cavitație. Corecția cauzei rădăcină este cheia eforturilor de mentenanță predictivă.

Pe baza ciclului de mentenanță predictivă arătat în figura 5.10 se generează variabilele timp conform figurii 5.11, după care se stabilește ciclul de mentenanță preventivă operațională în regim dinamic temporal (Anghel, 2007), care permite modelarea matematică a optimizării costului pe ciclu de reînnoire.

Se definesc (fig. 5.11): timpul total de utilizare

$$T_u = \sum_{i=1}^n t_{ui} , \quad (5.72)$$

și timpul total de mentenanță operativă

$$T_r = \sum_{i=1}^{n-1} t_{ri} , \quad (5.73)$$

În continuare se prezintă modelarea minimizării costului pentru cazul ciclului dinamic holonic de activitate posibilă pentru mentenanță operativă pentru un echipament critic din IDN.

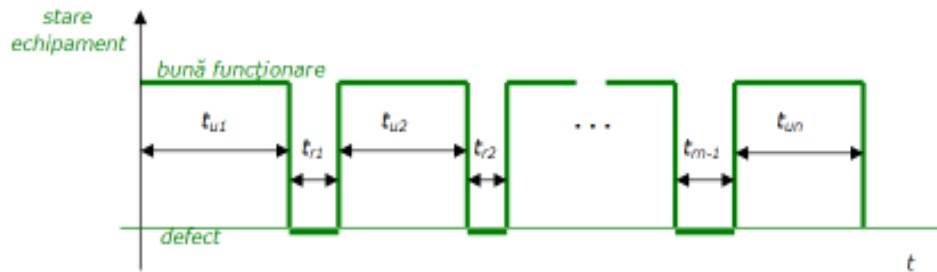


Fig. 5.11. Generarea variabilelor de timp de bună funcționare și timp de reparare în regim dinamic

Se consideră reprezentarea din figura 5.12, unde:

$T$  este timpul de funcționare al echipamentului, dat dinamic de  $F(t)$ ;

$\hat{T}$  - timpul de realizare a  $PM$ , dat dinamic de  $G(t)$ ;

$T_f$  - timp pentru mentenanță operațională (ex. reparație)  $E(t)=a$ ;

$T_p$  - timp pentru  $PM$ ,  $E(T_p)=b$ ;

$c_p$  - costul pentru  $PM$ ;

$c_f$  - costul reparației;

$k_f$  - costul generat pentru echipament defect;

$k_p$  - cost generat când echipamentul este în  $PM$ ;

$\tau$  - lungimea ciclului de reluare mentenanță (timpul între două reluări consecutive ale echipamentului);

$C$  - costurile totale atrase în timpul ciclului  $\tau$ .

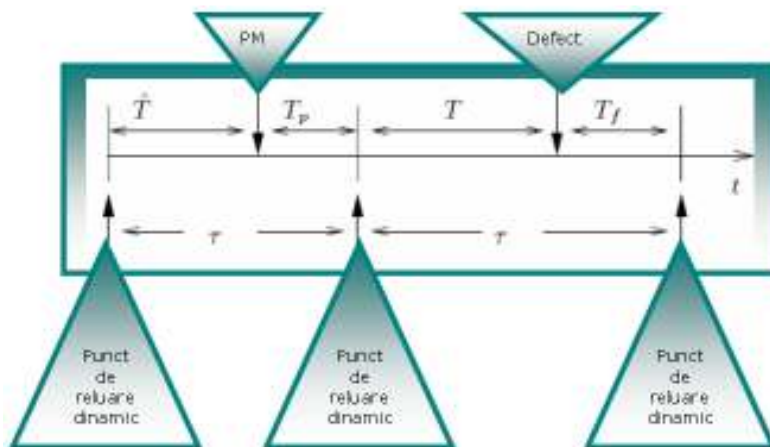


Fig. 5.12. Ciclul dinamic al mentenanței holonice operative pentru un echipament

Se admite că  $T_f$  și  $T_p$  sunt independente de  $T$  și  $\hat{t}$ . Este evident că

$$\tau = \min(T, \hat{T}) + T_f \cdot \mathbf{1}(T < \hat{T}) + T_p \cdot \mathbf{1}(T > \hat{T}), \quad (5.74)$$

unde  $\mathbf{1}(A)$  este indicatorul funcției  $A$ , cu valoarea fiind 1, dacă evenimentul  $A$  este adevărat. Deci,

$$E(\tau) = E(\min(T, \hat{T})) + E(T_f) \cdot Pr(T < \hat{T}) + E(T_p) \cdot Pr(T > \hat{T}), \quad (5.75)$$

dar

$$E(\min(T, \hat{T})) = E(E(\min(T, \hat{T}) | \hat{T})) = \int_0^{\infty} \left( \int_0^{\hat{T}} \bar{F}(y) dy \right) dG(t). \quad (5.76)$$

$$Pr(T < \hat{T}) = E(E(\mathbf{1}(T < \hat{T}) | \hat{T})) = \int_0^{\infty} E(\mathbf{1}(T < t)) dG(t) = \int_0^{\infty} F(t) dG(t) \quad (5.77)$$

$$Pr(T > \hat{T}) = 1 - Pr(T < \hat{T}) = \int_0^{\infty} \bar{F}(t) dG(t) \quad (5.78)$$

Deci,

$$E(\tau) = \int_0^{\infty} \left( \int_0^t \bar{F}(y) dy + a \cdot F(t) + b \cdot \bar{F}(t) \right) dG(t). \quad (5.79)$$

Costul total  $C$  în timpul ciclului  $\tau$  este:

$$C = (c_f + k_f \cdot T_f) \cdot \mathbf{1}(T < \hat{T}) + (c_p + k_p \cdot T_p) \cdot \mathbf{1}(T > \hat{T}) \quad (5.80)$$

Deci, costul total așteptat în ciclul  $\tau$  este:

$$\begin{aligned} E(C) &= (c_f + k_f \cdot E(T_f)) \cdot \int_0^{\infty} F(t) dG(t) + (c_p + k_p \cdot E(T_p)) \cdot \int_0^{\infty} \bar{F}(t) dG(t) \\ &= \int_0^{\infty} (a' \cdot F(t) + b' \cdot \bar{F}(t)) dG(t), \end{aligned} \quad (5.81)$$

unde  $a'$  și  $b'$  reprezintă costul total așteptat de reparație și PM.

Sub o politică dinamică  $G$  în continuă schimbare face ca  $PM$  să devină reînnoit, astfel că, costul mediu pe ciclu, care este optimizat, notat cu  $H(G)$ , determină pentru o politică optimă  $G^*$  expresia:

$$\begin{aligned}
 H(G^*) &= \min_G H(G) = \\
 &= \min_G \frac{\int_0^{\infty} (a' \cdot F(t) + b' \cdot \bar{F}(t)) dG(t)}{\int_0^{\infty} \left( \int_0^t \bar{F}(y) dy + a \cdot F(t) + b \cdot \bar{F}(t) \right) dG(t)}.
 \end{aligned} \tag{5.82}$$

Dacă se consideră pentru distribuția de funcționare o distribuție Weibull, atunci rata de defectare este  $\lambda a t^{a-1}$ . Rezultă ca în figura 5.13, funcția de cost minimizată sub diferite valori ale lui  $a$ .

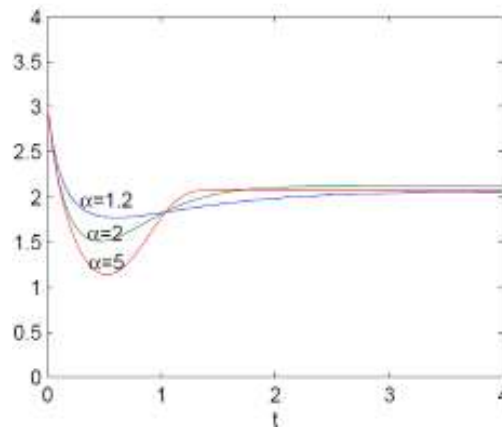


Fig. 5.13. Optimizarea costului ciclului de mentenanță operativă, bazată pe distribuția Weibull

$$k_p = k_f = 1 \tag{5.83}$$

$$\begin{aligned}
 c_p &= 1, c_f = 3, \\
 b &= 0.5, a = 1,
 \end{aligned} \tag{5.84}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t^a} \tag{5.85}$$

Pentru rezolvarea problemei propuse în condiții reale de incertitudine metoda de minimizare anterioară determină abordarea fuzzy de optimizare a costului motiv pentru care se parcurg următoarele etape:

- Stabilirea variabilelor de intrare și ieșire;
- Determinarea fiecărei variabile a funcțiilor de apartenență;
- Formarea regulilor;
- Intrările fuzzy;
- Aplicarea operatorului fuzzy;
- Defuzzificare.



Problema este de generare dinamică a costului optim recomandat pe baza stocului de piese de schimb și MTBF în regim dinamic a echipamentelor critice din IDN. Pentru aceasta se definesc seturile fuzzy pentru ambii parametri de intrare, fiabilitate și stoc de siguranță și parametrul de ieșire costul recomandat. Pentru exemplificare, două seturi fuzzy sunt definite pentru fiecare parametru. Un set definește conceptul "jos" pentru "mică", "puține" sau "reduse", iar altul „înant" definește conceptul pentru "mare", "multe" sau "ridicat".

Avantajul abordării fuzzy este că nu este necesar de a defini fiecare nivel posibil.

Nivelele intermediare sunt calculate pentru a putea avea amândouă seturi fuzzy "jos" și "înant":

- MTBF mică;
- MTBF mare;
- Piese schimb puține;
- Piese schimb multe;
- Cost mentenanța redus;
- Cost mentenanța ridicat.

Pentru exemplificare se măsoară costul mentenanței, MTBF și a stocului de siguranță pe o scară de la 0 la 10.

