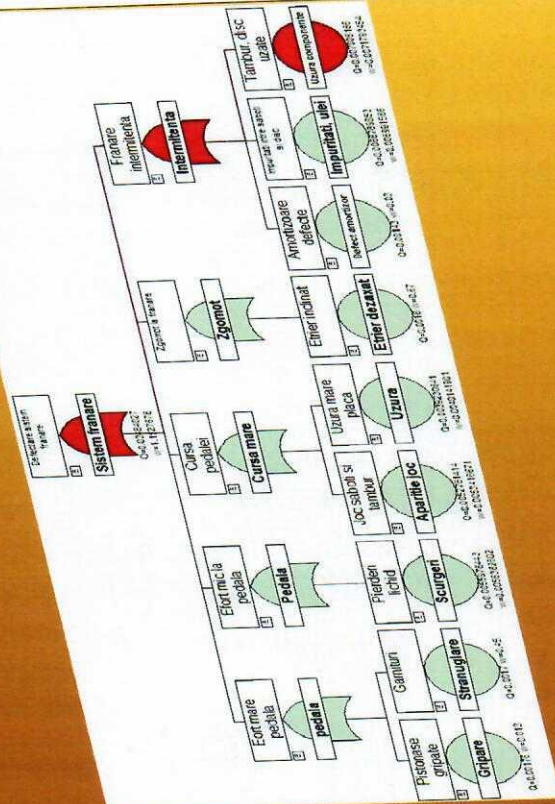
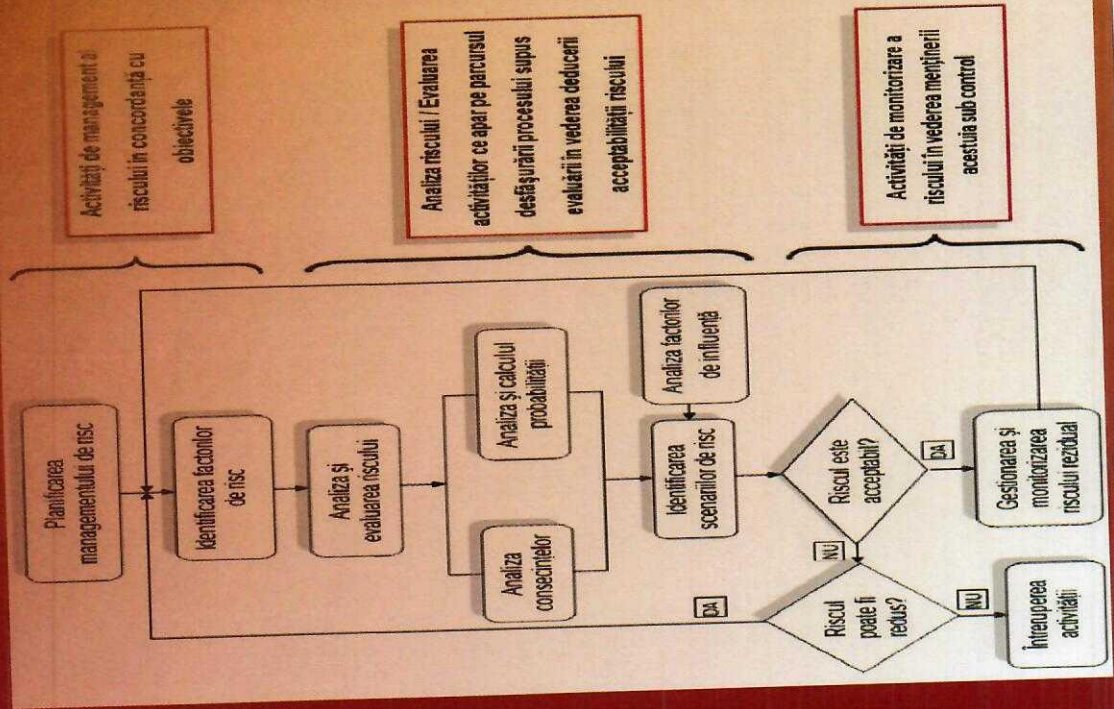


Viorel GOANȚĂ

ANALIZA RISCULUI ȘI EXPERTIZE ÎN INGINERIE

Editura Tehnopress
2017



SCOPUL LUCRĂRII

Scopul prezentei lucrări este de a oferi studenților și specialiștilor în domeniile: analiza riscului, expertize și diagnoze tehnice, mentenanță precum și specializări conexe, atât cunoștințele de bază cât și cele mai avansate metode și instrumente în inginerie. Având în vedere că, în cadrul acestui curs, sunt prezentate noțiuni noi, care vor fi detaliate ulterior, este de așteptat ca studenții să aibă cunoștințe anterioare cu privire la calculul statistic, legi probabilistice precum și de achiziția și prelucrarea datelor. În cadrul acestui curs, accentul este îndreptat asupra construirii de abilități și utilizarea de instrumente specifice, în vederea efectuării unei analize de risc cu grad cât mai ridicat de încredere, precum și a construirii capabilităților de expertizare și diagnosticare. Sunt implementate noțiuni ca: ingineria riscului, mentenanța și fiabilitatea, legi probabilistice, acestea fiind conexe celor de expertizare și diagnosticare. Parcurgând prezenta lucrare, studenții vor dobândi baza teoretică și abilitățile tehnice de a utiliza, la un nivel ridicat și în mod confortabil, metodele specifice analizei de risc, expertizării și diagnosticării sistemelor din zona ingineriei mecanice și mecatronice. Mai mult, pe lângă deprinderea utilizării respectivelor tehnici, prezenta lucrare face trimitere și la posibilitatea luării deciziilor, într-un context de risc asumat, determinat de utilizarea, în cunoștință de cauză, a tehnicilor și instrumentelor specifice, cu o încredere sporită asupra rezultatelor obținute. Cursul a fost organizat astfel:

- Primele două capitole pun bazele teoretice privind managementul și analiza riscului;
- Capitolul al treilea prezintă noțiuni specifice analizei de risc din inginerie, cu accent pe inspecția in-service și variabilitățile și incertitudinile ce apar în cadrul unui sistem ingineresc;
- În capitolele patru, cinci și șase se descriu, în detaliu, cu exemple, metode și instrumente de analiza riscului, utilizate în inginerie: matricea de risc, arborele de defectare, arborele de evenimente;
- Capitolul al șaptelea prezintă o minimă bază teoretică de aplicare a lanțurilor Markov, cu exemplificare în fiabilitatea sistemelor ingineresti;

- În capitolele opt și nouă sunt prezentate noțiuni privind detectarea, identificarea și izolarea defecțiunilor din sistemele dinamice precum și noțiuni de diagnosticarea și expertizarea sistemelor mecanice;
- Capitolul zece redă câteva aspecte privind fiabilitatea sistemelor din domeniul ingineriei.

Se așteaptă ca studenții care au urmat acest curs să aibă abilitatea, capacitatea, cunoștințele tehnice și instrumentele necesare de a rezolva următoarele probleme:

- Dezvoltarea de modele în vederea evaluării și monitorizării riscurilor;
- Formularea și efectuarea unei analize de risc cu grad ridicat de încredere;
- Evaluarea riscului sistemelor ingineresti dar și a celor sociale, politice, de management, al noilor proiecte etc.;
- Livrarea soluțiilor de ameliorare, prevenire și transfer a riscurilor, după prelucrarea datelor reieșite ca urmare a efectuării unei analize de risc;
- Luarea deciziilor importante de continuare, stopare sau modificare a activității afectată de riscul calculat;
- Capabilitatea de a expertiza și a efectua diagnosticarea sistemelor dinamice bazate pe starea acestora;
- Pregătirea lucrărilor de mentenanță ca urmare a rezultatelor obținute prin expertizare și diagnosticare;
- Înțelegerea modului în care fiabilitatea sistemului este afectată în funcționare și livrarea măsurilor de îmbunătățire ce trebuie luate precum și a timpilor de intervenție.

Având în vedere cele precizate anterior, se poate concluziona că prezenta lucrare este utilă în a pregăti specialiștii din domeniile precizate. Conștientizarea, monitorizarea și luarea de măsuri pentru prevenirea riscului reprezintă abilități și activități strict necesare în momentul actual, în care punerea în funcțiune și darea în exploatare a sistemelor ingineresti are loc cu încercări apriori din ce în ce mai puține. Ca urmare, riscurile pe care și le asumă atât companiile constructoare cât și beneficiarii acestora sunt din ce în ce mai mari. În aceste condiții, pentru ingineri va reprezenta un avantaj major să fie capabili de a efectua o analiză de risc, să stăpânească domeniul de expertizare și diagnosticare și să-și însușească noțiunile principale cuprinse în cadrul prezentei lucrări.

Autorul

CUPRINS

CAP. 1. MANAGEMENTUL RISCULUI	5
1.1. Noțiunea de risc	5
1.2. Diferențieri între risc-incertitudine și risc-probabilitate	9
1.3. Procesul de analiză în cadrul managementului riscului	12
1.4. Gradul de manifestare a riscului	17
1.5. Surse și categorii de risc în Inginerie	20
1.6. Componente ale managementului riscului și reacția la risc	22
1.6.1. Componentele managementului riscului	22
1.6.2. Reacția la risc	24
1.7. Factori care influențează managementul riscului	26
1.8. Studiu de caz: managementul riscului în inginerie și producție	28
CAP. 2. ELEMENTE GENERALE DE TEORIA RISCULUI	33
2.1. Clasificarea modelelor de risc	33
2.2. Riscul în domeniul Ingineriei	35
2.3. Caracteristicile variabilelor aleatoare	36
2.4. Funcțiile de distribuție și densitatea de probabilitate	38
2.5. Momentele variabilelor aleatoare	40
2.6. Procese aleatoare	46
2.7. Construcția modelului probabilistic în Ingineria riscului	49
2.8. Selecția funcției de distribuție de probabilitate	50
2.9. Estimarea parametrilor de distribuție	53
CAP. 3. INGINERIA RISCULUI	57
3.1. Surse de risc principale în Inginerie. Variabilitate și incertitudine	57
3.2. Inspecția in-service	58
3.3. Analiza pericolelor potențiale	63
3.4. Analiza efectelor unei defecțiuni (AED)	64
3.5. Modele probabilistice pentru evaluarea riscului	65
CAP. 4. MATRICEA DE RISC	67
4.1. Introducere	67
4.2. Noțiunea de risc acceptabil	68
4.3. Clase de probabilitate și consecințe în cadrul matricei de risc	70
4.4. Niveluri de risc determinate pe baza matricei de risc	71
4.5. Exemple de aplicare a matricei de risc	73
4.5.1. Identificarea potențialelor pericole și trasarea unei matrice de risc pentru o automacara cu nacelă	73
4.5.2. Trasarea unei matrice de risc pentru o volantă bimasică	77
4.5.3. Identificarea potențialelor pericole și trasarea unei matrice de risc pentru sistemul de direcție	83

CAP. 5. ANALIZA RISCULUI PE BAZA METODOLOGIEI DE TIP ARBORE DE DEFECTARE	89
5.1. Premizele utilizării arborilor de defectare	89
5.2. Principiul metodei	90
5.3. Structura arborilor de defectare	90
5.3.1. Evenimente	91
5.3.2. Porți	93
5.3.3. Legături	93
5.3.4. Operațiuni de transfer	94
5.4. Modul de lucru în cadrul metodologiei de tip arbore de defectare	94
5.5. Modele utilizate pentru evenimentele primare	97
5.6. Moduri de cedare și analiza efectelor cedării	99
5.7. Studiul fiabilității sistemelor prin metoda arborilor de defectare	102
5.8. Exemple de aplicare a metodologiei de tip arbore de defectare	103
5.8.1. Arbore de defectare la sistemul de frânare	104
5.8.2. Accident rutier	107
5.8.3. Avariarea unei rețele de conducte	110
5.8.4. Arborele de defectare a unei transmisii automate	114
CAP. 6. ANALIZA RISCULUI PE BAZA METODOLOGIEI DE TIP ARBORE DE EVENIMENTE	119
6.1. Metodologia de analiză de tip arbore de evenimente	119
6.2. Structura unui arbore de evenimente	120
6.3. Etape în analiza pe baza metodologiei de tip arbore de evenimente	124
6.4. Definirea unui eveniment accidental	125
6.5. Barierele utilizate în cadrul unei diagrame de tip arbore de evenimente	127
6.6. Consecințe, pericole, ieșiri	129
6.7. Exemple de aplicare a metodologiei de analiză a riscului de tip arbore de evenimente	130
6.7.1. Arborele de evenimente în cazul inițierii unui incendiu în interiorul unei clădiri	130
6.7.2. Utilizarea unui arbore de evenimente pentru a evalua probabilitatea de detectare a unui defect de material, utilizând mai multe variante de tehnică defectoscopică, proceduri și resursă umană	132
CAP. 7. MODELE DE PREDICȚIE A FUNCȚIONĂRII UNUI SISTEM MECANIC PE BAZA APLICĂRII LANȚURILOR MARKOV	135
7.1. Introducere	135
7.2. Procese stohastice și lanțuri Markov. Noțiuni și definiții generale	136
7.3. Proprietăți de bază ale lanțurilor Markov	138
7.4. Lanțuri Markov regulate	139
7.5. Procese Markov	140
7.6. Modele probabilistice de studiu a fiabilității bazate pe lanțuri Markov	141
7.7. Modele de aplicare a lanțurilor Markov	150
7.7.1. Model de predicție a vremii probabile	150

7.7.2. <i>Un model de predicție a funcționării unui sistem mecanic format din trei componente</i>	152
7.7.3. <i>Funcționarea unui sistem format dintr-un calculator, o imprimantă și un plotter</i>	154
CAP. 8. DETECTAREA, IDENTIFICAREA ȘI IZOLAREA DEFECȚIUNILOR ÎN SISTEMELE DINAMICE	159
8.1. Noțiunea de defecțiune	159
8.2. Diagnosticarea defecțiunilor	160
8.3. Modelarea matematică a unui traductor sau a elementului de execuție defect	161
8.4. Formularea problematicei detectării, izolării și identificării defecțiunilor	162
8.5. Atributele unui sistem de diagnosticare a defecțiunilor	167
8.6. Redundanța analitică utilizată pentru detectarea și izolarea defecțiunilor	169
8.6.1. <i>Abordări ale DID bazate pe modele</i>	169
8.6.1.1 <i>Detectarea defecțiunilor bazate pe modele</i>	170
8.6.1.2. <i>Izolarea defecțiunilor bazate pe model</i>	170
8.6.2. <i>Utilizarea inteligenței computaționale în ajutorul DID</i>	176
8.7. Abordarea hibridă la DIID – detectarea, identificarea și izolarea defecțiunilor apărute în sistemele dinamice	182
8.8. Robustețea DID la incertitudini	183
CAP. 9. NOȚIUNI DE DIAGNOSTICAREA ȘI EXPERTIZAREA SISTEMELOR MECANICE	187
9.1. Aspecte definitorii ale metodologiei de diagnosticare	187
9.2. Terminologie practică: metodă, demers, instrument	190
9.3. Instrumentele diagnosticului și demersul investigației	192
9.4. Analiza informațiilor adunate, concluziile și raportul	195
9.5. Calitatea informației	196
9.6. Diagnosticarea sistemelor reparabile pe baza mentenanței	197
9.6.1. <i>Achiziția de date</i>	199
9.6.2. <i>Prelucrarea datelor</i>	200
9.6.3. <i>Analiza datelor din cadrul semnalelor de tip undă</i>	201
9.6.3.1. <i>Analiza în funcție de timp</i>	201
9.6.3.2. <i>Analiza în funcție de frecvență</i>	202
9.6.3.3. <i>Analiza timp-frecvență</i>	203
9.6.4. <i>Analiza datelor tip de valoare</i>	204
9.6.5. <i>Analiza combinațiilor de date privitoare la eveniment și de monitorizare a stării</i>	204
9.6.6. <i>Decizia de mentenanță</i>	206
9.6.6.1. <i>Diagnosticarea defecțiunilor, cedărilor, nefuncționalității</i>	207
9.6.6.2. <i>Abordarea statistică</i>	207
9.6.6.3. <i>Inteligența artificială (IA)</i>	208
9.6.6.4. <i>Alte tipuri de abordări privind diagnosticarea</i>	209
9.7. Expertizarea stării sistemelor funcționale	210

9.7.2. Caracteristici furnizate de metodele de expertizare	212
9.7.3. Tipuri de abordări privind expertizarea	213
9.7.3.1. Abordări bazate pe modele	214
9.7.3.2. Abordări bazate pe date din literatură	214
9.7.3.3. Abordări bazate pe date reale	215
9.8. Durata de viață reziduală	215
9.9. Monitorizarea stării sistemelor	216
9.9.1. Sisteme complet observabile	216
9.9.2. Sisteme parțial observabile	217
9.9.3. Modul de monitorizare a stării sistemelor	218
9.9.4. Monitorizarea sistemelor prin combinarea datelor achiziționate de la mai mulți senzori	218
9.10. Concluzii	220
CAP. 10. FIABILITATEA SISTEMELOR MECANICE	225
10.1. Aspecte particulare ale fiabilității sistemelor	225
10.2. Definițiile fiabilității	225
10.3. Indicatori de fiabilitate	229
10.3.1. Variabila de stare	230
10.3.2. Timpul până la cedare/eșec/defectare/funcționare neconformă	230
10.3.3. Probabilitatea de defectare $F(t)$	231
10.3.4. Funcția de densitate a probabilității $f(t)$	231
10.3.5. Probabilitatea de bună funcționare $p(t)$ sau funcția de fiabilitate $R(t)$	232
10.3.6. Funcția ratei de cedare $z(t)$	233
10.3.7. Timpul mediu de bună funcționare - (TMBF)	235
10.3.8. Dispersia (σ^2) și abaterea medie pătratică (σ)	236
10.3.9. Durata de viață reziduală	237
10.4. Legi de distribuție	237
10.4.1. Distribuția (negativ) exponențială	237
10.4.2. Distribuția Gamma	239
10.4.3. Distribuția normală (Gauss - Laplace)	240
10.4.4. Distribuția Weibull	242
10.5. Fiabilitatea examinării nedistructive (NDE)	245
10.5.1. Probabilitatea detectării defectului (PDD)	245
10.5.2. Managementul NDE	249
10.5.3. Probabilități condiționale în procesul de discriminare prin NDE	251
10.5.4. Curbele COR (caracteristici operaționale relative)	251
10.5.5. Influența pragului de acceptare	252
10.5.6. Influența factorului uman	253

CAPITOLUL 1. MANAGEMENTUL RISCULUI

-
- 1.1. Noțiunea de risc*
 - 1.2. Diferențieri între risc-incertitudine și risc-probabilitate*
 - 1.3. Procesul de analiză în cadrul managementului riscului*
 - 1.4. Gradul de manifestare a riscului*
 - 1.5. Surse și categorii de risc în Inginerie*
 - 1.6. Componente ale managementului riscului și reacția la risc*
 - 1.7. Factori care influențează managementul riscului*
 - 1.8. Studiu de caz: managementul riscului în inginerie și producție*
-

1.1. Noțiunea de risc

Managementul riscului este un domeniu de cunoștințe cu care toți inginerii ar trebui să se familiarizeze, esențiale fiind un anumit grad de competență și de conștientizare în ceea ce privește aplicarea acestuia. Evaluarea și gestionarea riscurilor sunt componente integrale ale activităților de zi cu zi ale tuturor oamenilor. De la alegerea unui mijloc de transport la decizia asupra activităților pe care trebuie să le întreprindă, pot fi identificate probleme potențiale, care, cu o anumită probabilitate pot conduce la incidente. Managementul riscului face parte din mecanismul de control intern al unei organizații, pe baza căruia se determină nivelul de risc, fie la nivel de organizație fie la nivel de sisteme, sub-sisteme sau componente. Scopul acestui demers îl reprezintă determinarea probabilității de manifestare a riscului și luarea unor măsuri în vederea menținerii acestuia la un nivel acceptabil.

Obiectivele principale ale managementului riscului sunt:

- determinarea riscurilor în vederea asumării acestuia în cadrul unui program de „risc asumat”;
- luarea unor decizii care să limiteze influențele negative și introducerea de instrumente care să favorizeze funcționarea adecvată;
- menținerea riscurilor în limite care să nu afecteze funcționarea sistemului, așa cum a fost prevăzut;
- să contribuie la îmbunătățirea globală a performanțelor.

Managementul riscului presupune o abordare continuă și ciclică de monitorizare și gestionare permanentă a activității și a factorilor de influență. În aceste condiții, înainte de luarea unei decizii sunt necesare anumite activități preliminare [1] cum ar fi:

- stabilirea obiectivelor organizației în raport cu nivelele ierarhice ale acesteia și posibilitățile de manifestare pe piață;
- identificarea riscurilor care pot afecta realizarea obiectivelor, respectarea regulilor și regulamentelor, încrederea în informațiile financiare, protejarea bunurilor, prevenirea și descoperirea fraudelor, punerea pe primul plan a riscului privitor la accidente de muncă și apoi a posibilității apariției eșecurilor în execuție;

- definirea categoriilor de riscuri (externe, operaționale, interne sau de colaborare, privind schimbarea sau redefinirea totală sau parțială a obiectivelor), precum și a riscului inerent, riscului rezidual și apetitului pentru risc;
- evaluarea probabilității ca riscul să se materializeze și a mărimii impactului acestuia.

În general, managementul riscului presupune luarea de măsuri, în cunoștință de cauză, în vederea protejării împotriva anumitor amenințări: umane, financiare, accidente de muncă, casnice, de circulație, catastrofe naturale, etc. Se insistă asupra faptului că, managementul riscului nu este numai o problemă de costuri, ci mai degrabă o disciplină complexă cu fundamente teoretice, aplicații organizatorice și practice. În orice moment trebuie luate decizii, având în vedere anumite informații avute la dispoziție, luându-se măsuri pentru a preveni un eventual eveniment nedorit. Rezultatul va fi că, vei avea o călătorie și/sau activități zilnice mai plăcute. Ca urmare, trebuie făcute analize științifice privind evaluarea și determinarea nivelului de risc. În aceste condiții trebuie să fie identificate pericolele, cu probabilitățile lor de realizare, și evaluate consecințele ce decurg din concretizarea respectivelor pericole. Deciziile de management al riscului presupun acceptarea acestuia, având în vedere aducerea riscului la un nivel de acceptabilitate, astfel încât activitatea să continue în mod corespunzător, în cadrul parametrilor proiectați. Dacă se constată faptul că riscul este inacceptabil, atunci, respectiva activitate nu trebuie întreprinsă sau nu mai poate continua. În orice caz, orice activitate începută trebuie monitorizată astfel încât riscul să fie menținut la un nivel acceptabil. Așa cum s-a arătat, orice activitate conține un anumit nivel de risc, respectiv acesta poate fi definit ca fiind nesiguranța asociată oricărui rezultat. Nesiguranța se poate referi la probabilitatea de apariție a unui eveniment sau la influența sau efectul unui eveniment, în cazul în care acesta se produce. Despre risc putem vorbi atunci când apar nesiguranțe sau incertitudini, fie în cazul posibilității de manifestare fie în cazul consecințelor sau la ambele:

- un eveniment se produce sigur, dar rezultatul acestuia e nesigur;
- efectul unui eveniment este cunoscut, dar apariția evenimentului este nesigură;
- atât evenimentul cât și efectul acestuia sunt incerte.

Practica inginerească poartă cu ea un nivel inerent de risc pe care specialiștii trebuie să-l înțeleagă și să-l gestioneze. Este necesar să se facă o distincție clară între termenii de pericol și risc. Termenii de pericol și de risc sunt adesea folosiți în mod alternativ. Acești termeni nu trebuie confundați deoarece pericolele și riscurile nu sunt același lucru.

Pericol: potențialul ca o mașină, echipament, proces, material sau factorul fizic în acțiune să provoace daune persoanelor, mediului, utilajelor, aparatelor sau întregului proces de producție.

Riscul: posibilitățile de vătămare, pierdere sau prejudiciu – toate acestea fiind consecințe - create de un pericol ce are o anumită **probabilitate** de a se manifesta.

Importanța riscului este o funcție a probabilității producerii unui incident nedorit în combinație cu severitatea acestuia.

Definiții ale riscului:

- Posibilitatea de a pierde cuantificabilă în consecințe concrete;
- Incertitudinea ce afectează un rezultat posibil;
- Dispersia rezultatelor așteptate nu este în conformitate cu proiecția;
- Probabilitatea ca orice rezultat să difere în mod esențial de unul așteptat;
- Concept multidimensional al cărui nivel nu poate fi redus la un singur element, la o cifră.

Managementul riscului a apărut încă de la constituirea colectivităților umane, manifestându-se sub diferite forme, dezvoltându-se treptat, până la acțiuni concrete de tratare a riscului, de prevenire a factorilor negativi, de influență sau de determinare a vulnerabilităților.

Această disciplină s-a dezvoltat în mod continuu, parcurgându-se un drum lung, cu costuri imense, de la „mai bine un dram de noroc decât un tratament adecvat” până la „logică în loc de panică” și „acțiune în cunoștință de cauză” [1]. Astfel, s-a făcut un salt uriaș de la a accepta pericolele posibile, la a identifica și evalua hazardul, până la a controla riscul apariției unor evenimente nedorite.

Trebuie făcută o diferențiere clară între hazard și risc, având în vedere faptul că există tendința de a le considera ca sinonime. Astfel, în timp ce hazardul se referă la producerea unui eveniment nedorit și mai ales neașteptat, ca urmare, la ceva concret, riscul definește în mod abstract consecințele negative ale producerii respectivului evenimentului nedorit. Riscul se poate determina printr-o valoare numerică (probabilitatea producerii evenimentului nedorit, mărimea și natura consecințelor producerii acestuia sau produsul celor două elemente, frecvența cu care se poate produce evenimentul supus analizei), iar analiza și managementul acestuia presupun o atitudine de evaluare științifică, de prevenire a evenimentelor sau de atenuare a consecințelor acestora.

Produsul dintre probabilitatea producerii unui eveniment nedorit și mărimea consecințelor reprezintă esența definirii riscului. În timp ce conceptul de acceptare (tolerare) a riscului aparține civilizațiilor greacă și arabă, conceptul de monitorizare a riscului este relativ nou, conturându-se abia între anii 1950-1960. Cu toate descoperirile și definirea pe baze științifice a managementului riscului, mai există și astăzi manageri al căror stil organizatoric se întemeiază pe credința că „managementul riscului ține mai degrabă de hazard decât de știință” și, ca urmare, nu se poate face apel la acesta atunci când se face analiza unui sistem. Aceasta se datorează nu numai ignoranței sau lipsei de interes, ci și faptului că, la ora actuală, nu poate fi identificată o anumită formă optimală și explicită de organizare a managementului riscului pentru evenimentele nedorite, în special pentru cele de criză. Pe de altă parte, lipsa unor reglementări speciale, nu poate fi suplinită de prevederile (insuficiente și lapidare) din standardul calității ISO 9000. Riscurile nefiind entități concrete, nu pot fi măsurate cu precizie, reprezentând, mai degrabă, chestiuni abstracte a căror percepere, pentru unii manageri, este deseori confuză și tardivă. Nici izomorfismul situațiilor de risc nu este prea dezvoltat, acesta fiind mai mult un deziderat decât o preocupare științifică permanentă.

Deoarece atitudinea față de risc este conștientă și se bazează pe o analiză complexă, perceperea corectă a riscurilor a devenit un factor determinant al formării atitudinii. Acest aspect este evident pentru toată lumea, fiindcă oamenii răspund la situațiile de risc așa cum reușesc să le perceapă.

Depart de a fi epuizat, managementul riscului a devenit un subiect intens de cercetare, având la bază, încă din 1994, trei concluzii majore [1]:

- similar hazardului, o activitate necunoscută presupune un risc;
- asocierea dintre risc și hazardul particular nu este întotdeauna corectă;
- interesul, conveniența sau urgența nu pot fi disociate de risc, chiar și în cazul în care acțiunea declanșată de acestea a fost un succes.

În dicționarul limbii române, noțiunea de risc se definește ca posibilitatea de a ajunge într-o primejdie, de a avea de înfruntat un necaz sau de a suporta o pagubă. De asemenea, se mai aduce în discuție și posibilitatea ca riscul să reprezinte un *pericol posibil*. Termenul, în sine, datează de la

mijlocul secolului al 17-lea, când este întâlnit sub forma “**risque**” în limba franceză și “**rischo**”(derivat din “**rischiare**”) în limba italiană.

În consecință, se pot evidenția următoarele trăsături ale riscului :

- un eveniment incert dar posibil, originea lui aflându-se în incertitudine și variabilitate; este păgubitor, efectele lui odată produse nu mai pot fi înlăturate;
- apare în cadrul procesului activității umane, sociale, economice, politice și în raporturile dintre om și natură.
- expunerea la situații nedorite;
- eveniment posibil și nedorit, previzibil sau imprevizibil.

Definiția riscului diferă de la o disciplină la alta, chiar în cadrul aceluiași domeniu sunt uneori definiții contradictorii. Cu toate aceste diferențieri, toate definițiile conțin două elemente comune: **nedeterminare (incertitudine) și pierdere.**

Noțiunea de **nedeterminare a rezultatelor** este implicată în toate definițiile riscului. Când s-a afirmat că riscul există, întotdeauna rezultă cel puțin două rezultate posibile. Dacă se cunoaște cu certitudine că se va realiza o pierdere, aceasta nu înseamnă că evenimentul respectiv este afectat de risc. De asemenea, termenul „riscant”, cu referire la situații sau acțiuni, are sensul de „plin de riscuri, expus la primejdii, nesigur”.

Există mai multe caracteristici ale acestor definiții:

- riscul apare în cazul în care se manifestă un pericol. Identificarea aprofundată a pericolelor este cheia pentru eficienta gestionare a riscului; nu se poate gestiona riscul generat de un pericol care nu a fost identificat;
- prejudicii sau daune pot apărea în patru domenii largi – legate de persoane, de mediu, de active (echipament, proprietate, etc.), și producție (sau proces, respectiv întreruperea activității).

Recunoașterea acestor categorii distincte conduce la o abordare integrată a managementului riscului, care cuprinde toate pierderile potențiale. Managementul integrat al riscurilor, cuprinde o varietate de activități în inginerie. Există două aspecte legate de risc - probabilitatea și gravitatea. În loc de probabilitate se mai utilizează adesea frecvența. Deși există diferențe subtile în ceea ce privește semnificația acestor cuvinte, în special între frecvență și probabilitate, diferențele nu sunt critice. Ca urmare, putem spune că un pericol reprezintă o sursă de pierdere potențială iar riscul reprezintă posibilitatea de realizare a acesteia.

În teoria riscului se utilizează modele de risc ce se bazează, în principal, pe teorii statistice și probabilistice, în vederea evaluării gradului de risc. Riscul se bazează pe incertitudinile existente în sistemul analizat, incertitudini care vor conduce la stări de nesiguranță cu privire la comportarea ulterioară și viitoare a respectivului sistem. Incertitudinile, la rândul lor, sunt puternic influențate de vulnerabilitățile și variabilitatea sistemului. Ca urmare, incertitudinile derivă din starea de nesiguranță privind capabilitatea sistemului de a-și duce la bun sfârșit sarcinile pentru care a fost proiectat. Pe de altă parte, în analiza riscului intervine termenul de probabilitate, în care sistemului analizat i se atribuie anumite legi probabilistice (de bună-funcționare sau defectare). Într-un sistem (static sau dinamic) riscul și incertitudinea se întâlnesc, combinându-se în anumite proporții. Se menționează faptul că riscul poate fi determinat, cu o anumită probabilitate, în timp ce incertitudinea nu poate fi eliminată. În aceste condiții de incertitudine, într-un sistem pot apărea erori, disfuncționalități, abateri de la funcționarea normală, etc. care pot schimba fundamental datele de ieșire din cadrul acelu sistem. Peste incertitudinile provocate de funcționarea sistemului se suprapun și cele datorate procesului decizional. Acesta ia în considerare următoarele aspecte:

analizează datele statistice reieșite dintr-o funcționare prealabilă, se bazează pe experiența anterioară și încearcă validarea unui model în vederea aplicării acestuia la un sistem ce se va dezvolta în viitor. Atunci când oricare dintre secvențele anterioare se bazează pe informații incomplete, neverificate sau posibil eronate, incertitudinea devine o potențială sursă de risc. Deși în majoritatea cazurilor se utilizează teoria probabilităților ca o măsură a riscului, totuși, probabilitatea și riscul reprezintă concepte diferite. Astfel, riscul poate fi diminuat în urma deciziilor de management bazate pe informări și făcându-se o evaluare a alternativelor posibile, a incertitudinilor întâlnite pe traseu precum și a consecințelor posibile, atunci când se adoptă o alternativă sau alta.

Un program managerial performant trebuie să cuprindă o strategie de gestionare a riscului ce constă din minimizarea, atât a producerii riscului cât și a consecințelor în cazul în care, totuși, riscul se manifestă. Având în vedere faptul că, putem avea consecințe pe plan economic, social, privind mediul înconjurător, securitatea muncii, etc. obiectivul principal al unei politici în domeniul managementului riscului îl constituie reducerea probabilității de manifestare a riscului. Este evident faptul că, un management al riscului performant implică și anumite cheltuieli suplimentare. Cu cât se impun sisteme de siguranță mai sofisticate în vederea diminuării riscului cu atât cheltuielile cu acest capitol vor fi mai mari, suprapunându-se peste cheltuielile operaționale. Aceste cheltuieli cu managementul riscului reprezintă un risc în sine, întrucât există posibilitatea ca prețul produsului să crească peste limitele la care se poate desface cu profitabilitate. Pentru o eficientizare a managementului riscului trebuie să avem în vedere următoarele etape de lucru:

1. Analiza riscului, ce presupune identificarea și evaluarea consecințelor posibile, directe și indirecte;
2. Activități de prevenire, ce presupun diminuarea riscului și atenuarea efectelor posibile prin introducerea unor mijloace de protecție;
3. Finanțarea cheltuielilor cu managementul riscului, care să fie în limite acceptabile și în concordanță cu efectele posibile.

Se constată faptul că, riscul derivă din incertitudine întrucât decizia privind un sistem se ia în prezent iar punerea în practică și, eventual, manifestarea riscului precum și consecințele acestuia, se vor produce în viitor. Incertitudinea provine din variabilitățile sistemului, din necunoașterea cu exactitate a evenimentelor ce se vor manifesta impropriu și a efectelor ce vor urma.

1.2. Diferențieri între risc-incertitudine și risc-probabilitate

În cadrul acestui capitol și al capitolelor viitoare vom regăsi, printre altele, noțiunile de risc, incertitudine și probabilitate. Aceste noțiuni au elemente comune, dar se și diferențiază apelând unele la altele.

Noțiunea de risc presupune că, dacă un anumit aspect nedorit și luat în considerare ca fiind riscant se întâmplă, atunci se produc pagube care pot îmbrăca diferite aspecte. În acest caz, fie o componentă sau întregul sistem cedează, fie cineva în mod sigur va pierde, fie câștigul preconizat va fi mai mic decât cel așteptat. Riscul presupune și noțiunea de „risc informat” astfel încât, în momentul în care se ia o decizie, aceasta să fie acoperită de un studiu care să aibă la bază informarea prealabilă asupra pericolelor potențiale ce pot conduce la eșec sau câștig mai mic. Diferența dintre cel mai mare câștig, obținut în cadrul variantei celei mai optimiste, și varianta actuală, este denumită ca fiind oportunitatea și ea este valorificată pe baza asumării riscului.

Incertitudinea presupune o abordare ce pune la îndoială posibilitatea de realizare cu succes a unei variante de lucru. Incertitudinea se instalează ca urmare a lipsei de cunoaștere în profunzime a tuturor aspectelor problemei abordate, a necunoașterii asupra a ceea ce îți rezervă viitorul precum și a variabilității sistemelor prezente în cadrul respectivei probleme. Este evident faptul că, atunci când în cadrul unei activități avem de-a face cu un risc (asumat sau nu), persoanele sau organizațiile care conștientizează acest risc au și o anumită incertitudine privitoare la ceea ce le va rezerva viitorul în legătură cu realizarea obiectivelor propuse. Chiar dacă noțiunile de risc și incertitudine se întrepătrund, ele au caracteristici diferite și trebuie tratate ca atare. Astfel, în *tabelul 1.1.* sunt prezentate câteva aspecte ce diferențiază cele două caracteristici.

Tab. 1.1. Diferențe dintre risc și incertitudine:

	Risc	Incertitudine
1	Riscul poate fi cunoscut sau nu. Dacă nu se iau măsuri suplimentare, evenimentul se va desfășura cu riscul corespunzător.	Cunoașterea riscului poate reduce în mod semnificativ din incertitudine.
2	Atunci când riscul este conștientizat poate fi asumat, în mai mare sau mică măsură.	Starea de incertitudine se instalează chiar dacă riscul este conștientizat și asumat datorită faptului că nu se cunoaște în detaliu ce îți va rezerva viitorul.
3	Pot exista evenimente exterioare sau din cadrul sistemului, neluate inițial în calcul și care să interfereze în mod negativ cu evoluția sistemului principal.	În cazul conștientizării acestor interacțiuni, gradul de incertitudine crește, existând posibilitatea de renunțare la orice variantă posibilă, supusă unui astfel de risc.
4	Se pot face anumite anticipări și se poate merge pe un „risc informat” cu calculul probabilității de realizare a unei variante sau a alteia.	În aceste condiții incertitudinea scade, conducând la luarea unor decizii în funcție de riscul asumat: risc mare, posibilitate de câștig mare.
5	Se pot face anumite anticipări atât în ceea ce privește evenimentele ce se pot produce cât și asupra probabilității asociate materializării lor. De aici un risc cu atât mai cunoscut.	În situația în care, decidentul nu poate identifica toate sau chiar nici unul dintre evenimentele posibile a se produce și cu atât mai puțin nu poate estima probabilitatea producerii lor, avem de-a face cu variabile incomplet definite: incertitudine sporită.
6	Riscul se poate calcula în termenii probabilității de materializare.	Incertitudinea coexistă cu riscul dar nu poate fi cuantificată decât la nivel de percepție, emoție, etc.
7	Dacă sistemul studiat se desfășoară pe o perioadă determinată , riscul se poate calcula în termenii valorilor determinate de pierderi, mărimea fisurii propagate, mărimea avariei, accidentului, etc.	Incertitudinea se reduce la zero la sfârșitul acelei perioade.

Existând interdependențe între risc și incertitudine, se remarcă și elemente comune. Nici riscul și nici incertitudinea nu pot fi eliminate definitiv. Dacă sistemul studiat este unul care se

desfășoară în timp, riscul și incertitudinea vor exista pe toată perioada desfășurării evenimentelor din cadrul aceluși sistem. Variabilitatea și evenimentele imprevizibile ce apar pe parcursul desfășurării evenimentelor, dacă acestea sunt conștientizate, pot conduce la incertitudine sporită și, de asemenea, la un risc mai mare. Incertitudinea însăși, precum și lipsa de cunoaștere pot conduce la valori calculate ale riscului mai mari.

Așa cum s-a menționat, una din mărimile calculabile, ce caracterizează **riscul**, este reprezentată de **probabilitatea** de materializare. Totuși, pe lângă această mărime, riscul este caracterizat și de alți factori, ceea ce face ca între risc și probabilitatea materializării sale să se poată face anumite distincții. În acest sens, în *tabelul 1.2* sunt prezentate câteva diferențe între aceste noțiuni complementare. În capitolul 2, referitor la Analiza riscului, precum și în capitolele 5, 6 și 7, se va constata faptul că metodele moderne de evaluare a riscului utilizează elemente de teoria probabilității în vederea determinării unor mărimi care să caracterizeze riscul, din punct de vedere cantitativ. Valorile rezultate pentru aceste mărimi nu trebuie considerate ca fiind exclusive, ele având totuși rolul lor în ceea ce privește „riscul asumat”.

Tab. 1.2. Diferențe între risc și probabilitate:

	Riscul	Probabilitatea
1	O caracteristică specifică întregii distribuții de probabilități. Pentru fiecare domeniu specific se aplică o anumită lege de distribuție probabilistică chemată să caracterizeze cât mai bine desfășurarea evenimentelor avute în vedere.	Ne indică în ce măsură este posibilă producerea unui anumit eveniment în condiții bine determinate.
2	Se asociază cu o probabilitate de apariție a unor evenimente nedorite. Cu cât consecințele sunt mai nedorite cu atât este mai riscantă decizia ce a fost adoptată.	Pentru fiecare eveniment există o anumită probabilitate de apariție. Cuantificarea acesteia se face pe bază de observații, experiențe, calcul statistic, etc.
3	Metodele esențiale de măsurare a riscului sunt cele cu ajutorul teoriei probabilităților.	Probabilitatea definește caracterul sau însușirea a ceea ce este posibil să se materializeze.
4	Riscul obiectiv, inerent oricărei acțiuni caracterizate prin variabilitatea rezultatelor probabile, este o variabilă independentă de individ.	Probabilitatea obiectivă se bazează pe evidența istorică a datelor statistice.
5	Riscul subiectiv este o estimare a riscului obiectiv și depinde de sistemul analizat.	Probabilitatea subiectivă și, respectiv, aprecierea subiectivă a riscului, poartă amprenta personalității fiecărui individ, reflectând mentalitățile, obiceiurile și măsura în care acestea se bazează pe intuiție sau dimpotrivă, pe observații minuțioase pentru luarea deciziilor.

1.3. Procesul de analiză în cadrul managementului riscului

Managementul riscului începe prin identificarea în mod activ a riscurilor posibile, alocându-le o probabilitate de apariție și o frecvență de manifestare. Un pas foarte important în procesul de analiză a riscurilor îl reprezintă identificarea sau clarificarea contextului problemei de decizie, adică raportul dintre sistemul ingineresc considerat și activitățile necesare analizei riscului. În acest scop, încă de la început, este util să se caute răspunsuri pentru următoarele întrebări:

- cine sunt factorii de decizie și părțile interesate în cadrul acestei activități: societăți, clienți particulari, organizații neguvernamentale sau de stat, etc.?
- care sunt condițiile ce ar putea avea o influență negativă asupra impactului analizei de risc și a rezultatelor sale?
- care sunt factorii care pot influența modul în care se efectuează analiza de risc (politici, juridici, sociali, financiari și culturali)?

Aici trebuie făcută o distincție între analiza riscului și managementul riscului. Analiza riscului furnizează date concrete, calitative și cantitative, deduse pe baza unor diagrame de risc de exemplu, privitoare la sistemul analizat. Analiza riscului este o etapă din cadrul managementului riscului care permite evaluarea riscurilor. În *figura 1.1* se prezintă subordonările și raportările subdomeniilor constitutive ale managementului riscului.

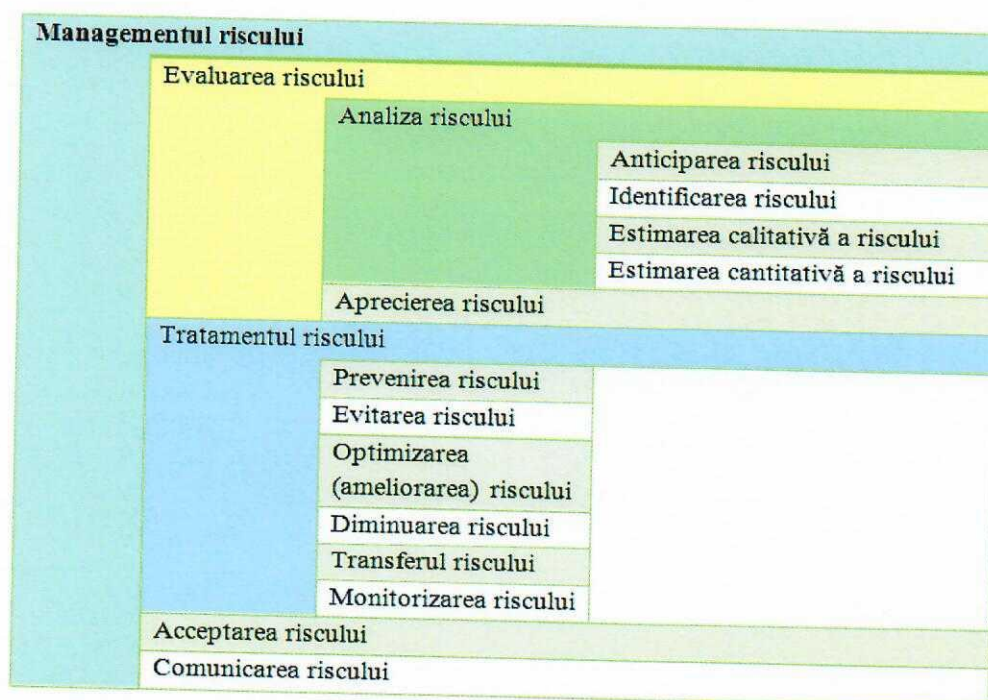


Fig. 1.1. Elementele de subordonare din cadrul managementului riscurilor

În esență, inginerii se ocupă de analiza de risc (de probabilitate și consecințe), astfel încât să se poată evalua riscul (cu privire la acceptabilitate). Zona de management a riscului ține de zona deciziei care să conducă la gestionarea sau tratamentul riscurilor. Așa cum a fost descris anterior, nu este posibil să se înceapă acest ciclu fără identificarea în mod eficient a riscurilor inițiale. Modul de

planificare a unei analize de risc este prezentat în schema din *figura 1.2*, [2]. Fiecare pas reprezentat în cadrul acestei diagrame conține activități specifice și care sunt organizate în formate specifice.

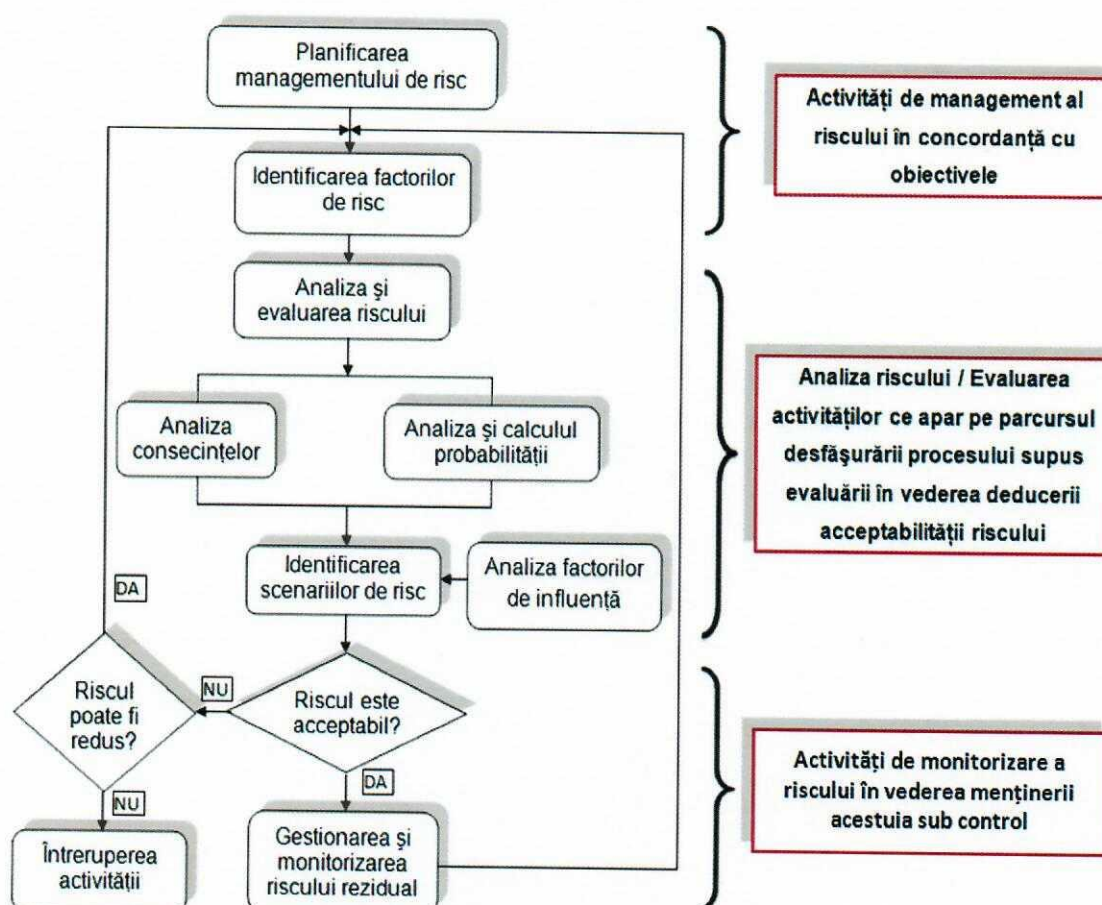


Fig. 1.2. Reprezentarea unei modalități de planificare a managementului de risc [2]

Etapile descrise în *figura 1.2* sunt explicate, pe scurt, în cele ce urmează.

Planificarea activităților privind managementul riscurilor

Aceasta este o etapă în care conducerea ia decizia, fie de monitorizare a riscurilor la un sistem existent, fie de a dezvolta noi proiecte. În ambele variante este necesară culegerea de informații necesare unui management al riscurilor performant. Se formează, astfel, o bază de date necesară pentru a asigura eficiența unui sistem de management performant. Aceste activități preliminare cuprind: investigații privind incidența unor activități similare, activități de reglementare (inspecții periodice, rapoarte de mediu, reînnoirea activelor, modificări ale legislației, actualizări de coduri și specificații), activități de întreținere. Obiectivul acestei etape este acela de a fi pro-activi astfel încât, colectarea de date, analiza evoluției sistemului precum și prelucrările statistice de date să mențină compania în afara oricăror probleme majore privitoare la riscurile potențiale. În această etapă sunt descrise și analizate toate ipotezele cu privire la posibilitățile de reprezentare a sistemului. Acest lucru include o descriere a unor părți ale sistemului care nu vor fi luate în considerare în cadrul analizei de risc.

Identificarea factorilor de risc

Una din activitățile ce trebuie efectuate în cadrul unei analize de risc o constituie identificarea pericolelor sau a factorilor de risc ce pot afecta comportarea viitoare a sistemului supus analizei, *figura 1.3*. Echipa de management va primi diverse date și va lua decizii asupra căror aspecte, reieșite din analiza sumară a acestora, trebuie să se oprească în vederea unei viitoare analize de risc.

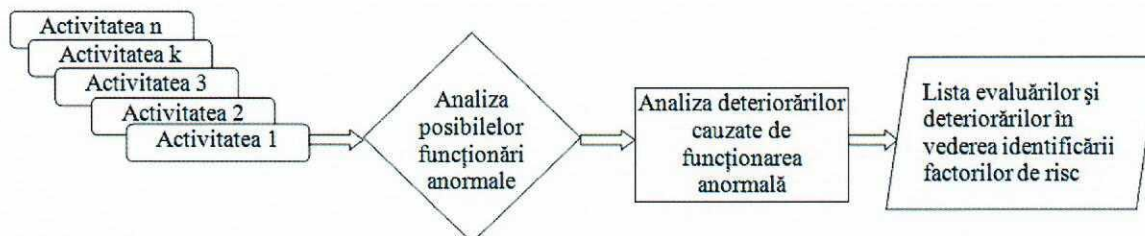


Fig. 1.3. Analiza activităților în vederea identificării factorilor de risc

Există o varietate de instrumente disponibile pentru identificarea factorilor de risc: Hazardul și studiul operabilității (HAZOP), What-If Analysis, Lista de verificare, Arborele de defectare, Arborele de evenimente, etc. În cadrul acestei analize se disting, de obicei, trei etape, și anume:

- descompunerea sistemului într-un număr de componente și/sau subsisteme sau activități. Această descompunere va forma baza de evaluare a riscurilor și de tratament logic și numeric a acestor riscuri;
- identificarea posibilelor stări de eșec/cedare/avarie pentru sub-componentele sistemului luate în considerare, respectiv pericolele asociate cu sistemul. Acest pas poate fi efectuat pe baza experiențelor unor sisteme similare și a informațiilor din bazele de date care conțin înregistrări ale eșecurilor/cedărilor pentru diferite tipuri de sisteme și subsisteme .
- identificarea modului în care ar apărea pericolele pentru sistemul și subsistemele considerate, respectiv, identificarea scenariilor de eșec/cedare/avarie ce vor conduce, în final, la cedarea sistemului. Un aspect important în această etapă îl constituie luarea în considerare a posibilelor cauze comune ce conduc la eșecuri/cedări/avarii, ceea ce poate provoca funcționarea neconformă a două sau mai multe componente sau subsisteme ale sistemului considerat.

Analiza și evaluarea riscului.

Există multe instrumente disponibile pentru analiza și evaluarea riscurilor. Analiza de risc implică o înțelegere a componentelor de risc, respectiv probabilitatea de realizare, frecvența și consecințele. Probabilitatea se referă la cedarea de sisteme, componente sau subsisteme, la acțiuni greșite ale factorului uman, la neîndeplinirea funcțiilor de către unele echipamente, etc., în multe cazuri acest eșec fiind ușor cuantificabil. Unele date sunt disponibile, fie din statistici fie din experiența anterioară, datele cele mai pertinente fiind adesea găsite în înregistrările de întreținere ale companiei, cum ar fi date de logistică operațională sau rapoarte de anchetă privind incidente anterioare, proprii sau ale altor companii. Există, de asemenea, o serie de metodologii pentru a cuantifica consecințele multora dintre pericolele întâlnite în practica inginerescă, cum ar fi: incendiile (radiația termică și fum), explozii (suprapresiuni, unda de șoc), toxice (dispersie nor, expuneri toxice, letalitate), zgomot, poluare apă/aer, etc. Odată cunoscute probabilitatea și severitatea consecințelor precum și riscul estimat, se trece la evaluarea riscului pentru a determina dacă acesta este acceptabil sau nu.

Analiza consecințelor

Consecințele luate în considerare în cadrul analizei trebuie să fie aceleași cu cele conținute în caietul de sarcini privind criteriile de acceptare. De obicei, se iau în considerare: consecințele economice, pierderile de vieți omenești, efectele negative asupra mediului, cedările componentelor ce pot conduce la ne-funcționalitatea sistemului, etc. Estimarea consecințelor, produse de către defecțiunea sistemului, necesită o înțelegere aprofundată a acestuia și a inter-relaționării cu împrejurimile sale. Astfel, estimarea consecințelor este realizată, cel mai bine, în colaborare cu experți care au experiență de tip "hands-on" în cadrul activității considerate.

Calculul și analiza de probabilitate

Evaluarea probabilităților de eșec/cedare/avarie pentru componentele individuale și subsisteme se poate baza pe două abordări diferite, în funcție de tipul de componente/sub-sistem și informațiile disponibile în ceea ce privește performanțele acestora. Pentru componentele din sistemele funcționale dinamic sau instalații de proces, în cazul în care sunt disponibile cantități semnificative de informații, probabilitățile de eșec/cedare/avarie pot fi evaluate pe baza ratelor de eșec/cedare/avarie **observate anterior**. Pentru componente structurale, situația este diferită, în sensul că informațiile privind rata de eșec/cedare/avarie sunt mult mai puține. În aceste cazuri, pentru evaluarea probabilității de eșec/cedare/avarie, sunt necesare metode de **teoria fiabilității structurale**.

Identificarea scenariilor privind riscul critic

Având efectuată analiza consecințelor și determinate probabilitățile pentru fiecare eveniment în parte, pot fi identificate scenariile de pericol care domină riscul, așa - numitele scenarii de risc. De multe ori, **scenariile critice de risc** sunt clasificate în conformitate cu contribuția lor la risc, fiind, de asemenea, util să se ia în considerare o clasificare în conformitate cu componentele și subsistemele implicate. Acest lucru va facilita planificarea ulterioară a tratamentului la risc.

Analiza factorilor de influență asupra riscului

Analiza factorilor de influență este utilă în vederea obținerii unor date suplimentare privitoare la scenariile de risc identificate, și include, în mod normal, o identificare a celor mai importanți factori pentru riscurile asociate cu diferite scenarii critice de risc. De asemenea, analiza factorilor de influență sau a sensibilității la risc poate include studii privind evaluarea importanței diferitelor simplificări ale sistemului efectuate în definirea acestuia. În acest fel, poate fi evaluată robustețea analizei, dar, de asemenea, pot fi investigate posibile modalități de reducere a riscului prin modificarea sistemului sau a performanțelor componentelor acestuia. De exemplu, în cazul analizei pe baza diagramei de tip arbore de defectare, se utilizează trei criterii de evaluare a sensibilității la risc. Măsurarea importanței pe baza criteriului F-Vesely (Fussell-Vesely) reprezintă *contribuția* respectivului eveniment la cedarea sistemului. Criteriul Birnbaum aplicat unui eveniment este o măsură a *sensibilității* cedării sistemului ținând cont de riscurile de defectare ale componentelor sau de probabilitatea de eșec/cedare înregistrată în cadrul fiecărui eveniment de bază sau intermediar. Măsurarea importanței evenimentului pe baza criteriului B-Proschan (Barlow-Proschan) ia în considerare (în calculul său) diferite *secvențe de cedări* în cadrul evenimentelor primare sau intermediare.

Riscul este acceptabil?

Multe dintre conducerile companiilor au dezvoltat o *matrice de risc* pentru a descrie ce reprezintă un risc de nivel scăzut (acceptabil), un risc de nivel mediu (acceptabil, cu anumite condiții), și un risc de nivel înalt (inacceptabil). Astfel de matrici clarifică angajaților ce trebuie să facă/să nu facă și ceea ce este acceptabil. Riscurile de nivel scăzut sunt, de obicei, acceptabile, fără nici o implicare în continuare a factorului administrativ și fără adăugiri de proiectare. În ceea ce privește riscul de nivel mediu, conducerea trebuie să se implice în mod activ pentru a se asigura de faptul că riscul este ținut sub control. Merită menționat aici că responsabilitățile conducerii sunt primordiale, **managerii asumându-și responsabilitatea pentru acceptarea riscului**.

Gestionarea, monitorizarea și asumarea riscului rezidual

Odată ce un riscul este determinat ca fiind acceptabil, acesta trebuie asumat, gestionat și monitorizat. Acesta este probabil cel mai important pas în procesul asumării responsabilității privind acceptarea riscului și de a preveni orice incident nedorit care poate apărea. Un instrument ingineresc cheie utilizat în această etapă îl reprezintă adoptarea unui sistem de management adecvat pentru riscurile asumate (sănătate, securitate la locul de muncă, siguranța desfășurării procesului, fiabilitatea echipamentelor, etc.). Sistemele de management al siguranței/situațiilor de urgență sunt recunoscute ca fiind cele mai bune practici de gestionare a riscului, recunoscute și acceptate ca atare la nivel mondial. Ele constau de obicei din 10 - 20 de elemente de program (de exemplu, gestionarea schimbării) care trebuie parcurse pentru a gestiona riscurile într-un mod acceptabil. Odată ce un risc este acceptat, el nu merge neapărat mai departe ci este așezat în așteptarea unei oportunități, în timp ce sistemul de management monitorizează în mod activ operațiunile companiei în vederea luării de măsuri pro-active pentru a corecta eventualele probleme.

Riscul poate fi redus?

Deseori, există modalități de a reduce riscul atunci când nivelul său a fost determinat ca fiind inacceptabil. Se utilizează termenul de „siguranță inherentă” pentru a sugera metode care vor reduce riscul pe baza reducerii pericolelor propriu-zise (de exemplu, prin substituirea unui material cu altul mai puțin periculos). În plus, pot fi adăugate și alte controale, sisteme de management, funcții de protecție, și altele asemenea instrumente pentru a reduce riscul la un nivel acceptabil. În cazul în care măsurile de reducere a riscurilor propuse sunt viabile, trebuie să se facă modificările necesare la echipamentul, procedurile, stocurile periculoase, etc. Este important de reținut că, odată ce se face o schimbare, ciclul de management al riscului este utilizat din nou pentru a evalua posibile **noi pericole și riscuri**. Modificări ale proceselor de inginerie creează adesea probleme suplimentare potențiale care pot, neintenționat (și, probabil, în necunoștință de cauză), conduce la o creștere a riscului operațional.

Întreruperea activității

Este un pas foarte important este de a recunoaște atunci când **riscul este prea mare**. Până în acest moment, managerul trebuie să aibă toate aspectele foarte bine clarificate în sensul riscului determinat și să ia deciziile corecte. În această etapă intră în joc obiectivele și valorile companiei - inclusiv factorii privind profituri mai mici sau intrare pe pierderi, promovări personale pe bază de succes sau demiteri pe bază de insucces, etc. Așadar, o decizie cu asumare de risc, implică atât

factori economici cât și factori emoționali. Întreruperea unei activități ca urmare a unui risc inacceptabil, este o decizie-cheie, deoarece se presupune că o societate nu va produce ceva care este *nesigur, poluează mediul, produce daune, riscă inutil oportunități de afaceri, sau are un impact negativ* din punct de vedere al societății. De asemenea, angajații companiei vor fi cu ochii pe performanța managerilor lor în această etapă, sprijinul angajaților fiind esențial privitor la deciziile de management de acceptare a riscului.

1.4. Gradul de manifestare a riscului

Riscurile care apar în fața luării unor decizii au grade de incertitudine diferite. În cazul analizării unui același sistem, se prefigurează un număr de riscuri, așezate pe diverse *paliere* ale sistemului. Din păcate, de cele mai multe ori, probabilitatea de manifestare a riscului crește odată cu importanța deciziilor. În aceste condiții, studiile și informațiile disponibile ar trebui să fie proporționale cu amplitudinea deciziilor ce urmează a fi luate. Și aici avem o inversă proporționalitate între decizie și informații, respectiv, cu cât decizia ce trebuie luată este mai importantă cu atât cantitatea și calitatea informației disponibile este mai puțin suficientă. Având în vedere variabilitatea sistemului și a factorilor exteriori care îl influențează, deciziile se iau în condițiile în care, de cele mai multe ori, datele premergătoare, în ceea ce privește managementul riscului, sunt *parțiale, globale și incerte*. Ca urmare, orice decizie importantă, chiar având un studiu prealabil bine documentat, presupune asumarea unui anumit risc. În cadrul oricărei decizii, problema nu este dacă riscul apare, ci de a determina cu aproximație mărimea acestui risc, de a găsi elemente de ameliorare și de a-ți asuma respectivul risc. În mod intuitiv, se poate aprecia că riscul este mai mare în anumite situații în raport cu altele, aceasta fiind doar o *apreciere calitativă*. Din punct de vedere cantitativ poate fi determinată probabilitatea de materializare a riscului, impactul/consecințele produse cât acesta se materializează, în aceste condiții decizia care urmează a fi luată fiind în cunoștință de cauză. Atât din punct de vedere calitativ cât și cantitativ, în fața unei decizii se relevă mai multe alternative, fiecare cu gradul ei de manifestare a riscului. De fiecare dată, varianta ce presupune câștigul cel mai mare este și cea mai riscantă. În cadrul managementului operațional al sistemelor, nu se operează, de regulă, cu varianta cea mai riscantă, decât în cadrul firmelor mai mici pentru care o eventuală pierdere nu ar conduce la un adevărat dezastru (financiar, uman, social, ecologic, etc.).

Gradul de incertitudine în cazul unei analize de risc este dat de acele riscuri care nu pot fi identificate la un moment dat, în timp ce *gradul de manifestare* a riscului este dat de riscurile identificate, a căror probabilitate și consecințe se pot cuantifica. Așa cum se poate constata din *figura 1.4*, avem riscuri inițiale care trebuie descrise și cărora trebuie să li se atribuie, pentru fiecare în parte, o probabilitate de realizare și o consecință în cazul manifestării, *pasul 1*.

Aceste riscuri pot fi reduse (ameliorate) pe baza introducerii unor elemente de siguranță. Cu noile valori calculate pentru probabilitate și consecințe se va face un **top al riscurilor**, de obicei în ordine descrescătoare, *pasul 2*. Este necesară și realizarea unei scheme grafice, de tip matrice de risc de exemplu, pentru a pune în evidență mai clar posibilitățile avute în calea unei decizii, *pasul 3*. În final, *pasul 4*, se face un tabel ce cuprinde și impactul fiecărui risc (impact = probabilitate x consecințe) descriindu-se, de asemenea, și acțiuni de ameliorare/atenuare a riscurilor probabile.

Riscurile inițiale sunt identificate pe baza unei evaluări primare, pe bază de brainstorming a echipei ce se ocupă cu implementarea managementului de risc. Toți cei implicați vor încerca să identifice respectivele riscuri, fie bazându-se pe experiența proprie fie pe studii anterioare a unor cazuri similare. Tot în cadrul în cadrul acestei echipe se vor cuantifica riscurile posibile pe baza severității și a probabilității de realizare a acestora. În general, atât probabilitatea cât și consecința sunt împărțite în cinci clase, așa cum se observă în matricea de risc din figura 1.4.

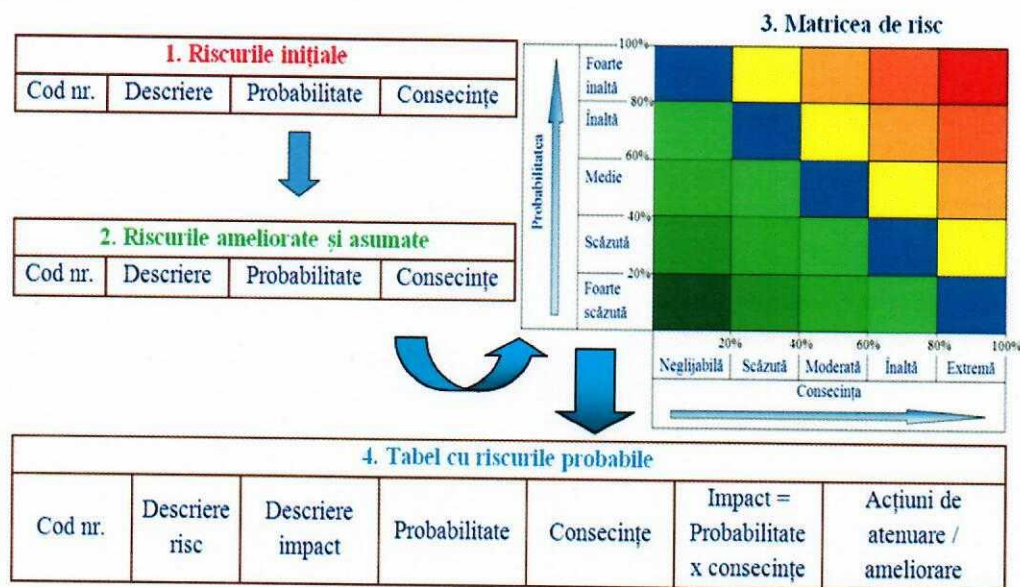


Fig. 1.4. Gradul de manifestare a riscului

Riscurile ameliorate sau raționalizate se referă la doi factori de clasare. În primul rând, pe diferite paliere, pot exista același tip de riscuri, cu aceeași manifestare, și, ca urmare, riscurile asemenea se reduc la unul singur. În al doilea rând, având în vedere instrumentele existente sau posibil a fi achiziționate în viitor, există posibilitatea de scădere, fie a probabilității de apariție fie a consecințelor. În aceste condiții, în tabelul al doilea din figura 1.4 se trec doar riscurile supuse raționalizării, având în vedere observațiile de mai sus.

Matricea de risc reprezintă o schematizare pe diferite nivele a impactului, cuprinzând probabilitățile și consecințele fiecărei acțiuni. Este evident faptul că, evenimentele aflate în zona cu roșu și zonele apropiate acestora au riscul cel mai mare, concretizat prin impact (probabilitatea x consecința). Această schematizare ilustrează modul în care sunt repartizate riscurile în funcție de impactul acestora. Pe de altă parte, clasificând riscurile în acest mod, se va ști asupra căror riscuri trebuie acționat în primul rând pentru ca rezultatul final să nu fie unul complet nefavorabil. Există instrumente, acțiuni, echipamente suplimentare, protecții, bariere, etc., ce pot fi utilizate astfel încât evenimentele aflate în zona roșie să fie trecute, cel puțin, în zona albastră. Dezideratul este, totuși, ca majoritatea covârșitoare a evenimentelor să fie trecute, după ameliorare, în zona verde.

Tabelul cu riscurile probabile cataloghează riscurile în funcție de importanța lor, în ordine descrescătoare. Aici sunt prezentate și codurile de identificare, o scurtă descriere a tipului de risc și a impactului acestuia precum și probabilitatea și consecința (consecințele) calculate sau determinate empiric. O analiză de acest tip ar fi insuficientă dacă nu s-ar prezenta și soluții de atenuare și ameliorare pentru a reduce gradul de risc, respectiv impactul pe care desfășurarea unui eveniment îl poate avea asupra sistemului analizat, atunci când riscurile nu pot fi prevenite complet. Pentru

fiecare risc se prezintă una sau mai multe acțiuni ce pot fi efectuate în vederea reducerii acestuia. În orice caz, implementarea elementelor de protecție împotriva manifestării riscului poate fi, uneori, extrem de costisitoare. De aici încolo intervine decizia managementului de a implementa complet, parțial sau deloc, instrumentele destinate manifestării plenare a riscului. Totuși, există și acțiuni simple ce pot fi implementate și care pot aduce beneficii substanțiale.

Pe de altă parte, trăim într-o lume a riscului și nu se poate progresa fără asumarea acestuia, dacă este posibil în mod cât mai rațional și în baza unor date și studii de prognoză întocmite de un corp de specialiști. În cele ce urmează se va analiza un mod de comportament considerat normal, cu judecăți fundamentate pe un set de informații bine sortate și clasificate de către manageri cu o pregătire temeinică în sfera lor de acțiune.

Unui *nivel normal de risc* îi corespunde un *nivel de inacțiune* din punctul de vedere al *acceptabilității* riscului. Peste acest nivel, gradul de acceptabilitate scade, deoarece riscul crește și se poate accepta doar dacă se planifică alternative strategice de diminuare al acestuia, în vederea ameliorării nivelului de risc. Deasupra nivelului de acțiune, nivelul riscului este foarte ridicat, fiind recomandabilă evitarea acestuia. În *figura 1.5* se încearcă o reprezentare intuitivă între mărimea riscului, corespunzând săgeții verticale cu orientare în sus, și gradul de acceptabilitate al acestuia reprezentată prin săgeata verticală orientată în jos. Se atrage atenția că nu există un nivel de acceptabilitate unic, amplitudinea sa depinzând de condițiile concrete ale fiecărui sistem și de atitudinea managerului față de risc.

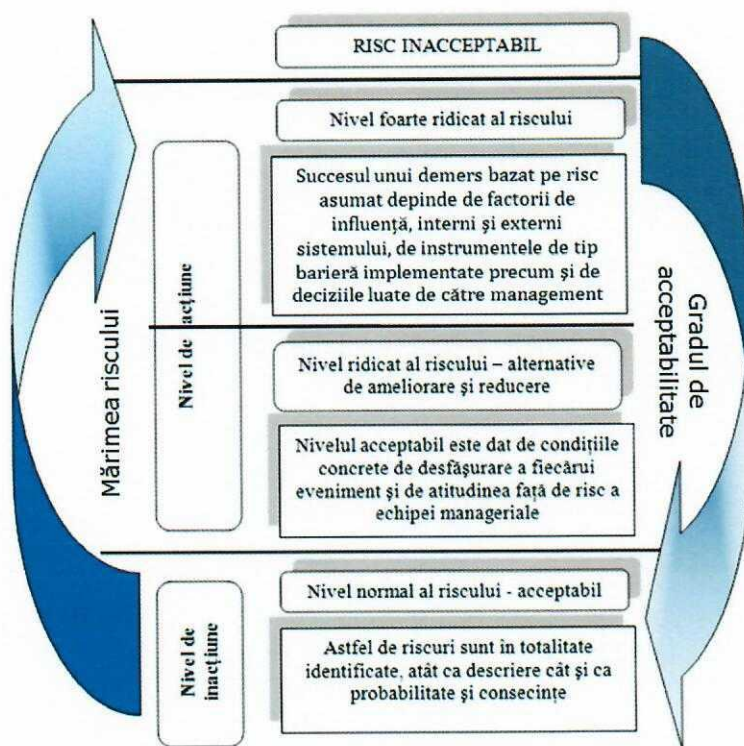


Fig. 1.5. Relația dintre mărimea riscului și gradul de acceptabilitate

Desigur, nu se pot cuantifica valoric aceste nivele pentru orice tip de sistem. Ceea ce se poate afirma cu certitudine este faptul că, înainte de a începe orice activitate se impune o identificare, o evaluare și o reducere/eliminare a riscurilor pe cât posibil, acceptate fiind doar acele riscuri care nu afectează, decât în mică măsură, activitatea firmei. Insuficienta cunoaștere a riscurilor potențiale,

evaluarea lor greșită și, mai ales, lipsa unor mijloace de protecție adecvate, vor afecta în mod direct rezultatul final al activității desfășurate. Cele mai multe riscuri pot fi identificate, cele mai importante dintre acestea fiind tratate cu deosebită atenție. Rămâne, însă, o categorie de riscuri identificate ce se vor exclude în mod voluntar din analiză (în general acestea sunt riscuri minore). Evident că vor exista și riscuri neidentificate, excluse involuntar din analiză. Din modul de punere a problemei rezultă, totuși, un grad ridicat de reflexivitate și de relativitate în chestiunea asumării diferitelor categorii de riscuri. Este discutabilă departajarea între riscuri identificate și neidentificate întrucât sunt multe pericole care trec pe lângă noi sau ne înconjoară, fără să le sesizăm. Ca urmare, ar trebui implementată o modalitate de apărare împotriva unor riscuri neidentificate, fie ele minore sau majore. Este foarte important, pentru evoluția ulterioară a evenimentelor, ca în categoria riscurilor neidentificate să nu rămână niciun risc major, care ar putea avea efecte distructive.

1.5. Surse și categorii de risc în Inginerie

Riscurile în inginerie pot proveni din cadrul unor surse diferite, cum ar fi: defecțiunile tehnice, erorile de operare, cedările, pericolele naturale, reaua-voință, etc. În general vorbind, orice activitate prezintă un anumit potențial de risc, reprezentând suma tuturor lucrurilor care ar putea merge greșit în cadrul desfășurării respectivei activități. Desigur, nu toate evenimentele care ar putea eșua sau la care s-ar putea produce cedarea, vor avea aceeași influență asupra probabilității finale de manifestare. În urma unor informații statistice privind riscurile, pot fi discutate, analizate și gestionate sursele de risc și cauzele acestora. Identificarea surselor de risc oferă o bază pentru examinarea sistematică a evenimentelor variabile în timp, pentru a descoperi circumstanțele care au impact asupra capacității sistemului de a-și îndeplini obiectivele. Sursele de risc sunt atât **interne**, cât și **externe** evenimentului studiat. Pot fi identificate surse **suplimentare** de risc, pe măsură ce sistemul avansează. Stabilirea categoriilor de risc prevede un mecanism de colectare și organizare a riscurilor, precum și asigurarea unui control adecvat și o atenție deosebită acordată de către de management pentru acele riscuri care pot avea consecințe mult mai grave asupra îndeplinirii obiectivelor sistemului.

În mod obișnuit **sursele de risc** pot fi următoarele:

- cerințe inițiale neclare;
- proiectare defectuoasă;
- cerințele de calitate impuse de către concurență care afectează atât selecția soluției ce va fi utilizată cât și proiectarea;
- tehnologia ce trebuie implementată nu este disponibilă sau este învechită;
- estimări nerealiste privind desfășurarea în timp, precum și alocarea de resurse insuficiente;
- personal și competențe necorespunzătoare;
- probleme de cost sau de finanțare;
- capacitatea de subcontractant este incertă sau inadecvată;
- capacitatea de furnizor este incertă sau inadecvată;
- comunicarea inadecvată cu clienții actuali sau potențiali sau cu reprezentanții acestora;
- întreruperi în continuitatea operațiunilor;
- experiență minimă în domeniul analizei de risc;
- constrângerile privind reglementările de securitate, siguranță, mediu.

Multe dintre aceste surse de risc sunt adesea acceptate fără o planificare adecvată. Planurile de reducere a riscurilor trebuie puse în aplicare la începutul proiectului, astfel, reducându-se posibilitatea manifestării acestora sau a consecințelor apariției lor.

Identificarea categoriilor de risc ajută la consolidarea viitoare a activităților în vederea reducerii riscurilor. **Categoriile de risc** pot fi considerate următoarele:

- fazele prin care trebuie să treacă sistemul până la realizarea sa fără eșec/cedare (cerințe inițiale impuse, proiectare, producție, testare și evaluare, livrare);
- tipuri de procese utilizate;
- tipuri de produse utilizate;
- riscul de management (riscuri contractuale, riscurile bugetare, riscuri de program, riscuri de resurse);
- riscurile de performanță tehnică (riscurile legate de atribute de calitate, riscuri de suportabilitate).

Riscurile sunt caracterizate prin clasă (A, B, C...), categorie (1, 2, 3...) și atribut (a, b, c...), iar categoriile de risc rezultă din această caracterizare, așa cum se poate constata din *tabelul 1.3*. Se poate constata că, din fiecare categorie sau atribut se pot extrage categorii de risc asociate.

Tab. 1.3. Domenii de risc

A. Produs ingineresc	B. Mediu de dezvoltare	C. Constrângeri și restricții
<i>1. Cerințe</i> a. Stabilitate b. Fiabilitate c. Claritate d. Validitate e. Fezabilitate f. Precedent g. Predictibilitate <i>1. Proiectare</i> a. Funcționalitate b. Dificultate c. Interfețe d. Performanță e. Testare f. Hardware g. Software <i>2. Cod și unitate de testare</i> a. Fezabilitate b. Testare c. Implementare <i>3. Integrare și testare</i> a. Mediu înconjurător	<i>1. Dezvoltare proces</i> a. Controlul procesului b. Controlul produsului c. Familiaritate d. Adecvare e. Formalizare <i>2. Dezvoltare sistem</i> a. Capacitate b. Adecvare c. Întreținere d. Suport tehnic ulterior e. Funcționalitate f. Încredere g. Livrare h. Utilizare <i>3. Procesul de management</i> a. Planificare b. Organizare sistem c. Experiență managerială d. Interfețe sistem e. Analiză sistem f. Decizii g. Urmărire și gestionare	<i>1. Resurse</i> a. Financiare b. Umane c. Timp d. Instrumente e. Capacități f. Analiză și control <i>2. Contract</i> a. Tip de contract b. Restricții c. Formulări d. Interdicții e. Limitări în timp f. Legislație <i>3. Interfețe program</i> a. Cumpărător b. Contractor asociati c. Subcontractori d. Prim-contractor e. Management corporatist f. Vânzător g. Politici

b. Produs c. Sistem 4. Factori de siguranță și întreținere a. Mentenanță b. Siguranță c. Fiabilitate d. Securitate e. Factor uman f. Specificații	evenimente 4. Metode de management a. Monitorizare b. Asigurarea calității c. Configurare management 5. Lucru în echipă a. Atitudinea privind calitatea b. Cooperare c. Comunicare	
---	--	--

Categoriile și sursele de risc se pot regăsi și în schema prezentată în figura 1.6.

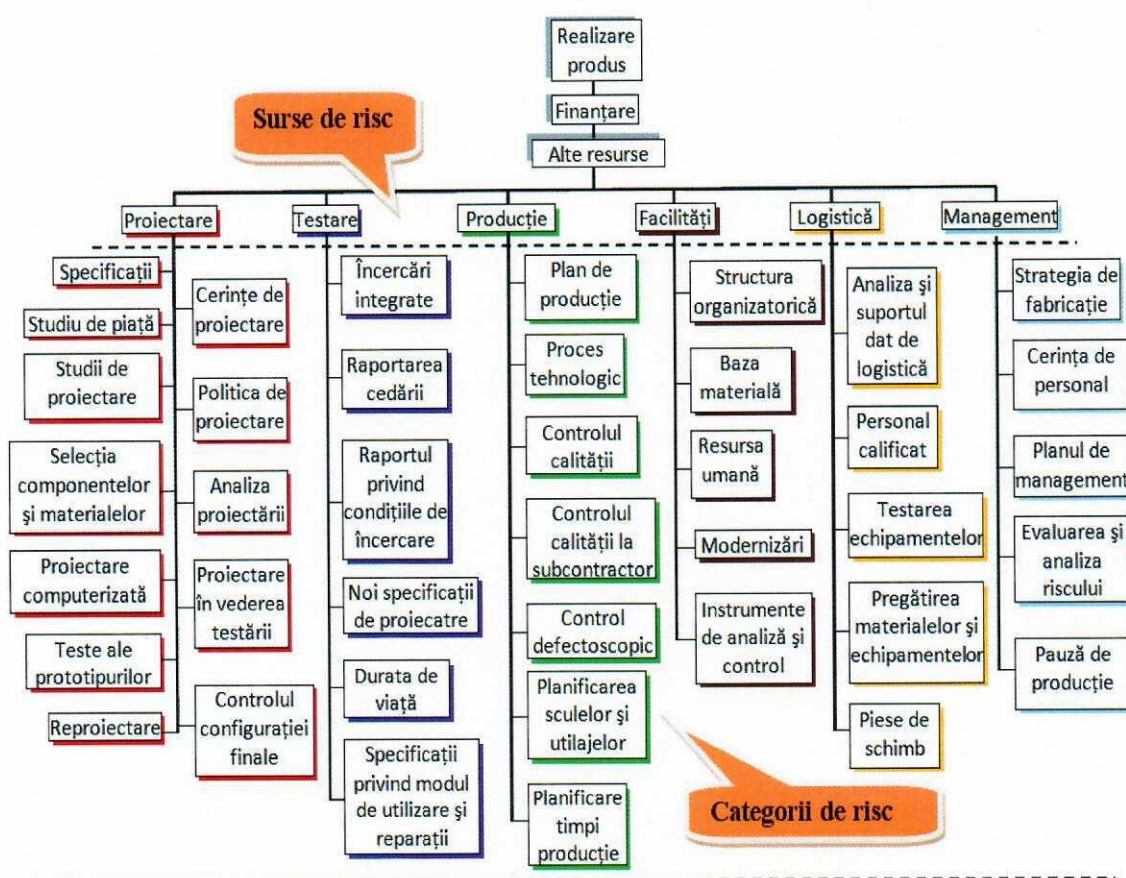


Fig. 1.6. Categoriile și surse de risc reieșite din activități

1.6. Componente ale managementului riscului și reacția la risc

1.6.1. Componentele managementului riscului

Managementul riscului este o activitate organizată și planificată, ce face parte din cadrul managementului general, fiind subordonată acestuia. Managementului general se bazează pe patru componente distincte, figura 1.7:

- managementul strategic sau al activităților de conducere;
- managementul operațional ce cuprinde activitățile necesare realizării produsului.;
- managementul riscului;
- suportul logistic.

Managementul strategic constă din acele activități care au drept scop, desfășurarea în condiții de eficiență a activității productive sau de servicii, stabilirea misiunii și a obiectivelor firmei, punerea la punct a planurilor strategice și desemnarea modalităților de evaluare a progreselor firmei în drumul său spre realizarea misiunii. El este chemat să răspundă la întrebarea: **care este scopul existenței firmei noastre?**

Managementul operațional definește acțiunile concrete care trebuie întreprinse în vederea atingerii obiectivelor organizaționale, cuprinzând activitățile decizionale curente sau de perspectivă, corecțiile, adaptabilitățile, răspunderile ierarhice, corecțiile parametrice și de structură, relațiile interumane, testele de calitate, sondajele, planificarea și evaluarea relațiilor de afaceri. El este chemat să răspundă la întrebarea: **cum își atinge întreprinderea scopurile sale?**

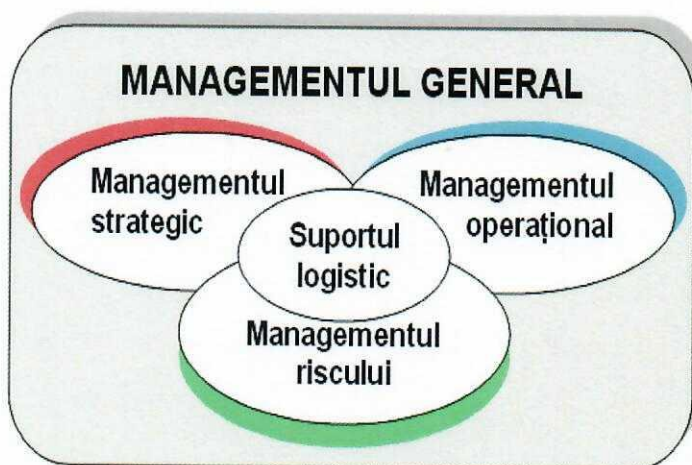


Fig. 1.7. Modelul managementului general: strategic, operațional și al riscului

Managementul riscului constă din toate acele activități ce conduc ca deciziile luate să fie în cadrul unui **risc determinat**, în cunoștință de cauză cu asumarea impactului și a consecințelor ce derivă din execuția unor decizii de risc. Managementul riscului facilitează îndeplinirea obiectivelor și misiunii unei organizații, în condițiile în care se cunoaște riscul și se încearcă limitarea influențelor negative a factorilor interni, externi și adiționali, așezându-se bariere în calea unor astfel de influențe.

Suportul logistic reprezintă baza comună a activităților operaționale, cuprinzând resursele de transport, umane, financiare, informaționale (documentații, baze de date) și informatice (rețele de calculatoare și comunicații etc.), precum și mediul ambiant propice activității și producției, de sprijin și protecție, precum și de asigurare a funcționalităților particulare și de ansamblu.

Fiecare dintre aceste componente conține elemente comune, dar și elemente specifice pentru managementul riscului, acestea fiind cele de control, de supraveghere ori de intervenție în cazul producerii evenimentelor nedorite, pentru diminuarea acțiunii factorilor distructivi sau a consecințelor acestora. Deși managementul riscului are acțiuni și responsabilități specifice (în consecință și structuri corespunzătoare), el nu poate fi (și nici nu trebuie să fie) despărțit de

managementul general, așa cum nici securitatea proceselor (siguranța și fiabilitatea) nu poate fi considerată independentă de calitate [3].

Într-o lume absolut sigură, managementul strategic și cel operațional ar fi suficiente pentru orice întreprindere. Organizația ar trebui doar să-și fixeze obiectivele, să decidă asupra căilor de urmat pentru atingerea lor și să acționeze în consecință. În condițiile în care incertitudinea și riscul fac parte din existența noastră, devine necesară, pentru orice organizație, adăugarea celei de-a treia funcții: managementul riscului.

1.6.2. Reacția la risc

Organizația trebuie să ia în calcul două tipuri de control al riscului: activ și pasiv. Se cunoaște faptul că, în orice activitate există riscuri și că acestea pot fi evitate, prevenite sau diminuate. Acest lucru se poate face pe baza cunoașterii potențialului de risc și a căilor și metodelor de îmbunătățire a activității în vederea controlului riscului.

Reacția la risc este faza de acțiune din cadrul managementului riscului, în care se încearcă să se elimine, să se reducă și/sau să se repartizeze riscurile. Din punct de vedere al reacției la risc precum și al nivelului de dezvoltare a managementului riscurilor, o organizație utilizează una dintre strategiile descrise mai jos, [4].

Strategia I: “ignorarea riscului”. În acest stadiu, preocupările pentru identificarea riscurilor și anticiparea eventualelor evenimente nefavorabile nu sunt văzute cu ochi buni în organizație. Angajații vor evita să aducă veștile proaste la cunoștința superiorilor, deoarece știu că reacția acestora va fi negativă. Adesea, responsabilii din firmă au o idee foarte vagă cu privire la pericolele care o amenință, ca și asupra probabilităților de producere a acestora. Preocuparea pentru riscuri își face loc numai *atunci când acestea se materializează*, ducând la apariția adevăratelor probleme.

Strategia a II-a: “eliminarea riscului”. Decizia de eliminarea a riscurilor are scopul de a reduce la zero probabilitatea de apariție a acestora. Echipa managerială sau întreprinzătorul poate: să nu inițieze o anumită tranzacție sau afacere; să stabilească un preț foarte mare, care să acopere riscurile; să condiționeze oferta, etc. Cele mai multe dintre opțiunile care elimină riscul tind să scoată organizația din afaceri. O organizație cu aversiune prea mare față de risc nu va supraviețui mult timp și ar trebui să-și investească capitalul în altă parte.

Strategia a III-a: “diminuarea riscului”. Se poate realiza printr-o serie de instrumente care sunt descrise în cele ce urmează.

Programarea. Dacă riscurile sunt legate de termenul de execuție, programarea științifică a activităților cu ajutorul graficelor de tip rețea poate diminua riscurile în limite rezonabile.

Instruirea. Multe riscuri sunt legate de securitatea muncii. Aceasta influențează productivitatea și calitatea lucrărilor. Prin programe de instruire și conștientizare în domeniul securității muncii se poate reduce probabilitatea producerii accidentelor și efectul acestora.

Reproiectarea. Riscurile pot fi de multe ori diminuate printr-o **reproiectare judicioasă** a produselor fabricate, a echipelor de muncă, a fluxurilor de materiale, a folosirii echipamentelor și a forței de muncă, etc. În această etapă, managementul este preocupat de tehnicile de diminuare a impactului riscurilor asupra organizației. Managerii încearcă să identifice sectoarele în care ar putea apărea probleme, să evalueze posibilele consecințe și să ia măsuri vizând reducerea probabilității de

apariție a acestora sau “amortizarea” impactului lor nefast asupra întreprinderii. Alte instrumentele utilizate pentru managementul riscului sunt legate de prevenirea daunelor, finanțarea pierderilor și planurile de criză.

Strategia a IV-a: “prevenirea riscului”. Acest stadiu marchează, pe de o parte, trecerea de la un management al riscului reactiv, la unul pro-activ, iar pe de altă parte, trecerea de la concepția privind managementul riscului ca activitate a unui singur om, la o concepție privind managementul riscului ca activitate de echipă. Managementul riscului este înțeles, în acest stadiu, ca un proces complex și dinamic ce nu poate fi realizat de către o singură persoană. Toate departamentele din firmă au responsabilități în ceea ce privește gestiunea riscurilor. Responsabilii din organizație au acumulat experiență în *identificarea și controlul diverselor categorii de riscuri*, dar au mai puține abilități în ceea ce privește cuantificarea riscurilor.

Strategia a V-a: “anticiparea riscului”. În această etapă are loc trecerea de la evaluarea subiectivă la măsurarea cantitativă a riscurilor. Cu ajutorul instrumentelor oferite de teoria probabilităților și statistică, managerul de risc are posibilitatea de a prezice dimensiunea pierderilor viitoare și probabilitatea de apariție a lor, ierarhizând riscurile în funcție de impactul lor asupra organizației și alocând, eficient, resursele necesare pre-întâmpinării acestora.

Strategia a VI-a: “recunoașterea oportunităților”. În acest stadiu, membrii organizației ajung la conștientizarea faptului că, acolo unde există un risc, într-un fel sau altul există și o oportunitate de câștig. Existența riscului este percepută ca o șansă de a *depăși* performanțele propuse prin planuri și/sau de a economisi resursele organizației.

Strategia a VII-a: “transferul și repartizarea riscului”. Repartizarea riscurilor este, de asemenea, un instrument performant de management al riscului. Aceasta se referă la părțile care vor accepta o parte sau întreaga responsabilitate pentru consecințele riscului. Repartizarea riscului trebuie să se facă ținându-se seama de comportamentul față de risc al diferitelor organizații implicate. În acest sens, regula generală de repartizare a riscului este de a se alocă riscul părții care poate să îl suporte și să îl controleze cel mai bine. Strategia de contractare constituie un mecanism esențial în repartizarea riscului. Riscurile pe care și le asumă firma sunt, în mod obișnuit, formalizate prin contracte cu beneficiarii. Riscurile legate de resursele umane sunt acoperite, cel puțin parțial, prin încheierea contractelor colective și individuale de muncă. În majoritatea cazurilor, riscurile legate de materiale și echipamente pot fi transferate furnizorilor acestora, prin garanțiile pe care aceștia le oferă. Unele riscuri pot fi transferate prin încheierea unor contracte de asigurare. Compania de asigurări își asumă o parte din riscuri în schimbul unui preț (prima de asigurare). Dacă riscul se produce în condițiile specificate prin contractul de asigurare, asiguratorul va rambursa partea asigurată sau toate pierderile suferite datorită riscului. Dacă riscul nu apare, asiguratorul păstrează prima de asigurare. Desigur, prima de asigurare nu trebuie să fie prea mare, pentru că, respectivele costuri trec în prețul produsului, care, dacă devine prea mare nu poate fi vândut ușor, apărând un risc suplimentar.

Strategia a VIII-a: monitorizarea riscului”. În acest stadiu este necesară, în primul rând, cunoașterea tuturor **riscurilor majore** în vederea monitorizării acestora. Prevenirea apariției

riscurilor se face cu ajutorul unor instrumente fizice sau manageriale. În acest context, se are în vedere descoperirea vulnerabilităților, a variabilității sistemului analizat și a factorilor de influență.

În *tabelul 1.4* [5] sunt prezentate câteva strategii de control al riscurilor pe baza unor decizii luate în cunoștință de cauză.

Un proces formalizat de management al riscului va da rezultate pozitive numai dacă ia în considerare toate aspectele acestuia. Performanța, în procesul de management al riscului, este dată de calitatea managerilor și a personalului implicat, și anume, de cea mai slabă verigă din cadrul său. Managerii firmei trebuie să se asigure că echipa care realizează managementul riscului este competentă și să găsească o cale de mijloc între tehnicizarea excesivă a procesului și acțiunea pe bază de intuiție.

Tab. 1.4. Strategii de control al riscurilor

Nr. crt.	Decizie de:	Consecințe
1	Ignorarea riscului	Nu este instituit un management al riscului și nu se iau decizii decât atunci când eșecul se produce
2	Eliminarea riscului	Se iau măsuri excesive de control al riscului ce pot conduce la renunțare
3	Diminuarea riscului	Riscul se acceptă și se iau măsuri eficiente în vederea reducerii acestuia
4	Prevenirea riscului	Se lucrează în echipă cu tehnici și tactici de gestiune a riscurilor posibile
5	Anticiparea riscului	Cu ajutorul instrumentelor ce țin de Ingineria riscului se trece de la analiza calitativă la cea cantitativă a riscului
6	Recunoașterea oportunităților	Oportunitățile vin în același timp cu riscurile, ca urmare, căutarea riscului poate aduce beneficii
7	Transferul și repartizarea riscului	Pentru diminuarea riscului propriu se regăsesc instrumente de transfer și repartizare: la subcontractori, prin asigurări, etc.
8	Monitorizarea riscului	Se are în vedere monitorizarea schimbărilor la nivel de risc al activităților și al companiei precum și a măsurilor de control

1.7. Factori care influențează managementul riscului

Riscul este influențat de mai mulți factori ce manifestă variabilitate, în consecință este greu de determinat cantitativ și, ca urmare, greu de gestionat sau ameliorat. Pentru determinarea cantitativă s-au dezvoltat modele logico-matematice ale unor procese complexe, greu de monitorizat altfel. Odată cu dezvoltarea tehnicii de calcul, aceste dezvoltări s-au realizat, atât în zona de calcul cât și în zona interfețelor grafice. Astfel, utilizarea instrumentelor de tip matrice de risc, diagrama arborelui de defectare, diagrama arborelui de evenimente sau diagrama de tip lanțuri Markov, sunt acum mult mai ușor de realizat, devenind și intuitive. Mai întâi, aceste tipuri de instrumente au fost realizate pe baza evenimentelor negative (disfuncțiunilor, cedărilor, eșecurilor). Acestea se referă la determinarea probabilității de cedare sau eșec și la frecvența cu care se produce cedarea/eșecul. Pe

baza determinării cantitative se iau apoi măsuri de ameliorare prin instrumente și bariere specifice, în vederea prevenirii evenimentelor nedorite. Managementul riscului poate fi afectat de mai multe probleme, care pot constitui, fie elemente de analiză, fie obiective concrete. În *figura 1.8* sunt prezentați factorii de influență negativă asupra posibilităților de realizare a managementului riscului [6]. În legătură cu factorii de influență asupra managementului riscului putem avea percepții diferite. Aceștia, aflându-se pe paliere diferite ale cunoașterii, sunt dificil de evaluat, eliminat sau ameliorat. *Necunoașterea problematicei* în domeniul analizei și evaluării riscului ține de specializarea și cunoștințele celor care sunt puși să organizeze activitatea de management al riscurilor. În general, acest tip de specializare nu este una larg cunoscută, ea fiind realizată, de obicei, de specialiști în domeniul de activitate al organizației, fiind familiarizați, mai mult sau mai puțin, cu problematica activităților în ceea ce privește managementul riscului.

Specialiștii, puși să se ocupe de partea de analiză a riscului, se confruntă, de cele mai multe ori, cu *lipsa informațiilor* care să conducă la deducerea probabilităților și a frecvențelor de realizare a unui eveniment (nedorit). În diverse domenii de activitate sunt informații statistice ce pot fi utilizate în vederea completării unei scheme sau diagrame de analiză [7].



Fig. 1.8. Factorii care influențează negativ managementul riscului

Atunci când există *prea multe informații*, care depășesc puterea de analiză a operatorilor, există „șansa” de a se renunța la unele dintre acestea. Problema este că, printre informațiile neutilizate pot exista și unele valoroase, care să conducă la însăși esența problemei de analiză și care pot avea o influență foarte mare asupra rezultatului final.

Pot fi și *informații false*, furnizate în mod conștient sau nu, fie în zona scriptică de acces, fie atunci când acestea se obțin pe bază de convorbire, chestionar, etc. În aceste condiții, trebuie să existe posibilitatea de analiză și evaluare a tuturor informațiilor, pentru a putea decela între cele adevărate și cele false.

O altă influență negativă asupra rezultatului unei analize de risc o constituie și *complexitatea* sistemului analizat. În aceste condiții, vor exista multe date ce nu vor fi utilizate la analiza finală, iar acest lucru poate conduce la un rezultat eronat. Este evident că, în cazul unui sistem complex, acesta va fi modelat astfel încât să se ajungă la unul mai simplu și mai suplu care să fie ușor de analizat. Așa cum se știe, orice model va conduce, prin definiția lui, la apariția de erori. Atunci când se lucrează cu foarte multe date în cadrul unui sistem complex, există tendința ca unele dintre acestea să fie introduse în mod aleatoriu în cadrul diagramelor/schemelor utilizate pentru analiză.

Este destul de dificil să poată fi cunoscute toate aspectele particulare ale producerii evenimentelor nedorite sau ale hazardului. În aceste condiții, în mod sigur vor exista informații care nu vor fi luate în considerare. Pentru predicția apariției și a consecințelor evenimentelor nedorite, este bine să se facă o analiză cât mai completă, atât a factorilor generali cât și a celor particulari. Trebuie însă avut în vedere că, cu cât aspectele particulare sunt mai numeroase, cu atât predicția este mai complicată și mai greu de explicat într-o formă rațională.

Un alt factor de influență îl constituie *nehotărârea* managerilor de a acționa, fie în sensul începerii unei analize de risc, fie de a decide asupra utilizării instrumentelor necesare ameliorării riscului. Pe de altă parte, implementarea managementului de risc implică anumite costuri. Se merge, uneori, pe ideea că, dacă riscul nu se manifestă, acele costuri sunt suplimentare și puteau fi evitate. Se spune că, uneori, este bine să iei orice decizie, fie aceasta mai proastă, decât să nu iei nici o decizie.

Variabilitatea și incertitudinea apar în cadrul oricărui sistem și trebuie tratate pe baza instrumentelor de risc. În cadrul analizei de risc sunt instrumente probabilistice care țin cont de variația în timp a sistemelor. În ceea ce privește incertitudinea, acesteia i se pot ameliora consecințele tot pe baza adecvării unor instrumente specifice [8].

Există cazuri în care, din diferite motive (*lipsa finanțării, necunoaștere, dezinteres*) specialiștii care se ocupă cu managementul riscului nu au la îndemână toate instrumentele ce trebuie utilizate în vederea efectuării unei analize de risc. Substituirea unor instrumente cu altele mai rudimentare, poate conduce la concluzii greșite privind probabilitatea de manifestare a riscului.

De foarte multe ori, managerii se confruntă cu lipsa finanțării, atunci când trebuie implementat un management de risc care să fie dotat atât cu resursa umană specializată cât și cu instrumentele necesare unui astfel de demers. Uneori, se preferă să nu se ia nici o decizie, mergându-se pe ideea că poate riscul nu se va manifesta și atunci s-au făcut reduceri de cheltuieli. De-a lungul timpului s-a constatat faptul că „riscul asumat” costă mult mai puțin decât hazardul.

1.8. Studiu de caz: managementul riscului în inginerie și producție

Prezentul studiu de caz prezintă posibilitățile de aprovizionare cu materiale, materii prime, etc., către clienți, fiind probabilă o anumită variație a calității a acestora [9]. Problemele de mediu și de competitivitate sunt de interes special în acest context, având în vedere faptul că impactul lor potențial negativ poate fi considerabil. Factorii importanți ce trebuie luați în considerare sunt: cumpărare / produs / proces / proceduri, urmate îndeaproape de spații / resurse umane / planificare / performanță (element esențial).

Factori de risc: grupul (a): premize - produs – achiziție

Problemele identificate includ :

- Premize: capacitate și aspect; depozitarea materiilor prime de anvergură / a subsansamblelor / a produselor finite; accesul pentru vehicule și posibilitatea de livrare; sisteme de securitate pentru restricționarea accesului vizitatorilor; distanța de la principalele rute de transport, în special pentru export și materiale provenite din afara țării.

- Produs: nevoia de coerență a standardelor de calitate, după specificația clientului; costul materialelor de ambalare și cerințele de reglementare; reducerea la minimum a utilizării de

ambalaje de protecție (doar pentru cazurile esențiale); preocuparea majoră cu privire la răspunderea producătorului pentru eliminarea produselor învechite; nevoia de optimizare a timpului de învățare a utilizării mașinii descrisă prin caietul de sarcini.

- Achiziții: creșterea costurilor și furnizarea redusă de materii prime; utilizarea internetului pentru a găsi noi surse regenerabile de materiale; nevoia de utilaje moderne asistate de calculator.

Factori de risc: grupul (b): resursa umană – proceduri – protecție

Problemele identificate includ :

- Resursa umană: mai puține sarcini care necesită muncă necalificată și mai multe abilități de lucru pe calculator; baze locale de calificare și formare pe utilaje specifice; vârsta mai ridicată a forței de muncă, luată în considerare în timp – poate să nu constituie o problemă în prezent, dar poate deveni una în aproximativ cinci ani; necesitatea de a aduce manageri din afară pentru unele părți ale sistemului.

- Proceduri: proceduri de urgență pentru cazul în care trebuie evacuată fabrica; în special în cazul unui potențial de scurgeri chimice periculoase și impact pe scară largă asupra comunității locale; procedurile de siguranță pentru utilizarea echipamentelor grele; monitorizarea nivelului de zgomot; depozitare și manipulare a fierului vechi și valorificarea ulterioară a acestuia.

- Protecție: rămân importante zonele tradiționale de protecție a sănătății și securității în muncă, cu accent pe monitorizare; securitatea datelor de proiectare și a informațiilor privind procesul de fabricație; necesitatea de a ne asigura că procedurile existente sunt verificate și îmbunătățite și funcționează în mod adecvat.

Factori de risc: grupul (c): proces – performanță

Probleme identificate includ :

- Proces: capacitatea instalațiilor și echipamentelor existente de a respecta specificațiile curente și viitoare ale clienților, care devin tot mai sofisticate; utilizarea judicioasă, fără pierderi energetice, însoțită de nevoia de a menține mediu de lucru mai curat – impunându-se întreținerea sau înlocuirea sistemului de ventilație.

- Performanță: așteptările clienților de aderare la politicile globale de calitate și mediu; auditarea periodică pentru acreditare și aliniere la standardele ISO; stabilirea și monitorizarea anuală a obiectivelor individuale de performanță stabilite, până la nivel de conducere; cursuri de perfecționare prevăzute atunci când este posibil, dar în mod obligatoriu atunci când lucrătorii trebuie să-și dezvolte noi aptitudini pentru producție; monitorizarea programului de investiții.

Factori de risc: de grupul (d): planificare - politică

Probleme identificate includ:

- Planificare: necesitatea de a asigura o comunicare corespunzătoare între planificare/producție/vânzări/departamentele de achiziție pentru a evita schimbările de programare în ultimul moment (și costurile ulterioare aferente); continuarea programului de înlocuire a echipamentelor; abilități de planificare și recrutare necesare pentru a se potrivi modificărilor aduse procesului de producție. Politică: egalitatea de șanse, cu extinderea recrutării în zone netradiționale; introducerea și monitorizarea politicii de reabilitare; punerea accentului mai degrabă pe creșterea valorii produsului decât pe creșterea volumului.

Tabelul 1.5 și figura 1.9 prezintă totalul punctajelor între 1 și 100 alocat pentru fiecare din cei zece factori de risc identificați și explicați anterior, în scopul de a identifica prioritățile potențiale pentru activitatea de inginerie prezentate în cadrul acestui studiu de caz.

Tab. 1.5. punctajele alocate pentru fiecare din cei zece factori de risc

Premize	Produs	Achiziții	Resursa umană	Proceduri	Protecție	Procese	Performanță	Planificare	Politică
45	80	70	75	78	85	65	60	50	75

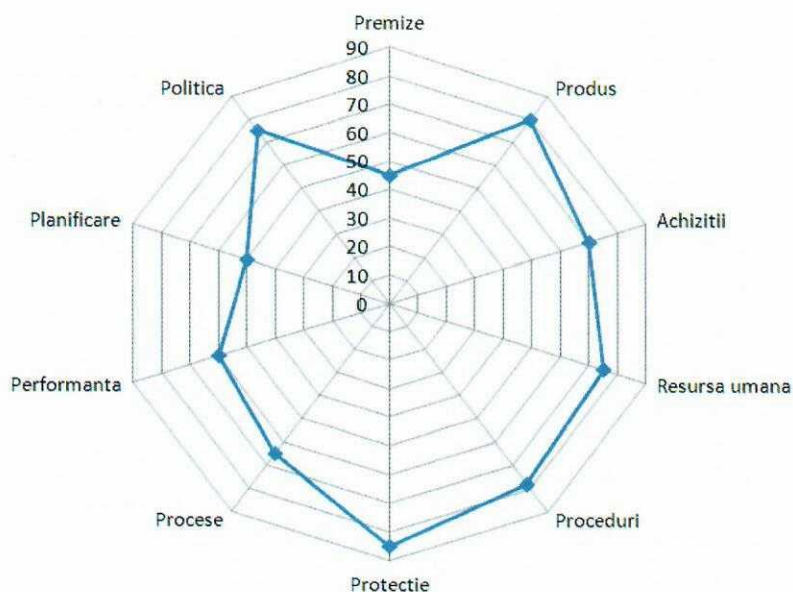


Fig. 1.9. Harta desfășurată a indicatorilor de risc

Impactul potențial al factorilor de risc identificați

Tabelul 1.6, figura 1.10 și figura 1.11 prezintă un sistem de notare pentru cinci factori de risc identificați pentru acest studiu de caz.

Tab. 1.6. Sistemul de notare pentru factorii de risc identificați

Factorul de risc	Mod de afectare	Severitate - impact	Probabilitate - impact	Rapiditate	Posibila recuperare	Costuri
Utilizarea materialelor sigure	5	6	7	6	5	7
Modul de cedare	5	7	6	6	7	9
Eliminarea deșeurilor periculoase	6	8	6	6	8	8
Securitatea mijloacelor de producție	6	8	7	7	6	9
Reclamațiile clienților	3	5	5	5	6	7

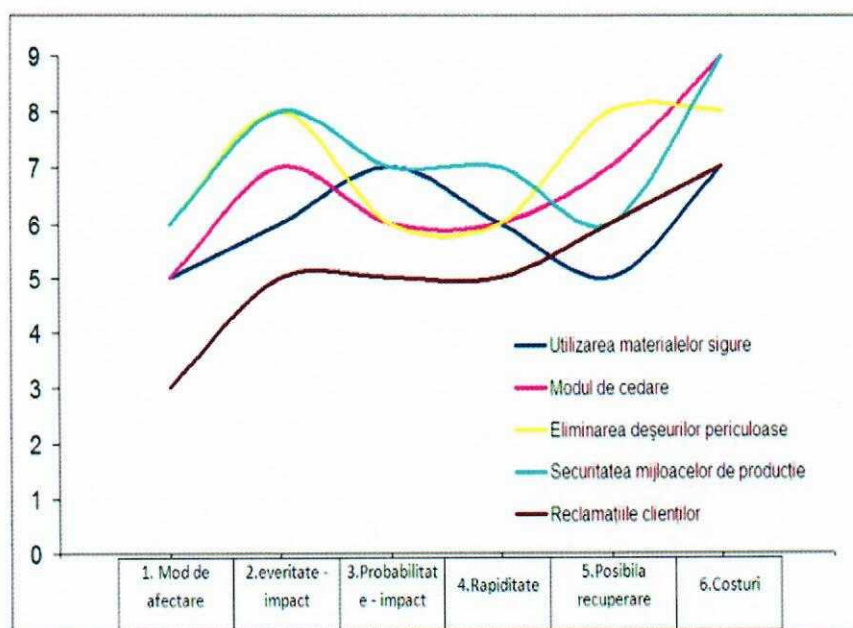


Fig. 1.10. Impactul potențial al factorilor de risc

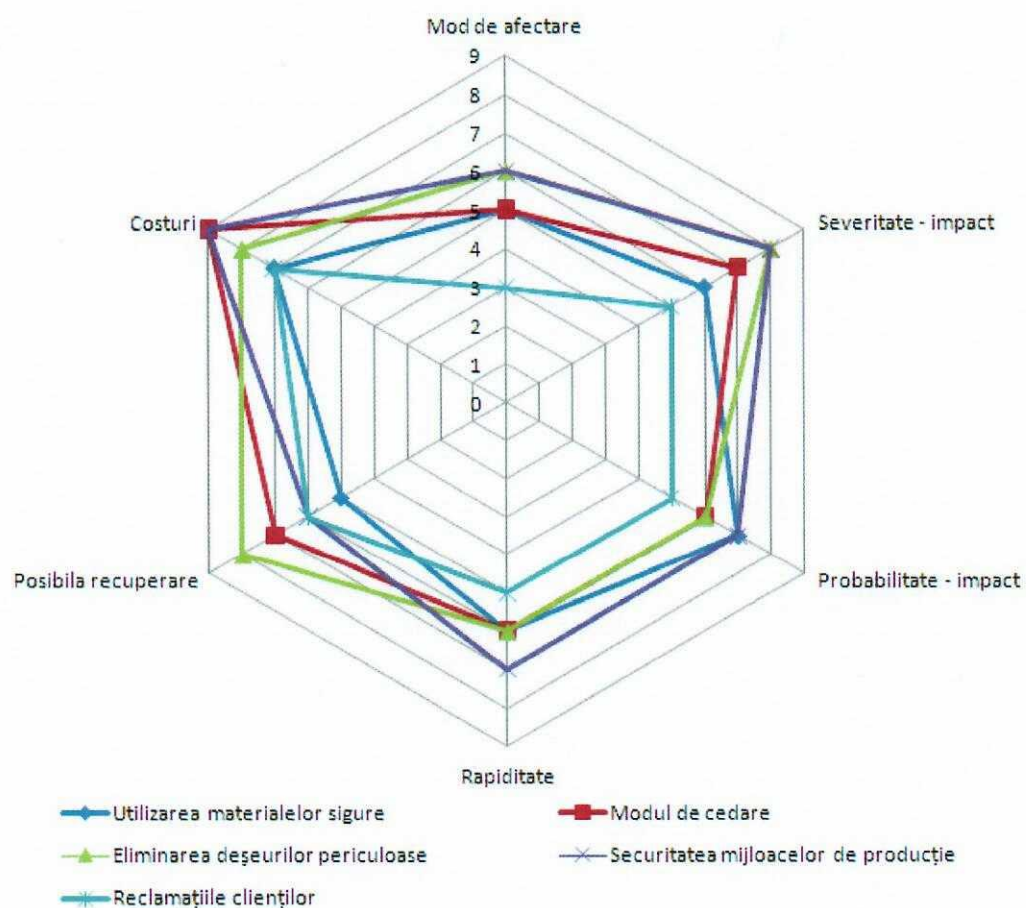


Fig. 1.11. Harta desfășurată a indicatorilor de risc pentru factorii de risc identificați

BIBLIOGRAFIE

- [1] Gh. ILIE, Securitatea proceselor și calitatea vieții - Managementul riscului, <http://www.revista-alarma.ro/PDD/Managementul%20riscului.PDD>, 2001.
- [2] P. R. Amyotte, D. J. McCutcheon, Risk Management – an Area of Knowledge For All Engineers, The Research Committee of the Canadian Council of Professional Engineers, October 2006.
- [3] M. H. Faber, Risk and Safety in Civil Engineering, Lecture Notes, 2007.
- [4] ***, A Risk Management Standard, AIRMIC, ALARM, IRM: 2002.
- [5] N. Bârsan-Pipu, I. Popescu, Managementul riscului, Concepte metode aplicații, Editura Universității „Transilvania” din Brașov, 2003.
- [6] M. H. Faber, Risk Assessment in Engineering, Principles, System Representation & Risk Criteria JCSS, Joint Committee on Structural Safety, June, 2008.
- [7] I. Tofan, M. Gontineac, D. Rusu, Teoria riscurilor și aplicații, Editura Alexandru Myller, Iași, 2011.
- [8] M. A. Maes, M. H. Faber, Utility Preferences, and Risk Perception in Engineering Decision Making, Joint Committee of Structural Safety, 2008.
- [9] N. Stacey, K. Simpson, Integrating risk concepts into undergraduate engineering courses, University of Liverpool for the Health and Safety Executive, 2009.

CAPITOLUL 2. ELEMENTE GENERALE DE TEORIA RISCULUI

-
- 2.1. Clasificarea modelelor de risc
 - 2.2. Riscul în domeniul Ingineriei
 - 2.3. Caracteristicile variabilelor aleatoare
 - 2.4. Funcțiile de distribuție și densitatea de probabilitate
 - 2.5. Momentele variabilelor aleatoare
 - 2.6. Procese aleatoare
 - 2.7. Construcția modelului probabilistic în Ingineria riscului
 - 2.8. Selecția funcției de distribuție de probabilitate
 - 2.9. Estimarea parametrilor de distribuție
-

2.1. Clasificarea modelelor de risc

Riscul reprezintă un eveniment sau o serie de evenimente ce conduc la schimbări negative în ceea ce privește starea sistemelor aflate în anumite circumstanțe, influențate fiind de factori exteriori sau interiori. Abaterea de la normalitatea descrisă prin caietul de sarcini (de exemplu) se produce în timp și este însoțită de diferite daune/cedări/eșecuri. Această definiție nu este suficient de relevantă, dar permite o *abordare matematică* generală, în vederea modelării oricărei situații de risc. Din diferite motive, nu există suficiente informații în legătură cu multe dintre sistemele analizate. În orice caz, toate sistemele supuse unor riscuri au o caracteristică unică: *nu este cunoscută cu certitudine evoluția lor în timp*. Astfel, întotdeauna va exista mai mult de o posibilitate de evoluție care poate apărea și se poate dezvolta. Această caracteristică poate fi înglobată în cadrul teoriei probabilității care să aibă în centrul său evenimente riscante. Comunitatea științifică a avansat teoria probabilității ca o structură formală ce poate descrie și reprezenta evenimente cu risc.

Așa cum s-a constatat mai sus, riscul este legat de apariția:

- unui **eveniment incert A**, care se numește eveniment de risc și care are **probabilitatea P** de realizare;
- unei **familii F de evenimente**, fiind descrisă luând în considerare situația de risc, și caracterizată prin două valori:
 - **timpul (T)** până la care se produce evenimentul și
 - **mărimea (X)** a daunelor/consecințelor negative.

Există diferite tipuri de incertitudini ce se pot manifesta în cadrul dezvoltării unui sistem. În consecință, la abordarea de tip probabilistic, incertitudinea este caracterizată prin posibilitatea *observării în timp* a fenomenului considerat (cel puțin în principiu), în aceleași condiții de manifestare. În acest caz, statistica este utilizată ca instrument principal pentru estimarea probabilității. Prin urmare, din punct de vedere matematic, în vederea rezolvării situațiilor ce implică riscuri pot fi luate în considerare diferite metode:

- probabilistice;

- subiective (metode de predicții subiective);
- metode expert (metode de teorie utilitară);
- analiză structurală, arbore de defectare, arbore de evenimente, lanțuri Markov, matrice de risc, etc.

În cele ce urmează ne-am limitat, în mare parte, la aspectele și metodele de studiu probabilistice ale riscului. Din acest punct de vedere, riscul este descris ca o componentă cu două elemente, sau secvență de două elemente, aflată într-un spațiu probabilistic. Trebuie luate în considerare și anumite particularități de analiză a riscului cum ar fi:

- unicitatea oricărei situații de risc;
- lanțul lung de cauze, care trebuie luat în considerare în cadrul oricărei analize a situației de risc;
- lipsa de date statistice necesare.

Toate aceste circumstanțe au condus la necesitatea de a construi, pentru orice model de risc, un spațiu propriu de probabilitate care este, de obicei, realizat în termenii construcției unui arbore de risc. Problema principală a unei analize de risc constă în apariția unor evenimente cu evoluție incertă, riscantă și aleatoare. Există două posibile abordări pentru modelarea fenomenelor aleatoare:

- teoretică (analitică);
- statistică.
-

Abordarea teoretică prezintă un grad mai ridicat de siguranță, având aplicații limitate, deoarece se bazează pe analiza detaliată a unui model complet, utilizat pentru fenomenul considerat, lucru ce nu este întotdeauna posibil.

Abordarea statistică este universală dar nu întotdeauna practică. Acest lucru apare din cauza necesității colectării și elaborării unui număr suficient de mare de informații. Acestea nu sunt întotdeauna accesibile din cauza costurilor și a faptului că multe dintre evenimentele de risc sunt foarte rare.

Prin urmare, în teoria riscului lucrăm cu subiectivități reieșite din probabilitățile conjunctive și analizele de specialitate. Deficiența unei astfel de abordări constă tocmai în subiectivitatea ei.

În mod obișnuit, modelele de risc se împart în:

- modele de risc individual;
- modele de risc colectiv.

Un risc individual este legat de un singur eveniment de risc, care e posibil să facă parte dintr-o familie mai largă de evenimente, în timp ce un model de risc colectiv are legătură cu o secvență de evenimente de risc, variabilă în timp și supusă oricând la eșec/cedare/distrugere. În ceea ce privește riscurile individuale, ele se pot împărți în:

- riscuri simple;
- riscuri complexe.

Un risc simplu este caracterizat prin posibilitatea de a evalua sau estima, în mod direct, caracteristicile probabilistice. *Un risc complex* este caracterizat de mai multe evenimente diferite și evaluate cantitativ pe baza unor date numerice. Riscurile complexe sunt reprezentate ca o înlănțuire de componente, fiecare dintre acestea putând fi descrisă ca riscuri individuale simple.

În terminologia matematică acestea sunt descrise astfel:

- *Un risc individual* [1] este un **spațiu probabilistic** de tip (Ω, F, P) , (Ω - spațiu, F - funcție de distribuție, P - probabilitate), în care sunt definite două componente (T, X) :

- prima componentă, T , reprezintă timpul până la apariția evenimentului de risc, începând de la un moment fixat;
- a doua componentă, X , denotă un prejudiciu/eșec/cedare/consecință, pornind de la acest eveniment de risc.

- Un risc colectiv este un **spațiu probabilistic** de tip (Ω, F, P) , pentru care este definită o secvență de două componente $\{(T_n, X_n): n = 0, 1, \dots\}$

- prima componentă, T_n , reprezintă timpul până la apariția evenimentului de risc A_n cu numărul n , începând de la un moment fixat;
- cea de-a doua componentă, X_n , indică daunele/consecințele ce decurg din manifestarea respectivelor evenimente de risc.

Prin urmare, construcția și studiul unui model probabilistic de risc, pentru diferite situații de risc, presupune abordarea unuia dintre aspectele teoriei matematice privitoare la risc.

2.2. Riscul în domeniul Ingineriei

În domeniul Ingineriei, deciziile sunt afectate de incertitudini și variabilitate, și, ca urmare, de riscuri. Astfel, în domenii precum Analiza Cantitativă a Riscurilor (Quantitative Risk Analysis - QRA) și Analiza Fiabilității Structurale (Structural Reliability Analysis - SRA) se acceptă faptul că incertitudinile trebuie interpretate și diferențiate în ceea ce privește tipul și originea lor. În acest fel, din cauza variabilității naturale inerente, a devenit obișnuit de a diferenția între *incertitudinile date de model și cele furnizate de statistică*. Primele menționate au de cele mai multe ori o desfășurare aleatoare (de tip 1), iar cele din urmă au o desfășurare epistemică (sau de tip 2). În cadrul teoriei probabilității de tip Bayesian, aplicată în domeniul Ingineriei, trebuie să fie luate în considerare toate tipurile predominante de incertitudini.

Performanța unui sistem ingineresc, componentă, structură sau instalație, poate fi, de obicei, modelată în termeni fizici și matematici în legătură cu relații de calcul mai mult sau mai puțin empirice. Pentru anumite date privind parametrii de model, performanța sistemului considerat se poate determina pe baza modelului analizat și asumat. Variabilele aleatoare de bază sunt definite ca parametri ce conțin incertitudini, chiar de la începutul modelului considerat. Variabilele aleatoare de bază trebuie să fie în măsură să reprezinte toate tipurile de incertitudini care sunt incluse în analiză. Principalele tipuri de incertitudini care trebuie luate în considerare, sunt: incertitudinea parametrilor fizici, incertitudinea statistică și incertitudinea legată de modelul propriu-zis.

Incetitudinea parametrilor fizici este asociată cu solicitarea și geometria structurii, cu proprietățile de material și calitatea reparațiilor, etc.

Incetitudinile statistice apar din cauza informației statistice incomplete, de exemplu datorită numărului mic de încercări efectuate pe materiale.

În final, trebuie să se țină cont de *incetitudinea asociată cu descrierile matematice idealizate*, utilizate pentru a aproxima comportamentul fizic, real, al structurii.

Orice **eveniment** A (incert), prezintă o **probabilitate de manifestare** $P(A)$, astfel încât $0 \leq P(A) \leq 1$. Aceasta include cazul special al evenimentului sigur, unde $P(A) = 1$. Deoarece evenimentele riscante și cele sigure sunt definite pentru a se exclude reciproc, rezultă că evenimentele riscante sunt caracterizate prin $P(A) < 1$. Rezultatul unui eveniment riscant nu este cunoscut dinainte. Un anumit eveniment poate fi mai mult sau mai puțin riscant în funcție de

capacitatea de a măsura, de a controla, de a obține și procesa informații, toate acestea fiind legate și de costul informațiilor. Un cost mare al preluării și prelucrării informațiilor introduce riscuri suplimentare – produsul poate ajunge la un preț prea mare.

Metodele moderne de analiză a fiabilității și riscurilor, permit o reprezentare foarte generală a acestor incertitudini și riscuri, de la domenii cu variabile aleatoare staționare în timp până la procese stohastice non-staționare. În cele mai multe cazuri, este suficient de a modela evenimentele ce prezintă risc, cu ajutorul *funcțiilor de distribuție cumulative* care conțin *variabile aleatoare* și *parametri de distribuție* estimați pe baza *informațiilor statistice*. Prin urmare, în cele ce urmează se face o descriere a caracteristicilor variabile aleatoare.

2.3. Caracteristicile variabilelor aleatoare

O variabilă aleatoare, care poate lua orice valoare în timp, este numită *variabilă aleatoare continuă*. Probabilitatea ca o astfel de variabilă aleatoare să aibă o valoare strictă, este zero. Probabilitatea ca o variabilă aleatoare continuă, X , să fie mai mică sau egală cu o valoare specificată x , este dată de *funcția de distribuție cumulativă* [1]:

$$F_X(x, t) = P(X \leq x, T \leq t) \quad (2.1)$$

în care T este perioada de timp în raport cu t , ce reprezintă momentul de timp prestabilit.

În general, se notează cu majuscule (X) un eveniment variabil iar cu litere mici (x) un rezultat fix al unei variabile aleatoare. *Figura 2.1a* ilustrează un exemplu de funcție cu distribuție cumulativă continuă [2].

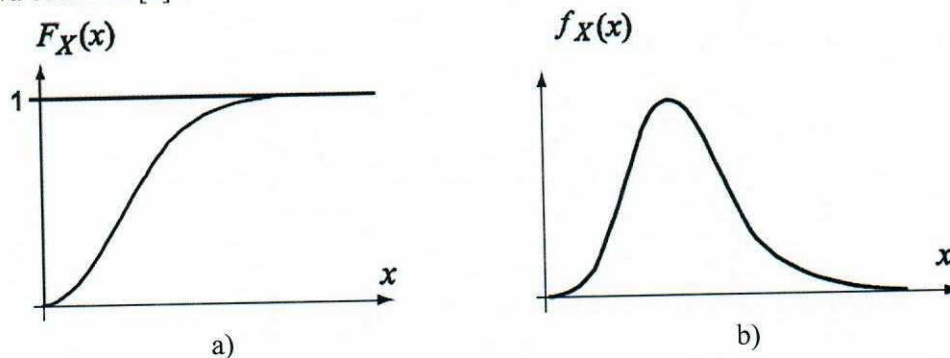


Fig. 2.1. a) Funcție de distribuție cumulativă continuă și b) funcția de densitate de probabilitate pentru o variabilă aleatoare continuă

Pentru variabilele aleatoare continue, *funcția de densitate de probabilitate*, *figura 2.1b*, este dată de relația:

$$f_X(x) = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \quad (2.2)$$

Probabilitatea în intervalul $[x; x+dx]$ unde dx tinde spre zero, este dată de:

$$P(x \in [x; x + dx]) = f_X(x)dx \quad (2.3)$$

Variabilele aleatoare, ce prezintă posibilitatea de eșantionare numărabilă (finită sau infinită), sunt denumite *variabile aleatoare discrete*. Pentru acestea, funcția de distribuție cumulativă este dată de relația:

$$P_X(x) = \sum_{x_i \leq x} p_X(x_i) \quad (2.4)$$

O funcție de distribuție cumulativă discretă precum și funcția de densitate de probabilitate sunt ilustrate în figura 2.2.

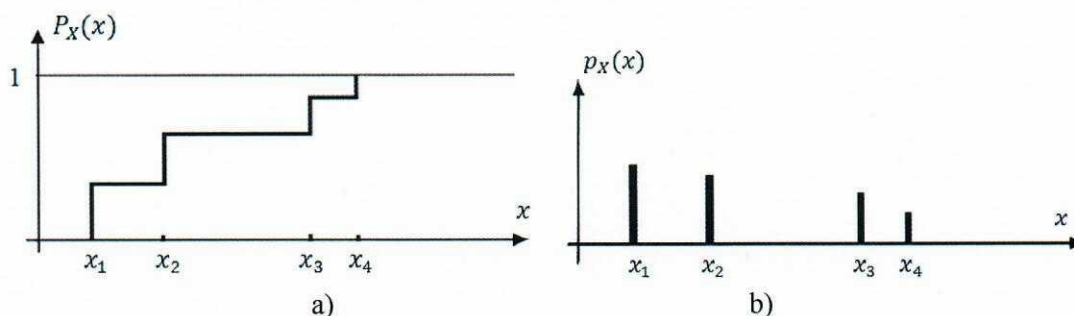


Fig. 2.2. Funcția de distribuție cumulativă discretă (a) și funcția de densitate de probabilitate (b) pentru o variabilă aleatoare discretă [3]

În cazul în care riscul este posibil să se manifeste într-un anumit interval de timp, în loc de evenimentul de risc cu apariția în perioada T , este mai convenabil să se ia în considerare probabilitatea $P(A)$ de manifestare a riscului, în legătură cu evenimentele A , precum și o funcție condițională $G(x; A)$, în raport cu daunele produse de A :

$$G(x; A) = P\{X \leq x | A\} \quad \text{cu } G(0; A) = P\{X = 0 | A\}$$

În acest caz, variația privitoare la mărimea daunelor prezintă un salt la zero, pentru că nu există daune/cedări/eșec/consecințe negative, dacă evenimentul de risc nu are loc:

$$F_X(x) = 1 - P(A) + P(A)G(X; A)$$

În general, este mai convenabil să se măsoare riscul pe baza distribuției în timp a evenimentului de risc $F_T(t) = F(t)$ precum și a funcției condiționale $G(x; t)$:

$$G(x; t) = P\{X \leq x | T = t\}.$$

Așadar, prin unirea celor două distribuții se obține:

$$F(x, t) = \int_0^t G(x, u) dF_T(u)$$

În cel mai simplu caz, se poate presupune că cedarea se poate produce independent de timp:

$$G(x; u) = G(x) = F_X(x) \quad \text{și} \quad F(x; t) = G(x)F(t)$$

În multe cazuri practice această ipoteză este valabilă, cu observația că daunele produse la un anumit moment trebuie actualizate cu o anumită rată de actualizare s , și, prin urmare, prejudiciul viitor este calculat cu valoarea sa actuală, dată de [1]:

$$\hat{X} = e^{-sT} X$$

De exemplu, pentru a acoperi prejudiciul produs de evenimentul X după timpul T , este suficient de a depune în bancă suma $\hat{X}$ cu dobânda $s\%$. Prin urmare, funcția de distribuție cumulativă ce descrie prejudiciu la valoarea actuală este:

$$\hat{F}_x(x) = P\{\hat{X} \leq x\} = \int_0^\infty P\{Xe^{-sT} \leq x\} dF_T(t) = \int_0^\infty F_X(xe^{st}) dF_T(t)$$

Vom presupune că variabilele aleatoare T și X sunt independente, din care vor rezulta funcțiile lor de distribuție cumulative, notate cu $F(\cdot)$ și respectiv $G(\cdot)$. În ingineria riscului avem relația:

$$R(t) = 1 - F_T(t) = P\{T > t\}$$

în care $R(t)$ este numită **funcția de fiabilitate** care va fi definită în capitolul 8. Pentru distribuții continue, variațiile celor două funcții sunt prezentate în figura 2.3, [4].

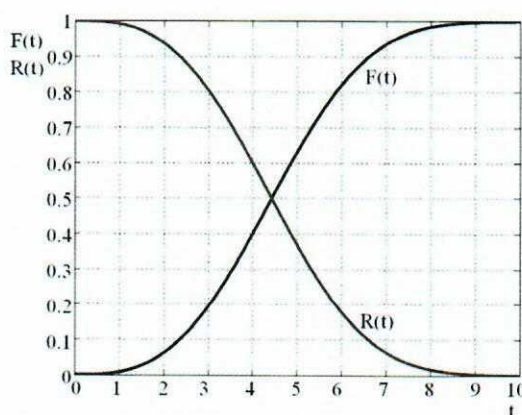


Fig. 2.3. Funcțiile de distribuție cumulativă în raport cu timpul: funcția de risc și funcția de fiabilitate

2.4. Funcțiile de distribuție și densitatea de probabilitate

Pentru variabilele aleatoare observate în mod continuu, este mai convenabil să se modeleze distribuțiile cu ajutorul funcției densității de probabilitate:

$$f(t) = F'(t) \text{ și } g(x) = G'(x)$$

Prin urmare, funcțiile de distribuție cumulative pot fi reprezentate în termenii funcției densității de probabilitate în forma:

$$F(t) = \int_0^t f(u) du \text{ și } G(x) = \int_0^x g(v) dv$$

În cele mai multe cazuri practice, variabilele *timp* și *deteriorare* sunt măsurate în unități discrete. În acest caz, un model adecvat de distribuție discretă este:

$$f_k = P\{T = k\} \text{ și } g_d = P\{X = d\}$$

unde k reprezintă numărul de unități de timp iar d reprezintă numărul de unități de deteriorare.

Având în vedere că măsurătorile, în ceea ce privește valoarea unor variabile aleatoare, se realizează la un moment fixat, este foarte important să se cunoască distribuția condiționată în raport cu timpul rezidual la care apare evenimentul de risc, fiind dat timpul t de la începutul procesului evolutiv. Ca urmare, rezultă probabilitatea condiționată pentru care evenimentul de risc se produce în intervalul $(t, t+x)$, având în vedere că acesta nu are loc înainte de timpul t :

$$F_T(x, t) = P\{T \leq t + x | T > t\} = \frac{P\{t < T < t + x\}}{P\{T > t\}} = \frac{F(t + x) - F(t)}{1 - F(t)} = \frac{R(t) - R(t + x)}{R(t)}$$

Pentru valori mici ale lui x se poate obține:

$$F(x, t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} x = \lambda(t)x$$

în care funcția $\lambda(t)$ este definită prin:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

și reprezintă *densitatea de probabilitate* condiționată, instantanee, astfel încât riscul să apară la timpul t de la începutul procesului numită și *rata de cedare*. Următoarea integrală este denumită *funcția de defectare sau de risc*:

$$\Lambda(t) = \int_0^t \frac{f(u)}{1 - F(u)} du = -\ln(1 - F(t))$$

Observație. În cadrul teoriei fiabilității și în Ingineria riscului, funcția $\lambda(t)$, este cunoscută sub numele de *rată de defectare*.

Cu ajutorul funcției *rată de risc*, [5], se poate determina probabilitatea de apariție a evenimentului de risc într-un interval de timp Δt , la timpul t după începutul procesului. În *figura 2.4* se prezintă variația ratei de risc (defectare), care este sub forma unei căzi de baie.

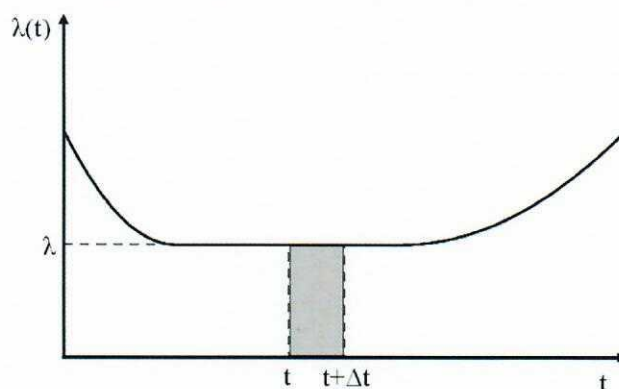


Fig. 2.4. Rata de risc (defectare)

Relația pentru $\Lambda(t)$ permite reprezentarea, în raport cu timpul, a funcției de distribuție cumulative și a funcției de risc, în raport cu rata de risc (defectare):

$$1 - F(t) = R(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(u)du\right\} = \exp\{-\Lambda(t)\}$$

În mod analog, pentru probabilitatea de apariție a riscului în intervalul de timp $(t, t + x)$ se poate scrie:

$$F(x: t) = P\{T \leq t + x | T > t\} = \exp\left\{-\int_t^{t+x} \lambda(u)du\right\}$$

Generarea funcțiilor este un instrument des utilizat pentru calculul diferitelor mărimi și caracteristici legate de risc.

Definiție:

Să presupunem că G este o distribuție a unei variabile aleatoare X . În aceste condiții vom avea:

$$\tilde{g}(s) = Ee^{sX} = \int_0^\infty e^{sX} Gdx = \int_0^\infty e^{sX} g(x)dx$$

care este denumită *funcție generatoare de moment* a variabilei aleatoare X , cu funcția sa de distribuție cumulativă $G(x)$.

Definiție

Fie $\{p_k, k=0,1,\dots\}$ o distribuție a valorilor întregi pentru variabilele aleatoare N . Atunci funcția:

$$p(z) = Ez^N = \sum_{k=0}^{\infty} z^k p_k$$

este denumită *funcție generatoare de probabilitate* pentru variabilele aleatoare N , și/sau distribuția corespunzătoare $\{p_k, k=0,1,\dots\}$.

2.5. Momentele variabilelor aleatoare

Distribuțiile de probabilitate pot fi definite în termenii momentelor sau parametrilor acestora. De multe ori, funcțiile de distribuție cumulative și funcțiile de densitate de probabilitate sunt scrise ca $F_X(x, p)$, respectiv $f_X(x, p)$ pentru a indica parametrii p (sau momentele) funcțiilor definite. *Momentul* m_i al variabilei aleatoare continue este definit prin, [6]:

$$m_i = \int_{-\infty}^{\infty} x^i f_X(x)dx \quad (2.5)$$

și pentru variabila aleatoare discretă:

$$m_i = \sum_{j=1}^n x_j^i p_X(x_j) \quad (2.6)$$

Valoarea medie (sau valoarea așteptată) a variabilelor aleatoare, continue sau discrete, X , este definită în acord cu primul moment:

$$\mu_X = E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx \quad (2.7)$$

unde $E[\cdot]$ reprezintă *operatorul ce furnizează valoarea așteptată*.

În mod identic, *varianța* σ_X^2 , este descrisă de al *doilea moment central* pentru variabile aleatoare continue, de relația:

$$\sigma_X^2 = \text{Div}[X] = E[(X - \mu_X)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_X)^2 f_X(x) dx \quad (2.8)$$

și pentru variabile aleatoare discrete:

$$\sigma_X^2 = \text{Div}[X] = \sum_{j=1}^n (x_j - \mu_X)^2 p_X(x_j) \quad (2.9)$$

unde $\text{Div}[X]$ reprezintă divergența lui X .

Raportul între *deviația standard*, σ_X , și *valoarea așteptată*, μ_X a variabilei aleatoare X , se notează ca fiind coeficientul de variație, $\text{CoV}[X]$, și este dat de relația:

$$\text{CoV}[X] = \frac{\sigma_X}{\mu_X} \quad (2.10)$$

Deviația standard (σ) a unui set de date(X), ce conține N înregistrări și având *valoarea medie* μ_X , se calculează cu următoarea relație:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum [X(n) - \mu_X]^2} = \sqrt{\sigma_X^2}$$

unde:

- $n = \{1 \dots N\}$;
- μ_X - valoarea medie a setului de date X ;
- σ_X^2 - valoarea varianței.

Coeficientul de variație reprezintă un descriptor util în ceea ce privește descrierea variabilității unei variabile aleatoare în jurul unei valori așteptate.

În *tabelul 2.1* se regăsește o selecție a funcțiilor de distribuție în raport cu momentele și parametrii lor de distribuție.

În cele ce urmează se va face o scurtă descriere a funcțiilor normală și lognormală.

Distribuția normală

Distribuția normală se aplică frecvent în probleme practice pentru modelarea probabilistică a fenomenelor incerte care provin ca urmare a unui efect cumulativ al mai multor contribuții incerte. Distribuția normală are proprietatea că, o combinație liniară S , a n variabile aleatoare normal distribuite, X_i , $i=1, 2, \dots, n$, și care este dată de relația, [7]:

$$S = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i$$

este, de asemenea, normal distribuită.

Tab. 2.1. Distribuții de probabilitate

Tipul distribuției / lege de variație	Parametri	Momente
Uniformă , $a \leq x \leq b$, $f_X(x) = \frac{1}{b-a}$, $F_X(x) = \frac{x-a}{b-a}$	a, b	$\mu = \frac{a+b}{2}$, $\sigma = \frac{b-a}{\sqrt{12}}$
Normală , $f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$ $F_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right) dt$	$\mu, \sigma > 0$	μ, σ
Lognormală , $x > \varepsilon$, $f_X(x) = \frac{1}{(x-\varepsilon)\xi\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x-\varepsilon)-\lambda}{\xi}\right)^2\right)$ $F_X(x) = \Phi\left(\frac{\ln(x-\varepsilon)-\lambda}{\xi}\right)$	λ $\xi > 0$ ε	$\mu = \varepsilon + \exp\left(\lambda + \frac{\xi^2}{2}\right)$ $\sigma = \exp\left(\lambda + \frac{\xi^2}{2}\right) \sqrt{\exp(\xi^2) - 1}$
Exponențială , $x \geq 0$, $f_X(x) = \lambda \exp(-\lambda(x-\varepsilon))$ $F_X(x) = 1 - \exp(-\lambda(x-\varepsilon))$	ε , $\lambda > 0$	$\mu = \varepsilon + \frac{1}{\lambda}$ $\sigma = \frac{1}{\lambda}$
Gamma , $x \geq 0$, $f_X(x) = \frac{b^p}{\Gamma(p)} \exp(-bx) x^{p-1}$ $F_X(x) = \frac{\Gamma(bx, p)}{\Gamma(p)}$	$p > 0$, $b > 0$	$\mu = \frac{p}{b}$ $\sigma = \frac{\sqrt{p}}{b}$

Se spune că distribuția este închisă în raport cu factorii de sumare. O variantă specială a acestui tip de distribuție, o reprezintă distribuția normală standard. O variabilă aleatoare Y , standardizată (**redușă sau scalată în originea axelor**) a fost transformată astfel încât are o valoare așteptată egală cu zero și o variație egală cu 1, și poate fi definită prin:

$$Y = \frac{X - \mu_x}{\sigma_x}$$

în care:

- X este variabila aleatoare;
- μ_x reprezintă *valoarea medie* (sau valoarea așteptată) a variabilei aleatoare;
- σ_x este *deviația standard*.

Dacă variabila aleatoare X , urmărește și distribuția normală a variabilei aleatoare Y , X este o distribuție normală standard. În figura 2.5 este ilustrat procesul de standardizare.

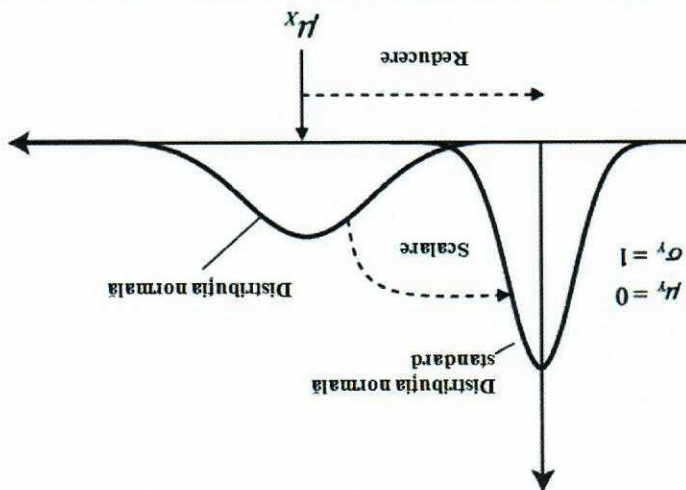


Fig. 2.5. Ilustrarea relației dintre o variabilă aleatoare normal distribuită și o variabilă aleatoare normală standard distribuită.

Este o practică obișnuită de a desemna funcția de distribuție cumulativă pentru distribuția normală standard prin (x) și funcția de densitate corespunzătoare prin $-(x)$. Aceste funcții sunt, în general, disponibile în pachete software, cum ar fi MS Excel și Matlab.

Distribuția Lognormală

O variabilă aleatoare Y are o distribuție log-normală în cazul în care variabila $Z = \ln(Y)$ este normal distribuită [8]. Astfel, rezultă că, dacă un fenomen incert se poate presupune că provine de la un efect multiplicativ de mai multe contribuții incerte, atunci, distribuția de probabilitate pentru respectivul fenomen se poate presupune a fi distribuția log-normal.

Distribuția log-normală are proprietatea că, în cazul în care:

$$P = \prod_{i=1}^n Y_i^{\lambda_i}$$

și Y_i sunt variabile aleatoare independente log-normală cu parametri λ_i , ξ_i și $\varepsilon_i=0$, prezentați în tabelul 2.1, atunci și P este log-normală cu parametri:

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

$$\xi_p^2 = \sum_{i=1}^n \xi_i^2$$

Proprietăți ale operatorului de așteptare

Operațiunea de așteptare posedă următoarele proprietăți:

$$E[c] = c$$

$$E[cX] = cE[X]$$

$$E[a + bX] = a + bE[X]$$

$$E[g_1(X) + g_2(X)] = E[g_1(X)] + E[g_2(X)]$$

unde a , b și c sunt constante iar X este variabilă aleatoare.

Din ultima ecuație se deduce că așteptarea, ca și diferențierea sau integrarea, este o operație liniară. Această proprietate de liniaritate este utilă deoarece poate fi utilizată, de exemplu, pentru a găsi următoarea relație pentru varianța unei variabile aleatoare X :

$$\begin{aligned} Var[X] &= E[(X - \mu_x)^2] = E(X^2 + \mu_x^2 - 2\mu_x X) = \\ \mu_x^2 + E(X^2) - 2\mu_x E(X) &= \mu_x^2 + E(X^2) - 2\mu_x^2 = E(X^2) - \mu_x^2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Prin aplicarea relației (2.11), pot fi deduse următoarele proprietăți ale operatorului de varianță $Var[\cdot]$:

$$\begin{aligned} Var[c] &= 0 \\ Var[cX] &= c^2 Var[X] \\ Var[a + bX] &= b^2 Var[X] \end{aligned} \quad (2.12)$$

unde a , b și c sunt constante iar X este variabila aleatoare.

Din ecuația (2.11) se observă că, în general, $E[g(X)] \neq g[E(X)]$. Pentru funcții convexe $g(x)$, se poate demonstra că este valabilă următoarea inegalitate (inegalitatea lui Jensen):

$$E[g(X)] \geq g(E[X]) \quad (2.13)$$

unde avem semnul egal dacă $g(X)$ este liniar.

Dacă distribuția cumulativă și funcția de densitate sunt definite prin parametri comuni, este posibil să se deducă una din cealaltă.

Vectori aleatori și momente de legătură

Dacă $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$ este un vector n -dimensional de variabile aleatoare continue, se consideră funcția comună de distribuție cumulativă ca fiind dată de:

$$F_X(x) = P(X_1 \leq x_1 \cap X_2 \leq x_2 \cap \dots \cap X_n \leq x_n)$$

iar funcția de densitate de probabilitate comună este:

$$f_X(x) = \frac{\partial^n}{\partial x_1 \partial x_2 \dots \partial x_n} F(x)$$

Covarianța $C_{X_i X_j}$ între X_i și X_j este definită de:

$$C_{X_i X_j} = E[(X_i - \mu_{X_i})(X_j - \mu_{X_j})] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - \mu_{X_i})(x_j - \mu_{X_j}) f_{X_i X_j}(x_i, x_j) dx_i dx_j \quad (2.14)$$

denumindu-se și momentul central comun între variabilele X_i și X_j .

Covarianța exprimă dependența dintre două variabile. Este evident că $C_{X_i X_i} = Var[X_i]$. Pe baza covarianței, coeficientul de corelație este definit prin:

$$\rho_{X_i X_j} = \frac{C_{X_i X_j}}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}}$$

Se poate constata că $\rho_{X_i X_j} = 1$. Coeficienții de corelație pot lua valori numai în intervalul $[-1, 1]$.

Un coeficient de corelație negativ între două variabile aleatoare presupune că, dacă rezultatul uneia dintre variabile este mare, în comparație cu valoarea sa medie, rezultatul celeilalte variabile este probabil să fie mic, în comparație cu valoarea medie. Un coeficient de corelație pozitiv între cele două variabile presupune că, în cazul în care rezultatul unei variabile este mare în comparație cu valoarea sa medie, rezultatul celeilalte variabile este, de asemenea, susceptibil de a fi mare în comparație cu valoarea sa medie. Dacă două variabile sunt independente, coeficientul lor de corelație este zero și funcția de densitate comună este produsul funcțiilor de densitate mono-dimensionale. În multe cazuri, este posibil să se obțină o aproximare suficient de precisă pentru funcția de distribuție cumulativă n-dimensională, de la funcțiile de distribuție mono dimensionale, având în vedere cele n variabile, parametri acestora precum și coeficienții de corelație.

Dacă Y este o funcție lineară a vectorului aleatoriu $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$, atunci:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i$$

Utilizând ecuațiile (2.11) (2.12) și (2.14), se poate constata că valoarea așteptată $E[Y]$ și varianța $V[Y]$ sunt date de relațiile:

$$E[Y] = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i E[X_i]$$

$$Var[Y] = \sum_{i=1}^n a_i^2 Var[X_i] + 2 \left(\sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n a_i a_j C_{X_i X_j} \right)$$

Distribuții și momente condiționale

Funcția de densitate de probabilitate pentru variabila aleatoare X_1 , condițională în raport cu rezultatul pentru variabila aleatoare X_2 , este notată cu $f_{X_1|X_2}(x_1|x_2)$ și definită prin:

$$f_{X_1|X_2}(x_1|x_2) = \frac{f_{X_1, X_2}(x_1, x_2)}{f_{X_2}(x_2)} \quad (2.15)$$

în conformitate cu definiția dată anterior pentru probabilitatea condițională. În ceea ce privește cazul în care au fost luate în considerare probabilități de evenimente, două variabile aleatoare X_1 și X_2 se spune că sunt independente, atunci când:

$$f_{X_1|X_2}(x_1|x_2) = f_{X_1}(x_1)$$

Prin integrarea relației (2.15), distribuția cumulativă condițională $F_{X_1|X_2}(x_1|x_2)$ se obține astfel:

$$F_{X_1|X_2}(x_1|x_2) = \frac{\int_{-\infty}^{x_1} f_{X_1,X_2}(z,x_2) dz}{f_{X_2}(x_2)} \quad (2.16)$$

Prin integrarea relației (2.16) cu luarea în considerare a funcției densității de probabilitate a X_2 , adică $f_{X_2}(x_2)$, distribuția cumulativă necondițională se obține pe seama teoremei de probabilitate totală:

$$F_{X_1}(x_1) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{X_1|X_2}(x_1|x_2) f_{X_2}(x_2) dx_2$$

Momentele condiționate de variabile aleatoare continue cu distribuție comună, rezultă din ecuațiile (2.7), și (2.15). De exemplu, variabilele aleatoare cu distribuție comună X_1 și X_2 condiționează valoarea așteptată $\mu_{X_1|X_2}$ dată de relația:

$$\mu_{X_1|X_2} = E[X_1|X_1 = x_2] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_{X_1|X_2}(x|x_2) dx$$

2.6. Procese aleatoare

Anumite procese aleatoare pot varia în timp, în sensul că, acestea iau noi valori la diferite intervale de timp sau în mod continuu. Dacă valorile proceselor aleatoare, variabile în timp, apar la momente discrete de timp, acestea sunt denumite ca fiind *secvențe aleatoare*. Exemple: jocul cu zaruri, apariția inundațiilor. Dacă valorile proceselor aleatoare se schimbă în mod continuu în timp, acestea sunt denumite ca fiind *procese aleatoare sau procese stohastice*. Exemple: viteza vântului, înălțimea valurilor, avalanșe sau scurgeri de apă. În unele cazuri, secvențele aleatoare și procesele aleatoare pot fi reprezentate, într-un context dat, în termeni de variabile aleatoare, de exemplu, pentru modelarea valorii la un moment dat a intensității vitezei vântului sau a vitezei maxime (extreme) a vitezei vântului timp de un an. Cu toate acestea, în multe cazuri acest lucru nu este posibil și atunci este necesar de a modela fenomenele incerte printr-un proces aleator. În cele ce urmează sunt prezentate: *procesul de numărare de tip Poisson* și *procesul normal continuu sau Gaussian*.

Procesul de numărare de tip Poisson

Familia cea mai frecvent aplicată proceselor discrete de fiabilitate structurală o reprezintă cea dată de procesele Poisson. Datorită faptului că procesele Poisson au găsit aplicații în multe tipuri diferite de probleme de inginerie, s-au dezvoltat un număr mare de variante ale procesului de tip Poisson. În general, procesul $N[t]$, care indică numărul de puncte dintr-un anumit interval $[0, t]$, este numit un proces simplu Poisson dacă îndeplinește următoarele condiții, [9]:

- probabilitatea unui eveniment în intervalul $[t, t+\Delta t]$ este asimptotic proporțională cu lungimea intervalului Δt ;
- probabilitatea dată de mai multe evenimente din intervalul $[t, t+\Delta t]$, este o funcție de ordin superior a Δt , pentru $\Delta t \rightarrow 0$;

- evenimente în intervale disjuncte sunt reciproc independente. Procesul Poisson poate fi definit complet de intensitate sa, $\nu(t)$:

$$\nu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P \quad (2.17)$$

Dacă $\nu(t)$ este constant în timp, atunci procesul Poisson se numește omogen, altfel el este neomogen. În general, probabilitatea a n evenimente din intervalul $[0, t]$ a procesului Poisson cu intensitatea $\nu(t)$ poate fi dată de relația:

$$P_n(t) = \frac{\left(\int_0^t \nu(\tau) d\tau\right)^n}{n!} \exp\left(-\int_0^t \nu(\tau) d\tau\right) \quad (2.18)$$

cu valoarea medie $E[N(t)]$ și varianța $Var[N(t)]$:

$$E[N(t)] = Var[N(t)] = \int_0^t \nu(\tau) d\tau \quad (2.19)$$

Probabilitatea de a exista evenimente în intervalul $[0, t]$, adică $P_0(t)$, este deosebit de interesantă având în vedere problemele reale de fiabilitate. Această probabilitate poate fi determinată direct din ecuația (2.18) ca fiind:

$$P_0(t) = \exp\left(-\int_0^t \nu(\tau) d\tau\right) \quad (2.20)$$

ceea ce înseamnă că timpul până la, și între evenimente, prezintă o distribuție exponențială. Din ecuația (2.20) rezultă că funcția de distribuție cumulativă a timpului de așteptare T_1 până la primul eveniment, respectiv $F_{T_1}(t_1)$, poate fi determinată în mod direct pe baza relației:

$$F_{T_1}(t_1) = 1 - \exp\left(-\int_0^{t_1} \nu(\tau) d\tau\right)$$

Atunci când, pentru n variabile independente cu o distribuție exponențială se poate scrie că:

$$T = T_1 + T_2 + \dots + T_n$$

funcția $f_T(t)$ având o distribuție de tip *Gamma* și fiind dată de relația:

$$f_T(t) = \frac{\nu(\nu t)^{(n-1)} \exp(-\nu t)}{(n-1)!}$$

Procese aleatoare continue

Un proces aleator $X(t)$ este considerat o funcție aleatoare de timp dacă, în orice moment de timp, valoarea $X(t)$ a respectivului proces este una aleatoare. Un model de proces aleatoriu (ex. variația nivelului apei) este ilustrat în figura 2.6.

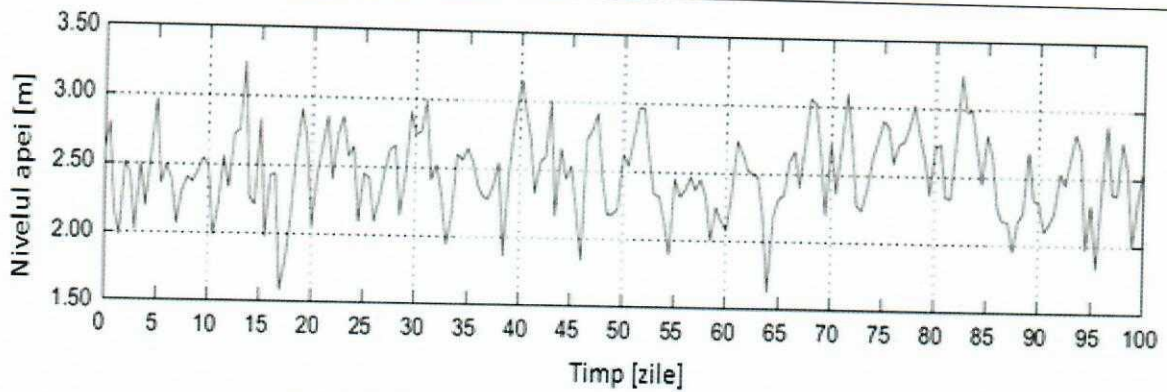


Fig. 2.6. Variația nivelului apei în funcție de timp.

În conformitate cu definiția valorii medii a unei variabile aleatoare, valoarea medie a rezultatelor furnizate de procesul stocastic la momentul t este dat de:

$$\mu_X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x, t) dx$$

Corelația dintre toate realizările posibile la două momente de timp este descrisă prin intermediul așa-numitei funcții de autocorelație: $R_{XX}(t_1, t_2)$. Funcția de autocorelație este definită prin:

$$R_{XX}(t_1, t_2) = E[X(t_1), X(t_2)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [x_1 x_2 f_{XX}(x_1, x_2; t_1, t_2) dx_1 dx_2]$$

Funcția de auto-covarianță este definită prin:

$$\begin{aligned} C_{XX}(t_1, t_2) &= E[(X(t_1) - \mu_X(t_1))(X(t_2) - \mu_X(t_2))] = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [x_1 - \mu_X(t_1)][x_2 - \mu_X(t_2)] f_{XX}(x_1, x_2; t_1, t_2) dx_1 dx_2 \end{aligned}$$

Pentru funcția de auto-covarianță, funcția de covarianță devine:

$$\sigma_X^2(t) = C_{XX}(t, t) = R_{XX}(t, t) - \mu_X^2(t)$$

unde $X(t)$ este funcția de deviație standard.

Definițiile de mai sus, pot fi extinse pentru procesul scalar $X(t)$, pentru a acoperi valorile vectorului de proces: $X(t) = (X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t))^T$, având funcții de covarianță. Pentru i acestea devin funcțiile de auto-covarianță fiind numite funcții de eco-covarianță. În final, funcția de corelație poate fi definit ca:

$$\rho[X_i(t_1), X_j(t_2)] = \frac{\text{cov}[X_i(t_1), X_j(t_2)]}{\sigma_{X_i}(t_1) \sigma_{X_j}(t_2)}$$

De obicei, funcția de corelare este o funcție cu variație exponențială în timp. După definirea funcției valoare medie și a funcției de corelare încrucișată, pentru un proces stocastic $X(t)$, probabilitatea ca

procesul să rămână într-un anumit domeniu de siguranță D , în intervalul de timp $[0, t]$ poate fi evaluată prin:

$$P_f(t) = 1 - P(N(t) = 0 | X(0) \in D)P(X(0) \in D)$$

unde $N(t)$ este numărul de treceri ale procesului aleator din domeniu D în intervalul de timp $[0, t]$.

2.7. Construcția modelului probabilistic în Ingineria riscului

O sarcină importantă în analiza de risc și fiabilitate este de a stabili modele probabilistice pentru tratamentul statistic în cazul fenomenelor cu variabile aleatoare sau rezultate incerte. În literatura de specialitate pot fi găsite un număr mare de modele probabilistice pentru variabile aleatoare în cazul solicitărilor. Astfel, se găsesc atât modele probabilistice pentru descrierea caracteristicilor de rezistență și rigiditate a structurilor cât și pentru descrierea efectelor sarcinilor aplicate în mai multe domenii ale ingineriei. Totuși, nu avem de fiecare dată un model probabilistic adecvat pentru problema în cauză. Mai mult decât atât, în alte domenii ingineresti, cum ar fi ingineria mediului sau hidrologie, standardizarea modelării probabilistice este mult mai puțin avansată. În astfel de situații, este necesar a fi dezvoltate noi metodologii și instrumente pentru evaluarea statistică a informațiilor ce derivă din experimente (de exemplu, observațiile și rezultatele testelor și încercărilor) și formularea de modele probabilistice de variabile aleatoare. În practică, se pot distinge două situații distincte, și anume: situația în care un model probabilistic nou este formulat chiar de la început și situația în care un model probabilistic deja existent este actualizat pe baza unor informații noi, de exemplu, observațiile sau rezultatele experimentului. Formularea de modele probabilistice se poate baza numai pe date și informații sigure, dar, de cele mai multe ori, nu există date disponibile. În astfel de cazuri ne bazăm, pentru construirea modelului, pe argumente fizice, experiență și judecată (informații subiective). De multe ori, unele informații subiective pot fi combinate cu informații sigure iar modelul probabilistic rezultat are caracter Bayesian. Trebuie subliniat faptul că, pe de o parte, modelul probabilistic ar trebui să fie simplu și, pe de altă parte, modelul trebuie să fie suficient de precis pentru a permite includerea informațiilor importante colectate pe durata de viață a sistemului, facilitând, astfel, noile actualizări ale modelului probabilistic. În acest fel, modelele de risc, care inițial se bazează în întregime pe informații subiective, având în vedere informațiile noi colectate și implementate, se vor baza, în cele din urmă, pe informații obiective. În esență, procesul de construcție a unui model de risc constă în cinci etape, și anume:

- evaluarea și cuantificarea statistică a datelor disponibile;
- selectarea funcției de distribuție;
- estimarea parametrilor de distribuție;
- verificarea modelului;
- actualizarea modelului.

De obicei, alegerea inițială a modelului, respectiv introducerea ipotezelor de bază privind funcțiile de distribuție și parametrii aleatorii se bazează, în principal, pe informații subiective întrucât, evaluarea parametrilor funcției de distribuție și nu în ultimul rând, verificarea modelelor se face pe baza datelor disponibile. Principiul de stabilire a unui model probabilistic este ilustrată în *figura 2.7*.

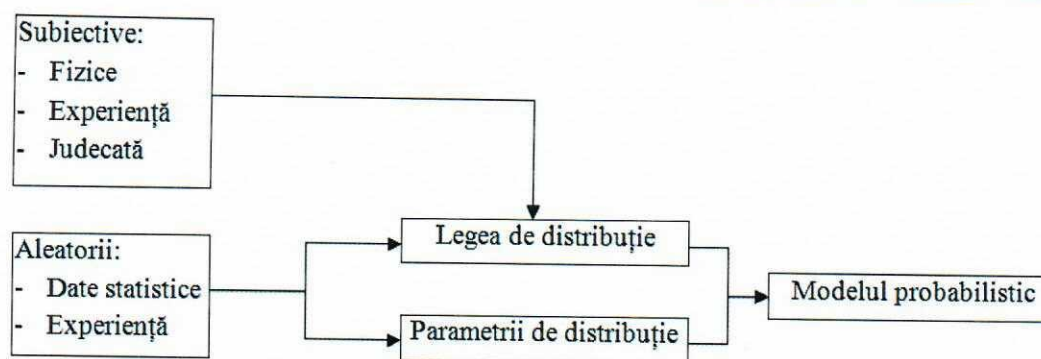


Fig. 2.7. Ilustrarea formulării modelelor probabilistice de variabile aleatoare.

Modelele probabilistice se bazează atât pe date precise cât și pe informații subiective, acestea fiind de natură Bayesiană. În cele ce urmează va fi luată în considerare numai modelarea probabilistică cu variabile aleatoare, dar abordarea descrisă se aplică, cu unele extensii, și la modelarea probabilistic a proceselor aleatoare și a domeniilor aleatoare. Prima problemă în alegerea unei familii de funcții de distribuție corespunzătoare o reprezintă estimarea parametrilor funcției de distribuție considerată.

2.8. Selecția funcției de distribuție de probabilitate

În general, funcția de distribuție pentru o variabilă aleatoare sau proces stohastic nu este cunoscută și, prin urmare, trebuie aleasă pe baza informațiilor obiective, argumente fizice sau o combinație a celor două. O abordare formală, clasică, pentru identificarea unei funcții de distribuție adecvată, pe baza datelor statistice o reprezintă parcurgerea următoarelor etape:

- postularea unei ipoteze pentru familia de distribuție;
- estimarea parametrilor de distribuție selectați pe baza datelor statistice;
- efectuarea unui test statistic pentru a valida sau pentru a respinge ipoteza.

Dacă ipoteza nu este respinsă, funcția de distribuție selectată se consideră a fi adecvată pentru modelarea variabilei aleatoare considerată. Dacă ipoteza este respinsă, trebuie postulată o nouă ipoteză și procedeul se repetă. Această procedură urmărește îndeaproape abordarea obiectivă, clasică, a analizei statistice. Cu toate acestea, în multe aplicații ingineresti, această procedură are o valoare limitată. Acest lucru se întâmplă datorită faptului că volumul de date disponibile, de cele mai multe ori, este prea limitat pentru a forma baza solidă pentru un test statistic. De asemenea, testele disponibile aplicate în situații cu puține informații sigure, pot conduce la concluzii false. În practică, deseori argumentele fizice sunt hotărâtoare pentru alegerea funcțiilor de distribuție iar datele statistice sunt utilizate doar în scopul de a verifica dacă funcția de distribuție propusă este plauzibilă. O abordare practică, aplicabilă pentru selectarea funcției de distribuție în vederea modelării unei variabile aleatoare este următoarea:

- în primul rând se consideră argumentele fizice care se atribuie uneia sau alteia dintre familiile de distribuție;
- ulterior, se verifică dacă dovezile statistice sunt în contradicție flagrantă cu distribuția asumată.

Selectarea modelului prin utilizarea graficelor de probabilitate

După ce s-a selectat o familie de distribuție de probabilitate pentru modelarea probabilistică a unei variabile aleatoare, graficele de probabilitate reprezintă un instrument extrem de util pentru a verifica plauzibilitatea familiei de distribuție selectată. Un grafic de probabilitate pentru o familie de distribuție dată, este construit astfel încât funcția densității de probabilitate cumulativă (sau complementul) să aibă forma unei linii drepte. Un grafic de probabilitate este construit printr-o transformare neliniară a axei y . Pentru o variabilă aleatoare distribuită normal, funcția de distribuție cumulativă este dată ca:

$$F_X(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right) \quad (2.21)$$

unde μ_x și σ_x sunt valoarea medie și deviația standard a variabilei aleatoare normal distribuite. Prin inversarea ecuației (2.21) se obține:

$$x = \Phi^{-1}(F_X(x))\sigma_x + \mu_x$$

Prin reprezentarea grafică a lui X în raport cu $\Phi^{-1}(F_X(x))$, *figura 2.8*, se obține o linie dreaptă având panta în funcție de abaterea standard a variabilei aleatoare X și punctul de trecere cu axa y în funcție de valoarea medie a variabilei aleatoare. O astfel de reprezentare este denumită cuantilă.

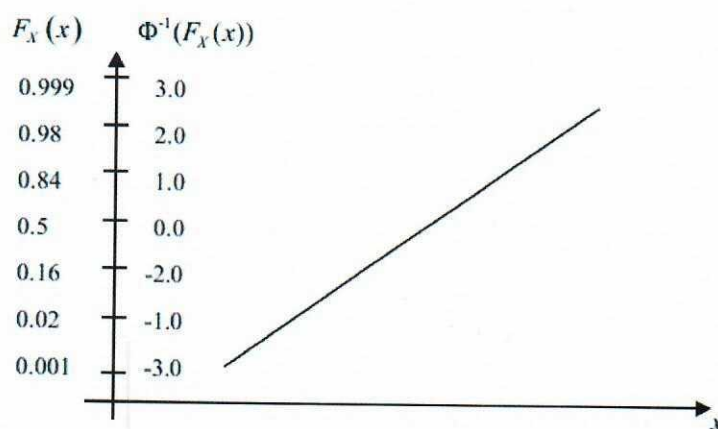


Fig. 2.8. Ilustrare scalară neliniară a axei y pentru o variabilă aleatorie cu distribuție normală.

De asemenea, în *figura 2.8*, scalarea neliniară a axei y este dată în corespondență cu maparea liniară a densităților de probabilitate cumulative. În *figura 2.9* se prezintă construcția unui grafic de probabilitate.

Având în vedere un set ordonat de valori observate: $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ a unei variabile aleatoare, funcția de distribuție cumulativă poate fi evaluată ca:

$$F_X(x_i) = \frac{i}{N+1} \quad (2.22)$$

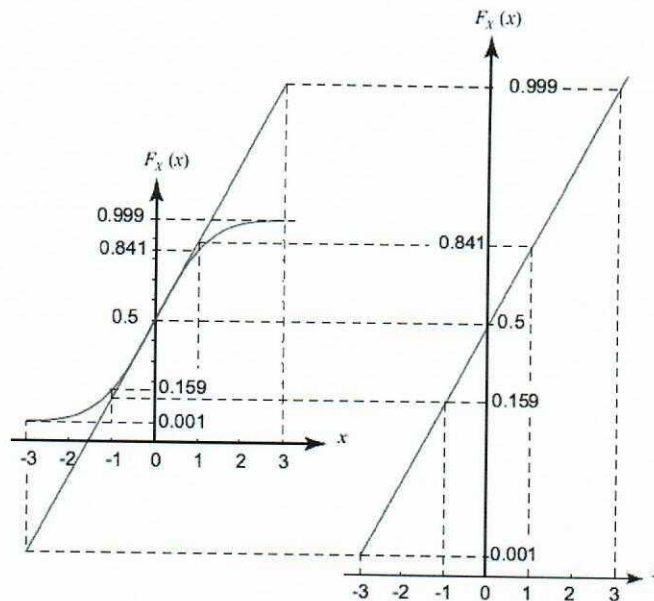


Fig. 2.9. Ilustrarea construcției unui grafic de probabilitate de distribuție normală.

În tabelul 2.2 este prezentat un exemplu privind valorile funcției de distribuție cumulative utilizând ecuația (2.20) pentru rezistența la compresiune a 20 de epruvete confecționate din același material.

Tab. 2.2. Rezistența la compresiune pentru 20 de probe din același material.
Valorile funcțiilor cumulative de distribuție.

i	x_i^0	$F_X(x_i^0)$	$\Phi^{-1}(F_X(x_i^0))$
1	24.4	0.047619048	- 1.668390969
2	27.6	0.095238095	- 1.309172097
3	27.8	0.142857143	- 1.067570659
4	27.9	0.19047619	- 0.876142694
5	28.5	0.238095238	- 0.712442793
6	30.1	0.285714286	- 0.565948707
7	30.3	0.333333333	- 0.430727384
8	31.7	0.380952381	- 0.302980618
9	32.2	0.428571429	- 0.180012387
10	32.8	0.476190476	- 0.059716924
11	33.3	0.523809524	0.059716924
12	33.5	0.571428571	0.180012387
13	34.1	0.619047619	0.302980618
14	34.6	0.666666667	0.430727384
15	35.8	0.714285714	0.565948707
16	35.9	0.761904762	0.712442793
17	36.8	0.80952381	0.876142694
18	37.1	0.857142857	1.067570659
19	39.2	0.904761905	1.309172097
20	39.7	0.952380952	1.668390969

În figura 2.10 este reprezentată grafic variația funcției de distribuție cumulative în raport cu rezistențele la compresiune. O primă estimare a parametrilor de distribuție poate fi determinată de panta drepte de aproximare a valorilor distribuției cumulative reprezentate grafic. Din figura 2.10 se observă că funcția de distribuție cumulativă este aproximată, relativ bine, cu o linie dreaptă.

Acest lucru este de așteptat, având în vedere că valorile rezistenței la compresiune nu sunt cu adevărat reprezentative pentru zona de jos a distribuției, unde, se poate presupune că, o distribuție lognormală ar fi mai potrivită.

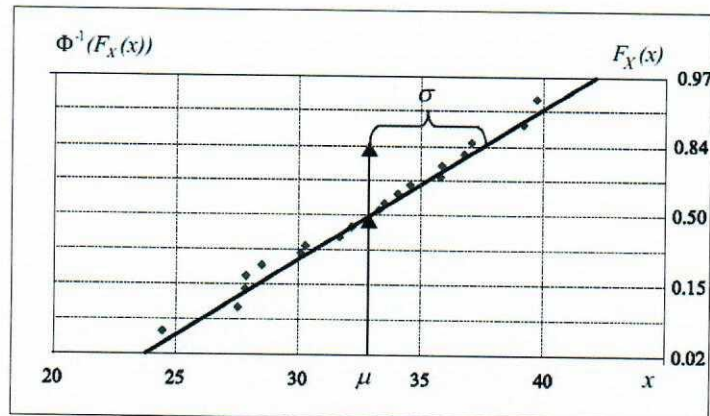


Fig. 2.10. Variația rezistențelor la compresiune trasată în cadrul unui grafic de distribuție normală

2.9. Estimarea parametrilor de distribuție

Există, în principiu, două metode diferite de estimare a parametrilor de distribuție pe bază de date, și anume, metodele de estimare a punctelor și metodele de estimare a intervalului. În cele ce urmează, vor fi explicate două dintre metodele de estimare, și anume: metoda momentelor și metoda probabilității maxime, ce s-au dovedit deosebit de utile în practica ingineriei riscului și analiza fiabilității sistemelor.

Metoda momentelor

Presupunând că, variabila aleatoare X poate fi modelată pe baza funcției de densitate de probabilitate $f_X(x; \theta)$ unde $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)^T$ reprezintă parametrii de distribuție, primele k momente $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)^T$, al variabilei aleatoare X pot fi scrise astfel:

$$\lambda_j(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} x^j f_X(x | \theta) dx = \lambda_j(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$$

Dacă eșantionul aleatoriu care va fi utilizat pentru estimarea parametrilor de distribuție unde $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)^T$, este colectat în vectorul $\hat{x} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_k)^T$, momentele de eșantionare corespunzătoare pot fi calculate cu ajutorul relației:

$$m_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{x}_i^j$$

Prin echivalarea a k momente de eșantionare prin k ecuații pentru momentele de variabilă aleatoare X , se obțin un set de k ecuații cu k parametri de distribuție necunoscuți, ale căror soluții reprezintă estimările prin puncte ale parametrilor de distribuție.

Metoda maximizării Riscului

Această metodă poate fi ceva mai dificil de utilizat decât metoda momentelor, dar are o serie de proprietăți foarte atractive, ceea ce face ca această metodă să se aplice, în special, în cadrul ingineriei riscului și analizei de fiabilitate. Principiul metodei constă în faptul că, parametrii funcției de distribuție sunt aliniați astfel încât este maximizată probabilitatea privind riscul eșantionului considerat. Să considerăm variabila aleatoare X cu funcția de densitate de probabilitate $f_X(x; \theta)$ unde $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)^T$ reprezintă parametrii de distribuție care urmează să fie estimați. Dacă eșantionul aleatoriu care va fi utilizat pentru estimarea parametrilor de distribuție $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)^T$, este colectat în vectorul $\hat{x} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_k)^T$, probabilitatea $P(\theta|\hat{x})$ a eșantionului este definită ca:

$$P(\theta|\hat{x}) = \prod_{i=1}^n f_X(\hat{x}_i|\theta)$$

Pe baza rezolvării următoarei probleme de optimizare:

$$\min_{\theta} (-P(\theta|\hat{x}))$$

se poate estima probabilitatea punctuală a parametrilor de distribuție $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)^T$.

Uneori, în locul funcției de probabilitate este avantajos să se ia în considerare logaritmul acesteia – și anume:

$$p(\theta|\hat{x}) = \sum_{i=1}^n \log(f_X(\hat{x}_i|\theta))$$

Una dintre cele mai atractive proprietăți ale metodei de maximizare a riscului este că, atunci când numărul de eșantioane n este suficient de mare, distribuția parametrilor converge spre o distribuție normală cu valori medii μ_{θ} egală cu estimările punctuale, adică:

$$\mu_{\theta} = (\theta_1^*, \theta_2^*, \dots, \theta_n^*)^T$$

Matricea de covarianță $C_{\theta\theta}$ pentru estimările punctuale poate fi obținută cu ușurință prin:

$$C_{\theta\theta} = H^{-1}$$

unde H este matricea de informații Fischer cu componente determinate pe baza derivatelor parțiale de ordinul 2 ale funcției $\log(-P)$, și anume:

$$H_{ij} = -\frac{\partial^2 p(\theta|\hat{x})}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \Big|_{\theta=\theta^*}$$

Estimarea parametrilor

Să considerăm din nou rezultatele experimentale rezistenței la compresiune prezentate în tabelul 2.2. Presupunând că rezistența la compresiune este normal distribuită, se pot estima parametrii de probabilitate pe baza rezultatelor experimentale. Relațiile pentru parametrii de distribuție, sunt:

$$\lambda_1 = \mu; \lambda_2 = \mu^2 + \sigma^2$$

Analizând datele din distribuție, rezultă că primele două momente vor fi:

$$m_1=32,67; \quad m_2=1083,36$$

Estimările punctuale ale parametrilor μ, σ pot fi determinate astfel:

$$\mu=32,67; \quad \mu^2+\sigma^2=1083,36$$

Folosind metoda de maximizare a riscului, funcția de probabilitate va fi:

$$P(\theta|\hat{x}) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta_1} \right)^n \exp \left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{x}_i - \theta_2)^2}{\theta_1^2} \right)$$

și, ca urmare, funcția logaritmică va fi dată de:

$$p((\theta|\hat{x}) = n \ln \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta_1} \right) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{x}_i - \theta_2)^2}{\theta_1^2} \quad (2.23)$$

Valorile medii ale eșantionului pot fi determinate prin rezolvarea următoarelor ecuații:

$$\begin{aligned} \frac{\partial l}{\partial \theta_1} &= -\frac{n}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_1^3} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \theta_2)^2 = 0 \\ \frac{\partial l}{\partial \theta_2} &= \frac{1}{\theta_1^2} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \theta_2) = 0 \end{aligned}$$

obținându-se:

$$\theta_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \theta_2)^2}{n}}$$

$$\theta_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{x}_i$$

care, cu ajutorul datelor din eșantionare conduce la:

$$\theta_1=\sigma=4.04; \quad \theta_2=\mu=32.665$$

Nu este surprinzător că s-au obținut același rezultat ca la metoda de momente.

Așa cum am menționat anterior, matricea de covarianță $C_{\theta\theta}$ pentru parametrii estimați poate fi determinată prin H, matricea de informații Fischer ce conține derivate parțiale de ordinul 2 ale funcției $\log(-P)$, vezi ecuația (2.23).

Matricea de informații este dată de relația:

$$H = \begin{pmatrix} \frac{n}{\theta_1^2} - \frac{3 \sum_{i=1}^n (x_i - \theta_2)^2}{\theta_1^4} & \frac{2 \sum_{i=1}^n (x_i - \theta_2)}{\theta_1^3} \\ \frac{2 \sum_{i=1}^n (x_i - \theta_2)}{\theta_1^3} & \frac{n}{\theta_1^2} \end{pmatrix}$$

unde matricea de covarianță este determinată pe baza datelor din eșantion ca fiind:

$$C_{\theta\theta} = H^{-1} = \begin{pmatrix} 0,836 & 0 \\ 0 & 0,1647 \end{pmatrix}$$

Într-o modelare probabilistică, unde rezistența la compresiune intră ca o variabilă aleatoare, se poate lua în considerare incertitudinea statistică asociată cu estimările parametrilor de distribuție, pentru funcția de distribuție, prin simpla includere a parametrilor de distribuție în analiza fiabilității ca variabile normal distribuite incluzând și determinările valorilor medii și ale covarianțelor.

BIBLIOGRAFIE

- [1] R. Vladimir, Elements of General Risk Theory, Linz University, Linz, December 4-22, 2006.
- [2] K. D. Schmidt, Lectures on Risk Theory, Lehrstuhl für Versicherungsmathematik, Technische Universität Dresden, 1995.
- [3] N. Bârsan-Pipu, I. Popescu, Managementul riscului, Concepte metode aplicații, Editura Universității „Transilvania” din Brașov, 2003.
- [4] J.P. Chavas, Risk Analysis in Theory And Practice, Elsevier Academic Press, 2004.
- [5] M. H. Faber, Risk and Safety in Civil Engineering, Lecture Notes, 2007.
- [6] L. Dragomirescu, A. I. Petrisor, Elemente de ecologie numerica si modelare, Elemente de teoria probabilitatilor, Ars Docendi, Bucuresti, 2009.
- [7] H. Schmidli, Risk Theory, www.mi.uni-koeln.de/~schmidli/vorl/Risk/vorl.pdf.
- [8] M. Bulgaru, Elemente de teoria probabilităților - note curs, www.cermi.utcluj.ro.
- [9] F. Safie, An Overview of Quantitative Risk Assessment Methods, Shuttle Quantitative Risk Assessment, Technical Interchange Meeting, 2000.

CAPITOLUL 3. INGINERIA RISCULUI

-
- 3.1. Surse de risc principale în Inginerie. Variabilitate și incertitudine
 - 3.2. Inspecția in-service
 - 3.3. Analiza pericolelor potențiale
 - 3.4. Analiza efectelor unei defecțiuni (AED)
 - 3.5. Modele probabilistice pentru evaluarea riscului
-

Sarcina finală a unui inginer este de a lua decizii, pe o bază solidă, privind planificarea, proiectarea, fabricația, operarea și gestionarea instalațiilor ingineresti, astfel încât, atât beneficiile cât și ciclul de viață al instalațiilor să fie maximizate iar cerințele privind siguranța personalului și cele de mediu prevăzute în legislație să fie îndeplinite. Cum informațiile disponibile (în ceea ce privește, de exemplu, solicitările, proprietățile materialului, condițiile operaționale viitoare și a proceselor de deteriorare) sunt incomplete sau nesigure, problema decizională este supusă hazardului. Prezentul capitol prezintă unele probleme fundamentale de luare a deciziilor în condiții de informații incerte. Problema de analiză a riscurilor este definită în termeni generali, în contextul teoriei deciziei.

3.1. Surse de risc principale în Inginerie. Variabilitate și incertitudine

După cum a demonstrat experiența de serviciu, există o incertitudine și o variabilitate semnificative, asociate cu orice estimare pe bază de calcul a riscului de cedare a componentelor, deoarece acest tip de evenimente apar foarte rar, [1].

Una din sursele de risc o poate constitui incapacitatea noastră de a prezice cu exactitate ce ne rezervă viitorul în privința cedării sau noncedării unei componente. Acest lucru se datorează în principal *variabilității și incertitudinii (V&I)*.

VARIABILITATEA reprezintă efectul șansei și depinde de sistem.

Variabilitatea este proprie naturii legilor fizice implicate:

- nu se poate reduce nici prin studiu și nici prin măsurători detaliate;
- se poate reduce prin schimbarea sistemului.

INCERTITUDINEA reprezintă lipsa de cunoștințe a evaluatorului despre:

- legile fizicii;
 - parametrii ce caracterizează sistemul fizic;
 - semanticile utilizate;
 - incertitudinea poate fi redusă prin experimente și studii viitoare.
-

Gradul de certitudine (nivelul de încredere) reprezintă măsura în care credem că ceva este adevărat. În practică, certitudinea este validată de experimente pozitive (confirmări).

Variabilitatea și incertitudinea acționează împreună pentru a limita capacitatea noastră de a prezice comportamentul viitor al sistemului. Acestea sunt elementele componente ce trebuie cuantificate în *evaluarea cantitativă a RISCULUI*.

Variabilitatea și incertitudinea sunt cuantificate prin metode ce țin de:

- statistica aplicată;
- teoria probabilității;
- logica fuzzy;
- rețele neuronale;
- solicitarea opiniilor experților.

3.2. Inspecția in-service

O modalitate de a reduce probabilitatea apariției cedării instalațiilor sau componentelor este de a le *inspecta în mod periodic* și de a repara sau înlocui componentele care prezintă semne de deteriorare și degradare, [2]. Pe baza cunoașterii riscului se pot determina locațiile și intervalele pentru inspecții. Această metodologie poartă numele de inspecție in-service și se bazează pe risc informat/cunoscut. Astfel de *inspecții in-service* sunt ceva obișnuit pentru recipientele sub presiune, conductele și sudurile asociate, precum și pentru structurile aviatice.

În trecut, intervalele de inspecție aveau la bază experiența istorică și judecata inginerescă. În ultimii ani s-au dezvoltat metode pentru a determina locațiile și intervalele pentru inspecția pe baza *cunoașterii riscului*. Aceasta s-a transformat într-o nouă metodologie inginerescă, cunoscută sub numele de *inspecție in-service* (In-Service Inspection, ISI) bazată pe risc informat (cunoscut). Fiabilitatea structurală (FS) și/sau Mecanica Ruperii Probabiliste (MRP) sunt utilizate la estimarea probabilității de cedare a structurilor portante, iar metodologia de evaluare a riscului în sistem este folosită pentru a determina efectul cedării structurii asupra întregului sistem.

Aceste estimări ale riscului se folosesc pentru a ordona sau grupa componentele instalațiilor și instalațiile ca entități în cadrul sistemului global, în funcție de contribuția lor la risc. Componentele sau instalațiile cu un nivel de risc mai ridicat sunt inspectate mai des și cu mai mare atenție. Ordonarea în funcție de potențialul de rupere reprezintă elementul cheie în strategiile ISI moderne.

Riscul de avarie al unei componente industriale este definit ca fiind potențialul de cedare a componentei (de regulă prin rupere sau deformare excesivă) și *consecințele* unei astfel de cedări.

Potențialul de rupere a componentei este în strânsă legătură cu *rata de cedare* sau frecvența de realizare a cedării componentei.

Consecințele cedării sunt legate de probabilitatea condițională de producere a unui *accident grav* dată fiind materializarea cedării.

$$RISC \left(\frac{\text{Consecinta}}{\text{Timp}} \right) = \text{Probabilitatea} \left(\frac{\text{Eveniment}}{\text{Timp}} \right) \times \text{Severitatea} \left(\frac{\text{Consecinta}}{\text{Eveniment}} \right)$$

Evaluarea *frecvenței riscului* se face pe baza:

- **deducției statistice** asupra acțiunilor trecute (analiză *aposteriori*);
- **predicții probabiliste** (analiza *apriori*).

Severitățile pot fi de natură economică, socială, de mediu și politică, [1].

În cuantificarea probabilităților de rupere și frecvenței acestora s-au urmat două căi:

- analiza datelor pentru service de cedare (experiență anterioară) prin estimări statistice și corelații cu factorii cheie (raționale ISI);
- evaluare (predicția) prospectivă a riscului de cedare prin Analize Structurale Probabiliste (ASP) [2], în special prin Mecanica Rupării Probabiliste (MRP).

Metodele ASP și MRP sunt delimitate de o abordare mai amplă, cunoscută sub numele de Analiza Probabilistă a Riscului (APR) sau Analiza Cantitativă a Riscului (ACR). ASP și MRP sunt instrumente esențiale în *managementul luării deciziilor*, formând noul domeniu de abordare denumit *managementul riscului* (MR).

Din punct de vedere programatic, există o serie de aspecte care trebuie abordate cu scopul de a asigura un program eficient de ISI, [3, 4, 5]. Acestea includ:

- Suportul acordat de către management;
- O bună înțelegere a punctelor forte și limitări ale programului existent ISI;
- Utilizarea corectă a informațiilor privind componentele cu risc specific;
- Cunoștințe multidisciplinare;
- Cunoștințe privind reglementările din țara respectivă.

Formarea unor specialiști calificați în domeniu este, de asemenea, un factor esențial în elaborarea și punerea în aplicare a unui program ISI. Aceștia trebuie să aibă cunoștințe din cadrul unor discipline diferite, inclusiv de control, proiectare de întreținere, materiale, chimie, analiza tensiunilor, sisteme, operațiuni de mentenanță și siguranță.

O privire de ansamblu asupra aspectelor fundamentale ale unei metodologii ISI este prezentată în *figura 3.1*.

Această figură reflectă elementele tehnice de bază ale conceptului de risc informat ca fiind relevante pentru dezvoltarea unui program ISI.

Dintr-o perspectivă tehnică, se pot distinge următoarele etape principale ce pot rezuma un proces ISI:

- Definirea sferei de aplicare a programului ISI;
- Colectarea și analiza datelor de intrare necesare;
- Evaluarea consecințelor cedării unei componente;
- Identificarea și evaluarea potențialului de cedare;
- Efectuarea unui clasament de risc pe baza unei analize „fault tree”;
- Inspecția componentei cu risc, selectate;
- Evaluarea impactului inspecției asupra riscului asumat în vederea modificării programului de inspecție;
- Gestionarea pe termen lung a unui program de ISI.

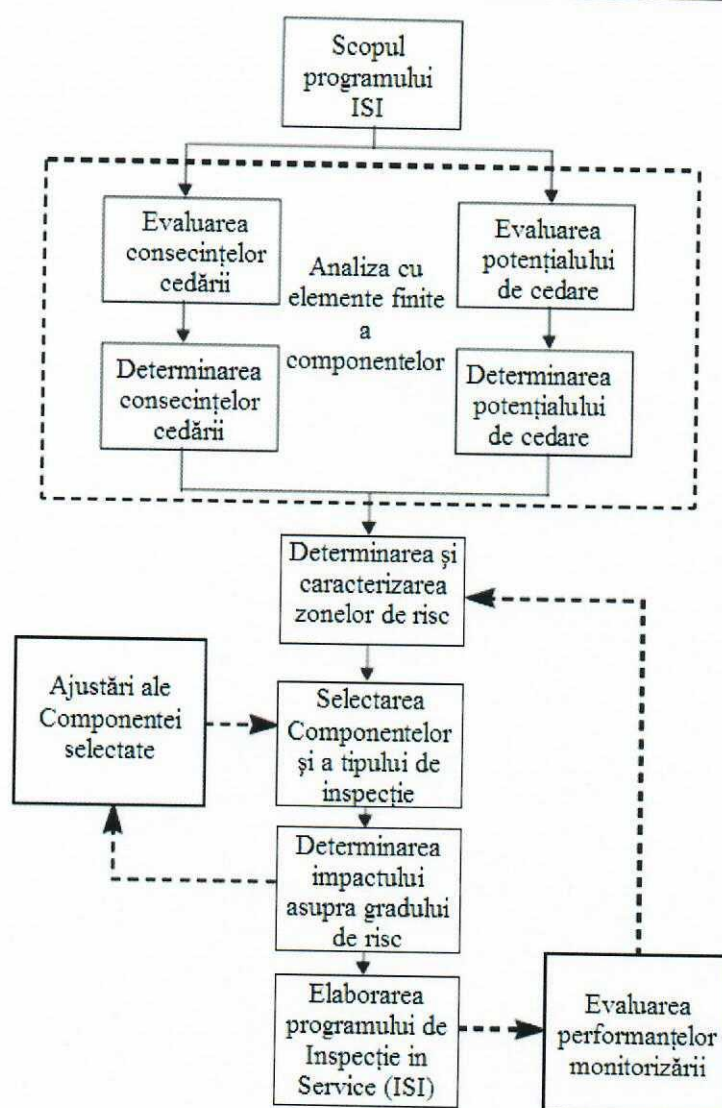


Fig. 3.1. Programul de Inspecție in Service

Primul pas se face pentru a decide domeniul de aplicare al programului ISI. Domeniul de aplicare al unui program de Inspecție in Service este condiționat de obiectivele beneficiarului, precum și feedback-ul primit din partea autorității de reglementare. Printre opțiuni se numără:

- Aplicații într-un domeniu vast, cum ar fi toate sistemele de conducte cu clase de siguranță clasificate și neclasificate;
- Selectarea unei părți a sistemului cum ar fi un traseu de conducte individuale (de exemplu, sistemul de răcire pentru un reactor);
- Un subtraseu al unei clase de sisteme de conducte .

Selectarea domeniului de aplicare a unei proceduri ISI pe baza unui risc informat (RI-ISI) poate influența puternic rezultatele, și, prin urmare, procesul utilizat pentru a defini domeniul de aplicare ar trebui să fie corect înțeles de către operator și organismul de reglementare.

Definirea scopului programului ISI

În practică, orice sistem care nu a fost selectat pentru includerea în sfera de aplicare a unui program RI-ISI, va fi inclus în cadrul sistemului regulat de inspecție (reparații curente sau capitale).

Trebuie luate în considerare și programele adiționale de inspecție a unor componente speciale, care nu trebuie să se suprapună peste ISI. Dacă este cazul, acestea vor fi incluse în ISI. Exemple de programe suplimentare care nu pot fi incluse în ISI: fisurarea intergranulară prin coroziune sub tensiune, coroziune locală, coroziune accelerată prin curgere.

Colectarea și analiza datelor de intrare necesare

Procesul RI-ISI presupune acumularea unei cantități mare de informații din surse diferite, care trebuie colectate și analizate. Aceste informații pot fi clasificate în următoarele patru categorii:

- (1) Date primite de la diversele echipamente;
- (2) Date operaționale de exploatare;
- (3) Informații generale din domeniul respectiv;
- (4) Analiza raportului de siguranță și a specificațiilor tehnice;
- (5) Date de tip ESP (Evaluarea Siguranței Probabilistice).

Colectarea de date este o parte esențială a procesului RI-ISI, deoarece constituie baza pentru analiza întregului proces decizional. Colectarea datelor este o etapă care trebuie să se desfășoare cu maximă rigurozitate pentru că aceste date vor avea o valoare considerabilă pentru siguranță sau fiabilitate.

Evaluarea consecințelor cedării

Analiza consecințelor, este, în mod normal, efectuată pe un sistem de bază și conduce la definirea preliminară a componentelor ce vor intra în cadrul ISI.

"Sistemul de componente" care va fi inspectat poate fi diferit în funcție de metodologia aleasă pentru inspecție, care poate include: potențial comun de cedare, consecință comună privind cedarea sau ambele (potențial și consecință comună). În practică, în această etapă în cadrul unei inspecții se include o componentă dintre acelea pentru care o cedare ar duce la aceleași consecințe. Mai târziu, această clasificare poate fi rafinată pentru a lua în considerare perspectiva analizei potențialului de cedare. Consecințele cedării sunt, de obicei, evaluate în funcție de probabilitatea condiționată de consecințe. Aceste determinări necesită estimări cantitative ale riscului care se pot obține pe baza unei modelări de tip ESP (Evaluarea Siguranței Probabilistice). Acest lucru este realizat prin identificarea impactului cedării luând în calcul evenimentele de inițiere, de atenuare și de răspuns a sistemului la încercarea de izolare a defectului.

Identificarea și evaluarea potențialului de cedare/defectare

Primul pas în evaluarea probabilității de defectare a unui element structural îl reprezintă identificarea mecanismelor de degradare. Acest lucru necesită evaluarea calitativă a parametrilor de influență, cum ar fi: informații de proiectare și fabricare, solicitări, condiții de mediu și rezultate ale inspecțiilor. Această analiză ar trebui să fie suplimentată cu o privire de ansamblu asupra modului în care operează sistemul luat în considerare, sisteme similare, precum și considerarea unui studiu privind date similare din întreaga lume. Această etapă este foarte importantă, în vederea clasificării sau cuantificării corecte a potențialului de cedare.

Potențialul de cedare a unei componente poate fi evaluată în moduri diferite, variind de la evaluarea pur calitativă mergând până la o evaluare cantitativă, fie pe baza analizelor statistice a datelor de operare sau pe baza modelelor structurale de fiabilitate. În cazul în care evaluarea se realizează la nivelul componentei, consecința de cedare inițială ar putea fi rafinată în acest stadiu, cu luarea în considerare a diferențelor din cadrul mecanismelor de degradare.