Pentru aceste seturi se admite următoarea funcție de apartenență (fig. 5.14) pentru "jos":

$$jos[x] = 1 - (1 / (1 + e^{-((x-8)/16)})) \tag{5.86}$$

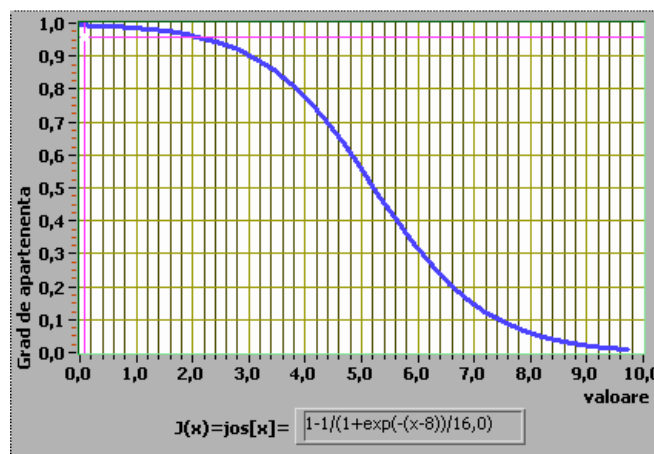


Fig. 5.14. Funcția de apartenență pentru conceptul „jos”

Pentru aceste seturi se admite următoarea funcție de apartenență pentru "înant" (fig. 5.15):

$$\hat{nant}[x] = 1 / (1 + e^{-((x-8)/16)}) \tag{5.87}$$

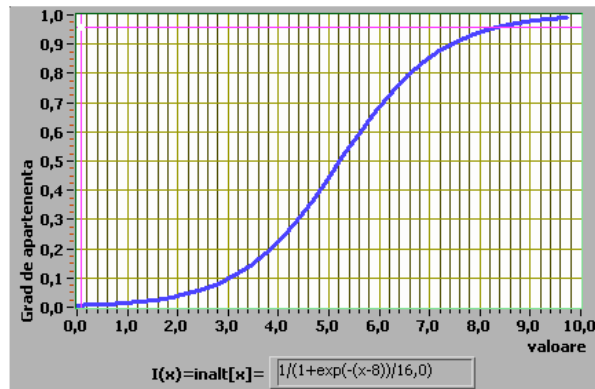


Fig. 5.15. Funcția de apartenență pentru conceptul „înalt”

Aceasta înseamnă că dacă nivelul de fiabilitate este de exemplu 6, atunci această observație este evaluată pe setul fuzzy  $J$  MTBF echipament ca 0,3 și pe setul fuzzy  $\hat{I}$  MTBF ca 0,7. Această observație nu este clasificată ca MTBF mică sau ridicată, dar este asociată la varierea gradului de apartenență la ambele concepte.

Pentru operarea sistemului expert fuzzy, doar un set de intrări vor fi necesare. Oricum, ilustrarea conceptului holonic fuzzy se poate face prin exemplificare, ca de pildă observând 10 valori ale MTBF și stocului de siguranță la momentele de timp  $t_i$ ,  $i = 1...10$  conform figurii 5.16.

	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
MTBF	2	1,3	0	0	5,2	7,1	3,8	10	3,3	0
STOC PS	0	0	0	1	3	9	3	1	5	1

Fig. 5.16. Tabel de date aferente echipamentului, observate în regim dinamic

Evaluările acestor observații în termeni de grade de apartenență ale celor patru seturi fuzzy rezultă conform figurii 5.17.

josMTBF	0,90183	0,98068	0,99400	0,99400	0,50685	0,13324	0,80649	0,00838	0,87296	0,99466
inaltMTBF	0,03814	0,01931	0,00533	0,00533	0,49314	0,86675	0,19350	0,99161	0,12703	0,00533
josSTOC	0,99466	0,99466	0,99466	0,98562	0,90268	0,02247	0,90268	0,98562	0,55660	0,98562
inaltSTOC	0,00533	0,00533	0,00533	0,01438	0,09731	0,97752	0,09731	0,01438	0,44339	0,01438

Fig. 5.17. Evaluările datelor aferente echipamentului, observate în regim dinamic

Se observă că toate gradele de apartenență trebuie să fie între 0 și 1. De asemenea, se observă că suma contrastului gradului de apartenență este 1. Aceasta este o caracteristică a sistemelor fuzzy, dar nu este o condiție.

În cadrul mentenanței holistice, mai departe se definesc reguli euristice necesare holonului de decizie, arătate în figura 5.18.

<b>REGULA 1:</b>	<b>Daca</b>	Stoc	putine	si	MTBF	mica	<b>atunci</b>	Cost	ridicat
<b>REGULA 2:</b>	<b>Daca</b>	Stoc 2	putine	si	MTBF 2	mare	<b>atunci</b>	Cost 2	redus
<b>REGULA 3:</b>	<b>Daca</b>	Stoc 3	multe	si	MTBF 3	mica	<b>atunci</b>	Cost 3	ridicat
<b>REGULA 4:</b>	<b>Daca</b>	Stoc 4	multe	si	MTBF 4	mare	<b>atunci</b>	Cost 4	redus

Fig. 5.18. Reguli euristice pentru optimizarea costului de mentenanță a echipamentului critic

Aceste reguli sunt definite în termeni de limbaj simplu. Astfel, decidentul holonic de mentenanță poate salva efortul mentenanței operative cuantificat în MTBF, prin definirea a două reguli: "dacă MTBF este mică atunci costul este mare" și "dacă MTBF este mare atunci costul este redus".

Mai departe, inferența observațiilor relatate determină în ce măsură gradele de apartenență a seturilor fuzzy sunt asociate fiecărei reguli. Astfel, se evaluează următoarele grade de apartenență:

- Regula 1: ... josMTBF și josSTOC
- Regula 2: ... josMTBF și înaltSTOC
- Regula 3: ... înaltMTBF și josSTOC
- Regula 4: ... înaltMTBF și înaltSTOC

Pentru logica "și", operările folosind gradele funcțiilor de apartenență rezultate seturilor fuzzy sunt definite ca minimumul valorilor gradelor de apartenență a seturilor de componente. Dacă regulile vor avea operații logice "sau", va fi utilizat maximumul gradelor de apartenență.

Pentru exemplul dat, inferența determină obținerea datelor ca în figura 5.19. Aceste grade de apartenență pot fi utilizate la definirea setului fuzzy pentru ieșirile regulilor.

<b>REGULA 1:</b>	R1	R1 2	R1 3	R1 4	R1 5	R1 6	R1 7	R1 8	R1 9	R1 10
	0,96185	0,98068	0,99466	0,98562	0,50685	0,02247	0,80649	0,00838	0,55660	0,9
<b>REGULA 2:</b>	R1 11	R1 12	R1 13	R1 14	R1 15	R1 16	R1 17	R1 18	R1 19	R1 20
	0,03814	0,01931	0,00533	0,00533	0,49314	0,02247	0,19350	0,98562	0,12703	0,0
<b>REGULA 3:</b>	R1 21	R1 22	R1 23	R1 24	R1 25	R1 26	R1 27	R1 28	R1 29	R1 30
	0,00533	0,00533	0,00533	0,01438	0,09731	0,13324	0,09731	0,00838	0,44339	0,0
<b>REGULA 4:</b>	R1 31	R1 32	R1 33	R1 34	R1 35	R1 36	R1 37	R1 38	R1 39	R1 40
	0,00533	0,00533	0,00533	0,00533	0,09731	0,86675	0,09731	0,01438	0,12703	0,0

Fig. 5.19. Reguli fuzzy euristice pentru optimizarea costului de mentenanță a echipamentului critic

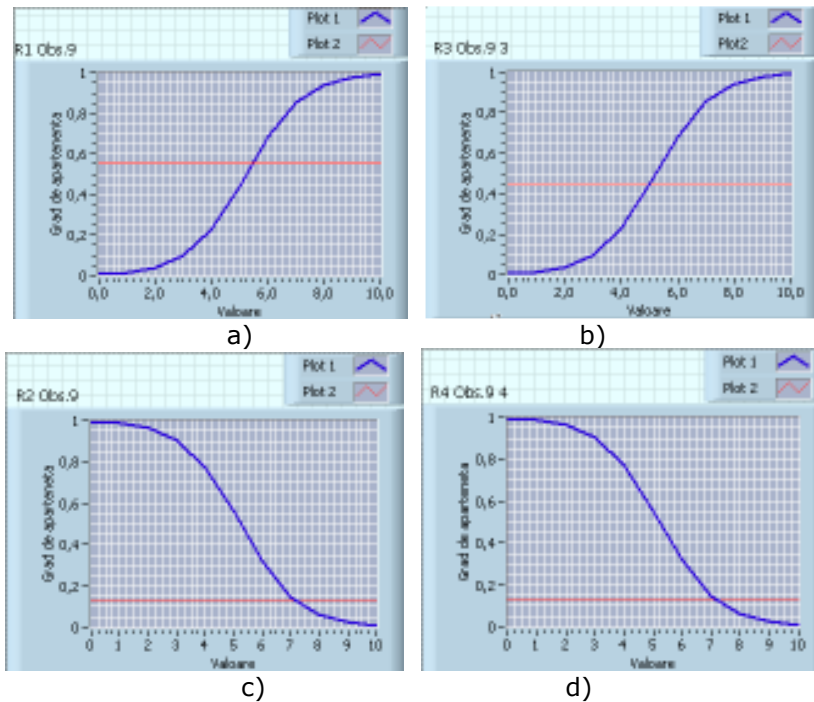


Fig. 5.20. Ieșirile pentru cost pentru observația 9 potrivit regulilor fuzzy euristice

Se observă că *josMTBF* și *josCOST* determină gradul de apartenență maxim pentru ieșirea fuzzy a costului. Astfel, pentru observația 9 se obține prin compoziție după regula1, ieșirea pentru cost fiind cazul a din figura 5.20.

max1	max1 2	max1 3	max1 4	max1 5	max1 6	max1 7	max1 8	max1 9
0,96185	0,98068	0,99466	0,98562	0,50685	0,86675	0,80649	0,98562	0,556

Fig. 5.21. Aplicarea operației logice SAU pentru cele 10 reguli fuzzy

După graficul din figura 5.22 este evident că observația 9 este asociată mai mult cu „înaltCOST” decât cu recomandarea pentru „josCOST”. Pentru a se determina exact cât de mult cost de mentenanță trebuie să se realizeze, este nevoie de reguli de defuzzificare.

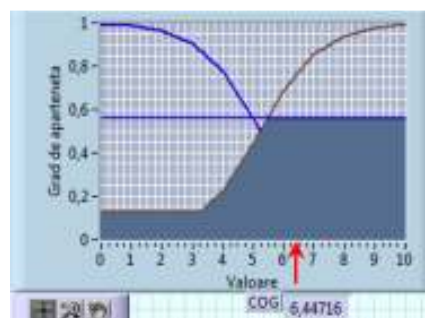


Fig. 5.22. Aplicarea defuzzificării pentru ieșire la observația 9

Astfel, se aplică metoda centrului de greutate (COG) și se obține pentru cazul observației 9, valoarea 6,429 între limitele  $0+10$  unități de cost posibile.

În cazul în care sunt active toate cele 10 reguli, mai întâi se combină rezultatele (fig. 5.19) de la toate regulile într-o ieșire fuzzy set (fig. 5.21) și apoi se transformă această compoziție fuzzy set într-o singură valoare numerică, procedându-se similar exemplului dat.

## 5.5. Alocarea factorilor de nesiguranță la metoda arborilor de defectare

### 5.5.1. Metoda arborilor de defectare

Metoda arborilor de defectare (AD) este o metodă de analiză probabilistică a siguranței pentru IDN. După construcția AD, multe evenimente de bază din IDN care pot să se întâmple teoretic nu se vor întâmpla practic atât de departe sau pot să se întâmple nefrecvent, astfel că datele lor rezonabile nu sunt disponibile.

Din acest motiv, se propune utilizarea probabilității fuzzy, care poate descrie probabilitatea defectării și nesiguranța fiecărui eveniment de bază, iar în final se determină probabilitatea evenimentului de top al AD.

Prin combinarea teoriei evidenței și seturilor fuzzy se poate evalua analiza cantitativă a AD și arborele de defectare fuzzy (ADF) (Anghel, 2008).