Clasificarea riscului

Elementele structurale sunt clasificate în funcție de riscul asociat, care este determinat de potențialul lor de cedare și de gravitatea consecințelor cedării. Criteriile de ierarhizare sau clasificare pot fi exprimate ca praguri în ceea ce privește *frecvența de cedare a componentei* sau *valoarea de reducere a riscurilor* sau *valoarea de realizare a riscurilor*. Fiecare componentă este plasată în locul potrivit într-o matrice de caracterizare a riscului. Componentele care urmează a fi selectate pentru programul de inspecție, se bazează pe caracterizarea riscului ansamblului de care aparține fiecare element.

Inspecția componentei selectate

În această etapă, se definesc și se revizuiesc cerințele de inspecție. Sunt selectate locațiile specifice pentru programul de inspecție, locații determinate pe baza clasamentului de risc în care se încadrează componenta și un set de considerente practice care țin seama de fezabilitatea și eficiența inspecției. Numărul de locații selectate pentru inspecție trebuie să fie în funcție de metodologia RI-ISI selectată pentru utilizare. Pentru locațiile selectate pentru inspecții NDE (examinări nedistructive), inspecțiile sunt axate pe tipul de mecanism de degradare identificat anterior. Capacitatea de a ne concentra inspecția asupra mecanismului de cedare, sporește eficiența acesteia. Printre locațiile în care se efectuează inspecția, indiferent de clasificarea riscurilor și de rezultatele selecției sunt, de obicei, elementele supuse la cele mai mari solicitări, mecanice, termice, acțiunea mediului, și care, prezintă consecințele cele mai nefavorabile la cedare.

Evaluarea impactului riscului cedării asupra modificării programului de inspecție

Pasul final privind punerea în aplicare a unui program de RI-ISI ia în considerare impactul unei inspecții asupra siguranței în exploatare (de exemplu, schimbarea coeficientului de risc). Ar trebui să se confirme faptul că, selecția inițială a componentelor pentru programul RI-ISI nu produce un impact nefavorabil și inacceptabil asupra riscului. În funcție de aplicația RI-ISI și a rezultatelor acesteia, pot fi dezvoltate criterii calitative, estimări de încadrare a impactului de risc, sau estimări realiste a impactului de risc. Dacă apare un impact de risc inacceptabil, pot fi necesare ajustări privind selecția componentelor evaluate în vederea îndeplinirii criteriilor de acceptare. Metodologia RI-ISI utilizată, însoțită de criteriile de acceptare, va fi cel mai probabil determinată de condițiile specifice de funcționare ale întregii instalații precum și de pachetul de reglementări specifice.

Gestionarea pe termen lung a unui program de RI-ISI

Ultimul pas al procesului de inspecție îl reprezintă documentarea programului RI-ISI și punerea în aplicare a strategiilor de monitorizare. Frecvența și conținutul actualizărilor vor fi convenite de către beneficiar și organul de reglementare. Cu toate acestea, aceste actualizări pot fi mai frecvente în cazul în care sunt necesare noi actualizări la ESP (Evaluarea Siguranței Probabilistice) sau în cazul în care sunt identificate noi mecanisme de degradare.

În plus, deoarece pot apare modificări ale instalațiilor, acestea induc parametri diferiți la intrările asociate cu RI-ISI. Câteva exemple de astfel intrări ar include:

- Caracteristicile de funcționare (de exemplu, modificări ale parametrilor apei);

- Modificări de material și de configurație;
- Modificări ale tehnicilor de sudură și a procedurilor asociate acestora;
- Rezultate ale examinărilor de pre-service;
- Date de exploatare (moduri de operare, presiune, schimbări de temperatură).

3.3. Analiza pericolelor potențiale

Evaluarea din timp și continuă a gradului de risc pentru un anumit produs este benefică în ceea ce privește corectarea greșelilor și permite, pe viitor, proiectarea unei structuri cu o probabilitate scăzută în a produce o vătămare utilizatorului.

Un proces total de management a riscurilor în Inginerie cuprinde câțiva pași esențiali, reprezentați în *figura 3.2*. Pentru a putea controla riscurile, este necesar ca întâi să fie identificate pericolele. Prin evaluarea potențialelor consecințe ale pericolelor și a probabilității ca ele să apară, se poate estima un grad de risc. Valoarea acestuia este comparată cu un criteriu de acceptabilitate, iar dacă este prea mare, se implementează strategii pentru diminuarea lui, [6], [7]. Riscul nu poate fi eliminat complet, de aceea riscul rămas trebuie controlat. Înaintea realizării unui model final al unui produs, se face o analiză preliminară pentru determinarea principalelor pericole asociate produsului respectiv. În esență, analiza constă din separarea componentelor principale și a cerințelor de funcționare ale dispozitivului și evaluarea potențialelor pericole legate de acestea.

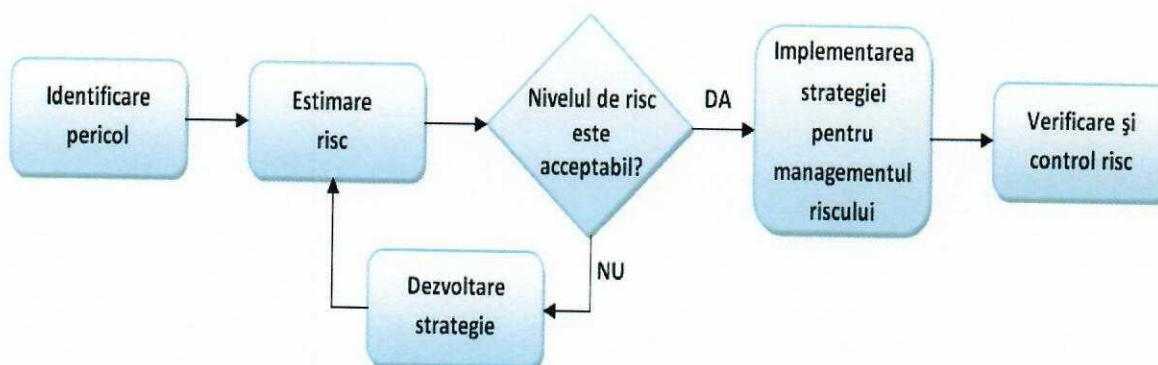


Fig. 3.2. Pași de urmat în Ingineria riscului.

De exemplu, componentele dispozitivului se referă la: materiale metalice, sisteme de monitorizare și control, interfața om - mașină, diferite servicii și facilități, mediul în care va funcționa, etc. Pericolele semnificative care ar trebui analizate sunt: toxicitatea, inflamabilitatea, reactivitatea materialelor, sensibilitatea la factorii de mediu (temperatură, umiditate), pericole legate de componentele mecanice, electrice sau electronice, factorii umani asociați cu interfața de comunicare om-mașină.

La efectuarea unei analize preliminare a riscurilor se recomandă: luarea în calcul a tuturor scenariilor și situațiilor care pot conduce la apariția unui pericol, evaluarea potențialelor consecințe și dezvoltarea unei strategii de management a riscului. Aceste strategii ajută la proiectarea unui dispozitiv mai sigur, mai eficient și mai ieftin. Analiza scenariilor se face în funcție de gravitatea pericolului [6]. Dacă nu există suficiente detalii care să permită o analiză aprofundată, se pot face comparații cu dispozitive similare și pot fi analizate rapoarte referitoare la acestea. Un rezultat

nesatisfăcător al analizei, determină schimbări majore în design-ul dispozitivului. Scopul este eliminarea pericolelor cu un grad ridicat de risc și reducerea, pe cât posibil, a pericolelor cu grad mediu și scăzut de risc.

În timpul prototipizării se pot efectua analize a riscului sau a pericolului mult mai detaliate. În acest stadiu al proiectării sunt la îndemână modelele 3D, fiind definite principalele caracteristici de funcționare.

3.4. Analiza efectelor unei defecțiuni (AED)

Acest demers constituie o abordare “de jos în sus”, ce presupune existența unui defect la nivel de componentă, apoi evaluarea efectelor și identificarea potențialelor soluții. Se recomandă să se facă încă din faza de proiectare a dispozitivului și la fiecare etapă de verificare a acestuia, cu rolul de a identifica eventualele erori de proiectare, [8].

Există două tipuri de *AED*: prima se concentrează pe ce ar putea merge prost la un dispozitiv, atât în faza de fabricație cât și în timpul funcționării, din cauza unei greșeli de proiectare; cea de-a doua se concentrează pe analizarea motivelor apariției unei defecțiuni în timpul funcționării sau fabricației. O *AED* poate fi sintetizată ca în *tabelul 3.1*.

Tab. 3.1. Analiza efectelor unei defecțiuni

Funcție sau componentă	Mod defectare	Efect asupra sistemului	Posibile pericole	Index de risc	Mijloace de detectare	Măsurile de protecție
Izolație transformator T1	Scurt-circuit între primar și secundar	Pierderi în alimentare cu energie, oprirea operării sistemului.	Șoc asupra utilizatorului, foc, defectare a altor componente	5	Becurile de semnalizare a lipsei de alimentare cu energie electrică nu se aprind.	Siguranțe primare. Transformatorul are în componență materiale aprobate. Carcasa este legată la masă.
(Etc.)						

La derularea analizei efectelor unei sau a mai multor defecțiuni, se recomandă parcurgerea următoarelor etape:

- Definirea funcționării dispozitivului analizat;
- Identificarea tuturor posibilelor defecțiuni;
- Determinarea cauzelor defecțiunilor;
- Determinarea efectelor posibilelor defecțiuni;
- Atribuirea unui index de risc pentru fiecare tip de defecțiune în parte;
- Implementarea celor mai potrivite măsuri de corectare / prevenire;
- Monitorizarea implementării făcute, pentru asigurarea efectului scontat.

În tabelul 3.2 se prezintă valori ale indicelui de risc în funcție de gradul de severitate:

Tab. 3.2. Criterii de alegere a valorilor indexului de risc

Probabilitate de apariție	Grad de severitate I Catastrofal (moarte, vătămare gravă)	Grad de severitate II Semnificativ (vătămare gravă, cu posibilitate de recuperare)	Grad de severitate III Marginal (inconveniențe)	Grad de severitate IV Neglijabil
Frecvent	1	3	7	13
Probabil	2	5	9	16
Ocazional	4	6	11	18
Singular	8	10	14	19
Improbabil	12	15	17	20

Pentru aplicarea unitară a modelului de analiză a riscului, se pot utiliza și standarde. Un exemplu de astfel de standard este ANSI/AAMI/ISO 14971. Acesta folosește o abordare similară cu cea de mai sus, dar definește trei zone de risc: zona acceptată, nedorită, și intolerabilă.

3.5. Modele probabilistice pentru evaluarea riscului

Modelele probabilistice cantitative sunt construite cu ajutorul teoriei bazată pe *procesele fizice*. Modelele probabilistice pure introduc descrierea parametrilor modelului și interacțiunea acestora prin *variabile aleatorii*. Aceste modele se bazează pe următoarele metode:

- Metoda binomială;
- Metoda Monte-Carlo;
- Metode bazate pe procese Markov cu parametru continuu;
- Metode bazate pe procese Markov cu parametru discret;
- Metode bazate pe enumerarea exhaustivă a stărilor sistemului;
- Metode bazate pe utilizarea formulei probabilității totale;
- Metode bazate pe mulțimea legăturilor și tăieturilor minimale;
- Metode bazate pe ridicarea la putere a matricei de conexiune;
- Metode bazate pe reducere succesivă a mărimei matricei de conexiune;
- Metoda căilor adiționale.

Toate modelele sunt reprezentări idealistice ale realității dar, prin îmbunătățiri, modele se pot apropia totuși cât mai mult de realitate.

BIBLIOGRAFIE

- [1] D. Cioclov, Probabilistic fracture mechanics and quantitative non-destructive testing approach to aircraft structures, 5th Int. Conference Structural Integrity of Welded Structures (ISCS2007), Timisoara, Romania, 20-21 Nov 2007.

- [2]***, Risk Based Inspection of Offshore Topsides Static Mechanical Equipment, 2010, <http://www.dnv.com> is
- [3] M. H. Faber, Risk Assessment in Engineering Principles, System Representation & Risk Criteria, Joint Committee on Structural Safety 2008.
- [4] ***, Application of non-destructive testing and in-service inspection to research reactors, International Atomic Energy Agency, 2001.
- [5] ***, International Atomic Energy Agency, Methodology for qualification of in-service inspection systems for WWER nuclear power plants, IAEA-EBP-WWER-11, Vienna, 1998.
- [6] ***, Discussion Document on Risk-Informed In-Service Inspection of Nuclear Power Plants in Europe, EUR 19742 EN, 2000.
- [7] C. Matthews, Handbook of Mechanical Works Inspection, Professional Engineering Publishing, London, 2001.
- [8] Z. Jinglun, S. Quan, Reliability analysis based on binary decision diagrams, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 4 No. 2, 1998.

CAPITOLUL 4. MATRICEA DE RISC

4.1. Introducere

4.2. Noțiunea de risc acceptabil

4.3. Clase de probabilitate și consecințe în cadrul matricei de risc

4.4. Niveluri de risc determinate pe baza matricei de risc

4.5. Exemple de aplicare a matricei de risc

4.1. Introducere

Matricea de risc este o reprezentare grafică sau tabelară, furnizând o construcție logică ce urmărește plasarea unei defecțiuni posibile într-o zonă de pericol mai mare sau mai mic. Această reprezentare grafică poate fi utilizată pentru a clasifica riscurile în ordinea importanței, neglijându-le pe cele nesemnificative și propunând măsuri de ameliorare pentru cele cu grad ridicat de risc.

O matrice de risc, utilizează, în mod obișnuit, de la 3 la 6 categorii, atât pentru probabilitate (frecvență) cât și pentru consecințe. Există puține standardizări în materie referitoare la dimensiunea matricei, categorii de risc, etichetarea axelor, etc. Matricea de risc dă o anumită formă de evaluare sau de clasificare a riscului provenind de la manifestarea unui anumit pericol. Se pot utiliza indicii numerice pentru probabilitate (frecvență) și consecințe (de exemplu 1 la 5). Se formează apoi casete de perechi, fiecăruia dintre acestea îi corespunde o anumită clasă de risc. În acest fel, se cuantifică riscurile, acest tip de clasificare fiind mai degrabă unul calitativ. Totuși, încadrarea într-o anumită zonă, mai mult sau mai puțin periculoasă relativ la standardele impuse, oferă indicii asupra pașilor de urmat: întreprinderea de acțiuni pentru reducerea riscurilor, ameliorarea acestora sau, pentru cele ce prezintă risc mic, doar ținerea sub observație a evenimentelor.

În cadrul unui sistem și între sub-sistemele sale respectiv între elementele funcționale și fizice de diferite dimensiuni există interacțiuni ce prezintă risc, cum ar fi de interacțiunea fizică, schimbul de informații, transfer de material și schimb de energie. Aceste interacțiuni sunt de o complexitate multidimensională, și nu pot fi cuprinse în totalitate în cadrul managementului convențional. În aceste cazuri sunt propuse tehnici alternative de reprezentare și analiză a sistemului pentru a gestiona riscul și a menține sub control interacțiunile nesigure și imprecise, utilizându-se în special structuri sub formă de matrice și grafice ce utilizează logica fuzzy.

Analiza riscului sau a pericolului este o metodă structurată pentru evaluarea potențialelor probleme care pot surveni în urma utilizării diverselor tipuri de produse/dispozitive/instrumente.

Analiza riscurilor trebuie realizată pe baza următoarelor considerente:

- Identificarea erorilor de proiectare a unor componente/dispozitiv/structuri, înainte de comercializare și darea în folosință, reduce semnificativ costurile prin eliminarea posibilității de cedare sau returnare de către utilizator.
- Utilizatorul beneficiază de protecție, asigurată de un certificat ce garantează siguranța componentei/dispozitivului/structurii;

- Există reglementări standardizate internaționale care se ocupă cu validarea din punct de vedere al siguranței;
- Acest demers reprezintă un lucru normal și benefic.

Nu există sistem în care să fie exclus complet pericolului potențial, apărând întotdeauna un risc „rezidual”, fie și numai datorită imprevizibilității acțiunii omului. Dacă nu se fac intervenții corectoare pe parcurs, acest risc rezidual crește, pe măsură ce elementele sistemului se degradează. Ca urmare, sistemele pot fi caracterizate prin „niveluri de securitate”, respectiv „niveluri de risc”, pe bază de indicatori cantitativi ai stărilor de securitate, respectiv de risc. Definind securitatea ca o funcție de risc: $S=f(R)$, unde $S = 1/R$, se poate afirma că un sistem va fi cu atât mai sigur, cu cât nivelul de risc va fi mai mic și reciproc. Astfel, dacă riscul este zero, din relația dintre cele două variabile rezultă că securitatea tinde către infinit, iar dacă riscul tinde către infinit, securitatea tinde către zero, *figura 4.1*, [1].

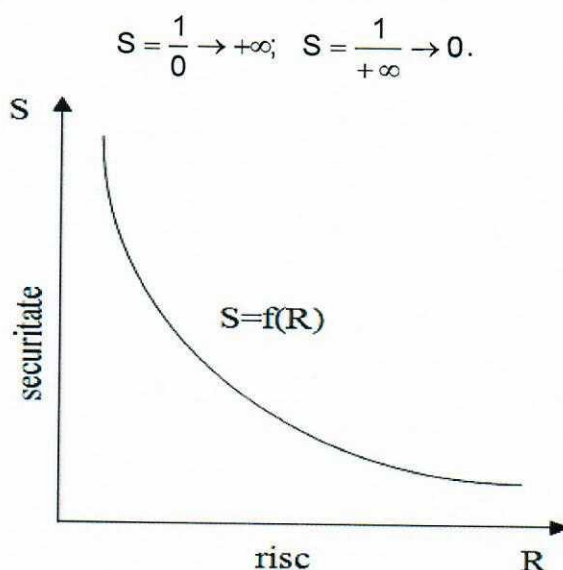


Fig. 4.1. Relația risc – securitate

În acest context, în practică trebuie admise, o limită de risc minim, respectiv un nivel al riscului diferit de zero, dar suficient de mic pentru a se considera că sistemul este sigur, ca și o limită de risc maxim, care să fie echivalentă cu un nivel atât de scăzut de securitate, încât să nu mai fie permisă funcționarea sistemului.

4.2. Noțiunea de risc acceptabil

Riscul a fost definit prin probabilitatea cu care, în cadrul unui sistem, se produce un eveniment nedorit, cu o anumită frecvență și gravitate a consecințelor.

Dacă admitem un anumit risc, putem să-l reprezentăm, în funcție de probabilitatea de producere și gravitatea consecințelor, prin suprafața unui dreptunghi R_1 , dezvoltat pe verticală; aceeași mărime a suprafeței poate fi cuprinsă și într-un pătrat R_2 sau într-un dreptunghi R_3 extins pe orizontală, *figura 4.2*.

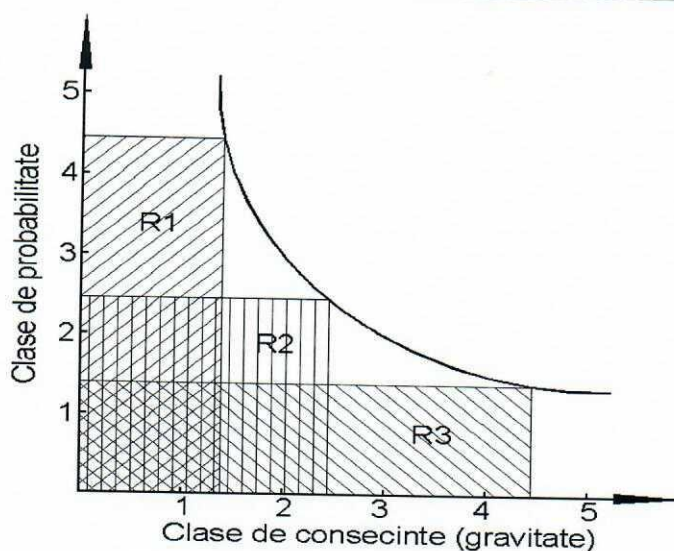


Fig. 4.2. Reprezentarea grafică a echivalenței riscurilor caracterizate prin cupluri diferite de probabilitate – consecințe (gravitate) [1]

În toate cele trei cazuri riscul este la fel de mare. În consecință, putem atribui același nivel de risc unor cupluri diferite de probabilitate-consecințe. Dacă trasăm o curbă prin cele trei colțuri libere ale figurilor geometrice menționate anterior, aceasta va avea o alură de hiperbolă, care descrie legătura dintre cele două variabile: probabilitate – consecințe (gravitate). Pentru reprezentarea riscului funcție de probabilitate și gravitate, standardul CEN-812/85 definește o astfel de curbă drept „curbă de acceptabilitate a riscului”, *figura 4.3*.

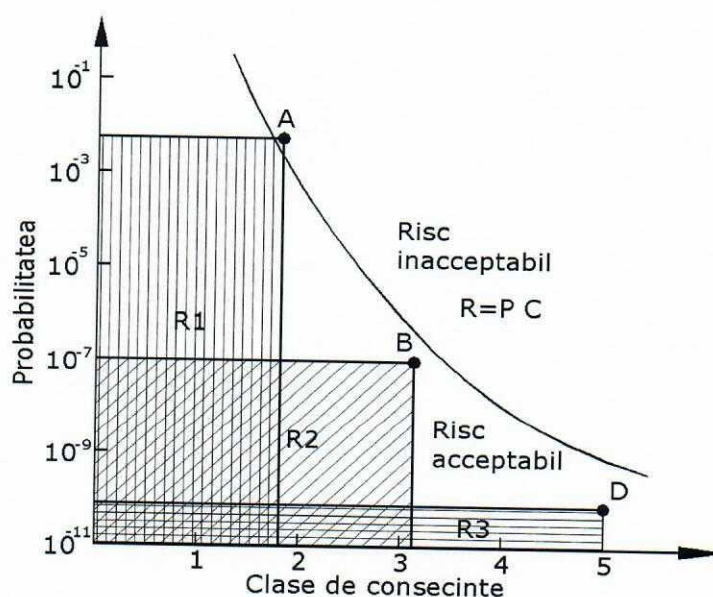


Fig. 4.3. Curba de acceptabilitate a riscului

Această curbă permite diferențierea între riscul acceptabil și cel inacceptabil. Astfel, riscul de producere a unui eveniment A, ce prezintă o probabilitate mare de manifestare dar având consecințe mai puțin grave, este situat peste curba de acceptabilitate, și, ca urmare este considerat inacceptabil, iar riscul evenimentului B, cu o probabilitate mai mică de apariție dar ale cărei consecințe sunt mai grave, îl face, totuși, să se situeze sub curbă, devenind astfel acceptabil.

De exemplu, în cazul unei centrale atomice, se iau astfel de măsuri încât riscul unui eveniment nuclear – fie el riscul evenimentului D, figura 4.3 – să fie caracterizate printr-o probabilitate de producere extrem de mică având totuși o gravitate extremă a consecințelor. Din cauza probabilității foarte reduse de materializare, activitatea este considerată sigură și riscul este acceptat de societate.

În schimb, dacă pentru riscul evenimentului A luăm ca exemplu accidentul rutier din activitatea unui conducător auto, deși acest tip de eveniment provoacă consecințe mai puțin grave decât un accident nuclear, probabilitatea de producere este mare (frecvență ridicată), încât locul de muncă al șoferului este considerat nesigur (risc inacceptabil).

Orice studiu de securitate are drept obiectiv stabilirea riscurilor acceptabile. O asemenea tratare a riscului ridică două probleme:

- cum se stabilesc coordonatele riscului: cuplul probabilitate-consecințe?;
- ce coordonate ale riscului se vor alege pentru a delimita zonele de acceptabilitate de cele de inacceptabilitate?.

Pentru a le rezolva, premiza de la care se pornește în elaborarea metodei de evaluare a fost relația risc – factor de risc.

4.3. Clase de probabilitate și consecințe în cadrul matricei de risc

În funcție de efectul lor, riscurile pot fi clasificate în următoarele categorii [2]:

- riscuri reduse (obișnuite sau triviale), care au o frecvență mică de apariție, dar pot fi suportate fără dificultate;
- riscuri moderate, care au o frecvență medie de apariție și pot fi gestionate cu anumite costuri;
- riscuri ridicate (critice sau majore), care au o frecvență mare de apariție, însă cu efecte nedorite; este necesară gestionarea atentă a acestora, pe o perioadă mai lungă de timp;
- riscuri inacceptabile, care sunt cele mai rare dar cu efecte foarte periculoase.

Tab. 4.1. Clasele de probabilitate de apariție (P)

Clasa	Valoarea estimată a probabilităților	Interpretarea probabilității	Caracterizarea probabilității	Caracterizarea nivelului de risc
1	(0 – 20)%	foarte puțin probabil ca riscul să se producă	foarte mică	suficient de prevenit
2	(21 – 40)%	puțin probabil ca riscul să se producă	scăzută	este prevenit
3	(41 – 60)%	chiar probabil ca riscul să se producă	medie	se poate preveni cu acțiuni suplimentare
4	(61 – 80)%	probabil ca riscul să se producă	mare	nu se poate preveni, se impune o altă abordare
5	(80 – 100)%	foarte probabil ca riscul să se producă	foarte mare	nu se poate preveni, nu sunt alternative

Orice activitate, respectiv orice decizie, implică un risc care trebuie apreciat/măsurat prin calculul unei probabilități privind apariția pierderilor, neobținerea performanțelor (beneficiu/profit) dorite. Una dintre metodele de analiză a riscului este **matricea de risc** ce are ca scop stabilirea categoriei de impact al riscului: scăzut, mediu sau ridicat. Această metodă constă din încadrarea riscului considerat în cinci clase referitoare la **probabilitatea de apariție** (tabelul 4.1) și în cinci clase privind **consecințele riscului** (tabelul 4.2) [3].

Tab. 4.2. Clase de consecințe (C)

Clasa	Efect	Definire	Nivel tehnic	Activități	Nivel cost
1	neglijabil	Dacă riscul se produce, atunci nu vor fi efecte, se îndeplinesc toate cerințele.	- minim - fără impact	- minime - fără impact economic	- minim - fără impact
2	minor	Dacă riscul se produce atunci vor apărea creșteri minime.	- moderat - reduceri minime	- activități suplimentare - se pot rezolva	- bugetul crește cu până la 5%
3	moderat	Dacă riscul se produce, atunci programul va înregistra creșteri modeste.	- modest - reduceri	- activități multiple - se depășește termenul	- bugetul crește între 5 – 7%
4	serios	Dacă riscul se produce, atunci programul va înregistra creșteri majore.	- reduceri majore	- impact economic/tehnic critic	- bugetul crește între 7 – 10%
5	critic	Dacă riscul se produce, atunci programul va eșua.	- inacceptabil - nu sunt alternative	- nu se poate realiza	- bugetul crește cu peste 10%

În conformitate cu clasa aleasă, se consideră o valoare P_a pentru probabilitatea de apariție a riscului. Determinarea consecințelor riscului se face pe baza experienței, cu aplicație pentru costurile concrete, respectiv problemele tehnice și de planificare specifice proiectului.

4.4. Niveluri de risc determinate pe baza matricei de risc

Dacă luăm în considerare toate combinațiile posibile ale claselor de probabilitate și consecințe, obținem o matrice $M_{p,c}$ cu 5 linii – p, care vor reprezenta clasele de probabilitate de apariție, și 5 coloane – c, respectiv clasele de consecințe [4]:

$$M_{p,c} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{51} & \cdots & a_{55} \end{bmatrix}$$

Clasa determinată pentru nivelul probabilității de apariție și clasa consecințelor determină **categoria de impact al riscului** asupra scopului (țintei) prin folosirea diagramei riscului. Reprezentând grafic (figura 4.4) matricea în cadrul unui sistem de coordonate rectangulare obținem un dreptunghi a cărui bază (abscisa) constituie mulțimea claselor de consecințe, înălțimea (ordonata) – clasele de probabilitate, iar suprafața sa: mulțimea nivelurilor de risc posibile. Cu

ajutorul fiecăruia dintre cupluri descriem un dreptunghi în care considerăm că figurează un risc; fiecărei micro-suprafețe îi vom atribui un nivel de risc.

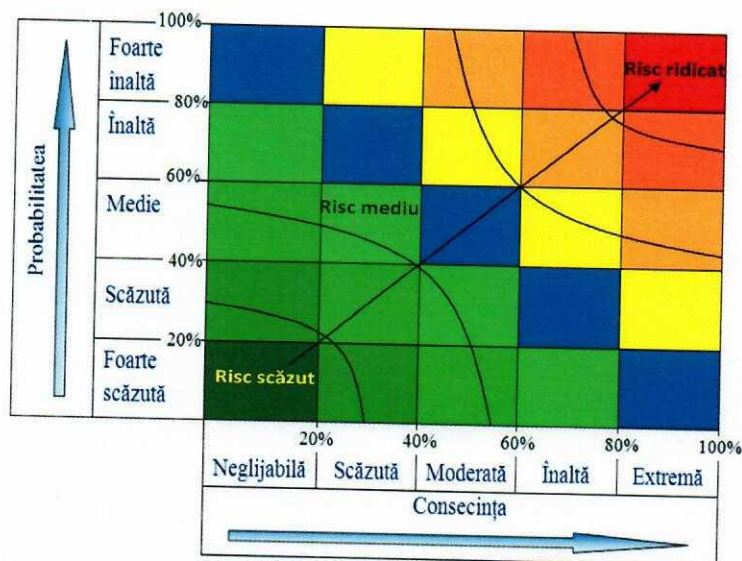


Fig. 4.4. Diagrama (matricea) de risc

Observație: atât pe axa C, cât și pe axa P, clasele corespunzătoare au fost figurate prin segmente egale, deși diferențele între gravitatea evenimentelor de la o clasă la alta, cât și intervalele de timp în cazul claselor de probabilitate, pe baza cărora s-au determinat, nu sunt egale;

Măsurile recomandate pentru combaterea/diminuarea efectelor riscului analizat în raport cu categoria de risc sunt:

- **pentru risc scăzut** – se recomandă monitorizarea continuă;
- **pentru risc mediu** – se recomandă acțiuni de combatere, inclusiv considerarea alternativelor;
- **pentru risc ridicat** – se implementează noi procese sau se schimbă planul.

Prin suprapunerea succesivă, în anumite condiții, a curbei de acceptabilitate a riscului cu reprezentarea obținută pentru mulțimea nivelurilor de risc, se poate stabili încadrarea cuplurilor pe **niveluri de risc**, așa cum se poate vedea un exemplu în figura 4.5, [5, 6].

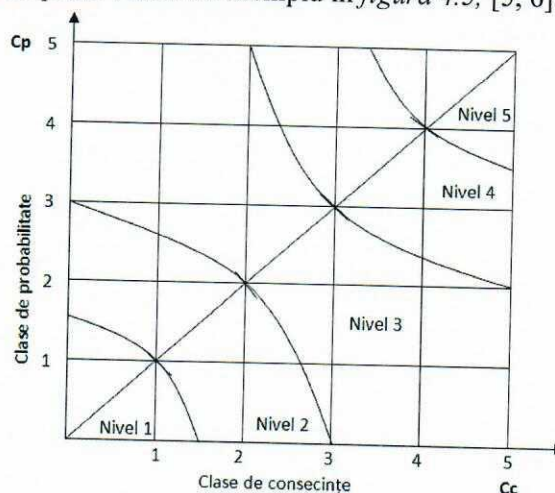


Fig. 4.5. Trasarea curbelor nivelurilor de risc.

Stabilirea punctelor prin care se trasează curbele de nivel; curba de nivel 1 (risc minim acceptabil)

Menținând logica reprezentării prin segmente egale a claselor, rezultă că și curbele care delimitează nivelurile de risc trebuie să fie echidistante. În consecință, împărțim diagonala mare a dreptunghiului, care semnifică suma mulțimilor nivelurilor de risc, în 5 segmente egale, prin care se vor trasa curbele.

Suprafața care este delimitată de laturile dreptunghiului și de curba trasată va reprezenta nivelurile de risc. Toți factorii de risc ce pot fi caracterizați prin cupluri ale căror coordonate generează puncte situate în interiorul suprafeței astfel delimitate sau pe curbă vor fi considerați de nivel k de risc, respectiv $6-k$ de securitate.

4.5. Exemple de aplicare a matricei de risc

Scopul principal al analizei factorilor de risc pentru un produs cu pericol potențial îl constituie identificarea din timp a caracteristicilor necorespunzătoare ale produsului respectiv, care pot influența nefavorabil siguranța în exploatare și performanțele acestuia, afectând negativ eficiența utilizării cu posibilitatea apariției pericolului de accidente. Odată identificate, aceste caracteristici trebuie eliminate, sau efectele lor minimizate, prin modificări, atât în proiectare cât și în fabricație, înainte ca produsul să fie comercializat [7].

4.5.1. Identificarea potențialelor pericole și trasarea unei matrice de risc pentru o automacara cu nacelă, figura 4.6

Caracteristicile de lucru:

1. Înălțime de lucru 18 m;
2. Sarcina utilă în nacela 230 kg;
3. Dimensiuni nacela 0.76x1.83 m;
4. Regim maxim lateral 10 m;
5. Rotire ansamblu continuu;
6. Rotire nacela față de braț +/-90°;
7. Articulație JIB vertical 1.83m 140°;
8. Dimensiuni echipament (Lxlxh) 8.84 x 2.34 x 2.39m;
9. Înălțimea maximă permisă pentru deplasare / max. 16.02 m / 0.6km/h;
10. Viteza maximă de deplasare cu nacela coborâtă 7.20 km/h;
11. Panta maximă admisă 45°;
12. Raza de bracăj (interior/exterior) 2.03/4.88m;
13. Gardă la sol 0.32 m;
14. Masa totală 7.200 kg.

Specificații tehnice standard:

1. Nacela cu podea antiderapantă, trusa cu sertar pentru scule în nacela;
2. Propulsie cu motor Diesel Deutz F3M1011F 47.6CP și auxiliară (de urgență) 12V DC;
3. Anvelopă 14x17.5 ;
4. Sistem automat de control pentru suprasarcină, comanda de coborâre de urgență;

5. Linie 220V în nacela (alimentare la baza), contor orar

6. Sistem automat cu punte oscilantă pentru deplasare în teren accidentat. Tracțiune integrală (4x4) permanentă;

7. Control proporțional electronic de la bază și din nacelă cu Joystick, interblocabil cu cheie și oprire de urgență. Telecomanda fixă, multicomanda simultană.

Pe baza analizei funcționării acestui produs reprezentativ pentru zona instalațiilor de ridicat și transportat, au fost identificate următoarele pericole legate de:

- *circuit hidraulic*
 - a₁ – conducte; a₂ – racorduri; a₃ – supape; a₄ – garnituri;
- *sistem frânare*
 - b₁ – cablu frână; b₂ – saboți; b₃ – cilindru;
- *motor termic*
 - c₁ – sistem alimentare combustibil; c₂ – circuit electric aferent; c₃ – componente cameră ardere; c₄ – distribuție; c₅ – circuit răcire; c₆ – circuit ungere;
- *transmisie*
 - d₁ – cutie viteze; d₂ – ambreiaj; d₃ – transmisii cardanice; d₄ – articulații;
- *nacelă*
 - e₁ – sisteme siguranță mecanică; e₂ – podea antiderapantă; e₃ – izolație electrică; e₄ – blocare sistem comenzi; e₅ – articulații și susținere;
- *sisteme și mecanisme de siguranță*
 - f₁ – sistem pentru înălțimea maximă permisă pentru deplasare; f₂ – sistem pentru viteza maximă de deplasare cu nacela coborâtă; f₃ – sistem pentru panta maximă admisă; f₄ – sistem automat cu punte oscilantă pentru deplasare în teren accidentat;
- *sisteme de control*
 - g₁ – control proporțional electronic de la bază și din nacelă; g₂ – cheie și sistem oprire de urgență; g₃ – telecomanda fixă, g₄ – multicomanda simultană; g₅ – sistem automat de control pentru suprasarcină; g₆ – comanda de coborâre de urgență;
- *mecanisme de rotire*
 - h₁ – mecanism rotire ansamblu; h₂ – mecanism rotire nacelă față de braț;
- *sistem direcție*
 - i₁ – articulații; i₂ – pivoți; i₃ – bielete; i₄ – brațe;
- *roți*
 - j₁ – pneuri; j₂ – jenți; j₃ – prezoane.

Atribuirea gradului de severitate a riscului pentru fiecare defecțiune / pericol în parte se face cu ajutorul matricei de risc din *figura 4.7*. Criteriul de poziționare în matricea de risc, ține seama de doi factori principali: gradul de severitate și probabilitatea de apariție. Acești factori sunt ordonați crescător de la stânga la dreapta, respectiv de jos în sus.

Severitățile, bazate pe impactul pericolelor potențiale, sunt următoarele:

- catastrofal – pierderea vieții;
- critic – accident grav;
- major – accident-serios, defecțiune gravă - nefuncționare, inconvenient major;
- marginal - accident minor, defecțiune cu funcționare, inconvenient cu posibilitate de deplasare în continuare;
- neglijabil – defecțiune minoră cu funcționare, inconvenient minor.

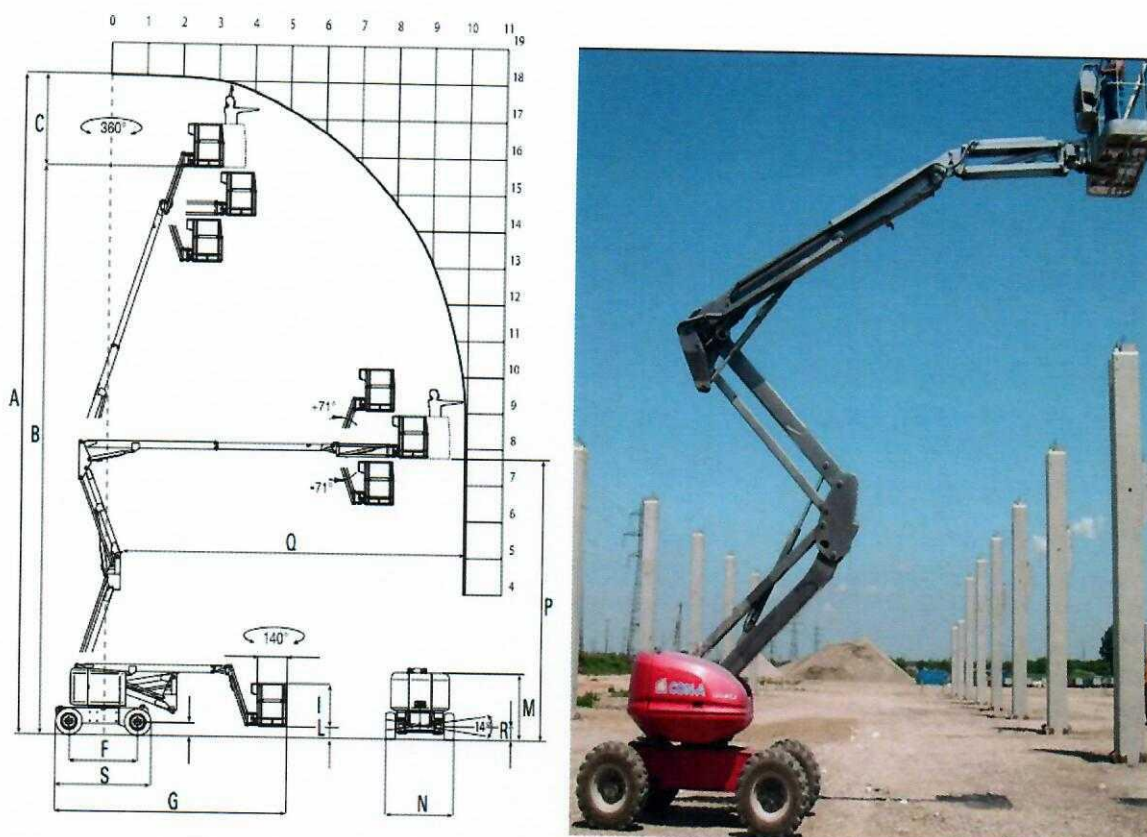


Fig. 4.6. Nacelă autoridicătoare cu braț telescopic model JLG 460SJ

Probabilitatea de apariție	Foarte des					
	Frecvent		c_5, g_3	c_2, i_2	b_2	g_2
	Ocazional	g_4, a_4	c_1, c_6, g_2	a_3, d_1, e_2, j_1	a_1, f_4, i_1	b_1, e_1, e_5, f_3
	Singular	g_1	c_4, d_2, g_5	c_3, f_1, g_6	a_2, b_3, d_3, i_3	d_4, e_3, f_2
	Improbabil		h_1	h_2, j_2	e_4, i_4, j_3	
		Neglijabil	Marginal	Serios	Critic	Catastrofal
Gradul de severitate (consecințe)						

Fig. 4.7. Matricea de risc inițială pentru autonacelă

Matricea cuprinde trei zone principale, după cum urmează: zona verde (zonă acceptată), zona galbenă, (zonă nedorită), zona roșie (zonă intolerabilă). Prin implementarea măsurilor de corectare / prevenire se urmărește trecerea, din zona roșie spre zonele galben și verde, a tuturor factorilor de risc.

Măsurile aplicate în vederea diminuării gradului de severitate al factorilor de risc

În funcție de potențialele pericolele identificate mai sus, propunem următoarele soluții de reducerea a gradului de severitate al acestora:

- a_1 → îmbunătățire material conducte;
- a_2 → îmbunătățire material racorduri și reproiectare;
- a_3 → verificare presiune diferențiată în sistemul hidraulic;
- a_4 → îmbunătățire material garnituri;
- b_1 → redimensionarea și ungerea cablului de frână;
- b_2 → control periodic saboți;
- b_3 → evaluare și control transmisie;
- c_2 → verificare periodică la componentele electrice;
- c_4 → înlocuire ulei și urmărire uzuri;
- c_5 → verificare nivel lichid răcire;
- c_6 → verificare nivel ulei;
- d_3 – verificare și mentenanță transmisii cardanice;
- d_4 – verificare și mentenanță articulații;
- e_1 → îmbunătățire proiectare;
- e_3 → fixare corespunzătoare și proprietăți îmbunătățite;
- e_5 → caracteristici de izolație superioare;
- f_1, f_2, f_4 → control și verificare senzori;
- f_3 – îmbunătățire sistem pentru panta maxima admisă;
- g_2 – îmbunătățire sistem cu cheie și sistem oprire de urgență;
- g_5, g_6 → echipamente electrice de siguranță auxiliare;
- h_1 → îmbunătățire proiectare;
- h_2 → evaluare și control mecanism;
- i_1, i_2 → verificare periodică și reparare;
- j_1 → verificare stare.

În urma implementării măsurilor de corectare/prevenire, enumerate mai sus, s-a reușit eliberarea zonei roșii (intolerabilă) de potențialii factori de risc (figura 4.8), iar numărul factorilor de risc din zona verde a crescut semnificativ.

Probabilitatea de apariție	Foarte des					
	Frecvent		g_3			
	Ocazional	g_4	c_1, c_5, g_2	c_2, d_1, e_2		
	Singular	a_4, g_1	d_2	c_3, i_2, j_1	$b_2, f_3, f_4, i_1, i_3, g_2$	
	Improbabil		c_4, c_6, h_1, g_5	a_3, h_2, j_2, f_1, g_6	$a_1, a_2, d_3, b_3, e_4, i_4, j_3$	$b_1, d_4, e_1, e_3, e_5, f_2$
		Neglijabil	Marginal	Serios	Critic	Catastrofal
Gradul de severitate (consecințe)						

Fig. 4.8. Matricea riscurilor pentru autonacelă, după implementarea măsurilor de corectare / prevenire

Ca urmare a analizei efectuate și a rezultatelor obținute, putem afirma că ne-am atins scopul: acela de a avea o automacara mai sigură și funcțională.

Pentru cele mai multe dintre componente se acționează în sensul diminuării probabilității de materializare a defectului sau funcționării defectuoase. De exemplu, a_1 (conduce circuit hidraulic) din punct de vedere al probabilității de materializare trece de la ocazional la improbabil, având același impact (catastrofal) dacă, totuși, conducta s-ar fisura. Pentru f_3 (sistem pentru panta maximă admisă) prin îmbunătățirea sistemului, din punct de vedere al probabilității de materializare aceasta trece de la ocazional la singular. Prin îmbunătățirea sistemului bazată pe reproiectare, se poate schimba și impactul funcționării defectuoase, de la catastrofal la critic. Ca urmare, pe baza măsurilor de corectare/prevenire prin reproiectare, mentenanță, prevederi clare în cartea tehnică de reparații, verificări și utilizare, se pot schimba atât probabilitatea de materializare cât și gradul de severitate (impactul).

4.5.2. Trasarea unei matrice de risc pentru o volantă bimasică, figura 4.9

Datorită proceselor de ardere din motoarele cu pistoane, sunt induse vibrații/oscilații de torsiune în cinematica transmisiei. Ca urmare, iau naștere zgomote și vibrații, de ex. zornăit în cutia de viteze, vibrații în caroserie, care afectează nivelul de zgomot și de confort în utilizare [8, 9].

Scopul dezvoltării volanțelor bimasice a fost acela de a se înlătura oscilațiile care iau naștere datorită maselor în mișcare ale motorului pentru obținerea unei funcționări silențioase a grupului propulsor. Volanta bimasică preia oscilațiile de torsiune prin sistemul integrat arcuri/sistem de amortizare și le absoarbe aproape în totalitate. Rezultatul constă dintr-o foarte bună izolare a vibrațiilor.

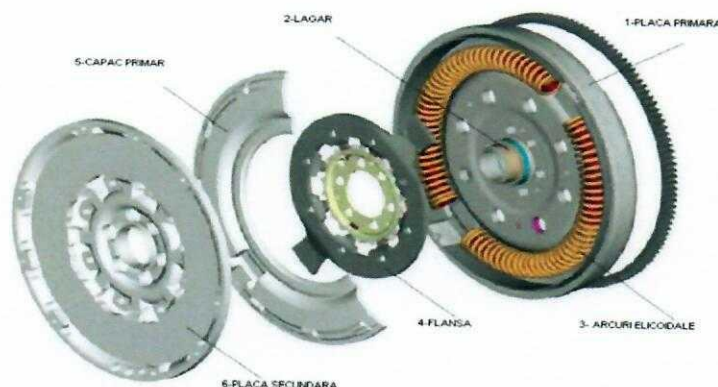


Fig. 4.9. Structura volanței bimasice.

Cele doua mase inerțiale ale volanței sunt legate printr-un sistem elastic/amortizat și printr-un lagăr cu role sau cu alunecare (2) ce permite rotirea acestora. Masa primară prevăzută cu coroana dințată aparține de motor și este montată (îmbinare cu șuruburi) pe arborele cotit. Împreună cu capacul primar (5) formează un spațiu care constituie canalul de arc. Sistemul elastic-amortizat constă din arcurile elicoidale (3). Tot sistemul culisează pe niște lagăre cu alunecare într-un canal, arcurile satisfacând cerințele unui amortizor de oscilații de torsiune "ideal". Lagărele cu alunecare asigură o bună ghidare și o bună ungere minimizând frecarea dintre arcurile elicoidale și cuzineți. Transmiterea momentului motor se face prin flanșa (4). Flanșa este nituită pe placa secundară și este prinsă cu "aripioare" de arcurile elicoidale. Placa secundară conține masa inerțială de pe partea cutiei de viteze. Pentru o mai bună funcționare la cald sunt prevăzute tăieturi/ferestre de răcire.

Atribuirea gradului de severitate a riscului pentru fiecare element al volantei bimasice

Posibile defecțiuni ale părților componente

Disc de ambreiaj

Descriere: Disc de ambreiaj ars.

Cauza: Suprasolicitarea termică a discului de ambreiaj.

Efect: patinarea prelungită a ambreiajului



Fig. 4.10. Disc de ambreiaj.

Zona dintre placa primara și cea secundara

Descriere: Praful de la materialul de fricțiune al ambreiajului ajunge în exteriorul volantei și în ferestrele de aerisire.

Cauza: Suprasolicitarea termică a discului de ambreiaj.

Efect: Praful poate ajunge în canalele arcurilor elicoidale și să conducă la anomalii în funcționare.



Fig. 4.11. Zona dintre placa primară și cea secundară.

Suprafața de fricțiune

Descriere: Striații.

Cauza: Ambreiaj uzat.

Niturile care fixează materialul de fricțiune șlefuiesc suprafața de fricțiune.

Efecte:

- Limitarea puterii transmise; ambreiajul nu mai poate transmite momentul necesar;



Fig. 4.12. Suprafața de fricțiune-striații

Deteriorarea suprafeței de frecare a volantei

1. Descriere: Pete închise, punctiforme de supraîncălzire

- Chiar și în număr mare

Efect: Nici unul



Fig. 4.13. Suprafața de fricțiune – pete

1. Descriere: Fisuri**Cauza:** Suprasolicitare termică**Efect:** Volanta nu mai prezintă siguranță în exploatare prin posibila propagare a fisurilor**Fig. 4.14.** Suprafața de fricțiune – fisuri*Rulmenți, cuzineți***Descriere:**

- Pierderi de vaselină;
- Lagărul s-a "mâncat".

Cauza: Suprasolicitare termică sau deteriorare/suprasolicitare.**Efect:** Ungerea incorectă a lagărului (temperatură înaltă).

- Deteriorare volantă

**Fig. 4.15.** Rulmenți, cuzineți.*Încărcare termică scăzută***Descriere:** Suprafața de fricțiune este ușor colorată (auriu/galben)**Cauza:** Suprasolicitare termică**Efect:** Nici unul**Fig. 4.16.** Încărcare termică scăzută.*Încărcare termică medie***Descriere:** Colorarea albastră a suprafeței de frecare prin încălzirea pentru perioade scurte (220°C).**Cauza:** Colorarea plăcii de fricțiune este un efect rezultat din funcționare.**Efect:** Nici unul.**Fig. 4.17.** Încărcare termică medie.

Încărcare termică mare

Descriere: Colorare albastră-mov în zona niturilor sau în secțiunea exterioară. Suprafața de fricțiune nu arată urme de suprasolicitare.

- Volanta bimasică a fost utilizată după solicitarea termică încă o perioadă.

Cauza: Încărcare termică mare (280 °C).

Efect: Consecința solicitărilor termice de lungă durată o reprezintă deteriorarea volantei.

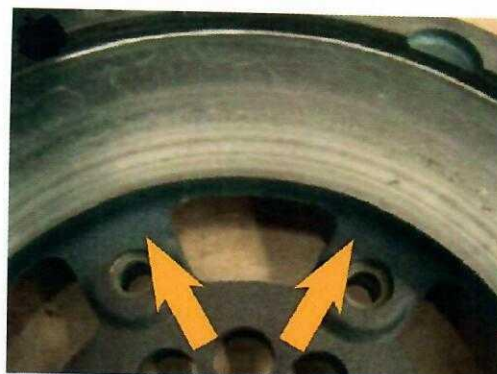


Fig. 4.18. Încărcare termică mare.

Încărcare termică foarte mare

Descriere: Volanta arată pe lateral sau pe partea din spate o colorare și/sau deteriorări vizibile sau fisuri.

Cauza: Încărcare termică foarte mare.

Efect: Volanta este defectă.

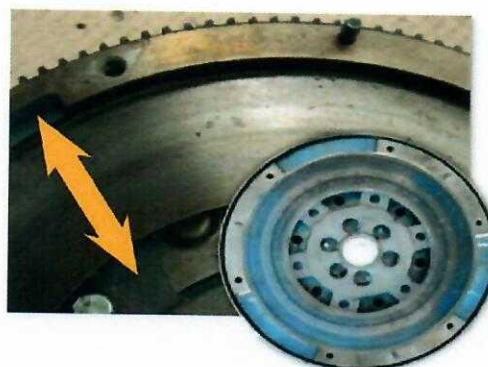


Fig. 4.19. Încărcare termică foarte mare.

Coroana electromotor

Descriere: Uzura puternică a danturii de cuplare.

Cauza: Electromotor defect

Efect: Zgomote la pornirea motorului

Zgomote și vibrații în mers sau în staționare

Scurgeri de vaselină din volantă

Cauza: Defect de fabricație

Conducerea cu turații reduse

Efect: Deteriorarea arcurilor interne și a carcasei ambreiajului.



Fig. 4.20. Coroana electromotor.

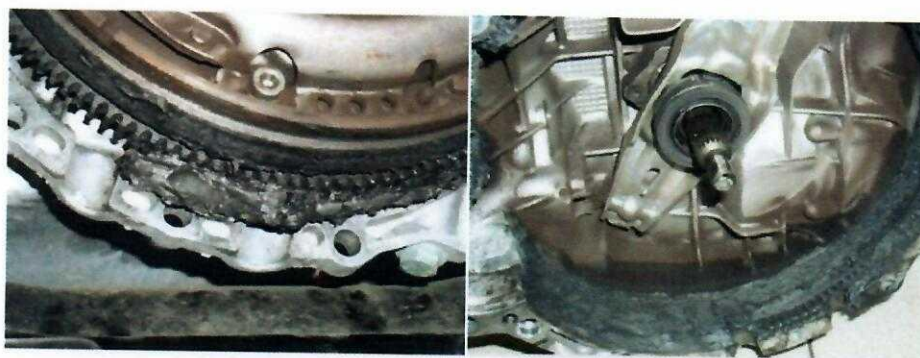


Fig. 4.21. Scurgeri de vaselină din volantă.

Pe baza analizei funcționării acestui produs, se consideră că impactul major îl reprezintă defectarea totală a ambreiajului și posibilitatea producerii unui accident din această cauză. În aceste condiții, pe baza analizei defecțiunilor anterioare, au fost identificate următoarele pericole legate de:

Discul de ambreiaj

a: - Disc de ambreiaj ars - patinarea prelungită a ambreiajului

Zona dintre placa primara și cea secundara

b: - Praful conduce la anomalii în funcționare.

Suprafața de fricțiune

c: - Striații - limitarea puterii transmise;

Deteriorarea suprafeței de frecare a volantei

d₁: - Pete închise, punctiforme de supraîncălzire - nici un efect;

d₂: - Fisuri - Volanta nu mai prezintă siguranță în exploatare.

Rulmenți, cuzineți

e₁: - Pierderi de vaselină - ungerea incorectă a lagărului (temperatură înaltă).

e₂: - Lagărul s-a "mâncat" - deteriorare volantă.

Încărcare termică scăzută

f: - Suprafața de fricțiune este ușor colorată (auriu/galben) - nici un efect;

Încărcare termică medie

g: - Colorarea albastră a suprafeței de frecare - nici un efect;

Încărcare termică mare

h: - Colorare albastră-mov în zona niturilor sau în secțiunea exterioară - deteriorarea volantei.

Încărcare termică foarte mare

i: - Volanta arată pe lateral sau pe partea din spate o colorare și/sau deteriorări vizibile sau fisuri - volanta este defectă.

Coroana electromotor

j: - Uzura puternică a danturii de cuplare - zgomote la pornirea motorului

Surgeri de vaselină din volantă

k: - Deteriorarea arcurilor interne și a carcasei ambreiajului.

Atribuirea gradului de severitate a riscului pentru fiecare defecțiune / pericol în parte se face cu ajutorul matricei de risc din figura 4.22. Criteriul de poziționare în matricea de risc, ține seama de doi factori principali: gradul de severitate și probabilitatea de manifestare. Acești factori sunt ordonați crescător de la stânga la dreapta, respectiv de jos în sus. Riscul maxim este considerat atunci când există pericolul de accident (catastrofal), apoi de nefuncționare totală (critic), funcționare defectuoasă (consecință serioasă), fără îndeplinirea în totalitate a funcțiilor proiectate (marginală), funcționarea cu zgomote (marginală), etc. În tabelul 4.3 sunt prezentate clasele de consecințe utilizate în acest caz.

Tab. 4.3. Clase de consecințe la analiza funcționării unui ambreiaj

Clasa	Efect	Nivel tehnic
1	neglijabil	Funcționează cu defecțiuni minore
2	marginal	Funcționează cu defecțiuni majore
3	serios	Funcționează cu defecțiuni grave
4	critic	Nu funcționează
5	catastrofal	Producere accident

Probabilitatea de apariție	Foarte des	g				
	Frecvent	f	e ₁	b	h	
	Ocazional	d ₁	c	a	d	k
	Singular			e ₂	i, j	d ₂
	Improbabil					
		Neglijabil	Marginal	Serios	Critic	Catastrofal
Gradul de severitate (consecințe)						

Fig. 4.22. Matricea de risc inițială a volantei bimasice

Matricea cuprinde trei zone principale, după cum urmează: zona verde (zonă acceptată), zona galbenă, (zonă nedorită), zona roșie (zonă intolerabilă). Prin implementarea măsurilor de corectare / prevenire se urmărește trecerea, din zona roșie spre zonele galben și verde, a tuturor factorilor de risc.

Măsuri aplicate în vederea diminuării gradului de severitate al factorilor de risc

În funcție de pericolele identificate mai sus, propunem următoarele soluții de reducerea a gradului de severitate al acestora:

- a: material de calitate superioară pentru zona de fricțiune;
- b: curățarea prafului prin îndepărtare cu jet de aer;
- c: Material cu caracteristici superioare termic;
- d₂: Material cu tenacitate la fisurare mare;
- e₁: Proiectare judicioasă a lagărului;
- e₂: Proiectare judicioasă a lagărului;
- f: Prevedere răcire cu aer;
- g: Prevedere răcire cu aer;
- h: Tratare termică superioară a coroanei dințate;
- i: Lăgăruire corespunzătoare;
- k: Mentenanță și proiectare judicioasă.

În urma implementării măsurilor de corectare/prevenire, enumerate mai sus, s-a reușit eliberarea zonei roșii (intolerabilă) de potențialii factori de risc (figura 4.23), iar numărul factorilor de risc din zona verde a crescut semnificativ.

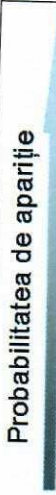
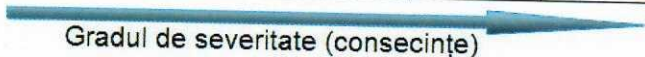
 Probabilitatea de apariție	Foarte des					
	Frecvent					
	Ocazional	g	e ₁			
	Singular	f	c	a, b	d, h	
	Improbabil	d ₁		e ₂	i, j, k	d ₂
		Neglijabil	Marginal	Serios	Critic	Catastrofal
 Gradul de severitate (consecințe)						

Fig. 4.23. Matricea riscurilor pentru volanta bimasică, după implementarea măsurilor de corectare / prevenire

De regulă, sistemul elastic/amortizat al unei volante bimasice, cât și componentele celelalte ale transmisiei unui motor oarecare este conceput astfel încât, în cazul unei creșteri cu 30% a momentului motor, rezerva de siguranță a volantei va fi atinsă sau depășită. Ca urmare, arcurile elicoidale sunt comprimate la maxim chiar și în funcționare normală, ceea ce ar duce la o înrăutățire a izolării (zgomot) sau la întreruperi. În scurt timp, datorită numeroaselor schimbări de sarcină, nu numai volanta, ci și cutia de viteze, arborii de transmisie și diferențialul vor fi deteriorate. Deteriorarea poate consta atât într-o uzură avansată, cât și în deteriorări abrupte a căror reparare presupune prețuri ridicate.

Prin creșterea performanțelor unui motor, momentul motor va fi deplasat în zona rezervei de siguranță. În timpul deplasării, datorită momentului crescut volanta va fi permanent suprasolicitată. Astfel, mult mai adesea decât a fost prevăzut în funcționare, arcurile vor ajunge la blocaj (spira pe spira). Urmarea: volanta se va deteriora.

4.5.3. Identificarea potențialelor pericole și trasarea unei matrice de risc pentru sistemul de direcție

Construcția sistemului de direcție, figurile 4.24 și 4.25

Pentru a-și îndeplini rolul funcțional, sistemul de direcție trebuie să răspundă la următoarele cerințe [10]:

- să asigure stabilitatea direcției;
- să permită stabilizarea mișcării rectilinii, după ce virajul s-a efectuat;
- să aibă tendința de a reveni la poziția mersului în linie dreaptă;
- menținerea mersului în linie dreaptă chiar și atunci când apar perturbații;
- să nu fie influențat de oscilațiile suspensiei;
- atunci când se efectuează un viraj, mecanismul de direcție trebuie să permită înclinarea roților pentru a nu determina alunecarea acestora;

- șocurile provenite prin neregularitățile căii de rulare să nu fie transmise prin volan;
- la rotirea volanului cu un anumit unghi, trebuie să se realizeze unghiuri de rotire egale pentru roțile de direcție care reprezintă un element important al siguranței circulației;
- efortul necesar pentru manevrarea direcției să fie cât mai redus;
- să se manevreze cu ușurință, să fie fiabil și să necesite operații de întreținere cât mai simple;

Starea tehnică a sistemului de direcție este de o deosebită importanță pentru securitatea circulației. Ea contribuie decisiv la asigurarea performanțelor de manevrabilitate și stabilitate ale automobilului și influențează intensitatea uzurii anvelopelor.



Fig. 4.24. Sistemul de direcție.

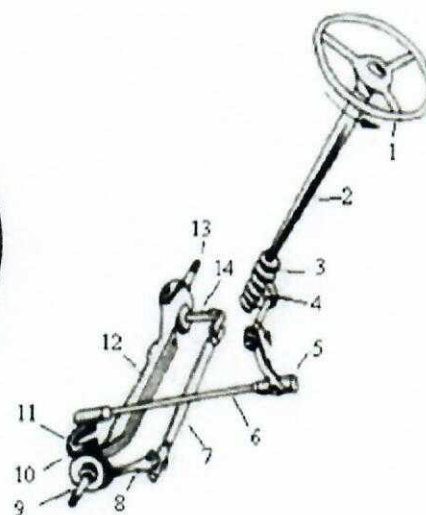


Fig. 4.25. Schema de principiu a sistemului de direcție.

Părțile componente ale sistemului de direcție sunt următoarele:

1-volan; 2-axul volanului; 3-melc; 4-sector dințat; 5-levier de direcție; 6-bara longitudinală de direcție; 7-bară transversală de direcție; 8,14-levier; 9,13-fuzeta; 10-pivot; 11-braț fuzetă; 12-puntea propriu-zisă.

Defectele în exploatare ale sistemului de direcție

Defecțiunile sistemului de direcție se pot manifesta sub forma:

- a) manevrarea volanului necesită un efort mare;
- b) roțile de direcție oscilează la viteze reduse;
- c) roțile de direcție oscilează la viteze mari;
- d) direcția trage într-o parte;
- e) direcția transmite volanului șocurile de la roți;
- f) zgomote anormale ale direcției.

a) Manevrarea volanului necesită un efort mare.

Defectul se datorește următoarelor cauze:

- a1 - frecărilor mari în articulații;
- a2 - frecărilor anormale în caseta de direcție și la pivoții fuzetelor;
- a3 - deformării axului volanului precum și unor defecțiuni ale pneurilor.

○ Frecările mari în articulații se produc ca urmare a unui montaj sau reglaj incorect, a gresajului nesatisfăcător sau a pătrunderii prafului între elementele articulației. Defecțiunile se remediază în atelierul de reparații, prin demontarea organelor respective, prin curățarea și ungerea lor.

○ Frecările anormale în caseta de direcție se produc datorită gresajului insuficient, uzării sau deteriorării șurubului melc, rulmenților uzați sau incorect montați, jocului insuficient între elementele casetei sau fixării incorecte a casetei de direcție pe cadrul automobilului. Defecțiunile, cu excepția gresajului insuficient, nu se pot remedia decât la atelier.

○ Frecările anormale la pivoți fuzetelor se datorează gresajului nesatisfăcător, jocului insuficient între pivoți și rulmenți sau bucșe, gripării pivoților. Remedierea constă în curățarea și gresarea pivoților.

○ Defecțiunile pneurilor care îngreunează manevrarea volanului pot fi: presiune insuficientă sau inegală, uzura neuniformă de dimensiuni diferite.

b) Roțile de direcție oscilează la viteze reduse.

Oscilația roților de direcție la viteze mai mici de 60 km/h, se datorează următoarelor cauze:

b1 - presiunii incorecte în pneuri;

b2 - pneuri de dimensiuni diferite;

b3 - roți neechilibrate;

b4 - organele sistemului de direcție sunt uzate;

b5 - rulmenții roților au joc mare;

b6 - osia din față deplasată;

b7 - suspensia defectă (arcuri desfăcute sau rupte, amortizoare defecte), cadrul deformat;

b8 - geometria roților incorectă.

Pe parcurs, se remediază defecțiunile referitoare la refacerea presiunii în pneuri, strângeri și montări corecte de piese. Restul defecțiunilor se remediază la atelier.

c) Roțile de direcție oscilează la viteze mari

Cauzele sunt similare cu cele care produc oscilații la circulația cu viteze reduse, în plus mai intervin:

c1 - jocuri insuficiente la frânele din față;

c2 - dezechilibrarea sau deformarea roților din spate.

La viteze mari, oscilația roților de direcție este un defect periculos mai ales când aceste oscilații intră în rezonanță cu oscilațiile cadrului sau cu cele ale altor organe ale sistemului de direcție sau suspensie.

d) Direcția trage într-o parte

Cauzele pot fi:

d1 - pneurile roților din față nu au aceeași presiune sau nu sunt identice ca mărime;

d2 - frânele sunt reglate incorect;

d3 - cadrul este deformat;

d4 - unul din arcurile suspensiei din față are ochiul foi principale rupt.

Pe parcurs se corectează presiunea în pneuri și se reglează frânele. Restul defecțiunilor se remediază la atelier.

e) Șocurile provenite din interacțiunea roților cu drumul se transmit volanului.

Fenomenul apare în special la deplasarea pe drumuri cu denivelări datorită:

e1 - presiunii prea mari în pneuri;

- e2- dezechilibrării roților;
- e3 - amortizoarelor defecte;
- e4 - uzării sau reglării incorecte a organelor sistemului de direcție.

f) Zgomote anormale ale organelor sistemului de direcție.

Cauzele ce conduc la zgomote anormale pot fi:

- f1 - jocuri excesive în articulațiile transmisiei direcției;
- f2 - slăbirea volanului și a suportului acestuia sau a casetei de direcție;
- f3 - deteriorarea rulmenților sau montarea lor greșită;
- f4 - frecării anormale datorită gresării nesatisfăcătoare.

Pe parcurs se remediază numai acele defecțiuni care nu necesită demontarea organelor sistemului de direcție.

Consecința catastrofală este legată pericolul de accident, cea critică de nefuncționare totală, funcționarea defectuoasă reprezintă o consecință serioasă, iar neîndeplinirea în totalitate a funcțiilor proiectate reprezintă o consecință marginală ca și funcționarea cu zgomote. În ceea ce privește atribuirea pe scala de probabilități, aceasta se face în funcție de datele statistice privitoare la apariția defectelor menționate. Acești doi factori – consecințele și probabilitatea - sunt ordonați crescător de la stânga la dreapta, respectiv de jos în sus.

Pe baza analizei funcționării sistemului de direcție pericolelor identificate anterior le-au fost atribuite un anumit grad de severitate a riscului, în conformitate cu fiecare defecțiune / pericol în parte. Criteriul de poziționare în matricea de risc din *figura 4.26*, ține seama de doi factori principali: consecințele urmează apariției unei defecțiuni și probabilitatea de manifestare a acesteia.

Probabilitatea de apariție	Foarte des		a3	b1		
	Frecvent		a1,e3	b5,f2	f1,d1	
	Ocazional		c1	b4, e1,e4	b3,e2,f3	b7
	Singular			a2,c2,f4	b2,d2	b8,d4
	Improbabil				b6	d3
		Neglijabil	Marginal	Serios	Critic	Catastrofal
Gradul de severitate (consecințe)						

Fig. 4.26. Matricea de risc inițială

Măsurile generale aplicate în vederea diminuării gradului de severitate al factorilor de risc

Pe baza analizei funcționării acestui produs au fost identificate următoarele pericole legate de:

- a - ungerea cu lubrifiant;
- b – gresarea și înlocuirea periodică a lichidului de ungere;

- c – montarea corectă și gresarea articulațiilor;
- d – gresare periodică, la un interval de 1000 și 2000 de km parcurși;
- e – montarea corectă și strângerea colierelor de la burduf pentru a evita pătrunderea prafului sau a apei;
- f – verificare cruce intermediară și gresare;
- g – verificare presiune pneuri, înlocuire în caz de uzură neuniformă a acestora și efectuare reglaj geometrie;
- h – utilizare rulmenți de bună calitate;
- i – îmbunătățire material, evitarea supraîncărcării;
- j – verificare protecții împotriva prafului;
- utilizare arcuri și amortizoare de calitate superioară.

În urma implementării măsurilor de corectare/prevenire, enumerate mai sus, s-a reușit eliberarea zonei roșii (intolerabilă) de potențialii factori de risc, *figura 4.27*, iar numărul factorilor de risc din zona roșie a scăzut semnificativ.

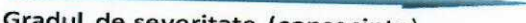
 Probabilitatea de apariție	Foarte des	b1				
	Frecvent	a3	f1, d1			
	Ocazional	a1, e3, e1,	b3, b5, e2	f3, f2, b7		
	Singular		c1, b4,	a2, d2, e4	b8, d4	
	Improbabil	b6	d3	c2, f4	b2	
		Neglijabil	Marginal	Serios	Critic	Catastrofal
 Gradul de severitate (consecințe)						

Fig. 4.27. Matricea riscurilor pentru sistemul de direcție, după implementarea măsurilor de corectare / prevenire

BIBLIOGRAFIE

- [1] ***, Prezentarea metodei elaborate de I.N.C.D.P.M. București pentru evaluarea riscurilor de accidentare și îmbolnăvire profesională, www.ohs.ro/files/formulare/metoda%20evaluare%20incdpm.doc.
- [2] T.M. Dejeu, A. Rusu, R. Săcară, RISK Analysis for Rehabilitation Engineering Products, www.termo.utcluj.ro/confstud07/lucrari/dejeu.doc.
- [2] V. Goanță, V. Palihovici, Expertize în Ingineria Mecanică, Ed. Tehnopress, Iași, 2006.
- [3] P. A. Engert, Z. F. Lansdowne, Risk Matrix - User's Guide, The MITRE Corporation, 1999.
- [5] <http://www.e-automobile.ro/categorie-motor/20-general/61-defect-turbo.html>.

- [6] <http://biblioteca.regielive.ro/laboratoare/mecanica/sistemul-de-directie-transporturi-119727.html>.
- [7] <http://ro.scribd.com/doc/77798400/CCA-Sistemul-de-Directie>.
- [8] <http://www.v-turbo.com/piese-auto/structura-unui-sistem-de-directie>.
- [9] SR EN 1050: 1996.
- [10] Securitatea mașinilor. Principii pentru aprecierea riscului,
www.ohs.ro/files/formulare/metoda%20evaluare%20incdpm.doc.

CAPITOLUL 5. ANALIZA RISCULUI PE BAZA METODOLOGIEI DE TIP ARBORE DE DEFECTARE

-
- 5.1. Premizele utilizării arborilor de defectare
 - 5.2. Principiul metodei
 - 5.3. Structura arborilor de defectare
 - 5.4. Modul de lucru în cadrul metodologiei de tip arbore de defectare
 - 5.5. Modele utilizate pentru evenimentele primare
 - 5.6. Moduri de cedare și analiza efectelor cedării
 - 5.7. Studiul fiabilității sistemelor prin metoda arborilor de defectare
 - 5.8. Exemple de aplicare a metodologiei de tip arbore de defectare
-

5.1. Premizele utilizării arborilor de defectare

Arborele de defectare (*fault tree - FT*) este o metodă de analiză a riscului, fiabilității și securității. Acest concept a fost introdus în anul 1962 pentru prima dată de către laboratoarele Bell Telephone dezvoltându-l pentru a fi folosit în cadrul Forțelor Aeriene Americane. Fault Tree-ul este una din cele mai folosite metode de analiză logică în operațiuni de previzionare și determinare a riscului și în studiul fiabilității sistemelor. *Arborele de defectare* este o reprezentare grafică logică a relațiilor dintre evenimente care, în dinamică, prezintă variabilități și incertitudini, ca urmare risc, determinând diferite combinații de erori ce ar putea duce la o defecțiune a sistemului. Așadar, arborele de defectare este o metodă grafică de prezentare a modului în care cedarea sistemului (efect) poate proveni din cedarea componentelor (cauză) [1].

Managementul riscului abordează problema determinării probabilității de apariție a defectelor și frecvența de manifestare a acestora. Riscul de avarie se definește ca fiind potențialul de cedare a unei componente și consecințele cedării. Numim sistem, aranjamentul ordonat al componentelor ce interacționează între ele și cu alte componente externe, cu alte sisteme, operatori umani și mediu, pentru a efectua anumite funcții specifice. Sistemul este format din componente structurale ce suportă sarcini sau alte acțiuni (de ex. radiații, temperaturi, acțiuni chimice, acțiuni ale mediului, etc.), precum și din componente nestructurale, cum ar fi echipamentele electrice sau electronice.

Metoda arborilor de defectare, utilizată pentru studiul fiabilității previzionale a sistemelor complexe, pornește de la ideea că, procesul de defectare poate fi cuantificat la nivel structural, astfel încât, orice defecțiune a sistemului este rezultatul unei secvențe cuantificate de stări ale procesului de defectare. Arborele de defectare (AD) este un procedeu utilizat pentru cuantificarea riscurilor asociate cu sistemele ce prezintă potențial de defectare. Modelul arborelui de defectare scoate în evidență o situație nefavorabilă, atunci când performanțele sistemului nu se încadrează între limitele specificate. Cu ajutorul acestui model se determină punctele slabe ale sistemului. Modelul se definește, ca și modelul logic, pornind de la ecuațiile modelului funcțional. Limitele metodelor ce utilizează *arborii de defectare* sunt parțial intrinseci și parțial de natură practică. Algoritmii utilizați

În acest caz, se bazează pe presupunerea că, o componentă fie funcționează fie cedează, și întotdeauna se află într-una dintre aceste două stări. Posibilelor cazuri intermediare nu li se aplică un tratament specific. Se presupune că evenimentele primare care contribuie la cedare sunt independente, ceea ce nu este întotdeauna cazul, [2]. Din punct de vedere practic, plenitudinea este greu de obținut, și dacă totuși se întâmplă acest lucru, rezultatul poate fi prea complex pentru a putea fi interpretat într-o manieră directă și, ca urmare, poate rezulta estimarea inexactă a riscului de cedare. În practică apar arbori de defectare formați din sute de elemente (evenimente primare și intermediare).

5.2. Principiul metodei

Metoda „arborelui de defectare” analizează sistemul **de la efect la cauză**. Aceasta începe cu cedarea sistemului/componentei, acțiunea fiind catalogată ca fiind cea mai importantă, și merge înapoi pentru a deduce cedarea cărui element sau care eveniment primar (negativ) ar fi putut cauza cedarea sistemului/componentei. Așadar, „arborii de defectare” este o metodă grafică de prezentare a modului în care cedarea sistemului poate proveni din cedarea componentelor [3].

Scopul principal al analizei pe baza „arborelui de defectare” este de a evalua probabilitatea ca un eveniment de top (nedorit) să aibă loc, cu ajutorul metodelor analitice și statistice. Aceste calcule implică cunoașterea unor date privind fiabilitatea sistemului, cum ar fi: probabilitatea de cedare, frecvența cedării, nivelul de cedare, timpul până la cedare, frecvența reparațiilor, etc. Modelele de analiză pe baza „arborilor de defectare” au fost utilizate de mult timp pentru analize calitative și cantitative ale combinațiilor de evenimente care pot conduce la cedarea unui sistem. Construirea unui model de tip „arbore de defectare” poate oferi o perspectivă asupra modului prin care se pun în evidență potențialele deficiențe. Analiza sistemelor complexe produce mii de combinații de evenimente ce pot provoca apariția evenimentului de top.

Ce este o Diagramă Fault Tree?

Diagramele Fault Tree (FTD) sunt diagrame bloc logice care afișează starea unui sistem (eveniment de top) în ceea ce privește stările componentelor sale (evenimente de bază). O diagramă Fault Tree este construită de **sus în jos**, în funcție de evenimente, mai degrabă decât blocuri [4]. Folosește un „model” grafic a căilor din cadrul unui sistem care poate conduce la un eveniment previzibil, pierderi nedorite, cedare (sau eșec). Căile interconectează evenimente contributive și condiții, folosind simboluri logice standard (AND, OR etc.). Construcțiile (ramificațiile) de bază într-o diagramă Fault Tree sunt porți și evenimente.

5.3. Structura arborilor de defectare

Din punct de vedere structural, arborele de defectare utilizează următoarele concepte:

- elementele primare - reprezintă componentele sau blocurile care stau la nivelul de bază al cuantificării avariei/cedării sistemului;
- defecțiunile primare - reprezintă defectele elementelor primare;
- evenimentul critic - reprezintă starea de defect a sistemului;
- modul de defectare - reprezintă setul de elemente defecte simultan care scot din funcțiune sistemul;

- modul minim de defectare - reprezintă setul cel mai mic de elemente primare care, fiind defecte simultan, conduc la defectarea sistemului;
- nivelul ierarhic - reprezintă totalitatea elementelor care sunt echivalente structural și care ocupă poziții echivalente în structura arborelui de defectare.

Metoda are la bază logica binară, prin care, în mod formal, o funcție a sistemului este asimilată unei funcții binare, ale cărei variabile sunt defecțiunile primare și care este sintetizată cu elemente de tip NU, ȘI, SAU. Aceste elemente poartă numele de porți [5]. Structural vorbind, un arbore de defectare utilizează următoarele elemente, *figura 5.1*: evenimente (de top, intermediare și primare); porți logice; legături; operațiuni de transfer.

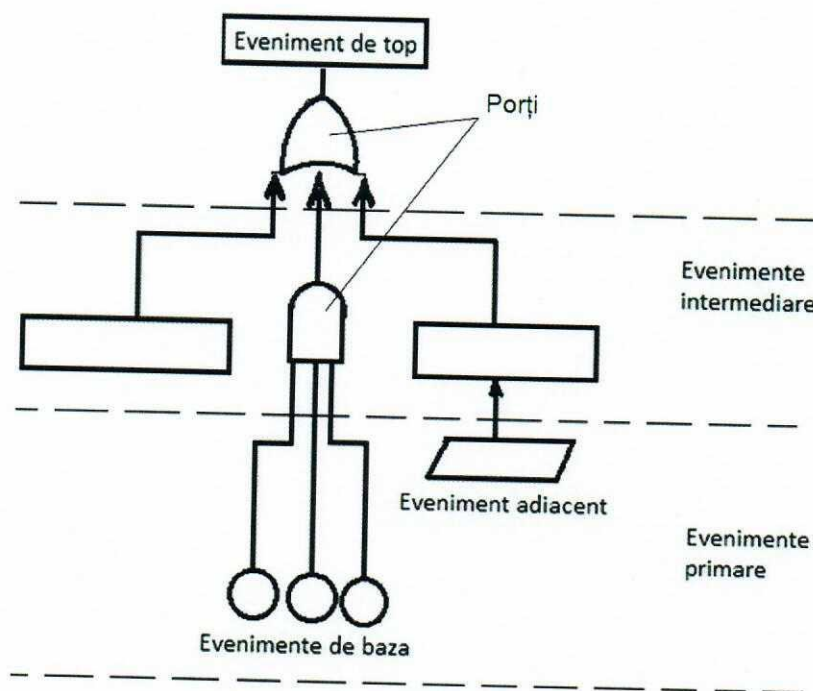


Fig. 5.1. Structura unui arbore de defectare

5.3.1. Evenimente

Un eveniment într-un arbore de defectare poate avea o probabilitate de manifestare (sau o funcție de distribuție). Pentru evenimentele primare acestea trebuie cunoscute, calculate dinainte și furnizate ca atare, pentru evenimentele intermediare, acestea se calculează pe baza relațiilor dintre evenimente, urmând sensul de **jos în sus**. Evenimentele se clasifică în [6]:

- evenimente finale sau de top;
- evenimente intermediare;
- evenimente primare.

Evenimentul de top reprezintă **efectul final** și este un eveniment care nu se constituie în intrare pentru alt eveniment, ca urmare, nu are ieșire. Evenimentul de top reprezintă primul element la care gândim că s-ar putea defecta, de la acesta pornindu-se construcția, în continuare, a arborelui de defectare. Ceea ce urmează reprezintă o înlănțuire de evenimente secundare (componente, subsisteme, influențe, etc.), conectate între ele prin porți logice, aceste evenimente secundare

constituind cauza pentru manifestarea nedorită a evenimentelor superioare, printre care și evenimentul final. Evenimentul final constituie, de fapt, starea finală a unui proces sau subproces definit de o anumită structură de ierarhizare.

Evenimentul intermediar reprezintă o stare de tranziție și este plasat între două evenimente care constituie unul cauza și celălalt efectul său. Evenimentul intermediar constituie atât o cale de propagare a transformărilor dinamice ale procesului (de la evenimentul de bază către cel de top), cât și un nivel de referință al desfășurării acestuia. De asemenea, un eveniment intermediar poate constitui rezultanta transformărilor dinamice ale unui proces, deci poate reprezenta, ca efect sau cauză, suma efectelor sau cauzelor acestor transformări. În mod obligatoriu, evenimentele intermediare au cel puțin o intrare și, evident, o singură ieșire.

Evenimentul primar nu are drept cauză alt eveniment, deci nu are intrare. Ca urmare, așa cum s-a menționat anterior, toate datele legate de probabilități, frecvențe, reparații, etc. trebuie introduse de la început, fiind determinate statistic sau calculate pe bază de modele. Evenimentul primar nu poate fi definit ca efect, el constituie doar cauza pentru alt eveniment (intermediar sau final), fiind de fapt similar cu starea inițială a procesului. Activarea evenimentului primar se poate datora unor elemente tehnologice definite prin proces, unor operări, accidente sau perturbații și poate, la rândul ei, declanșa dinamica procesului. În funcție de gradul cunoașterii, evenimentele primare sunt de două tipuri:

- eveniment definit (de bază) care poate fi înțeles și evaluat calitativ și cantitativ, în funcție de obiectivul analizei de proces. El poate fi predicționat și simulat, cunoscându-i-se natura. În diagrama logică, evenimentul de bază se marchează cu un cerc sub dreptunghiul de etichetă;
- eveniment nedefinit (adiacent) poate fi un eveniment a cărui natură nu este cunoscută și care, de aceea, nu poate fi evaluat decât, cel mult, calitativ. Activarea sa reprezintă un fenomen aleatoriu, iar efectul său poate fi intuit parțial.

Tab. 5.1. Simboluri pentru evenimente

Denumire eveniment	Simbol FTA	Descriere
Eveniment de bază (componentă)		Un eveniment de bază care inițiază cedarea (sau eveniment de eșec).
Eveniment extern (House Event)		Un eveniment care este așteptat să se producă. În general, aceste evenimente pot fi setate să aibă sau nu loc și, ca urmare, au o probabilitate fixată la 0 sau 1.
Eveniment nedevelopat		Un eveniment care nu este dezvoltat în continuare. Este un eveniment de bază care nu are nevoie de o rezolvare în continuare.
Eveniment condițional		O condiție sau restricție specifică care nu se aplică la orice poartă.
Transfer		Indică un transfer de continuare la un sub arbore.

În procesul analizei, în funcție de profunzimea cunoașterii, de dinamica procesului și de dependențele dintre evenimente, evenimentele adiacente pot deveni evenimente de bază sau pot fi

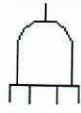
considerate ca atare. Evenimentul adiacent este marcat pe schemă cu un trapez. Simbolurile folosite pentru evenimente sunt prezentate în *tabelul 5.1*, [1,7].

5.3.2. Porți

Porțile logice sunt simboluri care arată legătura logică dintre elemente (evenimente) sau condiționează apariția (producerea) unui eveniment cunoscut, așteptat, previzionat. Porțile logice au, în mod obligatoriu, una sau mai multe intrări, dar, de regulă, o singură ieșire. De asemenea, tot de regulă, intrările sunt în partea de jos a simbolului, iar ieșirea în partea de sus. Există și cazul de multitransfer, când porțile logice au o intrare și mai multe ieșiri. În această situație, simbolul nu-și schimbă orientarea, ci se schimbă doar sensurile legăturilor.

În *tabelul 5.2* sunt prezentate principalele porți utilizate ca legături între evenimente.

Tab. 5.2. Porți clasice ale arborelui de defectare (AD) [1, 8]

Porți în AD	Simbol AD	Descriere
ȘI		Evenimentul de ieșire are loc în cazul în care toate evenimentele de intrare au loc.
SAU		Evenimentul de ieșire are loc în cazul în care cel puțin unul din evenimentele de intrare are loc.
De vot SAU (k-out-of-n)		Evenimentul de ieșire are loc în cazul în care se produc k sau mai multe dintre evenimentele de intrare.
Inhiba		Evenimentul de ieșire are loc în cazul în care toate evenimentele de intrare se produc și un eveniment suplimentar condițional de asemenea are loc.
Combinație		Eveniment care are loc dacă toate cele n intrări în poartă au loc.
Prioritatea ȘI		Evenimentul de ieșire are loc în cazul în care toate evenimentele de intrare se produc într-o secvență/ordine specifică.
XOR		Evenimentul de ieșire are loc dacă exact un singur eveniment de intrare se produce.

5.3.3. Legături

Legăturile reprezintă căile de propagare a efectelor activării unor evenimente. Sunt reprezentate sub formă de linii între evenimente, între evenimente și o poartă logică sau între o poartă logică și un eveniment. Săgeata reprezintă orientarea propagării sau sensul transferului. Într-o diagramă logică se utilizează, de regulă, legături unidirecționale, dar, în cazuri speciale, între evenimentele intermediare pot apărea și legături bidirecționale. Linia continuă reprezintă o cale

sigură, definită ca atare, în timp ce linia punctată reprezintă o cale probabilă. Pentru analiză, căilor de legătură li se pot asocia viteze sau capacități de transfer ori alte caracteristici.

5.3.4. Operațiuni de transfer

Operațiunile de transfer, [9] dacă sunt obișnuite, se realizează de-a lungul liniilor de legătură, iar dacă sunt între subdiagrame (subgrafuri) se marchează printr-un triunghi în care se înscrie codul (sau simbolul de identificare) elementului către care se realizează transferul, figura 5.2.

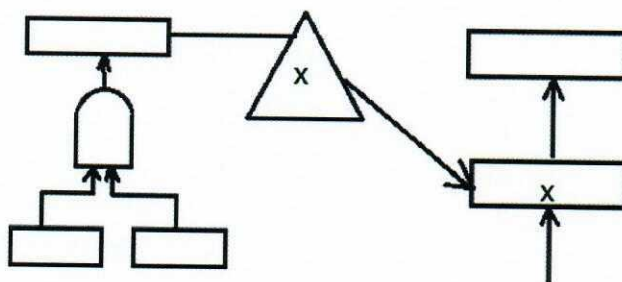


Fig. 5.2. Operațiunea de transfer

5.4. Modul de lucru în cadrul metodologiei de tip arbore de defectare

O analiză de tip „arbore de defectare” reușită necesită efectuarea următorilor pași:

1. Identificarea obiectivului analizei;
2. Definirea evenimentului de top;
3. Definirea domeniului analizei;
4. Definirea rezultatelor așteptate;
5. Definirea principiului de bază;
6. Construirea arborelui de defectare;
7. Evaluarea arborelui de defectare;
8. Interpretarea și prezentarea rezultatelor.

Primii cinci pași se referă la formularea problemei ce necesită analiza de tip arbore de defectare. Pașii rămași implică construirea propriu-zisă a arborelui de defectare și interpretarea rezultatelor. Deși majoritatea pașilor se realizează pe rând, etapele 3-4 pot funcționa simultan. Nu este deloc anormal ca pașii 4 și 5 să fie modificați în timpul etapelor 6 și 7. Relațiile dintre cele 8 etape sunt prezentate în figura de mai jos:

Primul pas, pentru a obține o analiză concludentă, este definirea corectă a obiectivelor arborelui de defectare [11]. Deși pare evidentă motivația existenței acestor etape, sunt cazuri de analiză care nu satisfac cerințele clientului sau a persoanei care a cerut o astfel de analiză, tocmai pentru că prima etapă a fost tratată cu superficialitate. Obiectivul ce trebuie formulat îl reprezintă modul de defectare/cedare a sistemului supus analizei. De exemplu, dacă se dorește o evaluare a diferitelor proiecte posibile pentru un sistem, atunci se va pune problema defectării sistemului ce s-a construit pe baza unui anumit proiect. În momentul stabilirii obiectivelor, în mod automat se definește și evenimentul de top, adică *pasul 2*. Evenimentul de top este acel eveniment care devine neconform, ale cărui cauze le vom identifica și pentru care se calculează probabilitatea de defectare.

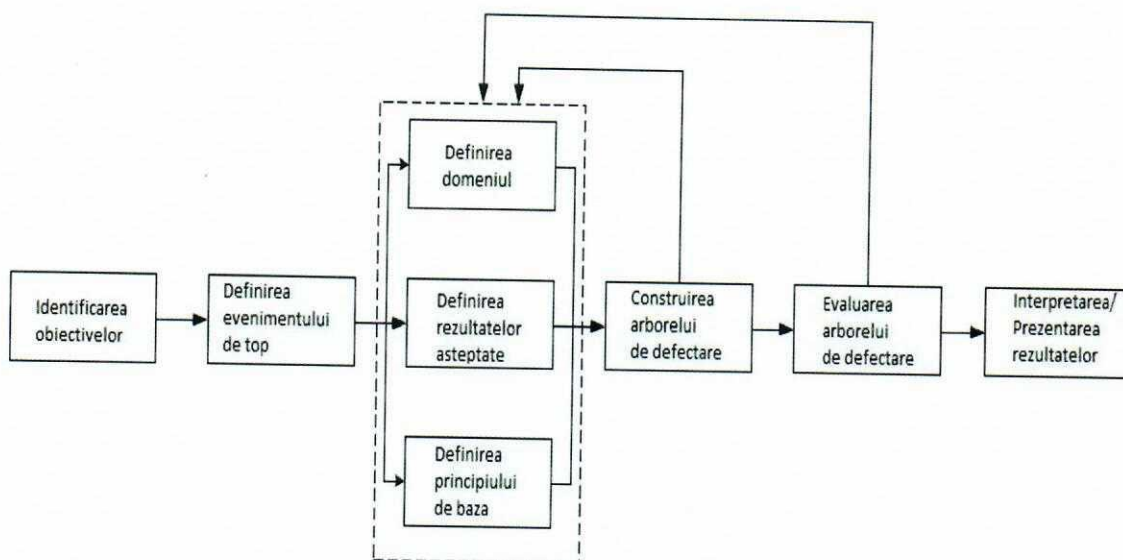


Fig. 5.3. Dependența etapelor din metodologia arborilor de defectare [10]

În *pasul 3* se definește domeniul, și anume, care sunt evenimentele determinatoare, care cauze vor fi luate în calcul și care vor fi eliminate. Totodată, în acest pas se studiază coeficienții și indicii la care sistemul funcționa sau trebuie să funcționeze în mod obișnuit.

Pasul 4 hotărăște până unde se va merge cu investigația, de câte detalii este nevoie? Fie ne oprim la defectarea de componente fie determinăm și cauzele defectării componentelor.

În stabilirea principiului de bază, *pasul 5*, se definesc proceduri și nomenclatura după care sunt numite porțile și evenimentele.

Construirea propriu-zisă a arborelui de defectare se realizează în *pasul 6*, ca mai apoi, în *pasul 7*, arborelui de defectare să i se facă o evaluare atât cantitativă cât calitativă.

Analiza calitativă include determinarea următoarelor caracteristici:

- elementele minimale ale arborelui de defectare, combinația dintre cedările de componente care cauzează cedarea sistemului;
- importanța componente calitative: - rangul calitativ al contribuțiilor la cedarea sistemului;
- elemente minimale susceptibile la cedări din cauze comune: - elemente minimale care au potențialul de a cauza o singură cedare.

Analiza cantitativă

Odată ce sunt obținute elementele minimale, dacă se dorește obținerea unor rezultate cantitative, pot avea loc evaluările ce țin de determinarea probabilității. Dacă probabilitățile de cedare ale unei componente sunt tratate ca variabile arbitrare, acestea se pot propaga până la evenimentul de top, pentru a determina variațiile probabilității de cedare. Prin termenul **componentă**, ne referim la orice **eveniment primar** care apare pe arborele de cedare. Pentru o componentă putem avea probabilitate de cedare dependentă de timp sau o probabilitate de cedare dependentă de cerere. Analiza cantitativă include [12]:

- probabilități absolute: - probabilități de cedare a sistemului și a elementelor;

- importanța cantitativă a componentelor și a elementelor minimale: - rangul cantitativ al contribuțiilor la cedarea sistemului;
- sensibilitate și evaluări de probabilitate relative: - efectele schimbărilor în modele și determinări de date și erori.

După ce s-au obținut toate aceste date, se trece la interpretarea rezultatelor și transmiterea acestora, cu tot cu interpretare și soluții către managementul general, *pasul 8*, pentru luarea deciziilor în cunoștință de cauză.

Pentru aplicarea metodei utilizând arborele de defectare, trebuie realizată o schemă logică, *figura 5.4*, în care se respectă, în ordine, următoarea etapizare [13]:

- Descrierea sistemului sau procesului în condițiile unei defecțiuni luate în considerare;
- Se identifică toate căile prin care un sistem sau un proces se poate defecta. Se utilizează informațiile din baza de date, experiența personală, experiențe externe sau date derivate din brainstorming;
- Se identifică simptomele fiecărui mod de defecțiune care ar putea ajuta la detecție;
- Se stabilește evenimentul de prim rang (de top – cedarea finală) pentru a fi analizat;
- Se identifică evenimentele intermediare de ordin întâi sau seria de elemente care contribuie în mod direct la evenimentul de rang superior;
- Se determină efectul fiecărui mod de defectare;
- Se continuă aceste etape până la nivelul de bază;
- Se stabilesc, cu mare atenție, evenimentele primare derivate din construcția sistemului și se analizează modurile posibile de defectare în cadrul evenimentelor primare;
- Se realizează schema logică prin interferarea de porți între evenimente;
- Pentru fiecare eveniment primar se stabilesc parametri necesari pentru calcul în zonele superioare ale arborelui: probabilitate de manifestare, frecvență, rată de reparații, etc.;
- Se efectuează calculele ce se transferă prin porți până la evenimentul de top;
- Se analizează datele obținute, inclusiv calea cea mai nefavorabilă cu influența cea mai mare asupra evenimentului de top;
- Se consideră și situații alternative și se propun soluții;
- Se evaluează probabilitatea pierderilor (pagubelor) și proporția avariei/cedării pentru fiecare mod de defectare;
- Se calculează indicii de pericol (danger index).

Elementele componente ale arborelui de defectare din *figura 5.4* sunt:

1- Evenimentul final (de top); 2-evenimente intermediare; 3-poarta evenimentului final; 4-evenimente de bază - primare; 5-porți între evenimente intermediare; 6-date de transfer de la un alt arbore de defectare.

Trebuie menționat că, elementele de bază (evenimentele primare), cele figurate prin cercuri, indică limita inferioară a analizei arborelui.

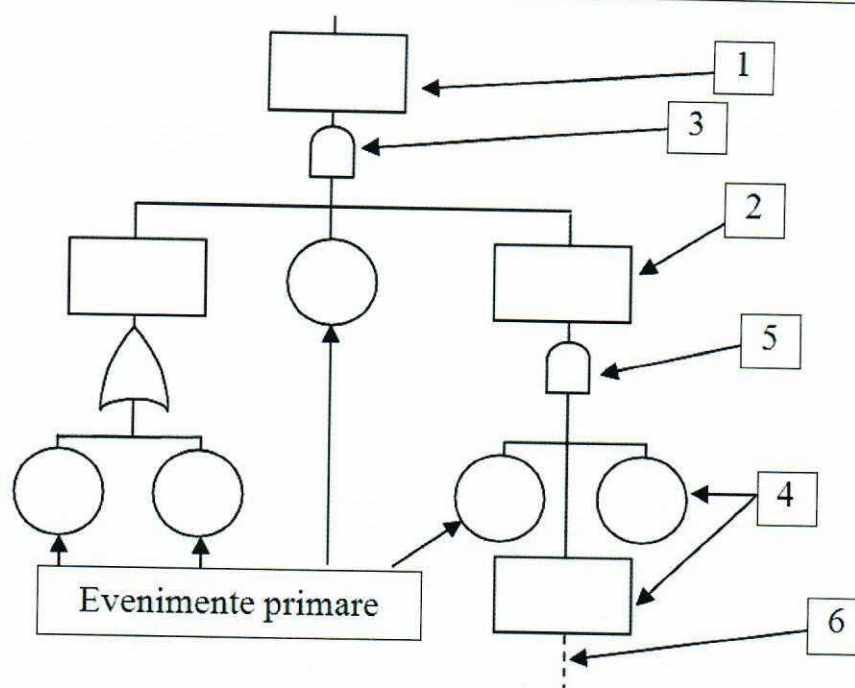


Fig. 5.4. Construcția unui arbore de defectare [14]

5.5. Modele utilizate pentru evenimentele primare

Modelul „Fixed” este atribuit evenimentului a cărui probabilitate de manifestare nu variază cu timpul și este utilizat pentru a reprezenta o probabilitate de cedare impusă, determinată anterior prin metode statistice.

Modelul „Rate” este dependent de timp și presupune o frecvență de cedare și reparare calculată în funcție de numărul de cedări pe oră, pe parcursul întregii perioade de funcționare a sistemului. Probabilitatea de cedare (funcționarea neconformă a componentei) la timpul t este dată de relația:

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} [1 - e^{-(\lambda + \mu)t}] \quad (5.1)$$

Frecvența cu care se produc cedările până la timpul t este dată de:

$$w(t) = (1 - Q(t)) * \lambda \quad (5.2)$$

unde:

- $Q(t)$ - Probabilitatea de cedare sau funcționarea defectuoasă a componentei la timpul t ;
- λ - Frecvența (rata) de cedare a componentei;
- μ - Frecvența (rata) de reparație a componentei.

„Normal distribution” este un model dependent de timp. Probabilitatea cedării (F-failure) la timpul t este dată de relația (a se vedea capitolul 2):

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (5.3)$$

cu funcția de distribuție:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (5.4)$$

unde:

- t - timpul;
- σ - deviația standard;
- m - valoarea medie.

Pentru a calcula probabilitatea cedării pe baza acestei distribuții este necesar să cunoaștem valorile pentru parametrii ce reprezintă deviația standard și valoarea medie.

„Uniform distribution” este un model dependent de timp. Probabilitatea de cedare la timpul t este dată de:

$$F(t) = \frac{t-a}{b-a} \quad (5.5)$$

unde:

- t - timpul;
- a - limita inferioară;
- b - limita superioară.

Pentru a calcula incertitudinea pentru această distribuție este nevoie să se cunoască valorile parametrilor a și b .

Exemple de date privitoare la evenimentele primare sunt sumarizate în *tabelele 5.3. și 5.4*:

Tab. 5.3. Raportul privind modelele cu cedare fixă

Model ID	Unavailability	Failure Frequency	Calculated Unavailability	Calculated Failure Frequency
Model 1	0.0089	0.0775	0.0089	0.0775
Model 2	0.054	0.063	0.054	0.063
Model 3	0.003	0.002	0.003	0.002
Model 4	0.001	0.09	0.001	0.09

Tab. 5.4. Raportul privind modelele de tip „rate”

Model ID	Failure Rate/ λ	Repair Rate/ μ	Calculated Unavailability/Q	Calculated Failure Frequency/w
Model 5	0.0049	0.014	0.0048539853	0.0048762155
Model 6	0.049	0.23	0.0042758225	0.046904847
Model 7	0.0055	0.213	0.0049405989	0.0054728267
Model 8	0.0019	0.01	0.0018887397	0.0018964114
Model 9	0.005	0.02	0.0049380176	0.0049753099

5.6. Moduri de cedare și analiza efectelor cedării

Analiza posibilităților de cedare și a efectelor acestora reprezintă o metodologie de identificare a modurilor potențiale de defecțiune și a hazardului asociat cu proiectarea detaliată a produsului sau procesului.

În cadrul acestei analize, modul de abordare face referire la următorii pași:

✓ *stabilirea gravității consecințelor cedării/eșecului/nefuncționării.*

Gravitatea consecințelor manifestării unei degradări/defecțiuni/cedări/eșec/nefuncționări, este luată în considerare pe baza unei scări cu patru valori:

✓ *Stabilirea nivelului de risc.*

Nivelul de risc se calculează pe bază de probabilitatea de apariție și impactul consecințelor:

$$\text{Nivelul riscului: } \text{Risc} = (p_a)(c_g)$$

unde: p_a – reprezintă probabilitatea de apariție;

- c_g – reprezintă categoria gravității de apariție defectului.

Probabilitatea de apariție se cuantifică pe baza a cinci nivele: A, B, C, D, E, în care se evidențiază și frecvența de manifestare.

Tab. 5.5. Categoriile de consecințe

Categoria	Descriere	Definiție
I	Neglijabil	Defect funcțional al unei piese sau al unui proces, fără stricăciuni
II	Critic	Defecte cu posibilități de manifestare, fără degradări majore ale sistemului sau stricăciuni serioase
III	Major	Degradare majoră a sistemului și/sau rănire a personalului
IV	Catastrofic	Ieșirea completă din uz a sistemului și/sau deteriorări grave și/sau rănire/deces a personalului

Tab. 5.6. Categoriile de risc

Nivelul	Probabilitatea	Descriere	Operație singulară
A	10^{-1}	Frecvent	Apariție frecventă
B	10^{-2}	Probabil	Are loc la diverse momente pe durata de viață a produsului
C	10^{-3}	Ocazional	Are loc la un moment pe durata de viață a produsului
D	10^{-4}	Vag (slab, îndepărtat)	Puțin probabil să apară dar este posibil
E	10^{-5}	Improbabil	Rareori are loc

✓ *Eveniment – probabilitate*

Numărul priorității de risc (risk priority number - RPN) este dat de relația:

$$RPN = (g_d) \cdot (p_a) \cdot (p_d)$$

unde:

- g_d – reprezintă, cantitativ, gravitatea și impactul defectării/cedării/eșecului/neconformității;
- p_a – reprezintă probabilitatea de apariție;
- p_d – reprezintă probabilitatea de detecție.

O valoare ridicată pentru RPN indică un risc semnificativ pentru sistem se impune reprojectarea produsului urmărindu-se eliminarea sau cel puțin reducerea acestui risc.

✓ *Scala de normare pentru gravitatea efectului produs prin defect*

Estimare	Descriere	Efectul asupra sistemului sau consumatorului	Paguba materială posibilă	Hazard
1	Neobservabil	Aproape nimic	Aproape nimic	Aproape nimic
	Foarte mic	Observabil	Aproape nimic	Aproape nimic
3	Mic	Consumator deranjat	Aproape nimic	Aproape nimic
4	Ușor (slab)	Consumator deranjat, sistemul necesită service	Aproape nimic	Aproape nimic
5	Moderat	Reclamație de la consumator, sistemul necesită service	Minor	Ușor
6	Semnificativ	Reclamație de la consumator, sistem parțial defectat	Moderat	Ușor
7	Major	Consumator nemulțumit, deranjament major în sistem	Semnificativ	Deteriorare minoră
8	Extrem	Sistem inoperabil sau inutilizabil	Major	Deteriorare
9	Decisiv	Sistem inoperabil sau inutilizabil	Extrem	Deteriorare serioasă
10	Riscant	Sistem inoperabil	Extrem	Pierderi umane

✓ *Scala de normare pentru probabilitatea de apariție*

Estimare	Descriere	O apariție la ? evenimente	O apariție la ? evenimente	O apariție
1	Extrem de îndepărtată	1.000.000	$\geq 500.000.000$	în 5 - ani
2	Foarte puțin probabilă	100.000	500.000.000	în 3 - 5 ani
3	Foarte ușor întâmplătoare	25.000	1.666.667	în 1- 3 ani
4	Ușor întâmplătoare	2.500	16.667	la 1 an
5	Ocazională	500	10.000	la 6 luni
6	Moderată	100	333	la 3 luni
7	Destul de frecventă	25	100	pe lună
8	Ridicată	5	20	pe săptămână
9	Foarte înaltă	3	3	oricare zi
10	Extrem de înaltă	≤ 2	$\leq$	pe zi

✓ *Probabilitatea de detectare a defectului*

Scala de ierarhizarea a probabilității de detectare a defectului

Estimare	Service	Fabricație
1	Aproape sigur	100 % inspecție automată (SPC) + calibrare & întreținere preventivă
2	Foarte înalt	100 % inspecție automată (SPC)
3	Înalt	100 % SPC ($C_{pk} \geq 1.33$)
4	Moderat	100 % SPC
5	Moderat	Parțial SPC + 100 % inspecție finală
6	Scăzut	100 % inspecție manuală utilizând calibre trece / nu trece
7	Ușor (scăzut)	100 % inspecție manuală în proces
8	Vag (slab)	Inspecție simplă, 100 % fără defect
9	Foarte vag (slab)	Inspecție simplă, se acceptă nivelul de calitate
10	Aproape fără	Fără inspecție

5.7. Studiul fiabilității sistemelor prin metoda arborilor de defectare

Pe baza analizei prin metoda arborelui de defectare, se poate obține, fie probabilitatea de defectare, fie rata de defectare [15, 16]:

- a) Evaluarea probabilității de defectare folosește proprietățile porților logice: ȘI, SAU, INVERTOR, figura 5.5:

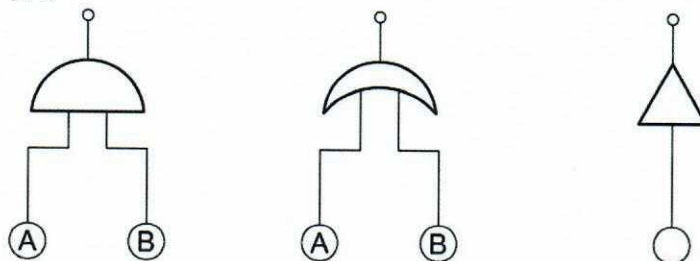


Fig. 5.5. Tipuri de porți

Astfel, la ieșirile celor trei porți logice, probabilitatea de a avea defect este:

- la ieșirea porții ȘI

probabilitatea (A și B defect)=

$$= P(A \cap B) = \begin{cases} P(A) * P(B) & \text{pentru evenimente independente} \\ P(A/B) * P(B) = P(A) * P(B/A) & \text{pentru evenimente dependente} \end{cases}$$

- la ieșirea porții SAU

probabilitatea (A sau B defect)=

$$= P(A \cup B) = \begin{cases} P(A) - P(B) + P(A \cap B) & \text{pentru evenimente dependente} \\ P(A) + P(B) - P(A) * P(B) & \text{pentru evenimente independente} \end{cases}$$

- la ieșirea porții INVERTOR

$$\text{probabilitatea (A să nu fie defect)} = P(\bar{A}) = 1 - P(A)$$

- b) Evaluarea ratei de defectare (λ_s) se face pe baza ipotezei că defectările elementelor componente sunt evenimente independente și legea de defectare este de tip exponențial.

Pentru a stabili valoarea ratei de defectare a sistemului, se pornește de la următoarele considerente:

- probabilitatea (A să se defecteze în intervalul 0,t) = $P(A) = F_A(t)$;
- probabilitatea (B să se defecteze în intervalul 0,t) = $P(B) = F_B(t)$.

Astfel, la ieșirea porții SAU, se obține:

$P(A \cup B)$ se defectează în intervalul (0,t)

$$= P(A) - P(B) + P(A) * P(B) = F_A(t) + F_B(t) - F_A(t) * F_B(t) = F(t) \quad (5.6)$$

Deci fiabilitatea $R(t)$ – reliability, va fi:

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - F(t) = 1 - F_A(t) - F_B(t) + F_A(t) * F_B(t) \\ &= [1 - F_A(t)] * [1 - F_B(t)] = R_A(t) * R_B(t) \end{aligned} \quad (5.7)$$

cum:

$$R_A(t) = \exp(-\lambda_A * t) \text{ și } R_B(t) = \exp(-\lambda_B * t) \quad (5.8)$$

se obține fiabilitatea sistemului:

$$R(t) = \exp(-\lambda_A * t - \lambda_B * t) \quad (5.9)$$

de unde rezultă că la ieșirea porții logice SAU se obține:

$$\lambda_S = \lambda_A + \lambda_B \quad (5.10)$$

Pentru a determina rata de defectare la ieșirea porții logice ȘI, se consideră N elemente și se reia corespunzător raționamentul de mai sus:

$$\lambda_S = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i * (\alpha_i - 1)}{\prod_{i=1}^N \alpha_i - 1} \quad (5.11)$$

unde:

$$\alpha_i = \frac{1}{1 - \exp(-\lambda_i * t)} \quad (5.12)$$

Un caz particular îl constituie cel al elementelor identice legate în paralel, alcătuind scheme redundante:

$$\lambda_S = \frac{N * \lambda}{\sum_{j=0}^{N-1} \alpha^j} \quad (5.13)$$

unde:

$$\alpha = \frac{1}{1 - \exp(-\lambda * t)} \quad (5.14)$$

Se observă că la limită:

$$t \rightarrow 0 \Rightarrow \alpha \rightarrow \infty \Rightarrow \lambda_S = 0 \quad (5.15)$$

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow \alpha \rightarrow 1 \Rightarrow \lambda_S = \lambda \quad (5.16)$$

În afară de simbolurile porților logice, se mai folosesc și alte simboluri grafice pentru configurarea arborelui de defectare, semnificația acestora fiind explicată în subcapitolul anterior.

5.8. Exemple de aplicare a metodologiei de tip arbore de defectare

În cazul unei analize utilizând metodologia de tip „arbore de defectare”, trebuie să se cunoască în detaliu anumite aspecte privitoare la sistemul analizat. În primul rând, trebuie avută în vedere structura, elementele componente ale sistemului și legăturile dintre acestea. Trebuie să se cunoască, în detaliu, modul de funcționare a sistemului și posibilitățile de defectare/cedare/eșec/funcționare defectuoasă ale fiecărei componente și ale sistemului, în ansamblul său. Trebuie avute în vedere influențele exterioare și interioare asupra evenimentelor luate în considerare. De asemenea, pe baza experiențelor anterioare, a discuțiilor cu specialiști, etc. pentru evenimentele primare trebuie stabilite, de la început, caracteristicile legate de cedare/fiabilitate/reparație, cum ar fi: probabilitatea de cedare, frecvența de manifestare, rata de

reparație, deviația standard, valoarea medie, limitele inferioară și superioară, etc. Valorile introduse pentru aceste mărimi influențează în mod direct riscul de apariție a evenimentului de top considerat [17, 18].

Exemplele furnizate în cele ce urmează țin seama de aceste precizări, etapele prezentate mai sus regăsindu-se în aplicațiile următoare.

5.8.1. Arbore de defectare la sistemul de frânare

Eficacitatea sistemului de frânare asigură punerea în valoare a performanțelor de viteză ale automobilului. În practică, eficiența frânelor se apreciază după distanța de oprire a unui automobil având o anumită viteză și ținând cont de starea suprafeței corasabile. În figura 5.6 se prezintă structura și componența sistemului de frânare.

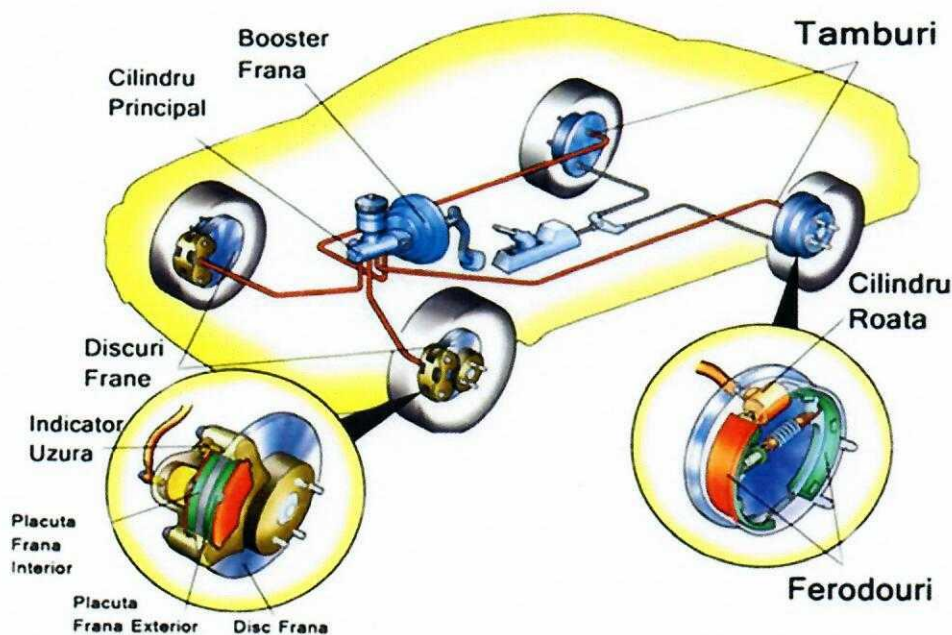


Fig. 5.6. Componentele sistemului de frânare pentru un automobil

În figura 5.7 este structurat și analizat un arbore de defectare cu luarea în considerare a posibilității defectării sau funcționării defectuoase a sistemului. Desenul arborelui de defectare structurat pe baza componentelor sale și a legăturilor dintre acestea, cuprinde [19]:

- evenimentul de top, reprezentând defectarea sau funcționarea necorespunzătoare, în parametrii proiectați ai sistemului de frânare;
- 5 porți logice de tip „SAU”;
- 9 evenimente primare care au la bază posibile funcționări defectuoase, cedări, condiții improprii de funcționare, etc.

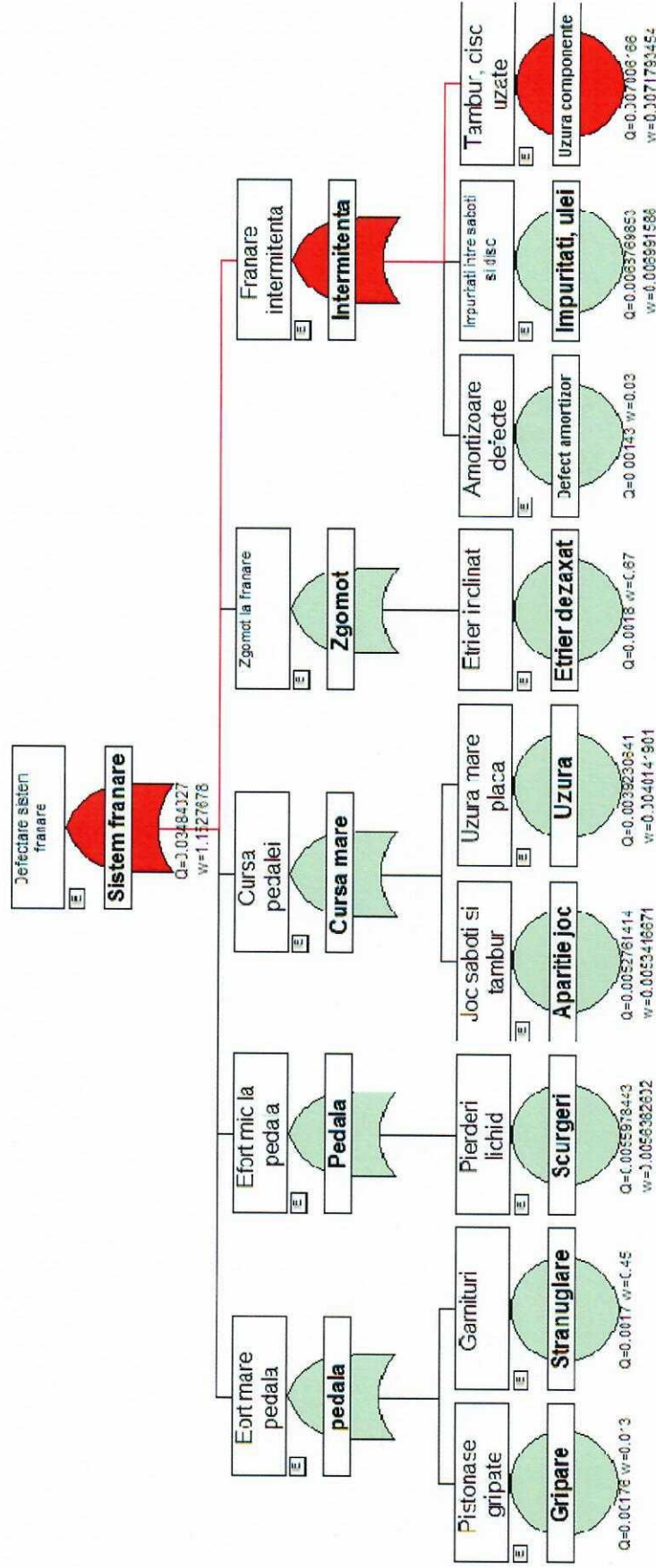


Fig. 5.7. Arborele de defeciere pentru sistemul de frânare [17]

Pentru evenimentele primare, se impun o probabilitate de manifestare Q și o frecvență de apariție w . Pentru a avea valori cât mai aproape de realitate în ceea ce privește Q și w trebuie să avem în vedere anumite aspecte privitoare la: modelele utilizate pentru manifestarea evenimentelor primare, capacitatea acestora de defectare, frecvența de defectare, frecvența de inspecție sau/și reparație, etc. În general, stabilirea valorilor pentru Q și w se face pe baza datelor statistice, a calculului probabilistic, a experienței, a modelelor similare aflate în funcționare. În aceste condiții, pentru evenimentul de top, prin rularea programului și efectuarea calculului la trecerea prin porți, se obține o probabilitate de manifestare a cedării de 3,4%.

Tot din figura 5.6, după rularea programului se distinge traseul cel mai nefavorabil, cu influența (nefastă) cea mai mare asupra manifestării evenimentului de top.

În tabelele 5.7, 5.8 și 5.9 se prezintă rezultatele finale și tabelare furnizate de către program [17]. În tabelul 5.7 sunt date mărimi ce caracterizează doar evenimentul principal (de top): probabilitate, frecvență, risc, fiabilitate.

Din perspectiva asumării riscului, a fiabilității și mentenanței, valorile pentru mărimile prezentate aici sunt importante și trebuie luate în considerare de către echipa de management. Se observă că sunt un număr de 9 trasee (cut sets), ordonate în funcție de contribuția lor (nefastă) la probabilitatea de manifestare a neconformității (funcționarea necorespunzătoare a sistemului de frânare). În acest fel, putem face o evaluare, din punct de vedere a situațiilor de risc în care ne aflăm, pentru a lua măsuri în consecință și a diminua probabilitatea de manifestare inițială a evenimentelor primare.

Tab. 5.7. Probabilitate, frecvență, risc, fiabilitate, pentru evenimentul de top

Parameter:	Value	Mean	Std	5%	50%	95%	99.00%
Unavailability Q:	0.03484027	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Failure Frequency W:	1.1527678	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mean Unavailability Qm:	0.020915927						
Mean Availability Am:	0.97908407						
CFI	1.1943804						
Expected Failures:	1.1693988						
Unreliability:	0.69710842						
Total Down Time TDT:	0.020915927						
Total Up Time TUT:	0.97908407						
Failure Rate:	1.1943804						
MTBF:	0.85514028						
MTTF:	0.83725422						
MTTR:	0.017886052						
Availability:	0.96515973						
Reliability:	0.30289158						
No. of Cut Sets:	9						

Tab. 5.8. Lista evenimentelor de bază și criterii de importanță – contribuția evenimentelor

Importance			
Event:	F-Vesely:	Birnbaum:	B-Proshan:
Uzura componente	0.19808103	1	0.0060221069
Impurități, ulei	0.19442879	1	0.0058646125
Scurgeri	0.15826442	1	0.0047294292
Apariție joc	0.14916911	1	0.004480644
Uzura	0.11091439	1	0.0033671429
Etrier dezaxat	0.050890296	1	0.56200272
Gripare	0.049759401	1	0.01090453
Stranuglare	0.048063057	1	0.37746451
Deect amortizor	0.040429513	1	0.025164301

Tab. 5.9. Lista evenimentelor în ordinea importanței lor

Cut Sets			
No:	Unavailability:	Frequency:	Events
1	0.007006166	0.0071793454	Uzura componente
2	0.0068769853	0.006991586	Impuritati, ulei
3	0.0055978443	0.0056382602	Scurgeri
4	0.0052761414	0.0053416671	Aparitie joc
5	0.0039230641	0.0040141901	Uzura
6	0.0018	0.67	Etrier dezaxat
7	0.00176	0.013	Gripare
8	0.0017	0.45	Stranuglare
9	0.00143	0.03	Defect amortizor

5.8.2. Accident rutier

Accidentul rutier, *figura 5.8*, este un eveniment final, neprevăzut și neintenționat care apare ca urmare, fie a unei acțiuni greșite a participanților la trafic, fie ca urmare a defecțiunii unuia dintre sistemele de siguranță la un autovehicul din trafic, fie ca urmare a stării precare a drumului, fie ca urmare a vremii nefavorabile [20]. Oricare ar fi cauzele primare, inițiale, efectul poate fi catastrofal, cu costuri umane și materiale mari.


Fig. 5.8. Accident rutier

În *figura 5.9* este desenat un arbore de defectare ce ia în considerare, ca eveniment final, posibilitatea producerii unui accident auto [17]. Ca evenimente primare și intermediare, arborele de defectare în cazul unui accident auto ia în considerare posibilitățile de neconformitate/eveniment nefast/defecțiune ce se pot manifesta în acest caz.

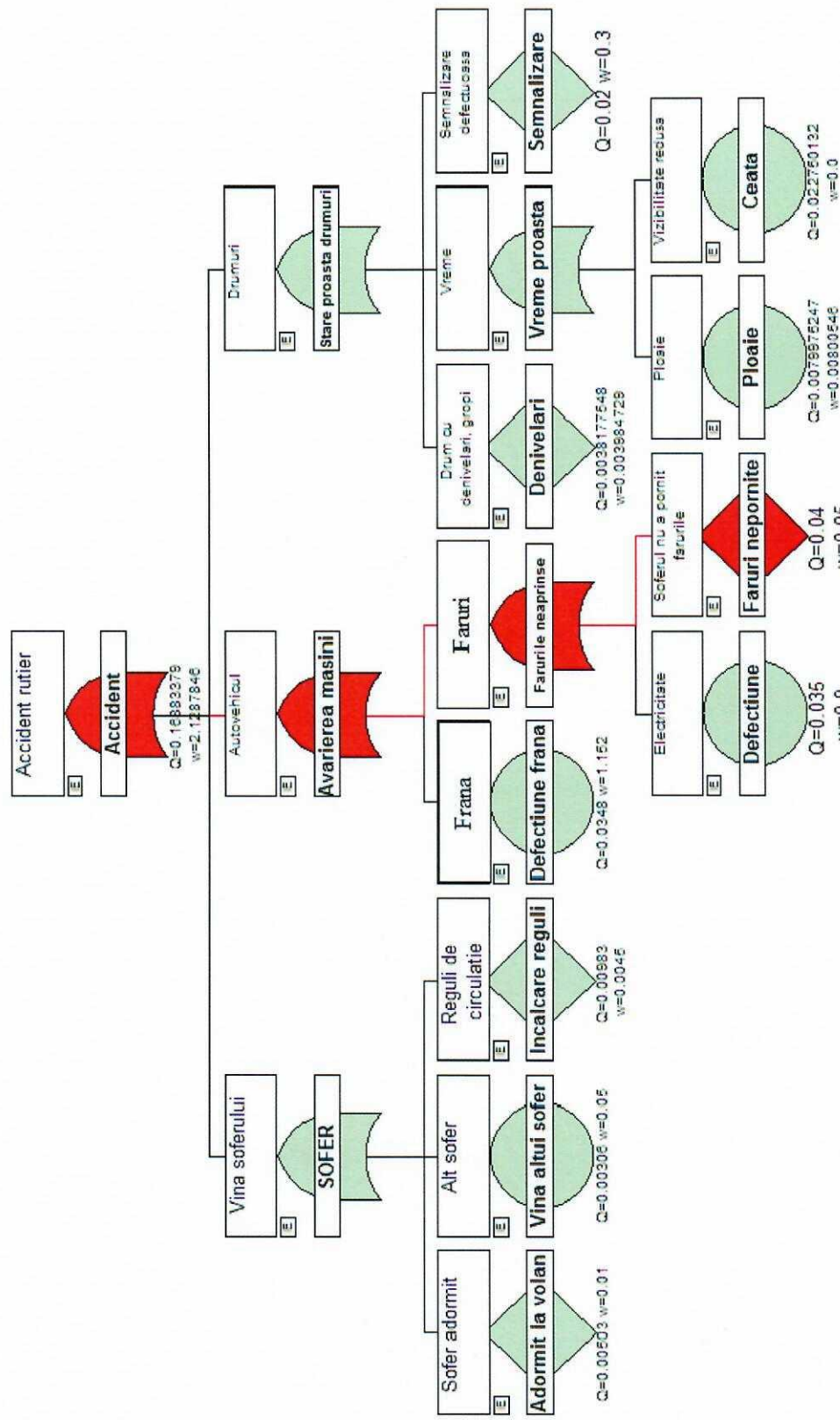


Fig. 5.9. Analiza unui accident rutier prin metoda arborelui de defectare [17]

Arborele din figura 5.9 cuprinde următoarele componente:

- evenimentul de top reprezentând posibilitatea de a se produce un accident rutier;
- 5 porți logice de tip „SAU”;
- 5 evenimente primare care au la bază posibile funcționări defectuoase, cedări, condiții de drum și meteorologice improprii;
- 5 evenimente de bază nedezvoltate (eveniment de bază care nu are nevoie de o rezolvare în continuare).

Pentru fiecare eveniment de bază considerat, se alege un model de referință în ceea ce privește posibilitatea de manifestare a respectivului eveniment [21]. În funcție de modelul ales pentru evenimentele de bază, pe bază de calcule, experiență anterioară, brainstorming, etc. se trec parametrii ce caracterizează respectivul model. Astfel, impunând, pentru evenimentele primare/de bază, de exemplu, probabilitatea de manifestare Q și frecvența de apariție w (modelul Fixed), pentru evenimentul de top, prin rularea programului și efectuarea calculelor la trecerea prin porți, se obține o probabilitate de accident de 16%.

Tot din figura 5.9, după rularea programului se distinge traseul cel mai nefavorabil, cu influența (nefastă) cea mai mare asupra posibilității de producere a unui accident rutier.

În tabelele 5.10, 5.11 și 5.12 se prezintă rezultatele furnizate și obținute după rularea programului. În tabelul 5.10 sunt date mărimi ca: probabilitate, frecvență, risc, fiabilitate, ce caracterizează probabilitatea de producere a unui accident rutier. În tabelul 5.11 este prezentată lista evenimentelor de bază și sunt date criteriile de importanță privind contribuția acestora. În tabelul 5.12 este prezentată lista evenimentelor de bază în ordinea contribuției lor (nefaste) asupra probabilității și frecvenței de manifestare a evenimentului de top.

Tab. 5.10. Probabilitate, frecvență, risc, fiabilitate, pentru evenimentul de top

Summary							
				Life Time :		OK	
Parameter:	Value	Mean	Std	5%	50%	95%	99.00%
Unavailability Q:	0.16883379	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Failure Frequency W:	2.1287846	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mean Unavailability Qm:	0.14542229						
Mean Availability Am:	0.85457771						
CFI	2.561202						
Expected Failures:	2.1887461						
Unreliability:	0.92278812						
Total Down Time TDT:	0.14542229						
Total Up Time TUT:	0.85457771						
Failure Rate:	2.561202						
MTBF:	0.45688259						
MTTF:	0.39044168						
MTTR:	0.066440914						
Availability:	0.83116621						
Reliability:	0.077211877						
Min of Cut Sets:	10						

Tab. 5.11. Lista evenimentelor de bază și criteriile de importanță – contribuția evenimentelor

Importance			
Event:	F-Vesely:	Birnbaum:	B-Proshan:
Faruri nepornite	0.2194361	1	0.020173572
Defectiune	0.19200659	1	0.36312429
Defectiune frana	0.19090941	1	0.4647991
Ceata	0.12480501	1	0.0
Semnalizare	0.10971805	1	0.12104143
Incalcare reguli	0.053926422	1	0.0018156215
Ploaie	0.043873641	1	0.0032299744
Adormit la volan	0.02759409	1	0.0040347144
Derivelari	0.020943831	1	0.0016077243
Vina altui sofer	0.016786862	1	0.020173572

Tab. 5.12. Lista evenimentelor în ordinea importanței lor

Cut Sets			
No:	Unavailability:	Frequency:	Events
1	0.04	0.05	Faruri nepornite
2	0.035	0.9	Defecțiune
3	0.0348	1.152	Defecțiune frână
4	0.022750132	0.0	Ceată
5	0.02	0.3	Semnalizare
6	0.00983	0.0045	Încălcarea regulii
7	0.0079975247	0.00800546	Ploaie
8	0.00503	0.01	Adormit la volan
9	0.0038177548	0.003984729	Derivelari
10	0.00306	0.05	Vina altui sofer

5.8.3. Avarierea unei rețele de conducte

Supravegherea și controlul funcționării rețelelor de conducte, *figura 5.10*, sunt activități extrem de complexe, datorită existenței unui număr mare de noduri de intrare-ieșire ce trebuie să satisfacă anumite cerințe de presiune, debit, temperatură, etc., [22]. Aceste rețele se întind, de obicei, pe o zonă geografică vastă, în care funcționează o serie de factori de risc, ce se vor descrie mai jos, ce pot afecta performanța sau integritatea rețelei.

**Fig. 5.10.** Rețea de conducte

În general, se efectuează o monitorizare a funcționării improprie a rețelei, pe baza analizei deviației unor mărimi standard avute în vedere. În acest fel, se poate detecta din timp apariția unor evenimente nedorite cum ar fi: scurgeri, blocarea unor ventile, dispozitive de dozare defecte, etc. În vederea diagnosticării și detectării defectelor din rețelele de conducte se practică mai multe abordări. Analiza posibilității privind avarierea unei rețele de conducte pe baza arborelui de defectare reprezintă una dintre acestea.

În *figura 5.11* este prezentat arborele de defectare pentru care evenimentul de top îl reprezintă apariția unei avarii în oricare punct din cadrul unei rețele de conducte. Cauzele ce pot conduce la un asemenea efect sunt constituite din: defecte inițiale de material, solicitări peste cele admise, solicitări neprevăzute, tehnologie de execuție incorectă, acțiunea factorilor de mediu. Arborele din *figura 5.11* cuprinde următoarele componente:

- evenimentul de top reprezentând posibilitatea de a se produce o avarie a rețelei de conducte;
- 7 porți logice de tip „SAU”;
- 2 porți logice de tip „SI”;
- 16 evenimente primare care au la bază diferite condiții de acțiune asupra rețelei de conducte.

Având în vedere faptul că există acțiunea unor factori cu dezvoltare și variație în timp, pentru anumite evenimente se alege modelul „Rate” ca fiind de referință în ceea ce privește modelul și

posibilitatea de manifestare a respectivului eveniment primar. Parametrii ce caracterizează evenimentele primare, din punct de vedere al riscului de apariție a neconformității, se aleg pe bază de calcule, experiență anterioară, analiza statistică a datelor. Impunând pentru evenimentele primare/de bază, de exemplu, rata de cedare și rata de reparație (modelul Rate), pentru evenimentul de top, prin rularea programului și efectuarea calculelor la trecerea prin porți, se obține o probabilitate de avarie de $2,13 \cdot 10^{-7}$ și o frecvență de apariție de 0,19.

Tot din *figura 5.11*, după rularea programului se distinge traseul cel mai nefavorabil, cu influența (nefastă) cea mai mare asupra posibilității de producere a avarierii rețelei de conducte.

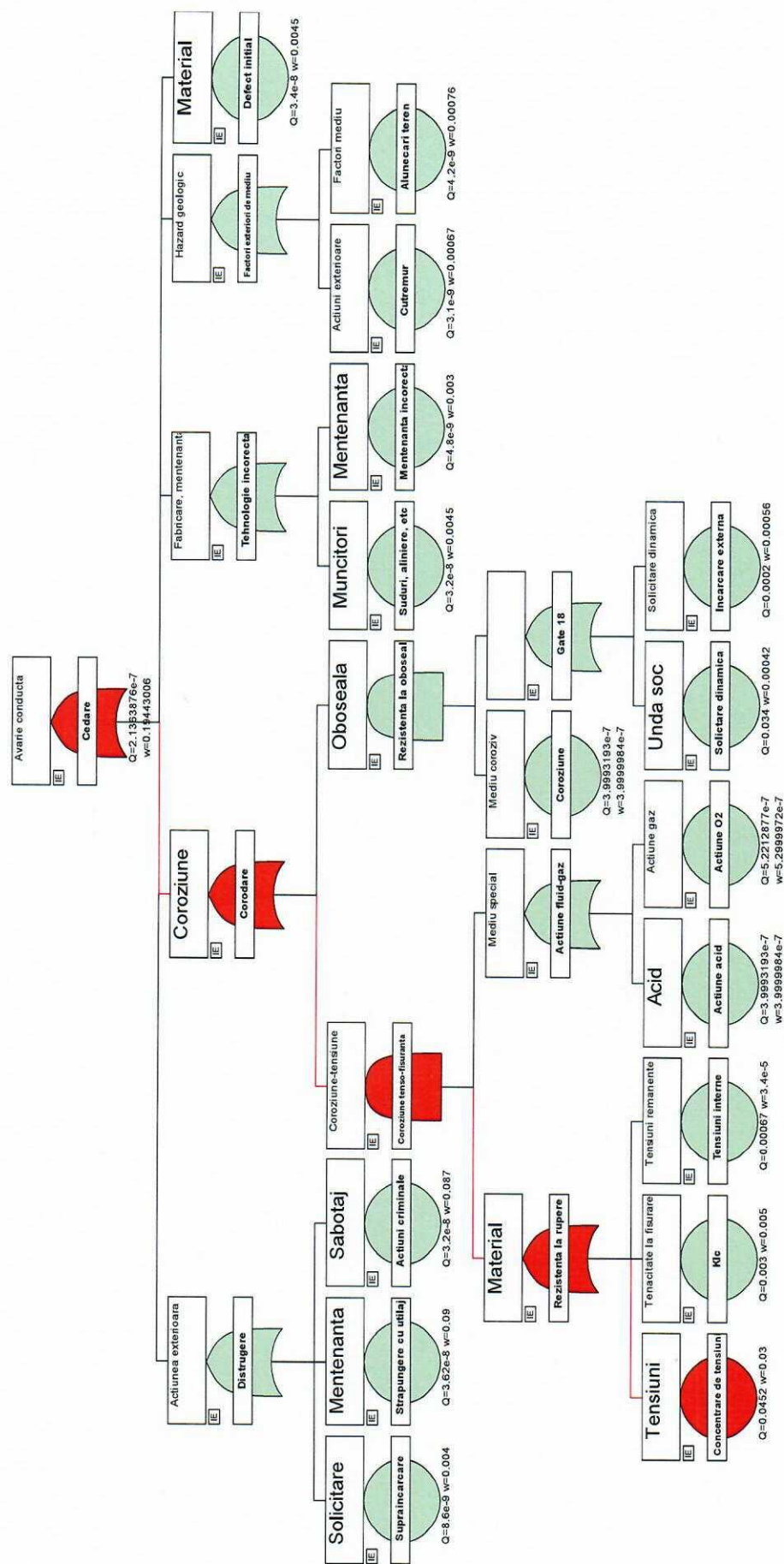


Fig. 5.11. Arbore de defectare aplicat avariei unui sistem de conducte [17]

In *tabelele 5.13, 5.14 și 5.15* sunt date rezultatele furnizate și obținute după rularea programului bazat pe diagrama de tip arbore de defectare din *figura 5.11*. In *tabelul 5.13* sunt date mărimi ca: probabilitate, frecvență, risc, fiabilitate, ce caracterizează probabilitatea de producere a unei avarii, funcționări incorecte sau defecțiuni, acesta fiind evenimentul de top sau efectul rezultat ca urmare a urmării traseelor din cadrul arborelui de defectare. In *tabelul 5.14* este prezentată lista evenimentelor de bază și sunt date criteriile de importanță privind contribuția acestora la producerea avariei. In *tabelul 5.15* este prezentată lista evenimentelor de bază în ordinea contribuției lor (nefaste) asupra probabilității și frecvenței de manifestare a evenimentului de top. Sunt prezentate trei criterii asupra măsurării importanței evenimentelor de bază în cadrul evenimentului de top: criteriului Fussell-Vesely (contribuția evenimentului de bază la producerea avariei), criteriul Birnbaum (o măsură a sensibilității la avarie determinată de probabilitatea de eșec înregistrată în cadrul fiecărui eveniment de bază sau intermediar), criteriul Barlow-Proshan (calculat pe baza diferitor secvențe de neconformități în cadrul evenimentelor primare sau intermediare).

Tab. 5.13. Probabilitate, frecvență, risc, fiabilitate, pentru evenimentul de top

Parameter:	Value	Mean	Std	5%	50%	95%	99.00%
Unavailability Q:	2.1363876e-7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Failure Frequency W:	0.19443006	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mean Unavailability Qm:	1.8433353e-7						
Mean Availability Am:	0.99999982						
CFI	0.1944301						
Expected Failures:	0.19443005						
Unreliability:	0.17669626						
Total Down Time TDT:	1.8433353e-7						
Total Up Time TUT:	0.99999982						
Failure Rate:	0.19443008						
MTBF:	5.143238						
MTTF:	5.143237						
MTTR:	9.4807119e-7						
Availability:	0.99999979						
Reliability:	0.82330374						
Min of CFI Factor:	16						

Tab. 5.14. Lista evenimentelor de bază și criterii de importanță – contribuția evenimentelor

Importance			
Event:	F-Vesely:	Birnbaum:	B-Proshan:
Concentrare de tensiuni	0.1950823	9.220607e-7	1.4227129e-7
Strapungere cu utilaj	0.16944489	1	0.46289131
Defect initial	0.15914714	1	0.023144566
Actiuni criminale	0.14978554	1	0.4474616
Suduri, aliniere, etc	0.14978554	1	0.023144566
Actiune O2	0.11943727	0.04887	1.3321542e-7
Actiune acid	0.091484671	0.04887	1.0053995e-7
Corozione	0.064022422	0.0342	7.0359451e-8
Solicitare dinamica	0.063648021	3.9993193e-7	8.6391673e-10
Supraincercare	0.040254864	1	0.020572947
Mentenananta incorecta	0.022467831	1	0.01542971
Alunecari teren	0.019659352	1	0.00390886
Cutremur	0.014510474	1	0.0034459686
Kic	0.01294794	9.220607e-7	2.371882e-8
Tensiuni interne	0.0028917066	9.220607e-7	1.612408e-10
Incarcare externa	0.00037440013	3.9993193e-7	1.151889e-9

Tab. 5.15. Lista evenimentelor în ordinea importanței lor

Cut Sets			
No:	Unavailability:	Frequency:	Events
1	3.62e-8	0.09	Strapungere cu utilaj
2	3.4e-8	0.0045	Defect initial
3	3.2e-8	0.0045	Suduri, aliniere, etc
4	3.2e-8	0.087	Actiuni criminale
5	2.360022e-8	3.9619851e-8	Actiune O2 ::Concentrare de tensiuni
6	1.8076923e-8	3.0077951e-8	Actiune acid ::Concentrare de tensiuni
7	1.3597686e-8	1.3767966e-8	Corozione ::Solicitare dinamica
8	8.6e-9	0.004	Supraincercare
9	4.8e-9	0.003	Mentenananta incorecta
10	4.2e-9	0.00076	Alunecari teren
11	3.1e-9	0.00067	Cutremur
12	1.5663863e-9	4.200643e-9	Actiune O2 ::Kic
13	1.1997958e-9	3.1996592e-9	Actiune acid ::Kic
14	3.4982628e-10	3.7285219e-10	Actiune O2 ::Tensiuni interne
15	2.6795439e-10	2.8159758e-10	Actiune acid ::Tensiuni interne
16	7.9986386e-11	3.0396185e-10	Corozione ::Incarcare externa

Se constată că sunt un număr de 16 trasee (cut sets), *tabelul 5.15*, ordonate în funcție de contribuția lor (nefastă) la probabilitatea de producere a avariei. În acest fel, putem face o evaluare, din punct de vedere a situațiilor de risc în care ne aflăm, pentru a lua măsuri în consecință și a diminua probabilitatea de manifestare inițială a evenimentelor primare. Este evident că, vom lua în considerare, mai întâi, traseul cu influența cea mai mare, *figura 5.11*. Pe de altă parte, trebuie să se țină seama și de costurile acestor măsuri care nu trebuie să fie prea mari. În consecință, se face o evaluare în vederea *diminuării* șanselor de manifestare a evenimentelor primare sau de influență prin porți a acestora asupra evenimentului de top.

5.8.4. Arborele de defectare a unei transmisii automate

Cutiile de viteze automate realizează schimbarea treptelor de viteză fără intervenția conducătorului automobilului [23]. Decizia de schimbare a treptelor de viteză este luată de calculatorul electronic de control al cutiei de viteze, pe baza informațiilor provenite de la senzori (poziție pedală accelerație și viteza automobilului). O cutie de viteze automată este compusă din trei subsisteme (componente):

- hidrotransformatorul, numit și convertizorul de cuplu;
- ansamblul de mecanisme planetare cu ambreiajele și frânele multidisc;
- modulul electro-hidraulic de comandă și control.

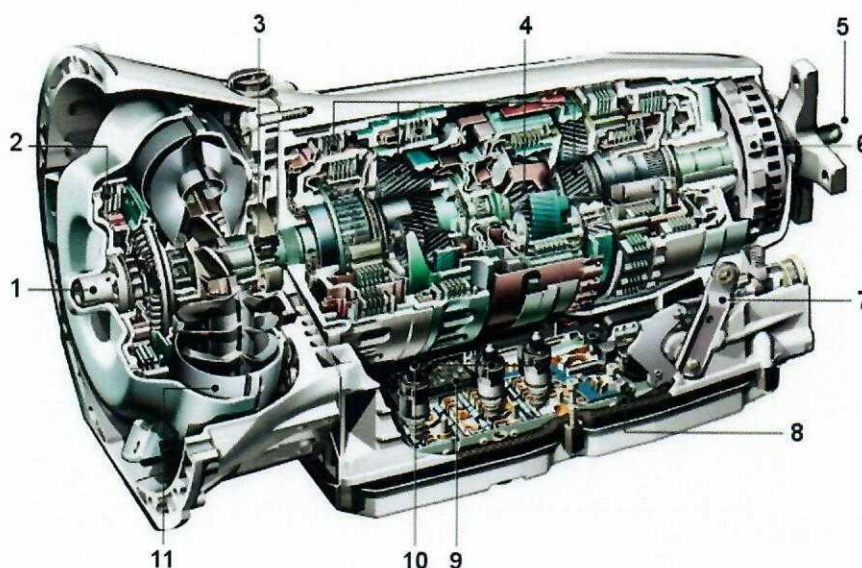


Fig. 5.12. Cutia automată cu 7 trepte 7G-tronic

Cutia de viteze automată din *figura 5.12* este compusă din [24]:

1. arborele de intrare în cutia de viteze (legătura cu motorul termic);
2. ambreiajul de blocare a hidrotransformatorului cu alunecare controlată și elemente de amortizare;
3. pompa de ulei pentru controlul presiunii de lucru;
4. mecanismele planetare și actuatorii de schimbare a treptelor (ambreiaje și frâne multidisc);
5. arborele de ieșire din cutia de viteze (legătura cu transmisia longitudinală, cardanică);
6. sistemul de blocare pentru parcare (poziția P a levierului de programe);
7. legătura mecanică cu levierul selector de programe;

8. modul electro-hidraulic de control (conține senzori, supape electromagnetice și calculatorul cutiei de viteze);
9. modulul electronic de comandă și control (calculatorul cutiei de viteze);
10. supape cu electromagnet (solenoid) pentru acționarea ambreiajelor și frânelor multidisc;
11. hidrotransformator (convertizor de cuplu).

Ținând cont de componența cutiei de viteze automate, de legăturile dintre componente, de acțiunea factorilor interni și externi, în figura *figura 5.13* se propune o structură de arbore de defectare ce cuprinde următoarele elemente:

- evenimentul de top reprezentând posibilitatea de defectare critică a cutiei de viteze automate, acest lucru însemnând de la un defect minor dar care trebuie reparat până la defectarea critică și blocarea în utilizare;
- 6 porți logice de tip „SAU”;
- 3 porți logice de tip „ȘI”;
- 14 evenimente primare care au la bază posibile funcționări defectuoase, cedări, ungeri cu ulei necorespunzătoare, etc.

Pentru fiecare evenimentul de bază considerat, se alege un model de referință în ceea ce privește posibilitatea de manifestare a respectivului eveniment. Având în vedere faptul că există acțiunea unor factori cu dezvoltare și variație în timp, pentru anumite evenimente se alege modelul „Rate” ca fiind de referință în ceea ce privește posibilitatea de manifestare a respectivului eveniment. Celelalte evenimente se aleg cu modelul de defectare de tip „Fixed”. Parametrii ce caracterizează evenimentele primare din punct de vedere al riscului de apariție a neconformității se aleg pe bază de calcule, experiență anterioară, analiza statistică a datelor, brainstorming, etc.

Caracteristicile de defectare sau de neconformitate impuse pentru evenimentele primare sunt: probabilitatea de producere și frecvența de manifestare (modelul „Fixed”) și rata de cedare și rata de reparație (modelul „Rate”). După implementarea acestor date corespunzătoare evenimentelor de bază, prin rularea programului și efectuarea calculelor la trecerea prin porți, pentru evenimentul de top se obține o probabilitate de defectare critică de $1,13 \cdot 10^{-6}$ și o frecvență de apariție de 0,039.

Tot din *figura 5.13*, după rularea programului se distinge traseul cel mai nefavorabil, cu influența (nefastă) cea mai mare asupra posibilității de cedare a cutiei de viteze. Acest traseu are ca eveniment de bază temperatura peste limită a uleiului. Este evident că această neconformitate poate fi privită ca fiind efectul unui alt șir de evenimente. Dacă se are în vedere acest lucru, poate fi construit un arbore de defectare separat, în care evenimentul de top se constituie din temperatura necorespunzătoare a uleiului. În această variantă, vor trebui identificate evenimentele de bază care conduc la acest efect. Probabilitatea și frecvența reieșite prin rularea programului secundar pentru evenimentul considerat acum ca fiind de top, vor fi trecute ca fiind caracteristicile modelului de neconformitate/cedare/eșec, ales pentru evenimentul considerat acum ca fiind primar.

În *tabelele 5.17, 5.18 și 5.19* se prezintă rezultatele furnizate și obținute prin rularea programului determinat de diagrama arborelui de defectare din *figura 5.13*.

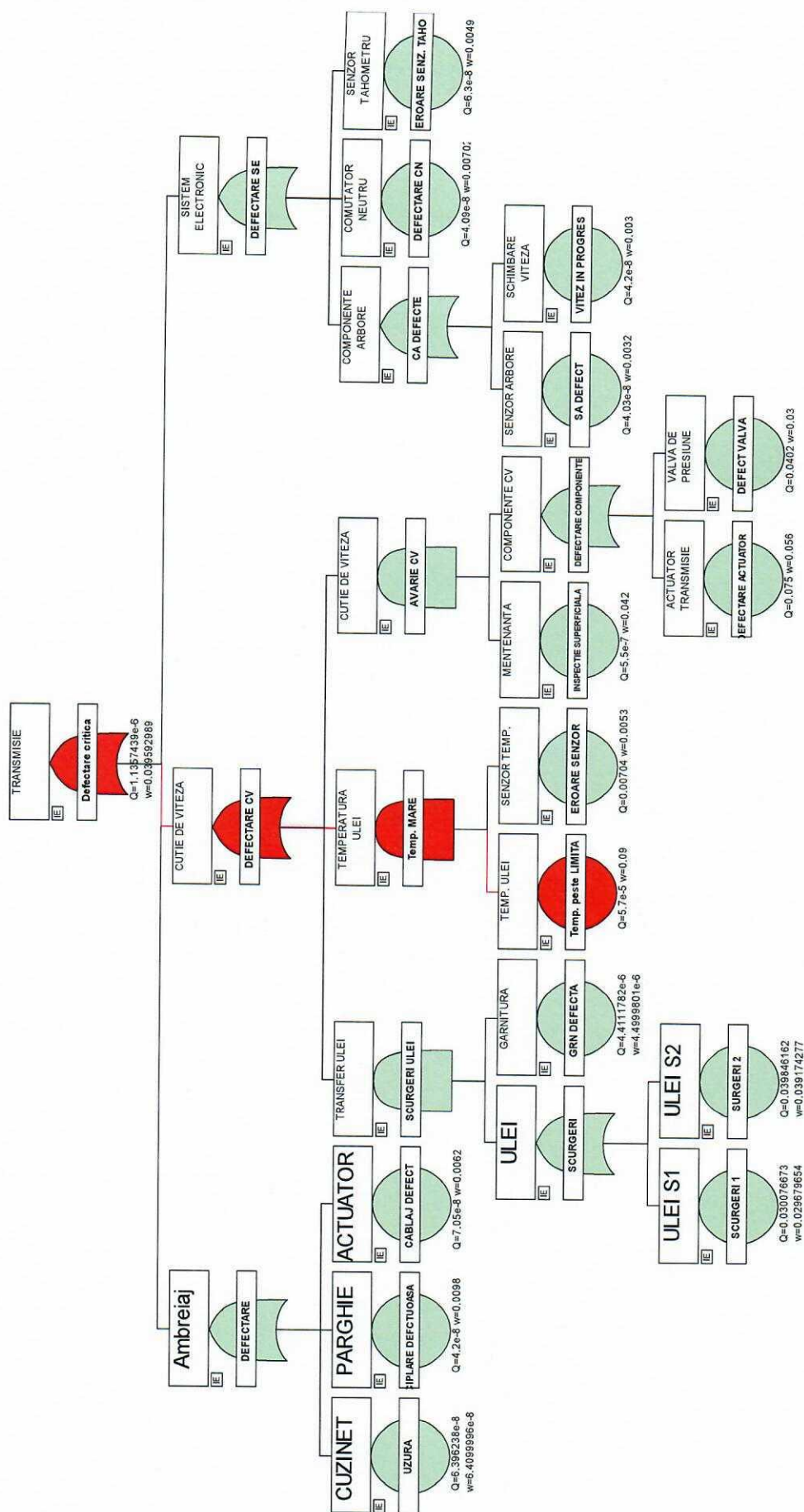


Fig. 5.13. Diagrama arborelui de defectare pentru avarierea unei transmisii automate [17]

În *tabelul 5.16* sunt date mai multe mărimi ce stabilesc, printre altele, riscul de realizare al evenimentului de top. Câteva dintre aceste caracteristici sunt: probabilitate, frecvență, fiabilitate, rata de cedare, timpul mediu de reparație, etc.. În *tabelul 5.17* este prezentată lista evenimentelor de bază, centralizate și ordonate în funcție de aportul și importanța lor asupra apariției evenimentului de top. În *tabelul 5.18* este prezentată lista evenimentelor de bază în ordinea contribuției lor (nefaste) asupra probabilității și frecvenței de manifestare a evenimentului de top. În funcție de tipul sistemului analizat, se poate considera unul din cele trei criterii de măsurare a importanței evenimentelor de bază în cadrul evenimentului de top: criteriul Fussell-Vesely, criteriul Birnbaum sau criteriul Barlow-Proshan, ale căror caracteristici au fost explicate anterior.

Tab. 5.16. Probabilitate, frecvență, risc, fiabilitate, pentru evenimentul de top

Parameter:	Value	Mean	Std	5%	50%	95%	99.00%
Unavailability Q:	1.1357439e-6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Failure Frequency W:	0.039592989	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mean Unavailability Qm:	8.9966464e-7						
Mean Availability Am:	0.9999991						
CFI	0.039593034						
Expected Failures:	0.039592693						
Unreliability:	0.038819179						
Total Down Time TDT:	8.9966464e-7						
Total Up Time TUT:	0.9999991						
Failure Rate:	0.039592729						
MTBF:	25.257186						
MTTF:	25.257163						
MTTR:	2.2722997e-5						
Availability:	0.99999886						
Reliability:	0.96118082						
No. of Cut Sets:	12						

Tab. 5.17. Lista evenimentelor de bază și criterii de importanță – contribuția evenimentelor

Event:	F-Vesely:	Birnbaum:	B-Proshan:
Temp. peste LIMITA	0.35331891	0.00704	0.016002816
EROARE SENZOR	0.35331891	5.7e-5	7.6301305e-6
GRN DEFECTA	0.27157701	0.069922835	7.9471401e-6
SURGERI 2	0.15476062	4.4111782e-6	4.3645235e-6
SURGERI 1	0.11681639	4.4111782e-6	3.3066991e-6
CABLAJ DEFECT	0.062073822	1	0.15659321
UZURA	0.05631758	1	1.6189716e-6
INSPECTIE SUPERFICIALA	0.055787197	0.1152	0.12220332
EROARE SENZ. TAHO	0.055470224	1	0.12375915
CIPLARE DEFECTUOASA	0.036980149	1	0.2475183
VITEZ IN PROGRES	0.036980149	1	0.075770909
DEFECTARE ACTUATOR	0.036319789	5.5e-7	7.7791466e-7
DEFECTARE CN	0.036011622	1	0.17730393
SA DEFECT	0.035483334	1	0.080822303
DEFECT VALVA	0.019467407	5.5e-7	4.1674e-7

Tab. 5.18. Lista evenimentelor în ordinea importanței lor

No:	Unavailability:	Frequency:	Events
1	4.0128e-7	0.0006339021	Temp. peste LIMITA ::EROARE SENZOR
2	1.7576852e-7	3.5211165e-7	GRN DEFECTA ::SURGERI 2
3	1.3267357e-7	2.6626667e-7	GRN DEFECTA ::SURGERI 1
4	7.05e-8	0.0062	CABLAJ DEFECT
5	6.396238e-8	6.4099999e-8	UZURA
6	6.3e-8	0.0049	EROARE SENZ. TAHO
7	4.2e-8	0.003	VITEZ IN PROGRES
8	4.2e-8	0.0098	CIPLARE DEFECTUOASA
9	4.125e-8	0.0031500308	INSPECTIE SUPERFICIALA ::DEFECTARE ACTUATOR
10	4.09e-8	0.00702	DEFECTARE CN
11	4.03e-8	0.0032	SA DEFECT
12	2.211e-8	0.0016884165	INSPECTIE SUPERFICIALA ::DEFECT VALVA

Se constată că sunt un număr de 12 trasee (cut sets), *tabelul 5.18*, ordonate în funcție de contribuția lor (nefastă) la probabilitate de producere a cedării/funcționării defectuoase a transmisiei automate. În acest fel, putem face o evaluare, din punct de vedere a situațiilor de risc în care ne aflăm, pentru a lua măsuri în consecință și a diminua probabilitatea de manifestare inițială a

evenimentelor primare. Implementarea acestor măsuri conduce și la costuri suplimentare care nu trebuie să fie prea mari. În consecință, se face o evaluare în vederea *diminuării* șanselor de manifestare a evenimentelor primare sau a influenței prin porți a acestora asupra evenimentului de top.

BIBLIOGRAFIE

- [1] M. Stamatelatos et. al, Fault Tree Handbook with Aerospace Applications, Prepared for NASA Office of Safety and Mission Assurance, NASA Headquarters Washington, DC 20546, 2002.
- [2] J. Andrews, Introduction to Fault Tree Analysis, Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2012.
- [3] W. E. Vessely et. al, Fault Tree Handbook, System and Reliability Research U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. 20555, 1981.
- [4] P.L.Clements, Fault Tree Analysis, 1993, www.fault-tree.net.
- [5] R. Pandher, A Procedure To Determine Head-In-Pillow Defect And Analysis Of Contributing Factors, South Plainfield, NJ, USA, 2010.
- [6] M. Rausand, System Reliability Theory (2nd ed), System Analysis, Fault Tree Analysis Wiley, 2004.
- [8] F.P.G. Márquez, Binary Decision Diagrams Applied to Fault Tree Analysis, The 4th IET International Conference on Railway Condition Monitoring: RCM, 2008.
- [9] M. Bozzano, A. Villafiorita, Integrating Fault Tree Analysis with Event Ordering Information, CiteSeer, 2003.
- [10] J. B. Dugan, S. Bavuso, M. Boyd, Fault Trees and Markov Models for Reliability Analysis of Fault Tolerant Systems. Reliability Engineering and System Safety, 39, 291-307, 1993.
- [11] J. B. Dugan, S. Doyle S., New Results in Fault-Tree Analysis. Annual Reliability and Maintainability Symposium Tutorials, 1997.
- [12] F. Safie, An Overview of Quantitative Risk Assessment Methods, Shuttle Quantitative Risk Assessment - Technical Interchange Meeting, 2000.
- [13] W. E. Vessely et. al, Fault Tree Handbook, System and Reliability Research U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. 20555, 1981.
- [14] P.L. Clements, Fault Tree Analysis, 1993, www.fault-tree.net;
- [15] K. Alverbro, B. Nevhage, R. Erdeniz, Methods for Risk Analysis, Printed in Sweden by US AB, Stockholm, 2010.
- [16] <http://biblioteca.regielive.ro/cursuri/electronica/fiabilitate-36189.html>.
- [17] ***, Programul ITEM Toolkit.
- [18] <http://ro.scribd.com/doc/158271582/diagrama-de-tip-arbore-de-defectare>.
- [19] http://conference.dresmara.ro/conferences/2010/20_Oancea_Gabriel.pdf.
- [20] <http://www.conceptdraw.com/solution-park/engineering-fault-tree-analysis-diagrams>.
- [21] <http://www.docstoc.com/docs/129867161/Fault-Tree-Analysis>.
- [22] <http://www.emeraldinsight.com/>.
- [23] http://omicron.ch.tuiasi.ro/~mgav/pdf/EMR/Curs_7.pdf.
- [24] <http://www.scribub.com/tehnica-mecanica/Diagnosticarea-pe-elemente-a-t24842.php>.

CAPITOLUL 6. ANALIZA RISCULUI PE BAZA METODOLOGIEI DE TIP ARBORE DE EVENIMENTE

-
- 6.1. Metodologia de analiză de tip arbore de evenimente
 - 6.2. Structura unui arbore de evenimente
 - 6.3. Etape în analiza pe baza metodologiei de tip arbore de evenimente
 - 6.4. Definirea unui eveniment accidental
 - 6.5. Barierele utilizate în cadrul unei diagrame de tip arbore de evenimente
 - 6.6. Consecințe, pericole, ieșiri
 - 6.7. Exemple de aplicare a metodologiei de analiză a riscului de tip arbore de evenimente
-

6.1. Metodologia de analiză de tip Arbore de Evenimente - AE

Metoda de tip arbore de evenimente reprezintă o structurare logică a unor evenimente intermediare, ce reprezintă bariere așezate în calea unei singure cauze pentru a diminua efectele rezultate ca urmare a manifestării acelei cauze. Analiza se desfășoară de la *cauză (una singură) la efect/efecte*. Se identifică evenimentul de inițiere (sau stimul) și se observă modul în care sistemul răspunde la diminuarea sau anularea efectelor produse ca urmare a materializării cauzei. Metoda AE se folosește de argumente probabilistice și încearcă să lege evenimentele improbabile ale sistemului cu evenimente mai probabile ale componentelor. Algoritmii abordărilor se bazează pe teoria probabilității și pe algebra booleană standard. Metodologia AE este folosită, în special, pentru analizarea situațiilor de urgență. Metodele de evaluare care permit cuantificarea probabilității unui accident și a riscurilor asociate cu funcționarea anormală, neconformă planului inițial, se bazează pe descrierea grafică a secvențelor de posibil accident/cedare/eșec, prin angajarea unei tehnici de analiză arborescentă (*arbore de evenimente*).

Analiza de tip arbore de evenimente este o abordare progresivă, logică, deoarece înaintează cu ajutorul elementelor componente, prin nivelul subsistemului, la cel al sistemului. Aceasta este o abordare inductivă. Arborele de evenimente poate fi folosit pentru sistemele în care toate componentele lucrează continuu, sau pentru sisteme în care o parte din componente se află în modul „standby” – acelea care implică operații logice, secvențiale sau de schimbare [1].

Punctul de pornire (referitor la un eveniment inițiator - cauza) întrerupe funcționarea normală a sistemului. Arborele de evenimente arată secvențele evenimentelor care implică funcționarea normală și/sau cedarea componentelor sistemului.

Această metodă permite aprecierea cantitativă a riscului utilizând graful evenimentelor. Este o metodă de analiză și cuantificare bazată pe logică binară. O analiză AE este o reprezentare vizuală a tuturor evenimentelor care pot apărea într-un sistem. Cum numărul de evenimente crește de la cauză la efect, schema seamănă cu *ramurile unui arbore*. Metodologia de analiză a cedărilor cu ajutorul arborelui de evenimente începe prin identificarea tuturor cauzelor posibile de defectare/eșec, la

nivel de sistem, sub-sistem, echipamente și componente: la ce am putea să ne așteptăm prin apariția de defecte? Cum se ajunge acolo?

Aceasta este o metodă cu ajutorul căreia se încearcă găsirea, în mod deductiv, a tuturor cauzelor intermediare, generate de o cauză inițială, care pot conduce la unul sau mai multe evenimente majore nedorite. Un arbore de evenimente este astfel structurat încât, evenimentul cauză apare în vârful arborelui. Sub evenimentul din vârf se află dispusă secvența de evenimente care conduce la o defecțiune nedorită a sistemului. Avantajul folosirii metodei arborelui de evenimente constă din posibilitatea evaluării cantitative. Astfel, consemnate sub forma unui grafic logic, se poate calcula probabilitatea de producere a evenimentului cauză sau a oricărui eveniment din succesiunea arborelui. Stabilind probabilitățile de producere a unor evenimente care contribuie la apariția evenimentului final nedorit, pe baza informațiilor de fiabilitate și din experiența acumulată în producție, se poate determina probabilitatea de apariție a oricăror accidente fatale.

Analiza prin intermediul arborelui de evenimente furnizează atât un algoritm de calcul pentru prevederea riscului, probabilitatea ca un eveniment să apară o dată într-o anumită perioadă de timp, cât și o cale de descriere calitativă a producerii evenimentului de vârf prin menționarea sub-evenimentelor care conduc la evenimentul cauză.

Analiza de tip arbore de evenimente este bazată pe logica binară în care un eveniment nedorit fie s-a inițiat, fie nu s-a inițiat, în care o componentă fie a cedat, fie nu. Această analiză este importantă în vederea determinării consecințelor ce apar în urma unor defectări sau a manifestării unui eveniment nedorit. Arborii de evenimente încep cu un eveniment inițial, precum defectarea unei componente, cedarea unei componente sau unei părți a sistemului, creșterea temperaturii sau a presiunii, sau degajarea unei substanțe periculoase. Influența materializării nefaste a evenimentului inițial este urmărită printr-o serie de traiectorii posibile. Fiecărei traiectorii îi este atribuită o probabilitate de manifestare. Această metodă este utilizată pentru a efectua o analiză matematică a secvențelor de accident și a fost creată pentru a determina sincope în funcționalitatea normală, proiectată, a sistemelor mecanice și electronice. Ea este, de asemenea, utilizată pe scară largă în industria nucleară, dar nu poate avea acuratețe pentru o evaluare generală de pericol major, pentru că acest lucru ar implica un efort substanțial și costuri ridicate.

Metoda își găsește aplicații practice în: analiza riscurilor din cadrul sistemelor tehnologice, identificarea posibilităților de îmbunătățire a sistemelor de protecție, proiectarea adecvată a funcțiilor de securitate/fiabilitate/siguranță.

Teoria analizei riscului este în strânsă legătură cu terminologia siguranței sistemelor. Un scenariu al accidentului este echivalent cu un hazard; frecvența scenariului este echivalentă cu probabilitatea riscului; rezultatul scenariului este echivalent cu gravitatea pericolelor. Managementul riscului implică identificarea și prevenirea sau reducerea scenariilor nefavorabile de accident și promovarea de scenarii favorabile. Managementul riscului revendică înțelegerea elementelor scenariilor nefavorabile astfel încât, componentele lor de risc să poate fi prevenite sau diminuate, dar și înțelegerea scenariilor favorabile astfel încât componentele lor să poată fi îmbunătățite.

6.2. Structura unui arbore de evenimente

Diagrama de tip arbore de evenimente este o structură ce prezintă toate posibilele evenimente nedorite care succed o defecțiune inițială sau un eveniment nedorit. Evenimentul inițial poate fi

defecțiune tehnică sau o eroare umană de operare. Obiectivele sunt: identificarea lanțului de evenimente ulterioare unui eveniment de bază specificat, dacă evenimentul va evolua într-un accident grav sau va fi suficient controlat de către sistemul de siguranță și dacă procedurile implementate în vederea diminuării efectelor sunt eficiente. Concluziile și recomandările ulterioare pot fi de creștere a redundanței unora dintre componente sau modificarea sistemelor de siguranță.

Conceptul de arbore de evenimente este prezent în figura 6.1. În majoritatea arborilor de evenimente, ramificările evenimentelor intermediare sunt binare: un fenomen apare ori nu apare; un sistem eșuează sau nu eșuează, o componentă cedează sau nu. Acest caracter binar nu este exclusiv chiar de fiecare dată; există câteva exemple de arbori de evenimente care se bifurcă în mai mult de 2 ramuri, de exemplu atunci când se ia în considerare influența direcției vântului. În orice caz, traiectoriile distincte trebuie să fie reciproc exclusive și să se cuantifice ca atare. În acest fel, așa cum se poate constata din figura 6.1, pentru două ramuri ce pornesc din același punct, suma probabilităților de materializare trebuie să fie egală cu 1.

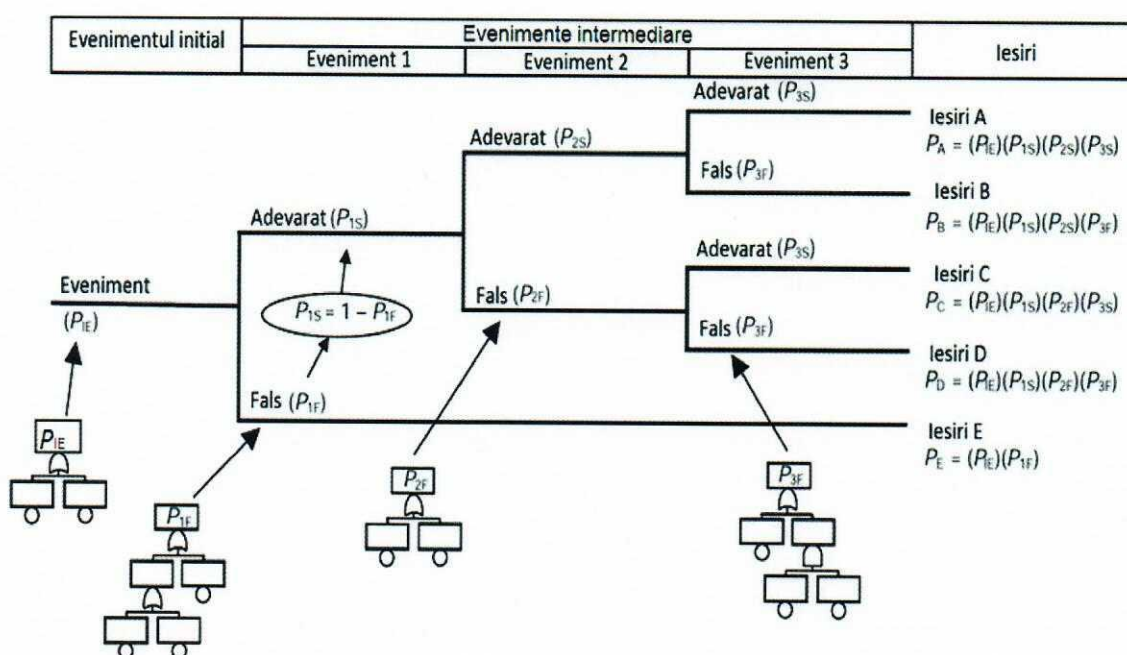


Fig. 6.1. Conceptul Arborelui de evenimente [1]

Rubricile unui arbore de evenimente sunt reprezentate de evenimente inițiale, evenimente intermediare și stările de sfârșit/ieșirile/pericolele/consecințele. Structura arborelui de sub aceste rubrici arată posibile scenarii care decurg din evenimentul inițial, ca urmare a intervenției, faste sau nu, a evenimentelor intermediare. Fiecare traiectorie distinctă prin arbore reprezintă un scenariu distinct.

Atât pentru evenimentul inițial (cauza) cât și pentru evenimentele intermediare (barierele), probabilitățile de manifestare se pot determina pe baza unor arbori de defectare. Pentru asta, fiecare dintre evenimente trebuie să reprezinte evenimentul de top (efectul) în cadrul unui arbore de defectare. Probabilitățile de materializare a consecințelor se calculează ca produsul probabilităților de pe fiecare ramură ce conduce la respectiva consecință, figura 6.1.

Modelul arborelui de evenimente combină, în mod logic, toate contramăsurile de siguranță, proiectate pentru sistem și destinate prevenirii evenimentului inițial. Un efect secundar al analizei

este că, pe parcursul analizei pot fi descoperite și evaluate mai multe avarii diferite, în raport cu cele evidente. Dacă nu am face o astfel de analiză, este posibil ca unele dintre evenimentele nefaste declanșate de un eveniment inițial, să nu fie luate în considerare. În momentul structurării unui arbore de evenimente, este nevoie de rigurozitate, și, astfel, se pot pune în evidență toate manifestările posibile ale cauzei în cadrul sistemului. Structura unui arbore de evenimente prezintă mai multe scenarii posibile, chiar dacă pentru unele dintre acestea probabilitatea de materializare este foarte mică.

În figura 6.2 se prezintă, în ansamblu, un proces de analiză a arborelui de evenimente și se rezumă relațiile implicate în acest proces. Procesul de analiză și elaborare a arborelui de evenimente implică utilizarea unor informații detaliate de proiectare. Se adună o serie de informații privind comportarea în exploatare a unor echipamente similare. Pentru implementarea unor noi tehnici și tehnologii în domeniul siguranței trebuie făcută o documentare amplă privitoare la dispozitivele și echipamentele existente și care ar putea aduce îmbunătățiri sistemului analizat. Odată sistemul stabilit (dacă este vorba de o proiectare nouă) sau pe baza analizei unui sistem în funcțiune, se trece la stabilirea evenimentelor inițiale, a evenimente intermediare și la structurarea posibilelor scenarii de accident.

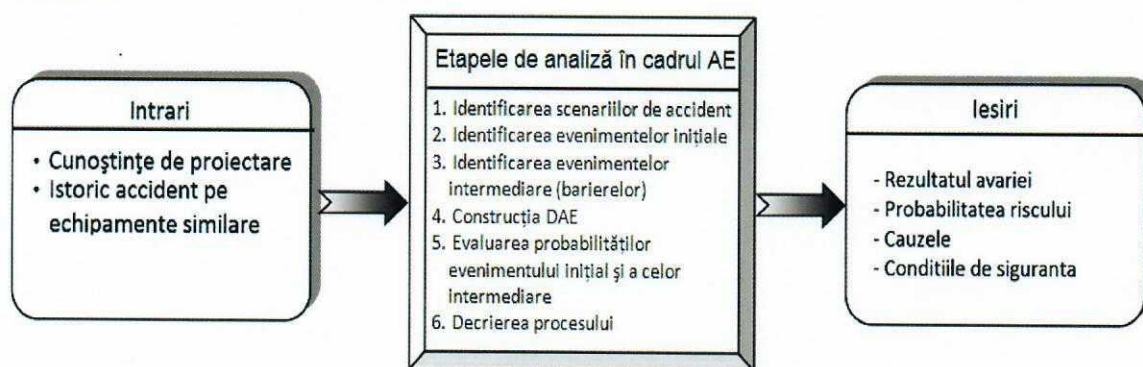


Fig. 6.2. Etapele unei analize a riscului cu ajutorul diagramei de tip arbore de evenimente (DAE)
Intrări - Etape de analiză – Consecințe [2]

În figura 6.3. este prezentată o schemă privind inițierea formării unei structuri de tip arbore de evenimente. Diversele stări ale subsistemelor se combină prin folosirea tehnicii deciziei - logica ramurilor de arbore - pentru a ajunge la probabilitățile secvențelor accidentului. De exemplu, ruta cedării *Inițiere – Distrugere subsistem A - Distrugere subsistem B*, poate fi analizată în termenii unui event tree (arbore de evenimente).

Pe măsură ce crește numărul subsistemelor, crește și numărul secvențelor de evenimente. Dacă există N subsisteme în plus față de evenimentul de inițiere atunci numărul secvențelor evenimentului este de 2^N . Dacă există mai mult de un eveniment de inițiere, atunci se poate face câte un *event tree* (arbore de evenimente) pentru fiecare eveniment de inițiere. *Riscul total* al sistemului este egal cu suma riscurilor tuturor evenimentelor de inițiere. Procedura de însumare este valabilă dacă unul sau mai multe evenimente de inițiere nu se pot realiza în același timp. Această presupunere se poate face dacă probabilitatea ca două sau mai multe evenimente de inițiere să apară în același timp este redusă, în comparație cu probabilitatea apariției unui eveniment de inițiere individual.

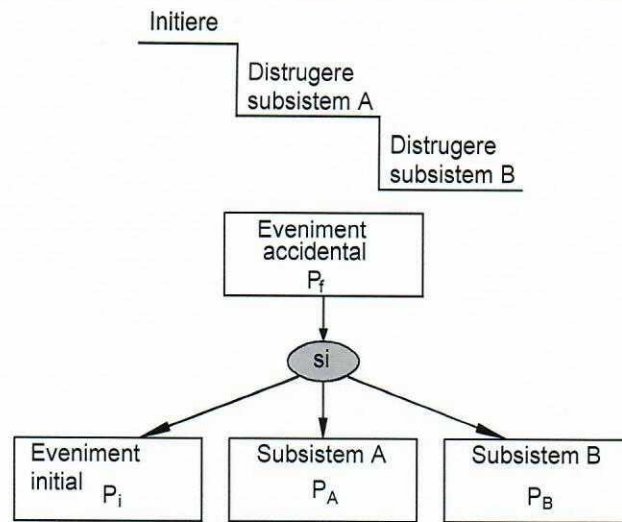


Fig. 6.3. Inițierea formării unui arbore de evenimente

Arborele de evenimente este un sistem aplicat pentru a analiza toate combinațiile (și posibilitatea de apariție) a parametrilor care afectează sistemul supus analizei. Toate evenimentele analizate sunt legate între ele prin niște puncte, *figura 6.4*: toate stările posibile ale sistemului sunt considerate și calculate la fiecare punct și fiecare stare (ramura unui arbore de evenimente) este caracterizată de o valoare definită de probabilitatea de manifestare.

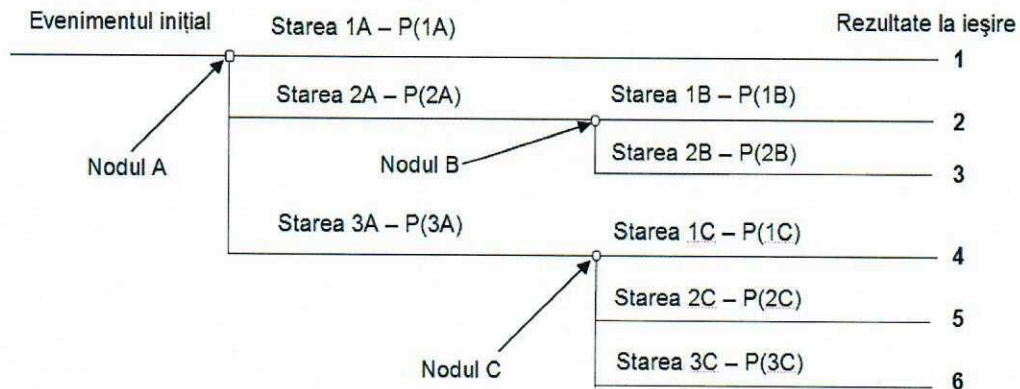


Fig. 6.4. Schema generală a unui arbore de evenimente [3]

Proprietățile fundamentale ale unui arbore de evenimente pot fi rezumate după cum urmează:

- evenimentele care pornesc din același punct se autoexclud și suma probabilităților respective de apariție trebuie să fie egală cu unu:

$$\begin{cases} \sum P(nA) = 1 \\ \sum P(nB) = 1 \\ \sum P(nC) = 1 \end{cases}$$

- probabilitatea de apariție pentru fiecare cale ($P(R_n)$) este o funcție a tuturor ramurilor care sunt incluse în ea:

$$\begin{cases} P(R_1) = P(1A) \\ P(R_2) = P(2A) \cdot P(1B) \\ P(R_6) = P(3A) \cdot P(3C) \end{cases}$$

Este necesar să se identifice consecințele (valoarea eventualelor pierderi) legate de succesiunea specifică de evenimente pentru fiecare cale obținută din arborele de evenimente. Cantitativ, riscul este definit ca o funcție a probabilității de apariție a unui proces de pericol (P) și gradul pagubelor, acesta din urmă fiind un produs al pagubelor potențiale și vulnerabilității corespunzătoare (V). Odată ce diagrama arborelui de evenimente este construită, se pot atașa parametrii de probabilitate (frecvență de defectare) atât pentru evenimentul cauză cât și pentru fiecare dintre ramurile arborelui de evenimente. De obicei, această informație provine din analiza de tip arbore de defectare, așa cum s-a arătat mai sus. Într-un nod al arborelui trebuie să avem satisfăcută relația: $1 = P_S + P_F$, respectiv: P_S probabilitatea ca bariera să funcționeze cu succes și în siguranță (safety) și P_F probabilitatea ca bariera să cedeze (failure) sau să funcționeze defectuos. Probabilitatea pentru o anumită consecință este calculată prin multiplicarea probabilităților de pe fiecare ramură corespunzătoare traseului prin care se ajunge la respectiva consecință.

6.3. Etape în analiza pe baza metodologiei de tip arbore de evenimente

Tabelul 6.1 prezintă și descrie pașii de bază a unui proces de analiză de tip arbore de evenimente, care include efectuarea unei analize detaliate a tuturor caracteristicilor implicate într-un lanț de evenimente care decurge din evenimentele inițiale până la ieșirea din funcțiune.

Tab. 6.1. Etapele unui proces de analiză de tip arbore de evenimente [4]

Pas	Atribuție	Descriere
1	Definirea sistemului	Examinarea sistemului și definirea limitelor sistemului, subsistemelor și a interfețelor
2	Identificarea scenariilor accidentului/cedării	Realizarea unei aprecieri a sistemului ori a analizei riscului pentru a identifica riscul sistemului și scenariile accidentului/cedărilor existente în proiectarea sistemului.
3	Identificarea evenimentelor inițiale	Perfecționarea analizei riscului pentru a identifica evenimentele inițiale semnificative în scenariile accidentului. Evenimentele inițiale includ cauze precum: incendiu, coliziunea, explozia, degajarea de gaze toxice, fisurarea unei conducte sau a unui recipient, etc.
4	Identificarea evenimentelor intermediare	Identificarea barierelor de siguranță sau a contramăsurilor cu un scenariu particular care încearcă să prevină avaria.

5	Obținerea probabilităților evenimentului de defecte	Obținerea sau calcularea probabilităților de cedare pentru evenimentele intermediare de pe diagrama de tip arbore de evenimente. Ar putea fi necesară utilizarea <i>arborelui de defectare</i> pentru a determina aceste valori pentru un eveniment intermediar.
6	Construirea diagramei arborelui de evenimente	Construirea unei diagrame logice a arborelui de evenimente, începând cu evenimentul inițial (cauza), apoi cu evenimentele intermediare (bariere, măsuri de siguranță) și completând cu valori de probabilitate (de defectare/cedare/funcționare defectuoasă), pentru fiecare rută posibilă.
7	Identificarea rezultatului riscului	Calcularea riscului pentru fiecare ramură a diagramei.
8	Evaluare rezultatul riscului	Evaluarea rezultatului riscului pentru fiecare caz, evaluarea consecințelor și determinarea acceptabilității riscului.
9	Propunerea unor măsuri corective	Dacă rezultatul riscului pentru o ramură nu este acceptabilă, se trece la dezvoltarea de strategii de proiectare pentru diminuarea riscului
10	Integrarea rezultatelor din cadrul acestui subsistem	Se face o analiză privitoare la influența riscului determinat aici în raport cu managementul general al riscului

Sistemele complexe tind să aibă un număr mare de componente interdependente, sisteme cu alimentare redundantă, sisteme standby și sisteme de siguranță. Câteodată este mult prea dificilă sau greoaie prezentarea unui sistem doar cu arborele de evenimente, așa că studiile pentru analiza riscului au combinat diagrama arborelui de evenimente cu cea a arborelui de defectare. Diagrama arborelui de evenimente prezintă cauza defectelor, scenariile a ceea ce se poate întâmpla după declanșarea avariei, iar arborele de defectare prezintă subsisteme complexe pentru a obține probabilitatea cedării acestor subsisteme. Un scenariu al accidentului poate avea diverse rezultate, în funcție de, care evenimente intermediare cedează și care funcționează corect. Îmbinarea arborelui de evenimente cu cel de defectare prezintă această complexitate.

Obiectul analizei arborelui de evenimente este determinarea probabilității tuturor posibilelor rezultate ce decurg din manifestarea unui eveniment inițial. Prin analizarea tuturor posibilelor rezultate se poate determina procentajul rezultatelor ce pot duce la deznodământul dorit precum și procentajul rezultatelor ce pot duce la un deznodământ nedorit.

6.4. Definirea unui eveniment accidental

Un eveniment accidental este definit ca prima deviație semnificativă de la o situație normală ce poate avea consecințe nedorite (ex.: scurgeri de gaze eventual urmate de o explozie, defectarea unei componente, producerea unui incendiu). Arborele de evenimente este utilizat de regulă pentru proiectarea scenariilor de accident. Un arbore de evenimente începe cu un **eveniment inițial** ce reprezintă cauza a tot ceea ce urmează să se întâmple nefast în cadrul sistemului. Se progresează apoi printr-o serie de **evenimente intermediare** până ce se ajunge la o situație finală, nedorită, *figura 6.5.*

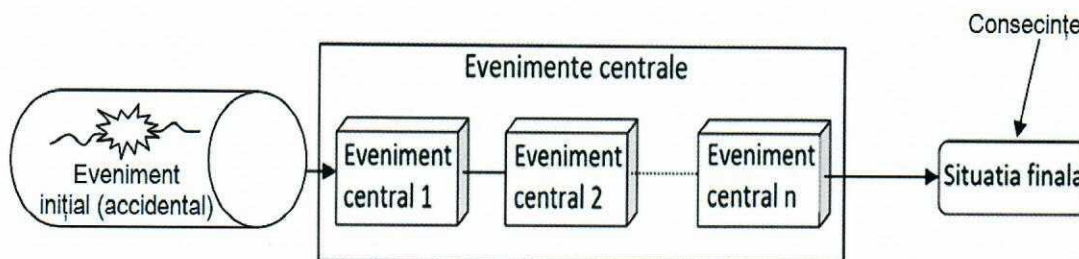


Fig. 6.5. Evoluția unei situații de risc [5]

Atunci când se efectuează o analiză a riscului, identificarea și elaborarea scenariilor accidentului sunt fundamentale pentru conceptul de evaluare a riscului. Procesul începe cu un set de evenimente inițiale care perturbă sistemul, adică îl determină să își schimbe modul de operare sau configurația.

Un eveniment accidental poate avea diferite consecințe. Consecințele potențiale pot fi ilustrate printr-o secvență de spectru, figura 6.6.

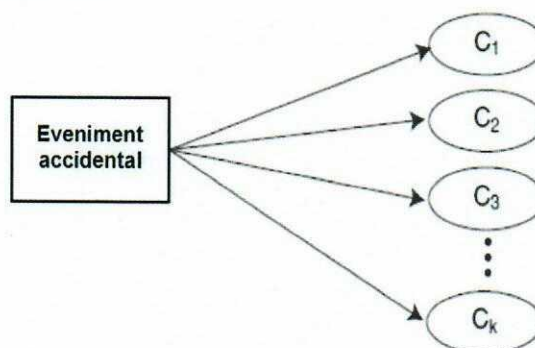


Fig. 6.6. Secvență de spectru a unui eveniment accidental cu producerea de consecințe

Când se definește un eveniment accidental se analizează:

- Ce tip de eveniment este? (ex.: scurgeri de substanțe nocive sau explozive, incendiu);
- La ce nivel se manifestă evenimentul? (ex.: în zona populată, la nivelul unui subansamblu);
- Când se produce evenimentul? (ex.: în timpul operațiilor normale, în timpul reviziilor de mentenanță).

În aplicațiile practice se poartă discuții în legătură cu ce ar trebui considerat drept eveniment accidental (ex.: ar trebui considerat un eveniment accidental o scurgere de gaze, producerea unui incendiu sau producerea unei explozii datorate acestuia?). Ori de câte ori este posibil, trebuie să se aleagă întotdeauna *prima deviație semnificativă*, care ar putea duce la consecințe nedorite.

Un eveniment accidental poate fi cauzat de:

- Funcționarea necorespunzătoare sau defectarea unui echipament, subsistem sau sistem;
- Eroare umană;
- Deranjarea gravă a funcționării proceselor.

Un eveniment accidental este, în mod normal, „anticipat”. Proiectanții sistemelor trebuie să instaleze bariere menite să reacționeze la eveniment prin terminarea secvenței accidentale sau aplanarea consecințelor accidentului.

Pentru orice eveniment accidental trebuie identificate:

- Progresia/progresiile potențiale de accident;
- Dependentele sistemului;
- Răspunsul condițional al sistemului.

Prezent în majoritatea analizelor de risc, un eveniment inițial este o perturbare care necesită un tip de răspuns din partea operatorilor și a unuia sau mai multor sisteme/echipamente pentru a preveni un deznodământ nedorit. Evenimentele intermediare includ succese sau eșecuri ale acestor răspunsuri la manifestarea cauzei ori. Partea de sfârșit este formulată în conformitate cu deciziile luate pe parcurs fiind susținute de o analiză probabilistică.

6.5. Barierele utilizate în cadrul unei diagrame de tip arbore de evenimente

Majoritatea sistemelor bine proiectate au una sau mai multe bariere implementate pentru împiedicarea sau prevenirea consecințelor determinate de evenimente accidentale. Probabilitatea ca un eveniment accidental să conducă la o serie de consecințe nedorite va depinde, prin urmare, de eficiența funcționării sau nefuncționării acestor bariere. Pentru fiecare eveniment inițial, analiza începe cu determinarea modurilor adiționale de eșec/cedare/funcționare neconformă, necesară pentru a evita consecințele nedorite.

Barierele sunt numite și funcții de siguranță sau niveluri de protecție, și pot fi de natură tehnică și/sau administrativă (organizațională).

Analiza arborelui de evenimente (ETA – event tree analysis)) este o procedură inductivă ce arată toate posibilele ieșiri rezultate de declanșarea (inițierea) unui eveniment accidental, ținând cont de funcționarea corectă sau defectuoasă a barierelor de siguranță și de factorii sau evenimentele adiționale.

Prin studiul tuturor evenimentelor accidentale relevante (ce sunt identificate într-o analiză preliminară a riscurilor cu ajutorul tehnicii HAZOP, sau a oricărei alteia) AE poate fi utilizat pentru identificarea tuturor potențialelor secvențe sau scenarii de accidente într-un sistem complex. Cu ajutorul acesteia pot fi identificate punctele slabe din proiectare sau proceduri neconforme ale sistemului și pot determinate probabilitățile unor ieșiri (outcomes) variate dintr-un eveniment accidental.

Barierele relevante pentru fiecare eveniment accidental specific trebuie enumerate în secvența în care acestea vor fi activate.

Exemplele includ:

- Sisteme automate de detecție (ex.: senzori detecție fum, căldură, laser perimetru);
- Sisteme de siguranță automatizate (ex.: stropitori/sistem de stingere incendiu, senzori/actuatori utilizați pentru închidere/deschidere/debranșare);
- Sisteme de alarmă pentru avertizarea personalului/operatorilor (ex.: sonoră, vizuală);
- Proceduri clare, scrise și implementate și acțiuni ale operatorilor;
- Sisteme de atenuare.

Fiecare barieră trebuie descrisă de o stare negativă de funcționare. Ex.: „Bariera X nu funcționează”- ceea ce înseamnă că bariera X nu este capabilă să îndeplinească funcția/funcțiile predefinite în momentul producerii unui eveniment accidental într-un context specific.

Evenimentele și/sau factorii adiționali trebuie menționați împreună cu barierele de siguranță, cât mai explicit posibil, în secvența în care aceștia intervin. Acestea/aceștia trebuie de asemenea descrise/descriși în funcție de starea de funcționare pentru cazul cel mai pesimist posibil. Ex.: aprinderea gazului în cazul unui scurgeri, direcția de propagare a vântului spre aria de locuințe.

În figura 6.7 se exemplifică amplasarea evenimentelor intermediare sau a factorilor adiționali. În mod convențional, acolo unde evenimentele intermediare sunt folosite pentru a specifica succesul sau eșecul sistemului, ramura din partea de jos este considerată ca reprezentând cedarea/eșecul. Ca urmare a celor afirmate mai sus, se stabilește mai întâi probabilitatea pentru ramura „fals” care se ocupă cu cedarea, $P(f)$, care trebuie să fie accesibilă din date statistice, analize de tip arbore de defectare, etc. și apoi se calculează probabilitatea pentru ramura de funcționare conformă (adevărat) ca fiind $1-P(f)$.

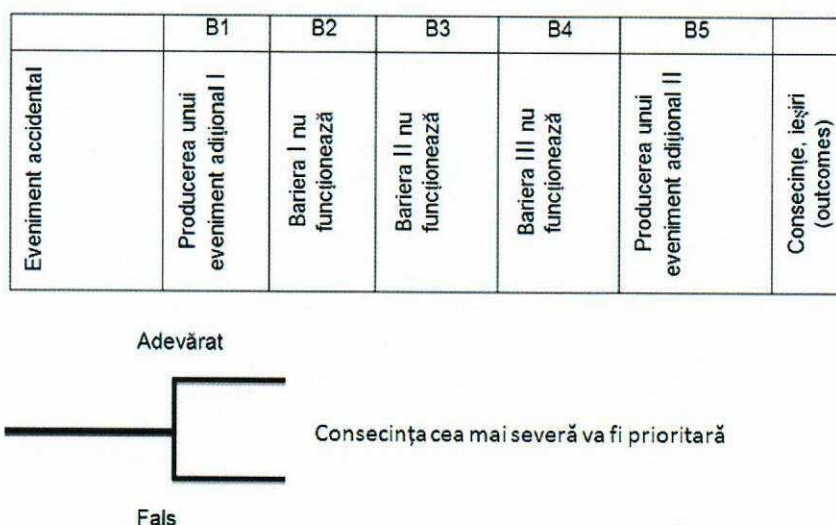
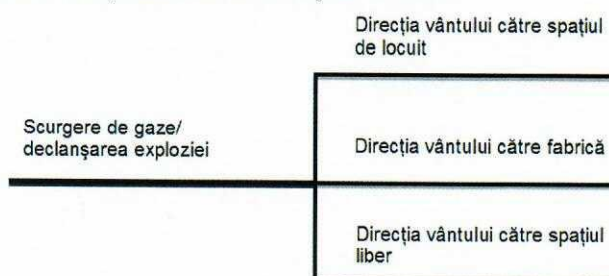


Fig. 6.7. Amplasarea evenimentelor/barierelor intermediare [6]

La ieșirea dintr-un eveniment intermediar, în cele mai multe aplicații sunt considerate doar 2 alternative: „Adevărat”/ „True” sau „Fals”/„False”. Este posibilă, de asemenea, apariția a 3 sau mai multe alternative după cum este prezentat în exemplul următor:



6.6. Consecințe, pericole, ieșiri

Scenariile de risc sunt clasificate în funcție de tipul și gravitatea efectelor, variind de la rezultate total satisfăcătoare până la pierderi de diferite tipuri precum:

- Pierderea vieții sau rănirea personalului;
- Deteriorarea sau pierderea de echipamente sau a proprietății;

- Daune colaterale neașteptate sau ca urmare a testelor;
- Nerespectarea indicatorilor funcționali;
- Pierderea de disponibilitate a sistemului;
- Deteriorarea mediului.

Consecințele pot depinde de unii factori sau evenimente adiționale. Spre exemplu:

- Dacă o la o scurgere de gaze există aprindere sau nu;
- Dacă la producerea unui eveniment accidental există sau nu prezență umană;
- Direcția vântului sau starea factorilor de mediu externi în momentul producerii evenimentului accidental.

Consecințele finale pot fi de mai multe tipuri:

- În practică, mulți arbori de evenimente își găsesc finalitatea înaintea atingerii consecinței "finale";

- Includerea consecinței "finale" poate mări dimensiunea arborelui, acesta devenind nepractic pentru vizualizare;

- Se pot stabili anumite distribuții ale consecințelor pentru fiecare finalitate de ieșire iar probabilitatea fiecărei consecințe este determinată pentru fiecare finalitate de eveniment;

- Practic, aceasta reprezintă o extensie a arborelui de evenimente, care permite o modalitate mai simplă de prezentare și care ușurează urmărirea finalității rezultatelor;

Finalitatea evenimentelor accidentale se consemnează într-un tabel similar cu cel de mai jos:

Ieșiri/ Consecințe	Frecvență/ Probabilitate	Pierderi de vieți					Distrugerii materiale				Afectarea mediului înconjurător			
		0	1-2	3-5	6-20	>20	A	B	C	D	α	β	γ	δ
....														

Rezultatele privind riscul din analiza arborelui de evenimente pot fi utilizate în:

- Stabilirea acceptabilității sistemului;
- Identificarea acceptabilității sistemului;
- Identificarea oportunităților de ameliorare a sistemului;
- Recomandări pentru îmbunătățiri;
- Justificarea alocării resurselor pentru îmbunătățiri.