AD este o reprezentare simbolică convenabilă de reprezentare a defectării sistemului. AD reprezintă relațiile între evenimente de nivel coborât (defectări hardware, defectări software, erori umane etc.) și evenimentul indezirabil specific la nivelul sistemului (eveniment de top sau de vârf).

Diferite combinații ale relațiilor sigure între evenimentele de nivel coborât determină în sens invers hazardul sistemului, care se realizează prin găsirea tuturor cauzelor posibile de defectare. În mod clasic, se face o analiză calitativă a AD și o evaluare a analizei cantitative a probabilității apariției evenimentului de vârf, atunci când probabilitatea fiecărui eveniment de bază este deja cunoscut.

În general, orice situație particulară care conduce la indisponibilitatea unui sistem este un mod de defectare al sistemului și implică defectări de componente sau de combinații de componente. Pentru a analiza un sistem și pentru a elimina cele mai probabile căi de defectare este necesară identificarea tuturor modurilor de defectare, folosind metoda AMDECE automatizată, care va fi integrată prin software cu metodologia AD, respectiv ADF (Anghel, 2008) (fig. 5.23).

Metoda AD se bazează pe seturile minime de tăieturi, reprezentând în fapt o combinație minimă de evenimente de bază care, dacă se produc, vor conduce la realizarea evenimentului de vârf sau de top.

Termenii setului minim de tăieturi se mai numesc în literatura de specialitate implicantți (Zhou, 2000), (Suh, 1999), (Hirschmann, 2002). Orice arbore de defectare constă dintr-un număr finit de implicantți care sunt unici pentru evenimentul de vârf al arborelui. Implicantții se caracterizează prin ordin, care reprezintă numărul de evenimente ce alcătuiesc implicantul respectiv.

Implicantții de ordinul I reprezintă defectări singulare care produc evenimentul de vârf. Implicantții de ordin II reprezintă combinații de două defectări care duc la apariția evenimentului de vârf. În general, contribuitorii de bază la defectarea sistemului sunt implicantții de ordin scăzut, efortul de eliminare a defectelor trebuind să se concentreze asupra acestora.

**PROGRAM DE ANALIZA A CAUZEI RADACINA**

**DEFINIREA PROBLEMEI**

**CE?** Defectare defect: Defectul vasului tampon de H2

**CAND?** Data apariției defectului: 10.21.59.343  
28.01.2009

**UNDE?** Locația defectului: aparatul puterilor  
Locația procesului: Vasul tampon de H2  
Locația procesului: Circuitul de H2  
Tipul procesului: Radare endogenica

**IMPACT LA:**

siguranță: mediu

medii: redus

menținerea operațională: mentenanță corectivă NC

productivitate: oprire

costurile: cu piese de schimb

**FRECVENTA:** FRECV: 0,0001

VAL: 5000 u.in.  
DEN: pilaie M14

Fig. 5.23. Panoul frontal pentru aplicația ADF aplicată la IDN

Fiecare implicant constă dintr-o combinație de defectări, astfel încât implicantul de ordin  $k$  este de forma:

$$K_i = X_1 * X_2 * X_3 * \dots * X_k \quad (5.88)$$

unde  $X_1, X_2, \dots, X_k$  sunt defectări de bază în arbore ("\*" reprezintă ȘI logic).

Analiza calitativă a arborelui de defectare se face prin minimizare booleană.

Atunci când se doresc rezultate cantitative, după obținerea setului minim de tăieturi se pot realiza evaluări probabilistice ale evenimentului de vârf. Evaluarea cantitativă a unui arbore de defectare se efectuează într-o manieră secvențială, întâi determinându-se probabilitățile de defectare ale componentelor, apoi probabilitățile seturilor minime de tăieturi și, în final, probabilitatea evenimentului de vârf.

În figura 5.24, este un exemplu de arbore de defectare care poate, de asemenea, să descrie următoarele relații:

$$ET = E_1 \cup P_1 \cup P_2, \quad (5.89)$$

unde

$$P_1 = E_1 \cap E_2 \quad (5.90)$$

și

$$P_2 = E_4 \cap E_5 \quad (5.91)$$

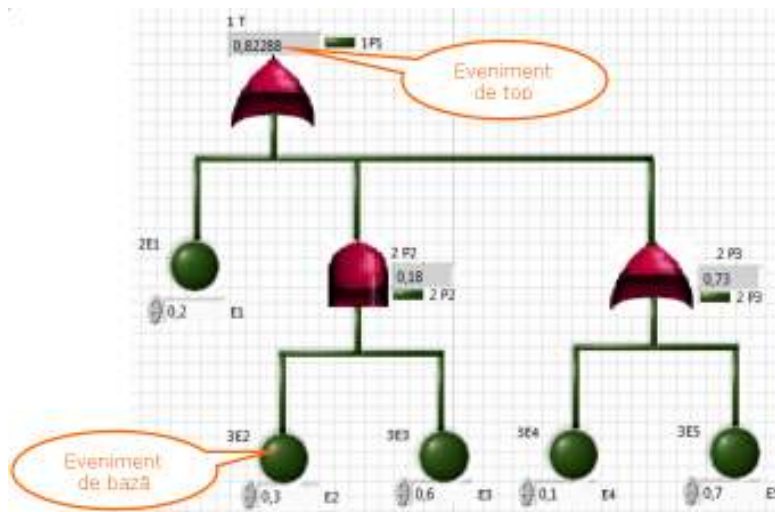


Fig. 5.24. Un arbore de defectare simplu

Dacă  $P_{E_i}$  reprezintă probabilitatea de apariție a evenimentului  $E_i$ , probabilitatea evenimentului de top va fi:

$$P_T = 1 - \{1 - P_{E_1}\{1 - P_{A_1}\{1 - P_{A_2}\}\}, \quad (5.92)$$

$$P_{A_1} = P_{E_2}P_{E_3} \quad (5.93)$$

și

$$P_{A_2} = 1 - \{1 - P_{E_4}\{1 - P_{E_5}\}\} \quad (5.94)$$

Rezultă că este ușor de estimat probabilitatea evenimentului de top dacă probabilitatea pentru fiecare eveniment de bază este cunoscută ca o valoare reală. În multe cazuri, multe evenimente de bază nu pot fi suficient estimate statistic, datorită datelor inițiale caracterizate de incertitudine foarte vagă. În aceste condiții, aplicarea probabilității fuzzy pentru fenomene imprecise ajută la determinarea ratelor de defectare ale evenimentelor de bază.

### 5.5.2. Metoda arborilor de defectare fuzzy

Metodologia arborilor de defectare fuzzy, potrivit figurii 5.25, cuprinde următoarele etape:

- ☑ desenarea modelului grafic a arborelui de defectare, utilizând simbolul logic și porți logice;
- ☑ modularea arborelui de defectare și analiza calitativă;
- ☑ prepararea listei de conexiuni a arborelui de defectare;
- ☑ transformările matricei booleene pentru determinarea seturilor de tăieturi.

Demersul constă în următoarele:

- ☑ fuzzificarea datelor evenimentelor de bază, utilizând funcțiile de apartenență trapezoidale;
- ☑ estimarea probabilității evenimentului de top (defuzzificarea);

- ☑ analiza de senzitivitate (defuzzificare);
- ☑ importanța seturilor de tăieturi;
- ☑ index de pondere fuzzy a evenimentelor de bază.

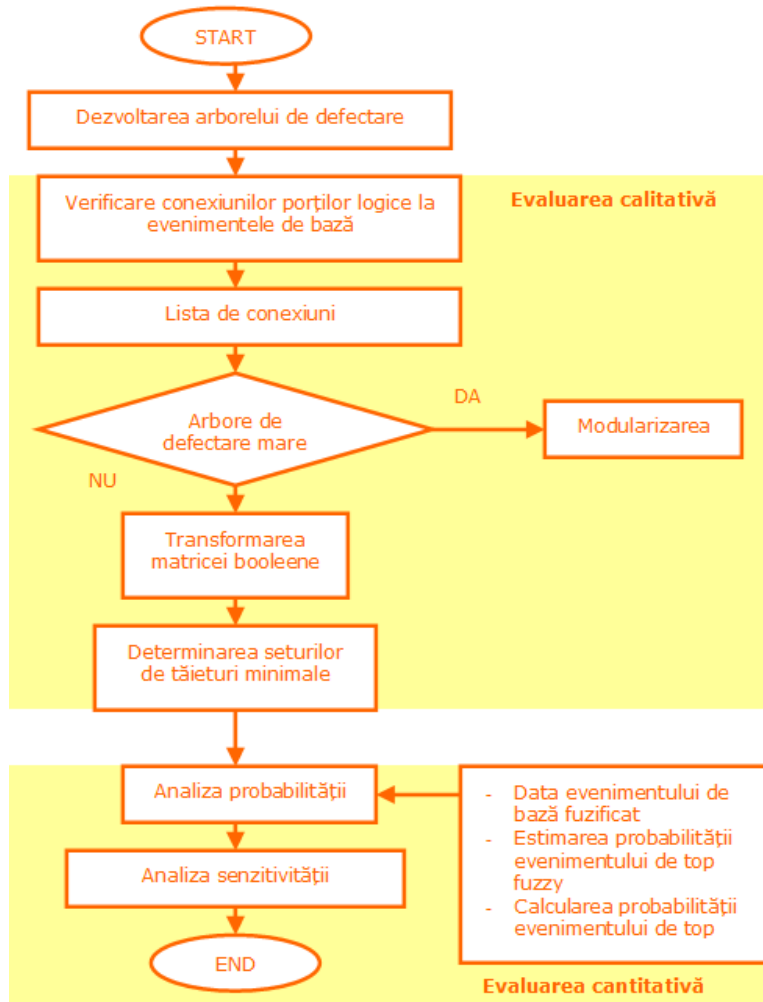


Fig. 5.25. Demersul ADF

Metoda ADF este o metodă deductivă, pentru că se deduce evenimentul de top din probabilitățile de apariție a evenimentelor de bază, folosind porți logice. Se poate defini ADF ca un triplet  $(E, PI, f)$ , astfel:

$$f : E \cup PI \rightarrow (E \cup G) \quad (5.95)$$

unde  $E$  reprezintă agregarea evenimentelor,  $PI$  agregarea porții logice, iar  $f$  descrie legăturile relaționale între evenimente și porți logice, deci reprezintă setul puterii, care este realizat de uniunea lui  $E$  și  $PI$ .

Metoda ADF adoptă numere fuzzy la descrierea probabilității evenimentelor întâmplătoare. Numărul fuzzy a probabilității de defectare  $p$  este notat ca:

$$p_f = (m - a, m, m + b),$$



unde:  $m$  este valoarea egalizatoare a numărului fuzzy;

$a, b$  - parametrul stânga și dreapta al distribuției numărului fuzzy.

La arborele de defectare convențional, probabilitatea defectării evenimentului de top este dată de evenimentele elementare folosind logica porților logice. Când evenimentele elementare sunt date folosind numere fuzzy, se adoptă operatori de porți logice fuzzy: poarta ȘI, respectiv poarta SAU.

Dacă probabilitatea de apariție a evenimentului  $i$  este un număr fuzzy  $p_{fi}$ ,

$$p_{fi} = \prod_{i=1}^n (m_i - a_i, m_i, m_i + b_i) \quad (5.96)$$

apoi operatorul fuzzy al porții "ȘI" este:

$$P_{SI} = \prod_{i=1}^n p_{fi} = (p_{Si}^a, p_{Si}, p_{Si}^b) \quad (5.97)$$

$$p_{Si}^a = \prod_{i=1}^n (m_i - a_i) \quad (5.98)$$

$$p_{Si} = \prod_{i=1}^n m_i \quad (5.99)$$

$$p_{Si}^b = \prod_{i=1}^n (m_i + b_i) \quad (5.100)$$

Operatorul fuzzy al porții SAU este:

$$P_{SAU} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{fi}) = (p_{Sau}^a, p_{Sau}, p_{Sau}^b) \quad (5.101)$$

$$p_{Sau}^a = \prod_{i=1}^n [1 - (m_i - a_i)] \quad (5.102)$$

$$p_{Sau} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i) \quad (5.103)$$

$$p_{Sau}^b = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - (m_i + b_i)] \quad (5.104)$$

### 5.5.3. Aplicarea analizei arborelui de defectare fuzzy la circuitul de alimentare cu hidrogen în instalația de separare criogenică

Probabilitatea apariției unui defect pe acest circuit se va determina cu analiza fuzzy și arbori de defectare, fapt ce presupune calculul probabilităților evenimentelor de bază, respectiv utilizarea de operatori fuzzy a porților logice.

Se presupune că fiecare eveniment elementar este independent și evenimentul de top (fig. 5.26), va fi după cum urmează:

$P$  = defectul vasului tampon de hidrogen + defectul la conductele de transport hidrogen + defect la alimentarea în instalația de separare criogenică (ISD).

De exemplu, defectul de fabricație în vasul tampon de hidrogen =  $p_1$  + evenimentul1 +  $p_2$  = evenimentul2 + evenimentul3 + evenimentul1 + evenimentul4 + evenimentul5 + evenimentul6.

Numărul fuzzy este utilizat pentru descrierea probabilității la evenimente variate, astfel că rezultă:

$$P_1 = X_2 + X_3 \quad (5.105)$$

$$P_2 = X_4 + X_5 + X_6 \quad (5.106)$$

$$P = P_1 + X_1 + P_2 = X_2 + X_3 + X_1 + X_4 + X_5 + X_6 \quad (5.107)$$

Se observă că setul de tăieturi a arborelui de defectare analizat determină schimbarea în ecuația algebrică Booleană echivalentă, astfel:

$$P = \sum_{i=1}^6 X_i \quad (5.108)$$

Deci, setul de tăieturi influențează direct fiabilitatea sistemului. La definirea defectului evenimentului de top a vasului tampon de hidrogen  $T$ , probabilitățile  $m_i$  ale tuturor evenimentelor  $f_i$  sunt prezentate în figura 5.27.

În acord cu ecuația operatorului fuzzy și a rezultatelor intermediare din figura 5.27, se poate obține:

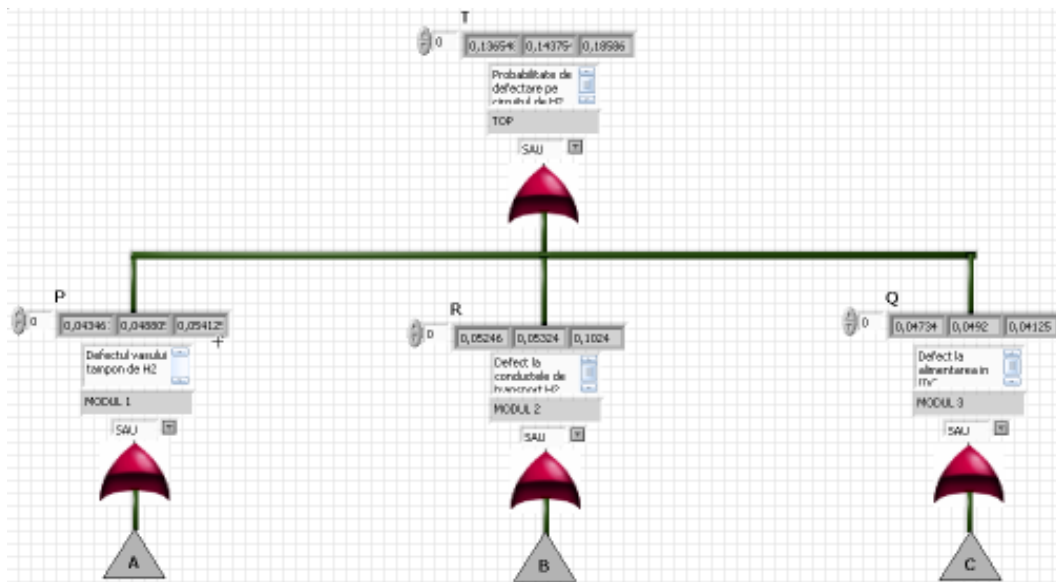
$$\bar{P}_1 = \bar{X}_2 + \bar{X}_3 = (0.00186, 0.00411, 0.00635) \quad (5.109)$$

$$\bar{P}_2 = \bar{X}_4 + \bar{X}_5 + \bar{X}_6 = (0.04026, 0.04306, 0.04586) \quad (5.110)$$

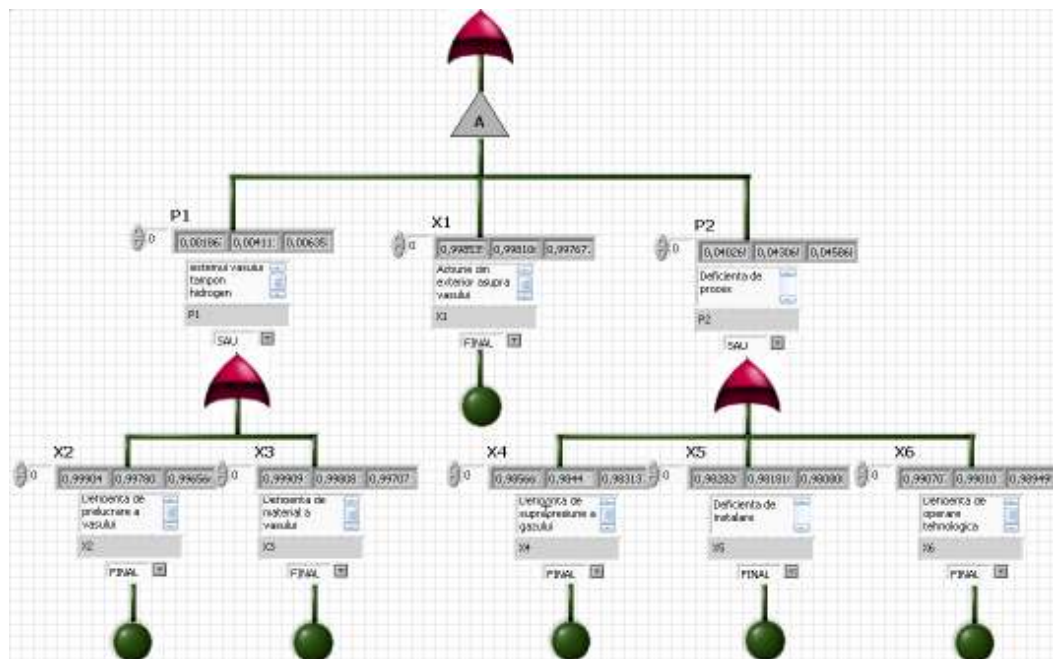
Dacă nivelul de încredere este  $c = 0.6$ , atunci:

$$\bar{P}_1^c = \bar{X}_2^c + \bar{X}_3^c = (0.04194, 0.04306, 0.04418) \quad (5.111)$$

$$\bar{P}_2^c = \bar{X}_4^c + \bar{X}_5^c + \bar{X}_6^c = (0.00321, 0.04111, 0.00500) \quad (1.112)$$



a)



b)

P<sub>1</sub>: Pierderi la sistemul vasului tampon hidrogen; P<sub>2</sub>: Deficiență de proces; R: inactivarea conductelor de hidrogen; Q: Deficiență de proces; X<sub>1</sub>: Acțiune din exterior asupra vasului; X<sub>2</sub>: Deficiență de prelucrare a vasului; X<sub>3</sub>: Deficiență de material a vasului; X<sub>4</sub>: Deficiență de suprapresiune a gazului; X<sub>5</sub>: Deficiență de instalare; X<sub>6</sub>: Deficiență de operare tehnologică

Fig. 5.26. Graficul arborelui de defectare la inactivitatea transmisiei și distribuției de hidrogen în instalația de distilare criogenică, din cadrul IDN

Astfel, probabilitatea întâmplării de tip fuzzy a defectului de top a vasului tampon de hidrogen este dată de:

$$\bar{P} = \bar{P}_1 + \bar{X}_1 + \bar{P}_2 = (0.04346, 0.04880, 0.05412) \quad (1.113)$$

și reprezintă un număr fuzzy. Calcularea de diferite nivele de încredere determină diferite intervale de confidență ale evenimentului de top. De exemplu, pentru nivelul de confidență  $\lambda=0.6$ , intervalul de confidență a defectului de top pentru vasul tampon de hidrogen este  $(0.04667, 0.04880, 0.05093)$ .

INCERȚARE	EVENIMENT	PROBABILITATEA cu	$\alpha$ & $b$	$1-(1-\alpha)^n$	$1-(1-\alpha)^n$ la $^{\circ}C$	$T_{rel}$	$1-(1-\alpha)^n$	$1-(1-\alpha)^n$ la $^{\circ}C$
X1	defectarea ochilor de protecție	0,0002	0,0002	x11	x12	x13	x14	x15
X2	defectarea servomotorului	0,0002	0,0002	x21	x22	x23	x24	x25
X3	defectarea sistemului de alimentare	0,0002	0,0002	x31	x32	x33	x34	x35
X4	defectarea sistemului de alimentare	0,0002	0,0002	x41	x42	x43	x44	x45
X5	defectarea sistemului de alimentare	0,0002	0,0002	x51	x52	x53	x54	x55
X6	defectarea sistemului de alimentare	0,0002	0,0002	x61	x62	x63	x64	x65

Fig. 5.27. Simularea datelor și validarea rezultatelor la exemplul din fig. 10.26, b

$P_1 = X_2 + X_3 =$	P1	0,00186781	0,00411195	0,00636388
$P_{1c} = X_{2c} + X_{3c} =$	P1c	0,0419461	0,0430656	0,0441842
$P_2 = X_4 + X_5 + X_6 =$	P2	0,0402653	0,0430656	0,0458606
$P_{2c} = X_{4c} + X_{5c} + X_{6c} =$	P2c	0,00321459	0,00411195	0,0050069
$P = P_1 + X_1 + P_2 =$	P	0,043461	0,0468064	0,051254
$P_c = P_{1c} + X_{1c} + P_{2c} =$	Pc	0,0466705	0,0468064	0,05093

Fig. 5.28. Valorile obținute pentru probabilitățile fuzzy ale ADF

În mod similar se calculează probabilitatea de apariție a defectului la conductele de transport hidrogen, respectiv instalația de alimentare în modulul de separare criogenică ISD.