6.7. Exemple de aplicare a metodologiei de analiză a riscului de tip arbore de evenimente

Diagrama de tip arbore de evenimente este formată din trei elemente: evenimentul de inițiere, barierele din calea acestuia, și consecințele și rezultatele. Atât pentru evenimentul de inițiere cât și pentru funcționarea (nefuncționarea) barierele, se stabilesc probabilități de manifestare și frecvențe ale acestora. Evenimentul de inițiere constituie cauza a tot ceea ce urmează

în cadrul arborelui de evenimente. Manifestarea acestuia, cu anumită probabilitate, conduce la fenomene negative, în calea cărora trebuie plasate bariere de siguranță, în vederea eliminării sau diminuării consecințelor. Pentru bariere, sunt două posibilități: acestea ori funcționează ori nu funcționează, astfel încât suma probabilităților de pe cele două ramuri corespunzătoare arborelui de evenimente trebuie să fie egală cu 1: $P_{\text{succes}} + P_{\text{cedare}} = 1$. Consecințele reprezintă efectul manifestării evenimentului inițiator și sunt determinate de funcționarea barierelor. Rezultatele sunt exprimate cantitativ, reprezentând probabilități și frecvențe de apariție a consecințelor. Probabilitățile rezultate sunt calculate ca produsul tuturor probabilităților întâlnite pe ramură, până (inclusiv) la evenimentul de inițiere

6.7.1. Arborele de evenimente în cazul inițierii unui incendiu în interiorul unei clădiri

Atunci când se inițiază un incendiu în interiorul unei clădiri (cauza – evenimentul inițial), asupra sistemului (clădirea) vor fi anumite consecințe negative. În calea manifestării evenimentelor nefaste provocate de materializarea incendiului, trebuie puse o serie de bariere care să limiteze, să reducă sau să anuleze efectele produse prin dezvoltarea evenimentului cauză. În cazul analizat mai jos aceste bariere sunt: sistem de detecție incendiu (sistem detecție fum sau căldură sau și unul și altul), sistem de alarmare care preia semnalul de incendiu de la sistemul de detecție (atât în interiorul clădirii cât și transmitere alarmă la pompieri) și sistem de stropire automată care preia semnalul de incendiu de la sistemul de detecție. Sistemul de protecție împotriva dezvoltării unui incendiu este compus din senzor de fum/foc, alarmă și echipamentul de stropire, figura 6.8.

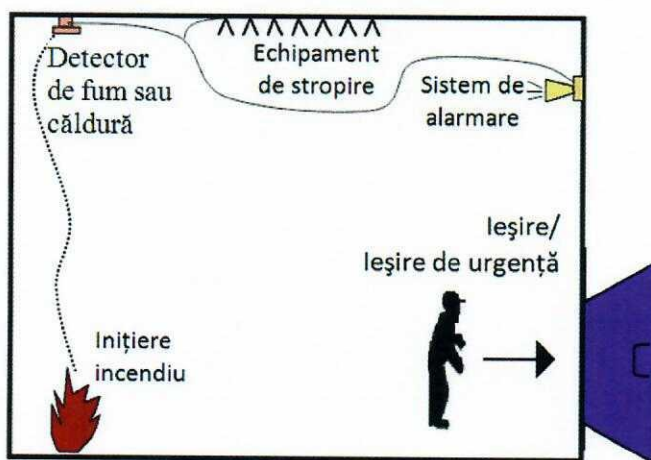


Fig. 6.8. Sistem anti-incendiu (detector/senzor+echipament de stropire+sistem alarmare)

Schema generală a arborelui de evenimente propus pentru analiza în cazul declanșării unui incendiu în interiorul unei clădiri este prezentată mai jos.

O asemenea schemă este compusă din următoarele categorii de elemente:

- Prima coloană reprezintă evenimentul inițiator. Acesta are întotdeauna o conotație negativă, astfel încât, pentru acest eveniment se vor stabili, implicit, doar probabilitatea de funcționare neconformă, „Unavailability” și frecvența de manifestare, „Failure Frequency”;
- Următoarele (trei) coloane reprezintă bariere așezate în calea evenimentului inițiator: sistem de detecție, sistem de alarmă, sistem de stropire. Aceste sisteme sunt prevăzute, fie pentru a se opune manifestării și dezvoltării în continuare a evenimentului cauză (sistem de stropire), fie

pentru a diminua consecințele – alarmarea personalului pentru a nu se produce pierderi de vieți. În acest caz, deși incendiul poate lua proporții, dacă sistemele de anihilare nu funcționează sau funcționează impropriu, prin prevederea unui sistem de alarmare se împiedică pierderea de vieți omenești;

Inițiere incendiu Incendiul se inițiază în clădirea principală	Detecție incendiu Incendiu este detectat de sistemul de detecție	Sistemul de alarmă Sistemul de alarmă este activat	Sistemul de stropire Sistemul de stropire este activat	Consecințe	Rezultate
Inițiator B1: Q=0,0015; w=10 Incendiul în clădirea principală	Succes B2: Q=3,02·10 ⁻¹⁷ ; w=2,014·10 ⁻¹³ Incendiu este detectat de sistemul de detecție	Succes B5: Q=3,02·10 ⁻¹⁷ ; w=2,014·10 ⁻¹³ Sistemul de alarmă este activat	Succes B9: Q=3,02·10 ⁻¹⁷ ; w=2,014·10 ⁻¹³ Sistemul de stropire este activat automat	Distrugerii minime; W=1; R=3,02·10 ⁻¹⁷	Q=3,02·10 ⁻¹⁷ ; w=2,014·10 ⁻¹³
			Failure B10: Q=3,02·10 ⁻¹⁷ ; w=2,014·10 ⁻¹³ Sistemul de stropire NU este activat	Distrugerii fără pierderi de vieți; Persoane udate W=2; R=2,2·10 ⁻¹²	Q=1,1·10 ⁻¹² ; w=7,402·10 ⁻⁹
			Succes B11: Q=3,02·10 ⁻¹⁷ ; w=2,014·10 ⁻¹³ Sistemul de stropire este activat automat	Distrugerii fără pierderi de vieți; W=7; R=7,77·10 ⁻¹²	Q=1,11·10 ⁻¹² ; w=7,402·10 ⁻⁹
			Failure B12: Q=3,02·10 ⁻¹⁷ ; w=2,014·10 ⁻¹³ Sistemul de stropire NU este activat	Distrugerii majore cu pierderi de vieți; W=90; R=0,03672	Q=4,08·10 ⁻⁸ ; w=0,00027
			Failure B16: Q=3,02·10 ⁻¹⁷ ; w=2,014·10 ⁻¹³ Sistemul de stropire NU este activat	Distrugerii majore cu pierderi de vieți; W=90; R=0,1341	Q=0,00149; w=9,999
		Failure B8: Q=3,02·10 ⁻¹⁷ ; w=2,014·10 ⁻¹³ Sistemul de alarmă NU pornește	Failure B6: Q=3,02·10 ⁻¹⁷ ; w=2,014·10 ⁻¹³ Sistemul de alarmă NU pornește		
	Failure B3: Q=3,02·10 ⁻¹⁷ ; w=2,014·10 ⁻¹³ Incendiu NU este detectat de sistemul de detecție				

- Coloana privind consecințele prezintă pagubele, atât în mod calitativ (prin aprecierea noastră – „distrugerii majore cu pierderi de vieți”) cât și cantitativ, luând în considerare Riscul prin parametrul R=0,1341. În programul ITEM, utilizat pentru exemplele din acest capitol, riscul este calculat ca fiind: $R=Q \cdot W$, în care W (Weight/Impactul) este stabilit în funcție de gravitatea consecințelor. În exemplul anterior, gravitatea consecințelor este prezentată în *tabelul 6.2*.
- În coloana Consecințe, R=0,1341 reprezintă riscul iar în coloana Rezultate, Q=0,00149 reprezintă „Unavailability” respectiv, probabilitatea ca sistemul să nu funcționeze conform sarcinilor pentru care a fost proiectat.

Tab. 6.2. Consecințe prin apreciere și risc

Nume	Weight/Impact	Unavailability	Risc
Distrugerii majore cu pierderi de vieți	90	Q=0,00149	R=0,1341
Distrugerii majore cu pierderi de vieți	90	Q=4,08·10 ⁻⁴	R=0,03672
Distrugerii fără pierderi de vieți; Persoane udate	7	Q=1,11·10 ⁻¹²	R=7,77·10 ⁻¹²
Distrugerii fără pierderi de vieți	2	Q=1,1·10 ⁻¹²	R=2,2·10 ⁻¹²
Distrugerii minime	1	Q=3,02·10 ⁻¹⁷	R=3,02·10 ⁻¹⁷

Atât pentru fiecare ramură în parte (B9, B10, etc.) cât și pentru fiecare consecință (Distrugerii majore, etc.) se prezintă un raport detaliat al rezultatelor obținute prin calcule, conform tabelelor de mai jos.

Tab. 6.3. Rezultate obținute pe ramuri [7]

Parameter:	Value	Mean	Std	5%	50%	95%	95.00%
Unavailability Q:	0.0014...	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Failure Frequency W:	9.9991...	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No of Cut Sets:	1						

Event:	F-Vesely:	Birnbaum:	B-Proshan:
ALARM STARTS	1	0.0014999184	4.8975709e-13
FIRE	1	0.99991838	1
FIRE DETECTED	1	0.0014999184	4.8975709e-13
SPRINKLER STARTS	1	0.0014999184	4.8975709e-13

No:	Unavailability:	Frequency:	Events
1	0.0014998776	9.9991838	ALARM STARTS ::FIRE ::FIRE DETECTED ::SPRI...

Tab. 6.4. Tipuri de consecințe (dreapta) [7]

Parameter:	Value	Mean	Std	5%	50%	95%	95.00%
Unavailability Q:	0.0014...	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Failure Frequency W:	9.999455	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
No of Cut Sets:	2						

Event:	F-Vesely:	Birnbaum:	B-Proshan:
FIRE	1	1.9998368	1.9999456
ALARM STARTS	1	0.0029998368	9.7948752e-13
SPRINKLER STARTS	1	0.0029998368	9.7948752e-13
FIRE DETECTED	0.99997279	0.0014999184	4.8974376e-13

No:	Unavailability:	Frequency:	Events
1	0.0014998776	9.9991838	ALARM STARTS ::FIRE ::FIRE DETECTED ::SPRI...
2	4.0809759e-8	0.00027206507	ALARM STARTS :: FIRE DETECTED ::FIRE ::SPRI...

6.7.2. Utilizarea unui arbore de evenimente pentru a evalua probabilitatea de detectare a unui defect de material, utilizând mai multe variante de tehnică defectoscopică, proceduri și resursă umană.

În cazul defectoscopiei, se impun anumite cerințe laboratoarelor chemate să detecteze defecte din diferite structuri. În primul rând se urmărește posibilitatea detectării defectului, având în vedere condițiile de detectare: material, poziție, condiții atmosferice, tehnica utilizată, etc. Se cunoaște faptul că, dacă nu se adoptă o tehnică și proceduri adecvate, defectele prezente în anumite materiale nu se pot detecta. De exemplu, pentru defectele din materiale compozite trebuie utilizate mai multe tehnici în lanț pentru ca determinarea să aibă acuratețe. Se urmărește apoi determinarea **poziționării**

defectului în raport cu configurația piesei în care acesta se găsește. Si din acest punct de vedere, trebuie utilizate tehnici și proceduri adecvate, în cadrul acestora trebuind folosite exact acele materiale, dispozitive sau elemente avute la dispoziție care conduc ca determinarea poziției defectului să fie cât mai precisă. O altă cerință a examinărilor defectoscopice o reprezintă determinarea cu precizie a **mărimii defectului**. În funcție de material și de poziționarea defectului în raport cu suprafața sau ale elemente ale construcției care îngreunează poziționarea elementelor de detectare, acest demers poate fi unul dificil de realizat. Totuși, se cunoaște faptul că, în anumite condiții, și un defect de dimensiuni mai mici poate fi acceptat în material, cu condiția ca dimensiunile acestui defect să fie determinate cu mare acuratețe. O determinare prin defectoscopie, necesită și determinarea **naturii defectului**: porozitate, incluziuni, fisuri, stropi, etc.

Arbore de evenimente pentru a evalua probabilitatea de detectare a unui defect de material

Detectare defecte	Echipe	Proceduri	Tehnici	Detectare	Dimensiuni	Consecința	Rezultat			
	Aceeși echipă 0,67	Aceleași proceduri 0,7	Aceleași tehnică 0,87	Detectare defect 0,92	Aceleași dimensiune 0,88	Defect detectat cu precizie	P=0,33			
					Dimensiuni diferite 0,12	Defect detectat cu dimensiune nesigură	P=0,045			
				Defect nedetectat 0,08	Aceleași dimensiune 0,88	Defect nedetectat	P=0,0326			
						Defect detectat cu acuratețe	P=0,0936			
			Tehnici diferite 0,13	Detectare defect 0,92	Dimensiuni diferite 0,12	Defect detectat cu dimensiune nesigură	P=0,00643			
					Defect nedetectat 0,08	Defect nedetectat	P=0,00487			
				Defect nedetectat 0,08		Defect detectat cu formă nesigură	P=0,141			
				Proceduri diferite 0,3	Aceleași tehnică 0,87	Detectare defect 0,92	Aceleași dimensiune 0,88	Defect detectat cu dimensiune nesigură	P=0,0193	
		Dimensiuni diferite 0,12	Defect detectat cu dimensiune nesigură				P=0,0193			
		Defect nedetectat 0,08	Aceleași dimensiune 0,88			Defect nedetectat	P=0,0139			
						Defect detectat cu locație nesigură	P=0,0211			
		Tehnici diferite 0,13	Detectare defect 0,92		Dimensiuni diferite 0,12	Defect detectat cu dimensiune greșită	P=0,00288			
					Defect nedetectat 0,08	Defect nedetectat	P=0,00209			
			Detectare defecte			Echipe diferite				
			Variante utilizate		0,33					

În aceste condiții, împotriva unor determinări corecte în legătură cu precizările anterioare, intervin o serie de factori care sunt tratați pe baza unui arbore de evenimente. Astfel, s-a considerat faptul că, influențe (nefastе) asupra determinărilor defectoscopice, o au următorii factori:

- utilizarea de echipe diferite, care nu sunt strict specializate pe un anumit procedeu de determinare;
- utilizarea de proceduri diferite în cazul unui același tip determinări;
- utilizarea de tehnici diferite în cazul aceleiași proceduri.

În aceste condiții, poate rezulta, fie detectarea fie nedetectarea defectului, iar dacă are loc detectarea, dimensiunea furnizată poate să nu fie cea reală. În cele ce urmează, având în vedere

precizările anterioare, s-a configurat o structură de tip arbore de evenimente, în vederea reliefării influențelor (negative) asupra determinării cu acuratețe a defectelor.

Se menționează faptul că, probabilitățile de materializare pe fiecare ramură s-au trecut în funcție de date statistice și experiența anterioară a utilizatorilor de tehnici de detectare a defectelor. De exemplu, probabilitatea de detectare a defectelor pe ramura cu probabilitatea de 0,88 este trecută ca urmare a datelor statistice;

Din exemplul anterior se constată următoarele aspecte:

- atunci când se folosește aceeași echipă, aceleași proceduri, aceeași tehnică și având o probabilitatea de 88% pentru determinarea defectului, probabilitatea de determinarea cu precizie a defectului (poziționare și dimensiune) este de 33%;
- dacă, pentru un defect dat, în cadrul aceleiași proceduri se schimbă tehnica de determinare, utilizând-se una neadecvată materialului sau poziționării defectului, probabilitatea detectării cu acuratețe a acestuia va fi de doar 9,3%;
- în cazul în care, aceeași echipă va utiliza, pentru determinarea unui defect, se utilizează proceduri neadecvate, probabilitatea detectării cu precizie a defectului va fi de doar 14,1%, în condițiile utilizării unei tehnici de determinare adecvate.

În consecință, din cadrul arborelui de evenimente structurat pentru determinări defectoscopice, se remarcă importanța adaptării tehnicii, a procedurilor, etc. la cazul concret pentru care se face determinarea, respectiv: natura materialului, poziția geometrică, condiții atmosferice, ora la care se face determinarea, etc.

BIBLIOGRAFIE

- [1] C. A. Ericson II, Hazard Analysis Techniques for System Safety, Chapter 12. Event Tree Analysis, Wiley online library, published Online: 24 AUG 2005, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0471739421.ch12/summary>.
- [2] J.D. Andrews, S.J. Dunnett, Event Tree Analysis Using Binary Decision Diagrams, IEEE Transaction and Reliability, 49(2), 2000.
- [3] Z. Long, Z. Jinglun, Analysis and Study of System Safety Based on Event Sequence Diagram, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.8 No.2, February 2008.
- [4] V. Goanță și V. Palihovici, Expertize în Ingineria Mecanică, Ed. Tehnopress, Iași, 2006.
- [5] S.M. Hosseini, M. Takahashi, Combining Static/Dynamic Fault Trees and Event Trees Using Bayesian Networks, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [6] J. B. Dugan, K. J. Sullivan, D. Coppit, , The Galileo Fault Tree Analysis Tool, Proceedings of the 29th Annual International Symposium on Fault-Tolerant Computing, 1999.
- [7] ***, Programul ITEM Toolkit.

CAPITOLUL 7. MODELE DE PREDICȚIE A FUNCȚIONĂRII UNUI SISTEM MECANIC PE BAZA APLICĂRII LANȚURILOR MARKOV

7.1. Introducere

7.2. Procese stohastice și lanțuri Markov. Noțiuni și definiții generale

7.3. Proprietăți de bază ale lanțurilor Markov

7.4. Lanțuri Markov regulate

7.5. Procese Markov

7.6. Modele probabilistice de studiu a fiabilității bazate pe lanțuri Markov

7.7. Modele de aplicare a lanțurilor Markov

7.1. Introducere

Un proces Markov este un proces stohastic care are proprietatea că starea curentă a unui astfel de proces/sistem, reține toată informația despre întreaga evoluție a procesului/sistemului. Un proces, în care una sau mai multe valori caracteristice lui variază aleator în timp, îl numim "proces stohastic". Într-un proces Markov, la fiecare moment sistemul își poate schimba sau păstra starea, în conformitate cu o anumită distribuție de probabilitate. Schimbările de stare sunt numite tranziții, trecerea de la o stare la alta făcându-se pe baza unor matrici de tranziție. Un exemplu de proces Markov îl constituie parcurgerea aleatoare a nodurilor unui graf, tranzițiile reprezentând trecerea succesivă de la un nod la altul, cu probabilitate egală, indiferent de nodurile parcurse până în acel moment. Practica oferă numeroase exemple în care, anumite valori caracteristice ale unui sistem, formând așa numitele stări discrete ale sistemului, variază o dată cu timpul, astfel încât ele nu pot fi prevăzute cu exactitate.

În acest capitol urmează să fie redate, succint, principalele definiții și proprietăți ale proceselor stohastice și ale lanțurilor Markov (*LM*), clasificarea acestora în conformitate cu modul în care sunt "vizitate" în cursul timpului funcționării lanțului. În practică se întâlnesc deseori și sisteme dinamice cu stări discrete, pentru care durata de aflare într-o stare oarecare i , fiind o variabilă aleatoare, depinde de această stare și de starea următoare de trecere și ea nu este necesar distribuită conform legii exponențial-negative. Astfel, evoluția sistemului este definită de starea curentă și de starea ce urmează. Acest tip de procese stohastice sunt numite procese semi-Markov.

Deoarece lanțurile Markov sunt procese stohastice, nu se poate ști cu exactitate ce se întâmplă în fiecare stare; de aceea, sistemul trebuie descris în termeni de probabilitate.

În cadrul acestui capitol se prezintă modele probabilistice de studiu a fiabilității structurate utilizând lanțuri Markov pe baza cărora funcționarea oricărui element al unui sistem mecanic, mecatronic, etc. se caracterizează printr-o succesiune de stări care descriu *regimurile de funcționare normale sau de avarie*. Datorită naturii probabilistice a stărilor prin care trece sistemul/instalația respectivă, se poate admite că evoluția procesului este descrisă ca fiind aleatorie. Evoluția

procesului respectiv este definită de o *familie de variabile* care descriu traiectoria procesului. Cunoașterea stărilor sistemului la momentele consecutive $t_1, t_2, \dots, t_{i-1}$, anterioare lui t_i , contribuie la cunoașterea stării în momentul t_i prin colectarea unor informații referitoare la starea din momentele anterioare, dar cuprinse toate în starea cea mai recentă, respectiv starea din momentul t_{i-1} . Trebuie ținut cont de faptul că, în general, un sistem poate ajunge într-o anumită stare prin mai multe succesiuni de stări, modul în care sistemul respectiv a ajuns aici influențând funcționarea sa ulterioară, și, ca urmare, și indicatorii ce caracterizează fiabilitatea sistemului pentru momentul t_i . **Procesul care are o asemenea evoluție, caracterizată de faptul că, starea în care va trece sistemul depinde atât de starea în care se găsește acesta cât și de modul în care sistemul a ajuns în această stare, se numește proces Markov.** Astfel, procesele Markov sunt caracterizate prin aceea că, apariția unei anumite stări este condiționată doar de un număr determinat de stări anterioare. Dacă numărul acestor stări anterioare este n , atunci este vorba de un proces Markov de ordinul n .

7.2. Procese stohastice și lanțuri Markov. Noțiuni și definiții generale

Procesele stohastice permit modelarea matematică a componentelor sistemelor tehnice, informatice, economice, sociale, etc. În cele ce urmează vom reda succint principalele *definiții și proprietăți* ale proceselor stohastice și ale lanțurilor Markov (LM).

Un proces stohastic X este o familie de variabile aleatoare $(X_\tau)_{\tau \in \Theta}$ definite pe același spațiu de probabilitate cu valori reale, în același spațiu de valori Ω și indexate după un parametru $\tau \in \Theta \subseteq \mathbb{R}$.

Un proces stohastic se reprezintă prin [1]:

$$\{X_\tau \in \Omega, \tau \in \Theta\} \quad (7.1)$$

De obicei, precizarea mulțimii Θ coincide cu intervalul de timp al evoluției diverselor clase de procese stohastice. Astfel, dacă $\Theta = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$ este o mulțime finită, atunci procesul stohastic este echivalent cu un vector aleator, care determină vectorul de stare al sistemului studiat. În termeni probabilistici, a descrie evoluția unui proces stohastic înseamnă:

- cunoașterea probabilităților tuturor evenimentelor de forma: "*la momentul τ procesul stohastic se găsește în starea $(X_\tau = x)$* ", **stare de defect, de exemplu;**
- cunoașterea probabilităților de realizare simultană a unui număr de astfel de evenimente (**probabilitatea de defectare**) pentru diverse momente $\tau_i \in \Theta$ și diverse mulțimi $e_i \subseteq \mathbb{R}$, $1 \leq i \leq n$. Cu alte cuvinte, este necesar să fie cunoscute probabilitățile de forma:

$$\Pr(X_{\tau_1} \in e_1, \dots, X_{\tau_n} \in e_n) \quad (7.2)$$

pentru orice $n \in \mathbb{N}$, orice $\tau_i \in \Theta$ și orice $e_i \subseteq \mathbb{R}$, cu $1 \leq i \leq n$. Acest fapt se manifestă prin cunoașterea funcțiilor de repartiție n – dimensionale:

$$X_{\tau_1 \dots \tau_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \Pr(X_{\tau_1} \leq x_1, \dots, X_{\tau_n} \leq x_n) \quad (7.3)$$

În acest context se mai spune că legea probabilistică a unui proces stohastic este dată de legea de repartiție a tuturor vectorilor aleatori cu probabilitățile (7.2).

În ipoteza că parametrul $\tau \in \Theta$ este timpul, se poate face și presupunerea particulară că, momentele $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_n$ sunt ordonate și anume că $\tau_0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_n < \tau$, fapt care apare natural. Într-o astfel de situație, dacă observăm procesul stohastic la momentul τ_n , pe care îl considerăm ca "prezent", putem presupune "trecutul" procesului pentru $\tau_i < \tau$, $0 \leq i \leq n$ și, în mod firesc, ne interesează "viitorul" acestui proces pentru τ . Un astfel de interes ne conduce la evaluarea probabilităților condiționate de forma:

$$Pr(X_\tau \leq x | X_{\tau_n} = x_n, \dots, X_{\tau_0} \leq x_0) \quad (7.4)$$

care înseamnă probabilitatea ca procesul stohastic să se afle la momentul viitor τ în starea $X_\tau = x$, condiționat de faptul că la momentele trecute $\tau_0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_n < \tau$ s-a aflat succesiv în stările $X_{\tau_0} = x_0, \dots, X_{\tau_n} = x_n$, starea x_0 fiind starea inițială a acestui proces.

Probabilitățile de forma $\pi_x(\tau) = Pr(X_\tau = x)$, $\tau_0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_n < \tau$ se numesc, în contextul de mai sus, **probabilități absolute de stare** și se referă la evenimente de forma: "procesul se găsește la momentul τ în starea $X_\tau = x$ ", fără a se face vreo referire la trecutul procesului stohastic. În cadrul analizelor efectuate cu ajutorul lanțurilor Markov, probabilitățile absolute de stare trebuie cunoscute și furnizate încă de la început, în vederea calculării ulterioare a probabilității ca sistemul să se regăsească ulterior într-o altă stare.

Ca și alte concepte matematice, nici procesele stohastice nu pot fi studiate global, fiind necesară o clasificare a acestora după anumite criterii.

O primă clasificare poate fi făcută pe baza mulțimii parametrilor procesului stohastic:

a) dacă τ este un interval mărginit al dreptei reale, atunci avem procese stohastice de tip continuu în raport cu parametrul timp;

b) dacă τ este o mulțime discretă, spre exemplu $\tau = Z$ (numere întregi) sau $\tau = R^+$ (mărimi reale), atunci avem procese stohastice de tip discret în raport cu parametrul τ și care se mai numesc lanțuri.

O altă clasificare poate fi făcută în funcție de mulțimea valorilor procesului și anume:

a) dacă mulțimea valorilor procesului este nenumărabilă (spre exemplu, un interval real), atunci avem procese cu valori continue;

b) dacă mulțimea valorilor procesului este cel mult numărabilă, atunci avem procese cu valori discrete.

Cel mai important criteriu de clasificare se referă la modul în care sunt legate între ele variabilele aleatoare X_τ , ceea ce permite și un studiu adecvat al diferitelor tipuri de procese stohastice.

Un proces stohastic X este un proces Markov (sau markovian) dacă și numai dacă are loc relația numită proprietatea lui Markov [2]:

$$\forall n \in \mathbb{N}^+, \forall \tau_0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_n < \tau, \forall (x_0, x_1, \dots, x_n, x), \\ Pr(X_\tau \leq x | X_{\tau_n} = x_n, \dots, X_{\tau_0} \leq x_0) = Pr(X_\tau \leq x | X_{\tau_n} = x_n)$$

Un lanț Markov este un proces Markov cu un spațiu discret de stări. La baza conceptului de proces Markov se află imaginea pe care o avem despre un *sistem dinamic fără postacțiune*, adică un sistem pentru care evoluția viitoare (la momentul τ) depinde de starea prezentă a procesului (cea de la momentul τ_n) dar și de ceea ce s-a petrecut în trecutul său (la momentele premergătoare $\tau_0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_{n-1}$).

Pentru astfel de procese stohastice, ultima stare cunoscută determină complet, din punct de vedere probabilistic, comportarea viitoare a sistemului.

7.3. Proprietăți de bază ale lanțurilor Markov

Informațiile despre tranzițiile de la o stare la alta în cadrul unui lanț Markov pot fi reprezentate prin *matricea de tranziție (într-un pas)*. Ea este formată din elementele p_{ij} - probabilitatea de trecere într-un pas de la starea i la starea j ($i, j = 1, 2, \dots, m$). În aceste condiții se poate vorbi și de *probabilitățile de tranziție în exact k pași* și de o matrice formată din acestea.

Se vor face următoarele notații:

- $p_{ij}(k)$ - probabilitatea condiționată de efectuare a tranziției din starea i în starea j în exact k pași.
- $P(k)$ - matricea de tranziție în k pași.

Fie P matricea de tranziție într-un pas a unui lanț Markov. Atunci, matricea $P(k)$ de tranziție în k pași este [3]:

$$P(k) = P \cdot P \cdot \dots \cdot P = P^k \quad (7.5)$$

de k ori

Relația (7.5) exprimă o *proprietate de bază a lanțurilor Markov* prin care acestea se deosebesc de alte procese stohastice.

Conform proprietății matricei de tranziție P , **suma probabilităților de pe fiecare linie a acesteia trebuie să dea 1**. Această proprietate rămâne valabilă și în cazul matricei de tranziție în k pași:

$$P(k) = P \cdot k.$$

Un vector poate fi reprezentat ca o *matrice linie (vector linie)* sau ca o *matrice coloană (vector coloană)*.

Un vector linie $(q_1, q_2, \dots, q_n)$ care are proprietățile:

- $0 \leq q_i \leq 1$
- $\sum_{i=1}^n q_i = 1$

se numește **vector de probabilitate** sau **vector stohastic**.

O matrice ale cărei linii sunt vectori stohastici se numește **matrice stohastică**.

Rezultă că fiecare linie a matricei de tranziție P este un *vector de probabilitate*. Același lucru se poate spune și despre liniile matricei de tranziție în k pași $P(k) = P \cdot k$. De asemenea, matricele P și $(P \cdot k)$ sunt matrice stohastice.

7.4. Lanțuri Markov regulate

Deoarece lanțurile Markov sunt procese stohastice, nu se poate ști cu exactitate ce se întâmplă în fiecare stare, ca urmare, sistemul trebuie descris în termeni de probabilitate.

Fie un lanț Markov cu n stări. Un vector de stare pentru lanțul Markov este un **vector de probabilitate** $X = x_1 \ x_2 \ \dots x_i \ \dots x_n$. Coordonatele x_i ale vectorului de stare X trebuie interpretate ca *probabilitatea ca sistemul să se afle în starea i* . Atunci când se știe cu siguranță că sistemul este într-o anumită stare, vectorul de stare are o formă particulară. Astfel, dacă se știe sigur că sistemul este în starea a i -a (de exemplu toate componentele sistemului funcționează), vectorul de stare va avea a i -a componentă egală cu 1, iar restul 0. $X = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 1 \ \dots \ 0]$.

Comportamentul unui lanț Markov poate fi descris printr-o secvență de vectori de stare. Starea inițială a sistemului poate fi descrisă printr-un vector de stare notat X_0 . După o tranziție sistemul poate fi descris printr-un vector X_1 , iar după k tranziții, prin vectorul de stare X_k . Relația dintre acești vectori este descrisă în cele ce urmează.

Fie un proces Markov cu matricea de tranziție P . Dacă X_k și X_{k+1} sunt vectori de stare care descriu un proces după k și respectiv $k+1$ tranziții, atunci [4]:

$$X_{k+1} = X_k \cdot P$$

În particular:

$$X_1 = X_0 \cdot P$$

$$X_2 = X_1 \cdot P = (X_0 \cdot P) \cdot P = X_0 \cdot P^2$$

$$X_k = X_0 \cdot P^k = X_0 \cdot P(k)$$

Ca urmare, vectorul de stare X_k care descrie sistemul după k tranziții e produsul între vectorul stării inițiale X_0 și matricea $P(k)$.

Observație. $X_0, X_1, X_2, \dots, X_k, \dots$ sunt toți vectori linie de dimensiune $(1 \times m)$.

Dacă interesează studierea unui proces stohastic după un număr mare de tranziții, atunci este utilă studierea comportării generale a acestuia pe termen lung. Pentru anumite tipuri de lanțuri Markov acest lucru este posibil. În general, pentru un lanț Markov cu m stări, posibilitatea ca sistemul să se afle în starea j după k tranziții depinde de starea din care s-a pornit. Astfel, $p_{1j}(k)$ este *probabilitatea ca sistemul să fie în starea j după k tranziții dacă inițial se află în starea 1*. Semnificații similare avem pentru $p_{2j}(k)$, ..., $p_{mj}(k)$. Nu există nici un motiv ca aceste probabilități să fie (sau să ne așteptăm să devină) egale. Dar, pentru anumite lanțuri Markov există o probabilitate strict pozitivă q_j asociată cu starea j astfel încât după k tranziții probabilitățile $p_{ij}(k)$ devin, toate, foarte apropiate de q_j . Cu alte cuvinte, speranța ca sistemul să ajungă în starea j după k tranziții (unde k este suficient de mare) este cam aceeași, indiferent de starea din care se pleacă.

Lanțurile Markov care au o astfel de comportare pe termen lung formează o clasă aparte care este definită după cum urmează.

Un lanț Markov cu matricea de tranziție P se numește **regulat** dacă există un întreg k pozitiv astfel încât $P(k)$ să aibă toate elementele strict pozitive.

7.5. Procese Markov

În cadrul proceselor aleatoare un loc deosebit îl ocupă procesele Markov caracterizate prin aceea că, apariția unei anumite stări este condiționată doar de un număr determinat de stări anterioare. Dacă numărul acestor stări anterioare este n , atunci este vorba de un proces Markov de ordinul n .

Procesele Markov de ordinul 1 ocupă un loc important în studiul sistemelor mecanice. Înseamnă că dacă un sistem se află la momentele de timp $t_0, t_1, \dots, t_j, \dots$ în stări $N(t_0), N(t_1), \dots, N(t_j), \dots$ și dacă el se comportă ca un sistem Markov de ordinul 1, atunci probabilitatea ca la un moment următor t_{j+1} starea lui să fie $N(t_{j+1})$ este determinată doar de starea lui din momentul anterior, adică [5]:

$$\begin{aligned} P\{N(t_{j+1})=k \mid N(t_0)=n_0, N(t_1)=n_1, \dots, N(t_j)=n_j\} = \\ = P\{N(t_{j+1})=k \mid N(t_j)=n\} = p_k(t) \end{aligned} \quad (7.6)$$

Cu alte cuvinte, aceasta se exprimă prin formularea: *starea viitoare k depinde doar de starea prezentă n sau starea prezentă înglobează în ea întregul trecut.*

Pentru orice sistem este caracteristic vectorul de stare $p(t)$. El este structurat ca un vector linie, având ca elemente probabilitățile absolute $p_n(t)$ ale tuturor stărilor n ale sistemului ($0 \leq n < \infty$).

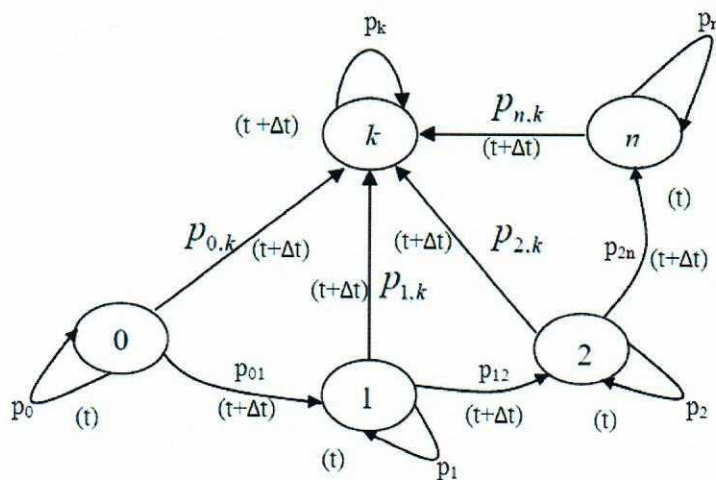


Fig. 7.1. Tranziții între stări la modelul Markov

În figura 7.1 se prezintă grafic această evoluție corespunzătoare unui proces Markov de ordinul 1. Stările sistemului numerotate începând cu $0, \dots, k$ sunt reprezentate prin cercuri, iar prin săgeți sunt figurate eventualele tranziții între stări. Pe fiecare săgeată sunt notate probabilitățile de tranziție. Astfel, pentru ca la momentul $t+\Delta t$ sistemul să se afle într-o stare nouă plecând din starea prezentă n , la momentul t trebuie să aibă loc tranziția: $n \rightarrow k$, adică, în termeni probabilistici se poate scrie ca:

$$p_k(t+\Delta t) = \sum [p_n(t) \cdot p_{n,k}(t)] \quad (7.7)$$

Această relație reprezintă modul de exprimare matematică a caracterului Markovian al procesului, în care starea viitoare k nu depinde decât de starea prezentă n .

Relația 7.7 poate fi scrisă și sub formă matriceală. Toate probabilitățile de tranziție $p_{n,k}$ sunt grupate într-o **matrice de tranziție T** (vezi tabelul 7.1), o matrice pătratică ce are ca dimensiune numărul total de stări posibile ale sistemului. În această matrice, suma elementelor fiecărei linii este egală cu unitatea. Se obține astfel relația matriceală:

$$p(t + \Delta t) = p(t) \cdot T \text{ sau } p(t) = p(0) \cdot T \quad (7.8)$$

care face posibilă determinarea vectorului de stare a sistemului în orice moment de timp, pe baza matricei de tranziție și a vectorului stării *vide*.

Tab. 7.1 Matricea T pentru procesul de naștere pură

Stări în t	Stări în t+Δt			
	0	1	...	k
0	1-p ₀₀ Δt	1-p ₀₁ Δt		1-p _{0k} Δt
1	1-p ₁₀ Δt	1-p ₁₁ Δt		1-p _{1k} Δt
⋮				
n-1	1-p _{n-10} Δt	1-p _{n-11} Δt		1-p _{n-1k} Δt
n	1-p _{n0} Δt	1-p _{n1} Δt		1-p _{nk} Δt

7.6. Modele probabilistice de studiu a fiabilității bazate pe lanțuri Markov

Funcționarea oricărui element al unui sistem mecanic, mecatronic, etc., se caracterizează printr-o succesiune de stări care descriu *regimurile de funcționare normale, de avarie sau de cedare*. Datorită naturii probabilistice a stărilor prin care trece instalația respectivă, se poate admite că evoluția sistemului este descrisă de un proces aleatoriu. Evoluția procesului respectiv este definită de o familie de variabile care descriu traiectoria procesului. Cunoașterea stărilor sistemului la momentele consecutive $t_1, t_2, \dots, t_n$ anterioare lui t contribuie la cunoașterea stării în momentul t prin colectarea unor informații referitoare la starea din momentele anterioare, dar cuprinse toate în starea cea mai recentă, respectiv starea din momentul t_n . Trebuie ținut cont de faptul că, în general, un sistem poate ajunge într-o anumită stare prin mai multe succesiuni de stări, modul în care sistemul respectiv a ajuns aici influențând funcționarea sa ulterioară, și deci, și indicatorii care caracterizează **fiabilitatea sistemului** pentru momentul t_n . Procesul care are o asemenea evoluție, caracterizată de faptul că starea în care va trece sistemul depinde atât de starea în care se găsește acesta cât și de modul în care sistemul a ajuns în această stare, se numește proces Markov.

Pentru un proces Markov vom nota cu $P(t, e; \theta, \xi)$ probabilitatea ca procesul să fie în starea ξ la momentul θ știind că a fost în starea e la momentul t . Se spune că un proces Markov este omogen în timp dacă probabilitățile P nu sunt afectate de o translație în timp, adică [6]:

$$P(t + t_1; e, \theta + t_1, \xi)$$

pentru orice valoare a lui t_1 .

Procesele Markov care nu sunt omogene se numesc procese Markov discrete. Schema tehnologică a oricărei instalații mecanice este alcătuită din componente dispuse într-o anumită configurație. Diferitele combinații posibile de componente, scoase temporar din funcțiune sau aflate în reparație ca urmare a avariilor, definesc stările prin care poate evolua instalația. Unele dintre aceste stări conduc la satisfacerea cerințelor consumatorilor și se numesc stări de succes, iar altele nu satisfac (parțial sau total) aceste cerințe și se numesc stări de defect sau de insucces. Pe parcursul exploatării, ansamblul trece de la o stare la alta pe măsură ce unele componente ale sale se defectează, altele reintră în funcțiune ca urmare a reparației iar altele sunt înlocuite. În regim normal de funcționare se consideră că defectarea unui element sau reintrarea sa în funcționare după o reparație nu depinde în mod direct de timp, ci numai de intervalul de timp de la intrarea lor în funcțiune, respectiv de la intrarea lor în reparație, ceea ce corespunde proceselor Markov omogene.

Dacă notăm cu $\{x(t); t \geq 0\}$ familia de variabile care caracterizează lanțul Markov finit și cu timp continuu, și cu $P\{x(\tau)=i\}$ probabilitatea ca la momentul $t=\tau$ sistemul să se găsească în starea i (unde i este o stare în care se poate afla sistemul), desemnăm prin $p_{ij}(\tau; \tau_1)$ probabilitatea ca sistemul să fie în starea j la momentul τ_1 știind că a fost în starea i la momentul τ unde $\tau < \tau_1$:

$$p_{ij}(\tau; \tau_1) = P\{x(\tau_1)=j; x(\tau)=i\}$$

Dacă $\tau=\tau_1$ se deduce că: $p_{ij}(\tau; \tau_1)=\delta_{ij}$ unde δ_{ij} este simbolul lui Kroneker (ia valoarea 1 dacă $i=j$ și 0 dacă $i \neq j$). Prin $[p_{ij}(\tau; \tau_1)]$ desemnăm matricea de tranziție între stările i și j pentru momentele τ și τ_1 . Considerând momentele τ și $\tau+t$ și notând:

$$p_{ij}(t) = p_{ij}(\tau; \tau+t)$$

se poate scrie că probabilitatea ca la momentul $\tau+t$ sistemul să se găsească în starea j este egală cu suma produselor dintre probabilitatea ca la momentul anterior τ sistemul să se găsească în starea i și probabilitatea ca sistemul fiind în momentul τ în starea i să treacă în momentul următor $\tau+t$ în starea j :

$$p_j(\tau+t) = \sum_{i=1}^N P_i(\tau) \cdot p_{ij}(t)$$

unde N este numărul de stări în care se poate afla sistemul.

Pentru lanțurile Markov omogene probabilitățile de tranziție p_{ij} satisfac relațiile:

$$\begin{aligned} p(\tau+t) &= p(\tau) \cdot p(t) \\ p(0) &= [\delta_{ij}] \end{aligned}$$

unde prin $p(t)$ am notat matricea de tranziție $[p_{ij}(t)]$. Dacă derivăm prima relație în raport cu τ , în punctul $s=0$ se obține următoarea ecuație matriceală:

$$p'(\tau) = p'(\tau) \cdot p'(0)$$

care reprezintă un sistem de ecuații diferențiale. Dacă o derivăm în raport cu t în punctul $t=0$ obținem:

$$p'(t) = p'(0) \cdot p(0)$$

sau, schimbând notația parametrilor t și τ :

$$p'(t) = p'(t) \cdot p'(0)$$

Introducând notația $q=p'(0)$, din relațiile anterioare se observă că matricea q , ale cărei elemente satisfac relațiile:

$$q_{ij} \geq 0 \text{ pentru } i \neq j$$

$$\sum_{j=1}^N q_{ij} = 1$$

permite determinarea elementelor matricei p : dacă sunt cunoscute elementele lui q pot fi determinate elementele matricei p .

$$p_j(\tau + t) = \sum_{i=1}^n P_i(\tau) \cdot p_{ij}(t)$$

Transcriind matriceal relația care ne dă probabilitatea ca sistemul să se afle în starea j :

$$p(\tau + t) = P(\tau) \cdot p(t)$$

unde prin $P(\tau)$ am notat vectorul linie având ca elemente $P_j(\tau)$ și derivând în raport cu t în punctul $t=0$ se obține:

$$P'(\tau) = P(\tau) \cdot p'(0) = P(\tau) \cdot q$$

sau transcriind pentru variabila t :

$$P'(t) = P(t) \cdot q$$

Matricea probabilităților de tranziție p este o matrice pătrată de ordinul n (nr. de stări posibile ale sistemului) ale cărei elemente p_{ij} reprezintă probabilitatea ca sistemul, fiind în starea i , să treacă în starea j . Elementele acestei matrice au următoarele proprietăți:

- termenii matricei sunt probabilități (sunt nr. pozitive cuprinse între 0 și 1);
- suma termenilor fiecărei linii este egală cu 1.

Defectarea unui element oarecare este un eveniment a cărui probabilitate de realizare într-un interval de timp elementar Δt are valoarea $(\lambda \cdot \Delta t)$, unde λ reprezintă **rata de defectare**. De asemenea, *repararea unui element* oarecare este un eveniment a cărui probabilitate de realizare într-un interval de timp elementar Δt are valoarea $(\mu \cdot \Delta t)$, unde μ este **rata de reparare**. *Probabilitatea de producere a două evenimente simultan într-un interval elementar este considerată nulă.*

Ca exemplu de aplicare a metodei lanțurilor Markov la determinarea indicatorilor de fiabilitate ai instalațiilor care conțin și elemente ce pot fi reparate sau înlocuite, considerăm cazul cel mai simplu al unui singur element care are rata de defectare λ și rata de reparare μ .

În acest caz, lanțul Markov are numai două stări:

- starea 0: elementul este în stare de funcționare;
- starea 1: elementul este defect.

Probabilitățile de tranziție au următoarele expresii:

$$p_{00}(\Delta t) = 1 - \lambda \cdot \Delta t; \quad p_{01}(\Delta t) = \lambda \cdot \Delta t$$

$$p_{10}(\Delta t) = \mu \cdot \Delta t; \quad p_{11}(\Delta t) = 1 - \mu \cdot \Delta t$$

iar matricea q va fi:

$$q = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{bmatrix}$$

Probabilitatea ca elementul să fie în stare de funcționare după timpul Δt este dată de relația $p_{00}(\Delta t) = 1 - \lambda \cdot \Delta t$ deoarece, probabilitate de defectare într-un interval de timp elementar Δt are valoarea $(\lambda \cdot \Delta t)$ și, ca urmare, probabilitatea de funcționare este $(1 - \lambda \cdot \Delta t)$. Probabilitatea ca elementul să fie în stare de defect după timpul Δt este dată de relația $p_{11}(\Delta t) = 1 - \mu \cdot \Delta t$ deoarece, probabilitate de reparare într-un interval de timp elementar Δt are valoarea $(\mu \cdot \Delta t)$ și, ca urmare, probabilitatea de defectare este $(1 - \mu \cdot \Delta t)$.

Pornind de la matricea q , se poate trasa un graf care să ilustreze stările posibile și modul în care se realizează tranziția între aceste stări; nodurile grafului reprezintă stările posibile, iar dacă este posibilă tranziția din starea i în starea j , se trasează un arc între nodurile corespunzătoare acestor stări, căruia i se asociază un număr egal cu q_{ij} . Graful stărilor pentru un singur element este reprezentat în figura 7.2, [7]

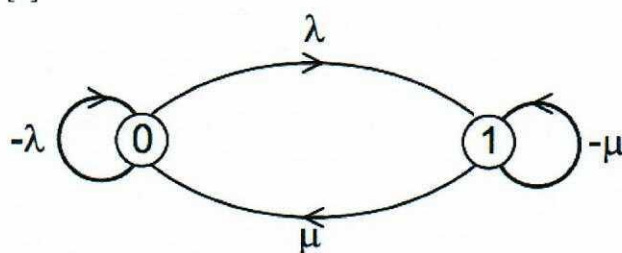


Fig. 7.2. Graful stărilor pentru un sistem cu un singur element reparabil

Notând cu $P_0(0)$ și $P_1(0)$ probabilitățile ca sistemul să se găsească în momentul inițial în stările 0 și respectiv 1, sistemul de ecuații diferențiale care ne permit determinarea probabilităților este:

$$\begin{cases} P'_0(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ P'_1(t) = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t) \end{cases}$$

Pentru rezolvarea sistemului se ține cont că:

$$P_0(t) + P_1(t) = 1$$

ceea ce conduce la o soluție particulară a ecuației neomogene ce se obține pentru $P_0(t) = ct$, ($P'_0(t) = 0$) și va fi de forma:

$$0 = -\lambda P_0(t) + \mu(1 - P_0(t)) \rightarrow P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

Punând condiția inițială ca la $t=0$ valoarea lui $P(t)$ să fie $P(0)$, vom putea obține probabilitățile P_0 și P_1 :

$$P_0(t) = P_0(0)e^{-(\lambda+\mu)t} + \frac{\mu}{\lambda+\mu} [1 - e^{-(\lambda+\mu)t}]$$

$$P_1(t) = 1 - P_0(t)$$

Dacă se știe că starea inițială a procesului este starea 1, $P_0(0)$ și $P_1(0)$ au valorile 0 și 1, ceea ce conduce la:

$$P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} [1 - e^{-(\lambda+\mu)t}]$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda + \mu e^{-(\lambda+\mu)t}}{\lambda+\mu}$$

Pentru un sistem de n elemente *conectate în serie*, lanțul Markov are următoarele stări:

- starea 0: starea de funcționare a tuturor elementelor sistemului;
- starea i : starea de avarie a elementului i .

Probabilitățile de tranziție asociate au expresiile:

$$p_{0i}(\Delta t) = 1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i p_{0i}(\Delta t) = \lambda_i(\Delta t)$$

$$p_{i0}(\Delta t) = \mu_i \Delta t p_{ij}(\Delta t) = \delta_{ij}(1 - \mu_i \Delta t)$$

iar graful de tranziție a stărilor este reprezentat în figura 7.3.

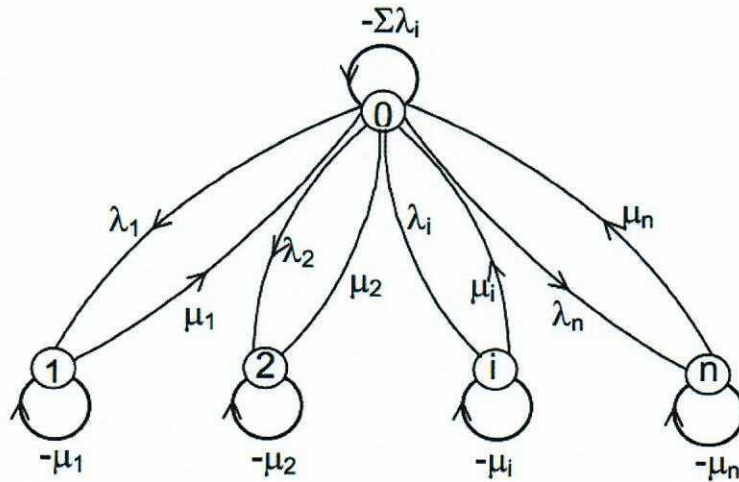


Fig. 7.3. Graful de tranziție a stărilor pentru un sistem de n elemente reparabile legate în serie
Dacă notăm:

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad \mu_0 = \frac{\lambda_0}{\sum_{i=1}^n \mu_i}$$

și considerăm că starea inițială a sistemului este starea 0 (sistemul este în momentul inițial în stare de funcționare) rezultă sistemul de ecuații diferențiale care dă probabilitățile absolute:

$$\begin{cases} P'_0(t) = -\lambda_0 P_0(t) + \sum_{i=1}^n \mu_i P_i(t); & P_0(0) = 1 \\ P'_i(t) = \lambda_i P_0(t) - \mu_i P_i(t); & P_i(0) = 0 \end{cases}$$

Soluțiile acestui sistem sunt:

$$P_0(t) = \frac{\mu_0 + \lambda_0 e^{-(\lambda_0 + \mu_0)t}}{\mu_0 + \lambda_0}$$

$$P_i(t) = \frac{1 - e^{-(\lambda_0 + \mu_0)t}}{\mu_0 + \lambda_0}$$

Dacă se consideră numai evoluția procesului din starea 0 în stările i , aceasta este echivalent cu $\mu_i=0$, ceea ce permite să se obțină funcția de distribuție a perioadelor de funcționare ale sistemului (probabilitatea ca perioada de funcționare până la defectare să fie mai mică decât timpul:

$$P\{T_f \leq t\} = 1 - P_0(t) = 1 - e^{-\lambda_0 t}$$

din care, dacă se ține cont că pentru un singur element această funcție de distribuție are expresia:

$$P\{T_f \leq t\} = 1 - e^{-\lambda t}$$

rezultă că sistemul de n elemente *conectate funcțional în serie* poate fi echivalat cu un singur element care are intensitatea de defectare :

$$\lambda_e = \lambda_0$$

În cazul unui sistem format din n elemente identice care funcționează în paralel, astfel încât sistemul este în funcțiune dacă cel mult m elemente sunt defecte, lanțul Markov asociat are $m+1$ stări, cu i fiind notată starea care corespunde la i elemente defecte, celelalte $n-i$ elemente fiind în funcțiune. Acestui sistem îi corespunde graful de tranziție a stărilor următor:

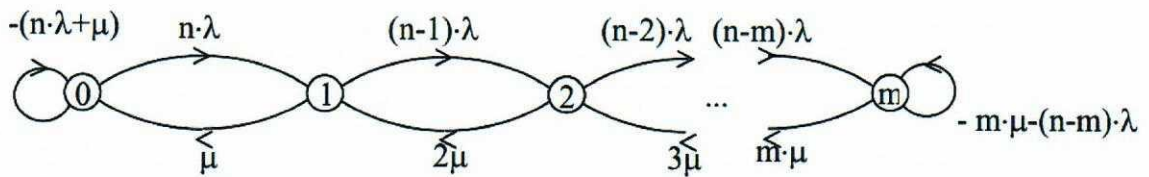


Fig. 7.4. Graful de tranziție a stărilor pentru un sistem de n elemente reparabile legate funcțional în paralel, necesitând funcționarea a cel puțin m elemente

Probabilitățile de tranziție au următoarele expresii [8]:

$$P_{i,i+1}(\Delta t) = (n-i) \cdot \lambda \cdot \Delta t$$

$$P_{i,i-1}(\Delta t) = i \cdot \mu \cdot \Delta t$$

$$\lambda_i = (n-i)\lambda + i \cdot \mu$$

$$P_{i,i}(\Delta t) = 1 - [(n-i)\lambda + i \cdot \mu]\Delta t = 1 - \lambda_i \cdot \Delta t$$

restul probabilităților de tranziție fiind nule deoarece dintr-o stare cu i elemente defecte se poate trece numai în starea cu $i+1$ elemente defecte (prin defectarea a încă unui element) sau în starea cu $i-1$ elemente defecte (prin repararea unui element defect).

Probabilitățile absolute ale procesului sunt soluțiile următorului sistem de ecuații diferențiale:

$$\begin{cases} P'_0(t) = -\lambda_0 P_0(t) + \mu P_1(t); \\ P'_i(t) = (n-i+1)\lambda P_{i-1}(t) - \lambda_i P_i(t) + (i+1)\mu P_{i+1}(t); \\ P'_n(t) = \lambda P_{n-1}(t) - \lambda_n P_n(t); \end{cases}$$

cu condițiile inițiale $P_0(0)=1, P_1(0)=0, \dots, P_i(0)=0, \dots, P_n(0)=0$ și pentru care soluțiile au forma:

$$P_i(t) = C_n^i \left[\frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}) \right] \cdot \left[\frac{\mu + \lambda \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}}{\lambda + \mu} \right]^{n-i}$$

$$P_0 = 1 - \sum_{i=1}^n P_i(t)$$

După cum se observă, pentru sistemele complexe, determinarea probabilității de funcționare a instalației presupune rezolvarea unui sistem de ecuații diferențiale cu un număr cu atât mai mare de ecuații cu cât sistemul este mai complex. Rezolvarea acestui sistem nu este totdeauna ușoară. Pentru timpi de observație mari, determinarea acestor probabilități absolute se ușurează deoarece ele tind să devină independente de starea inițială a procesului și rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale se reduce la rezolvarea unui sistem de ecuații algebrice. Dacă vom considera un sistem cu n stări, sistemul este format din ecuații de forma:

$$\sum_{i=1}^n P_i \cdot q_{ij} = 0; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

la care se adaugă ecuația:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1$$

P_i fiind probabilitatea absolută ca sistemul să se găsească în starea notată cu i . În mod practic, în unele stări în care se poate găsi procesul sunt îndeplinite condițiile de funcționare impuse instalației respective. Presupunem că aceste stări sunt stările $1, 2, \dots, s$ iar restul stărilor $s+1, s+2, \dots, n$ sunt stări de defect pentru instalație. Când instalația se găsește în una din stările de la 1 la s se spune că este în stare de succes. Notând cu P_S probabilitatea ca instalația să se afle în stare de succes (funcționare) și cu P_R probabilitatea ca ea să se afle în stare de refuz (defect), cele două probabilități se pot calcula în funcție de probabilitățile absolute ale stărilor cu formulele:

$$P_S = P_1 + P_2 + \dots + P_s = \sum_{i=1}^s P_i$$

$$P_R = P_{s+1} + P_{s+2} + \dots + P_n = \sum_{i=s+1}^n P_i = 1 - P_S$$

Considerăm un sistem format din două elemente legate în serie; acest sistem are asociat un lanț Markov cu trei stări:

- starea 0: ambele componente în funcțiune;
- starea 1: componenta 1 este defectă;
- starea 2: componenta 2 este defectă;

Matricea q pentru acest lanț este:

$$q = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -\mu_1 & 0 \\ \mu_2 & 0 & -\mu_2 \end{bmatrix}$$

Câteva dintre elementele componente ale matricei se explică astfel:

- $q_{00} = -(\lambda_1 + \lambda_2)$ deoarece probabilitatea ca sistemul să se afle în starea 0 este dată de relația: $P_{00} = 1 - P_0(\lambda_1 + \lambda_2)$ în care $P_0(\lambda_1 + \lambda_2)$ reprezintă probabilitatea ca ambele componente să se defecteze;
- $q_{01} = \lambda_1$ deoarece din starea 0 în starea 1 se trece prin rata de defectare a componentei 1, respectiv λ_1 ;
- $q_{10} = \mu_1$ deoarece din starea 1 (componenta 1 defectă) se trece în starea 0 (ambele componente funcționează) se trece prin rata de reparație a componentei 1, respectiv μ_1 ;
- $q_{11} = -\mu_1$ deoarece probabilitatea ca sistemul să se afle în starea 1 (componenta 1 este defectă) este dată de relația: $P_{11} = 1 - P_1 \cdot \mu_1$ în care $P_1 \cdot \mu_1$ reprezintă probabilitatea ca să fie reparată componenta 1;
- $q_{12} = 0$ deoarece nu există posibilitatea de a se trece din starea 1 (componenta 1 este defectă) în starea 2 (componenta 2 este defectă) prin rată de reparație sau rată de defectare.

Rezolvând sistemul de ecuații format (pe coloane) [9]:

$$\begin{cases} -P_0(\lambda_1 + \lambda_2) + P_1\mu_1 + P_2\mu_2 = 0 \\ P_0\lambda_1 - P_1\mu_1 = 0 \\ P_0\lambda_2 - P_2\mu_2 = 0 \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1 \end{cases}$$

obținem valorile probabilităților $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2}}$$

$$P_1 = P_0 \frac{\lambda_1}{\mu_1}$$

$$P_2 = P_0 \frac{\lambda_2}{\mu_2}$$

Prin compararea acestor relații cu cele scrise pentru un singur element, se pot obține valorile intensităților de defectare și reparație echivalente:

$$\lambda_e = \lambda_1 + \lambda_2$$

$$\mu_e = \frac{\lambda_e}{\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2}}$$

formule care pot fi generalizate pentru un sistem alcătuit din n elemente care funcționează în serie:

$$\lambda_{es} = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

$$\mu_{es} = \frac{\lambda_{es}}{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}}$$

În continuare considerăm două componente care sunt conectate funcțional în paralel.

Stările în care se poate găsi sistemul sunt:

- starea 0: ambele componente în funcțiune;
- starea 1: componenta 1 este defectă;
- starea 2: componenta 2 este defectă;
- starea 3: ambele componente sunt defecte.

Pentru acest sistem, matricea q are forma:

$$q = \begin{bmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ \mu_1 & -(\lambda_2 + \mu_1) & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2) & \lambda_1 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & -(\mu_1 + \mu_2) \end{bmatrix}$$

Câteva dintre elementele componente ale matricei se explică astfel:

- $q_{03}=0$ deoarece nu se poate trece direct din starea 0 (ambele componente în funcțiune) în starea 3 (ambele componente sunt defecte) pe baza vreunei rate de reparație sau defectare. Trecerea din starea 0 în starea 2 se face **succesiv**: $0 \rightarrow 1$ (sau $2 \rightarrow 1$) $\rightarrow 2$ (sau $1 \rightarrow 2$) $\rightarrow 3$.
- $q_{11}=-(\lambda_2+\mu_1)$ deoarece probabilitatea ca sistemul să se afle în starea 1 este dată de relația: $P_{11}=1-P_1(\lambda_2+\mu_1)$, respectiv, pentru a se părăsi starea 1 (componenta 1 este defectă și componenta 2 funcționează) este necesară repararea componentei 1 prin probabilitatea $P_1\mu_1$ și defectarea componentei 2 prin probabilitatea $P_1\lambda_2$;
- $q_{21}=0$ deoarece nu se poate trece din starea 2 (componenta 2 este defectă) în starea 1 (componenta 1 este defectă) prin vreo rată de reparație sau de defectare.

Prin rezolvarea acestui sistem se pot determina valorile probabilităților P_0, P_1, P_2, P_3 ceea ce permite determinarea valorilor coeficienților echivalenți:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_1 \mu_2}}$$

$$P_1 = P_0 \frac{\lambda_1}{\mu_1}$$

$$\lambda_e = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (\mu_1 + \mu_2)}{\mu_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1 + \lambda_1 \mu_2}$$

$$\mu_e = \mu_1 + \mu_2$$

7.7. Modele de aplicare a lanțurilor Markov

7.7.1. Model de predicție a vremii probabile

Predicția condițiilor meteorologice (modelate ca fie vremea să fie ploioasă sau soare), având în vedere vremea din ziua precedentă, poate fi reprezentată de o matrice de tranziție de tipul:

$$q = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

Matricea P reprezintă modelul în care vremea în care avem astăzi o probabilitate de 90% de vreme însorită ce ar putea fi urmată de o altă zi însorită, și o probabilitate de 50% de zi ploioasă ce ar putea fi urmată de o altă zi ploioasă. Coloanele pot fi etichetate "vreme însorită" și "ploaie", și rândurile pot fi etichetate în aceeași ordine.

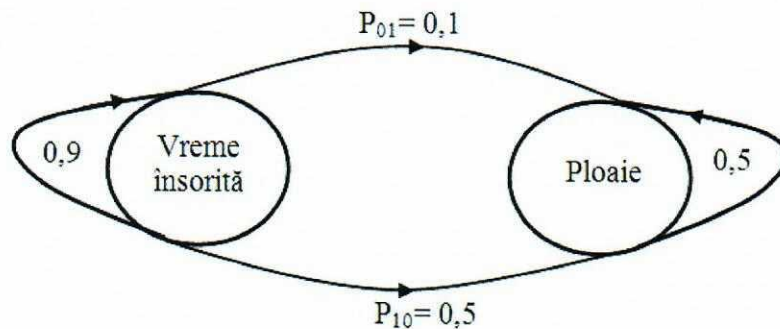


Fig. 7.5. Reprezentarea grafică a matricei de tranziție

$(P)_{ij}$ reprezintă probabilitatea ca, în cazul în care o anumită zi este de tip i , acesta va fi urmată de o zi de tipul j . Se constată că suma rândurilor P este 1 întrucât stările diferite se exclud, sistemul poate fi fie într-o stare, fie în cealaltă, fiecare cu probabilitățile ei de manifestare.

Predicția condițiilor meteorologice în zile consecutive apropiate [9]

Se cunoaște faptul că în ziua 0 este cu siguranță vreme însorită. Acest lucru este reprezentat de un vector în care mențiunea "vreme însorită" este de 100%, iar mențiunea "ploios" este 0%:

$$X(0) = [1 \quad 0]$$

Vremea în ziua 1 poate fi prezisă de:

$$X(1) = X(0)q = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} = [0.9 \quad 0.1]$$

Astfel, există o șansă de 90% ca în ziua 1 ce urmează zilei 0 în care sigur avem vreme însorită să fie, de asemenea, soare.

Vremea în ziua 2 poate fi prezis în același mod:

$$X(2) = X(1)q = [0.9 \quad 1] = [0.86 \quad 0.14]$$

sau

$$X(2) = X(0)q^2 = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}^2 = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} 0.86 & 0.14 \\ 0.7 & 0.3 \end{bmatrix} = [0.86 \quad 0.14]$$

Regulile generale pentru ziua n sunt:

$$X(n) = X(n-1)q$$

sau

$$X(n) = X(0)q^n$$

Predicția condițiilor meteorologice în zile mai îndepărtate

Previziunile pentru vremea din zilele mai îndepărtate sunt din ce în ce inexacte și tind spre un vector de tip stare de echilibru. Acest vector reprezintă probabilitățile de vreme însorită și ploioasă în toate zilele, și este independent de vremea inițială.

Vectorul de stare de echilibru este definit ca:

$$v = \lim_{n \rightarrow \infty} (x)^n$$

ce converge la un vector strict pozitiv numai dacă q este o matrice de tranziție regulată (atunci când există cel puțin un q_{ij} cu toate intrările nenule).

Având în vedere că v este independent de condițiile inițiale, acesta trebuie să fie neschimbat atunci când este transformat de q. Acest lucru face un vector propriu (cu valoare proprie 1), ceea ce înseamnă că acesta poate fi derivat din q. Pentru exemplul de mai sus avem:

$$q = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$v \cdot q = v = v \cdot I$$

(v este independent de q), cu

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$v(q - I) = v \left(\begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) = v \left(\begin{bmatrix} -0.1 & 0.1 \\ 0.5 & -0.5 \end{bmatrix} \right)$$

$$\begin{bmatrix} v_1 & v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1 & 0.1 \\ 0.5 & -0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ca urmare, $-0.1v_1 + 0.5v_2 = 0$ și, deoarece acesta este un vector de probabilitate știm că $v_1 + v_2 = 1$.

Rezolvarea acestei perechi de ecuații simultane dă distribuția stării de echilibru:

$$\begin{bmatrix} v_1 & v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.833 & 0.167 \end{bmatrix}$$

În concluzie, pe termen lung, aproximativ 83,3% din zile vor fi însorite.

7.7.2. Un model de predicție a funcționării unui sistem mecanic format din trei componente

Un sistem mecanic format din trei **componente**, poate avea următoarele stări:

- toate componentele sunt funcționale (starea 3);
- doar două componente funcționale (starea 2);
- o componentă funcțională (starea 1);
- nici o componentă nu este funcțională (starea 0).

Sistemul este, **inițial**, complet funcțional și are capacitatea să recupereze, parțial sau total, funcționalitatea.

Probabilitatea p_{30} , spre exemplu, reprezintă probabilitatea ca toate componentele să fie defecte la un moment dat.

Analog, probabilitatea p_{02} , spre exemplu, reprezintă probabilitatea reparării simultane a două componente, din cele trei ale sistemului, după același interval de timp t , atunci când sistemul **format din trei componente** a fost complet nefuncțional.

Pentru fiecare stare a lanțului Markov *din figura 7.6* se pot scrie relațiile:

$$p_{33} + p_{32} + p_{31} + p_{30} = 1,$$

$$p_{23} + p_{22} + p_{21} + p_{20} = 1,$$

$$p_{13} + p_{12} + p_{11} + p_{10} = 1,$$

$$p_{03} + p_{02} + p_{01} + p_{00} = 1.$$

Aceste relații arată completitudinea sistemului de evenimente asociate fiecărei stări, în parte, din lanțul Markov.

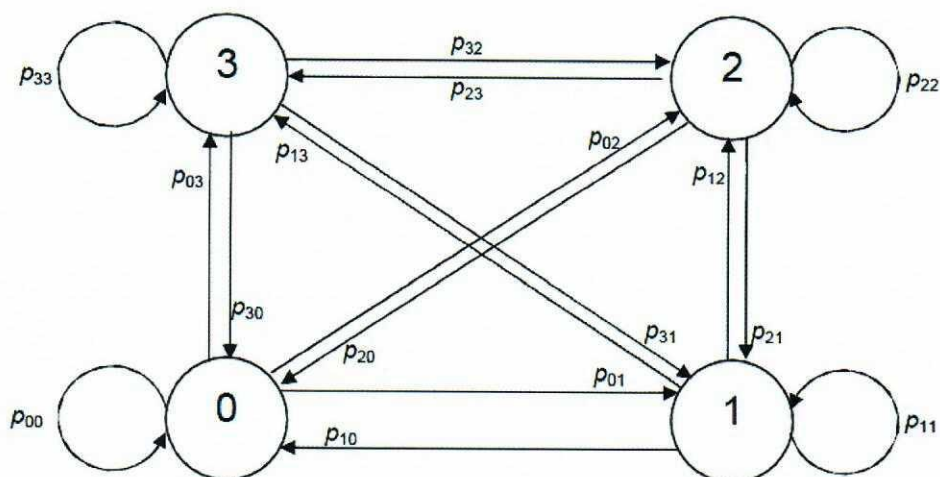


Fig. 7.6. Lanțul Markov asociat unui sistem format din trei componente având capacitatea unei recuperări dinamice

Probabilitatea ca sistemul să fie complet funcțional la momentul n spre exemplu, poate fi scrisă astfel:

$$P_3(n) = p_{33}P_3(n-1) + p_{23}P_2(n-1) + p_{13}P_1(n-1) + p_{03}P_0(n-1) \quad (7.9)$$

În (7.9) s-a notat, spre exemplu, prin $P_2(n-1)$ probabilitatea ca sistemul să funcționeze cu două unități din trei la momentul $n-1$, iar prin p_{23} s-a notat probabilitatea recuperării unității nefuncționale pe durata momentului $n-1$.

Similar, probabilitățile ca la momentul n sistemul să funcționeze cu 2, 1 sau niciuna dintre unitățile sale funcționale sunt:

$$P_2(n) = p_{32}P_3(n-1) + p_{22}P_2(n-1) + p_{12}P_1(n-1) + p_{02}P_0(n-1) \quad (7.10)$$

$$P_1(n) = p_{31}P_3(n-1) + p_{21}P_2(n-1) + p_{11}P_1(n-1) + p_{01}P_0(n-1) \quad (7.11)$$

$$P_0(n) = p_{30}P_3(n-1) + p_{20}P_2(n-1) + p_{10}P_1(n-1) + p_{00}P_0(n-1) \quad (7.12)$$

Relațiile anterioare se pot rescrie matricial astfel:

$$\begin{bmatrix} P_3(n) \\ P_2(n) \\ P_1(n) \\ P_0(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{33} & p_{23} & p_{13} & p_{03} \\ p_{32} & p_{22} & p_{12} & p_{02} \\ p_{31} & p_{21} & p_{11} & p_{01} \\ p_{30} & p_{20} & p_{10} & p_{00} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_3(n-1) \\ P_2(n-1) \\ P_1(n-1) \\ P_0(n-1) \end{bmatrix} \quad (7.13)$$

Se notează în (7.13) vectorul coloană din stânga prin:

$$\Pi_n = \begin{bmatrix} P_3(n) \\ P_2(n) \\ P_1(n) \\ P_0(n) \end{bmatrix} \quad (7.14)$$

Matricea pătrată a sistemului din (7.14) se notează:

$$A = \begin{bmatrix} p_{33} & p_{23} & p_{13} & p_{03} \\ p_{32} & p_{22} & p_{12} & p_{02} \\ p_{31} & p_{21} & p_{11} & p_{01} \\ p_{30} & p_{20} & p_{10} & p_{00} \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

Atunci relația (7.13) se rescrie astfel:

$$\Pi_n = A \cdot \Pi_{n-1} \quad (7.16)$$

Explicitând expresia (7.16)) rezultă:

$$\Pi_n = A^n \cdot \Pi_0 \quad (7.17)$$

Vectorul inițial Π_0 arată astfel:

$$\Pi_n = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.18)$$

Vectorul coloană inițial arată astfel deoarece, la momentul zero, sistemul se presupune că era complet funcțional.

Pentru o istorie suficient de lungă a funcționării sistemului tri-component considerat, acesta intră într-o stare staționară caracterizată printr-o anumită distribuție a probabilităților stărilor acestuia.

$$\Pi = A \cdot \Pi \quad (7.19)$$

Această distribuție stabilește probabilitățile sistemului de a se găsi în cele patru stări posibile. Un vector coloană de probabilități Π care satisface (7.19) este alcătuit din valori proprii ale matricei A .

Determinarea valorilor proprii ale unei matrice poate fi o sarcină laborioasă. Dintr-un punct de vedere pragmatic vectorul coloană Π poate fi aproximat printr-un calcul iterativ aplicând expresia (7.17). Calculul poate fi oprit de îndată ce:

$$|\Pi_{n+1} - \Pi_n| \leq \varepsilon \quad (7.20)$$

În (7.20) constanta pozitivă ε poate fi aleasă convenabil, în raport cu precizia urmărită, în calculul probabilităților staționare ale lanțului Markov respectiv. Uzual, valori ale erorii ε de ordinul $0 < \varepsilon < 10^{-6}$ sunt satisfăcătoare în marea majoritate a situațiilor.

7.7.3. Funcționarea unui sistem format dintr-un calculator, o imprimantă și un plotter

Un calculator, ce are cuplate o imprimantă și un plotter, poate fi privit ca un sistem care se poate afla într-una din următoarele stări:

- S1 - calculatorul, imprimanta și plotter-ul sunt funcționale;
- S2 - imprimanta este defectă și pot fi rulate numai programe utilizând plotter-ul;
- S3 - plotter-ul este defect și pot fi rulate numai programe utilizând imprimanta;
- S4 - calculatorul este defect sau imprimanta și plotter-ul sunt defecte, sistemul nemaiputând fi utilizat.

În momentul inițial, sistemul se află în starea S1 și este controlat la momente fixate de timp, t_1 , t_2 , t_3 . Sistemul poate fi modelat cu un lanț Markov cu trei pași (momentele de timp după cele trei controale). Graficul asociat este reprezentat în figura 7.7.

Se cer probabilitățile stărilor sistemului după cele trei controale. Nu se iau în considerare eventuale acțiuni de reparare.

Soluție: Avem următoarele probabilități de tranziție:

$$p_{12} = 0,1;$$

$$p_{13} = 0,2;$$

$$p_{14} = 0,3;$$

$$p_{11} = 1 - p_{12} - p_{13} - p_{14} = 1 - 0,1 - 0,2 - 0,3 = 0,4;$$

$$p_{21} = 0;$$

$$p_{23} = 0;$$

$$p_{24} = 0,2;$$

$$p_{22} = 1 - p_{21} - p_{23} - p_{24} = 1 - 0,2 = 0,8;$$

$$p_{31} = 0;$$

$$p_{32} = 0;$$

$$p_{34} = 0,1;$$

$$p_{33} = 1 - p_{31} - p_{32} - p_{34} = 1 - 0,1 = 0,9;$$

$$p_{41} = 0;$$

$$p_{42} = 0;$$

$$p_{43} = 0;$$

$$p_{44} = 1 - p_{41} - p_{42} - p_{43} = 1.$$

Probabilitățile inițiale ale stărilor sunt:

$$p_1(0) = 1, p_2(0) = p_3(0) = p_4(0) = 0.$$

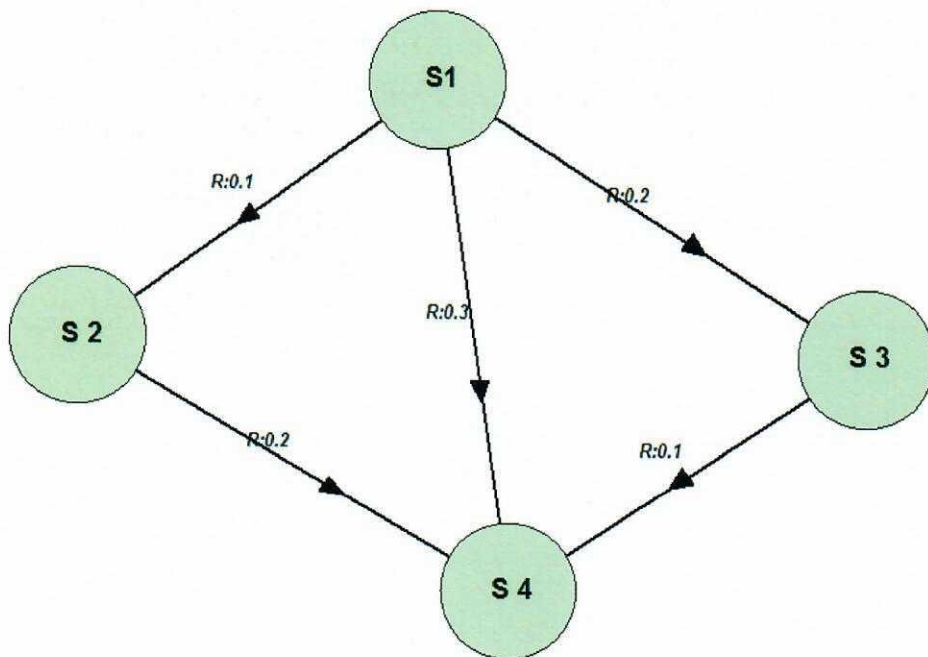


Fig. 7.7. Graful asociat lanțului Markov.

Aplicăm formula recurentă:

$$p_i(k) = \sum_{j=1}^n p_j(k-1) \cdot P_{ji}$$

Pentru timpul t_1 vom obține ($i=1 \div 4$ stări, $k=1$, $j=1 \div 4$, 3 legături posibile + starea proprie):

$$p1(1) = p1(0) \times P11 + p2(0) \times P21 + p3(0) \times P31 + p4(0) \times P41 = 1 \times 0,4 = 0,4;$$

$$p2(1) = p1(0) \times P12 + p2(0) \times P22 + p3(0) \times P32 + p4(0) \times P42 = 1 \times 0,1 = 0,1;$$

$$p3(1) = p1(0) \times P13 + p2(0) \times P23 + p3(0) \times P33 + p4(0) \times P43 = 1 \times 0,2 = 0,2;$$

$$p4(1) = p1(0) \times P14 + p2(0) \times P24 + p3(0) \times P34 + p4(0) \times P44 = 1 \times 0,3 = 0,3.$$

$$\text{Verificare: } p1(1) + p2(1) + p3(1) + p4(1) = 1.$$

Pentru timpul t_2 vom obține ($k=2$):

$$p1(2) = p1(1) \times P11 + p2(1) \times P21 + p3(1) \times P31 + p4(1) \times P41 = 0,4 \times 0,4 = 0,16;$$

$$p2(2) = p1(1) \times P12 + p2(1) \times P22 + p3(1) \times P32 + p4(1) \times P42 = 0,4 \times 0,1 + 0,1 \times 0,8 = 0,12;$$

$$p3(2) = p1(1) \times P13 + p2(1) \times P23 + p3(1) \times P33 + p4(1) \times P43 = 0,4 \times 0,2 + 0,2 \times 0,9 = 0,26;$$

$$p4(2) = p1(1) \times P14 + p2(1) \times P24 + p3(1) \times P34 + p4(1) \times P44 = 0,4 \times 0,3 + 0,1 \times 0,2 + 0,2 \times 0,1 + 0,3 \times 1 = 0,46.$$

$$\text{Verificare: } p1(2) + p2(2) + p3(2) + p4(2) = 0,16 + 0,12 + 0,26 + 0,46 = 1.$$

Pentru timpul t_3 vom obține ($k=3$):

$$p1(3) = p1(2) \times P11 + p2(2) \times P21 + p3(2) \times P31 + p4(2) \times P41 = 0,16 \times 0,4 = 0,064;$$

$$p2(3) = p1(2) \times P12 + p2(2) \times P22 + p3(2) \times P32 + p4(2) \times P42 = 0,16 \times 0,1 + 0,12 \times 0,8 = 0,112;$$

$$p3(3) = p1(2) \times P13 + p2(2) \times P23 + p3(2) \times P33 + p4(2) \times P43 = 0,16 \times 0,2 + 0,26 \times 0,9 = 0,226;$$

$$p4(3) = p1(2) \times P14 + p2(2) \times P24 + p3(2) \times P34 + p4(2) \times P44 = 0,16 \times 0,3 + 0,12 \times 0,2 + 0,26 \times 0,1 + 0,46 \times 1 = 0,558.$$

$$\text{Verificare: } p1(3) + p2(3) + p3(3) + p4(3) = 1.$$

Acceași situație rezolvată cu ITEM Toolkit

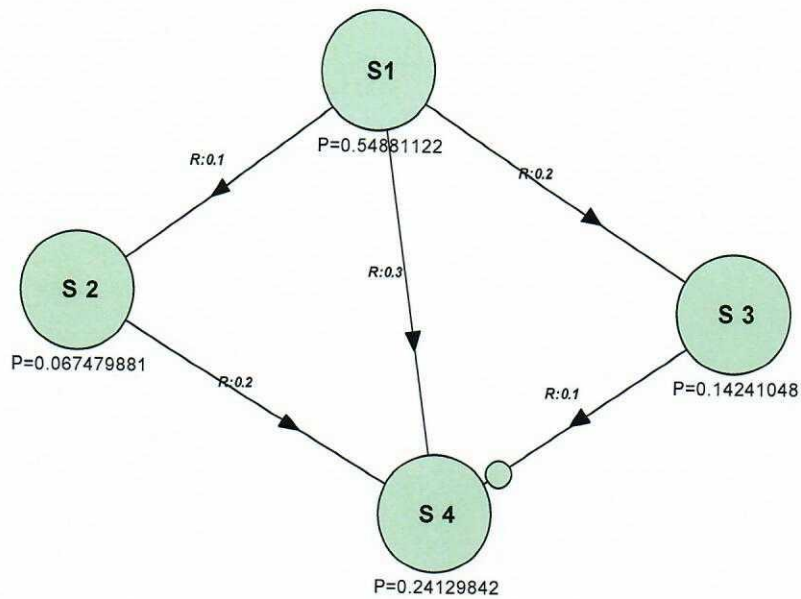


Fig. 7.8. Graful asociat lanțului Markov rezolvat prin Item-Toolkit [10]

Tab. 7.2. Rezultate obținute în urma rulării problemei în programul Item-Toolkit [10]

Summary View		
	Parameter	Value
1	Unavailability Q	0.24129842
2	Mean Unavailability	0.12956964
3	Failure Frequency W	0.19238039
4	CFI	0.25356529
5	Expected Failures	0.24129842
6	Unreliability	0.24129842
7	Total Down Time TDT	0.12956964
8	Availability A	0.75870158
9	Mean Availability	0.87043036
10	Repair Frequency	0.0
11	CRI	0.0
12	Expected Repairs	0.0
13	Reliability	0.75870158
14	Total Up Time TUT	0.87043036

BIBLIOGRAFIE

- [1] ***, Chapter 11, Markov Chains, <https://www.dartmouth.edu/~chance/.../Chapter11.pdf>
- [2] Gh. Mihoc, C.Bergthaller, V.Urseanu, Procese stochastice, elemente de teorie si aplicatii, Ed.Stiintica si pedagogica. 1978.
- [3] I.Gh.Sabac, Matematici Speciale 2. Ed. Tehnica. 1977.

- [4] E. Gutulan, Lanturi si sisteme de asteptare markoviene: Elemente teoretice si aplicatii. Ed Universitatea tehnica a moldovei Chisinau 2010.
- [5] A. Tolver, An Introduction to Markov Chains, Lecture Notes For Stochastic Processes, 2016.
- [6] Modelare si simulare Seminar 3,
<http://www.tc.etc.upt.ro/teaching/ms-ap/MS%20SEMINAR%207.pdf>
- [7] Platforma de e-learning si curriculara e-content pentru invatamantul superior ethnic. Ingineria calculatoarelor – O abordare din punct de vedere fiabilistic a stiintei calculatoarelor- Lanturi Markov
http://andrei.clubcisco.ro/cursuri/f/f-sym/3ic/IC_6.pdf
- [8] <https://web.stanford.edu/class/stat217/New12.pdf>
- [9] An introduction to Markov chains, math.mit.edu/~rothvoss/18.../1-Pratiksha-presentation1.pdf
- [10] Markov Analysis Software, www.itemsoft.com/markov

CAPITOLUL 8. DETECTAREA, IDENTIFICAREA ȘI IZOLAREA DEFECȚIUNILOR ÎN SISTEMELE DINAMICE

-
- 8.1. Noțiunea de defecțiune
 - 8.2. Diagnosticarea defectelor
 - 8.3. Modelarea matematică a unui traductor sau a elementului de execuție defect
 - 8.4. Formularea problematicei detectării, izolării și identificării defecțiunilor
 - 8.5. Atributele unui sistem de diagnosticare a defecțiunilor
 - 8.6. Redundanța analitică utilizată pentru detectarea și izolarea defecțiunilor
 - 8.7. Abordarea hibridă la DIID – detectarea, identificarea și izolarea defecțiunilor apărute în sistemele dinamice
 - 8.8. Robustețea DID la incertitudini
-

8.1. Noțiunea de defecțiune

Încetarea aptitudinii unui sistem, aparat, instalație, produs, etc. de a-și îndeplini funcția specificată, se numește defectare, cedare sau cădere. Cauzele defectării pot fi foarte variate, reprezentând circumstanțe legate de proiectare, fabricație sau utilizarea incorectă a produsului/sistemului, ce conduc la o comportarea acestuia în afara parametrilor prevăzuți în caietul de sarcini.

Defectarea poate fi: *inerentă*, atunci când aceasta provine de la slăbiciuni proprii ale sistemului sau de la elemente ale acestuia, *produsă din exterior*, în condițiile în care solicitările reale nu depășesc posibilitățile admisibile ale componentelor sistemului, sau datorate *utilizării necorespunzătoare*, atunci când cedarea provine ca urmare a unor solicitări ce depășesc posibilitățile admisibile ale produsului - acest tip de defecte nu caracterizează sistemul și nu se iau în considerație la calculul fiabilității.

Problema detectării și izolării defecțiunilor (determinarea locului în care s-a produs defectul/cedarea) este una complexă. Necesitatea obținerii unor performanțe în diagnoză, fără instalarea unor echipamente redundante sau dedicate, scumpe, forțează dezvoltarea programelor de diagnoză prin adoptarea de tehnici disponibile și descoperirea de informații “ascunse” în funcționare. Realitatea sistemelor industriale oferă inginerului însărcinat cu implementarea funcțiilor de monitorizare, modele slabe, inadecvate, bazate pe lipsa redundanței, număr insuficient de măsuri, distorsiuni în datele achiziționate, perturbații nemodelate, incertitudini pe diverse paliere, variabilități ale parameterilor funcționali, etc..

O defecțiune se definește ca: “o deviație nepermisă a unei proprietăți caracteristice ce duce la inabilitatea îndeplinirii scopului propus”.

Pentru problema detectării și izolării defecțiunilor în sistemele dinamice au fost propuse mai multe abordări incluzând utilizarea *arborilor de defectare*, (cap. 5), filtre Kalman, observatori, tehnici de paritate a spațiului, filtre de detecție, etc.

Toate metodele de detectare a defecțiunilor utilizează date redundante (suplimentare) obținute fie direct, când există două sau mai multe traductoare pentru măsurarea aceleași variabile a procesului, fie analitic, când o variabilă a unui proces este determinată printr-un model matematic. Aceste relații de redundanță pot fi exploatate pentru a genera *semnale reziduale*. În condiții normale de funcționare, valorile semnalelor reziduale sunt mici dar pot afișa variații distincte la apariția defecțiunii. Procesul de diagnosticare a defectului constă în trei etape, [1]:

a) *Procesul de modelare* (estimarea stării, estimarea parametrilor, teoria deciziei statistice, etc.);

b) *Generarea semnalelor reziduale*. Acestea sunt independente de măsurătorile reale dar, reflectă efectele modelării incerte, zgomot și defecte ale componentelor. În absența defectelor din sistem și fără erori mari de modelare, semnalele reziduale **nu prezintă abateri**, rezultând o apropiere între măsurători și detecția bazată pe modelare;

c) *Analiza semnalelor reziduale*. Datorită efectelor zgomotului și a modelului incert, semnalele reziduale trebuie examinate cu atenție pentru a permite determinarea prezenței unor defecțiuni (**detectare**), a indica tipul defecțiunii (**identificare**) și precizarea componentelor care prezintă defecte (**izolare**).

■ Definiții conexe

- Defecțiune: o abatere nepermisă a cel puțin unei caracteristici sau a unui parametru al sistemului raportate la condițiile acceptabile/obișnuite/standard de funcționare.
- Cedarea: întreruperea permanentă a capacității unui sistem de a îndeplini o funcție necesară în condiții de operare specifice.
- Perturbarea: o intrare necunoscută (și necontrolată) ce acționează asupra sistemului, care duce la o abatere de la starea actuală.
- Simptom: o schimbare de la comportamentul normal a unei mărimi observabile, adică un efect observabil al unei defecțiuni.
- Fiabilitate: capacitatea sistemului de a îndeplini o funcție necesară în condiții prevăzute.
- Siguranța: capacitatea sistemului de a nu periclita persoanele, echipamentul sau mediul înconjurător.
- Disponibilitatea: probabilitatea ca un sistem sau echipament să funcționeze în mod satisfăcător în orice moment.
- Mentenabilitate: totalitatea acțiunilor cu privire la necesitățile de reparare și intervenție, raportate la ușurința cu care poate fi adus sistemul la starea de funcționare normală, inițială.

8.2. Diagnosticarea defecțiunilor

O defecțiune cauzează o *abatere* de la funcționarea normală a sistemului dar poate să nu conducă neapărat la o cădere totală a acestuia. Sistemul poate continua să funcționeze la un nivel mai scăzut, motiv pentru care, cedarea totală se poate produce dacă defectul nu este detectat la timp. În aceste condiții, sarcinile unui sistem de monitorizare și diagnosticare a defecțiunilor sunt, [1]:

- *detectarea defecțiunii*: o indicație binară care indică dacă defecțiunii se manifestă sau nu;
- *identificarea defecțiunii*: precizarea tipului, mărimii, valorilor caracteristice ale defecțiunii precum și a influenței acesteia în cadrul funcționării sistemului;

• *izolarea defectului*, reprezintă a treia sarcină a procesului de diagnosticare a defecțiunii; însemnând detectarea componentei, a traductorului, a senzorului sau a elementului de execuție care prezintă defect;

• *sinteza comenzilor* în condiționarea defectului care trebuie să asigure funcționarea normală a sistemului până la următoarea intervenție de aducere în parametri prescriși (posibilă într-o mai mică măsură).

Problema detectării și izolării defectului este prezentată în figura 8.1.

În general, modelul matematic al unui proces are următoarea expresie:

$$y = f(u, n, \theta, x) \quad (8.1)$$

unde s-a notat cu:

y – variabile de ieșire măsurabile;

u – variabile de intrare măsurabile;

θ – parametri procesului din măsurabili/nemăsurabili;

n – semnale nemăsurabile de perturbații (preluate din proces și din sistemele de achiziție și control);

x – variabilele stării interne (parțial măsurabile și parțial nemăsurabile).

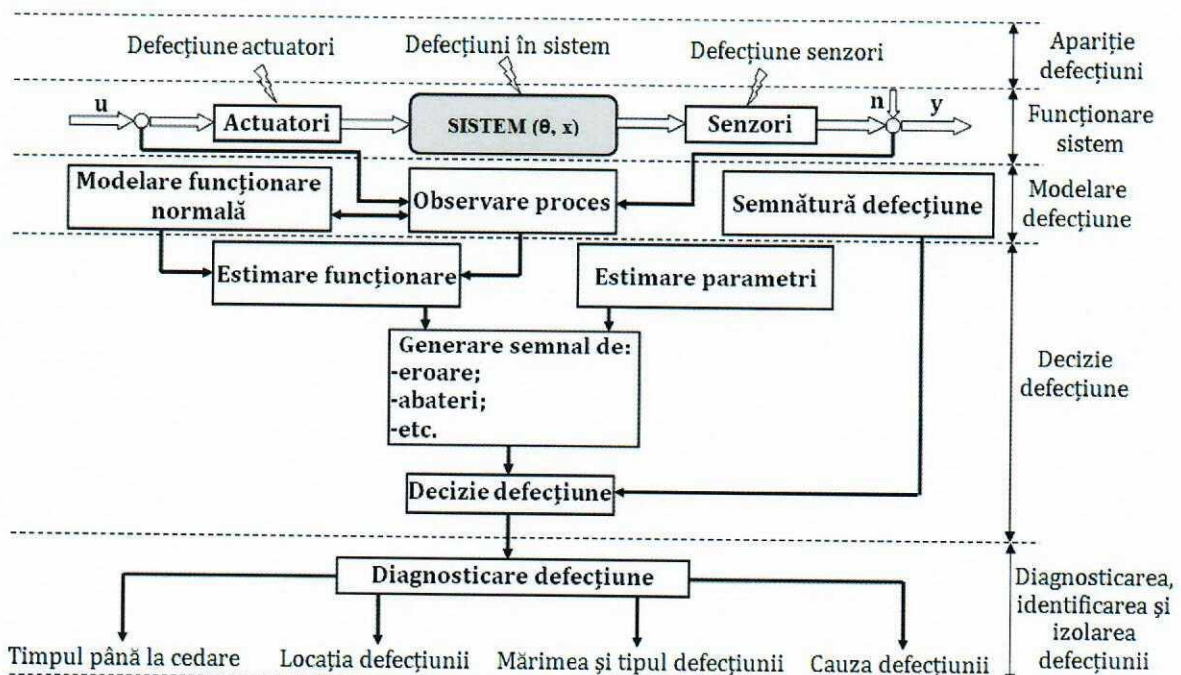


Fig. 8.1. Structura generalizată a modelului bazat pe metodele de detectare, identificare și izolare a defectelor [1]

8.3. Modelarea matematică a unui traductor sau a elementului de execuție defect

În figura 8.2 este prezentat sistemul generalizat cu toate posibilitățile de defect, [1]. Semnificația variabilelor este următoarea:

- u_c – intrările dorite pentru control;
- u_d – defecte la actuatori;

- u_r - acționarea instalației (intrare reală);
- y_c - ieșirea actuală a instalației;
- y_d - defectele la senzori;
- y_r - ieșirea măsurată a instalației.

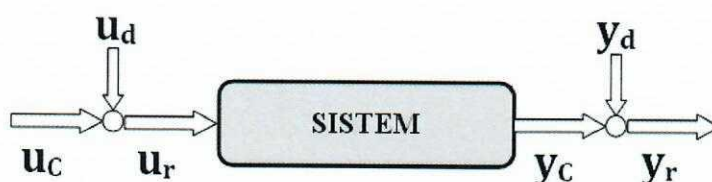


Fig. 8.2. Modelul analitic al traductoarelor și elementelor de execuție defecte [1]

Considerăm două tipuri de defecțiuni: defecțiuni independente ale senzorilor și defecțiuni independente ale actuatorilor (dispozitivelor de acționare). Este posibilă modelarea defecțiunilor la dispozitivele de acționare sau la senzori ca semnale adiționale, așa cum indică *figura 8.2*. Se presupune că $u_c(t)$ este intrarea corectă (dorită) în sistem și $u_r(t)$ este intrarea reală (actuală), modificată de semnalul datorat defecțiunilor de la actuatori, $u_d(t)$. Printr-o selecție corectă a semnalelor $u_{di}(t)$ putem reprezenta diferite defecțiuni pentru dispozitivul de acționare “i”. În particular, dacă acesta se blochează în poziția inițială neproducând nici o ieșire, atunci $u_{di}(t) = -u_{ci}(t)$. Dacă, din diferite motive, apare o abatere b_i pentru dispozitivul de acționare respectiv, atunci $u_{di}(t) = b_i$. În final, dacă dispozitivul de acționare “i” este blocat la o valoare constantă b_i , atunci $u_{di}(t) = b_i - u_{ci}(t)$. Defecțiunile multiple pot fi modelate specificând faptul că, mai multe elemente ale lui $u_d(t)$ trebuie să fie diferite de zero.

Defecțele senzorilor pot fi reprezentate într-o manieră asemănătoare pe baza unei alegeri corespunzătoare a semnalelor $y_{di}(t)$. Variabilele $u_c(t)$ și $y_r(t)$ reprezintă semnalele externe disponibile pentru diagnosticarea defecțiunilor, iar $u_r(t)$ și $y_c(t)$ sunt semnale interne sau inaccesibile.

8.4. Formularea problematicei detectării, izolării și identificării defecțiunilor

În acest subcapitol este formulată problema detectării, izolării și identificării defecțiunilor într-un sistem dinamic, care, în esență și la modul general, este neliniar. Se consideră un sistem dinamic, descris de următoarea reprezentare neliniară discretă a stării ca fiind [2]:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) = \Gamma(x_k)w_k; \quad y_k = h(x_k) + v_k \quad (8.2)$$

unde $x_k \in \mathbb{R}^n$ este vectorul de stare al sistemului, $f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^r \rightarrow \mathbb{R}^n$, $h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ sunt funcții netede neliniar vectoriale (sau câmpuri vectoriale) pe domeniile respective, $u_k \in \mathbb{R}^r$ este vectorul la intrare de control, $y_k \in \mathbb{R}^m$ este vectorul de ieșire al sistemului, iar w_k și v_k reprezintă perturbații ale sistemului și, respectiv, zgomot de măsurare.

Câmpurile vectorilor f și h reprezintă ecuațiile dinamice și de ieșire ale modelului atribuit sistemului. Funcția dependentă de stare $\Gamma(\cdot)$ reprezintă, în esență, canalul prin care se aplică perturbațiile externe sistemului. În multe sisteme această funcție este sub forma unei matrice. Se presupune că toate stările sistemului sunt disponibile pentru măsurare. Se presupune, de asemenea, că perturbațiile și zgomotul de măsurare sunt semnale delimitate, adică:

$$\|w_k\| \leq D_{max}, \|v_k\| \leq N_{max} \quad \forall k \in N \quad (8.3)$$

În ipoteza de măsurare totală a stării sistemului, ecuația pentru mărimile ieșire din (8.2) poate fi redefinită ca:

$$y_k = C \cdot x_k + v_k,$$

unde C este o matrice de mărime $n \times n$.