Probabilitatea evenimentului de top pentru instalația aferentă circuitului de hidrogen este  $(0.13654, 0.14375, 0.18566)$ .

Metoda ADF este binevenită pentru analiza fiabilității calitative și cantitative a instalațiilor nucleare, pentru că datele privind regimul dinamic al defectărilor sunt dependente de un grad variabil de incertitudine, astfel că

această metodă reflectă mult mai bine evoluția operabilității instalației decât metoda clasică AD.

Această metodă nu reflectă doar probabilitatea fuzzy a evenimentului, ci permite a se determina existența erorilor permise. Între timp, metoda permite conectarea cu ingineria operatorilor de câmp, respectiv cu câteva teste de date cu care să se compare experiența de operare a instalației nucleare.

În cadrul metodei se poate lua în considerare și factorul uman, ceea ce este foarte important pentru operarea în siguranță.

## 5.6. Concluzii

Cu metodele propuse se pot rezolva necesitățile specifice pentru analiza și diagnoza defectărilor, programarea lucrărilor de mentenanță, stabilirea stocurilor de siguranță, fiind printre cele mai bune practici de luare a deciziei la operare și mentenanță integrată holonic pentru IDN. Metodele propuse sunt validate experimental, dar și prin simulare cu software-ul LabVIEW.

Astfel, ca obiectiv operațional, se poate întocmi nomenclatorul pieselor de schimb pe categorii de echipamente din instalația IDN, respectiv numărul pieselor de același tip, ca stoc de rezervă optim.

Utilizarea în procedurile de ordonanțare a mentenanței a sistemelor decizionale de tip multiatribut, bazate pe mulțimi fuzzy, oferă noi posibilități de dezvoltare a acestora. Aceste posibilități se referă la folosirea simultană a unui număr mai mare de criterii în raport cu care să se facă stabilirea priorității de realizare a ordinelor de lucru, cât și selecția echipamentelor la care se vor face operațiile de mentenanță.

Metoda arborilor de defectare fuzzy (ADF) aplicată la IDN reprezintă o extindere a metodei convenționale a arborilor de defectare (AD), folosită curent în evaluările cantitative și calitative de fiabilitate a instalațiilor nucleare, când este estimat ritmul de eșec de sistem.

Aceste metode operaționale, realizate în regim dinamic și în timp real, se adaugă la concepția MHBR propusă.

Mediul software LabVIEW, prin funcțiile sale de monitorizare, achiziție de date, control de proces pentru operare și mentenanță predictivă, respectiv facilitatea de programare grafică, asigură atingerea obiectivului operațional de mentenanță inteligentă și integrată pe parcursul ciclului de viață al sistemului tehnic nuclear considerat.

## **6. CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII ȘI PERSPECTIVE**

### **6.1. Concluzii generale**

Obținerea performanței în mentenanța nucleară înseamnă adaptarea mijloacelor existente la necesitățile actuale și viitoare privind parcursul ciclului de viață pentru instalația nucleară mentenabilă, în ansamblu, iar în detaliu, fiabilizarea instalației, prin procesul de mentenanță și mentenanța produsului. Scopul asigurării mentenanței inteligente este de asigurare a calității dinamice în operarea instalației în regim nuclear, la un nivel prestabilit în cadrul politicii de calitate a întreprinderii.

Obiectivele de mentenanță nucleară se traduc în termeni de siguranță și cost. Rolul mentenanței în domeniul nuclear este fundamental, datorită riscului potențial pe care îl reprezintă.

Dacă în trecut mentenanța a fost abordată doar ca acțiuni mai mult sau mai puțin corective, orientate spre produs, în prezent mentenanța este orientată spre acțiuni preventive, de prognostic și diagnoză, deci spre mentenanță inteligentă, atât pentru produs cât și pentru management.

La instalațiile nucleare se urmărește integrarea riscului în mentenanță, respectiv integrarea mentenanței în activitățile din amonte și aval ale ciclului de viață al instalației. În acest sens, demersul propus satisface obiectivul cercetării, promovând o nouă metodologie, un model și noi metode pentru mentenanță inteligentă.

Cercetările întreprinse sunt bazate pe teoria sistemelor și a ingineriei integrate, considerând mentenanța nu ca o activitate izolată, pentru că există interacțiuni, ea afectează și este afectată de alte activități, ca: producția (operarea), proiectarea produsului mentenabil, logistica și calitatea etc.

Se realizează astfel obiectivul general al procesului de mentenanță și al mentenanței sistemului (IDN), sporirea profitabilității operării instalațiilor nucleare, optimizarea costului ciclului de viață total al acestora, fără a fi compromisă siguranța pentru om și mediul înconjurător.

Pentru aceasta a fost necesară studierea modelelor, metodelor și mijloacelor cunoscute ca cele mai bune practici în mentenanța industrială.

Studiul întreprins evidențiază eforturile depuse la nivel mondial și național în domeniul mentenanței. Astfel, sunt evidențiate diferite soluții strategice de aplicare și dezvoltare a mentenanței la nivel național, unde mentenanța este departe de a fi considerată de "generație actuală".

La nivel mondial, soluțiile de referință actuale sunt prezentate sistematizat ca evoluții în mentenanță, fiind considerate modele, metode și tehnici evaluate de mentenanță. Fiecare dintre acestea au la bază studii de caz bine definite, soluții implementate la companii mari, generația actuală fiind considerată a patra.

În categoria mentenanței de generația a patra intră și metodologia de mentenanță holonică bazată pe risc (MHBR), propusă ca mentenanță inteligentă bazată pe cunoaștere, din perspectiva tehnologică și științifică.

Metodologia MHBR pentru mentenanță inteligentă reprezintă un demers original de mentenanță a sistemelor complexe industriale, în particular a sistemelor nucleare, demers care este bazat pe concepția holonică.

MHBR reprezintă și o variantă de abordare științifică a mentenanței bazată pe risc și pe condiții, oferind demersul pentru continua îmbunătățire a procesului de decizie în mentenanță, avându-se în vedere necesitatea de mentenanță determinată de considerentele că nu există nici o activitate umană care să se poată bucura de zero risc și nici un echipament cu zero rată de defectare.

MHBR conduce către specificația de mentenanță a unui sistem holonic multi-agent, care oferă un bun compromis între distribuirea cunoașterii pentru mentenanță și centralizarea controlului. Bazată pe logica fuzzy, pentru detecția și diagnosticarea defectelor, aceasta asigură un cadru sistematic de prelucrare a mărimilor aleatoare vagi și a cunoștințelor vagi despre proces. Cu cât nivelul de incertitudine din proces este mai mare, cu atât logica fuzzy este mai utilă în detecție și diagnosticare la nivele din ce în ce mai înalte în sistemele de conducere automată a proceselor, cu referire la domeniul nuclear.

Supravegherea proceselor nucleare necesită o prelucrare masivă a unor baze de cunoștințe cantitative și calitative. În acest caz, logica fuzzy este deosebit de atractivă pentru generarea simptomelor cu așa numitele praguri fuzzy, simptome care pot fi observate și descrise lingvistic.

De asemenea, logica fuzzy este utilizată în special în raționamente aproximative privind defectele de proces cavitaționale, cu baze de reguli fuzzy, cu multiple nivele holonice, în așa zise structuri de generare de simptome cu ramificații.

Pe baza experimentărilor realizate la o instalație pilot (CONTMENT), se proiectează regulatorul fuzzy, astfel încât pentru orice situație intervenită în proces se poate evita starea de operare în cavitație a robinetelor de reglare, ca sistem holonic complex (mecanic-hidraulic-electronic) mentenabil.

Dacă riscul reprezintă pentru mentenanță probabilitatea de a ajunge într-un pericol posibil, el poate exprima un criteriu de apreciere calitativă, dar și cantitativă, a realizării unei acțiuni, arătând măsura în care aceasta poate să producă efecte nedorite, materializate prin daune asupra omului, echipamentelor tehnice sau mediului înconjurător.

Privind demersul propus pentru mentenanța bazată pe risc, ca sistem holonic (MHBR), rezultă că utilizarea resurselor efective prezentate, ghidează unde și cum mentenanța va fi performantă. Astfel, prin metoda HAZOPA propusă se poate facilita analiza de hazard și operabilitate în regim dinamic, prin simulare și/sau experimentare, spre deosebire de metodele similare (HAZOP), care permit realizarea unui aspect calitativ al riscului preliminar, bazat pe un istoric de funcționare al unei instalații experimentale sau pe baza unui studiu în fază de concepție-proiectare a instalației considerate. Rezultă astfel că metoda HAZOPA are o aplicabilitate deosebită în sectorul energetic nuclear, iar cu mici particularități și în alte sectoare industriale.

În cadrul metodologiei MHBR, după realizarea studiului cu metoda HAZOPA se folosește metoda AMDEC extinsă (AMDECE), care include riscul evaluat în termeni de cost, iar pe baza suportului software oferit de LabVIEW se demonstrează posibilitatea de extindere a metodei la parcursul întregului ciclu de viață, prin scenariul defectului aferent acestui parcurs. Astfel, se conturează mai

bine combinarea de metode pentru realizarea MHBR centrată pe "viața" produsului (sistem sau component), care trebuie considerată ca un proces descris cu ajutorul unei bucle cibernetice de autoreglare, pentru modelare oferindu-se metode noi de alocare a fiabilității la IDN.

După metodele preventive de prognostic și diagnostic pentru MHBR, prezentarea se continuă cu metodele corective sau corectiv-predictive pentru evaluare calitativă și/sau cantitativă a mentenanței produsului (IDN). Astfel, metodologia MHBR include un sistem expert fuzzy pentru mentenanța uzurii (SEFMU) produsului holonic mentenabil.

Cu SEFMU se poate determina relația între recomandările privind uzura, făcute de fabricanții de echipamente dinamice complexe, și datele experimentale obținute prin aplicarea metodei de mentenanță predictivă (ex. cazul monitorizării uleiului sau vibrații).

SEFMU se integrează în MHBR prin software suport LabVIEW, folosit pentru achiziție date, control și monitorizare a sistemului expert după metodologia prezentată. În cele din urmă se constată că SEFMU reduce considerabil cheltuielile de mentenanță corectivă.

Interconectat în cadrul MHBR pentru mentenanța operativă, SEFMU contribuie la alocarea factorilor de nesiguranță pentru IDN cu metoda arborilor de defectare, prin aplicarea metodei arborilor de defectare fuzzy (ADF). Cu ADF se acoperă necesitățile informaționale în cadrul MHBR, ca analize calitative și cantitative privind abaterile de la toleranța defectelor critice (cu rol de securitate), pentru instalația IDN. Metoda ADF se integrează direct cu metoda HAZOPA și AMDECE, potrivit caracterului dinamic și în parte aleatoriu, de schimbare în evoluția funcționării echipamentelor complexe nucleare.