În acest capitol, ne ocupăm de diagnosticarea defecțiunilor care apar în componentele unui sistem dinamic neliniar cu buclă deschisă. Astfel, chiar dacă performanța tehnicii DIID (detectarea, izolarea și identificarea defecțiunilor,) propuse va fi evaluată într-o setare de buclă închisă operațională, presupunem că nu se pot produce defecțiuni în controlerul de sistem. Există două motive principale pentru admiterea acestei ipoteze. În primul rând, sistemele moderne de monitorizare sunt controlate de calculator și, prin urmare, sunt mai fiabile și mai puțin predispuse la erori. În al doilea rând, erorile care pot apărea în software-ul controlerului sunt gestionate, de obicei, folosind o metodă complet diferită de cele utilizate pentru localizarea defecțiunilor, care sunt, în mare parte, dezvoltate de cercetătorii din comunitatea științelor informatice. În ceea ce privește sistemul cu buclă deschisă, acesta poate fi descompus în trei părți: senzori, actuatori și dinamica sau procesul sistemului.

Figura 8.3 prezintă această descompunere, care este folosită adesea și în practică. După cum se poate observa din această figură, pot apărea defecțiuni în oricare dintre cele trei componente ale sistemului cu buclă deschisă. Mai mult, dinamica sistemului și măsurătorile provenite de la senzori sunt întotdeauna afectate de perturbații externe ale sistemului (sau zgomote de proces) și de zgomote de măsurare. Un sistem fiabil de diagnosticare a defecțiunilor ar trebui să poată distinge între întreruperile provocate de perturbațiile sistemului și cele datorate zgomotului măsurătorilor. Mai exact, sistemul de diagnosticare a defecțiunilor trebuie să fie **robust** pentru aceste incertitudini, rămânând în același timp **sensibil** la defecțiunile reale. Robustețea unui sistem DIID la diferite surse de incertitudine și variabilitate este de o importanță majoră.

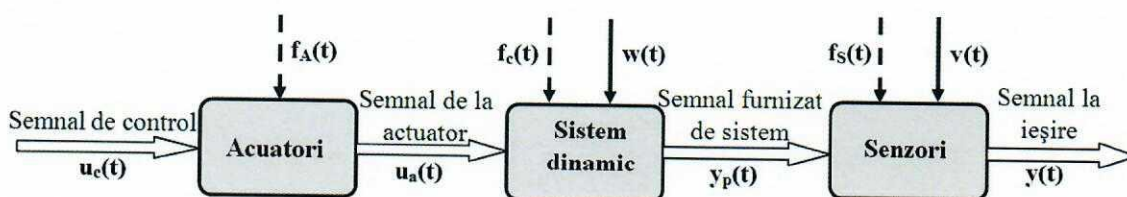


Fig. 8.3. Descompunerea componentelor sistemului de tip buclă deschisă și posibila apariție a defecțiunilor [3]

În cele ce urmează, vom descrie diferitele surse de defecte în sistemul cu buclă deschisă.

(i) *Defecțiuni ale senzorilor.* Senzorii reprezintă interfața de ieșire a unui sistem către exterior și transmit informații despre comportamentul unui sistem și stările sale interne. Prin urmare, defecțiunile senzorilor pot determina o degradare semnificativă a performanței tuturor sistemelor sau proceselor decizionale care depind de integritatea datelor pentru luarea deciziilor. Astfel de sisteme includ, dar nu se limitează la, sistemele de control al feedback-ului, sistemele de control al

siguranței, sistemele de control al calității, sistemele de navigație, sistemele de supraveghere și recunoaștere, sistemele de estimare a stării, sistemele de optimizare și, în special, sistemele de monitorizare a stării și diagnosticare a defecțiunilor. De exemplu, într-un sistem de control de tip feedback, senzorii sunt utilizați, fie pentru a măsura direct stările sistemului, fie pentru a genera estimări de stare pentru legea de control al feedback-ului. Astfel, prezența unor defecte în senzori poate deteriora estimările de stare și, în consecință, poate duce la un control ineficient și/sau inexact.

Defecte/defecțiunile comune ale senzorilor includ: (a) iregularități; (b) abateri; (c) degradarea performanței (sau pierderea acurateței); (d) blocarea senzorului; (e) defecțiune de calibrare [4].

Figura 8.4 [3] prezintă efectul defecțiunilor menționate mai sus asupra măsurătorilor din sistem.

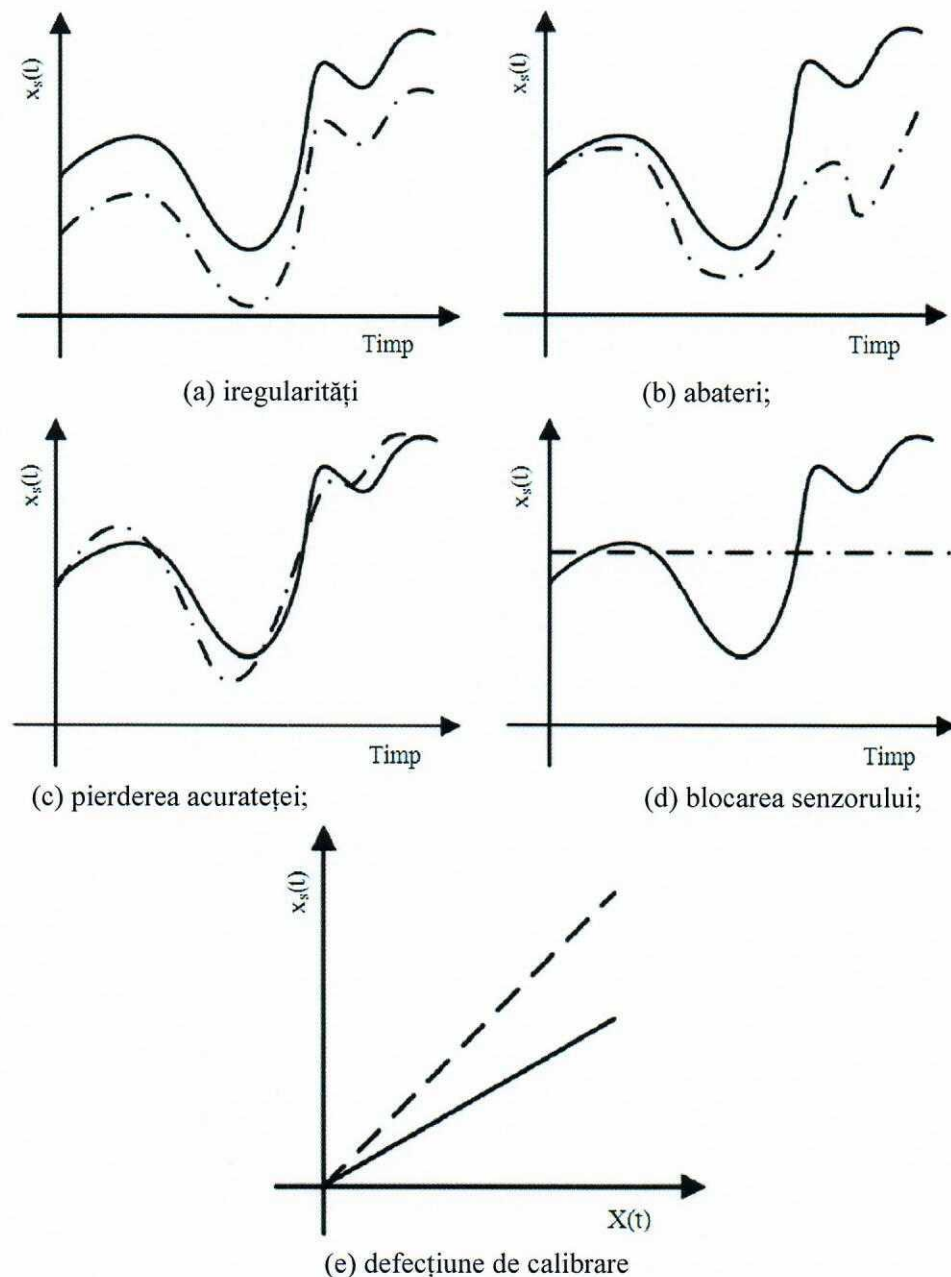


Fig. 8.4. Efectul diferitelor defecțiuni ale senzorilor asupra măsurătorilor din sistem [5]

Reprezentarea matematică a defecțiunilor senzorilor de mai sus este următoarea [4]:

$$y_i(t) = \begin{cases} x_i(t), \forall t \geq t_0, & \text{fără defecțiune} \\ x_i(t) + b_i, b_i(t) = 0, b_i(t_{Fi}) \neq 0, & \text{irregularități} \\ x_i(t) + b_i, |b_i(t)| = c_i(t), 0 < c_i \ll 1, \forall t \geq t_{Fi}, & \text{abateri} \\ x_i(t) + b_i, |b_i(t)| < \bar{b}_i, b_i(t) \in L^\infty, \forall t \geq t_{Fi}, & \text{pierderea acurateței} \\ x_i(t_{Fi}), \forall t \geq t_{Fi}, & \text{blocare senzor} \\ k_i(t)x_i, 0 < \bar{k} \leq k_i(t) < 1, \forall t \geq t_{Fi}, & \text{defecțiuni de calibrare} \end{cases} \quad (8.4)$$

unde t_{Fi} reprezintă timpul până la apariția defecțiunii pe senzorul i iar b_i indică coeficientul său de precizie astfel încât $b_i \in [-\bar{b}_i, \bar{b}_i]$ unde $\bar{b}_i > 0$. În plus, se observă că, $k \in [\bar{k}_i, 1]$, unde $\bar{k}_i > 0$ reprezintă eficacitatea minimă a senzorului. Putem reprezenta cazurile de mai sus, cu excepția cazului de blocare, cu următorul model matematic general:

$$y = k_m x + B \quad (8.5)$$

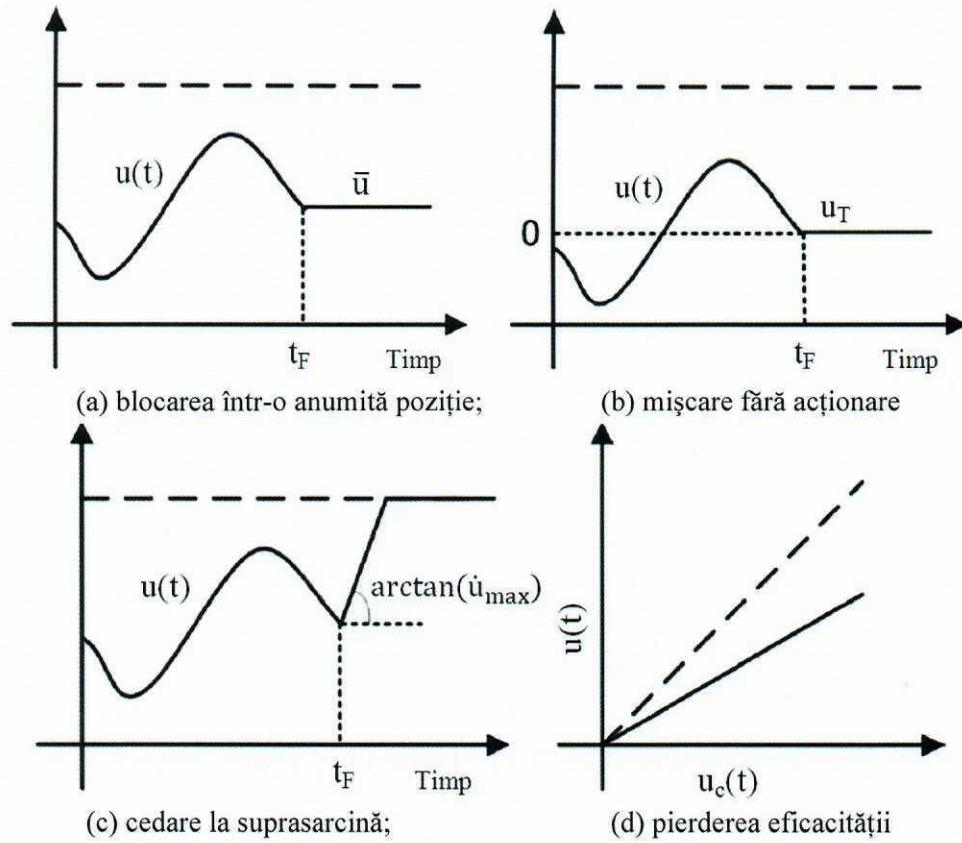
unde k_m este o matrice diagonală pozitivă ale cărei elemente variază în cadrul lui $\bar{k}_i$, iar elementele vectorului B variază în interiorul lui $[-\bar{b}_i, \bar{b}_i]$.

(ii) *Defecțiuni ale mecanismelor de acționare (actuatoarelor).* În multe sisteme electromecanice, semnalele de verificare de la controler (de exemplu, un microprocesor sau un microcontroler) nu pot fi aplicate direct în sistem. Sunt necesare servomotoare pentru a transforma semnalele de comandă în semnale de acționare adecvate, cum ar fi cuplurile și forțele de antrenare a sistemului.

Actuatorii sunt, prin urmare, și elemente de control ale unui sistem. Astfel, consecințele apariției anomaliilor în dispozitivele de acționare ale sistemului pot varia de la un consum mai mare de energie (datorită unei erori inițiale) până la pierderea totală a controlului (datorită unei cedări totale a unui actuator).

Defectele actuatorului sunt, de obicei, dependente de tipul acestuia. Cu toate acestea, pentru anumite tipuri de actuatoare au fost identificate defecțiuni comune. De exemplu, defectele comune ale dispozitivelor de acționare ale supapelor de comandă includ scurgeri blocate, închideri și scurgeri anormale. Un alt set comun de defecțiuni de acționare, în special în servomotoare, includ: (a) blocarea într-o anumită poziție; (b) mișcare fără acționare; (c) cedare la suprasarcină; (d) pierderea eficacității [6]. *Figura 8.5* prezintă efectul acestor defecțiuni asupra semnalului de acționare.

În cazul defecțiunilor de blocare într-o anumită poziție, servomotorul "îngheață" la o anumită condiție și nu răspunde la comenzile ulterioare. Mișcarea fără acționare apare atunci când servomotorul "plutește" cu moment de acționare zero și nu contribuie la control. Cedarea la suprasarcină se caracterizează prin faptul că, dispozitivul de acționare se deplasează la limita de poziție superioară sau inferioară, indiferent de comandă. Viteza de răspuns este limitată de anumiți parametri, inclusiv de viteza de acționare. Pierderea eficacității se caracterizează prin scăderea valorilor furnizate de actuator în raport cu valoarea sa nominală.


Fig. 8.5. Tipuri de defecțiuni ale servomotorului [5]

Diferitele tipuri de defecte ale actuatorului pot fi reprezentate matematic prin:

$$u_a^i(t) = \begin{cases} u_c^i(t), & \text{fără defecțiune, cedare} \\ k_i(t)u_c^i(t), & 0 < \varepsilon_i \leq k_i(t) < 1, \forall t \geq t_{Fi}, \text{ pierderea eficacității} \\ 0, & \forall t \leq t_{Fi}, \text{ mișcare fără acționare} \\ u_c^i(t_{Fi}), & \forall t \geq t_{Fi}, \text{ blocarea într-o anumită poziție} \\ u_{i \min} \text{ sau } u_{i \max}, & \forall t \leq t_{Fi}, \text{ cedare la suprasarcină} \end{cases} \quad (8.6)$$

unde $u_a^i(t)$ reprezintă semnalul de acționare (sau ieșirea actuatorului) de la dispozitivul i ; $u_c^i(t)$ este semnalul de comandă și control (sau intrarea actuatorului) la dispozitivul i ; t_{Fi} reprezintă timpul până la apariția defecțiunii pe dispozitivul i ; $k_i(t) \in [\varepsilon_i, 1]$ este coeficientul de eficacitate a servomotorului i cu $\varepsilon_i > 0$ fiind definită eficacitatea minimă; $u_{i \min}$ și $u_{i \max}$ sunt limitele inferioare și superioare ale nivelului de acționare a dispozitivului i .

Putem reprezenta cazurile de mai sus cu următorul model matematic:

$$u_a^i(t) = \delta_i k_i u_c^i(t) + (1 - \delta_i) \bar{u}_i \quad (8.7)$$

unde $\delta_i = 1$, și $k_i = 1$, în absența defecțiunilor/cedărilor, $\delta_i = 1$, $0 < k_i < 1$, la pierderea eficacității și $\delta_i = 0$ pentru celelalte tipuri de defecte cu $\bar{u}_i$ fiind poziția la care mecanismul de acționare este blocat.

(iii) *Defecțiuni ale componentelor.* Defecțiunile componentelor sunt sunt reliefate atunci când unele modificări ale condițiilor din sistem conduc la o evaluare dinamică nevalidă, defectuoasă, a

sistemului. Defecțiunile componentelor depind, de asemenea, de sistemul monitorizat. Câteva exemple includ cedări ale surselor de alimentare (baterii, acumulatori); scurgeri într-un rezervor în sisteme petrochimice sau sisteme de propulsie; deteriorarea suprafeței (deteriorarea aripilor, deteriorarea suprafeței de control), defecțiuni în vehiculele aeriene; defectele lagărelor în echipamentele de rotație (aferele motoarelor de aeronave); probleme de fricțiune datorate deteriorării calității lubrifiantului; ruperea danturii roților dințate și fisurarea cutiei de viteze (elicoptere). Reprezentarea matematică sau modelarea acestor defecte este, uneori, foarte dificilă și, înainte de a construi un model, este necesară o experimentare amplă. Cu toate acestea, defectele componentelor pot fi reprezentate de o schimbare a ecuației de stare a sistemului (adică o schimbare a funcției neliniare f din ecuația (8.2), fiind, fie o modificare parametrică, fie o schimbare structurală/funcțională. Defectele componentelor pot avea consecințe minore până la foarte grave. De exemplu, o defecțiune neașteptată a cutiei de viteze într-un elicopter poate duce la pierderi semnificative atât economice, cât și de viați omenești. Aceste tipuri de defecțiuni apar, de obicei, datorită uzurii componentelor sistemului. Astfel, este extrem de important să se diagnosticheze aceste defecțiuni în stadiile incipiente ale degradării componentelor, pentru a evita consecințele catastrofale.

Diagnosticul precoce al defecțiunilor incipiente ale componentelor, permite efectuarea operațiunilor de întreținere la timp pentru componentele degradate, care poate implica și înlocuirea componentelor. Având în vedere că sursele generale ale defecțiunilor dintr-un sistem dinamic neliniar dat în ecuația (8.2) au fost identificate, problema diagnosticului de defecțiune poate fi stabilită conform indicațiilor prezentate în continuare.

Diagnosticarea defecțiunilor este problema detectării autonome a *prezenței, izolarea locației și identificarea tipului și gravității* oricăruia dintre defecțiunile ce apar într-un sistem. Obiectivul este de a realiza simultan o detecție, izolare și identificare a tuturor defecțiunilor (DIID) într-un cadru unificat. Sunt vizate, în principal, defecțiunile componentelor și cele ale sistemului de acționare, deoarece detecția, izolarea și identificarea exactă a defecțiunilor incipiente în componente și actuatori dintr-un sistem, sunt vitale pentru sporirea fiabilității și siguranței sistemului, precum și pentru prognosticul de defecțiune și efectuarea lucrărilor de întreținere (mentenanță). Mentenanța preventivă, bazată pe informare și expertiză prealabilă, primește o atenție deosebită din partea diferitelor industrii și a producătorilor de echipamente (motoarele de aeronave, lanțul de producție al industriei auto, etc.). Metodele utilizate pentru detectarea precoce a defecțiunilor la actuatori, pot fi extinse cu ușurință și la senzori.

8.5. Atributele unui sistem de diagnosticare a defecțiunilor

Un sistem de diagnosticare a defecțiunilor ar trebui să îndeplinească, în mod ideal, anumite cerințe generale. Unele dintre cele mai importante atribute, dorite ale unui sistem de diagnosticare sunt explicate în cele ce urmează.

- *Detectarea și diagnosticarea timpurie.* Aceasta se referă la capacitatea unui sistem de diagnosticare, detectare și izolare a defecțiunilor incipiente. Detectarea timpurie și izolarea defecțiunilor înainte de a se manifesta pe deplin într-o cedare totală, este de o importanță majoră pentru controlul toleranței la apariția defecțiunilor în sistemele de siguranță, precum și a practicilor de mentenanță. Fiind sensibil la defectele incipiente, sistemul de diagnosticare trebuie să deceleze

între alarmele false și cele provenite de la defecțiune, menținând sistemul în stare de funcționare, ceea ce reprezintă o provocare majoră în ceea ce privește capacitatea de detectare timpurie.

- *Izolabilitatea.* Este capacitatea unui sistem de diagnosticare de a distinge între originea unei defecțiuni reale și alte surse potențiale de defectare sau de a localiza o componentă defectă între diferitele componente ale unui sistem. Capacitatea de izolare este foarte importantă pentru sistemul de mentenanță și, de asemenea, crucială pentru a obține toleranța la defectare, deoarece nu pot fi luate contramăsuri adecvate fără a ști sursa unei anomalii într-un sistem. Izolabilitatea unei defecțiuni nu depinde numai de proiectarea sistemului de diagnosticare ci și de modul în care defecțiunea afectează ieșirile sistemului (observabilitatea defecțiunii). Mai mult, diferitele surse de incertitudine, cum ar fi incertitudinea/erorile de modelare și variabilitățile din sistem, reprezintă o provocare serioasă pentru a obține un grad ridicat de izolare. Mai precis, un sistem de diagnosticare cu un grad ridicat de izolare poate fi prea sensibil la aceste incertitudini/variabilități/erori.
- *Identificarea defecțiunilor* este importantă în vederea estimării severității, a tipului sau naturii defecțiunii. Identificarea defecțiunilor este o cerință majoră pentru prognoza defecțiunilor/cedărilor și, în cele din urmă, pentru mentenanța bazată pe starea sistemului (MSS). Identificarea exactă a defecțiunilor este, de obicei, foarte dificil de realizat din cauza prezenței zgomotului de măsurare, a perturbațiilor sistemului, a incertitudinilor de modelare și, nu în ultimul rând, a interacțiunilor și conexiunilor dintre sursele potențiale de defecte în sistemul monitorizat.
- *Robustețe.* Incertitudinile și variabilitățile sunt inevitabile în aplicațiile practice. Prin urmare, robustețea măsurării zgomotului, a variațiilor din sistem și a incertitudinilor de modelare este unul dintre cele mai importante atribute ale unui sistem de diagnosticare, destinat implementărilor practice. Robustețea îmbunătățește esențial fiabilitatea și eficacitatea sistemului de diagnosticare
- *Identificarea noutăților apărute în sistem.* Instrumente de analiză a defecțiunilor standard din industrie, cum ar fi FMEA (failure mode and effects analysis) și extensia recentă a FMECA (failure mode, effects, and criticality analysis) furnizează informații importante cu privire la posibilele moduri de avarie în cadrul unui sistem. Totuși, efectele/impactul defecțiunilor asupra sistemului, precum și probabilitatea ca modurile de cedare să fie în raport cu gravitatea consecințelor acestora (adică analiza criticității), pot conduce la apariția de noi anomalii în sistem. Este de așteptat și de dorit ca un sistem de diagnosticare să clasifice în mod corect noile defecțiuni din sistem, ca fiind, fie un tip de defecțiune a priori cunoscută, fie să identifice modul corect de funcționare în lipsa defecțiunii, dar cu schimbare de stare. Deși detectarea unor defecțiuni noi este relativ ușor de realizat, izolarea și identificarea lor este extrem de dificil de obținut, deoarece aceste defecțiuni nu pot fi modelate, datorită naturii lor necunoscute.
- *Identificarea defecțiunilor multiple* se referă la abilitatea unui sistem de a diagnostica, identifica și clasifica corect mai multe defecțiuni care pot coexista într-un sistem. Aceasta este o cerință destul de dificilă, în principal datorită neliniarităților, interacțiunilor și conexiunilor care există între diferitele stări ale sistemului și potențialele surse de defectare ce pot apărea în cadrul unui sistem dinamic. Un alt motiv este faptul că, unele erori ale unui sistem din ingineria mecanică sunt extrem de dificil de modelat, datorită complexității lor.
- *Identificarea facilă.* Un sistem de diagnosticare ar trebui să poată explica unde a apărut o defecțiune și cum a fost propagată în sistem.
- *Adaptabilitate.* Condițiile de funcționare ale sistemului se modifică datorită perturbațiilor, variabilităților și schimbărilor de mediu. În plus, componentele sistemului prezintă o degradare a

performanței în timp. Prin urmare, un diagnostic de defecțiune trebuie să se adapteze inteligent la aceste modificări pentru a-și menține performanțele de diagnosticare.

- *Cerințe de stocare și cerințe computaționale rezonabile.* Cerințele de memorie și de calcul sunt cele două caracteristici fundamentale ale oricărui algoritm destinat implementării online, în timp real, a unui sistem de diagnosticare. Algoritmii de diagnosticare, în special cei destinați diagnosticării defecțiunilor încorporate la bord, nu sunt deloc o excepție. Prin urmare, în timp ce se proiectează un sistem de diagnosticare a defecțiunilor, este necesar să se rețină faptul că, cerințele de calcul și de memorie trebuie întotdeauna să respecte specificațiile aplicației, inclusiv specificațiile privind consumul de energie. În plus, în funcție de aplicație, ar trebui făcut un compromis rezonabil între aceste două cerințe.

8.6. Redundanța analitică utilizată pentru detectarea și izolarea defecțiunilor

Majoritatea metodologiilor DID (detectarea și izolarea defecțiunilor) existente pot fi împărțite în abordări bazate pe **model** și bazate pe **CI** ("computational intelligence"). Prima metodologie utilizează un *model matematic* ca sursă a priori de informare asupra sistemului monitorizat. Abordarea bazată pe utilizarea *programelor de calcul* utilizează fie date istorice cantitative ale sistemului, fie informații calitative despre sistem, sub forma regulilor "if-then".

În acest subcapitol, investigăm aceste două abordări fundamentale și conceptual diferite ale DID.

8.6.1. Abordări ale DID bazate pe modele

Din punct de vedere matematic, abordările privind **diagnosticarea defecțiunilor bazate pe model**, pot fi clasificate în două categorii distincte, în raport cu modelul dinamic și cu informațiile/datele online, pe care le utilizează. Aceste două categorii includ:

- *Abordări bazate pe sistemul cu evenimente discrete (SED).* Aceste metode sunt urmărite ori de câte ori comportamentul sistemului monitorizat poate fi modelat ca o mașină cu stare finită (MSF) (sau descris ca un sistem de evenimente discrete) iar sistemul poate fi observat doar ca o succesiune de evenimente. Tehnicile din această categorie rezolvă sarcina de diagnosticare prin compararea secvenței de evenimente observate cu dinamica evenimentului discret al modelului.
- *Abordări bazate pe modele ce utilizează ecuații diferențiale.* Aceste metode sunt utilizate ori de câte ori sistemul monitorizat poate fi reprezentat de un model matematic sub forma unor ecuații diferențiale, iar ieșirile sistemului pot fi măsurate numeric.

Cele două tipuri de metode de diagnoză bazate pe modele, diferă semnificativ în ceea ce privește aparatul matematic utilizat și pașii diagnosticați. Acest lucru se datorează diferențelor fundamentale între proprietățile sistemelor pe care le monitorizează. De exemplu, abordările de diagnosticare a defecțiunilor, pentru sistemele cu variabilitate continuă, sunt descompuse în două etape: *generarea reziduală* și *evaluarea reziduală*, în timp ce în sistemele cu evenimente discrete, acești pași nu pot fi definiți (deoarece noțiunea de diferență între evenimentele nu este definită [7]). În schimb, abordările de diagnoză bazate pe SED verifică consecvența sau nu dintre *comportamentul curent* al sistemului și *modelul SED* [8].

8.6.1.1 Detectarea defecțiunilor bazate pe modele

Detectarea defecțiunilor este, în esență, primul pas al diagnosticării defecțiunilor. În cadrul acestei etape are loc detectarea prezenței unor defecțiuni într-un sistem dinamic. Este important de menționat că detectarea defecțiunilor incipiente (sau depistarea precoce a defecțiunilor) este extrem de importantă pentru siguranța sistemului, precum și pentru implementarea eficientă a unui sistem de mentenanță bazat pe starea sistemului (MSS).

Detectarea defecțiunilor cu ajutorul modelelor se utilizează *generarea reziduală*, unde reziduurile reprezintă cantități ce arată neconcordanța dintre comportamentul real al sistemului și modelul matematic al sistemului. Observatorii de stare sunt sisteme dinamice care estimează stările sistemului dinamic neliniar și, în consecință, rezultatele unui proces. Un reziduu bazat pe observatori de stare, reprezintă o estimare a ieșirii de tip defecțiune sau o combinație a acestora reprezentând defecțiuni multiple. Pentru generarea reziduală bazată pe observație, au fost utilizate diferite tehnici de proiectare a observatorilor neliniari, deoarece nu există un singur observator neliniar, universal, optim, pentru toate sistemele neliniare. Observatorii neliniari existenți, trebuie proiectați sub anumite ipoteze privind structura sistemului, intrările de sistem și/sau gradul de neliniaritate al sistemului.

Cea de-a doua metodă, clasică, pentru generarea reziduală în vederea detectării defecțiunilor, este abordarea *parității spațiului*, ce utilizează relațiile analitice de redundanță (RAR) care leagă un subset de variabile selectate ale sistemului luat în considerare. RAR-urile pot fi obținute automat, din ecuațiile modelului, utilizând diferiți algoritmi de eliminare [9]. RAR-urile pot fi separate în două părți. *Prima parte* depinde doar de variabilele cunoscute (măsurate), în timp ce, *partea a doua*, și anume partea de evaluare, depinde de componentele defecte. Reziduurile de paritate sunt generate prin calcularea online a părții cunoscute a acestor relații. Valoarea reziduală poate fi interpretată de partea de evaluare a RAR [9]. Se poate demonstra că, pentru o clasă de sisteme neliniare, cu multiple intrări și o singură ieșire, (MISO - multi-input, single-output), există o relație între reziduurile de paritate și reziduurile generate de observatorii de stare, cu valori adăugate mari. Principalul dezavantaj al abordării spațiului parității îl reprezintă faptul că, reziduurile sunt calculate folosind derivate în raport cu timpul ale variabilelor măsurate, ceea ce face ca abordarea să fie foarte sensibilă la zgomotul de măsurare și la perturbațiile sistemului. Astfel, pentru a fi folositoare într-un mediu zgomotos, sunt necesare filtre suplimentare și pre-procesare.

8.6.1.2. Izolarea defecțiunilor bazate pe model

Odată ce o defecțiune este detectată într-un sistem, trebuie urmată de izolarea defecțiunilor care va distinge (sau izola) o anumită defecțiune de altele sau va localiza componenta defectă din sistem. În timp ce este suficient *un singur semnal rezidual pentru detectarea defecțiunilor*, izolarea defecțiunilor necesită, de obicei, *un set de reziduuri* (sau un vector rezidual). Dacă un vector rezidual poate izola toate defectele, are proprietatea de izolare a defecțiunilor dorită.

În principiu, există două moduri fundamentale pentru a crea un set rezidual ce va permite izolarea defecțiunilor, inclusiv setul rezidual structurat și setul rezidual direcțional. Aproape toate metodologiile de izolare a defecțiunilor bazate pe modele, pot fi clasificate în oricare dintre aceste două moduri. În cele ce urmează se prezintă conceptul general al fiecărui mod, luat individual, și sunt discutate unele tehnici de izolare a defecțiunilor bazate pe model.

(A) *Set rezidual structurat*. Pentru a îndeplini sarcina de izolare a defecțiunilor, una dintre abordări o reprezintă proiectarea unui set de reziduuri structurate, în care fiecare reziduu este prevăzut să fie sensibil la un subset de defecte, rămânând insensibil la cele rămase. Procesul de proiectare constă în două etape: *prima etapă* constă din a specifica relațiile de sensibilitate și de insensibilitate dintre reziduuri și defecțiuni, în funcție de sarcina de izolare atribuită, iar *a doua* presupune proiectarea unui set de generatoare reziduale, în funcție de sensibilitatea și relațiile de insensibilitate dorite [10]. Reziduurile structurate pot fi proiectate în două moduri conceptual diferite, și anume: set rezidual dedicat și set rezidual generalizat. Aceste două scheme sunt prezentate în figura 8.6 pentru un exemplu de izolare a trei defecte diferite $\{f_1, f_2, f_3\}$.

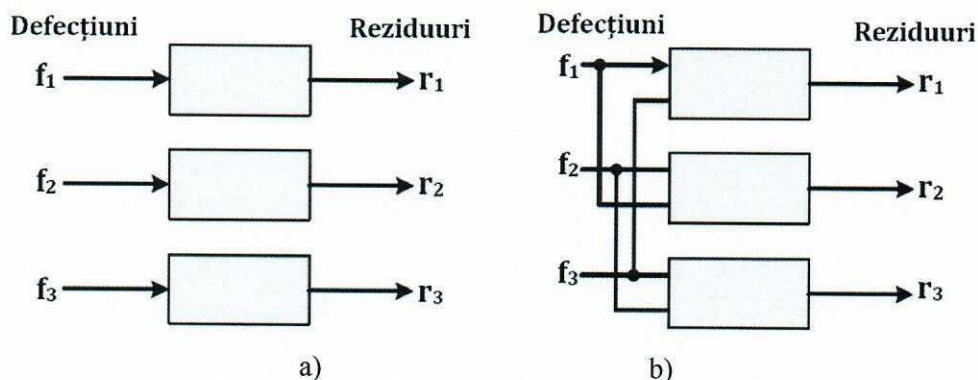


Fig. 8.6. Două scheme de set rezidual structurat pentru un exemplu de izolare a trei defecte:
(a) schema dedicată și (b) schema generalizată [10]

(A-1) *Schema dedicată a setului rezidual structurat*. În schema dedicată, pentru a lua o decizie cu privire la apariția unei defecțiuni specifice, se poate utiliza următoarea logică de prag [10]:

$$r_i(t) > T_i \rightarrow f(t) \neq 0; \quad i \in \{1, 2, \dots, L\} \quad (8.8)$$

unde L este numărul total de defecțiuni care urmează să fie izolate iar T_i sunt pragurile corespunzătoare reziduurilor r_i . Setul rezidual dedicat este foarte simplu și toate defecțiunile pot fi detectate simultan; totuși, în mod normal, nu rămâne prea multă libertate la proiectare pentru a obține alte atribute dorite ale unui sistem de diagnosticare a defecțiunilor, cum ar fi robustețea la diferite surse de incertitudine (adică, zgomotul de măsurare, perturbațiile sistemului și erorile de modelare). O parte din logica deciziei de izolare a defecțiunilor din schema cu seria paralelă, este analogă cu cea a schemei dedicate. În plus, ambele metode sunt la fel de sensibile (sau non-robuste) la măsurarea zgomotului. În cadrul schemei dedicate au fost dezvoltate diferite tehnici de izolare a defecțiunilor. Clark [11], a proiectat o schemă de observație dedicată (DOS) pentru detectarea defecțiunilor senzoriale, care a fost punctul de plecare pentru conceptul de set rezidual dedicat (sau schemă dedicată). În DOS, un observator reconstruiește toate ieșirile din sistem, cu excepția uneia (adică $y_j(t)$, $j = 1, \dots, m$, $j \neq i$) folosind toate intrările de sistem și o singură ieșire. Apoi, diferența dintre estimare și măsurare indică posibilitatea unei defecțiuni în senzorul i . Dacă această tehnică este aplicată pentru toate ieșirile m ale sistemului, și anume y_i , $i = 1, \dots, m$, atunci este nevoie de o bancă de observatori dedicați pentru a monitoriza senzorii m ai sistemului. Chen și Saif [12] au extins recent DOS-ul lui Clark la izolarea defecțiunilor de acționare. Schema lor este capabilă să

detecteze și să izoleze mai multe defecțiuni de acționare folosind o bancă de observatori r , unde r este numărul total de actuatori din sistemul luat în considerare.

Un alt grup, foarte important de metode de izolare a defecțiunilor care se încadrează, în esență, în schema dedicată, este reprezentat de abordările modelului multiplu (MM). În ultimele decenii, utilizarea modelelor multiple a devenit foarte populară și aplicată pe scară largă în diferite domenii ale cercetării, inclusiv în estimarea stării sistemului, în controlul, urmărirea țintei și diagnosticarea defecțiunilor din sistemele presupuse a fi stochastice (fie sunt defecte fie funcționează la parametri proiectați). În literatura de specialitate există, în principal, două tipuri de algoritmi MM, și anume MM care nu interacționează și MM care interacționează (IMM). Metoda non-interactivă MM a fost inițial propusă de Magill [13] pentru o estimare optimă a proceselor liniare stochastice eșantionate. Estimatorul MM este compus dintr-un set de estimatori elementali și un set corespunzător de coeficienți de ponderare. Cu toate acestea, filtrele elementale bazate pe model funcționează în paralel, în mod independent, în orice moment, fără nici o interacțiune între ele. O astfel de abordare nu este potrivită pentru problema diagnosticării defecțiunilor deoarece, presupune că nu există interacțiuni reciproce între modelele multiple, în timp ce, în general, structura sau parametrii sistemului se schimbă. Cu toate acestea, abordarea MM a fost dezvoltată și pentru diagnosticarea defecțiunilor în diferite aplicații ingineresti, dar, în principal, în scopul detectării, mai degrabă decât a izolării.

Abordarea IMM folosește probabilitățile modale de analiză în fiecare moment, a intrărilor și ieșirilor unei rețele de filtre paralele. În plus, abordarea IMM depășește punctele slabe ale abordării MM prin modelarea, în mod explicit, a schimbărilor abrupte ale sistemului, prin "trecerea" de la un model la altul într-un mod probabilist. Această abordare este una dintre cele mai rentabile tehnici de estimare adaptivă a sistemelor care implică modificări structurale și parametrice [14].

Defecțiunile/cedările, produc, de regulă, modificări structurale și parametrice ale sistemului. Deoarece abordarea IMM modelează și gestionează în mod eficient modificările structurale și/sau parametrice ale sistemului, aceasta prezintă o abordare promițătoare și eficientă pentru detectarea și izolarea defecțiunilor din sistemele dinamice. Diagnosticul de defecțiune neliniar, bazat pe IMM, presupune că sistemul monitorizat poate fi modelat, în orice moment, suficient de precis, cu următorul sistem hibrid Markov neliniar [14]:

$$\begin{cases} x(k+1) = f[k, m(k+1), x(k), u(k)] + T[k, m(k+1), w(k, m(k+1))] \\ z(k) = g[k, m(k), x(k), u(k)] + v[k, m(k)] \end{cases} \quad (8.9)$$

cu $x_0 \sim N(\hat{x}_0, P_0)$; unde modul sistemului la momentul k este selectat printr-un proces discret $m(k)$ care este modelat ca un lanț Markov de ordin L , discret, cu probabilitate de tranziție $\pi_{ij}(k)$ dat de:

$$\pi_{ij}(k) = P\{m_j(k+1) | m_i(k)\}, \forall m_i, m_j \in S \quad (8.10)$$

unde $\pi_{ij}(k)$ este probabilitatea tranziției de la modul (timpul k) la modul j (timpul $k+1$) și

$$\begin{cases} 0 \leq \pi_{ij}(k) \leq 1, \quad i = 1, \dots, N; \quad j = 1, \dots, N \\ \sum_j \pi_{ij}(k) = 1, \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (8.11)$$

unde $S = \{m_1, m_2, \dots, m_L\}$ reprezintă setul tuturor modurilor posibile ale sistemului, inclusiv modurile de funcționare corectă și diverse defecte, iar L este numărul total de moduri în S .

În diagnosticul de defecțiuni bazat pe IMM, trebuie proiectat un model matematic. Acesta este pasul inițial și un pas esențial în abordarea IMM, deoarece, setul de modele trebuie proiectate astfel încât să reprezinte cât mai multe moduri posibile de sistem. Prin urmare, proiectarea unui set de modele adecvat, necesită o cunoaștere a priori a potențialelor de defectare/cedare a sistemului. Odată ce un set de modele este asumat, trebuie să fie proiectat un filtru recursiv pe baza fiecărui model din setul de IMM, orientat pentru a estima stările sistemului. Pentru acest scop, pot fi folosite diferite tehnici de filtrare stohastică. Filtrul utilizat frecvent pentru sistemele neliniare este filtrul extins Kalman (EKF). Fiecare filtru din banca IMM calculează, recursiv, o estimare condiționată de model a stărilor sistemului și apoi, aceste estimări sunt combinate pentru a obține o estimare generală, numită și estimare mixtă a stărilor sistemului. Estimările mixte sunt calculate utilizând așa-numitele probabilități de model. Trebuie remarcat faptul că, probabilitățile modelului diferă de probabilitățile de tranziție introduse mai sus. Probabilitățile de tranziție cuprind o matrice care este un parametru al algoritmului IMM și este, de obicei, setată la o valoare fixă; totuși, probabilitățile modelului cuprind un vector (μ_i , $i = 1, 2, \dots, N$ în figura 8.7) care este, în mod esențial, parte a vectorului de stare al algoritmului IMM și este actualizat recursiv la fiecare etapă de timp a funcționării algoritmului.

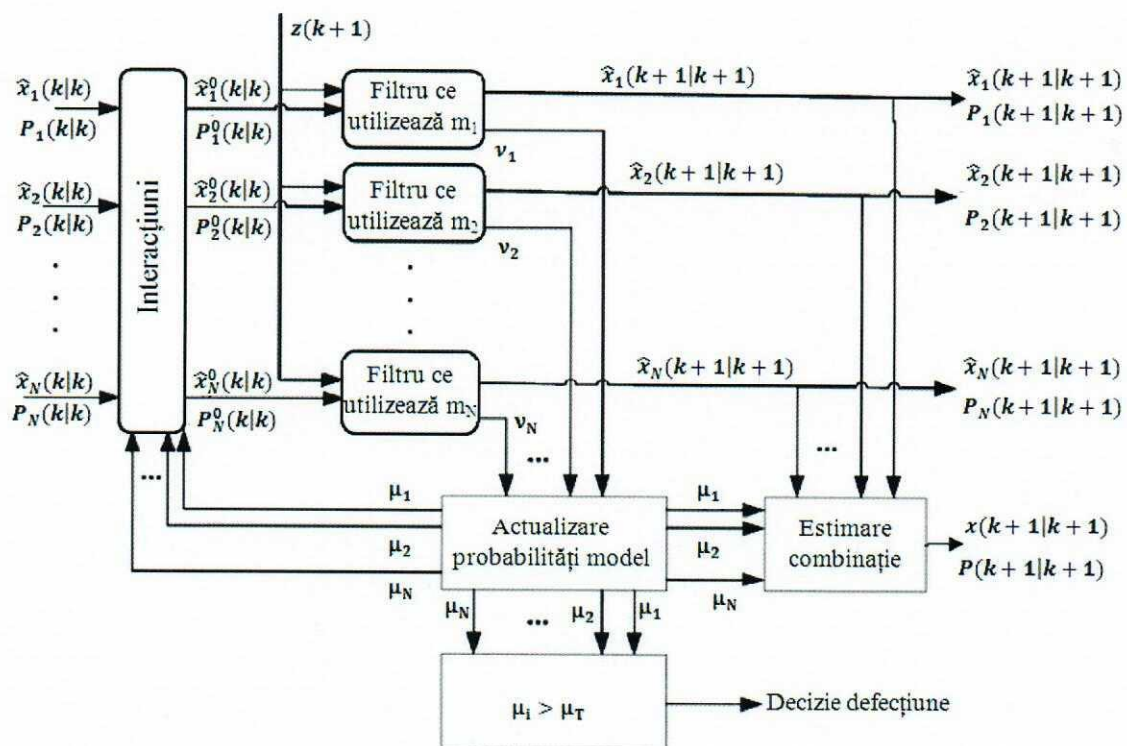


Fig. 8.7. Diagrama bloc a algoritmului de diagnosticare a defecțiunilor bazat pe IMM [14]

Probabilitatea modelului în fiecare moment, reprezintă produsul probabilităților fiecărui mod prezent în acel moment. Prin urmare, cea mai mare probabilitate a modelului indică, în mod clar, modul în vigoare în acel moment, prin urmare, defecțiunea este izolată. În plus, valoarea celei mai mari probabilități a modelului oferă o măsură cantitativă a nivelului de încredere al diagnosticatorului bazat pe IMM în decizia sa, care este aproape o proprietate exclusivă a

diagnosticului de defecțiune pe bază de IMM. Acest lucru poate fi considerat un avantaj al metodei IMM, deoarece informațiile de încredere pot fi utilizate foarte eficient pentru fuziunea informațiilor în sistemele de diagnosticare a defecțiunilor care cuprind mai multe diagnostice (sau factori de decizie). *Figura 8.7* prezintă diagrama bloc a algoritmului de diagnosticare a defecțiunilor bazat pe IMM.

(A-2) *Schema generalizată a setului rezidual structurat.* Schema generalizată pentru proiectarea reziduului structurat, constă în a determina ca fiecare semnal rezidual să fie sensibil la toate defecțiunile, cu excepția uneia singure [15]:

$$\begin{cases} r_1(t) = R[f_2(t), \dots, f_L(t)] \\ \vdots \\ r_i(t) = R[f_1(t), \dots, f_{i-1}(t), f_{i+1}(t), \dots, f_L(t)] \\ \vdots \\ r_L(t) = R[f_1(t), \dots, f_{L-1}(t)] \end{cases} \quad (8.12)$$

Setul de reziduuri de mai sus este definit ca set rezidual generalizat. Dacă se utilizează un set de observatori pentru generarea tuturor reziduurilor în setul rezidual generalizat (adică o bancă de generare de reziduuri bazate pe observatori), structura este cunoscută sub denumirea de schema de observație generalizată (GOS) și se utilizează inclusiv la diagnosticarea defecțiunilor senzorilor și a servomotoarelor pentru sistemele de evenimente discrete. Izolarea, în schema generalizată, poate fi realizată utilizând următoarele relații [15]:

$$\left. \begin{matrix} r_i(t) \leq T_i \\ r_j(t) > T_i, \quad \forall j \in \{1, \dots, i-1, i+1, \dots, L\} \end{matrix} \right\} \Rightarrow f_i(t) \neq 0 \quad (8.13)$$

pentru $i = 1, 2, \dots, L$.

DID bazată pe GOS, prezentată în *figura 8.8* pentru detectarea și izolarea defecțiunilor senzorilor și a actuatorilor, este mai robustă decât DOS în ceea ce privește incertitudinile parametrilor și zgomotul măsurătorilor. Acest lucru se datorează, în principal, faptului că în GOS este introdusă în observatori mai mult de o ieșire y_i [16], așa cum se poate vedea și în *figura 8.8*.

(B) *Set rezidual direcțional.* O abordare alternativă a izolării defecțiunilor este aceea de a aborda problema de generare a setului rezidual într-un cadru geometric. Mai exact, trebuie să definim un spațiu rezidual, ca spațiu cuprins de vectorul rezidual și apoi să realizăm izolarea defecțiunilor prin proiectarea unui vector rezidual direcțional, numit și filtru de detecție (vezi Beard [17] și Jones [18]). Un set rezidual direcțional este un vector care se află într-o direcție fixă, cu defecțiune specifică în spațiul rezidual (sau subspațiu), ca răspuns la acea defecțiune specifică [10]. În notația matematică, vom avea:

$$r(t|f_i(t)) = \beta_i(t)\vec{l}_i; \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (8.14)$$

unde vectorul constant $\vec{l}_i$ reprezintă direcția semnăturii defecțiunii i în spațiul rezidual iar β_i este un scalar care depinde de dimensiunea și dinamica defecțiunilor [10].

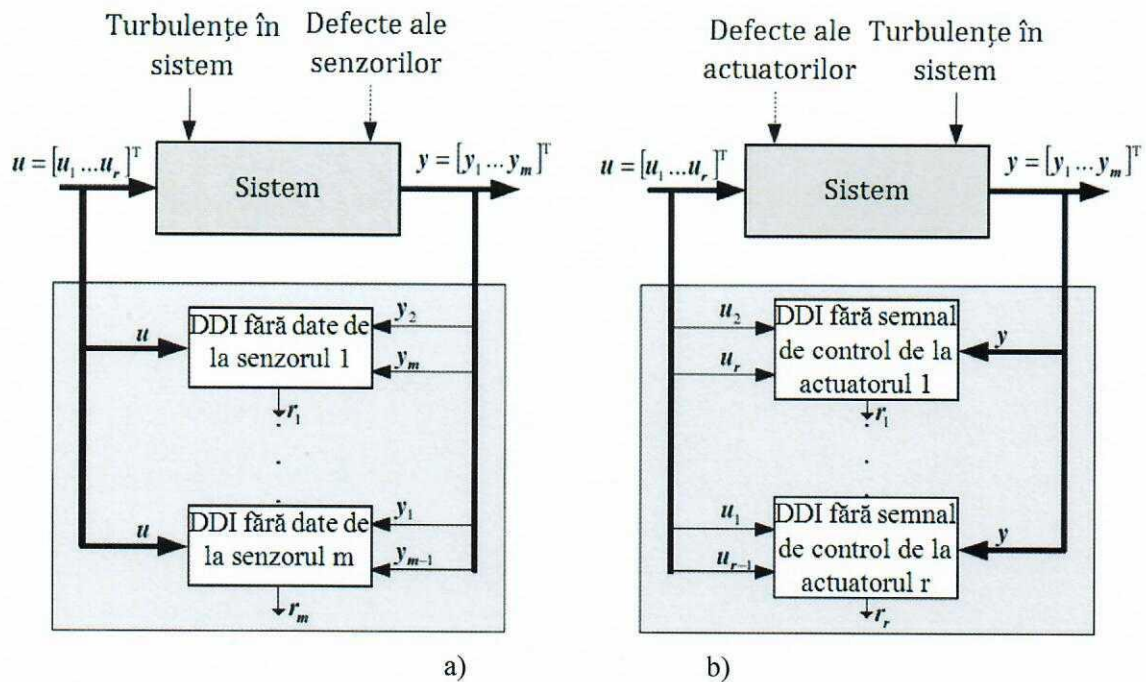


Fig. 8.8. Schema de observație generalizată (GOS) pentru (a) senzor și (b) DID pentru actuator [16]

Defecțiunea este apoi izolată prin determinarea direcției semnăturii acesteia, luându-se în considerare care cea mai apropiată semnătură de vectorul rezidual generat. Prin urmare, pentru a izola corect defecțiunea (adică, pentru a reduce rata de izolare greșită) trebuie să existe o corespondență unu-la-unu între semnăturile de defecțiune și sursele potențiale de defecțiuni (adică fiecare semnătură de defecțiune trebuie asociată în mod unic cu o singură defecțiune).

Deși setul rezidual direcțional este mai simplu de implementat (nu neapărat de proiectat, pentru că este mai dependent de problemă) decât setul rezidual structurat, și oferă o capacitate de izolare mai sigură a defecțiunilor în condiții ideale, este foarte greu să fie robust împotriva diferitelor surse de incertitudini, în special cele datorate defecțiunilor de modelare și variabilităților din sistem.

O serie de metode de izolare a defecțiunilor au fost propuse în literatura de specialitate în cadrul modelului de generare reziduală orientat pe model. Filtrele de detecție a defecțiunilor propuse de Beard [17] și Jones [18] (cunoscut și ca filtru de diagnosticare a defecțiunilor Beard-Jones) este una dintre metodele de pionierat care a inspirat conceptul rezidual direcțional. Fiind conceput inițial pentru DID (detectarea și izolarea defecțiunilor) de sistemele liniare, filtrul de detecție a defecțiunilor este o metodă bazată pe observația Luenberger, unde variația observatorului de stare este astfel aleasă încât, să se poată utiliza direcția vectorului rezidual în spațiul rezidual de ieșire, pentru a identifica componenta defectă. În proiectarea filtrului de detecție Beard-Jones, defectele sunt văzute ca intrări, iar reziduurile sunt văzute ca ieșiri. Filtrul de detecție Beard-Jones, dezvoltat în urma conceptului de setare reziduală direcțională, a inspirat, de asemenea, abordarea geometrică bine cunoscută a izolării defecțiunilor, care, într-adevăr, se încadrează în categoria setului rezidual dedicat.

În notațiile matematice, abordarea geometrică neliniară presupune că sistemul neliniar poate fi descris prin următorul model:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^R g_i(x)u_i + \sum_{i=1}^L l_i(x)m_i + \Gamma(x)w \\ y = h(x) \end{cases} \quad (8.15)$$

unde u_i , $i = 1, \dots, R$; m_i , $i = 1, \dots, L$ și w reprezintă canalele de intrare în vederea controlului semnalelor de defecțiune/funcționare neconformă, a căror apariție trebuie detectată și izolată, respectiv semnalele de perturbație a sistemului.

Obiectivul este acela de a găsi pentru fiecare semnal de avarie, m_i , $i = 1, \dots, L$, un factor de subsistem care este afectat de semnalul de defecțiune m_i și decuplat de alte defecte m_j , $j = 1, \dots, L$; $j \neq i$ (și, dacă este posibil, decuplat de la perturbația w pentru a atinge, de asemenea, robustețe în ceea ce privește perturbația). Algoritmul care verifică existența unui astfel de subsistem este unul constructiv, care asigură transformarea coordonatelor de stare $z = \Phi(x)$, necesare pentru izolarea defecțiunilor. Odată ce este determinată funcția de transformare a coordonatelor $\Phi(\cdot)$ și aplicată în ecuațiile spațiului de stare a sistemului, este obținută noua reprezentare a spațiului de stare a sistemului în termenii coordonatei transformate z . Apoi, este proiectat un observator neliniar pentru estimarea z , cu reziduul definit ca $r = z - \hat{z}$, unde $\hat{z}$ este estimarea observatorului.

Avantajul major al abordării geometrice neliniare constă în asigurarea condițiilor necesare și suficiente pentru soluționarea problemei de izolare a defecțiunilor, susținută de dovezi matematice riguroase. Mai mult decât atât, în condiții de măsurare totală a stării sistemului (de exemplu, funcția $h(\cdot)$ din ecuația 8.15 este o matrice de unitate), se găsește destul de ușor funcția $\Phi(\cdot)$. Principalul dezavantaj îl constituie lipsa de robustețe în modelarea defecțiunilor. Deoarece funcția de transformare $\Phi(\cdot)$ este obținută pe baza ecuațiilor nominale ale sistemului, orice discrepante dintre sistemul actual și modelul său nominal (datorită dinamicii, incertitudinilor parametrilor, variațiilor caracteristicilor, etc.) pot determina invaliditatea rezultatelor analitice. Într-o măsură mai mică, zgomotele de măsurare vor afecta, de asemenea, performanța abordării geometrice. În ceea ce privește robustețea raportată la perturbațiile sistemului, apar probleme de concepție pentru a decupla reziduurile de la perturbații.

8.6.2. Utilizarea inteligenței computaționale în ajutorul DID

Abordările bazate pe model pentru diagnosticarea defecțiunilor se bazează pe modelul matematic analitic al procesului de monitorizare. Aceasta implică faptul că, precizia modelului are un impact direct asupra performanței și fiabilității sistemului de diagnosticare. Mai precis, cu cât modelul este mai precis, cu atât va fi mai fiabilă schema de diagnosticare a defecțiunilor bazată pe model. Cu toate acestea, pentru sistemele complexe și incerte, derivarea modelelor matematice de înaltă fidelitate din principiile fizice, poate deveni foarte complicată, consumatoare de timp și chiar, uneori, imposibilă (unele sisteme nu pot fi reprezentate suficient de precis de un sistem de parametri complex). Mai mult decât atât, chiar și cu posibilitatea de a obține un model matematic folosind principiile de bază, obținerea unor valori precise ale parametrilor de model poate consuma timp, mai les atunci când nu este asigurată colaborarea cu integratorii de sistem. Nu în ultimul rând, unele sisteme prezintă comportamente incerte, cum ar fi dinamica din ordinul superior și oscilațiile de înaltă frecvență, denumite dinamică nemodificată, care nu pot fi modelate cu precizie.

Metodele matematice în inteligența computațională și teoria învățării - rețelele neuronale, logica fuzzy, sistemele neuro-fuzzy și algoritmi genetici - reprezintă o metodă promițătoare de a trece peste problemele de precizie de modelare menționate mai sus în diagnosticul de defecțiuni

bazat pe model. În ultimul deceniu, metodele bazate pe inteligența computațională (CI) s-au dezvoltat pe scară largă și s-au aplicat cu succes la diferite sisteme ingineresti. O serie de lucrări și cărți din literatura de specialitate analizează folosirea tehnicilor CI în diagnosticarea defecțiunilor. Printre pionieri se numără studiul lui Patton et al. [19], care prezintă unele dintre metodele de generare reziduală bazate pe tehnicile de inteligență artificială, care integrează atât cunoașterea cantitativă, cât și pe cea calitativă a sistemului, în diagnosticarea defecțiunilor. Mai recent, Palade et al. [20] au publicat o carte constând dintr-un set de lucrări care revizuiesc principalele tehnici de CI și aplicațiile lor pentru diagnosticarea defecțiunilor. S-au pus în evidență principalele avantaje și dezavantaje ale fiecărei metodologii. De asemenea, se arată că hibrizii tehnicilor de diagnostic bazate pe CI sunt adesea utilizați în practică pentru a-și utiliza avantajele individuale și pentru a-și depăși dezavantajele.

Utilizarea tehnicilor bazate pe CI permite folosirea informațiilor cantitative (numerice) și calitative (simbolice) despre sistemul monitorizat. Informațiile calitative sunt exprimate sub formă de reguli booleene sau fuzzy, de exemplu de tip „if-then”. Pentru sistemele reprezentate de reguli booleene, metodele de analiză cauzală și analiză a arborilor de defectare au fost folosite, în special, în industria aerospațială. Pe de altă parte, logica fuzzy este instrumentul potrivit pentru diagnosticarea defecțiunilor ori de câte ori comportamentul sistemului este descris de un set de relații fuzzy de tip „if-then”, derivate fie de un expert, fie folosind parametrii calitativi din fizică. Avantajul cheie al abordărilor calitative bazate pe CI este acela că ele pot furniza informații valoroase operatorilor de sistem pentru a identifica cauza principală a anomaliilor (adică seria de evenimente/anomalii care au condus la o defecțiune). Deși aparent atractive, metodele calitative de diagnosticare a defecțiunilor bazate pe CI, au un dezavantaj major. În multe aplicații de inginerie, derivarea regulilor booleene și/sau fuzzy de tip „if-then”, nu este deloc simplă și necesită o vastă cunoaștere a sistemului. În schimb, cunoștințele care descriu comportamentul sistemului sunt conținute în seturi mari de date cantitative, stocate în baze de date. Rețelele neuronale sunt instrumente matematice ideale pentru astfel de situații datorită proprietății universale de aproximare a funcțiilor neliniare și capacitatea lor de a învăța și de a reproduce comportamentul sistemului din seturile de date cantitative. Toate aceste proprietăți fac ca rețelele neuronale să devină un instrument promițător pentru aplicații atât de diverse, cum ar fi extragerea caracteristicilor, recunoașterea modelelor, gruparea, clasificarea, integrarea informației și, după cum s-a menționat mai sus, în identificarea sistemelor, putând aplicate în mod eficient pentru diagnosticarea și monitorizarea defecțiunilor sau a funcționării neconforme. Astfel, rețelele neuronale au fost aplicate pe scară largă la diagnosticarea defecțiunilor. În cele ce urmează, vom examina trei dintre cele mai frecvent utilizate abordări ale rețelei neuronale (RN) bazate pe diagnosticul de defecțiuni.

(I) Diagnosticarea defecțiunilor prin modelarea sistemelor dinamice utilizând rețele neuronale

Pentru modelarea sistemelor dinamice, rețelele neuronale sunt utilizate, în principal, pentru extragerea și clasificarea caracteristicilor. Cu alte cuvinte, rețeaua neuronală se utilizează doar pentru a clasifica defecțiunile apărute în sistem. De exemplu, în Li și colab. [21], caracteristicile frecvenței vibrațiilor la rulment și caracteristicile domeniului de timp sunt aplicate unei rețele neuronale pentru o diagnosticare automată a defecțiunilor la rulmenți. În aceste aplicații, rețelele neuronale sunt utilizate doar pentru a examina posibilitatea unei defecțiuni sau funcționări anormale

în sistem și a clasifica defecțiunile, pentru a declara starea de funcționare/defecțiune a sistemului. Această abordare a utilizării numai a măsurătorilor de ieșire din sistem, generează rezultate valide de diagnosticare a defecțiunilor, în principal pentru sistemele statice sau procesele staționare. În cazul diagnosticării defecțiunilor din sistemele dinamice (în special a celor neliniare), această abordare poate conduce la erori, deoarece o schimbare a intrărilor de sistem poate afecta anumite caracteristici măsurate la ieșirile sistemului. Prin urmare, modelarea sistemelor dinamice neliniare bazate pe RN la diagnosticarea defecțiunilor acestora, poate genera informații eronate, incorecte, atunci când au loc schimbări la intrările sistemului. Această problemă a fost rezolvată prin următoarea abordare a diagnosticării defecțiunilor bazate pe RN.

(II) Schema de luare a deciziilor privind generarea reziduală bazată pe rețele neuronale

Această schemă de diagnosticare bazată pe RN a fost inițial propusă de Patton și colab. [19]. În această schemă, ilustrată în *figura 8.9*, rețelele neuronale sunt utilizate în două etape: generarea reziduală și luarea deciziilor (pentru izolarea defecțiunilor). **În stadiul de generare reziduală**, rețelele neuronale sunt utilizate ca modele de predicție. O caracteristică importantă a unui model de predicție pe bază de rețele neuronale este aceea că, va învăța în mod automat dinamica sistemului neliniar în timpul procesului de instruire, efectuat pe mai multe cicluri de instruire, datele utilizate pentru instruire provenind din datele istorice de intrare-ieșire ale sistemului.

Modelele de predicție bazate pe rețelele neuronale au avantaje potențiale față de metodele tradiționale de predicție și estimare, având, inclusiv, proprietăți de cartografiere neliniară, toleranță la zgomot, auto-învățare și auto-adaptare precum și capabilități de procesare paralelă.

Pentru predicția în stadiul de generare reziduală pot fi folosite ca model diferitele arhitecturi de identificare a sistemelor neliniare bazate pe RN. Trei arhitecturi, utilizate pe scară largă, includ rețele neuronale autoregresive, (NARX), rețele neuronale recurente și rețele neuronale dinamice, așa cum se arată în *figura 8.9*. Aceste arhitecturi diferă în ceea ce privește modul în care a fost introdusă dinamica în arhitectura rețelei.

Rețelele neuronale au patru caracteristici importante și anume: (i) sunt neliniare, fiind potrivite pentru a trata sistemele dinamice neliniare; (ii) pot face prelucrare paralelă, ceea ce le permite să efectueze mai eficient calculele; (iii) au caracteristici de auto-învățare și auto-adaptare, care sunt ideale pentru adaptarea la diferite condiții de mediu; (iiii) sunt tolerante la zgomot și variabilități.

Schemele de identificare a sistemelor dinamice neliniare bazate pe RN, se pot clasifica în patru categorii principale.

Prima categorie utilizează în structura sa, trasee de întârziere (TI), împreună cu o rețea neuronală statică. TI-urile sunt folosite pentru a introduce dinamicitate în rețea, generând intrări și ieșiri întârziate ale sistemului care sunt apoi alimentate într-o rețea statică ca vector de regresie. Rețeaua realizează, apoi, o hartă statică neliniară pe acest vector de regresie, astfel încât să se obțină rezultatul dorit. Acest model este numit model neliniar autoregresiv exogen (NARX- nonlinear autoregressive exogenous).

A doua categorie o reprezintă rețelele neuronale recurente. În cadrul acestei modelări, este construită o reprezentare dinamică de intrare-ieșire utilizând o structură recurentă. Funahashi și Nakamura [22] au demonstrat că rețeaua neuronală recurentă propusă este capabilă să identifice

orice sistem dinamic neliniar, cu condiția ca stările inițiale ale rețelei să fie alese corespunzător, în raport cu condițiile inițiale ale sistemului.

A treia categorie este rețeaua neuronală dinamică încorporată. Rețelele neuronale dinamice încorporate sunt construite prin utilizarea neuronilor dinamici ai căror modele sunt diferite de cei ai neuronilor statici. Pentru a obține o hartă dinamică specifică de intrare-ieșire sunt utilizate unul sau mai multe elemente dinamice.

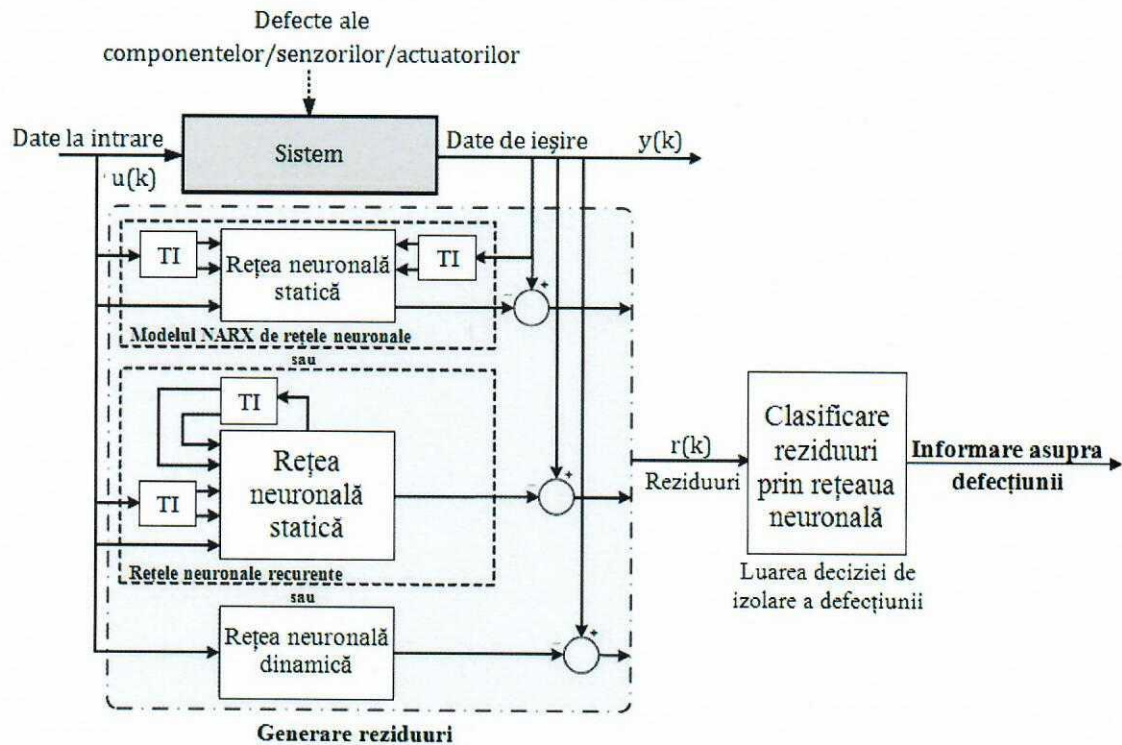


Fig. 8.9. Schema, în două etape, pentru detectarea și izolarea defecțiunilor pe bază de rețele neuronale

Modelul neuronilor Gamma a fost dezvoltat de Principe și Motter [23] pentru identificarea sistemelor neliniare. Structura modelului Gamma este similară cu structura TI-urilor, dar în loc să se utilizeze elemente simple de schimbare în linie, se utilizează un filtru liniar de ordinul întâi pentru a genera o hartă dinamică de intrare-ieșire. Yazdizadeh și Khorasani [24] au introdus o rețea neuronală dinamică încorporată, în care filtrele adaptive liniare sunt mărite înainte, de funcțiile de activare a straturilor ascunse ale RN-urilor, pentru a genera o hartă dinamică de intrare-ieșire. În această rețea, învățarea are loc atât prin adaptarea parametrilor de filtru liniar încorporat cât și a ponderii rețelei neuronale.

A patra categorie de identificatori dinamici constă dintr-o arhitectură de rețea statică neuronală, de tip cascadă „feed-forward”, urmată de un filtru fix, stabil liniar. În timpul procesului de instruire/învățare, ponderea rețelei neuronale, ce cuprinde parametrii adaptivi ai identificatorului neuronal și parametrii filtrului liniar stabil, rămâne neschimbată.

În cea de-a doua etapă a schemei de diagnosticare a erorilor bazate pe rețele neuronale, și anume, etapa de luare a deciziilor, pentru a atribui vectorul rezidual la modelele corespunzătoare diferitelor moduri de funcționare normală sau defectuoasă ale sistemului, este utilizat un clasificator

bazat pe rețele neuronale. Clasificatorul bazat pe RN-uri este instruit să recunoască caracteristicile complexe în reziduuri, și apoi să genereze informații de detectare și de izolare a defecțiunilor. Instruirea poate avea loc atât în moduri supravegheate cât și nesupravegheate. Clasificatorii supravegheați sunt, în general, mai exacti. Aceștia, au, totuși, un dezavantaj major, acela de a solicita date din toate situațiile de avarie posibile pentru formarea clasificatorului. Nu este de așteptat ca un clasificator bazat pe RN-uri instruite, folosind doar situații fără defecte, să funcționeze bine pentru situații de defecțiune/funcționare neconformă/cedare.

(III) Rețea neuronală bazată pe generarea și clasificarea reziduală a modelelor multiple

Această schemă de diagnosticare a defecțiunilor bazată pe RN-uri, urmează ideea schemei de diagnosticare și izolare a defecțiunilor bazată pe modele multiple, descrise în secțiunea 8.6.1.2, în care modelele matematice au fost înlocuite cu identificatori dinamici bazați pe rețele neuronale paralele. Schema, ilustrată în figura 8.10, conține două etape.

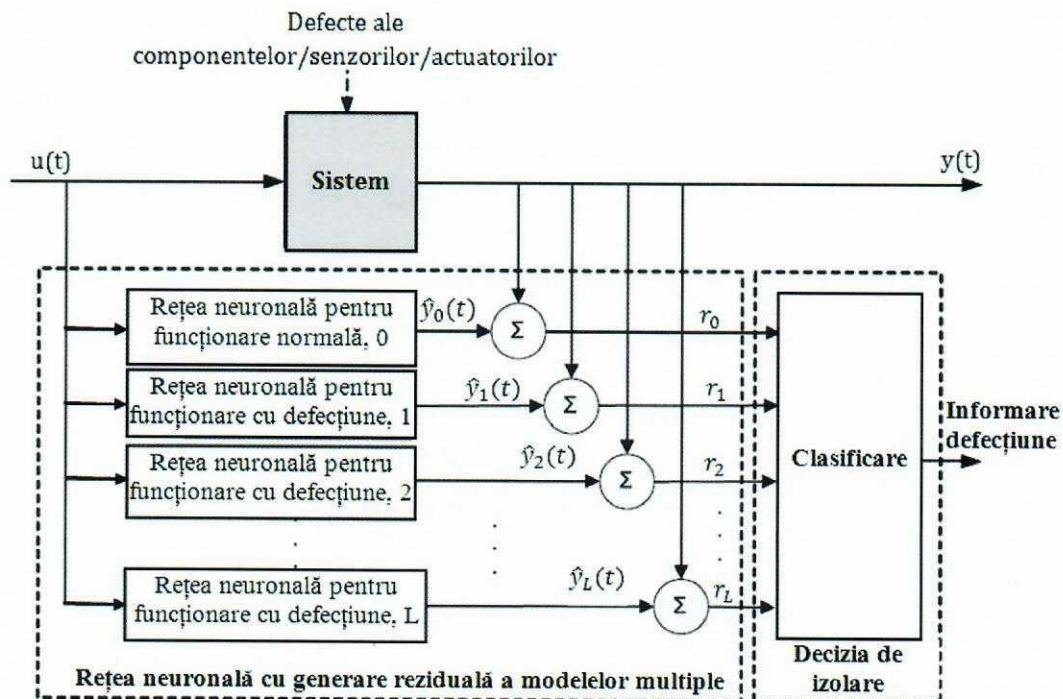


Fig. 8.10. Schemă de detectare și izolare a defecțiunilor (DID) pe bază de rețele neuronale multiple

Rețele neuronale pe bază de generare reziduală și de luare a deciziilor de izolare.

În prima etapă, fiecare model de defecțiune din blocul de generare reziduală este o rețea neuronală dinamică care identifică o anumită clasă de comportament a sistemului. Identificatorii dinamici de stare, discutați anterior, se aplică, în mod echivalent, și aici. Diferența majoră este că, spre deosebire de schema de luare a deciziilor de generare reziduală, schema modelului multiplu bazat pe RN-uri necesită date din toate situațiile de funcționare normală și cu defecțiuni în stadiul de generare reziduală, pentru a putea învăța toate clasele/tipurile de comportament ale sistemului. Acest lucru poate fi considerat unul dintre principalele dezavantaje ale abordării modelului multiplu bazat pe RN.

În etapa de luare a deciziilor de izolare, sarcina principală este de a clasifica reziduurile generate într-un număr de modele distincte care corespund diferitelor situații de funcționare normală și cu defecțiune. În acest scop este utilizată o altă rețea neuronală pe baza capacității de clasificare a acestora. În această etapă pot fi utilizate diferite arhitecturi și algoritmi de clasificare de tip RN. Acestea includ: rețeaua perceptron multi-strat (capabilă de recunoaștere și discriminare), rețeaua radială a funcției de bază, mașinile vectoriale de suport, rețelele neuronale probabiliste (RNP), rețelele neuronale fuzzy pentru clasificarea supravegheată, rețelele neuronale competitive (de exemplu, rețeaua Kohonen, hărțile autoorganizatoare) și rețelele teoretice de rezonanță adaptivă pentru clasificarea nesupravegheată.

Metodele de diagnoză bazate pe CI (computational intelligence), menționate mai sus, utilizează fie informații calitative fie cantitative despre un sistem dinamic, pentru a realiza diagnosticarea defecțiunilor. Ambele metodologii au fost aplicate cu succes în diagnosticarea defecțiunilor diferitelor sisteme de inginerie. Integrarea informațiilor cantitative și calitative poate spori considerabil performanța și robustețea sistemului de diagnosticare. Astfel de sisteme de diagnosticare se numesc sisteme integrate de diagnosticare a defecțiunilor bazate pe inteligența computațională. Există, în principiu, două concepte principale în cadrul sistemului integrat bazat pe CI. Primul concept este reprezentat de generarea reziduurilor utilizând metode bazate pe RN și apoi alocarea procesului de luare a deciziilor (sau a procesului de luare a deciziilor de izolare) unui motor de inferență fuzzy-logic. Această abordare permite operatorilor de sistem să descrie comportamentul sistemului sau relația dintre simptomele defecțiunilor și regulile simple de tip „if-then”. Al doilea concept integrat de diagnostic, bazat pe CI, prezentat în *figura 8.11*, utilizează rețelele neuronale pentru două scopuri principale:

(i) generarea reziduală folosind date istorice cantitative de intrare-ieșire ale sistemului și (ii) învățarea (sau determinarea) parametrilor modelului fuzzy al sistemului (adică, regulile fuzzy „if-then” care descriu calitativ comportamentul sistemului) din datele cantitative ale sistemului. Această integrare a cunoștințelor cantitative și calitative ale sistemului se realizează printr-un sistem neuro-fuzzy (sau o rețea neuronală fuzzy) care face posibilă combinarea capacității de învățare a rețelelor neuronale cu reprezentarea explicită a cunoașterii logicii fuzzy. Potrivit lui Patton și colab. [19], un mod potențial de implementare a unui sistem neuro-fuzzy îl reprezintă utilizarea rețelelor neuronale B-Spline.

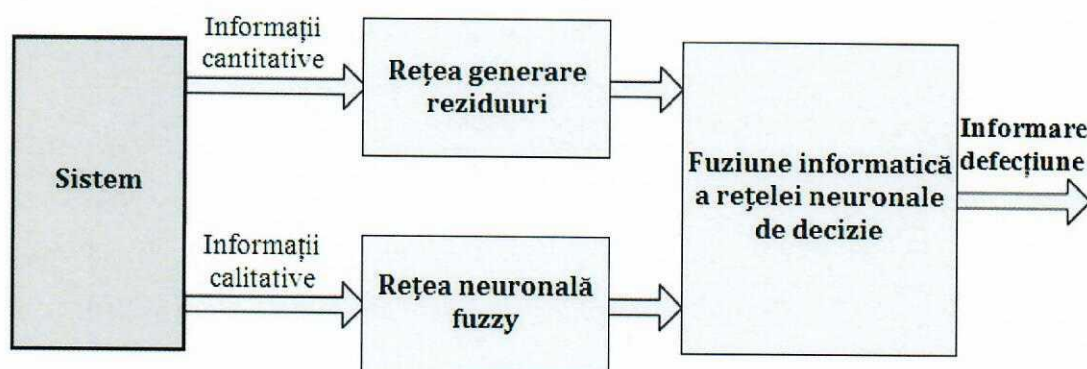


Fig. 8.11 Structură conceptuală a diagnosticului ce utilizează CI pentru determinarea defecțiunilor [10]

O rețea neuronală astfel formată, poate fi utilizată pentru a evalua fiabilitatea informațiilor furnizate prin metode cantitative sau calitative și să decidă, în consecință, care trebuie să fie ponderea în fuziunea informațiilor, așa cum este ilustrat în *figura 8.11*.

8.7. Abordarea hibridă la DIID – detectarea, identificarea și izolarea defecțiunilor apărute în sistemele dinamice

Această metodologie de diagnoză a defecțiunilor, exploatează simultan, atât informația despre starea sistemului oferită a priori de modelul matematic, cât și capacitatea de apropiere și adaptare neliniară a rețelelor neuronale. Mai exact, modelul matematic al sistemului este utilizat ca bază pentru modelarea și izolarea defecțiunilor, iar capacitatea rețelelor neuronale în aproximarea funcției neliniare adaptive, este utilizată ca bază pentru identificarea online a gravității defecțiunilor.

În literatura de specialitate există numai câteva metode de diagnoză a defecțiunilor care beneficiază simultan de un model matematic al unui sistem și de capacitățile exclusive ale tehnicilor CI, în special a rețelelor neuronale, într-un cadru hibrid. De exemplu, Alessandri [25] a propus o abordare hibridă a detectării defecțiunilor în sistemele neliniare. În lucrarea sa, detectarea și izolarea defecțiunilor se realizează prin intermediul unei bănci de estimatori, care furnizează estimări ale parametrilor care descriu defectele actuatorului, a instalației și a senzorilor. Acești estimatori, numiți și filtre cu memorie finită, se execută în conformitate cu o strategie de orizont de retragere, și sunt proiectate folosind modelul matematic nominal al sistemului și modelele de defecțiuni. Problema proiectării unor astfel de estimatori, pentru sistemele dinamice neliniare, este rezolvată prin căutarea funcțiilor de estimare optimă. Aceste funcții sunt approximate de rețele neuronale de tip „feed-forward” (modificarea sau controlul unui proces utilizând rezultatele sau efectele sale anticipate), problema fiind redusă la găsirea ponderilor neuronale optime, de unde și numele de filtre neuronale cu memorie finită. Procesul de învățare al filtrelor neuronale este împărțit în două faze: o fază de inițiere offline, utilizând orice cunoștințe posibile "a priori" privind statisticile variabilelor aleatoare care afectează stările sistemului, și o fază de formare online, pentru optimizarea online a ponderilor neuronale.

Într-un alt exemplu de abordare hibridă la diagnosticare, Xiaodong et al. [26] a prezentat o schemă robustă de detectare și izolare a defecțiunilor, pentru defecțiunile abrupte și incipiente ale sistemelor dinamice neliniare. Arhitectura de diagnosticare propusă constă dintr-o bancă de estimatori adaptivi neliniari $N+1$, unde N reprezintă numărul de defecțiuni potențiale care pot afecta sistemul neliniar. Unul dintre estimatorii adaptivi neliniari este estimatorul de detectare și aproximare a defecțiunilor (FDAE) utilizat pentru a detecta defecțiunile. Restul sunt estimatori de izolare a defecțiunilor (FIE) care sunt utilizați în scopuri de izolare numai după detectarea unei defecțiuni. În condiții normale de funcționare (fără defecțiuni), FDAE este singurul estimator care monitorizează sistemul. Odată ce se detectează o defecțiune, banca FIE este activată și FDAE adoptă modul de apropiere a funcției de defecțiune. Modelul matematic nominal al sistemului este utilizat în mod explicit pentru proiectarea FDAE și FIE. Mai mult, o componentă cheie a FDAE este un aproximator online, care, în prezența unei disfuncționalități ale sistemului, furnizează structura adaptivă pentru aproximarea on-line a funcției neliniare pentru defecțiune. Aici se utilizează capacitatea rețelelor neuronale de adaptare în a reprezenta funcțiile neliniare multivariabile pentru a implementa aproximatorul online al FDAE.

Foarte recent, Talebi și Khorasani [27] prezintă o schemă inteligentă de detecție și izolare a defecțiunilor pentru un sistem dinamic neliniar care utilizează un observator bazat pe rețele neuronale. Observatorul bazat pe RN-uri propune un model matematic nominal al sistemului, împreună cu *două rețele neuronale recurente* care sunt folosite pentru a identifica defectele necunoscute ale actuatorului și senzorului. Avantajul metodei este că nu se bazează pe disponibilitatea măsurătorilor de stare completă a sistemului analizat. Cu toate acestea, lucrarea de mai sus nu a abordat problema importantă a estimării gravității defecțiunilor (sau identificarea defecțiunilor) sau a abordat-o într-un mod care nu este util pentru prognoza de defecțiune și, prin urmare, pentru mentenanța bazată pe starea sistemului (MSS).

La fel, abordarea propusă de Alessandri [25] este doar o metodă de detectare și izolare a defecțiunilor, ceea ce lasă problema de identificare a defecțiunilor nerezolvată. Pe de altă parte, abordările propuse de Xiaodong et al. [26] și Talebi și Khorasani [27], estimează/identifică funcția de defecțiune care reprezintă impactul general al defecțiunilor asupra stărilor sistemului. Deși estimarea acestui impact global este adesea suficientă pentru diagnosticarea defecțiunilor (și astfel se obține un control de toleranță la erori), este utilă și pentru identificarea defecțiunilor actuatorului (în special actuatore statice sau actuatore cu dinamică neglijabilă), dar nu este adecvată pentru a prognoza defecțiunile și pentru a fi utilizată în mentenanța bazată pe starea sistemului. Motivul este că, este imposibil sau extrem de dificil să se obțină informații despre tendința de avarie pentru o componentă anume a sistemului din estimarea funcției de defectare menționată mai sus.

Metoda hibridă de diagnosticare a defecțiunilor este capabilă să detecteze, să izoleze și să identifice gravitatea defecțiunilor componentelor unui sistem dinamic neliniar într-un cadru integrat. Acest lucru se realizează prin utilizarea unei bănci a *modurilor de defectare* parametrizate și a unei bănci corespunzătoare a estimatorilor parametrilor neuronal adaptivi (NPE- neural parameter estimators) pentru a estima vectorul parametrului de defect (FP- fault parameter) și, astfel, severitatea defecțiunilor. Modelul matematic al sistemului, este utilizat atât în proiectarea acestor bănci de date, cât și în proiectarea NPE, rețelele neuronale fiind utilizate în proiectarea NPE, reprezentând, prin urmare, o abordare hibridă a diagnosticării defecțiunilor.

În cele din urmă, pentru a realiza DIID în stare parțială, este proiectat separat un observator neliniar care să evalueze continuu stările sistemului de la intrare, chiar și în prezența unor defecte în componentele sistemului. Acesta se numește un observator tolerant la defecțiuni (FTO- *fault-tolerant observer*) sau un estimator de stare tolerant la defecțiuni (FTSE- *fault-tolerant state estimator*).

8.8. Robustețea DID la incertitudini

Abordările bazate pe diagnosticul de defecțiuni/cedări/funcționare defectuoasă, pe bază de model (DD - diagnoza defecțiunilor) se bazează pe ipoteza principală că este disponibil un model matematic, perfect și exact, al sistemului dinamic neliniar supravegheat. O astfel de presupunere nu este, de obicei, validă în practică, deoarece este dificil să se obțină precizia necesară de modelare necesară pentru construirea de arhitecturi DD bazate pe redundanță analitică. Modelările și incertitudinile inevitabile care apar din cauza defecțiunilor de modelare, a variațiilor parametrilor în timp, a perturbațiilor externe necunoscute și a zgomotului de măsurare, afectează performanțele schemelor DD prin producerea de alarme false. Această deteriorare a performanței se poate

întâmpla într-o măsură care face ca schema DD bazată pe model să fie complet inutilă. Acest lucru necesită dezvoltarea algoritmilor DD, care au capacitatea de a detecta, izola, și identifica defectele și disfuncționalitățile, în prezența diferitelor surse de incertitudine. Astfel de algoritmi sunt denumiți algoritmi de diagnoză robustă.

Pentru a depăși dificultățile introduse de modelare, incertitudini și variabilități, un model DIID bazat pe model trebuie făcut robust, adică insensibil la incertitudini [24]. Reducerea sensibilității la incertitudini poate să nu rezolve total problema, deoarece, o *reducere generală a sensibilității* poate fi însoțită, în mod nedorit, de o *reducere a sensibilității la defecte*. Prin urmare, o formulare mai semnificativă a problemei robusteții unei analize DIID este de a crește robustețea la diferite surse de incertitudine fără a pierde sensibilitatea la defecte. Cu alte cuvinte, o schemă DIID care este concepută pentru a oferi o sensibilitate satisfăcătoare la defecte, asociată cu robustețea necesară în ceea ce privește modelarea, incertitudinile și variabilitățile, se numește o schemă robustă de DIID.

Importanța robusteții DIID bazată pe modele pentru sistemele dinamice neliniare trebuie abordată în două etape. Mai întâi, modelul este liniarizat în jurul unui punct de operare și apoi se aplică tehnici robuste de DIID liniare pentru a genera reziduuri care sunt insensibile la incertitudini, dar care răspund la defecțiuni. Această metodă funcționează bine numai atunci când liniarizarea nu cauzează o nepotrivire mare între modelele liniare și cele neliniare, iar sistemul funcționează în apropierea punctului de operare specificat. O altă alternativă la DIID neliniar robuste, o constituie creșterea nivelurilor de prag ale reziduurilor generate de schema neliniară de DIID, reducând astfel numărul de alarme false. Cu toate acestea, creșterea nivelurilor de prag va micșora, în același timp, sensibilitatea la defecțiuni a schemei DIID.

Acest lucru impune un compromis între reducerea numărului de alarme false și numărul de alarme pierdute. O soluție fiabilă la o astfel de problemă de compromis nu este banală în practică, în special datorită comportamentului neliniar al sistemului dinamic și prezenței diferitelor surse de incertitudini. Prin urmare, există o mare cerere de dezvoltare a tehnicilor care fac ca problema neliniară DIID să fie robustă în raport cu modelarea, incertitudinile și variabilitățile, pentru a reduce numărul de alarme false atunci când sistemul neliniar se află într-un mod corect de funcționare, diagnosticând, în mod fiabil, defectele, defecțiunile, cedările sau funcționarea necorespunzătoare.

BIBLIOGRAFIE

- [1] E. Iancu, M. Mircea, Fault Detection and Isolation in Dynamic Systems, The 5th International Power Systems Conference, pp. 269-275, 6 - 7 Noiembrie 2003.
- [2] E. Sobhani-Tehrani, K. Khorasani, Fault Diagnosis of Nonlinear Systems Using a Hybrid Approach, Lecture Notes in Control and Information Sciences 383, Springer Science+Business, LLC, 2009.
- [3] E. Sobhani-Tehrani, K. Khorasani, S. Tafazoli, Dynamic Neural Network-based Estimator for Fault Diagnosis in Reaction Wheel Actuator of Satellite Attitude Control System, Proc. Int. Joint Conf. on Neural Networks, pp. 2347-2352, 2005.
- [4] J.D. Boskovic, R.K. Mehra, Stable adaptive multiple model-based control design for accommodation of sensor failures, Proceeding of American Control Conference, 2002.

- [5] Capabilities in the area of flight-critical systems.” Available on the Web at <http://www.ssci.com/Technology/FCS/SofC nop.pdf>
- [6] D. Boskovic, S. E. Bergstrom, and R. K. Mehra, Retrofit reconfigurable flight control in the presence of control effector damage. Proceeding of American Control Conference, 2002.
- [7] J. Lunze, J. Schroder, SJ., Sensor and actuator fault diagnosis of systems with discrete inputs and output, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Cybernetics, Volume: 34, Issue: 2, April 2004.
- [8] J. Lunze, J. Schröder, State Observation and Diagnosis of Discrete-Event Systems Described by Stochastic Automata, Discrete Event Dynamic Systems, Volume 11, Issue 4, pp 319–369, October 2001.
- [9] C. Christophe, V. Cocquempot, A.B. Jiang, Link between high gain observer-based residual space one May 8-10, 2002, American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002.
- [10] J. Chen, R.J. Patton, Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems, Kluwer Academic Publisher, 1999.
- [11] R.N. Clark, Instrument Fault Detection, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Volume: AES-14, Issue: 3, May 1978.
- [12] W. Chen, M. Saif, Observer-based strategies for actuator fault detection, isolation and estimation for certain class of uncertain nonlinear systems. IET Control Theory A; 1(6): 1672–1680, 2007.
- [13] D. T. Magill. Optimal adaptive estimation of samples stochastic processes. IEEE Trans. on Automat. Contr. (4), 434—439, 1965.
- [14] Y. Zhang, R.-L.Xiao, “Detection and Diagnosis of Sensor and Actuator Failures using Interacting multiple-model estimator, Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, pp. 4475-4480, dec. 1997.
- [15] J. Gertler, Fault detection and diagnosis in Engineering Systems, Marcel Dekker, New York, 1998.
- [16] P. M. Frank, Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-Based Redundancy - A Survey and Some New Results, Automatica 26, pp. 450-472, 1990.
- [17] R. V. Beard, Failure Accommodation in Linear Sustems Through Self-organization, NASA, 1971.
- [18] Jones, Harold Lee, Failure detection in linear systems, Massachusetts Institute of Technology, 1973.
- [19] R.J. Patton, P. Frank and R. Clark, Fault Diagnosis in Dynamic Systems. Theory and applications. Control Engineering Series, Prentice Hall, 1989.
- [20] V. Palade, C.D. Bocaniala, L.C. Jain, Computational Intelligence in Fault Diagnosis, Springer-Verlag, 2006.
- [21] P. Li, V. Kadiramanathan, Fault detection and isolation in non-linear stochastic systems—A combined adaptive Monte Carlo filtering and likelihood ratio approach, International Journal of Control, Volume 77, Issue 12, , pp. 337–343, 2004.
- [22] K. Funahashi, Y. Nakamura, Approximation of dynamical systems by continuous time recurrent neural networks, Elsevier, Neural Networks, Volume 6, Issue 6, , Pages 801-806, 1993.
- [23] M. A. Motter, C. Jose, A. Principe, Gamma Memory Neural Network For System Identification, Neural Networks, 1 IEEE World Congress on Computational Intelligence, 1994.

- [24] A. Yazdizadeh, K. Khorasani, Adaptive time delay neural network structures for nonlinear system identification, 47 (1), pp. 207-240, 2002.
- [25] A. Alessandri, Fault diagnosis for nonlinear systems using a bank of neural estimators, Journal Computers in Industry - Special issue: Soft computing in industrial applications, Volume 52 Issue 3, Pages 271 – 289, December 2003.
- [26] Z. Xiaodong, M.M. Polycarpou, T. Parisini, A robust detection and isolation scheme for abrupt and incipient faults in nonlinear systems, IEEE Transactions on Automatic Control, 2002.
- [27] H.A. Talebi, Khorasani, A robust fault detection and isolation scheme with application to magnetorquer type actuators for satellites. IEEE International Conference, Systems, Man and Cybernetics, October 2007.

CAPITOLUL 9. NOȚIUNI DE DIAGNOSTICAREA ȘI EXPERTIZAREA SISTEMELOR MECANICE

-
- 9.1. Aspecte definitorii ale metodologiei de diagnosticare
 - 9.2. Terminologie practică: metodă, demers, instrument
 - 9.3. Instrumentele diagnosticului și demersul investigației
 - 9.4. Analiza informațiilor adunate, concluziile și raportul
 - 9.5. Calitatea informației
 - 9.6. Diagnosticarea sistemelor reparable pe baza mentenanței
 - 9.7. Expertizarea stării sistemelor funcționale
 - 9.8. Durata de viață reziduală
 - 9.9. Monitorizarea stării sistemelor
 - 9.10. Concluzii
-

9.1. Aspecte definitorii ale metodologiei de diagnosticare

Realizarea oricărui studiu de diagnosticare, pentru soluționarea problemelor de orice natură intervenite în activitatea agentului economic, necesită o abordare metodică. Această exigență, valabilă pentru toate tipurile de studii, este mult mai mare în cazul diagnosticării unei activități productive, a unui produs. Pentru a pătrunde în labirintul complicat al unei întreprinderi și a identifica soluțiile cele mai bune la problemele apărute, este foarte importantă asigurarea unei *informări corecte* a specialistului consultant. Metoda diagnosticării, pe de o parte, ar trebui să permită degajarea elementelor esențiale pentru elaborarea studiului și, mai mult, cercetarea în profunzime în cazul anomaliilor, iar pe de altă parte, să neglijeze elementele accesorii care nu prezintă utilitate pentru domeniul studiat, [1]. Această dublă necesitate antrenează eforturile *expertului* în eliminarea dificultăților metodei de diagnosticare, ce ar trebui să evite două posibile limite și anume: realizarea unui *studiu foarte analitic și costisitor* în raport cu informațiile pe care le aduce sau elaborarea unui *studiu mult prea global*, care poate antrena unele omisiuni, prin care să se piardă unele puncte importante pentru judecata finală și pentru programele de acțiune ce urmează a fi propuse. Ca urmare, numai o metodă riguroasă de diagnosticare va convinge beneficiarul studiului de competența și de valoarea expertului specialist la care s-a apelat și de faptul că rezultatul expertizei nu cuprinde o multitudine de informații inutile, fără esență.

Orice diagnosticare presupune utilizarea mai multor tehnici complementare pentru evidențierea și analiza aspectelor vizate. Avantajul recurgerii la o abordare multilaterală este dublu: pe de o parte, permite *verificarea mărturiilor/argumentelor* care măresc securitatea analizei iar pe de altă parte, permite *identificarea celor mai potrivite procedee*, adaptate domeniilor studiate, deoarece orice tehnică are limitele sale și poate fi utilizată numai în proporții diferite pentru examinarea structurilor, funcțiilor sau proceselor cercetate. Realizarea metodică a diagnosticării comportă un anumit număr de etape, absolut necesare în elaborarea unei lucrări pertinente.

Studiul de diagnosticare [2] ne furnizează un anumit număr de informații utile în abordarea unui produs, din punct de vedere a riscului, ca urmare a *degradării sau deteriorării acestuia*. Instrumentele de diagnosticare sunt destinate să genereze și să primească informații și date, să le ordoneze și să le structureze și, prin punerea lor în legătură, să permită deducerea unei semnificații pe care n-ar avea-o dacă ar fi tratate separat.

Diagnosticarea este prezentată ca unirea a două niveluri de analiză:

- punctele forte și slăbiciunile posibile ale unui produs;
- amenințările generate de mediul înconjurător.

Această analiză este, în mod necesar, dinamică. Se dezvoltă, astfel, metode exacte de analiză comparativă a unui produs.

La definiția medicală tradițională, care nu vede în diagnosticare decât determinarea disfuncționalităților (pornind de la simptome), limbajul modern informatic a adăugat căutarea cauzelor și corectarea acestor disfuncționalități.

Diagnosticarea, în sensul său actual lărgit, cuprinde ciclul complet, [3]:

constatare – analiză - acțiune

Această definiție poate fi reținută pentru diagnosticarea unui produs, al calității acestuia sau a unei situații generale de disfuncționalități, de funcționare neconformă sau de cedare.

O altă abordare, mai pragmatică, constă din definirea diagnosticării pe baza întrebărilor la care trebuie să se răspundă:

- Care este situația actuală?
- În ce situație de *risc* mă aflu dacă nu schimb nimic?
- În funcție de situația în care mă încadrez, care sunt acțiunile pe care trebuie să le întreprind?
- Care sunt riscurile și obstacolele de depășit?

Cea de-a treia întrebare pune problema referențialului. Acesta trebuie să fie explicit, și să servească drept model de comparație pentru a facilita o evaluare a devierii existente.

Ca urmare, *diagnosticarea reprezintă o acțiune de investigare dusă de o persoană (sau un grup de persoane) asupra funcționalității unui produs, echipament, etc., sau asupra unei situații produse ca urmare a degradării/cedării produsului, echipamentului, etc., la cererea unei autorități competente.*

Realizat într-o manieră preventivă sau curativă, diagnosticarea are ca țel:

- să analizeze corelația funcționării și a managementului cu obiectivele;
- să scoată în evidență neconformitățile și ansamblul cauzelor;
- să propună un plan de acțiune potrivit, acționând asupra unui ansamblu de cauze și asupra mediului înconjurător, astfel încât să amelioreze competitivitatea sau eficacitatea produselor, echipamentelor, etc.

Diagnosticarea utilizează metode și instrumente adaptate, plecând de la un referențial mai mult sau mai puțin explicit.

Înainte de *deteriorare/cedare/funcționare neconformă*, ca măsură preventivă, se poate efectua controlul calității.

Tab. 9.1. Definiția și domeniul procesului de diagnosticare

Definiție		Domeniu
Ce își propune?	Acțiuni de investigare ¹	Sistem, organizație, produs, tehnologie, etc.
Cine?	O persoană (sau un grup de persoane)	Internă sau externă domeniului respectiv, dar în orice caz, <i>competentă și obiectivă</i>
Unde?	La o organizație ²	Sistem, activitate, întreprindere, uzină, administrație
	sau la o parte din ea	Atelier, serviciu, funcție, proces, produs, procedeu, mașină, tehnică, social, financiar
Scop?	Să se analizeze coerența sa ³	Adecvare, corelare, aptitudine de funcționare, eficacitate
	Să evidențieze neconformitățile și cauzele lor	Problema, dificultatea, blocajul
	Să propună un plan de acțiune potrivit ⁴	Soluții, acțiuni corective sau de ameliorare, demersuri, metode, etc.
Cum?	Utilizând metodele și instrumentele adaptate și bazându-se pe un referențial ⁵	Tehnică, analiză de date și informații, comunicare, model, referință recunoscută
Declanșare	De către o autoritate competentă ⁶	Din interiorul organizației, factor de decizie, responsabil cu demersul respectiv
	Pentru motive preventive sau curative	Verificare preventivă, verificare prealabilă sau în urma unei probleme apărute, a constatării unei devieri, erori, disfuncționalități, greșeli, defecțiuni, conflicte

NOTE:

1. Investigare: semnifică cercetarea continuă și sistematică

2. Sistem

3. Coerență: această noțiune trimite la analiza corelării între:

- obiective și contexte (sau mediu înconjurător);
- obiective și caracteristici interne;
- obiective și mijloace aplicate;
- mijloacele însăși;
- rezultatele obținute și rezultatele posibile.

4. Planul de acțiune se referă la cauzele problemelor dar și la condițiile care favorizează eficacitatea acțiunilor

5. Referențialul: trebuie să fie cât mai formalizat posibil

6. Autoritate: a) poate fi externă domeniului studiat, dar cu acordul explicit al ierarhiei operaționale; b) declanșarea poate fi spontană, fără alt motiv decât prevenirea, sau din contră, să se facă în urma unor incidente

Cele nouă întrebări ale procesului de diagnosticare, tabelul 9.1:

- 1) Care este cadrul investigației?
- 2) Ce demers trebuie să caracterizeze acțiunea?
- 3) Cum funcționează domeniul asupra căruia trebuie condusă expertiza?
- 4) Cum ar trebui să funcționeze sistemul?
- 5) De ce nu funcționează acesta așa cum s-a prevăzut?
- 6) Care sunt consecințele și efectele datorate acestei situații?
- 7) Se poate ameliora funcționarea sa și ce obiective rezonabile se pot fixa?
- 8) Acționând asupra căror parametri și în ce manieră?
- 9) Ce consecințe ar avea modificarea asupra domeniului considerat?

Aceste întrebări oferă o cronologie de lucru care se poate decupa în două mari faze:

- caracterizarea situației de plecare, ce regroupează primele cinci întrebări;
- ameliorarea previzibilă și modalitățile de acțiune, descrise de ultimele patru întrebări.

În sfârșit, o ultimă întrebare decurge din toate cele precedente:

- 10) Cum s-ar putea verifica dacă obiectivele prevăzute au fost atinse?

9.2. Terminologie practică în diagnosticare

Metodă, demers, instrument

Metoda

Sensul acestui cuvânt poate fi definit în două moduri, ușor diferite:

- este o manieră de a acționa după un plan gândit și hotărât dinainte;
- este un ansamblu de instrumente care se utilizează succesiv, în diferite etape.

Ambele presupun faptul că un scop a fost fixat de la început. Prima definiție conduce la necesitatea unei reflecții prealabile acțiunii, a doua pune accentul pe organizarea riguroasă a mijloacelor ce se doresc a fi folosite.

În metodă există un punct de plecare, o orientare filozofică, politică și strategică în ceea ce privește maniera de a proceda. Se disting două metode ce conduc la aceeași finalitate: metoda Juran care privilegiază sensul politic și managementul și metoda Crosby care se vrea mai operațională și mai spectaculoasă căutând să mobilizeze efectivele prin intermediul acțiunilor destinate să influențeze conștiințele (ziua cu *zero defecte*, de exemplu) și să favorizeze luările la cunoștință și schimbările de comportament.

Metoda este aleasă în funcție de obiectivele procesului de diagnosticare: ea definește instrumentele, conținutul și înlănțuirea etapelor, principiile de acțiune. Metoda justifică criteriile, permițând să se decidă trecerea la etapa următoare.

Demersul

Foarte aproape de metodă, demersul nu conține ideea unui plan hotărât dinainte. Demersul este mai empiric: se ajunge la un rezultat căruia nu i se poate defini cu siguranță conținutul dinainte. Demersul include ideea de directivă. Dacă metoda trebuie să fie riguros definită și aplicată, demersul se adaptează în funcție de situațiile întâlnite. În sociologia organizațiilor se vorbește despre *demers de schimbare*. Se înțelege perfect de ce, pentru că nu există în acest domeniu

mijloace care să garanteze schimbarea căutată. Demersul reprezintă ansamblul acțiunilor planificate care vor fi folosite cu ocazia diagnosticării. Se pot include în demers etapele și cronologia lor, respectiv, lista a ceea ce trebuie făcut. Demersul depinde de metoda utilizată și de domeniul de investigare; în plus, el poate varia în funcție de complexitatea problemei și de nivelul de investigare dorit.

Instrumentul

Este, prin definiție, un obiect fabricat care servește pentru a acționa asupra materiei, a face o muncă; instrumentul desemnează adesea un obiect sau elementul de bază al unei mașini mai complexe care este în relație directă cu materia. Folosirea acestui cuvânt nu este improprie în limbajul managementului.

Unitatea de bază a *diagnosticării* este instrumentul. Cele mai des întâlnite sunt:

- matricea diagnosticării;
- diagramele de flux, diagrame bloc, logigrame;
- grile de analiză ale neconformităților;

Este esențială utilizarea unui *referențial* pentru a verifica aplicarea procedurilor, pentru a aprecia conformitatea unei organizări, a calității raportată la un referențial, pentru a analiza originile costurilor sau ale neconformităților (eroare, neaplicare de proceduri, material neadaptat sau neconform).

Diagnosticarea acoperă un câmp de investigare mult mai larg decât *auditul* și produce o analiză mai profundă. El nu se mulțumește să constate devierile, ci pune în evidență cauzele neconformităților, subliniază importanța lor relativă și indică acțiuni corective. Cu toate că se insistă asupra necesității unui referențial, diagnosticarea este adesea realizată fără document normativ formal, pentru că el trebuie să poată fi orientat în maniere diferite, în funcție de situațiile întâlnite. Diagnosticarea trebuie să permită abordarea relațiilor de la cauză la efect, cele mai neașteptate și mai neobișnuite. El trebuie, de asemenea, să rămână cât mai liber în investigațiile sale, ceea ce nu este cazul auditului. Determinările obiectivelor, analiza referențialului în raport cu un context dat și revizia sa eventuală sunt de domeniul diagnosticării. Acesta face apel la instrumente de un nivel de performanță mai înalt decât cele utilizate în mod obișnuit de audit.

Diagnosticarea calității are ca obiective:

- să dea informațiile necesare, relative la calitate pentru a permite fixarea strategiei organizației (dacă aceasta face obiectul unui demers de elaborare structurată);
- să ajute la elaborarea obiectivelor și a politicii calității (pe baza informațiilor adunate anterior), ale strategiei și politicii generale;
- să servească drept bază la elaborarea celei mai bune strategii în domeniul calității, pentru a atinge obiectivele calității și planurile de acțiune, în domeniul calității rezultante;
- să propună planurile de acțiune și programe de ameliorare adecvate politicii, obiectivelor și strategiei în domeniul calității, adaptate la funcționarea reală observată;
- să evidențieze toate neconformitățile în materie de calitate ale organizației, la toate nivelurile, după obiectivele atribuite diagnosticării, precum și cauzele lor și să le ierarhizeze pentru a ușura elaborarea planurilor de ameliorare a calității, în diversitatea originilor (tehnice, umane, informative, financiare, organizaționale).

Diagnostic de fezabilitate

Această formă de diagnosticare este foarte importantă pentru introducerea tehnicilor, metodelor sau instrumentelor noi în cadrul organizației. Ea permite să se verifice în prealabil că:

- tehnica în chestiune se aplică domeniului studiat;
- condițiile introducerii sale sunt favorabile;
- cauzele blocajelor sau respingerilor sunt bine identificate și evaluate;
- soluțiile prefigurate pentru remediere sunt bune;
- demersul prefigurat răspunde caracteristicilor terenului;
- programul de introducere este adaptat.

Această formă de diagnostic are mare importanță în momentul de față, datorită vitezei cu care evoluează tehnicile și mijloacele de producție.

Diagnosticul unei situații evolutive

Acest tip de diagnosticare este practicat atunci când, în cadrul unei probleme cunoscute sau resimțite (dar pentru care lipsește informația sau este dificil de analizat, sau pentru care cauzele sunt multiple și greu ierarhizate), trebuie făcută o investigație aprofundată a diferiților factori având, sau fiind susceptibili de a avea, o influență asupra problemei.

Diagnostic de acțiuni colective

Este practicat atunci când este necesară o reflecție comună în vederea obținerii unui consens în cadrul proiectelor, vizând evoluția modurilor de funcționare, referențiale culturale sau comportamentale.

Diagnostic de evoluție a performanței

Acest tip de diagnosticare poate lua una din următoarele forme:

- evoluția standardului spre o situație de funcționare optimă (pentru un obiectiv dat);
- reevaluarea obiectivelor calității sau ponderea lor în procesul reflecției strategice.

Autodiagnostic

Acesta este realizat chiar de părțile implicate, fiind vorba de o formă care poate fi considerată ca un ansamblu al diagnosticărilor prezentate mai înainte. Grupul constituit pentru autodiagnosticare trebuie să reunească toate competențele necesare. Diagnosticarea calității este o acțiune de investigație dusă asupra unei părți dintr-o organizație. Scopul său este de a ameliora competitivitatea organizației. Pentru aceasta:

- analizează coerența funcționării în raport de obiectivele definite în politica pentru calitate;
- reperează, măsoară și explică neconformitățile;
- propune un plan de acțiune.

Metoda utilizată trebuie să definească obiectivele, etapele succesive și principiile de acțiune.

9.3. Instrumentele procesului de diagnosticare

Pentru ca investigația să-și atingă scopul trebuie ca:

- să fie comunicate principalele tehnici de investigare ce permit obținerea de informații (astfel încât să nu se omită nimic în cercetarea informațiilor, să se verifice calitatea și precizia lor, să se tragă concluzii utilizabile);
- să fie definită utilitatea și limitele instrumentelor diagnosticului;

- să se prezinte un demers tip, de realizare a unei diagnosticări.

Tehnicile de *expertizare* sunt utilizabile, atât în cursul auditurilor, cât și al diagnosticărilor.

Instrumentele de expertizare

Observația

Nimic nu înlocuiește un contact direct cu terenul, mai ales când este vorba de a observa un mod de funcționare, adaptarea oamenilor la anumite forme de tehnică (sau de organizare), aplicarea unui consemn sau a unei proceduri. *Observația* permite scoaterea în evidență a componentelor, situațiilor pe care alte forme de diagnosticare n-ar fi putut s-o evidențieze niciodată. Observarea permite să se ia contact cu mediul, să se perceapă o ambianță, să se "filmeze" un cadru. În general, observația poate lua mai multe forme, în funcție de etapa în care se află studiul.

Analiza documentară

Constă din obținerea de informații având la dispoziție documentele pe care le posedă organizația. Această formă de investigație este întotdeauna foarte bogată. Ea permite formarea unei opinii asupra stării reale a organizației. Această analiză este indispensabilă în astfel de demersuri. Analiza documentară îmbogățește toate celelalte tehnici descrise în acest capitol. *Cercetarea documentară* (în principal asupra pieselor ce se constituie) este un mijloc fundamental al diagnosticării. Cercetarea documentară permite analiza calitativă a informațiilor, extragerea indicatorilor sau a sintezelor, verificarea tipului de informații adunate și tratate de către organizație. *Cercetarea documentară* autorizează exprimarea unui aviz exterior asupra formei și conținutului documentelor utilizate de organizație.

Analiza informațiilor existente în organizație

Este potrivit să se achiziționeze toate informațiile existente, să fie comunicate și, evident, să fie citite cu atenție. Se întâmplă foarte rar să se găsească documente precise și detaliate asupra neconformităților observate. Se va aduna, pe parcurs, o cantitate importantă de informații care vor fi organizate astfel încât să se ajungă la imaginea finală. Experiența arată că pot apare frecvent piedici în acest domeniu. Astfel, un expert insuficient pregătit va avea tendința să dispună de toate documentele aflate în dosarul său. S-a demonstrat că el nu va folosi mai mult de 30% până la 40% din acestea, pentru concluziile finale. Totuși, cunoașterea celorlalte piese poate avea o anumită importanță.

Analiza pieselor de întocmit

În cazul precis al unui diagnostic al calității, evaluarea a ceea ce se numește costurile noncalității presupune să se dispună de o informație importantă. Din nefericire, aceasta este foarte rar disponibilă. Ca urmare, este necesar ca informația să fie constituită pe baza documentelor de înregistrare. Aceasta este o parte importantă a muncii de diagnosticare și poate lua multiple forme, putându-se aplica la toate neconformitățile.

Există o altă tehnică documentară, și anume *sondajul*. Acesta constă din realizarea, într-o manieră empirică sau statistică (cu definirea riscurilor), unui eșantion și obținerea din această sursă a concluziilor aplicabile ansamblului populației.

Pe de altă parte, expertul poate desemna pe cineva să facă o operațiune, sub controlul său, în scopul evaluării modului în care operațiunea se desfășoară și pentru a se asigura de validitatea rezultatelor și condițiilor de realizare. În acest mod, se pune în evidență o neconformitate.

Se poate da un exemplu de aplicare a acestei tehnici în domeniul capacității instrumentelor de măsură. Validitatea unei operații de control în atelier poate fi contestată, fie arătând că operatorul nu are competența necesară, fie că aparatul nu are precizia sau repetabilitatea dorită. Este suficient să se realizeze un ansamblu de măsuri "in situ" și să se verifice rezultatele în condiții normale.

Convorbirea

Este o situație privilegiată ce reunește expertul cu o persoană aleasă să prezinte un domeniu pe care-l cunoaște, aducând informații, reflectând asupra unei situații. Ținând cont de dinamica interactivă și evolutivă caracteristică, această tehnică nu este neutră și trebuie utilizată cu unele precauții în ceea ce privește comunicarea, calitatea informațiilor obținute, etc.

Convorbirea este adesea împărțită între două forme diferite de acțiune:

- directivă (pornind de la întrebări al căror număr și ordine răspund la o logică fixată dinainte);

- nedirectivă (întrebări deschise).

În toate cazurile se impune utilizarea ghidurilor de conversație, a check-listelor de întrebări, etc. Aceasta reprezintă o formă privilegiată de culegere a informațiilor. Este foarte bogată, întrucât operatorul poate reacționa în fiecare moment asupra unei propuneri și asupra unei situații prezente, și, pornind de la aceasta, să fie condus spre anumite informații ascunse, sau a căror importanță nu era dezvăluită anterior de către persoana care le furniza. Convorbirea permite, de asemenea, să se evidențieze date necunoscute sau considerate de neschimbat.

Convorbirea reprezintă singurul mod de a proceda conform unei metode, pentru a limita erorile și omisiunile într-o intervenție care trebuie să fie cât se poate de exhaustivă.

Chestionarul

Atunci când problema este suficient de bine studiată și când colaborarea interlocutorilor este garantată, ca metodă de lucru se utilizează chestionarul. Valoarea informațiilor astfel adunate este uneori dificil de apreciat.

Din această tehnică au reieșit altele două, care încearcă să se generalizeze. Acestea sunt *autoraportul* (descrierea unei situații de către persoana sau persoanele interesate) și *autoevaluarea*. Aceasta din urmă este folosită cu precădere în funcțiile administrative.

Autoevaluarea permite celui interesat să ia la cunoștință de repartiția timpului său:

- sarcini legate de misiunea de bază;
- sarcini de informare a altora;
- sarcini de reglementare;
- tratarea urgențelor;
- reluarea unei munci deja realizate.

Chestionarul este folosit și pentru a cunoaște nivelul de satisfacere al utilizatorilor, al consumatorilor unui produs sau al beneficiarilor unui serviciu.

Observarea permite aprofundarea nivelului de cunoștințe deja dobândit, validarea informațiilor și, ca urmare, asigurarea obiectivității lor. Observarea se utilizează, în principal, pentru analizarea

comportamentului indivizilor într-un context dat, individual dar și colectiv, sau pentru a studia felul în care este aplicată o instrucțiune, o recomandare sau o procedură, sau modul cum este executată o sarcină.

Combinarea tehnicilor

Alegerea uneia sau alteia din aceste tehnici depinde de mai multe criterii:

- tipul procesului de diagnosticare ales;
- nivelul de cunoaștere a domeniului ce se studiază;
- nivelul de încredere care se dorește a fi dat informațiilor culese.

9.4. Analiza informațiilor adunate, concluziile și raportul

Raportul procesului de diagnosticare este un element capital pentru că este singura urmă a muncii realizate ce ține cont de toate elementele diagnosticului. Raportul rezultă din analiza informațiilor adunate și din interpretarea făcută de expert. Cu cât munca a fost mai participativă cu atât concluziile sunt de la început împărtășite de protagoniști. În toate cazurile această abordare limitează repunerea în cauză a informațiilor, servind drept bază a analizei (pentru că ele au fost furnizate și adunate de persoanele în cauză).

Procesul de diagnosticare este forma privilegiată de investigare a unui sistem care încearcă să evolueze, fie prin reducerea neconformităților sale, fie prin ameliorarea nivelului său de performanță. Posedarea unei metode de diagnosticare este o necesitate fundamentală pentru calitatea investigației realizate.

Utilitatea diagnosticării rezidă din:

- dispune de o *abordare structurală* asupra sistemului, datorită unui model de referință coerent;
- are *instrumente operaționale* care permit colectarea unui volum cât mai mare de informații utile, organizarea colectării acestor informații urmând o schemă conducătoare dată (faza de teren), și care simplifică exploatarea acestor informații pentru a proceda la o analiză pertinentă;
- servește drept *bază de comunicare* printr-o reprezentare a rezultatelor care ușurează înțelegerea lor, plecând de la informațiile adunate cu ocazia procesului de diagnosticare.

O metodă de diagnosticare trebuie să dea linii directoare de lucru, și să furnizeze următoarele:

- o listă de întrebări care trebuie puse;
- o organizare a acestor întrebări și cronologia lor;
- un mod de colectare a răspunsurilor și informațiilor;
- un mod de tratare a răspunsurilor obținute.

Limitele sale au mai multe surse:

- caracterul general al unei metode evaluate;
- predictibilitatea asupra a ceea ce se poate determina;
- maniera în care metoda va fi utilizată.

Procesul de diagnosticare reprezintă un moment important pentru analiza unei situații, produs, sistem, organizație, etc. Prin diagnosticare trebuie să ne plasăm la originea reflecțiilor (și uneori a îndoielilor), a analizelor și repunerilor în cauză de la care poate pleca un proces de evoluție, [1]. Derularea procesului de diagnosticare trebuie gândită în acest spirit.

9.5. Calitatea informației

Pentru o eficientizare maximă a diagnosticării, organizația trebuie să-și definească cu mare precizie nevoile de informație. Aceasta implică evaluarea obiectivelor căutate și delimitarea domeniului. Obiectivele sunt mai mult sau mai puțin explicite, în funcție de operator și de modul de formare al problemei; trebuie admisă o anumită marjă de manevră la acest nivel astfel încât să se păstreze posibilitatea de evaluare în funcție de situațiile întâlnite.

Pe de altă parte, determinarea câmpului de investigare presupune delimitarea unui anumit cadru de referință și existența unui model explicit al domeniului. Plecând de la acest model este posibilă constatarea unor abateri sau devieri.

În cele din urmă trebuie efectuat inventarul nevoilor de informare.

Noțiunea de „calitate” este una complexă, cu utilizări în multe domenii unde i se atribuie diferite sensuri, motiv pentru care este greu a se formula o definiție unică și riguroasă:

- *calitate* - măsura în care un ansamblu de caracteristici intrinseci ale unui produs, proces sau sistem îndeplinește cerințele declarate;
- *caracteristică* - trăsătură distinctă;
- *cerință* - nevoie sau așteptare implicită sau obligatorie;
- *proces* - ansamblu de activități corelate sau în interacțiune care transformă elemente de intrare în elemente de ieșire. În general, elementele de intrare într-un proces sunt elemente de ieșire ale altor procese. Procesele dintr-un sistem sunt planificate și se desfășoară în condiții controlate pentru a adăuga valoare.
- *organizație* - grup de persoane și facilități cu un ansamblu de responsabilități, autorități și relații determinate (companie, corporație, firmă, instituție, comerciant individual, asociație);
- *produs* - rezultat al unui proces;

Informația reprezintă un mesaj, un semnal care reflectă starea unui sistem sau a mediului în care aceasta funcționează și care aduce beneficiarului său, un spor de cunoaștere.

Informația este supusă unui proces de prelucrare furnizându-i destinatarului elemente noi, valorificabile în exercitarea sarcinilor și realizarea obiectivelor ce-i revin.

Cunoașterea și gestionarea unei unități economice solicită identificarea faptelor și evenimentelor care generează date, delimitând precis obiectivele cunoașterii și conducerii, stabilind purtătorii materiali de informație, precum și modalitățile prin care se culeg și se înregistrează datele, metodele și instrumentele de prelucrare a acestor date și destinația informațiilor, transferul lor la destinatar.

Utilizând simboluri asociate cu realitatea, *informația* este folosită în caracterizarea ordinii și a organizării specifice, în studiul procesului de reflectare, căpătând semnificații proprii fiecărui domeniu al cunoașterii.

În general, informația rezultată în procesul cunoașterii este privită ca o cunoștință, o reflectare a realității obiective în cunoștința umană.

Informația este caracterizată în mare măsură prin gradul de subiectivitate-obiectivitate, referindu-se la dependența acesteia de utilizator, de intervalul de timp asupra căruia face referință, dar și de aspectele calitative și cantitative, cu exemplificarea clasică ”informația contabilă”. Informației trebuie să i se asocieze o valoare de utilitate, respectiv, speranța de economie, calculată prin diferență realizată între efectele unei decizii promovate, în și fără elementul ”cunoaștere” a

informației respective. Valoarea de utilitate a unei informații este strict dependentă de aspectul fizic, dar și de aspectul uzurii morale, aspect prioritar datorat mediului caracterizat printr-o maximizare a dinamismului acestuia.

Pentru a fi eficientă, informația trebuie să fie fundamentată științific, să fie oportună, să fie captată la timp și de cine trebuie, fiind clară și nu contradictorie.

Calitatea informației se “măsoară” prin întocmirea unor parametrii specifici dintre care cei mai importanți sunt:

- *dinamismul* – în sensul evidențierii procesului de muncă în evoluția lui și nu static;
- *multilaritatea* – asigurată de abordarea fenomenului și procesului prin prisma unor aspecte de natură economică, tehnică, socială și regăsirea acestei informații;
- *realismul* – reprezintă utilizarea de informații care să respecte fidel situația firmei și a mediului său contextual;
- *oportunitatea* – culegerea, înregistrarea, transmiterea și prelucrarea informațiilor în timpul utilizării, asigurându-se derularea de procese decizionale, operaționale, eficace;
- *siguranța și precizia* – evidențierea aspectelor de esență și detaliu care să elimine ambiguitatea mesajului;
- *sinteza și conciziunea* - prezentarea informațiilor cu economie de mesaje ajutând astfel managerii, aflați într-o permanentă criză de timp;
- *specificitatea* – data de adoptare a informației la particularitățile utilizatorului, referitoare la nivelul de pregătire, timpul de care dispune pentru a fi rezolvată.

Informația este „sângele care irigă”, asigurând robustețea organizației. Așa cum sistemul circulator este dispus într-o simetrie perfectă față de scheletul uman, sistemul informațional se pliază pe structura organizatorică cu puncte nodale din care se ramifică sau în care se concentrează informația potrivit cerințelor exprimate de centrii decizionali ai organizației. Din această cauză parametrii organizării funcționale se află în strânsă legătură cu structura organizatorică.

Ar fi incorect să afirmăm că certitudinea există numai acolo unde există și o informație perfectă, de unde s-ar deduce simplu că problemele apar numai din cauza absenței informației perfecte. Din acest motiv punem accentul pe culegerea metodică a cât mai multă informație, ca o premiză esențială a soluționării unei probleme. Cu toate acestea, ne confruntăm cu trei dificultăți majore – adesea datele sunt incomplete, mare parte a lor sunt prezentate sub formă de opinii sau pot fi deduse numai din relația aparentă dintre fapte ori evenimente. De aici rezultă că o sarcină majoră a inginerului este de a verifica informațiile disponibile, în ceea ce privește acuratețea, validitatea și veridicitatea lor, ca o permisă pentru a determina relațiile dintre aspectele semnificative pentru soluționarea respectivei probleme. Deși acuratețea absolută înseamnă adevăr, este greșit să deducem că un nivel mai scăzut de acuratețe duce la concluzii eronate și că, în consecință, acest lucru este inacceptabil. În lumea afacerilor, rareori se cere un grad de precizie similar celui dintr-un laborator științific, fiind suficientă o estimare rezonabilă.

9.6. Diagnosticarea sistemelor reparabile pe baza mentenanței

Mentenanța ce ia în calcul starea sistemului (MSS), este un program ce presupune că deciziile privind mentenanța sunt luate pe baza informațiilor colectate prin monitorizarea stării respectivului sistem. Acest program are trei etape principale: achiziția de date, prelucrarea datelor și luarea

deciziilor de mentenanță. **Diagnosticarea și expertizarea stării** sistemului sunt două aspecte importante ale unui program MSS.

Fiabilitatea a reprezentat întotdeauna un aspect important în evaluarea sistemelor industriale și/sau a echipamentelor. Evident că, o proiectare adecvată va conduce la produse cu fiabilitate ridicată. Cu toate acestea, chiar dacă proiectarea s-a făcut la parametri ridicați, produsele se deteriorează în timp, deoarece acestea funcționează sub anumite tensiuni introduse de sarcini de exploatare și alte acțiuni exterioare (ale mediului înconjurător, etc.), implicând adesea variații aleatorii. Mentenanța a fost introdusă ca o modalitate eficientă de a asigura un nivel satisfăcător de fiabilitate pe parcursul duratei de viață utilă a unui produs.

Cea mai veche tehnică de mentenanță este, în principiu, mentenanța privitoare la monitorizarea defecțiunilor sau a cedărilor (numită și mentenanța neplanificată sau mentenanța la întreruperi), care are loc doar atunci când apar defecțiuni/cedări/funcționare neconformă. O tehnică de mentenanță anterioară defectării/cedării, este o mentenanță preventivă bazată pe activități în timp (numită și mentenanță planificată), care stabilește un interval periodic pentru a efectua intervenții preventive, indiferent de starea unui produs. Odată cu dezvoltarea rapidă a tehnologiei moderne, produsele au devenit din ce în ce mai complexe, astfel, în timp sunt necesare o mai bună calitate și o fiabilitate mai mare. Acest lucru conduce la creșterea costului mentenanței preventive. În cele din urmă, mentenanța preventivă a devenit o cheltuială majoră pentru multe companii industriale. Prin urmare, pentru a face față situației sunt puse în aplicare abordări mai eficiente de mentenanță, cum ar fi mentenanța bazată pe starea sistemului (MSS).

MSS este un program de mentenanță ce recomandă acțiuni de intervenție și reparații pe baza informațiilor colectate prin **monitorizarea stării sistemului**. MSS încearcă să evite acțiuni inutile de mentenanță prin efectuarea de lucrări de întreținere doar atunci când există dovezi inițiale ale comportamentelor anormale ale unui produs. Un program MSS, dacă este stabilit corespunzător și implementat eficient, poate reduce semnificativ costurile de întreținere prin reducerea numărului de operațiuni de mentenanță preventivă inutile.

Un program MSS constă din trei pași cheie [2] (vezi figura 1):

1. Achiziția de date (colectarea informațiilor), pentru a obține date și parametri relevanți pentru funcționarea corectă a sistemului.
2. Procesarea a datelor (prelucrarea informațiilor), pentru a gestiona și analiza datele, informațiile sau semnalele colectate în etapa 1 pentru o mai bună vizualizare a tendințelor parametrilor de funcționare și a celor de defect.
3. Luarea deciziei de efectuare a mentenanței conținând și recomandări privitoare la acțiuni eficiente de întreținere.

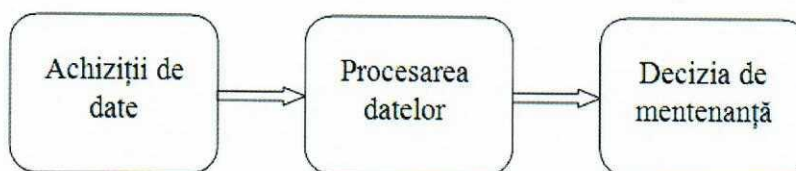


Fig. 9.1. Pașii în programul de mentenanță pe baza monitorizării stării sistemului

Diagnosticarea și expertizarea sunt două aspecte importante ale unui program MSS. **Diagnosticarea** se ocupă cu detectarea, izolarea și identificarea defecțiunilor, atunci când acestea apar. Detectarea defecțiunilor este o sarcină care indică faptul că, în sistemul monitorizat, ceva a

cedat sau nu funcționează la parametrii proiectați. Izolarea defecțiunilor se referă la acțiunile de localizare a componentei defecte. Prin identificarea defecțiunilor se determină natura și mărimea defecțiunii după ce aceasta a fost detectată și identificată. **Expertizarea** se face când sistemul funcționează la parametrii proiectați, ca urmare, înainte de apariția defecțiunii, încercând să se previzioneze modul în care va evolua sistemul, și în ce măsură și după cât timp în cadrul acestuia va apărea o defecțiune. Expertizarea se ocupă de *predicția* defecțiunilor înainte de a se produce și se face pentru a determina dacă o cedare este iminentă și pentru a estima în ce moment și cât de probabil se va produce o defecțiune. Diagnosticarea este o analiză a evenimentelor posterioare, iar expertizarea este o analiză a evenimentelor anterioare. Expertizarea este mult mai eficientă decât diagnosticarea și se face pentru ca să nu se ajungă la cedări, înainte de reparațiile programate. Diagnosticarea este necesară, totuși, atunci când predicția privind defectarea a dat greș și sistemul cedează anticipat.

9.6.1. Achiziția de date

Achiziția de date este un proces de colectare și stocare a datelor utile (informațiilor) din cadrul sistemului aflat în funcțiune. Acest proces este un pas esențial în implementarea unui program MSS de diagnosticare și expertizare a defecțiunilor mecanice (sau a cedării, care este, de obicei, cauzată de una sau mai multe defecțiuni ale componentelor). Datele colectate într-un program MSS pot fi clasificate în două tipuri principale: date despre evenimente și date de monitorizare a stării sistemului.

Datele despre evenimente includ informațiile despre ceea ce s-a întâmplat (de exemplu, instalarea, punerea în funcțiune, revizia etc. și care au fost cauzele) și/sau intervențiile realizate după punerea în funcțiune (de exemplu: reparații minore, mentenanță preventivă, schimbarea uleiului, etc.). Datele privind monitorizarea stării sistemului sunt preluate de la măsurători legate de funcționarea corectă sau cu defecțiuni a sistemului.

Datele privind monitorizarea stării sistemului sunt foarte diverse. Pot fi date preluate de la vibrații, date acustice, date de analiză a uleiului, temperatură, presiune, umiditate, date meteorologice sau de mediu etc. S-au proiectat diferiți senzori, cum ar fi microsenzori, senzori ultrasonici, senzori de emisie acustică etc. pentru a colecta diferite tipuri de date [3, 4].

Tehnologiile wireless, cum ar fi Bluetooth, au oferit o soluție alternativă la comunicarea eficientă de date, din punct de vedere al costurilor. Sistemele informatice de mentenanță, cum ar fi sistemele de management al mentenanței computerizate (SMMC), sistemele de planificare a resurselor întreprinderii etc., au fost dezvoltate pentru stocarea și prelucrarea datelor [5].

Colectarea datelor în legătură cu evenimentele, necesită, de obicei, introducerea manuală a datelor în sistemele informatice. Odată cu dezvoltarea rapidă a tehnologiilor computerizate și a senzorilor avansați, facilitățile și tehnologiile de achiziție a datelor au devenit mai puternice și mai puțin costisitoare, făcând achiziția de date pentru implementarea MSS mai accesibilă și fezabilă. În practica MSS, se tinde să se pună accent mai mult pe colectarea datelor de monitorizare a stării și să negligeze, uneori, colectarea datelor în legătură cu evenimentele. Acest lucru rezultă din credința eronată că datele privitoare la evenimente nu sunt valoroase atâta timp cât indicatorii (sau caracteristicile) de stare par să aibă valorile normale care nu arată că echipamentele sunt pe cale să cedeze. Această convingere este incorectă, deoarece datele privitoare la evenimente sunt utile, cel puțin pentru evaluarea performanței indicatorilor de stare (sau a caracteristicilor) actuale și pot fi

folosiți ca feedback pentru proiectantul de sistem în vederea modificării sau îmbunătățirii indicatorilor de stare. Neglijarea acestor date se poate datora faptului că, de obicei, colectarea datelor privind evenimentele necesită introducerea manuală a acestora. Odată ce apare implicarea umană în colectarea și introducerea datelor, totul devine mai complicat și predispus la erori. O soluție ar putea fi implementarea automatizării colectării și raportării datele privitoare la evenimente în sistemul informatic de mentenanță.

9.6.2. Prelucrarea datelor

Primul pas al prelucrării îl reprezintă *eliminarea datelor* care nu sunt reprezentative pentru sistemul de mentenanță studiat sau a celor ce prezintă erori. Procesarea datelor este un pas important deoarece acestea, în special cele despre evenimente, care de obicei sunt introduse manual, conțin întotdeauna erori. Efectuarea acestui prim pas mărește șansa de utilizare pentru analize și modelări ulterioare a datelor valide (fără erori). Apariția datelor eronate este cauzată de mulți factori, inclusiv factorul uman. Pentru datele privitoare la monitorizarea stării sistemului, erorile pot fi cauzate de defecțiunile senzorilor. În acest caz se procedează la izolarea senzorilor cu defecțiuni [6]. Pentru eliminarea erorilor se utilizează, fie examinarea manuală a datelor fie instrumente grafice.

Următorul pas al prelucrării datelor îl reprezintă *analiza datelor*. În literatură sunt disponibile o varietate de modele, algoritmi și instrumente pentru analiza de date și pentru o mai bună înțelegere și interpretare a acestora. Modelele, algoritmii și instrumentele folosite pentru analiza datelor depind, în principal, de tipurile de date colectate.

După cum s-a menționat mai sus, datele achiziționate ce privesc monitorizarea stării sistemului sunt diverse. Acestea se încadrează în trei categorii:

Date de tip valoare: datele achiziționate într-o anumită perioadă de timp pentru o variabilă privitoare la monitorizarea stării sistemului au o anumită valoare. De exemplu, datele de analiză a uleiului cum ar fi, temperatura, presiunea și umiditatea, sunt date de tip de valoare.

Date sub formă de undă: datele colectate într-o anumită perioadă de timp pentru o variabilă privitoare la monitorizarea stării sistemului sunt adesea sub formă de undă, ca urmare au o variabilitate periodică în raport cu timpul. De exemplu datele privind vibrațiile și datele acustice furnizează un semnal de tip undă.

Date de tip multidimensional: datele achiziționate într-o anumită perioadă de timp pentru o variabilă privitoare la monitorizarea stării sistemului pot fi multidimensionale. Cele mai frecvente date multidimensionale sunt date de imagine, cum ar fi termografie în infraroșu, imagini cu raze X, imagini vizuale, etc.

Prelucrarea semnalelor de tip undă și a datelor multidimensionale se mai numește și **procesarea semnalelor**. Au fost dezvoltate diferite tehnici de prelucrare a semnalelor pentru a analiza și interpreta datele de tip undă și date multidimensionale, pentru a extrage informații utile în vederea diagnosticării și expertizării. Procedura de extragere a informațiilor utile din semnalele brute se numește extragerea caracteristicilor.

Prelucrarea semnalelor de tip multidimensional, cum ar fi procesarea imaginilor, este similară, dar mai complicată decât prelucrarea semnalului de undă pentru că au cel puțin o dimensiune în plus. În practică, imaginile brute sunt foarte complicate și nu avem informații imediate ca, pe baza acestora, să putem detecta defecțiunile. În aceste cazuri, pentru a extrage caracteristici utile din

imaginile brute în vederea diagnosticării defecțiunilor, tehnicile de prelucrare a imaginilor trebuie să fie complexe [7, 8]. Prelucrarea imaginilor pare inutilă atunci când imaginile brute furnizează informații suficiente și clare pentru a detecta defectele. Cu toate acestea, în astfel de situații, prelucrarea imaginilor poate ajuta la extragerea funcțiilor pentru detectarea automată a defecțiunilor. În plus, față de imaginile brute obținute prin achiziția de date, unele tehnici de prelucrare a formei de undă, cum ar fi analiza timp-frecvență, produc, de asemenea, imagini. În aceste situații, prelucrarea imaginilor poate fi combinată cu procesarea formei de undă pentru a obține rezultate mai bune. De obicei, prelucrarea semnalului la un nivel scăzut este suficient de bună pentru a obține rezultate satisfăcătoare. Ca atare, există puține cercetări în ceea ce privește prelucrarea avansată a imaginilor în diagnosticarea și expertizarea mașinilor. În secțiunile următoare sunt analizate tehnicile de prelucrare a semnalelor de tip undă și apoi sunt discutate tehnicile de analiză pentru alte tipuri de date.

9.6.3. Analiza datelor din cadrul semnalelor de tip undă

În literatura de specialitate sunt prezentate numeroase tehnici și algoritmi de prelucrare a semnalelor pentru diagnosticarea și expertizarea sistemelor mecanice. Având în vedere multiplele posibilități existente, sunt necesare cunoștințe și investigații dependente de fiecare caz în parte pentru a selecta instrumentele adecvate de procesare a semnalelor. Datele cele mai comune de tip undă, utilizate în monitorizarea stării sistemelor, sunt semnalele date vibrații, de emisiile acustice și semnalele provenite de la ultrasunete. În literatură există trei categorii principale de analiză a datelor de tip undă: analiza în funcție timp, analiza în funcție de frecvență și analiza spațială timp-frecvență.

9.6.3.1. Analiza în funcție de timp

Analiza în funcție de timp se bazează în mod direct pe variația formei de undă în timp. Analiza tradițională în funcție de timp calculează caracteristicile semnalelor de undă în timp ca statistici descriptive, cum ar fi media, valorile maxime și minime, perioada, deviația standard, factorul de creștere, rădăcina medie pătratică, parametri de zgomot, aplatizarea, etc. Aceste caracteristici sunt numite caracteristici variabile în timp. O abordare comună de analiză a datelor variabile în timp o reprezintă media sincronă în timp. Ideea este de a folosi media ansamblului semnalului brut pe o serie de evoluții, în încercarea de a elimina sau de a reduce zgomotul și efectele din alte surse, pentru a pune cât mai bine în evidență componentele de interes din cadrul semnalului. Media sincronă este dată de relația:

$$\bar{s}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s(t + nT), \quad 0 \leq t < T \quad (9.1)$$

unde $s(t)$ reprezintă semnalul, T este perioada de mediere și N este numărul de probe pentru mediere.

Abordările mai avansate ale analizei datelor variabile în timp, aplică modele de tip serii de timp pentru datele de tip undă. Ideea principală a modelării seriei de timp este de a potrivi datele de tip undă cu un model parametric de serie funcție timp și de a extrage caracteristicile bazate pe acest model parametric. Modelele comune utilizate în literatura de specialitate sunt: modelul autoregresiv

(MAR) și modelul cu mișcare autoregresivă (MMAR). Un model MMAR de ordin (p, q) , este exprimat prin relația:

$$x_t = a_1 x_{t-1} + \dots + a_p x_{t-p} + \varepsilon_t - b_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - b_q \varepsilon_{t-q} \quad (9.2)$$

unde x este semnalul sub formă de undă, ε este o mărime independentă ce prezintă o distribuție normală cu media 0 și varianța constantă σ^2 , iar a_i, b_i sunt coeficienți de model.

Un model de tip AR (autoregresiv) de ordin p este un caz special de MMAR(p, q) cu $q = 0$. Exemple de utilizare a acestui model: semnale de vibrație colectate de la un motor de inducție utilizând coeficienții modelului AR ca elemente extrase, rețele neuronale cu propagare inversă, analiza semnalelor de vibrații. În practică, aplicarea modelelor AR sau MMAR este dificilă datorită complexității modelării, în special a necesității de a determina ordinea în model. Există multe alte tehnici de analiză a semnalelor variabile în timp sub formă de undă în vederea diagnosticării defectelor mecanice.

9.6.3.2. Analiza în funcție de frecvență

Analiza în funcție de frecvență se bazează pe transformarea semnalului în domeniul frecvenței. Avantajul analizei în funcție de frecvență, în raport cu analiza în funcție de timp, îl reprezintă capacitatea sa de a identifica și de a izola cu ușurință anumite componente cu frecvențe de interes. Cea mai folosită analiză convențională este analiza spectrului prin intermediul transformatei Fourier (TF). Ideea principală a analizei spectrului este, fie să privim întregul spectru, fie să privim îndeaproape anumite componente cu frecvențe de interes și, astfel, să extragem caracteristicile semnalului [9, 10, 11]. Cel mai utilizat instrument corespunzător analizei în funcție de frecvență este spectrul de putere. Acesta este definit ca $E[X(f)X^*(f)]$, unde $X(f)$ este transformata Fourier a semnalului $x(t)$, E reprezintă valoarea așteptată și $*$ este conjugata complexă. Unele instrumente utile pentru analiza spectrului de frecvențe sunt: prezentarea grafică a spectrului, filtre de frecvență, analiza învelitorii spectrului (denumită și demodularea amplitudinii), analiza structurii benzii laterale, etc. Transformata Hilbert, care este un instrument util pentru analiza învelitorii spectrului, a fost utilizată, de asemenea, pentru detectarea și diagnosticarea defecțiunilor mecanice [12].

În ciuda acceptării largi a spectrului de putere, în anumite cazuri au fost dezvoltate alte spectre utile pentru prelucrarea semnalelor care s-au dovedit a avea propriile avantaje față de spectrul TF. Cepstrumul are capacitatea de a detecta armonicile și modelele de benzi laterale în spectrul de putere. Există mai multe versiuni ale definiției cepstrumului. Dintre acestea, cel mai frecvent utilizat este cepstrumul de putere, care este definit ca transformata Fourier inversă (TFI) a spectrului de putere logaritmică. Spectrul de înaltă ordine, adică bispectrumul sau trispectrumul, poate furniza mai multe informații de diagnosticare decât spectrul de putere pentru semnale de tip non-Gaussian. În literatura de specialitate, spectrul de înalte frecvențe se numește și statistică de înaltă ordine [13]. Această denumire provine din faptul că, bispectrumul și trispectrumul sunt de fapt transformatele Fourier ale statisticilor de ordin trei, respectiv patru, pentru forma de undă variabilă în timp. Analiza bispectrum s-a dovedit a fi o aplicație utilă în diagnosticarea diferitelor sisteme mecanice, cum ar fi roțile dințate, rulmenții, mașinile rotative și mașinile de inducție. Exemple de utilizare a analizei bispectrum: aplicarea dreptei diagonale la diagnoza defecțiunilor roților dințate și a uzurii lagărelor. O nouă tehnică, numită holospectrum, este utilizată pentru a

integra toate informațiile despre faza, amplitudinea și frecvența unui semnal de undă. În general, există două tipuri de abordări pentru estimarea spectrului de putere. Primul tip, este o abordare non-parametrică ce estimează secvența de autocorelație a semnalului și apoi aplică transformata Fourier în secvența de autocorelație estimată. Al doilea tip, include abordările parametrice care construiesc un model parametric pentru semnal și apoi estimează spectrul de putere pe baza modelului estimat. Dintre acestea, spectrul AR și spectrul MMAR bazat pe modelul AR și, respectiv, modelul MMAR sunt cele două spectre parametrice cel mai frecvent utilizate în diagnosticarea defecțiunilor în ingineria mecanică.

9.6.3.3. Analiza timp-frecvență

O limitare a analizei în funcție de frecvență conduce la incapacitatea de a gestiona semnale de undă non-staționare, care sunt foarte frecvente atunci când apar defecțiuni ale mașinilor. Astfel, a fost elaborată analiza timp-frecvență, care investighează semnalele de undă atât în funcție timp cât și în funcție de frecvență, pentru semnale de undă non-staționare. Analiza tradițională a frecvenței în timp folosește distribuțiile de timp-frecvență, ce reprezintă energia sau puterea semnalelor de undă în funcțiile bidimensionale, atât ale timpului cât și ale frecvenței, pentru a dezvălui mai bine modelele de tip defecțiune pentru o diagnoză mai precisă. Transformata Fourier de scurtă durată (TFSD) sau spectrograma (puterea TFSD) și distribuția Wigner-Ville [14] sunt cele mai comune distribuții de timp-frecvență. Ideea transformatei Fourier de scurtă durată este de a împărți întregul semnal de undă în segmente cu fereastră de scurtă durată și apoi de a aplica transformata Fourier pentru fiecare segment. Spectrograma are o anumită limitare în rezoluția de timp-frecvență datorită segmentării semnalului. Se poate aplica numai semnalelor non-staționare cu schimbări lente în dinamică. Transformatele biliniare nu se bazează pe segmentarea semnalelor și, astfel, depășesc limita de rezoluție a analizei timp-frecvență a spectrogramei. Cu toate acestea, există un dezavantaj principal al transformatelor biliniare datorate caracteristicilor de interferență formate de transformata însăși. Aceste caracteristici de interferență fac dificilă interpretarea distribuției estimate. Au fost dezvoltate transformate îmbunătățite, cum ar fi distribuția Choi-Williams, pentru a depăși acest dezavantaj.

O altă transformată pentru analiza timp-frecvență este transformarea Wavelet. Spre deosebire de o distribuție de timp-frecvență, care reprezintă o reprezentare a frecvenței în timp a unui semnal, transformarea Wavelet este o reprezentare în timp a unui semnal. Teoria Wavelet a fost dezvoltată rapid în ultimul deceniu și are o aplicare largă [15]. O transformată wavelet continuă este definită ca:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (9.3)$$

unde $x(t)$ este semnalul de undă, a este un parametru scalar, b este un parametru funcție de timp și $\psi(\bullet)$ este un Wavelet, care este o funcție oscilantă în jurul valorii medii (zero) centrată în jurul valorii de zero cu o energie finită iar "*" este un conjugat complex.

În mod obișnuit, Waveleturile cele mai utilizate sunt Morlet, pălăria mexicană, Haar, etc. Ca și transformata Fourier, transformata Wavelet are, de asemenea, forma discretă care este obținută prin discretizarea a și b și exprimând $x(t)$ în formă discretă. Similar cu transformata Fourier rapidă (TFR), este de asemenea disponibilă pentru calcul o transformată rapidă a wavelet-ului. Analiza Wavelet a unui semnal de tip undă exprimă semnalul într-o serie de funcții oscilatoare cu

frecvențe diferite, la un moment diferit, prin dilatări ale parametrului de scală a , cu translație în raport cu parametrul de timp b . Pentru a interpreta semnalul, similar cu spectrul de putere și spectrul de fază din analiza Fourier, se utilizează o scalogramă definită ca $|W(a,b)|^2$ și un spectru de fază Wavelet definit ca unghiul de fază al variabilei complexe $W(a,b)$. Un avantaj principal al transformării Wavelet îl reprezintă abilitatea sa de a produce o rezoluție înaltă a frecvenței, pentru frecvențe joase, și o rezoluție înaltă de timp, la frecvențe înalte, pentru semnale cu frecvențe joase de lungă durată și frecvențe înalte de durată scurtă. Un alt avantaj al transformării Wavelet este capacitatea sa de a reduce zgomotul în semnalele brute. Transformata Wavelet a fost aplicată cu succes la analiza datelor de tip undă în diagnosticarea defectelor din roțile dințate, a rulmenților și a altor sisteme mecanice [16, 17, 18].

9.6.4. Analiza datelor tip de valoare

Datele de tip de valoare includ atât datele brute obținute prin achiziția datelor, cât și valorile caracteristice extrase din semnalele brute prin prelucrarea semnalelor. Datele de tip valoare arată mult mai simplu decât datele de tip undă și datele furnizate de către imagini. Cu toate acestea, complexitatea constă în structura de corelare atunci când numărul variabilelor este mare. Tehnicile de analiză multivariate, cum ar fi *analiza componentelor principale* (ACP) și *analiza componentelor independente* (ACI), sunt foarte utile pentru gestionarea datelor cu structură de corelare complicată. Când numărul variabilelor este mare, pentru reducerea datelor pot fi utilizate tehnici de micșorare a dimensiunilor, cum ar fi ACP și urmărirea variației. Tehnicile de analiză a tendințelor, cum ar fi analiza de regresie și modelul de serie de timp, sunt tehnicile utilizate în mod obișnuit pentru analizarea datelor de tip de valoare. De exemplu, Grimmeliuss și colab. [19] a dezvoltat un sistem prototip de monitorizare și diagnosticare a condițiilor pentru instalațiile de refrigerare cu comprimare utilizând un model de analiză de regresie pentru a prezice comportamentul funcțional al sistemului. Yang și colab. [20] au stabilit un model MMAR (model cu mișcare autoregresivă) pentru a extrage caracteristicile din datele on-line în diagnosticarea echipamentelor energetice. Sinha [21] a aplicat atât regresia polinomială, cât și un model MMAR pentru a prezice tendința la amplitudine a vârfurilor de vibrații.

9.6.5. Analiza combinațiilor de date privitoare la eveniment și de monitorizare a stării

Analiza datelor privitoare la eveniment este bine cunoscută ca analiza fiabilității sistemului, care potrivește datele privitoare la eveniment într-un interval de timp, luând în considerare probabilitatea ca un eveniment să aibă loc până la un timp prestabilit. Este avantajos ca datele privind evenimentele și cele privind monitorizarea stării sistemului să fie analizate împreună. Această analiză combinată a datelor poate fi realizată prin construirea unui model matematic care descrie, în mod corespunzător, mecanismul de bază al unei defecțiuni. Modelul construit pe baza datelor de monitorizare a evenimentului și a stării sistemului reprezintă baza pentru suportul decizional de mentenanță - diagnosticare și expertiză.

Un model probabilistic în funcție de timp (MPT), care este un model comun în *analiza duratei de viață*, este adecvat pentru analizarea împreună a datelor de monitorizare a evenimentelor și a stării sistemului. Meritul unui MP dependent de timp îl reprezintă capacitatea sa de a raporta probabilitatea de defecțiune atât la variabilele funcție de timp, cât și la variabilele de stare, astfel

încât să se poată evalua probabilitatea de defectare cu o anumită stare a mașinii la orice moment de timp specificat. Un MP dependent de timp are o funcție de forma:

$$h(t) = h_0(t) \exp(\gamma_1 x_1(t) + \dots + \gamma_p x_p(t)) \quad (9.4)$$

unde $h_0(t)$ este o funcție de probabilitate, $x_1(t), \dots, x_p(t)$ sunt covarianți care sunt funcții de timp și $\gamma_1, \dots, \gamma_p$ sunt coeficienți. Funcția de probabilitate $h_0(t)$ poate fi sub formă neparametrică sau parametrică. O funcție de parametrizare, bazată pe parametrii de bază, utilizată în mod obișnuit, este funcția de tip Weibull. Un model probabilistic funcție de timp, de tip Weibull, este denumit Weibull MPT. Covarianții $x_1(t), \dots, x_p(t)$ pot fi orice variabile ce definesc starea sistemului, cum ar fi indicatori de funcționare normală și caracteristici în monitorizarea stării. Estimarea probabilității maxime este folosită pentru a construi un MPT din datele despre evenimente și datele privitoare la monitorizarea stării. Modelarea unui MPT este mai mult sau mai puțin asemănătoare procesului de analiză a regresiei: în final, se găsește un set de covarianți semnificativi care sunt incluși în model. Totuși, modelarea MPT diferă de analiza regresiei obișnuite prin faptul că nu există observații pentru variabila "dependentă" $h(t)$, în schimb, observațiile sunt disponibile ca date de eveniment. Jardine și colab. [22] a propus utilizarea unui Weibull MPT pentru a analiza datele referitoare la defecțiunile motoarelor aeronavelor și ale navelor marine împreună cu măsurătorile concentrației de metal în uleiul din carterul motorului.

În mentenanța centrată pe fiabilitate, [23], este utilizat conceptul cunoscut ca interval P-F (probabilitate – defecțiune funcțională) pentru a descrie modelele de defecțiuni în monitorizarea stării sistemului. Un interval P-F este intervalul de timp dintre o defecțiune probabilă (P), care este identificată de un indicator al stării sistemului, și o defecțiune funcțională (F). Un interval P-F este un instrument util pentru determinarea intervalului de monitorizare a stării sistemului pentru monitorizarea periodică a funcționalității acestuia. Un interval de monitorizare a stării sistemului este, de obicei, setat ca intervalul P-F împărțit la un număr întreg. Cu toate acestea, în practică este dificil să cuantificăm intervalul P-F. Goode și colab. [24] au ales două distribuții Weibull pentru intervalul P-F și intervalul I-P, adică de la instalarea mașinii la o eventuală defecțiune. Folosind metodele de control statistic al proceselor (CSP), au separat fiecare ciclu de viață al mașinii în două zone privitoare la datele istorice: zona stabilă și zona de eroare. Apoi, perioadele de timp stabile din datele istorice sunt utilizate pentru a se potrivi cu distribuția Weibull pentru intervalul I-P, în timp ce timpii pentru zonele de eroare sunt utilizați pentru a se potrivi distribuției Weibull pentru intervalul P-F. Pe baza comparării celor două distribuții și a procesului de monitorizare a stării sistemului, a fost derivată expertizarea mașinilor.

Modelul ascuns Markov (MAM), [25], este un alt model adecvat pentru analizarea împreună a datelor de monitorizare a evenimentelor și a stării sistemului. Un MAM constă din două procese stochastice: un lanț Markov cu un număr finit de stări care descriu un mecanism de bază, și un proces de observare în funcție de starea ascunsă. Un MAM cu timp discret este definit prin:

$$\begin{cases} X_k + 1 = AX_k + V_k + 1 \\ Y_k = CX_k + W_k \end{cases} \quad (9.5)$$

unde X_k și Y_k reprezintă procesul ascuns și procesul de observare la ieșirea din sistem, V_k și W_k sunt termeni ce depind de zgomot, iar A și C sunt parametri.

Datele de tip eveniment și cele de monitorizare a stării sistemului sunt utilizate pentru a estima parametrii modelului. Deoarece funcția de probabilitate completă nu este disponibilă pentru un MAM, pentru estimarea parametrilor este folosită o abordare statistică cunoscută sub denumirea de algoritm EM. Bunks și colab. [26] a aplicat un MAM pentru a analiza datele provenite de la elicopterul Westland, care au constat din informații privind defecțiunile cutiei de viteze și măsurători de vibrații la componentele cu diferite defecțiuni. Clasele de defecțiuni au fost tratate ca stări în lanțul Markov ascuns, în timp ce măsurătorile de vibrații au fost tratate ca realizări ale procesului de observare. MAM-ul astfel instrumentat, care utilizează datele de testare de laborator, a fost aplicat pentru clasificarea defecțiunilor pentru un set de date dintr-o cutie de viteze în funcțiune.

În monitorizarea stării sistemului, o stare de defect este, de obicei, observabilă. În această situație, este nepotrivit să se utilizeze un MAM pentru a descrie procesul de stare a mașinii până la cedare. Lin și Makis [27] au propus utilizarea unui model stohastic, parțial observabil, pentru a descrie mecanismul de defecțiune care stă la baza unui sistem supus monitorizării stării sistemului. Modelul propus este similar cu cel al MAM, dar are câteva caracteristici distincte: toate stările de funcționare normală sunt ascunse, starea defecțiunilor este observabilă iar procesul de stare, parțial ascuns, este continuu în timp, în timp ce procesul de observare este discret în timp. Aceste caracteristici sunt mai realiste în fenomenul de monitorizare a stării periodice. Parametrii modelului au fost evaluați utilizând atât date de monitorizare a evenimentelor cât și a stărilor. Modelul astfel elaborat poate fi utilizat pentru diagnosticarea și expertiza ulterioară.

9.6.6. Decizia de mentenanță

Ultimul pas al unui program privind mentenanța bazată pe starea sistemului (MSS) îl reprezintă luarea deciziilor de mentenanță. Suportul decizional suficient și eficient este esențial pentru deciziile managerilor de mentenanță privind luarea măsurilor de întreținere. Tehnicile pentru susținerea deciziilor de mentenanță într-un program MSS pot fi împărțite în două categorii principale: **diagnosticare și expertizare**. După cum s-a menționat mai devreme, diagnosticarea defecțiunilor se concentrează pe detectarea, izolarea și identificarea defecțiunilor, atunci când acestea apar. Pe de altă parte, expertizarea încearcă să prezică erori sau cedări înainte ca acestea să se producă. Evident că, expertizarea este superioară diagnosticării, în sensul că expertizarea poate preveni defecțiunile sau cedările și, dacă este posibil, să fie gata (cu piese de schimb pregătite și resursele umane planificate) pentru apariția disfuncționalităților și astfel, să economisească costuri suplimentare de mentenanță neplanificate. Cu toate acestea, expertizarea nu poate înlocui complet diagnosticarea deoarece, în practică, există întotdeauna unele defecte și cedări imprevizibile. În plus, expertizarea, ca orice altă tehnică de predicție, nu poate fi 100% sigură în a prezice defectele și cedările. În cazul predicției nereușite, diagnosticarea poate fi un instrument complementar pentru asigurarea suportului decizional de mentenanță. În plus, diagnosticarea este utilă și pentru îmbunătățirea expertizării în modul în care informațiile de diagnosticare pot fi utile pentru pregătirea unor date mai precise ale evenimentului și, prin urmare, pentru construirea unui model de prognoză mai bun pentru mentenanța bazată pe starea sistemului. În plus, informațiile de diagnosticare pot fi folosite ca informații de feedback utile pentru reproiectarea sistemului.

9.6.6.1. Diagnosticarea defecțiunilor, cedărilor, nefuncționalității

Diagnosticarea defecțiunilor mecanice este o procedură de cartografiere a informațiilor și caracteristicilor obținute prin achiziție, măsurare, etc., din spațiul caracteristic sistemului pentru defecțiunile acestuia. Acest proces de cartografiere se numește și recunoașterea modelului. În mod tradițional, recunoașterea modelului se face manual, cu instrumente grafice auxiliare, cum ar fi: graficul spectrului de putere, graficul spectrului de fază, graficul cepstrum, graficul spectrului de frecvențe AR (autoregresiv), spectrograma, scalograma Wavelet, graficul fazei Wavelet etc. Recunoașterea *manuală* a modelului necesită expertiză în zona specifică din aplicația de diagnosticare, fiind nevoie de personal calificat. Prin urmare, este de dorit să se realizeze *recunoașterea automată* a modelului. Acest lucru se poate realiza prin clasificarea semnalelor pe baza informațiilor și/sau a caracteristicilor extrase din semnale. În următoarele secțiuni sunt prezentate abordări diferite de diagnosticare a defectelor mecanice, cu accent pe abordările statistice și abordările inteligente artificiale.

9.6.6.2. Abordarea statistică

O metodă obișnuită de diagnosticare a defecțiunilor este de a detecta dacă există o anumită defecțiune sau nu, pe baza informațiilor disponibile primite în cadrul **monitorizării stării sistemului**, fără o inspecție intruzivă a mașinii. Această problemă de detectare a defecțiunilor poate fi descrisă ca o problemă test de ipoteză nulă H_0 : eroarea A este prezentă; spre deosebire de ipoteza alternativă H_1 : eroarea A nu este prezentă. Într-o problemă de *diagnosticare a defecțiunilor* concrete, ipotezele H_0 și H_1 sunt interpretate într-o expresie care utilizează modele sau distribuții specifice sau parametrii unui model sau ai unei distribuții specifice. Statisticile de testare sunt construite pentru a rezuma informațiile de monitorizare a stării astfel încât să poată decide dacă să accepte ipoteza nulă H_0 sau să o respingă. O abordare convențională de tip control statistic al proceselor (CSP), care a fost inițial dezvoltată în teoria controlului calității, a fost bine dezvoltată și utilizată pe scară largă în detectarea și diagnosticarea defecțiunilor. Principiul CSP este de a măsura abaterea semnalului curent de la un semnal de referință reprezentând starea normală pentru a vedea dacă semnalul curent se află în limitele de control sau nu.

Analiza de tip cluster, ca metodă de analiză statistică multivariată, este o abordare de clasificare statistică care grupează semnale în diferite categorii de defecțiuni pe baza asemănării caracteristicilor. În acest fel, se urmărește să se minimizeze varianța în cadrul grupului și să se maximizeze varianța între grupuri. Rezultatul analizei de tip cluster este un număr de grupuri eterogene cu conținut omogen: există diferențe substanțiale între grupuri, dar semnalele dintr-un singur grup sunt similare. Un mod natural de grupare a semnalelor se bazează pe măsurarea diferențelor sau pe măsurarea similitudinii între două semnale. Aceste măsuri sunt, de obicei, derivate din anumite funcții discriminante în recunoașterea modelului statistic. Mijloacele ce utilizează măsurarea diferențelor utilizate în mod obișnuit sunt diferențierea Euclidiană, diferențierea Mahalanobis, diferențierea Kullback-Leibler și diferențierea Bayesian. Altele decât măsurarea diferențelor, coeficientul de corelare a vectorului de funcție este, de asemenea, o măsură de similitudine utilizată în mod obișnuit pentru clasificarea semnalelor în diagnosticarea defecțiunilor mecanismelor [28]. Există numeroși algoritmi de grupare pentru determinarea grupurilor de semnale. Un algoritm utilizat în mod obișnuit în clasificarea defectelor mecanice este

algoritmul de vecinătate care conectează două grupuri apropiate într-un grup nou și calculează distanța dintre două grupuri ca fiind distanța celui mai apropiat vecin în cele două grupuri separate [29]. Limita a două grupuri adiacente este determinată de funcția discriminantă utilizată. A fost utilizată o funcție de discriminare liniară în parte, și astfel, s-au obținut limite lineare pentru clasificarea defecțiunilor din rulmenți [30]. O tehnică numită mașină cu suport vectorial (MSV) este utilizată pentru a optimiza o curbă delimitată, în sensul că, distanța dintre cel mai apropiat punct și curba limită este maximizată.

9.6.6.3. Inteligența artificială (IA)

Tehnicile de inteligență artificială (IA) au fost aplicate din ce în ce mai mult diagnosticarea mașinilor și instalațiilor, și au demonstrat performanțe îmbunătățite față de abordările convenționale. În practică, totuși, nu este ușor să se aplice tehnicile IA din cauza lipsei unor proceduri eficiente de obținere a datelor de formare și a cunoștințelor specifice, care sunt necesare pentru inițierea modelelor. Până în prezent, majoritatea aplicațiilor din literatură au folosit datele experimentale pentru formarea modelului. În literatura de specialitate, pentru diagnosticarea mașinilor se utilizează tehnica rețelelor neuronale artificiale (RNA). Alte tehnici IA utilizate includ sisteme logice fuzzy, rețele neuronale fuzzy (RNF), sisteme neuronale-fuzzy și algoritmi evolutivi (AE). O tehnică RNA este un model computațional care imită structura creierului uman. Se compune din elemente simple de procesare, conectate într-o structură complexă de straturi care permite modelului să aproximeze o funcție complexă neliniară cu intrări multiple și ieșiri multiple. Un element de procesare cuprinde un nod și o pondere. RNA cunoaște funcția necunoscută ajustând ponderile sale cu observațiile de intrare și ieșire. Acest proces este denumit antrenamentul unui RNA. Există diferite modele de rețele neuronale. Structura rețelei neuronale FeedForward (RNFF) este cea mai răspândită structură a rețelei neuronale în diagnosticarea defecțiunilor mecanice. Un perceptron special RNFF, multilayer, cu un algoritm de instruire, este cel mai frecvent utilizat model de rețea neuronală pentru recunoașterea și clasificarea modelelor și, prin urmare, și pentru diagnosticarea defecțiunilor mecanice. Rețelele neuronale au, totuși, două limitări principale: (1) dificultatea determinării structurii rețelei și a numărului de noduri; (2) convergența lentă a procesului de formare. O rețea neuronală de corelare în cascadă (RNCC) nu necesită determinarea inițială a structurii rețelei și a numărului de noduri. RNCC poate fi folosită în cazurile în care formarea on-line este preferabilă. Spoerle [31] a aplicat CCNN la clasificarea defecțiunilor la rulment și a arătat că RNCC poate avea ca rezultat utilizarea unei structuri minime a rețelei pentru recunoașterea defecțiunilor cu precizie satisfăcătoare. Alte modele de rețele neuronale aplicate în diagnosticarea sistemelor mecanice sunt rețelele neuronale bazate pe radialitate, rețelele neuronale recurente și rețelele neuronale de contra propagare. Modelele cu rețele neuronale artificiale de mai sus, utilizează algoritmi de învățare supravegheați care necesită o intrare externă, cum ar fi cunoștințele apriori despre ținta sau rezultatul dorit. De exemplu, o practică obișnuită de formare a unui model de rețea neuronală este de a folosi un set de date experimentale cu defecte cunoscute (însămânțate). Acest proces de instruire este învățat supravegheat. Spre deosebire de învățarea supravegheată, învățarea nesupravegheată nu necesită o intrare externă. O rețea neuronală nesupravegheată se învață folosind noi informații disponibile. Wang și Too [32] au aplicat rețelele neuronale nesupravegheate, și hărțile auto-organizatoare (HO) la detectarea defecțiunilor organelor de mașini aflate în mișcare de rotație. Tallam și colab. [33] au propus algoritmi de auto-punere în

funcțiune on-line pentru o rețea neuronală FeedFour, cu o aplicare specială la diagnosticarea defectelor electrice ale mașinilor.

Spre deosebire de rețelele neuronale, care preiau informații prin achiziția de date, observate și instruite, cu intrări și ieșiri cunoscute, sistemele expert (SE) utilizează informațiile din domeniu în cadrul unui program pe calculator, cu un motor de inferență automat, pentru a raționa în vederea rezolvării problemelor. Sunt utilizate trei metode principale de raționament pentru SE, utilizate în domeniul diagnosticării mașinilor: raționamentul bazat pe reguli, raționamentul bazat pe caz și raționamentul bazat pe modele. Spre deosebire de alte metode de raționament, raționamentul negativ se ocupă de informații negative, care, prin absența sau lipsa simptomelor, indică inferențe semnificative. Sistemele expert și rețelele neuronale au propriile limitări. O limitare principală a SE-urilor bazate pe reguli este explozia combinatorică, care se referă la problema de calcul cauzată atunci când numărul de reguli crește exponențial pe măsura creșterii numărului de variabile. O altă limitare principală o reprezintă consistența sistemului de mentenanță, care se referă la procesul prin care sistemul decide când unele dintre variabile trebuie să fie recompuse ca răspuns la schimbările produse în alte valori.

Două limitări principale ale rețelelor neuronale sunt: dificultatea de a avea explicații fizice ale modelului instruit și dificultatea procesului de instruire. Evident, combinarea celor două tehnici ar îmbunătăți semnificativ performanța. De exemplu, Silva și colab. [34] au folosit două rețele neuronale și teoria rezonanței adaptive (TRA), combinate cu un SE bazat pe ecuația duratei de viață a instrumentului Taylor, pentru a clasifica starea de uzură a sculelor. DePold și Gass [35] au studiat aplicațiile rețelelor neuronale și a SE-urilor într-un sistem modular inteligent și adaptiv în diagnosticarea turbinelor cu gaz. Yang și colab. [36] au prezentat o abordare pentru integrarea raționamentului bazat pe caz SE cu o rețea neuronală TRA-Kohonen pentru a îmbunătăți diagnosticarea defecțiunilor.

În practica de *monitorizare a stărilor sistemului*, cunoștințele de la experții domeniului sunt, de obicei, inexacte, iar raționamentul asupra cunoștințelor este adesea imprecis. Prin urmare, pentru un sistem expert (SE) este necesară măsurarea incertitudinilor pentru a oferi soluții mai solide de rezolvare a problemelor. În mod obișnuit, mărimile utilizate frecvent sunt: probabilitatea, funcțiile fuzzy în teoria logicii fuzzy și funcțiile de încredere în teoria rețelelor de încredere. Un exemplu de aplicare a logicii fuzzy la clasificarea defecțiunilor a fost dat în [37] pentru a clasifica spectrele de frecvență reprezentând diferite defecte ale rulmenților din materialul rulant. O comparație între SE-urile (sistemele expert) convenționale bazate pe reguli și rețelele de încredere aplicate diagnosticării mașinilor a fost dată în [38]. Du și Yeung [39] au introdus o abordare numită probabilitate de tranziție fuzzy, care combină probabilitatea de tranziție (procesul Markov), precum și setul fuzzy, pentru a monitoriza defectele progresive. Aplicarea logicii fuzzy este, de obicei, combinată cu alte tehnici, cum ar fi rețelele neuronale și sistemele expert.

9.6.6.4. Alte tipuri de abordări privind diagnosticarea

O altă clasă de abordări privind diagnosticarea defectelor mecanice sunt bazate pe modele prezentate în [40, 41]. Aceste abordări utilizează modelul matematic specific, explicit, al fizicii sistemului monitorizat. Pe baza acestui model explicit, pentru a obține semnale, numite reziduuri, ceea ce indică prezența defecțiunilor în mașină, sunt folosite metode de generare reziduală, cum ar fi filtrul Kalman, estimarea parametrilor (sau identificarea sistemului) și relațiile de paritate. În cele

din urmă, reziduurile sunt evaluate pentru a ajunge la *detectarea, izolarea și identificarea defecțiunilor*. Această procedură generală este ilustrată în *figura 9.2*. Abordările bazate pe model pot fi mai eficiente decât alte abordări fără model dacă modelul construit este unul corect și precis. Cu toate acestea, modelarea matematică explicită poate să nu fie fezabilă pentru sistemele complexe, deoarece ar fi foarte dificil sau chiar imposibil să se construiască modele matematice pentru astfel de sisteme.

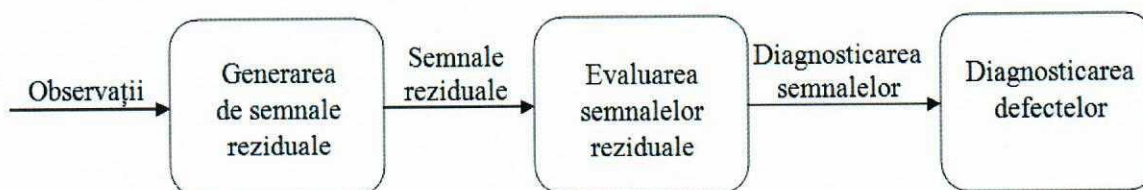


Fig. 9.2. Schema generală a unei abordări bazate pe model.

Diferite abordări privind diagnosticarea bazată pe model au fost aplicate pentru diagnosticarea defectelor unei game variate de sisteme mecanice cum ar fi cutii de viteze, lagăre, rotoare și scule așchietoare. Informațiile furnizate prin aceste metode s-au dovedit a fi foarte utile pentru identificarea mai precisă a defectelor, împreună cu evaluarea încrederii unei decizii de diagnosticare. Rețelele Petri, ca instrument grafic general pentru descrierea relațiilor existente între stările sistemului și evenimente [42], au fost recent aplicate la detectarea și diagnosticarea defecțiunilor mecanice.

9.7. Expertizarea sistemelor funcționale

Comparativ cu *diagnosticarea*, literatura de specialitate, cuprinzând informații despre *expertizare*, este mult mai restrânsă. Există două tipuri principale de predicție în expertizarea mașinilor. Expertiza cea mai utilizată este cea care să prezică în cât timp de la momentul actual va apare o defecțiune sau mai multe defecțiuni în sistem, ținând cont de starea curentă a mașinii și de profilul de funcționare trecut. Timpul rămas înainte de a observa o cedare sau o defecțiune este denumit, de obicei, **durată de viață rămasă (DVR)**. În anumite situații, mai ales atunci când o defecțiune sau o cedare este catastrofală (de exemplu, centrala nucleară), ar fi mai de dorit să se prevadă posibilitatea ca o mașină să funcționeze fără defecțiune sau să se prevadă intervalul de timp în care este posibil să se înregistreze o defecțiune, având în vedere starea actuală a mașinii și profilul de funcționare trecut. De fapt, în orice situație, probabilitatea ca o mașină să funcționeze fără defecțiune până la intervalul următor de inspecție (sau monitorizare a stării) ar putea fi o referință bună în atenția personalului de mentenanță, pentru a determina dacă intervalul de inspecție este adecvat sau nu. Cele mai multe dintre lucrările din literatura de specialitate privind proiecția mașinilor, discută numai primul tip de expertizare, și anume estimarea DVR. În următoarele secțiuni, ne concentrăm pe discuțiile privind estimarea DVR, expertizare, care include acțiuni sau politici de mentenanță și determinarea intervalului de monitorizare a stării.

Expertizarea este, în mod obișnuit legată de *mecanica ruperii și de oboseală*. Având în vedere această abordare, expertizarea are ca obiect predicția duratei de viață a unui sistem și cuprinde totalitatea metodelor de detectare a defecțiunilor posibile să apară. Expertizarea poate fi, de asemenea, definită ca o măsură a probabilității: o modalitate de a cuantifica șansa ca sistemul mecanic/mecatronic să funcționeze fără vreo defecțiune sau, dacă aceasta se produce, să putem

determina perioada de timp până la apariția defecțiunii. Această "valoare prognostică probabilistică" este o indicație foarte interesantă, având în vedere că defectul sau cedarea pot avea consecințe catastrofale (de exemplu apariția defecțiunilor la reactorul unei centrale nucleare). Pe de altă parte, și managerul de mentenanță trebuie să știe care sunt intervalele de inspecție.

În cele din urmă, deși există unele divergențe în literatura de specialitate, expertizarea poate fi definită, așa cum a fost recent propus de Organizația Internațională de Standardizare: "expertizarea este estimarea a două componente: a timpului până la defecțiune sau cedare și a riscului de producere/manifestare a unuia sau mai multor moduri de defecțiune sau cedare [43]. În această acceptare, expertizarea este numită și "predicția duratei de viață a unui sistem", deoarece este un proces al cărui obiectiv este să precizeze durata de viață rămasă (DRV) înainte de a se produce o defecțiune, având în vedere starea actuală a sistemului mecanic/mecatronic și profilul de funcționare trecut. Asimilarea expertizării unui "proces de predicție" trebuie să ia în calcul situații ce se vor dezvolta în viitor. Acest lucru presupune, în mod evident, că trebuie înțeleasă mai întâi situația actuală, aceasta reprezentând sinteza unui proces de detectare a datelor măsurabile ale sistemului. Aceste abordări se bazează pe noțiunea de insuficiență ("încetarea capacității de a îndeplini o funcție necesară"), ceea ce înseamnă că "activitatea de expertizare" este asociată cu un grad de acceptabilitate. Ca urmare, expertizarea trebuie să se bazeze pe criterii de evaluare, ale căror limite depind de sistemul însuși și de obiectivele de performanță [43], iar expertizarea ar putea fi împărțită în două sub-activități: prima, prezice evoluția unei situații la un moment dat, a doua fiind utilizată pentru a raporta situația prevăzută la un referențial de evaluare (figura 9.3). Precizia unui sistem de expertizare este legată de abilitatea acestuia de a aproxima și de a prezice degradarea echipamentului, faza de predicție fiind una critică.

Scopul expertizării mașinilor este de a oferi suport decizional pentru acțiunile de mentenanță. Ca atare, este firesc ca politicile de mentenanță să fie incluse în procesul de expertizare al mașinii. Mentenanța, în această situație, este așa-numita MSS (mentenanță în raport de starea sistemului) discutată în introducere. În comparație cu mentenanța convențională, modelele matematice aplicabile scenariului de tip MSS sunt mult mai puține.

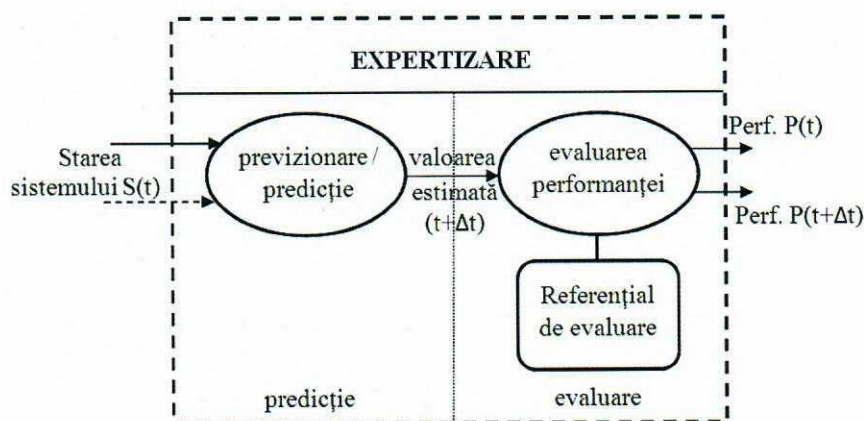


Fig. 9.3. Expertizarea ca proces de predicție și evaluare [44].

Ideea principală a expertizării care include politici de mentenanță, o reprezintă optimizarea acestora în funcție de anumite criterii, cum ar fi riscul, costul, fiabilitatea și disponibilitatea. Riscul este definit ca o combinație dintre probabilitate și consecință. De obicei, consecința poate fi

măsurată prin costuri – acolo unde nu există și alte implicații cum ar fi pierderile de vieți omenești. În acest caz, criteriul de risc este echivalent cu criteriul de cost. Cu toate acestea, există unele cazuri, de exemplu echipamente critice într-o centrală electrică, în care consecința nu poate fi estimată numai prin cost. În aceste scenarii, ar fi mai adecvate criteriile de probabilitate sau de fiabilitate. Deoarece criteriul de cost se aplică în majoritatea situațiilor, nu este surprinzător faptul că literatura de specialitate, în optimizarea MSS, este dominată de optimizarea bazată pe costuri. Tehnica de analiză a consecințelor este un instrument general de evaluare a riscurilor pentru optimizarea MSS pe baza diferitelor tipuri de criterii.

9.7.1. Metode de expertizare

Nu există niciun acord general cu privire la un set adecvat și acceptabil de metode care să poată fi utilizate în aplicațiile de expertizare, iar cercetătorii și practicienii în domeniul mentenanței încă lucrează în acest domeniu. Ca și în cazul sistemelor industriale, expertizarea poate fi evaluată cel puțin în două moduri: 1) obiectivul principal al expertizării este de a furniza informații eficiente care să permită unui proces decizional de bază alegerea acțiunilor de mentenanță. Un prim set de valori este cel care cuantifică riscurile suportate de sistemul monitorizat. Această metodă poate fi numită de tip măsuri de expertizare, 2) presupunând că expertizarea este, în esență, un proces incert, probabilistic, acțiunile întreprinse în cadrul procesului de mentenanță trebuie să țină cont de acest lucru. În acest fel, se pot construi măsuri de performanță ale sistemului de expertizare.

9.7.2. Caracteristici furnizate de metodele de expertizare

Principala caracteristică urmărită este timpul estimat până la defecțiune/cedare (TD), numit și durata de viață utilă rămasă (DVR). În plus, se poate determina o caracteristică de tip „încredere” care să indice gradul de certitudine în ceea ce privește posibilitatea de manifestare în timp a cedării. Prin extensie, și având în vedere că practicanții pot fi interesați de evaluarea sistemului luând în considerare orice limită de performanță, DVR și caracteristica de „încredere” pot fi generalizate. În figura 9.4a, TT_{xx} se referă la timpul rămas până la depășirea limitei de performanță $Perf/xx$, iar $Incr/xxT$ este încrederea cu care poate fi preluat activul $TT_{xx} > T$.

Timpul estimat până la cedare (TEC) rezultă pe baza funcției de densitate a probabilității (fdp) în raport cu timpul, a modelului de predicție, având în vedere apariția evenimentului de tip cedare/defectare/funcționare defectuoasă. Acest criteriu evoluează pe măsură ce avem mai multe date disponibile și furnizează perioada de timp după care trebuie efectuată întreținerea echipamentelor prin acțiuni preventive [43] (figura 9.4b). Trebuie definite două limite diferite pentru timpul până la efectuarea lucrărilor de întreținere: T_{min} ce reprezintă valoarea minimă, timpurie, și T_{max} ce reprezintă valoarea maximă târzie. **Acuratețea** măsoară apropierea valorii estimate de cea reală. Are o formă exponențială și are aceeași mărime cu diferența dintre valoarea timpului estimat până la cedare și timpul real până la cedare. **Precizia** arată modul în care predicțiile apropiate sunt grupate împreună și reprezintă o măsură a îngustării intervalului în care se menține durata de viață rămasă. Precizia rezultă din variația rezultatelor estimate furnizate de mai multe experimente. Complementaritatea preciziei și acurateței este ilustrată în figura 9.4c.

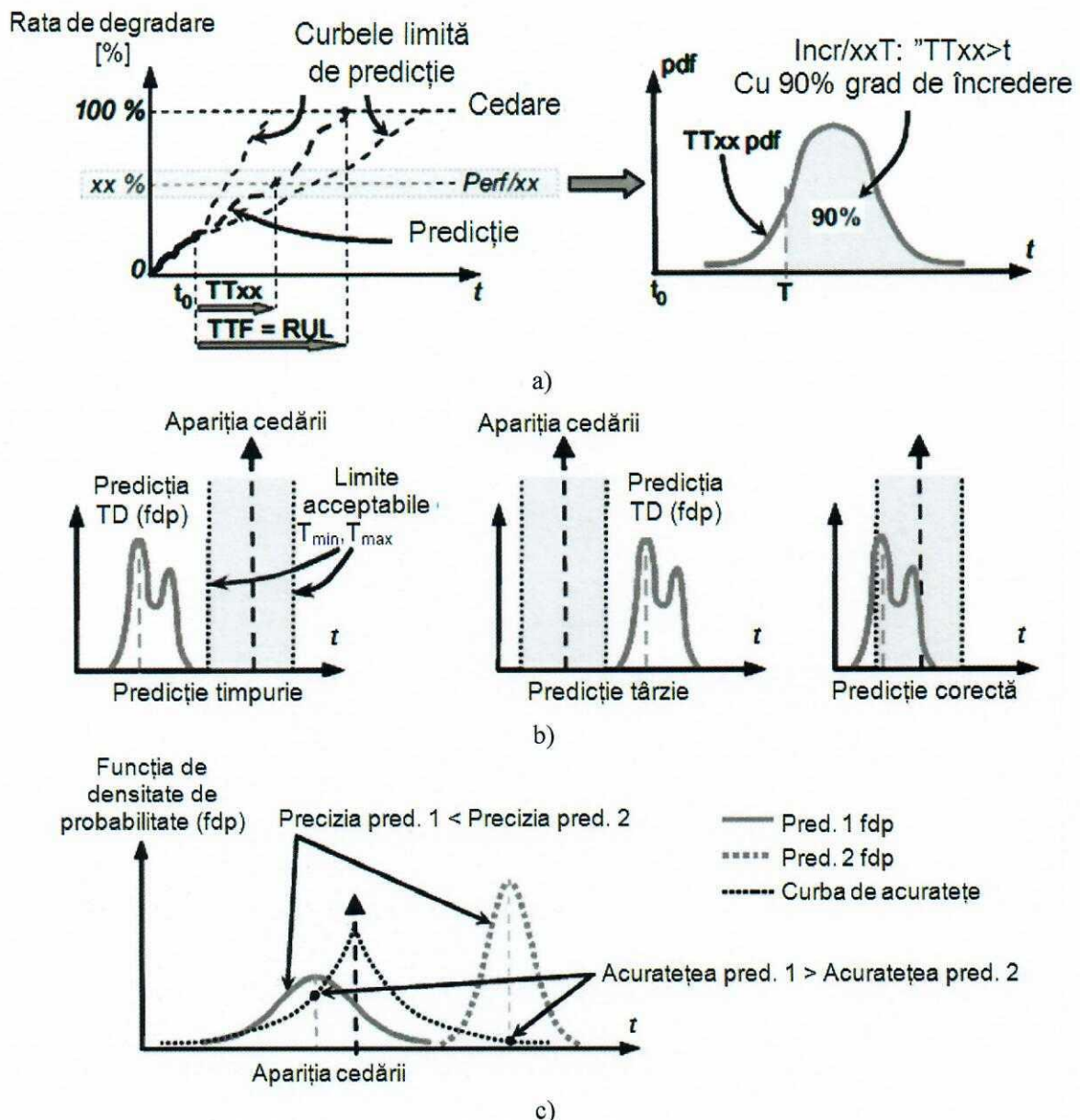


Fig. 9.4. Metode de expertizare

Criterii de performanță ale sistemului de expertizare

9.7.3. Tipuri de abordări privind expertizarea

Au fost dezvoltate diverse abordări ale expertizării, care variază în fidelitate de la modele simple bazate pe defecțiunile istorice la modele fizice de înaltă fidelitate referitoare la prognozarea defecțiunilor. Informațiile necesare (în funcție de tipul de expertizare avută în vedere) includ: date și modele ingineresti, istoricul defecțiunilor, condițiile de funcționare trecute, condițiile de funcționare curente, modele aplicabile defecțiunilor deja identificate, traiectoriile de defecțiuni tranzitorii, istoricul de întreținere, degradarea sistemului și modurile de defectare.

Câteva dintre abordările privind expertizarea, ce au fost aplicate cu succes pe diferite tipuri de probleme, sunt prezentate mai jos.

- *Expertizare bazată pe experiență.* Se utilizează fiabilitatea statistică pentru a prezice probabilitatea de cedare/defecțiune în orice moment.
- *Expertizare evolutivă/statistică.* Se face o analiză multivariabilă a răspunsului sistemului și a modelelor de cedare, comparativ cu modelele de defecțiuni cunoscute.
- *Expertizare bazată pe inteligența artificială.* Estimarea mecanică a defecțiunii folosind raționamente instruite cu date privind cedările.
- *Expertiză în vederea estimării stării sistemului.* Degradarea sistemelor sau urmărirea funcțiilor de diagnosticare utilizând filtre Kalman și alte modalități de corectare a predicției.
- *Expertiză bazată pe modele fizice ale defecțiunilor.*

Pentru a anticipa viteza de degradare, având în vedere sarcinile și condițiile de lucru, au fost dezvoltate modele funcționale și fizice ce simulează defecțiunile. **Similar diagnosticului, metodele de expertizare** pot fi clasificate ca fiind asociate cu una din următoarele două abordări: bazate pe modele și bazate pe date. Fiecare dintre aceste abordări are propriile sale avantaje și dezavantaje și, în consecință, acestea sunt utilizate adesea în combinație cu multe aplicații.

9.7.3.1. Abordări bazate pe modele

Metodele de expertizare bazate pe modele presupun că poate fi construit un model matematic precis având la bază datele existente de funcționare anterioară. De exemplu, modelele de oboseală bazate pe fenomenele fizice au fost utilizate pe larg pentru a reprezenta inițierea și propagarea fisurilor. Caracteristicile utilizate de aceste metode o reprezintă reziduurile care sunt furnizate de rezultatele controalelor amănunțite ce pun în evidență diferența dintre măsurătorile detectate ale unui sistem real și rezultatele unui model matematic. În general, reziduurile sunt mari în prezența unor defecțiuni și mici în prezența unor perturbări normale, respectiv erori date zgomot sau modelare.

Pentru a defini pragurile în vederea detectării unor defecțiuni, se utilizează tehnici statistice. În literatura de specialitate sunt propuse mai multe tehnici pentru a genera reziduuri: spațiul paritar, estimarea parametrilor, observatori de stare, graficul de legătură, etc..

9.7.3.2. Abordări bazate pe date din literatură

Abordările bazate pe modele în vederea expertizării, necesită cunoștințe și teorii specifice mecanismelor de defectare, relevante pentru sistemul mecanic monitorizat. În cazul problemelor industriale, în literatură se propun soluții bazate pe diferite modele. Bartelmus și Zimroz [45], utilizând un proces de demodulare, au estimat semnalul de vibrație pentru o cutie de viteze planetară în condiții de funcționare normală și suprasolicitată. Pentru expertizarea echipamentului de elicopter, Kacprzynski și colab. [46] au propus combinarea modelării defecțiunilor cu informațiile de diagnosticare relevante. Oppenheimer și Loparo [47] au aplicat un model fizic pentru prezicerea stării sistemelor mecanice, în combinație cu un model de tip rezistență reziduală, bazat pe o lege de propagare a fisurilor, pentru a estima DVR (durata de viață reziduală).

O modalitate diferită de modelare pe bază de expertizare, este de a deduce relații explicite dintre variabilele ce caracterizează stările sistemului și durata de viață.

Avantaje și dezavantaje.

Principalul avantaj al abordărilor bazate pe modelare îl reprezintă abilitatea lor de a încorpora înțelegerea fizică a sistemului monitorizat. În plus, în multe situații, modificările vectorului de caracteristici sunt strâns legate de parametrii modelului. Mai mult, unii autori consideră că instrumentele de monitorizare și expertizare trebuie să evolueze pe măsură ce sistemul funcționează un anumit număr de ore.

9.7.3.3. Abordări bazate pe date reale

Metodele bazate pe date utilizează achiziția de date reale (cum ar fi cele colectate online cu senzori sau furnizate de către operator) pentru a aproxima și a urmări caracteristicile care dezvăluie degradarea componentelor și pentru a anticipa comportamentul global al unui sistem. Într-adevăr, în multe aplicații, datele măsurate de intrare/ieșire reprezintă sursa majoră pentru o înțelegere mai profundă a degradării sistemului. Abordările bazate pe date pot fi împărțite în două categorii: tehnici de inteligență artificială (rețele neuronale, sisteme fuzzy, arbori decizionali etc.) și tehnici statistice (metode statistice multivariate, discriminatori liniari și pătratici). Rezolvări bazate pe caz, modele inteligente bazate pe decizii și grafice de tip min-max, au fost considerate ca potențiale candidate pentru *algoritmi de expertizare*:

- tehnici bazate pe inteligența artificială;
- rețele neuronale (perceptron multi-straturi, rețele neuronale probabilistice, cuantificarea vectorilor de învățare, hărți auto-organizante, etc.);
- sisteme bazate pe reguli fuzzy și sisteme neuro-fuzzy,
- arbori de decizie,
- modelele grafice (rețele bayesiene, modele Markov ascunse).
- tehnici statistice:
- discriminare liniară și pătratică,
- analiza semnalului (modele auto-regresive, transformata Fourier, etc.).

9.8. Durata de viață reziduală

DVR, (durata de viață reziduală), durata de viață utilă sau durata de viață rămasă, se referă la timpul rămas până la producerea unei defecțiuni, având în vedere istoricul funcționării, solicitarea și starea actuală a sistemului. Durata de viață rămasă este definită ca o variabilă aleatoare condițională:

$$T-t|T>t, Z(t) \quad (9.6)$$

unde T reprezintă variabila aleatoare a timpului până la defecțiune, t este timpul de funcționare curent și $Z(t)$ este profilul stării trecute până la momentul actual. Deoarece DVR este o variabilă aleatorie, distribuția acesteia ar fi de interes pentru înțelegerea completă a conceptului DVR. În literatura de specialitate, termenul "estimarea duratei de viață utilă reziduală" este folosit cu semnificații duble. În unele cazuri, înseamnă găsirea distribuției DVR. În alte cazuri, înseamnă doar DVR așteptată, adică,

$$E[T-t|T>t, Z(t)] \quad (9.7)$$

Definirea corectă a defecțiunii, defectului, cedării, funcționării neconforme, este crucială pentru corectarea interpretării DVR. Deși există o controversă în practica industrială actuală, o definiție oficială a defecțiunii poate fi găsită în multe manuale de fiabilitate. Pentru a realiza estimarea posibilei defecțiuni în timp, pe lângă cunoștințele (sau datele) despre procesul de propagare a cedării, trebuie să fie disponibile cunoștințe (sau date) privind mecanismul de defectare. Procesul de propagare a cedării/defecțiunii este, de obicei, urmărit de un model de tendință sau de prognoză/estimare pentru anumite variabile de stare. Există două moduri în descrierea mecanismului de defectare. *Primul* presupune că cedarea depinde numai de variabilele privitoare la starea sistemului, care reflectă nivelul real de defecțiune, și limita predeterminată. Definiția cea mai frecvent utilizată a defecțiunii este simplă: cedarea apare atunci când defecțiunea atinge un nivel predeterminat. *Cel de-al doilea* construiește un model pentru mecanismul de defectare, utilizând datele istorice disponibile. În acest caz, pot fi utilizate diferite definiții ale cedării. O defecțiune poate fi definită ca un *eveniment* în care aparatul funcționează la un nivel nesatisfăcător, sau poate fi o defecțiune funcțională atunci când mașina nu își poate îndeplini funcțiile stabilite în cartea tehnică, sau poate fi o cedare totală atunci când mașina nu mai funcționează. Similar *diagnosticării*, abordările pentru *expertiză/estimare/prognoză* se împart în trei categorii principale: abordări statistice, abordări inteligent-artificiale și abordări bazate pe modele.

Se poate separa întreaga durată de viață a mașinii în două intervale, intervalul I-P (Interval de instalare-potențial) în care aparatul funcționează corect și C-P (zonă de cedare potențială - defecțiune funcțională) în care aparatul funcționează cu o problemă. Bazându-ne pe două distribuții Weibull, atribuite pentru intervalele de timp I-P și respectiv C-P, pentru cele două intervale se obține estimarea zonei de defectare în timp și se poate estima DVR.

9.9. Monitorizarea stării sistemelor funcționale

În monitorizarea stării, indiferent de ce echipamente sunt monitorizate, acestea se încadrează în două categorii: sisteme complet observabile și sisteme parțial observabile. Pentru un sistem complet observabil, starea mașinii poate fi total observată sau identificată. Informațiile colectate de la acest sistem se numesc informații directe. Pentru un sistem parțial observabil, starea mașinii nu poate fi complet observată sau identificată. Informațiile obținute de la acest sistem se numesc informații indirecte, care sunt într-o anumită legătură cu starea reală a mașinii. În ceea ce urmează vom discuta în legătură cu diferite modele și metode pentru aceste două tipuri de sisteme.

9.9.1. Sisteme complet observabile

Wang [48] a dezvoltat un model MSS bazat pe un mod de variație a coeficientului aleator unde, coeficienții modului de regresiei se presupune că urmează funcții de distribuție cunoscute. Modelul a fost utilizat pentru a determina nivelul critic optim, și intervalul de inspecție a MSS, în termenii unui criteriu de interes, care poate fi costul, durata de întrerupere sau fiabilitatea. Pentru a descrie procesul de deteriorare, a fost utilizat un model stochastic, de tip proces gamma; s-a considerat că sistemul este defect în cazul în care starea lui depășește un nivel prestabilit de funcționare neconformă; pe baza acestui nivel s-a stabilit intervalul de inspecție secvențial (sau

neperiodic). Se poate introduce o politică de înlocuire, pe mai multe niveluri a regulilor limită de control, obținându-se pragurile optime și planificarea inspecțiilor, prin minimizarea costului de mentenanță preconizat pentru fiecare unitate de timp. Se poate utiliza o politică de reparație/înlocuire pe mai multe niveluri bazată. Pe regula limitei de control se obțin praguri optime iar programarea inspecției se face pe baza unui criteriu de cost și a unui criteriu de disponibilitate. Se poate utiliza un lanț Markov pentru a descrie modelul MSS pentru un sistem cu deteriorare în timp, supus unei inspecții periodice. S-a constatat că optimizarea, atât a frecvenței de inspecție cât și a pragului de mentenanță, maximizează disponibilitatea sistemului.