În cadrul MHBR, pentru a previziona nivelul de siguranță al IDN, dar și pentru evaluarea fiabilității instalației pentru conformități impuse, se propune metoda pentru risc și upgrade mentenanță (RUM), bazată pe logica fuzzy. Folosind metoda RUM pentru predicția și evaluarea riscului în decizia operațională a mentenanței holonice, se va obține un program operativ de mentenanță în regim dinamic temporal. Prin integrarea în MHBR și aprecierea variabilelor de ieșire, RUM poate fi considerată și ca o metodă de evaluare a măsurilor ce se vor lua pentru continua îmbunătățire pe parcursul ciclului de viață a IDN considerate.

Așa cum s-a menționat anterior, siguranța este o măsură critică pentru instalațiile nucleare. În plus, deciziile în mentenanță au efect asupra siguranței. Astfel, este imperativ ca alocarea mentenanței să se facă în condiții de profitabilitate și fără aspect advers pentru siguranță. Problema optimizării în condiții de siguranță și profitabilitate este deosebit de importantă pentru domeniul nuclear, așa încât cercetările au urmărit să contribuie la dezvoltarea acestei problematice tehnico-economice pentru MHBR la IDN. Astfel, în cadrul MHBR au fost incluse noi metode:

- pentru alocarea mentenanței holonice la optimizarea stocului de siguranță;
- pentru selectarea lucrărilor de mentenanță operativă;
- pentru optimizarea costului la mentenanța holonică operativă.

Toate aceste metode sunt verificate prin simulare cu software LabVIEW.

Astfel, obiectivele stabilite au fost realizate, iar scopul operațional, planificarea în regim dinamic a mentenanței holonice inteligente, bazată pe analiza de risc, a fost atins, demonstrându-se că probabilitatea de defectare a sistemului și a consecințele defectării sunt minime.



MHBR ajută deci ca în managementul instalației nucleare să se ia decizii corecte privind mentenanța operativă, pentru creșterea siguranței și competitivității.

## 6.2. Contribuții personale

Pornind de la necesități identificate și impuse de asigurarea disponibilității instalațiilor nucleare, cu aplicare directă la Instalația de Detritiere Nucleară (IDN) de la ICSI Rm. Vâlcea, contribuțiile pe care teza de doctorat le aduce pentru comunitatea de specialiști din domeniul mentenanței industriale se referă la dezvoltarea unei metodologii de mentenanță inteligentă.

Contribuțiile globale, de ordin teoretic, experimental și aplicativ se referă la dezvoltarea de modele, metode și mijloace de mentenanță industrială în domeniul nuclear:

1. Sinteza privind cele mai bune practici aplicate la nivel mondial în domeniul mentenanței industriale, aplicabile instalațiilor nucleare;
2. Modelul general de mentenanță holonică aplicabil instalațiilor nucleare;
3. Particularizarea modelului holonic de mentenanță pentru întreprinderile de tip proces, pentru defecte cavitaționale și defecte predictive (metoda CONTMENT pentru defecte cavitaționale este propusă pentru brevetare);
4. Metodologia de mentenanță holonică bazată pe risc (MHBR), aplicabilă la IDN;
5. Metoda pentru evaluarea hazardurilor și operabilitate automată (HAZOPA);
6. Metoda de analiză a defectărilor, efectelor și criticității extinse (AMDECE);
7. Alocarea fiabilității în sistemele holonice mentenabile;
8. Sistemul expert fuzzy pentru uzură nucleară (SEUN) particularizat pentru mentenanța uzurii produsului (SEFMU) la sistemele holonice mentenabile;
9. Alocarea factorilor de nesiguranță la metoda arborilor de defectare – metoda arborilor de defectare fuzzy (ADF);
10. Metoda de risc și upgrade mentenanță (RUM) pentru "nuclear safety level" prin mentenanță holonică bazată pe logica fuzzy;
11. Alocarea mentenanței holonice în condițiile optimizării stocului;
12. Sistem expert decizional pentru stabilirea priorităților și optimizării mentenanței holonice operaționale;
13. Software integrat în metodologia MHBR:
  - Modulul HAZOPA, pentru evaluare hazard în timp real;
  - Modulul AMDECE, pentru analiză extinsă la defecte;
  - Modulul SEFMU, pentru defecte de uzură;
  - Modulul RUM, pentru predicție și stabilire nivel de siguranță nuclear și upgrade mentenanță;
  - Modulul ADF, pentru alocarea factorilor de nesiguranță fuzzy în sistemele holonice mentenabile;
14. Metoda CONTMENT, pentru achiziții date, monitorizare și control fuzzy de proces pentru defectele cavitaționale;
15. Stand experimental pentru validarea metodei CONTMENT.

Cercetările prezentate au fost valorificate prin activități de diseminare, respectiv publicare a 25 de lucrări științifice, în volumele unor conferințe internaționale și în reviste indexate în baze de date internaționale.

### **6.3. Perspective de cercetare**

Direcțiile de cercetare preconizate în domeniul mentenanței industriale pot fi următoarele:

1. Noi tehnologii pentru fiabilizarea instalațiilor, cu demersuri îndreptate spre prognostic, analiză și diagnoză, și cu dezvoltare de software expert integrat și hibrid neuro-fuzzy.
2. Noi metode de proiectare pentru mentenanță, în scopul integrării mentenanței la nivel de proiect CAD, îmbunătățind astfel continuu design-ul pentru mentenanță.
3. Sisteme expert bazate pe optimizări holonice, folosind sau îmbunătățind metode ca RBR (Rule-Based Reasoning), CBR (Case-Based Reasoning) și neuro-fuzzy în regim dinamic temporal.
4. Mentenanța holonică virtuală orientată pe aplicații de mentenanță operativă, training și dezvoltare de abilități.

## BIBLIOGRAFIE

1. Agre, J. ș.a. (1994). *Rensselaers Manufacturing Conference*, New York.
2. Agre, J., Elsley, G., McFarlane, D., Cheng, J., Gunn, B. (1994). *Holonic Control of Cooling Control System*, în *Proceedings of Rensselaers Manufacturing Conference*, New York.
3. Anghel, V. (2001). *Asigurarea calității prin implementarea unui program de mentenanță terotehnic evoluat în cadrul instalației pentru separarea tritiului și deuteriului pilot criogenic*, 7th International Conference PROGRESS în CRYOGENICS AND ISOTOPES SEPARATION – ICIT RM. VALCEA, October.
4. Anghel, V. (2002). *Study of the implementation maintenance process at the cryogenic pilot plant*, International Conference on Integrated Engineering, Timișoara, ISBN: 973-8247-92-6.
5. Anghel, V. (2002). *The study of the maintenance for a cryogenics pilot plant în nuclear regime*, The 8th ICSI Conference PROGRESS în CRYOGENICS AND ISOTOPES SEPARATION, Căciulata, ISSN: 1582-2575
6. Anghel, V. (2003). *Studiu privind tehnici și tehnologii de mentenanță integrată, informatizată în regim nuclear pentru o instalație pilot criogenic*, 9th International Conference PROGRESS în CRYOGENICS AND ISOTOPES SEPARATION – Căciulata. ISSN: 1582-2575.
7. Anghel, V. (2003). *The Operative Maintenance (OM) Advanced Like a Modality of the Productivity and Quality Increase*, Conferința internațională Tehnologii Moderne Calitate Restructurare TMCR, Chișinău, Republica Moldova, vol. 5, ISBN 9975-9748-0-5 și ISBN 9975-9748-5-6
8. Anghel, V. (2003). *The Operative Maintenance (OM) Advanced Modality of The Productivity and Quality Increase to a Cryogenic Pilot Plant (CPI)*, Conferința internațională Tehnologii Moderne Calitate Restructurare TMCR, Chișinău, Republica Moldova, vol. 5, ISBN 9975-9748-0-5, ISBN 9975-9748-5-6
9. Anghel, V. (2003). *The Implementation of Integrated Predictive Maintenance for a Cryogenics Pilot Plant (CPP)*, Conferința internațională TEHNO, Timișoara, Academic Journal of Manufacturing Engineering, vol. 1 nr. 3, Editura Politehnica, ISSN: 1583-7904.
10. Anghel, V. (2004). *The method for assurance to operational safety of cryogenics equipment through definite maintenance*, 10th International Conference PROGRESS în CRYOGENICS AND ISOTOPES SEPARATION – Căciulata. ISSN: 1582-2575.
11. Anghel, V. (2005). *Labview Simulation for Operative Maintenance at a Cryogenics Plant with Fuzzy Method*, 11th International Conference PROGRESS în CRYOGENICS AND ISOTOPES SEPARATION – Căciulata. ISSN: 1582-2575

12. Anghel, V. (2005). *A Method by Excellence în Maintenance with Application for Nuclear Units*, International Conference on Integrated Engineering C2I 2005, Timișoara, ISBN 973-625-259-0
13. Anghel, V. (2005). *The Study of Implementation of the EMANU Method for a Nuclear Detritiation of the EMANU Method for a Nuclear Detritiation Installation (NDI)*, International Conference on Integrated Engineering C2I 2005, Timișoara, ISBN 973-625-259-0
14. Anghel, V. (2006). *New Conceptual Method în Maintenance with Application în cryogenics Pilot Plant (CPP)*, Jurnal: Transactions on Environment and Development, ISSN: 1790-5079, ISBN 960-8457-52-1, Issue 7, Vol 2, Grecia
15. Anghel, V. (2006). *Simulation for Cavitations Failures at Predictive Maintenance în Cryogenic Nuclear Plant*, Jurnal: Transactions on systems and Control, Grecia Issue 1, Volume 1, ISSN: 1991-8763, ISBN 960-8457-52-1.
16. Anghel, V. (2006). *Study Concerning the Control of Reliability and Maintainability în Real Time and On-line of a cryogenic Installation Based on Fuzzy Method*, SCIENTIFIC BULLETIN of the "POLITEHNICA" University of Timișoara, Romania Transactions on Mechanics, Tomul 51 (65), Fascicula 1, Editura POLITEHNICA, ISSN 124-6077
17. Anghel, V. (2006). *Excelence Method în Maintenance with Aplication for Cryogenic Nuclear Unit (EMAC)*, Conf. On HEAT TRANSFER, THERMAL ENGINEERING and ENVIRONMENT, Elounda, Greece, ISSN 1790-5095 și ISBN 960-8457-52-1
18. Anghel, V., Drăghici, G. (2006). *Simulation, Modelling and Optimization for Operative Maintenance*, Conf. COMPUTAȚIONAL INTELLIGENCE, MAN-MACHINE SYSTEMS AND CYBERNETICS, Venice, Italy, ISSN 1790-5095 și ISBN 960-8457-52-1
19. Anghel, V. (2007). *Simulation for Predictive Maintenance with LabView Software*, 13th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM). Lansing, Michigan ISBN 978-1-58603-920-2.
20. Anghel, V., Drăghici, G. (2007). *Simulation for Complex Systems through Predictive Maintenance*. "ISSAT International Conference on Modeling of Complex Systems and Environments", ISBN: 978-0-9763486-3-4, Ho Chi Minh City, Vietnam, Iuly 16-18,
21. Anghel, V., Drăghici, G. (2007). *A New Approach for Maintenance at Nuclear Complex Systems*, Conferința CEEX "Cercetarea de excelență – premiză favorabilă pentru dezvoltarea spațiului românesc de cercetare", Brașov - ISSN 1843-5904
22. Anghel, V. (2008). *Prediction of the Safety Level to an Installation of the Tritium Process through Predictive Maintenance*, "8th Internațional Conference on Tritium Science and Technology, Rochester, New York. International Journal of the American Nuclear Society „Fusion Science and Techology” volume 54, number 2, fuste8 (2) 323-654. ISSN: 1546-1055
23. Anghel, V. (2008). *Simulation for Operative Maintenance at Complex Systems Conference EXCELLENCE RESEARCH – A WAY TO INNOVATION – AMCSIT Politehnica*, Editura Tehnică, ISSN 1844-7090.

24. Anghel, V. (2008). *Fuzzy with LabVIEW Software for Reliability Prediction at Nuclear Complex System*, Advanced Topic son Fuzzy Systems, 9th WSEAS International Conference on FUZZY SYSTEMS (FS'08) ISBN: 978-970-6766-57-2, ISSN: 1790-5109.
25. Anghel, V. (2008). *Conception for Integrated Availability în Design for the Nuclear Systems*, Second IEEE International Conference on Secure System Integration and Reliability Improvement – SSIRI, Yokohama, Japan Library of Congress Number 2008926014, Product Number E3266, BMS Part Number CFPO8SIR-CDR, ISBN 978-0-7695-3266-0, IEEE Computer Society
26. Anghel, V., Drăghici, G. (2008). *Application of the Entropy Law for Designing and the Maintenance of the Complex Nuclear Systems*. Academic Journal of Manufacturing Engineering, vol. 6, ISSUE 1, Editura Politehnica ISSN: 1583-7904.
27. Anghel, V., Drăghici, G. (2008). *Simulation of the Diagnosis Based on Model to a Nuclear Detritiation Installation*. 12th WSEAS International Conference on Systems, jurnal New Aspects of Systems Part I, Heraklion, Greece, ISBN:978-960-6766-83-1, ISSN: 1790-2769, published by WSEAS Press.
28. API, (2000), *Risk-Based Inspection*, Base Document, API Publication 581.
29. Asama, H., Yoshikawa, H., Mikami, T., Shirowa, T., (1986). *Development of a 9 DoF Articulated Manipulator for Maintenance*, Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, vol.20, no.1: 47-48.
30. ASME (1994). *Risk-based Inspection – Development of Guidelines*, Vol.3 Fossil Fuel-fired Electric Power Generating Station Applications, ASME Research Report, CRTD-Vol.20-3.
31. Betlem, B., van Aygele, R. (1994). *An Object Oriented framework for Production Control*, Proceedings of Control 94, UK.
32. Bevilacqua, M., Braglia, M. (2000). *The analytical hierarchy process applied to maintenance strategy selection*, Reliab. Eng. Syst. Saf. 70.
33. Boothroyd, G., Dewhurst, P., (1983). *Design for assembly: A Designer's Handbook*, Boothroyd Dewhurst Inc., Wakerfield, Rhode Island.
34. Braun, J. C., Erguina, V., Lugansky, N. (2002). *Nuclear Power Plant Maintenance Economics Model*. 2002 ANS Winter Meeting, Washington, DC.
35. Brown, S.J., May, I.L. (2003). *Risk-based hazardous protection and prevention by inspection and maintenance*, Trans. ASME J. Press. Ves. Technol. 122.
36. Buchholz, A., Franke, C. (2003). *Assessment of Standard Components for Extended Utilization*, Proceedings Colloquium e-ecological Manufacturing, Berlin: 39-42.
37. Bussmann, (1994). *A Multi Agent Approach for Dynamic Adaptive Scheduling of Material Flow*, Proceedings of MAAMAN - 94, Octense, Denmark.
38. Casoetto, N., Djurdjanovic, D., Mayor, R., Lee, J., Ni, J. (2003). *Multi-sensor Process Performance Assessment Through the Use of Autoregressive Modeling and Feature Maps*, J. of Manufacturing Systems, vol.22, no.1: 64-72.

39. Ceglarek, D., Shi, J., Wu, S.M. (1994). *A Knowledge-Based Diagnostic Approach for the Launch of the Auto-Body Assembly Process*, Journal of Engineering for Industry, vol.116, no.4: 491-499.
40. Ceglarek, D., Shi, J. (1996). *Fixture Failure Diagnosis for Autobody Assembly Using Pattern Recognition*, Journal of Engineering for Industry, vol.118: 55-66.
41. Chen, L., Bender, P., Renton, P., El-Wardany, T. (2002). *Integrated Virtual Manufacturing Systems for Process Optimisation and Monitoring*, Annals of the CIRP, vol.51/1: 409-412.
42. Chen, Z., Lee, J., Qiu, H. (2004). *Intelligent Infotronics System Platform for Remote Monitoring and EMaintenance*, International Journal of Agile Manufacturing, Special Issue on Distributed EManufacturing, vol. 7, issue2.
43. Chiang, L.H.; Russel, E.L., Braatz, R.D. (2001). *Fault Detection and Diagnosis în Industrial System*, Springer, London
44. Christensen, J. (1994). "Holonc Manufacturing Systems - Initial Architecture and Standards Directions," presented at First European Conference on Holonic Manufacturing Systems,,Hannover, Germany.
45. Cooke, F.L. (2003). *Plant maintenance strategy: evidence from four British manufacturing firms*, J. Qual. Maint. Eng. 9 (3)
46. Deac, V. (2000). *Managementul mentenanței industriale*, Editura Eficient, București.
47. De Boer, R.J., Zijm, W.H.M. (1997). *A decision support system for ship maintenance capacity planning*, Annals of the CIRP, vol.46/1: 391-396.
48. DeSimone, L. D., Popoff, F. with The WBCSD (1997). *Eco-Efficiency*, MIT Press.
49. Di Marco, P., Eubanks, C., Ishii, K. (1995). *Service Modes and Effects Analysis: Integration of Failure Analysis and Serviceability Design*, Computers în Engineering, VOL COM: 833-840.
50. Ding, Y., Jin, J., Ceglarek, D., Shi, J. (2000). *Process-Oriented Tolerance Synthesis for Multistage Manufacturing Systems*, Manufacturing Science and Engineering, ASME MED, vol.11: 15-22.
51. Ding, Y., Ceglarek, D., Shi, J. (2002). *Fault Diagnosis of Multistage Manufacturing Processes by Using State Space Approach*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol.124, no.2: 313-322.
52. Ding, Y., Shi, J., Ceglarek, D. (2002). *Diagnosability Analysis of Multi-Station Manufacturing Processes*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.124, no.1: 1-13.
53. Djurdjanovic, D., Ni, J., Lee, J. (2002). *Time-frequency Based Sensor Fusion în the Assessment and Monitoring of Machine Performance Degradation*, Proc. of ASME IMEC&E 2002, New Orleans, LA: 15-22.
54. Djurdjanovic, D., Yang Jihong, Qiu Hai, Lee, J., and Ni, J. (2003). *Web-enabled Remote Spindle Monitoring and Prognostics*, Proc. of 2nd International CIRP Conference on Reconfigurable Systems.
55. Drăghici, G. (1999). *Ingineria integrată a produselor*, Editura Eurobit, Timișoara, ISBN 973-96065-7-1.
56. Engels-Lindemann, M., Sihn, W. (2002). *Risk-based maintenance budgeting*, Manufacturing Engineering, vol. 81, no. 4: 162-164.

57. Feldmann, K., Goeringer, J. (2001). *Internet based Diagnosis of Assembly Systems*, Annals of the CIRP, vol.50/1: 5-8.
58. Flaig, T. (1998). *Virtual Environment for Education and Training în Safety Engineering and Maintenance*, Virtual Environments, 270-279.
59. Finch, F.E., Oyeleye O.O. and Kramer, M.A. (1990). "A robust eventoriented methodology for diagnosis of dynamic process systems", Computers Chemical Engineering, 14, (12), pp1379-1396.
60. Gershenson, J., Ishii, K. (1992). *Design for Serviceability, Concurrent Engineering: Theory and Practice*, Kusiak, A. (ed.), John Wiley, New York: 19-39.
61. Hirschmann, J. (2002). *Fault detection and diagnosis of the electromechanical drive units the automation technology*, Managing Innovative Manufacturing (MiM 2002) Conference Proceedings: 179-181.
62. Isermann, R. (1984). "Process fault detection based on modelling and estimation methods - a survey", Automatica, v20, n4, pp387-404.
63. Isermann, R. (1984). *Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods - A Survey*, Automatica, v20, n4.
64. Isermann, R. (1995). *On Fuzzy Logic Applications for Automatic Control, Supervision and Fault Diagnosis*, The Proceeding of EUFIT -95, Aachen.
65. Jedrzejewski, J., Kwasny, W. (1996). *Artificial intelligence tools în diagnostics of machine tool drives*, Annals of the CIRP, vol.45/1: 411-414.
66. Jin, J., Shi, J. (1999). *State Space Modeling of Sheet Metal Assembly for Dimensional Control*, ASME Transactions, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 121, no.4: 756-762.
67. Kapur, K. C., Lamberson, L.R. (1977). *Reliability în Engineering Design*, John Wiley & Sons.
68. Kececioglu, D. (1991). *Reliability Engineering Handbook*, vol 2, PTR Prentice Hall.
69. Keller, E, (2003). *Customer Support: Delivering Enhanced Services through Intelligent Device Management*, Service Business Magazine, Nov/Dec.
70. Khan, F.I., Haddara, M. (2004). *Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities*, J. Hazard. Mater.
71. Khan, F.I., Haddara, M. (2004). *Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities*, J. Hazard. Mater. A 108.
72. Khan F.I., S.A. Abbasi, (1998). *Techniques and methodologies of risk analysis în chemical process industries*, J. Loss Prevent. Process Ind. 11.
73. Khan, F.I., Abbasi, S.A. (1997). *OptHAZOP – an effective and optimum approach for HAZOP study*, J. Loss Prevent. Process Ind. 10 (3).
74. Khan, F.I., Abbasi, S.A. (1996). *Simulation of accidents în a chemical industry using the software package MAXCRED*, Indian J. Chem. Technol. 3.
75. Khan, F.I., Abbasi, S.A. (1997). *A maximum credible accident analysis based quantitative risk assessment study of a chemical process industry*, Indian Chem. Eng., Sec. B 39 (2).
76. Khan, F.I. (2001). *Use maximum-credible accident scenarios for realistic and reliable risk assessment*, Chem. Eng. Prog.

77. Khan, F.I., Abbasi, S.A. (2002). *A criterion for developing credible accident scenarios for risk assessment*, J. Loss Prevent. Process Ind. 15.
78. Khan, F.I., Abbasi, S.A. (1997). *Accident hazard index: a multi attribute method for process industry hazard rating*, Trans. IChemE Process Saf. Environ. Prot. 75 (4).
79. Kimura, F., Suzuki H. (1995). *Product Life Cycle Modelling for Inverse Manufacturing, Life-Cycle Modelling for Innovative Products and Processes*, Chapman & Hall: 80-89.
80. Kimura, F., Hata, T., Kobayashi, N. (2002). *Reliability-Centered Maintenance Planning based on Computer-Aided FMEA*, Proc. of the 35th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems: 506-511.
81. Kimura, F., Hata, T. (2003). *Life Cycle Design and Management based on Simulation of Service Quality Variation*, Proc. of CIRP Seminar on Life Cycle Engineering: 80-88.
82. Kletz, T.A. (1997). *HAZOP—past and future*, Reliab. Eng. Syst. Saf. 55.
83. Koestler, (1967). – *The Ghost in the Machine*, Ed. Macmillan, New York.
84. Kondoh, S., Umeda, Y., Yoshikawa, H. (1998). *Development of upgradable cellular machines for environmentally conscious products*, Annals of the CIRP, 47/1: 381-384.
85. Kruse, R., Gebhardt, J., Klawonn, F. (1995). *Foundations of Fuzzy Systes*. John Wiley & Sons, Inc.
86. Lee, J. (2003). *Review on Advances on Prognostics Algorithms*, the 14th International Workshop on Principles of Diagnostics DX-03, Washington, DC: 31-35.
87. Lee, J. (2003). *Smart Products and Service Systems for e-Business Transformation*, Special Issues on "Managing Innovative Manufacturing," International Journal of Technology Management, Vol.26, No.1: 45-52.
88. Lindqvist, B. H., Støve, B. and Langseth, H. (2006). *Modelling of dependence between critical failure and preventive maintenance: The repair alert model*. J. Statist. Plann. Inference 136 1701–1717.
89. Majstorovic, V., Milacic, V. (1989). *An expert system for diagnosis and maintenance in FMS*, Annals of the CIRP, vol.38/1: 489-492.
90. Majstorovic, V.D. (2003). *Expert Systems for Diagnosis and Maintenance: The State-of-the-Art*, Research Report, No. 24/03, Mechanical Engineering Faculty, Belgrade: 1-21.
91. Mamdani E.H., S. Assilian, (1975). *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*, J. Man Machine Stud., vol 7.
92. Mamdani, E. H. (1977). *Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Systems*, IEEE Trans. on Computers, 26:1182-1191.
93. Mărăscu-Klein, V., Toma, V. (2007). *Managementul mentenanței*, Editura Universității Transilvania Brașov, ISBN 978-598-093-1
94. McCoy, S.A. ș.a. (1999). *HAZID, a computer aid for hazard identification*. 1. STOPHAZ package and the HAZID code: an overview, the issues and the structure, Trans. IChemE Process Saf. Environ. Prot. 77 (B).
95. McFarlane, (1995). "*Holonc manufacturing in continuous processing: concepts and control requirements*", Proc ASI'95, Portugal.



96. McFarlane, D., Marett, B., Elsley, G., Jarvis, D., Wilbers, P. (1995). *Application of Holonic Methodologies to Problem Diagnosis în a Steel Rod Mill*, submitted to IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vancouver.
97. Moubray, J.M. (1994). *Reliability-Centred Maintenance*, Butterworth / Heinemann, Oxford.
98. Ohashi, T., Iwata, M., Arimoto, S., Miyakawa, S. (2002). *Extended Assemblability Evaluation Method (AEM)*, JSME International Journal, Series C., vol. 45, no. 2: 567-574.
99. Patton, R, Frank, P.M., Clark, R. (1989). *Fault Diagnosis în Dynamic Systems: Theory and Applications*, Prentice Hall.
100. Patton, R., Frank, P., Clark, R. (eds) (1989). *Fault Diagnosis în Dynamic systems*, Prentice Hall, NK.
101. Pena, E. A. (2006). *Dynamic modelling and statistical analysis of event times*. Statist. Sci. 21 487–500.
102. Preitl, S., Precup E. (1997). *Introducerea în conducerea fuzzy a proceselor*, Ed. Tehnica, Bucuresti
103. Rong, Q., Ceglarek, D., Shi, J. (2000). *Dimensional Fault Diagnosis for Compliant Beam Structure Assemblies*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol.122: 773-780.
104. Russomanno, D. J., Bonnell, R. D., Bowles, J. B. (1994). *Viewing Computer-Aided Failure Modes and Effects Analysis from an Artificial Intelligence Perspective*, *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol.1, no.3: 209-228.
105. Rust, H., Schreck, G., Leister, P. (1998). *SOLIST – A Lightweight Climbing Robot with Highly Flexible Kinematics*, CLAWAR'98: 193-196.
106. Seliger, G., Buchholz, A., Grudzien, W. (2002). *Multiple Usage Phases by Component Adaptation*, in: Proceedings of the 9th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering, Erlangen: 47-54.
107. Seliger, G., Bollmann, O., Kaase, W. (1990). *Knowledge-Based Diagnosis în Flexible Automated Assembly*, Annals of the CIRP, vol.39/1: 9-14.
108. Seliger, G., Basdere, B., Keil, T., Rebařka, U. (2002). *Innovative Processes and Tools for Disassembly*, Annals of the CIRP Vol. 51/1: 37-40.
109. Seliger, G., Kross, U., Buchholz, A. (2003). *Efficient Maintenance Approach by On-board Monitoring of Innovative Freight Wagon Bogie*, Proc. of the IEEE ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: 407-411.
110. Seliger, G., Buchholz, A., Kross, U. (2003). *Enhanced Product Functionality with Life Cycle Units*, Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, vol. 217 no. B9: 1197-1202.
111. Shimomura, Y., Tanigawa, S., Umeda, Y., Tomiyama, T. (1995). *Development of Self-Maintenance Photocopiers*, AI Magazine, vol. 16, no. 4: 41-53.
112. Shiu, B.W., Apley, D., Ceglarek, D., Shi, J., (2003). *Tolerance Allocation for Sheet Metal Assembly using Beam-Based Model*, Trans. of IIE, Design and Manufacturing, vol. 35, no. 4: 329-342.

113. Sihn, W., Graupner, T.D. (2003). *Web-based maintenance services for manufacturing systems*, CARS 2003 Computer Assisted Radiology and Surgery 2: 579-590.
114. Smith, R. (1980). *The Contact Net Protocol: High Level Communication and Control în a Distributed Problem Solver*, IEEE Transactions on Computing, v C-29, n12.
115. Smith, K.E. (2001). *Six steps to effectively update and revalidate PHAs*, Chem. Eng. Prog.
116. Sofron, E. s.a. (1998). *Sisteme de control fuzzy – Modelare și proiectare asistate de calculator*, Ed. All, Bucuresti.
117. Spur, G., Duelen, G., Kirchoff, U., Hels, J. (1986). *Requirements for robotics în handling and maintenance functions on space platforms*, Annals of the CIRP, vol.35/1: 21-25.
118. Stender, S. (1998). *Teleservice - Opening Doors to the World Market*, The Globalisation of Manufacturing în the Digital Communications Era of the 21st Century - PROLAMAT: 771-782.
119. Stender, S. (2000). *Combining Teleservice and DEPR for a Successful Maintenance Strategy*, ICOMS-2000: 066/1-5.
120. Suh, J., Kumara, S.R.T., Mysore, S.P. (1999). *Machinery fault diagnosis and prognosis: applications of advanced signal processing techniques*, Annals of the CIRP, vol.48/1: 317-320.
121. Szczerbicki, E. (1993). *Acquisition of Knowledge for Autonomous Co-operating Agents*, IEEE Transactions of Systems, Man & Cybernetics, v23, n5.
122. Takata, S., Hiraoka, H., Asama, H., Yamaoka, N., Saito, D. (1995) *Facility Model for Life-Cycle Maintenance System*, Annals of the CIRP, Vol.44/1: 117-121.
123. Takata, S., Inoue, Y., Kohda, T., Hiraoka, H., Asama, H. (1999). *Maintenance Data Management System*, Annals of the CIRP, Vol.48/1: 389-392.
124. Takata, S. (1999). *Life Cycle Maintenance Management, Computer-Aided Maintenance*, edited by Lee, J., Wang, B., Kluwer Academic Pub.: 209-230.
125. Takata, S., Yamada, A., Kohda, T., Asama, H. (1998). *Life Cycle Simulation Applied to a Robot Manipulator -An Example of Aging Simulation of Manufacturing Facilities-*, Annals of the CIRP, Vol.47/1: 397-400.
126. Takata, S., Isobe, H., Fujii, H. (2001). *Disassembly Operation Support System with Motion Monitoring of a Human Operator*, Annals of the CIRP, Vol.50/1: 305-308.
127. Tani, T. (1999). *Product Development and Recycle System for Closed Substance Cycle Society*, Proc. of Environmentally conscious design and inverse manufacturing: 294-299.
128. Tannenbaum, A., (1994). *Distributed Operating Systems*, Prentice Hall.
129. Umeda, Y., Sato, T., Tomiyama, T., Yoshikawa H. (1989). *Model Based Diagnosis Using Qualitative Reasoning*, în Kimura, F., and Rolstadas A. (eds.): Computer Applications în Production and Engineering, Proc. of the Third International IFIP Conference on Computer Applications în Production and Engineering (CAPE '89), 443-450.

130. Umeda, Y., Ishii, M., Shimomura, Y., and Tomiyama, T. (1996). *Supporting Conceptual Design Based on the Function-Behavior-State Modeler*, Artificial intelligence for engineering design, analysis and manufacturing: AI EDAM. 10, no. 4: 275-288.
131. Umeda, Y., Tomiyama, T., Yoshikawa, H., Shimomura, Y. (1994). *Using Functional Maintenance to Improve Fault Tolerance*, IEEE Expert, Intelligent Systems & Their Applications, vol. 9, no. 3: 25-31.
132. van Houten, F.J.A.M., Tomiyama, T., Salomons, O.W. (1998). *Product Modelling for Model-based Maintenance*, Annals of the CIRP, vol.47/1: 123-128.
133. van Houten, F.J.A.M., Kimura, F. (2000). *The Virtual Maintenance System: a Computer-based Support Tool for Robust Design*, Product Monitoring, Fault Diagnosis and Maintenance Planning, Annals of the CIRP, vol.49/1: 91-94.
134. Westkaemper, E., Niemann, J. (2002). *Strategic considerations to boost utilization performance of manufacturing systems*, 6th International Conference on Engineering Design and Automation / CD-ROM: 80-85.
135. Westkaemper, E., von der Osten-Sacken, D. (1998). *Product Life Cycle Costing Applied to Manufacturing Systems*, Annals of the CIRP, vol.47/1: 353-356.
136. Westkaemper, E., von der Osten-Sacken, D. (2000). *The Method of Life Cycle Costing Applied to Manufacturing Systems*, Production Engineering 7, Nr. 1: 135-138.
137. [http://www.onesixsigma.com/tools\\_resources/tools/pareto.php](http://www.onesixsigma.com/tools_resources/tools/pareto.php) Accesat pe 23 Martie, 2004
138. Zhou, Z.D., Chen, Y.P., Fuh, J.Y.H., Nee, A.Y.C. (2000). *Integrated condition monitoring and fault diagnosis for modern manufacturing systems*, Annals of the CIRP, vol.49/1: 387-390.