9.9.2. Sisteme parțial observabile

Ohnishi și colab. [49] au aplicat un model de proces decizional de tip Markov pentru un sistem de deteriorare discret în timp, pentru a găsi pragul optim de înlocuire în care este utilizată reparația minimă pentru restabilirea funcționalității, în cazul în care decizia este fără înlocuire, doar cu doar reparație. Procesul decizional se formulează ca o problemă discretă a deciziei de tip Markov, bazată pe un proces de deteriorare continuă, pentru a găsi zona optimă de mentenanță în ceea ce privește costurile. Barbera și colab. [50] au propus un model MSS, presupunând o variație exponențială a cedării în raport cu rata de defectare, care depinde de variabilele de stare și de intervalele de inspecție fixe. S-a descoperit zona optimă de mentenanță pentru a minimiza costul mediu pe termen lung al acțiunilor de mentenanță și al defecțiunilor. Christer și colab. [51] au folosit un model spațial privitor la starea sistemului și filtrul Kalman pentru a prezice condiția de eroziune a inductoarelor într-un cuptor de inducție, condiționată de măsurătorile indirecte efectuate până în prezent. Apoi, a fost elaborat un model de cost privitor la înlocuire pentru a obține zona optimă de înlocuire, având în vedere toate informațiile disponibile. Kumar și Westberg [52] au propus o abordare bazată pe fiabilitate, pentru estimarea intervalului optim de mentenanță sau a pragului optim al zonei de mentenanță, pentru a minimiza costul total pe unitatea de timp. Pentru a găsi soluția optimă, autorii au folosit PHM (Prognostics & Health Management) în vederea identificării importanței monitorizării variabilelor și a timpului total de încercare. Makis și Jardine [53, 54] au stabilit un model MSS folosind un proces Markov pentru a descrie procesul de evoluție al variabilelor de stare și un PHM pentru a descrie mecanismul de defecțiune, care depinde atât de timpul de funcționare anterior cât și de variabila de stare. S-a aplicat o teorie de oprire optimă pentru a găsi zona de înlocuire, maximizând profitul total așteptat în timpul duratei de viață a mașinii. În cazul optimizării MSS pe baza unui model stocastic continuu discret, evoluția stării ascunse a mașinii se poate descrie printr-un proces Markov continuu, iar monitorizarea stării a fost descrisă de un proces stocastic de observare discretă care depinde de starea ascunsă a mașinii. Se poate constata că, pe termen lung, zona optimă de înlocuire a minimalizat costul estimat pe unitatea de timp, folosind teoria optimă de oprire. Wang [55] a aplicat un model de control recursiv stocastic pentru optimizarea MSS pe baza ipotezei că elementul monitorizat urmează un proces de deteriorare în două perioade: prima perioadă a unei funcționări normale, iar a doua caracterizată de o potențială cedare. A fost folosit un model de filtrare recursivă stocastică pentru a prezice DVR, iar apoi a stabilit un model de decizie pentru a recomanda acțiunile optime de mentenanță. Intervalele optime de monitorizare a stării au fost determinate pe baza unei combinații între simulare și analiză analitică. Okumura și Okino [56] au construit un model MSS generalizat, în care sunt incluse pierderea de viață reziduală și timpul de pregătire a înlocuirii. Astfel, au fost obținut vectorul de

timp optim de inspecție și nivelul de avertizare al sistemului, pe baza unei probabilități de înlocuire preventivă a constrângerilor, prin minimizarea costului mediu pe termen lung suportat pe unitatea de timp.

9.9.3. Modul de monitorizare a stării sistemelor

Există două moduri de monitorizare a stării sistemelor: continuu și periodic. Prin *monitorizarea continuă*, pe baza semnalelor unor senzori montați pe mașină, se declanșează o alarmă de avertizare ori de câte ori se detectează o funcționare defectuoasă. Există două limitări ale monitorizării continue: (1) costul ridicat; (2) monitorizarea continuă a semnalelor cu zgomot conduce la informații inexacte de diagnosticare. Prin urmare, este folosită *monitorizarea periodică* datorită faptului că este mai eficientă din punct de vedere al costurilor și oferă o diagnosticare mai precisă, utilizând date filtrate și/sau prelucrate. Riscul utilizării monitorizării periodice îl reprezintă posibilitatea de a omite unele evenimente de cedare care apar între inspecții succesive. Principala problemă relevantă pentru monitorizarea periodică este determinarea intervalului de monitorizare a stării sistemului. Trebuie proiectate atât zona optimă a intervalului de monitorizare a stării (sau a intervalului de inspecție) cât și pragul de la care trebuie efectuată inspecția. O posibilitate de optimizare este de a minimiza costul estimat pe unitatea de timp pentru intervalul dintre inspecția curentă și următoarea perioadă de inspecție. Pentru a obține intervalele de inspecție secvențială optime în cadrul mentenanței bazată pe starea sistemului (MSS), se poate utiliza un model bazat pe conceptul de întârziere, pentru un sistem ce funcționează defectuos, prin minimizarea costului mediu pe unitate de timp. Pentru a determina durata următorului interval de monitorizare a stării, cu un anumit nivel de risc asumat, se poate utiliza un model pentru determinarea intervalelor de monitorizare optimă a stării, bazat pe conceptul de timp de întârziere a defecțiunilor și pe conceptul de timp rezidual condiționat. Se presupune că monitorizarea stării sistemului este efectuată la un interval fix, pe întreaga durată de funcționare, realizând că ar putea fi necesară o monitorizare mai frecventă a stării de funcționare dinamice precum și în perioada de întârziere a defecțiunii.

9.9.4. Monitorizarea sistemelor prin combinarea datelor achiziționate de la mai mulți senzori

Atunci când avem de-a face cu un sistem complex, un singur senzor nu este capabil să colecteze suficiente date pentru o monitorizare precisă a stării, pentru diagnosticare sau expertizare a defecțiunilor. În aceste condiții, sunt necesari mai mulți senzori sau/și senzori cu capacitate multiplă de achiziție și transmitere de date. Odată cu dezvoltarea rapidă a științei informatice și a tehnologiei avansate a senzorilor, există tendința de utilizare a mai multor senzori pentru monitorizarea stării sistemului, pentru diagnosticarea și prognoza defecțiunilor. Atunci când se utilizează mai mulți senzori, datele colectate de la diferiți senzori pot conține informații parțiale diferite despre aceeași stare a mașinii. Problema este, cum să se combine toate informațiile parțiale obținute de la diferiți senzori pentru diagnosticarea și expertizarea mai precisă a mașinii. Soluția la această problemă este cunoscută sub numele de combinarea datelor multisenzor. Există multe tehnici de combinare a datelor multisenzor. Acestea pot fi grupate în trei categorii principale: (1) fuziune la nivel de date, (2) fuziune la nivel funcțional și (3) fuziune la nivel decizional.

De exemplu, se poate folosi o abordare de combinare la nivel de date pentru a genera fuzionarea imaginilor obținute prin iluminare multidirecțională în vederea obținerii unei imagini cu

un grad ridicat de informații relevante pentru monitorizarea suprafețelor finisate și pentru diagnosticarea abaterilor de formă sau a rugozităților. Diagnosticarea bazată pe combinarea datelor multisenzor a demonstrat că depășește performanțele diagnosticării provenite de la un singur senzor. De exemplu, pentru o mai bună diagnoză și expertizare a defecțiunilor din cutia de viteze se pot aplica metodele de combinare a *caracteristicilor uleiului* cu *vibrațiile necorespunzătoare*. Pentru monitorizarea stării suprafețelor prelucrate și diagnosticarea sculelor așchietoare se poate aplica o rețea neuronală bazică radială, pentru a combina *caracteristicile extrase din imaginile suprafețelor prelucrate* cu *sunetul* generat în timpul procesului de prelucrare. Pe de altă parte, într-un sistem de diagnoză multisenzor ce utilizează combinarea datelor, trebuie avute în vedere și **fiabilitatea și autodiagnosticarea senzorilor**.

Într-un sistem mecanic cu senzori multipli instalați, datele colectate de la fiecare senzor pot fi un amestec complicat de date din mai multe surse. Numai câteva dintre aceste surse sunt legate de o anumită stare a mașinii. Problema este, de a separa diferitele surse pentru o diagnoză și prognoză mai bună a mașinii, prin combinarea datelor multisenzor observate. Tehnica de rezolvare a acestei probleme este cunoscută ca separarea sursei oarbe (SSO). În ultima vreme, tehnica SSO se utilizează din ce în ce mai frecvent în domeniul diagnosticării și expertizării defecțiunilor sistemelor mecanice. Ideea generală a SSO este prezentată în *figura 9.5*. Se presupune că semnalele sursă $S(t) = [s_1(t), \dots, s_n(t)]$ generate de n surse independente necunoscute iar semnalele de zgomot $Z(t)$, independente de semnalele sursă, sunt combinate împreună printr-un proces de amestecare necunoscut. Rezultatul combinării este observat la ieșire ca un semnal m -dimensional: $X(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t)]$. O formulă pentru procesul de combinare poate fi scrisă ca:

$$X(t) = f[S(t), Z(t)] \quad (9.8)$$

unde f este, în general, o funcție neliniară, dependentă de timp. O formă frecvent utilizată pentru procesul de combinare;

$$X(t) = f[S(t)] + Z(t) \quad (9.9)$$

separând semnalul și zgomotul. Obiectivul SSO este de a găsi o funcție de separare care se aplică semnalelor observate $X(t)$ pentru a obține o estimare a semnalelor sursă $S(t)$.

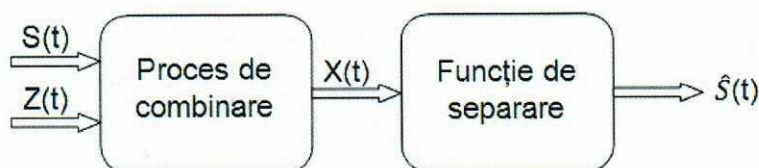


Fig. 9.5. Procesul de combinare și separare în cadrul modelului SSO

În literatura de specialitate, există două categorii de procese de combinare: instantaneu și convolutiv. Un proces de combinare este instantaneu dacă $f(\bullet)$ este o funcție independentă de timp (fără memorie), altfel este convolutivă. Procesul de combinare convolutivă este mai frecvent, în special pentru sistemele mecanice. Se exemplu, pentru monitorizarea și diagnosticarea semnalelor provenite ale mașinile rotative, se pot avea în vedere și se pot compara, două abordări, și anume o abordare dependentă de timp și o abordare prin frecvență. Aceeași abordare se poate utiliza în cazul

diagnosticării defectelor lagărelor sau pentru a separa semnalele acustice mixte în vederea monitorizării sistemului și diagnosticării defecțiunilor.

9.10. Concluzii

În acest capitol s-au trecut în revistă modurile actuale și dezvoltările recente privind diagnosticarea și expertizarea mașinilor care implementează **mentenanța bazată pe starea sistemului** MSS. S-au avut în vedere diferite tehnici, modele și algoritmi, rezultate în urma celor trei etape principale ale unui program MSS, și anume achiziția de date, prelucrarea datelor și luarea deciziilor de mentenanță, cu accent pe ultimele două etape. Au fost discutate, de asemenea, diferite tehnici de combinare a semnalelor provenite de la mai mulți senzori.

Deși în literatura de specialitate sunt disponibile tehnici avansate de mentenanță, încă există două tipuri de abordări în industria actuală. Una dintre abordările extreme o reprezintă adoptarea, întotdeauna, a unei politici de *activare doar la defecțiune*. Cealaltă abordare extremă este aplicarea, întotdeauna, a unei politici de mentenanță, cât mai frecvent posibilă. Desigur, cele două politici convenționale de mentenanță, și anume politica de activare doar la defecțiune și *mentenanța preventivă la intervale scurte de timp*, pot fi aplicate, cu rezultate satisfăcătoare, în unele cazuri speciale. În anumite situații, mai ales atunci când, atât mentenanța cât și activarea doar la defecțiune sunt foarte costisitoare, **mentenanța bazată pe starea sistemului - MSS** este o alegere mult mai bună decât cele convenționale. Pentru alegerea celor mai bune politici de mentenanță sunt necesare cunoștințe expert în respectivul domeniu, de tipul teoriei fiabilității și mentenanței.

Cauzele pentru care tehnologiile avansate de mentenanță nu sunt mai bine implementate în industrie ar putea fi: (1) lipsa datelor din cauza unei abordări incorecte de colectare a datelor sau chiar a lipsei de colectare a datelor și/sau de stocare a datelor; (2) lipsa unei comunicări eficiente între dezvoltatorii de teorii și practicieni în domeniul fiabilității și mentenanței; (3) lipsa unor abordări eficiente de validare; (4) dificultăți de implementare datorită schimbărilor frecvente de design, tehnologii, politici de afaceri și a managementului.

Sistemele de diagnosticare și de expertizare de generație următoare se vor concentra, probabil, mai mult pe diferite aspecte ale monitorizării continue și ale diagnosticării și expertizării automate. Considerăm că următoarele direcții de cercetare sunt necesare pentru următoarea generație de sisteme de diagnosticare și expertizare:

1. Îmbunătățirea sistemelor de **mentenanță bazată pe starea sistemelor** pentru a colecta informații exacte, în special informații despre evenimente. Aceste informații sunt foarte importante pentru construirea și validarea modelului;
2. Dezvoltarea de tehnici avansate de senzori pentru achiziționarea de date on-line;
3. Dezvoltarea de metode sau instrumente pentru extragerea, prelucrarea și interpretarea informațiilor;
4. Dezvoltarea algoritmilor eficienți și rapizi de procesare a semnalelor on-line;
5. Dezvoltarea unor abordări robuste de detectare a defectelor și abordări de diagnosticare a defecțiunilor pentru sisteme complexe;
6. Dezvoltarea unor abordări de expertizare rapidă și precisă;
7. Dezvoltarea modelelor de mentenanță bazată pe starea sistemelor care încorporează mai multe categorii de acțiuni de mentenanță;
8. Stabilirea unor abordări eficiente de validare.

Odată cu dezvoltarea rapidă a tehnologiei sistemelor micro-electro-mecanice, o tendință viitoare de cercetare și dezvoltare a modelelor de mentenanță bazată pe starea sistemelor ar fi *proiectarea unui dispozitiv inteligent* care să aibă capacitatea de a monitoriza în permanență propria funcționare corectă, utilizând achiziția de date on-line, semnalul on-line, prelucrarea instantanee a datelor și instrumentele de diagnostic on-line (a se vedea, de exemplu, [57]). Algoritmi rapizi și robuști de procesare a semnalului on-line sunt esențiali pentru proiectarea unui dispozitiv inteligent. Acest lucru ar stimula, fără îndoială, creșterea interesului cercetării în acest domeniu. O altă tendință a cercetării în domeniul modelelor de mentenanță bazată pe starea sistemelor ar fi, colaborarea grupurilor de cercetare pentru a produce platforme integrate în vederea îmbunătățirii diagnosticării și expertizării unui program de mentenanță, deoarece fiecare grup de cercetare are specialitatea sa.

BIBLIOGRAFIE

- [1] A.K.S. Jardine, D. Lin, D. Banjevic, A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, Volume 20, Issue 7, Pages 1483-1510, October 2006.
- [2] J. Lee, R. Abujamra, A.K.S. Jardine, D. Lin, D. Banjevic, An integrated platform for diagnostics, expertizes and maintenance optimization, in: *The IMS '2004 International Conference on Advances in Maintenance and in Modeling, Simulation and Intelligent Monitoring of Degradations*, Arles, France, 2004.
- [3] H. Austerlitz, *Data Acquisition Techniques using PCs*, Academic Press, San Diego, CA, 2003.
- [4] N.V. Kirianaki, S.Y. Yurish, N.O. Shpak, V.P. Deynega, *Data Acquisition and Signal Processing for Smart Sensors* Wiley, Chichester, West Sussex, England, 2002.
- [5] C. Davies, R.M. Greenough, The use of information systems in fault diagnosis, in: *Proceedings of the 16th National Conference on Manufacturing Research*, University of East London, UK, 2000.
- [6] R. Xu, C. Kwan, Robust isolation of sensor failures, *Asian Journal of Control*, 5, pp. 12-23, 2003.
- [7] J.C. Russ, *The Image Processing, Handbook* CRC Press, Boca Raton, FL, 2002.
- [8] M.S. Nixon, A.S. Aguado, *Feature Extraction and Image Processing*, Newnes, Oxford, 2002.
- [9] R.R. Schoen, T.G. Habetler, Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31, pp. 900-906, 1995.
- [10] R.G.T. De Almeida, S.A. Da Silva Vicente, L.R. Padovese, New technique for evaluation of global vibration levels in rolling bearings, *Shock and Vibration*, pp. 225-234, 2002.
- [11] Z. Liu, X. Yin, Z. Zhang, D. Chen, W. Chen, Online rotor mixed fault diagnosis way based on spectrum analysis of instantaneous power in squirrel cage induction motors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19, pp. 485-490, 2004.
- [12] D. Ho, R.B. Randall, Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14, pp. 763-788, 2000.
- [13] C.C. Wang, G.P.J. Too, Rotating machine fault detection based on HOS and artificial neural networks, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13, pp. 283-293, 2002.

- [14] Q. Meng, L. Qu, Rotating machinery fault diagnosis using Wigner distribution, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 5, pp. 155-166, 1991.
- [15] R.K. Young, *Wavelets Theory and Its Applications*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1993.
- [16] R. Rubini, U. Meneghetti, Application of the envelope and wavelet transform analyses for the diagnosis of incipient faults in ball bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15, pp. 287-302, 2001.
- [17] G.Y. Luo, D. Osypiw, M. Irle, On-line vibration analysis with fast continuous wavelet algorithm for condition monitoring of bearing, *Journal of Vibration and Control*, pp. 931-947, 2003.
- [18] G.O. Chandroth, W.J. Staszewski, Fault detection in internal combustion engines using wavelet analysis, in: *Proceedings of the COMADEM '99*, Chipping Norton, pp. 7-15, 1999.
- [19] H.T. Grimmeliuss, J.K. Woud, G. Been, On-line failure diagnosis for compression refrigeration plants, *International Journal of Refrigeration*, 18, pp. 31-41, 1995
- [20] L. Yang, M.Z. Yang, Z. Yan, B.Z. Shi, Extraction of symptom for on-line diagnosis of power equipment based on method of time series analysis, in: *Proceedings of the Sixth International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, vol. 1, Xi'an, China, pp. 314-317, 2000.
- [21] B.K. Sinha, Trend prediction from steam turbine responses of vibration and eccentricity, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A—Journal of Power and Energy*, 216, pp. 97-104, 2002.
- [22] A.K.S. Jardine, P.M. Anderson, D.S. Mann, Application of the Weibull proportional hazard model to aircraft and marine engine failure data, *Quality and Reliability Engineering International*, 3, pp. 77-82, 1987.
- [23] J. Moubray, *Reliability-Centred Maintenance* Butterworth-Heinemann, Oxford, 1997.
- [24] K.B. Goode, J. Moore, B.J. Roylance, Plant machinery working life prediction method utilizing reliability and condition-monitoring data, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E—Journal of Process Mechanical Engineering*, 214, pp. 109-122, 2000.
- [25] L.R. Rabiner, Tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition, *Proceedings of the IEEE*, 77, pp. 257-286, 1989.
- [26] C. Bunks, D. McCarthy, T. Al-Ani, Condition-based maintenance of machines using hidden Markov models, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14, pp. 597-612, 2000.
- [27] D. Lin, V. Makis, Recursive filters for a partially observable system subject to random failure, *Advances in Applied Probability*, 35, pp. 207-227, 2003.
- [28] X. Lou, K.A. Loparo, Bearing fault diagnosis based on wavelet transform and fuzzy inference, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18, pp. 1077-1095, 2004.
- [29] C.K. Mechefske, J. Mathew, Fault detection and diagnosis in low speed rolling element bearing. Part II: The use of nearest neighbour classification, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 6, pp. 309-316, 1992.
- [30] Q. Sun, P. Chen, D. Zhang, F. Xi, Pattern recognition for automatic machinery fault diagnosis, *Journal of Vibration and Acoustics*, Transactions of the ASME, 126, pp. 307-316, 2004.
- [31] J.K. Spoorre, Application of the cascade correlation algorithm (CCA) to bearing fault classification problems, *Computers in Industry*, 32, pp. 295-304, 1997.
- [32] T. V. Tung, B.S. Yang, *Machine Fault Diagnosis and Prognosis: The State of The Art*, *International Journal of Fluid Machinery and Systems* Vol. 2, No. 1, January-March 2009.

- [33] R.M. Tallam, T.G. Habetler, R.G. Harley, Self-commissioning training algorithms for neural networks with applications to electric machine fault diagnostics, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17, pp. 1089-1095, 2002.
- [34] R.G. Silva, R.L. Reuben, K.J. Baker, S.J. Wilcox, Tool wear monitoring of turning operations by neural network and expert system classification of a feature set generated from multiple sensors, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12, pp. 319-332, 1998.
- [35] H.R. DePold, F.D. Gass, The application of expert systems and neural networks to gas turbine expertizares and diagnostics, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 121, pp. 607-612, 1999.
- [36] B.S. Yang, T. Han, Y.S. Kim, Integration of ART-Kohonen neural network and case-based reasoning for intelligent fault diagnosis, *Expert Systems with Applications*, 26, pp. 387-395, 2004.
- [37] C.K. Mechefske, Objective machinery fault diagnosis using fuzzy logic, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12, pp. 855-862, 1998.
- [38] G.C. Collins, J.R. Bourne, A.J. Brodersen, C.F. Lo, Comparison of rule-based and belief-based systems for diagnostic problems, in: *Proceedings of the Second International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA/AIE—89)*, vol. 2, New York, USA, pp. 785–793, 1989.
- [39] R. Du, K. Yeung, Fuzzy transition probability: A new method for monitoring progressive faults. Part 1: The theory, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 17, pp. 457-467, 2004.
- [40] J.J. Gertler, *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*, Marcel Dekker, New York, 1998.
- [41] S. Simani, C. Fantuzzi, R.J. Patton, *Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques*, Springer, London, 2003.
- [42] R. David, H. Alla, Petri nets for modeling of dynamic systems—A survey, *Automatica*, 30, pp. 175-202, 1994.
- [43] O. E. Dragomir, R. Gouriveau, F. Dragomir, E. Minca, N. Zerhouni, Review of expertizare problem in condition-based maintenance. IFAC and in collaboration with the IEEE Control Systems Society, European Control Conference, ECC'09., Aug 2009, Budapest, Hungary. sur CD ROM, pp.1585-1592, 2009.
- [44] O. Dragomir, R. Gouriveau, N. Zerhouni and F. Dragomir, "Framework for a distributed and hybrid expertizare system", in: 4thIFAC Conf. on Manag. and Control of Prod. and Logistics, 2007.
- [45] W. Bartelmus and R. Zimroz, "Vibration condition monitoring of planetary gearbox under varying external load", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23, pp. 246- 257, 2009.
- [46] G.J. Kacprzynski, A. Sarlashkar and M.J. Roemer, "Predicting remaining life by fusing the physics of failure modeling with diagnostics", *Journal of Metal*, Vol. 56, pp. 29-35, 2004.
- [47] C.H. Oppenheimer and K.A. Loparo, "Physically based diagnosis and prognosis of cracked rotor shafts", in: *Comp. & Syst. Diagnostics, Expertizares, and Health Manag. II*, Vol. 4733, pp. 122-132, 2002.
- [48] W. Wang, A model to determine the optimal critical level and the monitoring intervals in condition-based maintenance, *International Journal of Production Research*, 38, pp. 1425-1436, 2000.

- [49] M. Ohnishi, T. Morioka, T. Ibaraki, Optimal minimal-repair and replacement problem of discrete-time Markovian deterioration system under incomplete state information, *Computers and Industrial Engineering*, 27, pp. 409-412, 1994.
- [50] F. Barbera, H. Schneider, P. Kelle, A condition based maintenance model with exponential failures and fixed inspection intervals, *Journal of the Operational Research Society*, 47, pp. 1037-1045, 1996.
- [51] A.H. Christer, W. Wang, J.M. Sharp, A state space condition monitoring model for furnace erosion prediction and replacement, *European Journal of Operational Research*, 101, pp. 1-14, 1997.
- [53] D. Kumar, U. Westberg, Maintenance scheduling under age replacement policy using proportional hazards model and TTT-plotting, *European Journal of Operational Research*, 99, pp. 507-515, 1997.
- [54] V. Makis, A.K.S. Jardine, Optimal replacement in the proportional hazards model, *INFOR*, 30, pp. 172-183, 1992.
- [55] W.B. Wang, A stochastic control model for on line condition based maintenance decision support, in: *Sixth World Multiconference on Systematics, Cybernetics and Informatics*, vol. VI, Proceedings—Industrial Systems and Engineering I, Orlando, pp. 370–374, 2002.
- [56] S. Okumura, N. Okino, Optimisation of inspection time vector and warning level in CBM considering residual life loss and constraint on preventive replacement probability, *International Journal of COMADEM*, 6, pp. 10-18, 2003.
- [57] F.M. Discenzo, P.J. Unsworth, K.A. Loparo, H. Marcy, Self-diagnosing intelligent motors: A key enabler for next generation manufacturing systems, *IEE Colloquium (Digest)*, pp. 15-18(3/1–3/4), 1999.
- [58] Heizer, J., *Production and Operations Management*, Allyn and Macon, Needham Heights, Massachusetts, 1999.
- [59] L. Marian, *Management general și industrial*, Curs universitar, Ed. Universității “Petru Maior”, Tg. Mureș, 1994.
- [60] F. Moore, *Production/Operations Management*, 9th ed., Richard Irwin, Burr Ridge, Illinois, 1994.
- [61] W. Stevenson, *Introduction to Management Science*, 2nd ed., Richard D. Irwin, Burr Ridge, Illinois, 1992.

CAPITOLUL 10. FIABILITATEA SISTEMELOR MECANICE

10.1. Aspecte particulare ale fiabilității sistemelor

10.2. Definițiile fiabilității

10.3. Indicatori de fiabilitate

10.4. Legi de distribuție

10.5. Fiabilitatea examinării nedistructive (NDE)

10.1. Aspecte particulare ale fiabilității sistemelor

Importanța tot mai mare a studiului fiabilității se datorează următorilor factori: creșterea complexității sistemelor tehnice și a importanței funcțiunilor pe care trebuie să le realizeze acestea, intensificarea regimurilor de lucru ale sistemelor sau părților componente ale acestora, complexitatea condițiilor de exploatare, introducerea automatizării pe scară largă și controlul automat al proceselor de producție, inclusiv cu ajutorul calculatoarelor de proces, creșterea cheltuielilor de exploatare, asigurarea securității exploatării. Produsele industriale, echipamentele mecanice, dispozitivele, organele de mașini etc., pot fi considerate ca unități elementare, având funcționare autonomă, în agregate sau instalații complexe. Instalațiile sau liniile tehnologice de fabricație ale industriei chimice, de exemplu, sunt alcătuite din utilaje în care au loc procese chimice și/sau operații fizice, alături de care se află utilaje auxiliare, toate acestea fiind legate între ele prin conducte sau prin alte mijloace de transport, în funcție de tipul de material transportat: fluide sau solide granulare. Aceste instalații constituie sisteme, adică reprezintă un număr de elemente active, interconectate între ele, care pot fi considerate ca un întreg structural. Legăturile reciproce sunt cele care deosebesc sistemul de un simplu conglomerat de elemente. Legăturile depind, în întregime, pentru fiecare caz dat, de scopul în vederea căruia se realizează sistemul. În analizele de fiabilitate, se consideră numai legăturile esențiale sau cele care interesează sub aspectul considerat.

10.2. Definițiile fiabilității

Se definește conceptul calitativ al fiabilității, drept capacitatea unui sistem, produs, componentă, structură etc., de a îndeplini corect funcțiunile prevăzute pe durata unei perioade de timp date, în condiții de exploatare specificate. În mod similar, se definește conceptul cantitativ al fiabilității, ca fiind probabilitatea ca un sistem, produs, componentă, structură etc., să-și îndeplinească corect funcțiile prevăzute, la un nivel de performanță stabilit, pe durata unei perioade de timp date, în condiții de exploatare specificate. Din definițiile de mai sus rezultă faptul că, studiul fiabilității se bazează pe teoria probabilității fiind utilizate pentru analiza fiabilității și alte

discipline ca: statistica matematică, programarea matematică, teoria așteptării, a deciziei și informației, teoria reglării automate, analiza spectrală etc.

Ca urmare putem concluziona că:

- Fiabilitatea unui “obiect” reprezintă capacitatea acestuia de a-și îndeplini funcția pentru care a fost proiectat, un anumit interval de timp și cu o probabilitate cunoscută;
- Din punct de vedere metrologic presupune menținerea unui parametru de calitate între anumite limite, în afara căruia se consideră că sistemul este în stare de defect;
- Nivelul de funcționare al oricărui sistem este dat de către parametrii săi de performanță, respectiv:
 - Capacitatea de bună funcționare;
 - Buna stare a unui sistem;
 - Capacitatea de stocare;
 - Durata de viață;
 - Funcționarea fără defecțiuni;
 - Disponibilitatea;
 - Capabilitatea;
 - Capacitatea de reparare;
 - Restabilirea.

În abordarea fizică, rezistența unei componente mecanice este modelată ca o variabilă aleatoare S (strength). Componenta este supusă unei sarcini L (load) care este, de asemenea, modelată ca o variabilă aleatoare. O defecțiune va avea loc imediat ce sarcina este mai mare decât rezistența. Fiabilitatea R (reliability) a elementului este definită ca probabilitatea ca rezistența să fie mai mare decât solicitarea (încărcarea),

$$R = P_r(S > L)$$

unde prin $P_r(A)$ se înțelege probabilitatea de manifestare a evenimentului A .

De obicei, sarcina variază în funcție de timp și poate fi modelată ca o variabilă dependentă de timp $L(t)$. Componenta se va deteriora în timp, din cauza mecanismelor de defectare, cum ar fi coroziunea, eroziunea, uzura, oboseala, etc. Rezistența elementului va fi, prin urmare, funcție de timp, $S(t)$. O posibilă variație în timp a celor două mărimi, $S(t)$ și $L(t)$ este ilustrată în *figura 10.1*. Timpul până la defecțiunea T a componentei este timpul (cel mai mic) până când $S(t) < L(t)$ este dat de relația:

$$T = \min\{t; S(t) < L(t)\}$$

și în aceste condiții fiabilitatea $R(t)$ a componentei poate fi definită ca:

$$R(t) = p(t) = P_r(T > t)$$

unde:

$p(t)$ - este probabilitatea de bună funcționare, adică însăși funcția de fiabilitate;

t - variabila de timp;

T - o limită precizată a duratei de bună funcționare.

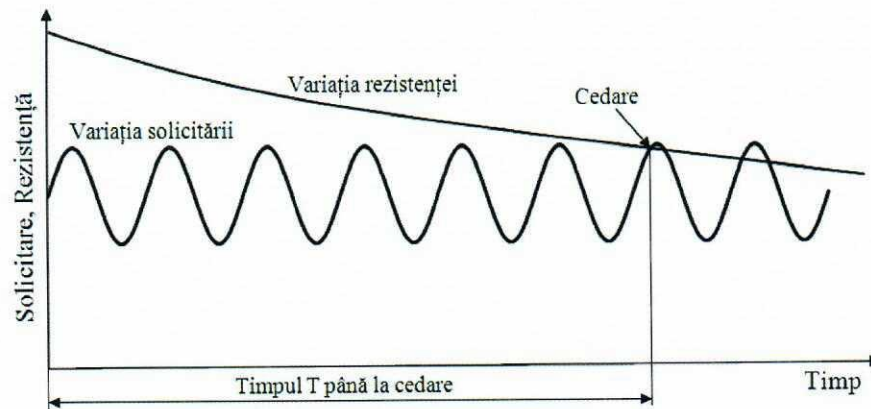


Fig. 10.1. Variația solicitării și a rezistenței unei componente mecanice

Obiectivul principal al unui studiu de fiabilitate trebuie să fie întotdeauna furnizarea informațiilor care stau la baza luării deciziilor. Înainte de inițierea unui studiu de fiabilitate, factorul de decizie trebuie să enunțe problema decizională și să precizeze obiectivele și condițiile de limitare ale studiului, astfel încât informațiile relevante necesare pentru a lua decizia să fie disponibile al timp și în format adecvat.

Fiabilitate are o gamă potențial largă de domenii de aplicare. În orice caz, așa cum se prezintă în figura 10.2, o parte dintre metodele utilizate în cadrul analizei de risc, se bazează pe studiul și determinarea fiabilității sistemelor.

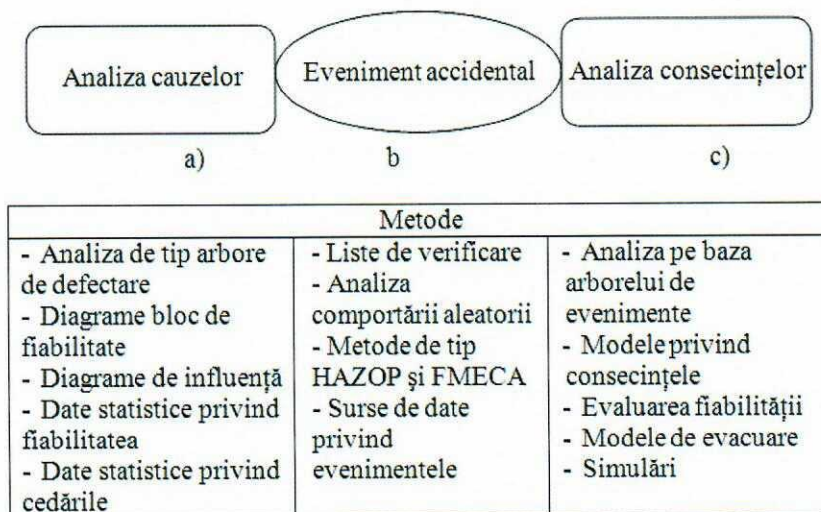


Fig. 10.2. Pașii principali în analiza riscului cu metodele utilizate.

Din figura 10.2. reținem următoarele aspect ale metodelor utilizate în cadrul analizei de risc și care utilizează fiabilitatea:

(a) Identificarea și descrierea eventualelor evenimente accidentale din sistem.

Un eveniment accidental este definit, de obicei, ca o abatere semnificativă față de condițiile normale de funcționare care pot duce la consecințe nedorite. Într-o instalație de prelucrare a petrolului/gazelor, o scurgere de gaz/petrol poate fi, de exemplu, definită ca un **eveniment accidental**.

(b) Cauzele potențiale ale fiecărui eveniment accidental sunt identificate pe baza unei analize structurale. Cauzele sunt de obicei identificate într-o structură ierarhică, pornind de la cauzele principale. Cauzele principale și cele intermediare pot fi descrise de o structură arborescentă numită arbore de defectare. Dacă sunt disponibile estimări de probabilitate, acestea pot fi introduse în arborele de defectare și se poate calcula probabilitatea sau/și frecvența evenimentului accidental.

(c) Sistemele bine concepute includ diferite bariere și funcții de siguranță care sunt instalate pentru a opri dezvoltarea evenimentelor accidentale sau pentru a reduce consecințele evenimentelor accidentale. În exemplul de scurgere a gazului de la punctul (a), barierele și funcțiile de siguranță pot cuprinde sisteme de detectare a gazelor/petrolului, sisteme de închidere de urgență, sisteme de stingere a incendiilor, sisteme de izolare împotriva incendiilor (de exemplu, pereți de incendiu) și sisteme / proceduri de evacuare.

Consecințele finale ale unui eveniment accidental vor depinde de funcționarea adecvată a acestor sisteme. Analiza consecințelor este efectuată, de obicei, printr-o analiză arborescentă a evenimentelor. Analiza de tip arbore de evenimente este adesea completată de calculele privind incendiile și potențialul exploziv, simulările privind propagarea incendiilor, evaluarea fiabilității sistemelor de închidere de urgență, etc.. Pot fi necesare metode specifice pentru a analiza consecințele pentru oameni, mediu, bunuri materiale, regularitatea producției.

Metodele utilizate cel mai frecvent în timpul celor trei etape ale unei analize de risc sunt prezentate în *figura 10.2*. Analiza fiabilității este o parte principală a oricărui QRA (analiză de risc cantitativă), mai multe metode fiind comune pentru analizele de risc și fiabilitate.

În situații practice, înainte de efectuarea unei analize de fiabilitate va trebui să se obțină modele (stochastice) ale sistemului care să aibă caracteristici cât mai aproape de cele reale. sau cel puțin trebuie să se aleagă din mai multe modele posibile. Pentru a fi "realist" modelul trebuie să descrie caracteristicile esențiale ale sistemului, dar nu trebuie neapărat să fie exact în toate detaliile. Fiecare încercare de a folosi matematica pentru a studia unele fenomene reale trebuie să înceapă prin construirea unui model matematic al acestor fenomene. Din necesitate, modelul simplifică aspectele într-o măsură mai mare sau mai mică și, ca urmare, un număr de detalii sunt ignorate. Succesul depinde de faptul dacă detaliile ignorate sunt sau nu importante în dezvoltarea fenomenelor studiate. Soluția problemei matematice poate fi corectă numai că poți fi în conflict total cu realitățile, pentru că ipotezele originale ale modelului matematic se deosebesc în mod esențial de condițiile problemei practice luate în considerare. În prealabil, este imposibil să se prevadă cu certitudine dacă un model matematic dat este sau nu adecvat. Pentru a afla acest lucru, este necesar să deducem o serie de consecințe ale modelului și să le comparăm cu observarea.

În studiile privind fiabilitatea și siguranța sistemelor tehnice, trebuie să lucrăm întotdeauna cu modele ale sistemelor. Aceste modele pot fi grafice (rețele de diferite tipuri) sau matematice. Este necesar un model matematic pentru a putea aduce date și a utiliza metode matematice și statistice pentru a estima parametrii de fiabilitate, siguranță sau risc. Pentru astfel de modele, se cere ca:

- Modelul trebuie să fie suficient de simplu pentru a fi tratat prin metodele matematice și statistice disponibile.
- Modelul trebuie să fie suficient de "realist", astfel încât rezultatele deduse să fie relevante din punct de vedere practic.

Cu toate acestea, trebuie avem în vedere că lucrăm cu un model simplificat, idealizat al sistemului. În plus, rezultatele pe care le derivăm sunt valabile numai pentru model și, prin urmare, sunt doar "corecte" în măsura în care modelul este realist.

Înainte de a începe să dezvoltăm un model, ar trebui să înțelegem în mod clar ce tip de decizie ar trebui să furnizeze rezultatele din analiza noastră și, de asemenea, formatul necesar al contribuției la decizie.

Studiul fiabilității unui sistem presupune mai întâi o analiză a componenței sistemului, prin care se stabilește dependența stării globale acestuia de starea elementelor componente cu parametri de fiabilitate dați. Sistemele pot fi: reparabile sau nereparabile, aceasta depinzând și de ipotezele admise asupra funcționării și de condițiile impuse exploatarei. Referitor la sisteme se pot face următoarele ipoteze:

a) echipamentul considerat, nu poate fi la un moment dat, decât în unul din următoarele două stări: bună funcționare sau defect;

b) echipamentul poate fi descompus în k elemente componente (sau blocuri), numerotate de la 1 la k , astfel încât, la un moment dat, fiecare componentă să fie în stare bună sau defect iar starea echipamentului (bun sau defect) depinde numai de starea componentelor;

c) fiecare componentă a sistemului are o durată de funcționare în parametri T_i aleatoare, fiind în stare bună în intervalul $(0, T_i)$ și în stare defectă după momentul T_i ;

d) variabilele aleatoare T_i ($i = 1, 2, \dots, k$) sunt independente. Această ultimă ipoteză este greu de verificat practic. Sistemele pot avea structură cu elemente dispuse în serie, în paralel și mixt (structură combinată).

Se poate spune că niciun model nu este absolut corect sau că toate modelele sunt false. În anumite situații, totuși, unele modele sunt mai utile decât altele. Există uneori convingerea că utilizarea "analizei probabilității de fiabilitate" a limitat valabilitatea datelor obținute și că se îndepărtează de utilizarea practică.

Conceptul de fiabilitate nu este numai probabilistic, el are în același timp și un caracter statistic în sensul că, determinarea caracteristicii de fiabilitate se face pe baza datelor privitoare la defecțiunile constatate pe o anumită populație statistică (un lot de produse identice, fabricate în condiții identice și încercate sau exploatate în aceleași condiții).

Din cele prezentate rezultă că într-o analiză a fiabilității sistemelor tehnice sunt implicate mai multe domenii. Sunt necesare cunoștințe detaliate despre aspectele tehnice ale sistemului și despre mecanismele fizice care pot duce la eșec/cedare/funcționare neconformă:

- Cunoașterea conceptelor matematice / statistice și a metodelor statistice este o condiție necesară (dar nu suficientă) pentru a putea efectua astfel de analize;
- Trebuie să fie disponibile date pentru estimarea parametrilor și verificarea modelelor;
- Analiza sistemelor complicate trebuie să fie însoțită de programe informatice adecvate.

Lista de mai sus nu este completă, dar ilustrează faptul că o analiză a fiabilității necesită multe domenii de cunoaștere diferite având o caracteristică multidisciplinară.

10.3. Indicatori de fiabilitate

Indicatorii de fiabilitate sunt mărimi care exprimă, calitativ și cantitativ, dacă o componentă/structură/etc., este fiabilă sau nu. Indicatorii de fiabilitate mai sunt denumiți și caracteristici sau parametri ai fiabilității. De foarte multe ori aceste caracteristici se referă la elemente nereparabile sau pentru care nu se dorește repararea. Acest element poate fi orice, de la o componentă mică la un sistem mare. Atunci când clasificăm o componentă ca fiind nereparabilă, suntem

interesați doar să o studiem până când apare prima cedare care să afecteze funcționarea normală în continuare. Dacă acea componentă care cedează este nereparabilă, asta înseamnă că aceasta va fi eliminată la prima cedare.

Câțiva dintre indicatorii ce furnizează informații privind fiabilitatea sunt:

- Funcția de fiabilitate $R(t)$;
- Funcția ratei de cedare $z(t)$;
- Timpul mediu până la cedare (MTTF);
- Durata medie reziduală (LMR).

10.3.1. Variabila de stare

Starea elementului la momentul t poate fi descrisă de variabila de stare $X(t)$:

$$X(t) = \begin{cases} 1 & \text{dacă până la timpul } t \text{ componenta funcționează în parametrii prevăzuți} \\ 0 & \text{dacă până la timpul } t \text{ componenta cedează} \end{cases}$$

Variabila de stare a unui element nereparabil este ilustrată în figura 10.3 și va fi, în general, o variabilă aleatorie.

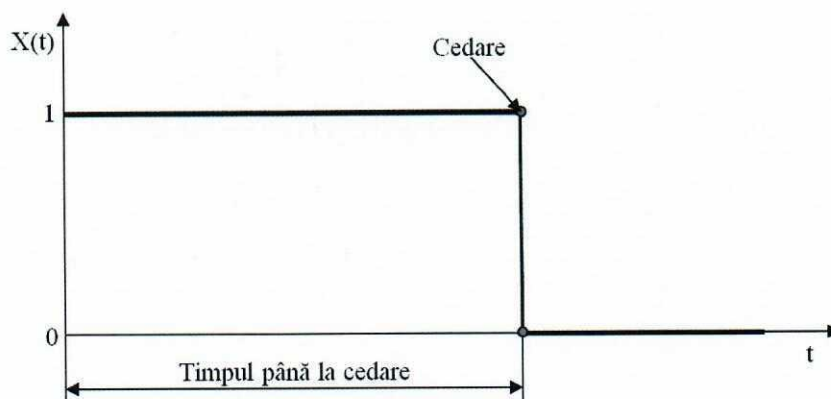


Fig. 10.3. Variabila de stare în raport cu timpul până la cedare a componentei

10.3.2. Timpul până la cedare/eșec/defectare/funcționare neconformă

Prin timpul până la defectarea unei componente se înțelege timpul scurs de la punerea în funcțiune a respectivei componente până când acesta cedează pentru prima dată. Se stabilește $t=0$ ca punct de plecare. Cel puțin într-o oarecare măsură, timpul până la cedare este supus unor variații întâmplătoare survenite ca urmare a unor cauze diverse. Prin urmare, este natural să interpretăm timpul până la cedare ca o variabilă aleatoare, T . Legătura dintre variabila de stare $X(t)$ și timpul până la cedare T este ilustrată în figura 10.3. Nu întotdeauna timpul până la cedare T este măsurat în timpul calendaristic. De asemenea, poate fi măsurată prin concepte de timp mai indirecte, cum ar fi:

- Numărul de utilizări ale un întrerupător;
- Numărul de kilometri parcurși de către un autovehicul;
- Numărul de rotații ale unui rulment;
- Numărul de cicluri pentru o componentă supusă solicitării de oboseală mecanică.

10.3.3. Probabilitatea de defectare $F(t)$

Din aceste exemple, observăm că timpul până la cedare poate fi adesea o variabilă discretă. O variabilă discretă poate fi, totuși, aproximată de o variabilă continuă. Aici, dacă nu se precizează altfel, vom presupune că timpul până la cedare T este distribuit continuu cu funcția densității de probabilitate $f(t)$ iar funcția de distribuție $F(t)$ este:

$$F(t) = P_r(T \leq t) = \int_0^t f(u) du \quad \text{pentru } t > 0 \quad (10.1)$$

$F(t)$ indicând probabilitatea ca respectiva componentă să cedeze în intervalul de timp $(0, t)$. $F(t)$ se mai numește și probabilitate de defectare sau funcție de defectare.

10.3.4. Funcția de densitate a probabilității $f(t)$

Funcția de frecvență (sau densitatea distribuției sau densitatea de probabilitate) a căderilor $f(t)$ exprimă frecvența relativă a căderilor Δn_i , într-un interval de timp Δt_i :

$$f(t_i) = \frac{\Delta n_i}{\Delta t_i N} \quad (10.2)$$

unde: $\Delta n_i = N(t) - N(t + \Delta t)$, iar N_0 reprezintă numărul total de componente luate în considerare.

În raport cu funcția de defectare $F(t)$, ca funcție continuă, funcția densității de probabilitate $f(t)$ este:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_r(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (10.3)$$

Dacă Δt este foarte mic, vom avea;

$$P_r(t < T \leq t + \Delta t) \approx f(t) \cdot \Delta t \quad (10.4)$$

Funcția de distribuție $F(t)$ și funcția de densitate a probabilității $f(t)$ sunt ilustrate în figura 10.4.

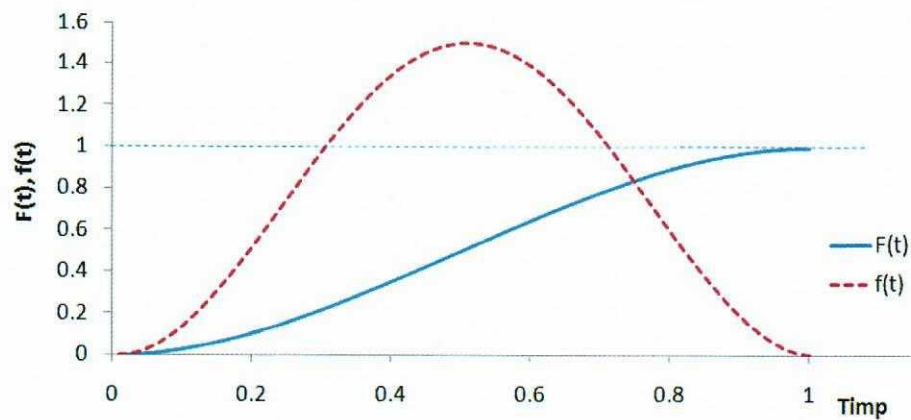


Fig. 10.4. Funcția de defectare $F(t)$ și funcția de densitate a probabilității $f(t)$

Reprezentarea grafică a funcției de densitate a probabilității $f(t)$ se face pe baza datelor privind momentele de apariție a defectelor în funcție de legea de distribuție care guvernează procesul respectiv, figura 10.5:

- 1- Distribuția (negativ) exponențială;
- 2- Distribuția normală (Gauss - Laplace);
- 3- Distribuția Weibull.

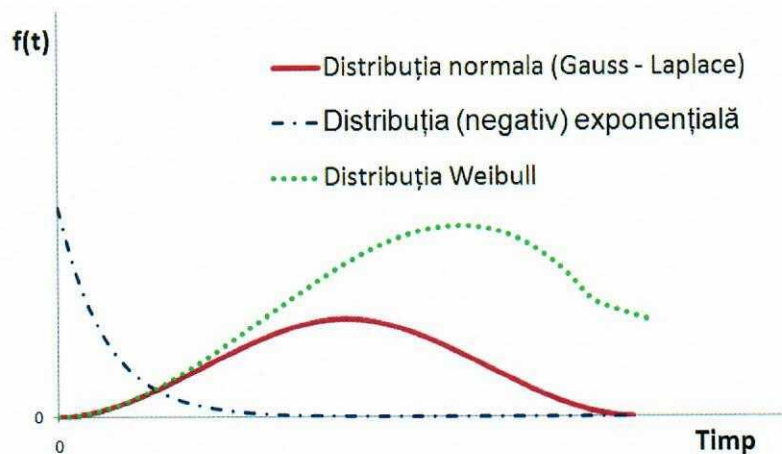


Fig. 10.5. Funcția de densitate a probabilității – tipuri de variații posibile

10.3.5. Probabilitatea de bună funcționare $p(t)$ sau funcția de fiabilitate $R(t)$

Funcției de fiabilitate $R(t)$ îi corespunde expresia:

$$R(t) = 1 - F(t) = p(t) = P_r(t > T) \quad \text{pentru } t > 0 \quad (10.5)$$

unde:

$p(t)$ - este probabilitatea de bună funcționare, adică însăși funcția de fiabilitate;

t - variabila de timp;

T - o limită precizată a duratei de bună funcționare.

Reprezentarea grafică celor două funcții, de fiabilitate $R(t)$ și de defectare $F(t)$ este prezentată în figura 10.6.

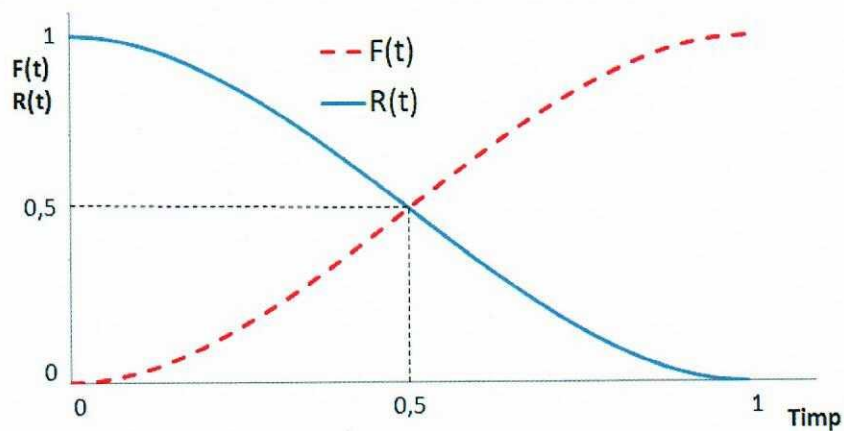


Fig. 10.6. Funcția de fiabilitate $R(t)$ și cea de defectare $F(t)$

Se mai poate utiliza și expresia:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(u) du = \int_t^\infty f(u) du \quad (10.6)$$

Ca orice probabilitate, se înțelege că și funcția de fiabilitate va îndeplini condiția:

$$0 < R(t) < 1 \quad (10.7)$$

adică: la $t=0$, $R(t)=1$ ceea ce înseamnă că produsul este în stare de funcționare la momentul începerii exploataării, după care scade după o anumită lege până la $T(t)=0$, teoretic la $t=\infty$, când produsul se află în stare de nefuncționare.

Așadar, $R(t)$ este probabilitatea ca elementul să nu eșueze în intervalul de timp $(0, t)$, sau, cu alte cuvinte, probabilitatea ca elementul să supraviețuiască intervalului de timp $(0, t)$ și încă să funcționeze la momentul t . Funcția de fiabilitate $R(t)$ este de asemenea denumită funcția de supraviețuire.

10.3.6. Funcția ratei de cedare $z(t)$

Probabilitatea ca un element să cedeze în intervalul de timp $(t, t+\Delta t)$ când știm că elementul funcționează la momentul t este:

$$P_r(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \frac{P_r(t < T \leq t + \Delta t)}{P_r(T > t)} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} \quad (10.8)$$

Prin împărțirea acestei probabilități la intervalul de timp, Δt , și având în vedere că $\Delta t \rightarrow 0$, obținem funcția ratei de cedare a unei componente, $z(t)$, ca fiind:

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_r(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (10.9)$$

Dacă Δt este foarte mic, vom avea:

$$P_r(t < T \leq t + \Delta t | T > t) \approx z(t) \cdot \Delta t \quad (10.10)$$

Trebuie remarcată similitudinea cu relația anterioară privitoare la funcția de distribuție a probabilității $f(t)$:

$$P_r(t < T \leq t + \Delta t) \approx f(t) \cdot \Delta t \quad (10.11)$$

Atunci când se ia în calcul fiecare piesă dintr-un lot de N piese identice, acest indicator se poate determina experimental pentru un interval de timp Δt_i , în funcție de frecvența absolută a căderilor Δn_i :

$$z(t_i) = \frac{\Delta n_i}{\Delta t_i \cdot N}$$

Dimensional, intensitatea căderilor se exprimă în h^{-1} .

De foarte multe ori, funcția $z(t)$ se ilustrează ca în *figura 10.7*, reprezentare cunoscută și sub numele de formă de "cadă de baie".

În figura 10.7 se disting trei zone ale graficului $z(t)$:

- zona I, în care apar căderile precoce, care se datoresc unor cauze ascunse sau/și deficiențelor de control de fabricație; durata $0-t_I$ se numește și perioada de rodaj;
- zona II, în care apar căderile aleatorii, normale, din perioada de funcționare normală; în acest interval de timp (t_I-t_{II}), valoarea indicatorului $z(t)$ rămâne aproape constantă;
- zona III, în care apare uzura sau îmbătrânirea materialelor constitutive ale produsului considerat.

Așadar, intervalul $0-t_{II}$, reprezintă durata de viață utilă, certificată prin garanția produsului.

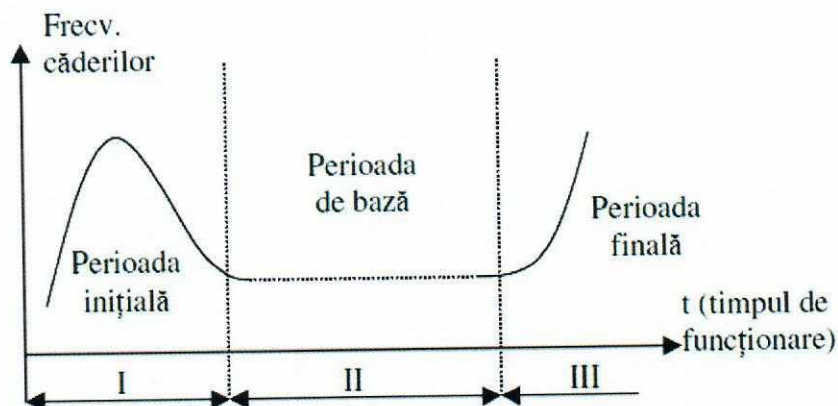


Fig. 10.7. Variația în timp a ratei de defectare

Să presupunem că avem o componentă nouă la timpul $t=0$. Ne punem întrebarea: "Care este probabilitatea că această componentă să cedeze în intervalul de timp $(0, t)$?" Probabilitatea de cedare, (10.11), este aproximativ egală cu funcția de densitate a probabilității $f(t)$ la momentul t înmulțită cu lungimea intervalului, t . După ce componenta nu a cedat în intervalul de timp $[0, t]$ ne punem întrebarea: "Care este probabilitatea ca respectiva componentă să cedeze în intervalul următor de timp $(t, t+\Delta t)$?" Această probabilitate (condițională) este în conformitate cu (10.10), aproximativ egală cu funcția ratei de defectare $z(t)$ la momentul t înmulțit cu lungimea intervalului, Δt . Dacă punem în funcțiune un număr mare de elemente identice la momentul $t = 0$, atunci $z(t) \cdot \Delta t$ va reprezenta, aproximativ, proporția relativă a elementelor care încă funcționează în momentul t , și care vor ceda în intervalul $(t, t + \Delta t)$.

Dacă

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1 - R(t))}{dt} = -R'(t)$$

atunci

$$z(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -\frac{d \ln R(t)}{dt}.$$

Dacă $R(0)=1$ atunci:

$$\int_0^t z(t) dt = -\ln R(t)$$

și

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t z(u) du\right) \quad (10.12)$$

Funcția de fiabilitate (supraviețuire) $R(t)$ și funcția de cedare legate fiind prin relația; $F(t) = 1 - R(t)$ sunt, prin urmare, determinate în mod unic de funcția ratei de defectare $z(t)$. Din (10.9) și (10.12) vedem că funcția densității de probabilitate $f(t)$ poate fi exprimată prin:

$$f(t) = z(t) \cdot \exp\left(-\int_0^t z(u) du\right) \text{ pentru } t > 0$$

Funcția ratei de cedare se numește forța mortalității (FOM). Acest termen a fost adoptat de mai mulți autori de manuale de fiabilitate pentru a evita confuzia dintre funcția ratei de cedare și rata de apariție a defectărilor (ROCOF) a unui articol reparabil. Funcția ratei de cedare (FOM) este o funcție a distribuției de viață a unui singur element și o indicație a "poziționării către eșec" a componentei după ce timpul a trecut, în timp ce ROCOF este rata de apariție a defectărilor pentru un proces stohastic, vezi capitolul cu lanțurile Markov. Termenul de rată de cedare este, acum, bine stabilit în fiabilitatea aplicată.

10.3.7. Timpul mediu de bună funcționare - (TMBF)

Timpul mediu de bună funcționare, reprezintă media duratelor de bună funcționare pentru populația statistică ce a fost luată în considerație. Astfel din cele N produse supuse observației, fiecare reprezintă o anumită durată de funcționare t_{Fi} , figura 10.8.

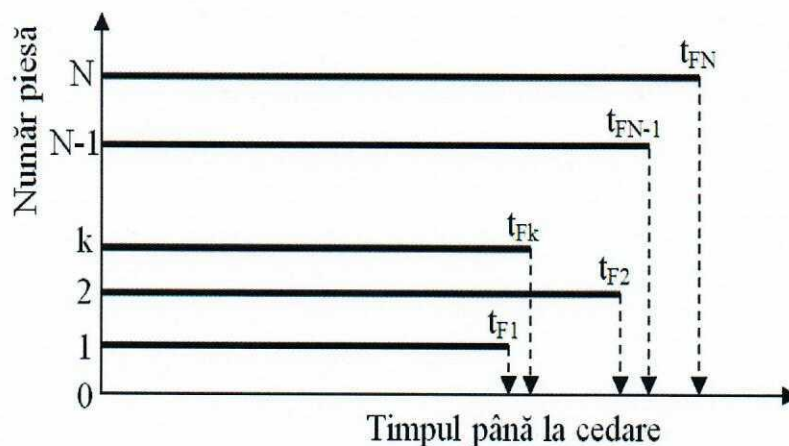


Fig. 10.8. Timpul mediu până la defectare

Media aritmetică a acestor timpuri este dată de relația:

$$TMBF = \frac{\sum_{i=1}^N t_{Fi}}{N} \quad (10.13)$$

Din punct de vedere dimensional, TMBF se exprimă în ore. Dacă funcția de distribuție $f(t)$, este continuă atunci:

$$TMBF = m = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = - \int_0^{\infty} t \cdot R'(t) dt \quad (10.14)$$

Integrând prin părți vom avea:

$$TMBF = [tR(t)]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t)dt$$

Dacă $TMBF < \infty$, se poate spune că $[tR(t)]_0^{\infty} = 0$ și în acest caz avem:

$$TMBF = \int_0^{\infty} R(t)dt$$

10.3.8. Dispersia (σ^2) și abaterea medie pătratică (σ)

Dispersia se notează cu σ^2 și este mărimea care indică abaterea valorilor timpilor de bună funcționare față de media aritmetică a acestora. Relația de calcul este următoarea:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t-m)^2 f(t)dt \quad (10.15)$$

în care m este timpul mediu de bună funcționare iar $f(t)$ este funcția de densitate a probabilității.

Abaterea medie pătratică se notează cu σ și exprima gradul de împrăștiere a timpilor de bună funcționare:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_0 - 1} \sum_{i=1}^{N_0} (t_i - m)^2} \quad (10.16)$$

unde N_0 este numărul de produse supuse observației în funcționare.

Se remarcă faptul că, fiind dat sau determinat unul din cei patru indicatori de fiabilitate, $R(t)$, $F(t)$, $f(t)$ și $z(t)$ se pot deduce conform relațiilor din *tabelul 10.1*.

Tab. 10.1. Relații între indicatorii de fiabilitate

Nr. crt.	indicator	exprimat în funcție de indicatorul			
		$F(t)$	$f(t)$	$R(t)$	$z(t)$
1	$F(t)$	-	$\int_0^t f(t)dt$	$1 - R(t)$	$1 - \exp[-\int_0^t z(t)dt]$
2	$f(t)$	$\frac{dF(t)}{dt}$	-	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$z(t)\exp[-\int_0^t z(t)dt]$
3	$R(t)$	$1 - F(t)$	$\int_0^{\infty} f(t)dt$	-	$\exp[-\int_0^t z(t)dt]$
4	$z(t)$	$\frac{1}{1-F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt}$	$\frac{f(t)}{\int_0^{\infty} f(t)dt}$	$-\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$	-
5	$TMBF=m$	$\int_0^{\infty} [1-F(t)]dt$	$\int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt$	$\int_0^{\infty} R(t)dt$	$\int_0^{\infty} \exp[-\int_0^t z(t)dt]dt$

10.3.9. Durata de viață reziduală

Să considerăm o componentă cu timp de cedare T care a fost pusă în funcțiune în momentul $t = 0$ și funcționează încă în momentul t . Probabilitatea ca acea componentă care a funcționat un timp t să supraviețuiască unui interval suplimentar de durată τ este:

$$R(\tau|t) = \Pr(T > t + \tau | T > t) = \frac{\Pr(T > t + \tau)}{\Pr(T > t)} = \frac{R(t + \tau)}{R(t)}$$

$R(t|t)$ se numește funcția de supraviețuire condiționată a componentei la momentul t . Durata medie de viață sau reziduală, $MRL(t)$, a componentei la momentul t este dată de relația:

$$MRL(t) = \mu(t) = \int_0^{\infty} R(\tau|t) d\tau = \frac{1}{R(t)} \int_t^{\infty} R(\tau) d\tau$$

Când $t = 0$, componenta este nouă și avem $\mu(0) = \mu = TMBF$. Este uneori interesantă studierea funcției:

$$g(t) = \frac{MRL(t)}{TMBF} = \frac{\mu(t)}{\mu}$$

Atunci când un element a supraviețuit până la momentul de timp t , atunci $g(t)$ dă $MRL(t)$ ca procent din $TMBF$ inițial. Dacă, de exemplu, $g(t) = 0,60$, atunci durata de viață reziduală medie, $MRL(t)$ la momentul t , este de 60% din durata de viață reziduală medie la momentul 0.

Prin diferențierea lui $\mu(t)$ în raport cu t , este simplu să se verifice dacă funcția ratei de defectare $z(t)$ poate fi exprimată ca:

$$z(t) = \frac{1 + \mu'(t)}{\mu(t)}$$

10.4. Legi de distribuție

Vom prezenta o serie de legi de distribuție care pot fi folosite pentru a modela durata de viață a unei componente nereparabile. Se vor descrie următoarele legi de distribuție cu variație continuă:

- Distribuția exponențială;
- Distribuția Gamma;
- Distribuția Weibull;
- Distribuția normală.

10.4.1. Distribuția (negativ) exponențială

Această lege se caracterizează prin $z(t) = \text{constant} = \lambda$.

Să presupunem că avem o componentă pusă în funcțiune la momentul $t=0$. Funcția de densitate a probabilității este:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t} & \text{pentru } t > 0, \lambda > 0 \\ 0 & \text{pentru celelalte valori ale lui } \lambda \text{ și } t \end{cases} \quad (10.17)$$

Această distribuție se numește distribuția exponențială cu parametrul λ și uneori scrie $T=\exp(\lambda)$. Funcția de fiabilitate (supraviețuire) a componentei este:

$$R(t) = \Pr(T > t) = \int_t^{\infty} f(u) du = e^{-\lambda t} \text{ pentru } t > 0$$

Folosind relațiile din *tabelul 10.1* precum și *relația (10.13)* se determină ceilalți indicatori de fiabilitate specifici acestei distribuții, respectiv:

- funcția ratei de defectare:

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda \quad (10.18)$$

- timpul mediu de bună funcționare:

$$TMBF = m = \frac{1}{\lambda} \quad (10.19)$$

- dispersia:

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (10.20)$$

Graficele de variație a indicatorilor de fiabilitate sunt prezentate în *figura 10.9*, din care se vede că manifestarea acestei legi are loc pe durata vieții utile a produsului, adică zona II din *figura 10.7*.

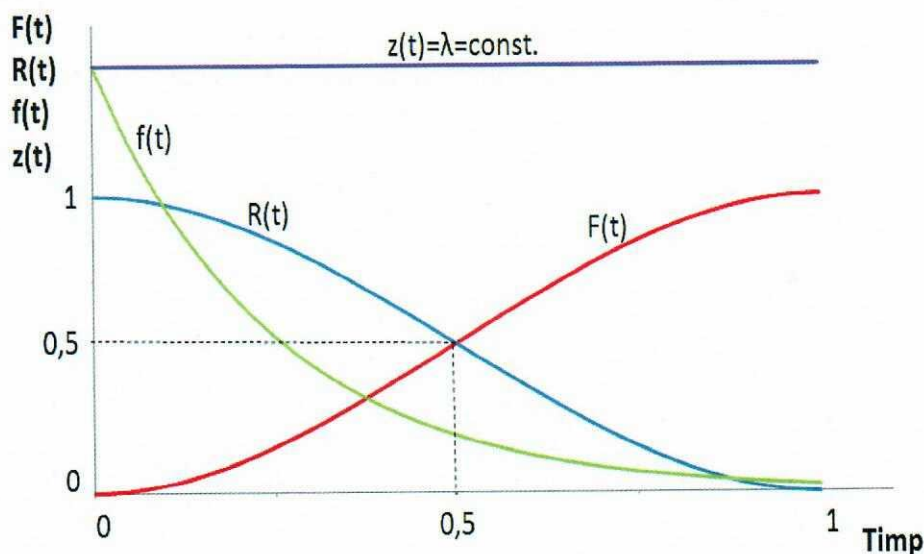


Fig. 10.9. Graficele de variație a indicatorilor de fiabilitate în cazul distribuției exponențiale

Momentele de timp la care se manifestă defectele în cazul unui lot de produse identice, se repartizează potrivit unei legi de distribuție statistică, dată de expresia funcției de frecvență $f(t)$. După cum variabila aleatoare t (timpul) ia valori discrete sau continue, și distribuția va fi discretă sau continuă.

În continuare se vor face scurte considerații asupra principalelor trei legi de distribuție folosite în teoria fiabilității.

10.4.2. Distribuția Gamma

Să considerăm o componentă care a fost supusă la o serie de solicitări repetate cu rata λ . Intervalele de timp $T_1, T_2, \dots$ între solicitările consecutive sunt independente și distribuite exponențial cu parametrul λ . Să presupunem că respectiva componentă cedează exact la solicitarea k , și nu mai devreme.

Timpul până la defectarea componentei este:

$$T = T_1 + T_2 + \dots + T_k$$

și ca urmare T prezintă o distribuție gamma (k, λ) și uneori se poate scrie $T \sim \text{gamma}(k, \lambda)$. Funcția de densitate a probabilității este dată de relația:

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(k)} (\lambda t)^{k-1} e^{-\lambda t} \quad (10.21)$$

unde $\Gamma(k)$ este funcția gamma, cu $t > 0$, $\lambda > 0$ și k fiind număr întreg pozitiv. Funcția densității de probabilitate $f(t)$ este schițată în figura 10.10 pentru valorile selectate de $k=0,5, 1$ și 2 .

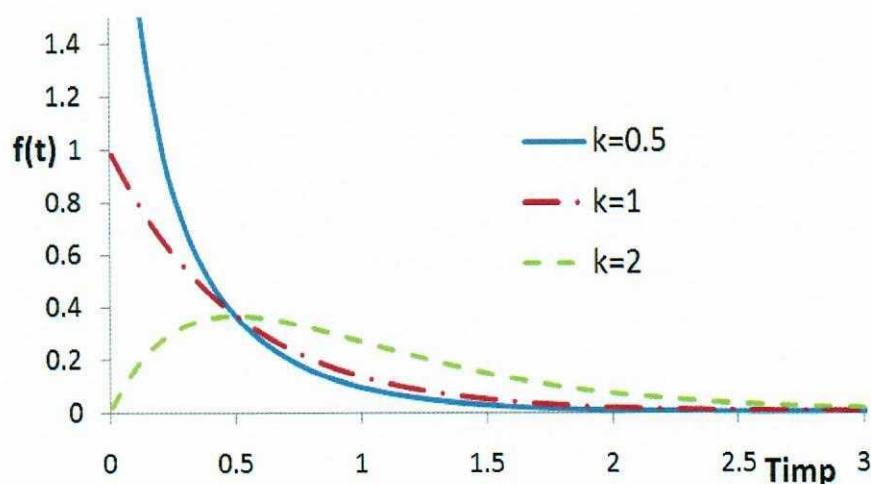


Fig. 10.10. Funcția gamma a densității de probabilitate, $\lambda=1$

Parametrul λ indică rata (frecvența) solicitărilor și este un parametru extern al componentei. Valoarea întreagă k poate fi interpretată ca o măsură a abilității de a rezista solicitărilor, care poate să nu fie limitată la valori întregi, ci poate fi o constantă pozitivă. Din (10.21) se deduce că:

$$MTTF = \frac{k}{\lambda}$$

Pentru valori întregi ale lui K , funcția de fiabilitate este:

$$R(t) = 1 - F(t) = \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$$

În figura 10.11 este figurată funcția de fiabilitate pentru $k=1, 2$ și 3 .

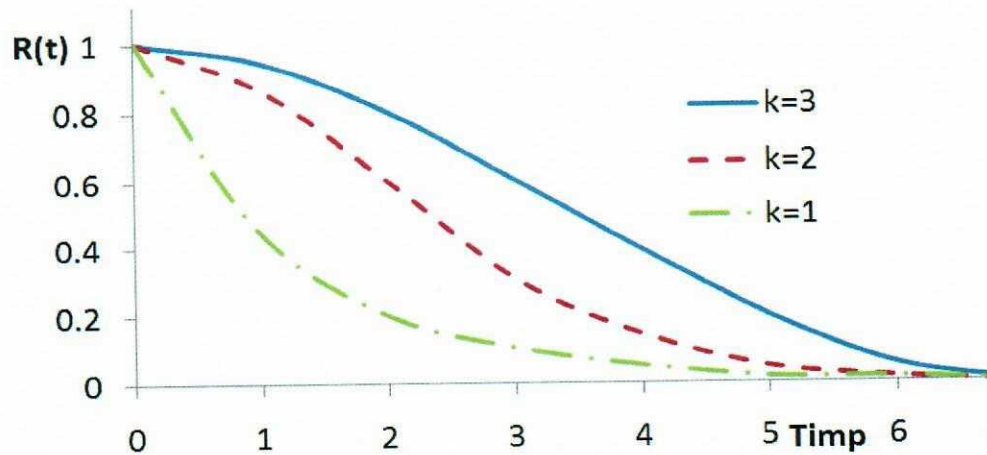


Fig. 10.11. Funcția de fiabilitate pentru distribuția gamma, $\lambda=1$

Relația corespunzătoare pentru funcția ratei de cedare este:

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda(\lambda t)^{k-1} e^{-\lambda t} / \Gamma(k)}{\sum_{n=0}^{k-1} (\lambda t)^n e^{-\lambda t} / n!}$$

Pentru $k = 2$ funcția ratei de cedare este:

$$z(t) = \frac{\lambda^2}{1 + \lambda t}$$

Funcția ratei de defectare $z(t)$ este ilustrată în figura 10.12 pentru unele valori întregi ale lui k .

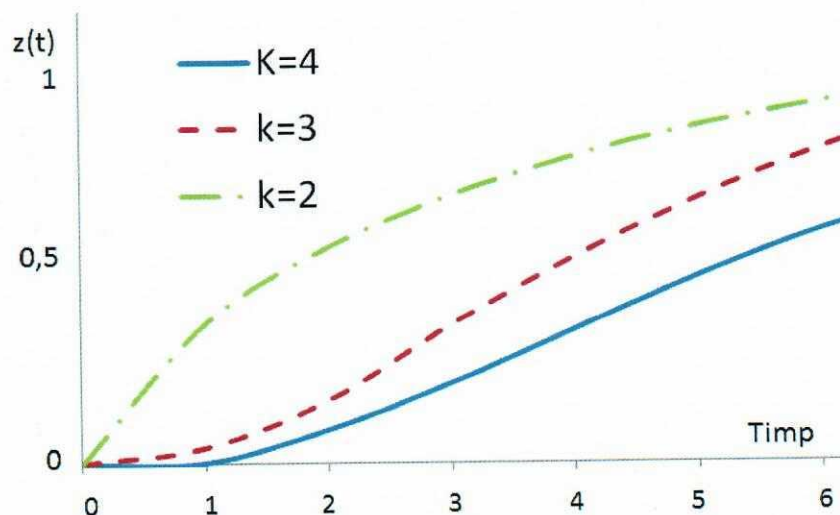


Fig. 10.12. Funcția ratei de defectare a distribuției gamma pentru $\lambda=1$.

10.4.3. Distribuția normală (Gauss - Laplace)

Distribuția normală reprezintă o lege de distribuție a unei mărimi aleatoare în jurul mediei sale. Aceasta distribuție este frecvent întâlnită cu calculul statistic al erorilor, în răspândirea valorilor unor

parametri, iar fiabilitatea caracterizează fenomene de îmbătrânire mecanică, electrică, termică etc. a elementelor și sistemelor .

Variabila aleatoare continuă t , urmează o lege de distribuție normală dacă funcția de frecvență este de forma:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (10.22)$$

unde: $m = \text{TMBF}$ are semnificația de la punctul 10.3.6 iar σ (abaterea medie pătratică) și σ^2 (dispersia) pe cea de la punctul 10.3.7, reprezentând parametrii distribuției normale .

Reprezentarea grafică a funcției $f(t)$ este data în *figura 10.13* și se numește curba normală sau clopotul lui Gauss, cu valori maxime pentru $t=m=\text{TMBF}$.

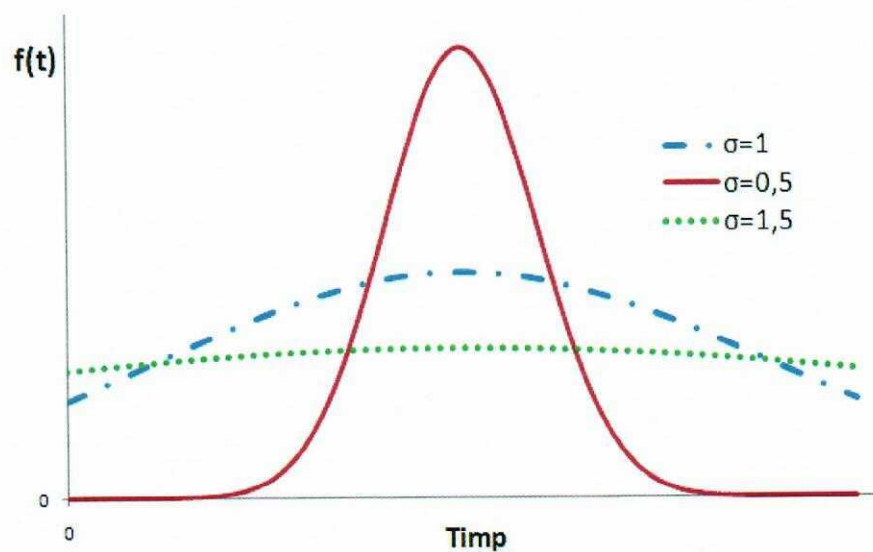


Fig. 10.13. Reprezentarea grafică a funcției $f(t)$

Variația indicatorilor de fiabilitate este dată în *figura 10.14*, din care se remarcă faptul că această lege este valabilă pentru sfârșitul duratei de viață a produselor, adică zona III din *figura 10.7*.

Relația pentru funcția de defectare $F(t)$:

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right]} dt$$

Funcția de fiabilitate este:

$$R(t) = 1 - \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right]} dt$$

Relația corespunzătoare pentru funcția ratei de cedare este:

$$z(t) = \frac{\int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right]} dt}{1 - \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right]} dt}$$

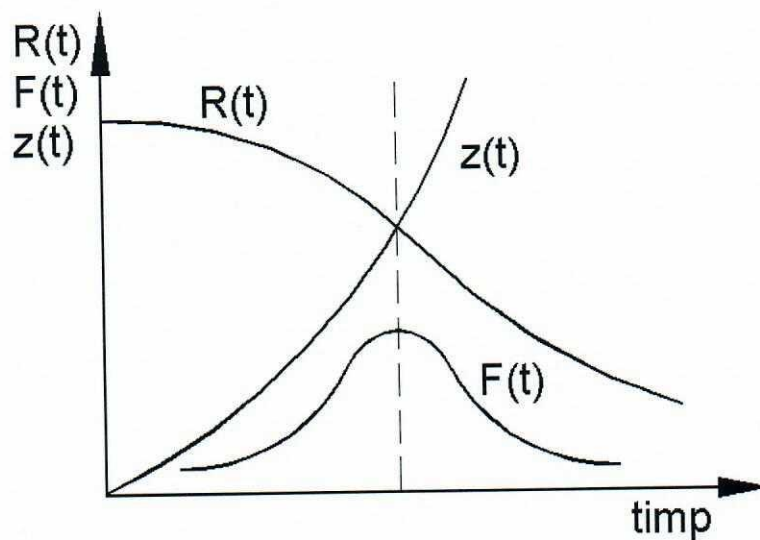


Fig. 10.14. Variația indicatorilor de fiabilitate

10.4.4. Distribuția Weibull

Distribuția Weibull este una dintre cele mai utilizate în analiza fiabilității. Distribuția Weibull este foarte flexibilă și poate, printr-o alegere adecvată a parametrilor, să modeleze multe tipuri de comportamente la cedare. Aceasta distribuție are un caracter general și se utilizează acolo unde distribuția timpilor de defectare nu se supune nici legii normale și nici celei exponențiale. Ca urmare a schimbării valorilor parametrilor α și λ această lege de distribuție este acoperitoare pentru o gamă foarte largă de aplicații printre care și cele privitoare la studiul fiabilității. Timpul până la cedare T al unui element este declarat a avea o distribuție de tip Weibull cu parametrii $\alpha (> 0)$ și $\lambda (> 0)$ dacă funcția de distribuție este dată de:

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = \begin{cases} 1 - e^{-(\lambda t)^\alpha} & \text{pentru } t > 0 \\ 0 & \text{pentru celelalte valori ale lui } t \end{cases}$$

Funcția de densitate a probabilității este în acest caz:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \begin{cases} \alpha \lambda^\alpha t^{\alpha-1} e^{-(\lambda t)^\alpha} & \text{pentru } t > 0 \\ 0 & \text{pentru celelalte valori ale lui } t \end{cases}$$

unde λ este un parametru scalar, iar α este denumit parametru de formă (reflectând nivelul procesului degradare); t exprimă durată minimă până la care nu se manifestă nici un defect. Atunci când $\alpha=1$, distribuția Weibull este aceeași cu distribuția exponențială. Funcția de densitate a probabilității $f(t)$ este ilustrată în figura 10.15 pentru anumite valori ale lui α .

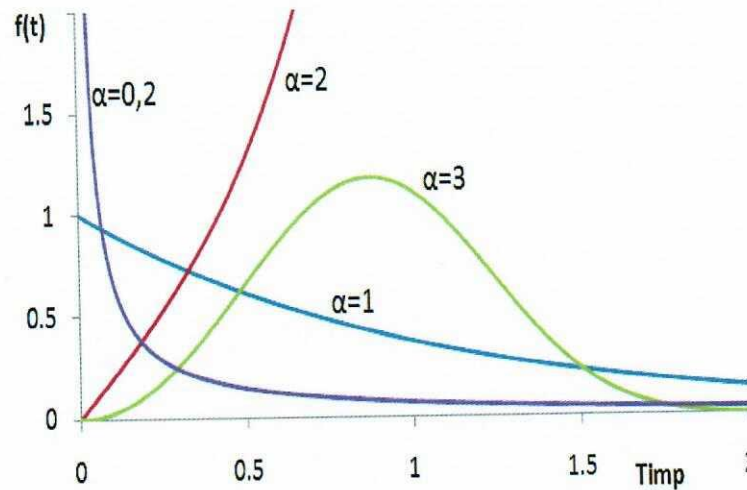


Fig. 10.15. Graficul de variație a funcției de densitate a probabilității în funcție de α

Fiabilitatea este, în acest caz dată de relația:

$$R(t) = \Pr(T > t) = e^{-(\lambda t)^\alpha}$$

Graficele de variație ale funcției de fiabilitate este prezentate în figura 10.16.

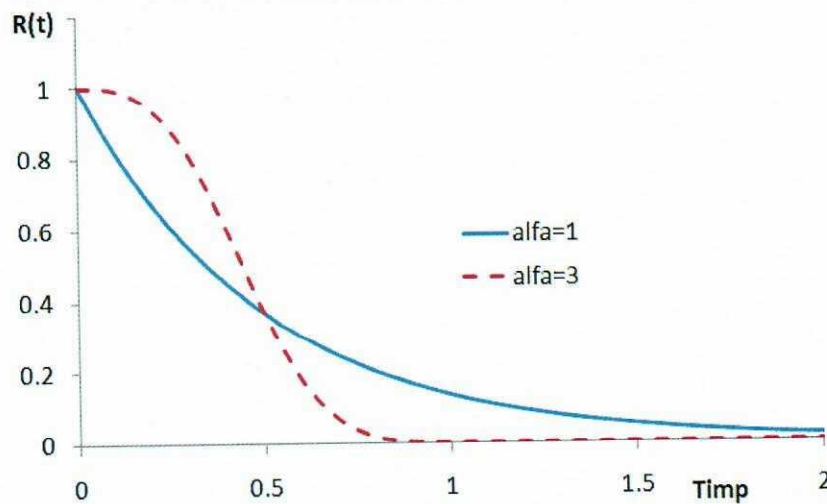


Fig. 10.16. Graficele de variație a fiabilității ($\alpha=1$; $\alpha=3$)

iar funcția ratei de cedare este:

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \alpha \lambda^\alpha t^{\alpha-1} \text{ pentru } t > 0$$

Când $\alpha=1$, rata defectare este constantă; atunci când $\alpha > 1$, funcția ratei de defectare crește; când $0 < \alpha < 1$, $z(t)$ este în scădere. Funcția ratei de defectare $z(t)$ a distribuției Weibull este ilustrată în figura 10.17 pentru unele valori ale lui α .

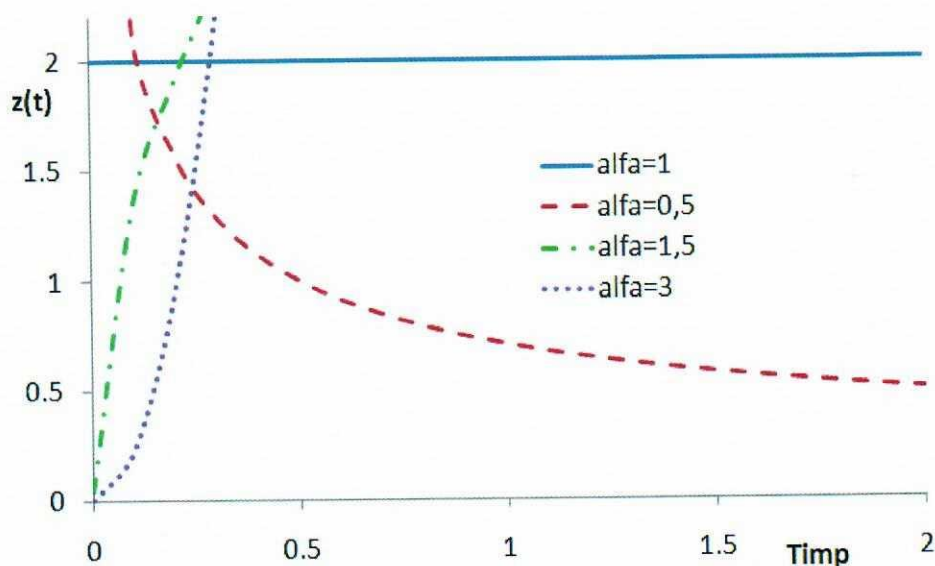


Fig. 10.17. Graficele de variație a funcției de defectare ($\alpha=1$; $\alpha=0,5$; $\alpha=1,5$; $\alpha=3$)

Tab. 10.2. Expresiile indicatorilor de fiabilitate

Indica tori de fiabili tate	Legea de distribuție			
	Normală	Exponenți ală	Gamma	Weibull
$f(t)$	$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}\right]}$	$\lambda e^{(-\lambda t)}$	$\frac{\lambda}{\Gamma(k)} (\lambda t)^{k-1} e^{-\lambda t}$	$\alpha \lambda^\alpha t^{\alpha-1} e^{-(\lambda t)^\alpha}$
$R(t)$	$1 - \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right]} dt$	$e^{(-\lambda t)}$	$\sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$	$1 - e^{-(\lambda t)^\alpha}$
$F(t)$	$\int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right]} dt$	$1 - e^{(-\lambda t)}$	$1 - \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$	$1 - e^{-(\lambda t)^\alpha}$
$z(t)$	$\frac{\int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right]} dt}{1 - \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right]} dt}$	λ	$\frac{\lambda(\lambda t)^{k-1} e^{-\lambda t} / \Gamma(k)}{\sum_{n=0}^{k-1} (\lambda t)^n e^{-\lambda t} / n!}$	$\alpha(\lambda t)^{\alpha-1}$

Distribuția Weibull este considerată a fi flexibilă și poate fi utilizată pentru a modela distribuțiile duratei de viață, unde funcția ratei de defectare este în descreștere, constantă sau în creștere.

Pentru legile de distribuție normală, exponențială (negativ) și Weibull, în *tabelul 10.2* se dau expresiile indicatorilor de fiabilitate.

10.5. Fiabilitatea examinării nedistructive (NDE–Non-Destructive Examination)

O tehnică NDE fiabilă se definește ca fiind aceea ce detectează în mod constant toate defectele semnificative atunci când este aplicată riguros de către un număr de echipe de profesioniști și urmând procedurile elaborate pentru fiecare caz în parte.

O caracteristică comună a tuturor tehnicilor NDE o reprezintă incapacitatea acestora de a furniza în mod repetat aceleași indicații atunci când sunt aplicate de diverși inspectori la un număr de defecte de aceeași dimensiune, [24].

Factorii esențiali care influențează șansa de detectare:

- locul dezvoltării și calitatea echipamentului NDE;
- calitatea procedurilor scrise;
- cunoștințele și atitudinea operatorilor;
- geometria și materialul elementelor componente;
- mediul și locația în care are loc inspecția;
- orientarea și dimensiunea defectului.

Deoarece acțiunile de mentenanță ale structurii sunt programate pe baza *lungimii potențiale a fisurii*, trebuie ca incertitudinea inspecției să fie caracterizată în termenii lungimii fisurii.

10.5.1. Probabilitatea detectării defectului (PDD)

Pentru toate fisurile de o anumită lungime, *probabilitatea detectării fisurii* este postulată ca fiind proporția fisurilor ce vor fi detectate printr-o tehnică NDE atunci când este aplicată de către operatori calificați unui număr de elemente componente într-un mediu de lucru definit.

Prin PDD, capacitatea unei tehnici NDE se exprimă în termeni probabilistici, *figura 10.18*.

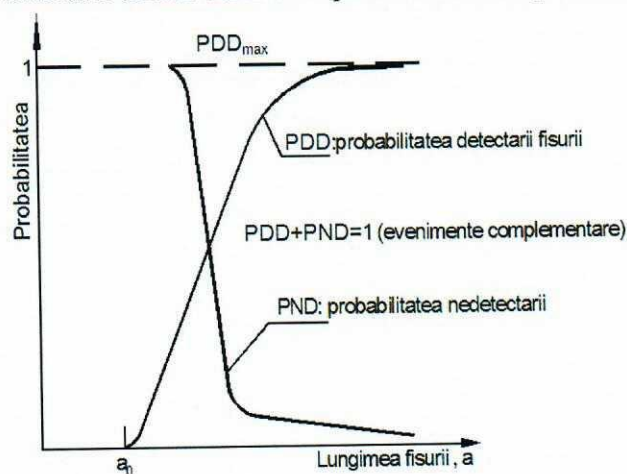


Fig. 10.18. Probabilitatea detectării fisurii

Variația PDD-urilor în funcție de dimensiunea fisurii este prezentată în mod schematic.

Tendința variației poate expune un prag minim al fisurii, a_0 , ce indică faptul că defectele trebuie să aibă o anumită dimensiune minimă înainte să poată fi detectate.

Peste acest prag PDD crește o dată cu dimensiunea defectului.

Curba PDD atinge în final o valoare maximă, PDD_{max} , unde nedetectarea este guvernată de alți factori cum ar fi eroarea umană, (fiabilitatea umană), care domină procesul de detectare.

Creșterea PDD prin diverse mijloace (de exemplu prin folosirea unei interpretări mai puțin discriminatorii a semnalelor), elimină posibilitatea ca o componentă fără defect să fie clasificată incorect ca fiind cu defect.

Probabilitatea alarmei false se poate defini ca fiind fracțiunea de încercări în urma cărora o componentă fără defect este clasificată ca fiind cu defect.

Pe lângă o PDD ridicată, și o tehnică NDE de încredere, determinarea dimensiunii defectului ar trebui să aibă o acuratețe corespunzătoare. Acuratețea dimensionării măsoară diferența dintre dimensiunea reală a defectului și dimensiunea estimată prin NDE. Erorile de dimensionare pot fi sistematice sau aleatoare. Cele aleatoare sunt, de regulă, descrise de distribuțiile statistice. PDD și PND reprezintă probabilități legate de evenimente complementare (exclusiv reciproc). PDD poate fi estimată doar prin intermediul experimentelor NDT (non-destructive testing) planificate statistic pe epruvete (probe) ce conțin defecte de dimensiune cunoscută.

Metodele statistice folosite pentru estimarea PDD sunt:

- procesarea datelor de tip Reușită/Eșec;
- procesarea datelor sub formă de răspunsuri-semnal corelate cu dimensiunea fisurii;
- analiza probabilității maxime dintre parametrii funcției PDD;
- incertitudinea estimată prin limite de încredere inferioare (CB - conservatoare) pentru PDD.

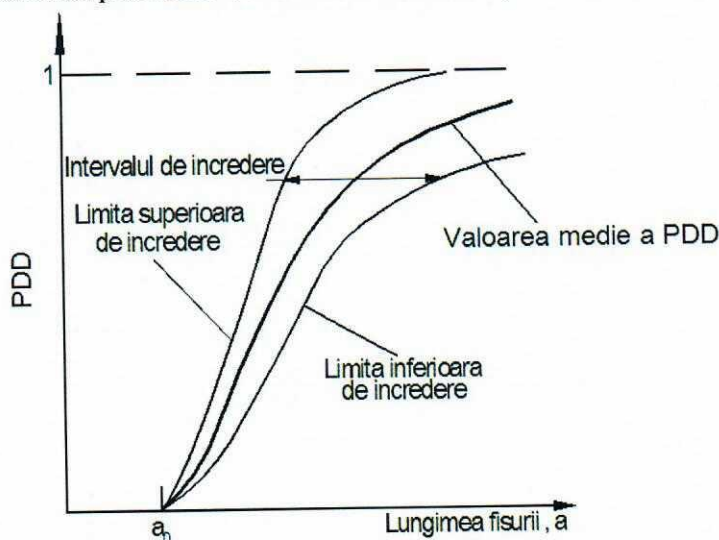


Fig. 10.19. Exemplu: CB 97,5% inferioară la curba PDD pentru 95% interval de încredere

Metodele Bootstrap (eșantionare prin simulare pe calculator) sunt foarte eficiente pentru stabilirea intervalelor de încredere parametrice și neparametrice ale PDD în funcție de curbele dimensiunii fisurilor.

Prin NDE repetate de aceeași echipă sau de echipe diferite, cu aceeași tehnică și cu aceeași procedură, un anumit defect poate fi detectat sau nu, iar dacă este detectat i se pot da dimensiuni diferite, figura 10.20.

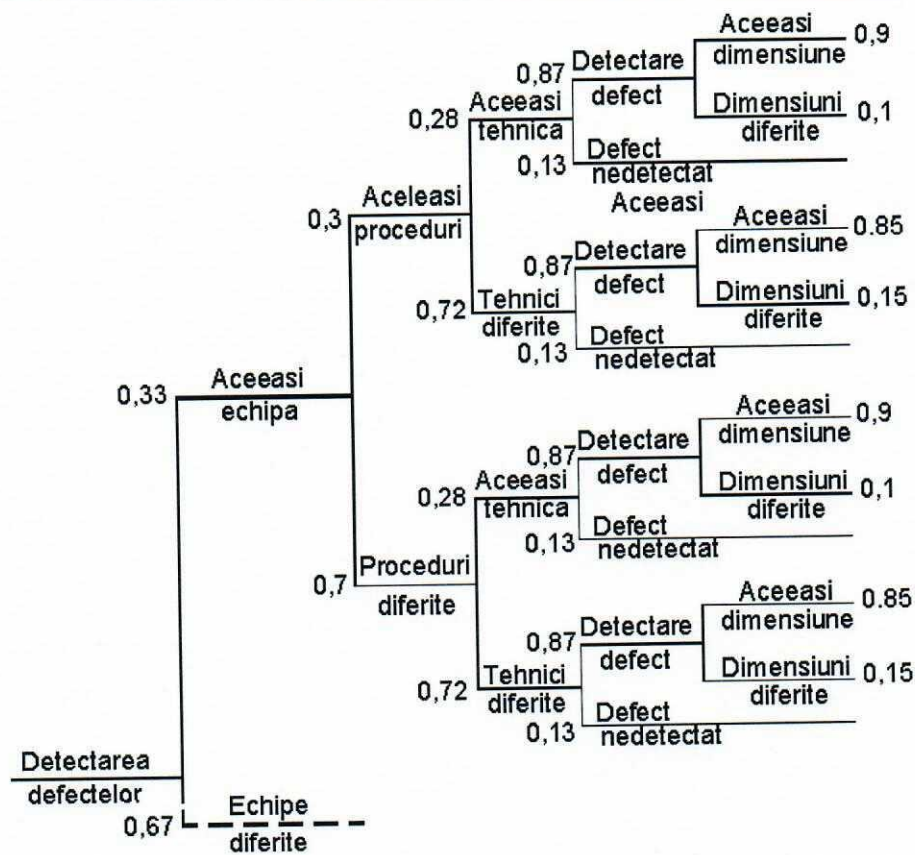


Fig. 10.20. Arbore de evenimente pentru examinări nedistructive

Evaluarea optimistă a avantajului NDE repetat

- La prima examinare, probabilitatea de reușită este PDD iar probabilitatea de a nu detecta defectele este (1-PDD).

- După n inspecții, probabilitatea de reușită este: $PDD_n = 1 - (1 - PDD)^n$, având în vedere distribuția binomială.

Această evaluare este optimistă deoarece consideră că un rezultat al NDE este independent de celelalte, iar erorile implicate sunt aleatorii (fără părtinire). În realitate acest lucru este greu de obținut deoarece, de regulă, evaluarea într-o inspecție este influențată de ceea ce s-a descoperit la inspecțiile precedente.

Evaluarea pesimistă

- Rezultatul fiecărei examinări NDE este în strânsă legătură cu rezultatul altor examinări.

- Probabilitatea ca cel puțin într-o examinare defectul să fie detectat, este evaluată prin probabilitatea maximă de detectare în inspecțiile individuale:

$$PDD_n = \text{Max}(PDD_1, PDD_2, \dots, PDD_n)$$

Exemplu: Se consideră patru NDE-uri succesive cu probabilități de 35%, 75%, 88% și 57%. Cel mai optimist PDD, după patru inspecții este:

$$PDD_n = 1 - (1 - 0,65)(1 - 0,75)(1 - 0,88)(1 - 0,57) = 0,995485, \text{ mai exact } 99,5\%.$$

Cel mai pesimist este: $PDD_n = 88\%$.

Ca urmare PDD_n real este între limitele anterioare.

Răspunsul NDE obținut de la un sistem NDE poate lua forma:

- unui rezultat sub formă de semnal;
- unei imagini directe sau indirecte.

Condițiile acceptabile se pot diferenția (discrimina) de condițiile inacceptabile prin:

- Discriminarea pragului de la ieșirile electronice;
- Recunoașterea modelului prin analizarea imaginii și discriminarea pragului. **Discriminarea**

semnelor sau imaginilor prag se poate face:

- prin proceduri automate;
- de către operatori umani.

Legătura pozitivă dintre răspunsul NDE și funcționalitatea și fiabilitatea structurală a sistemului este, în principal, funcție de:

- calibrare;
- criterii de acceptare;
- accesibilitatea inspectării;
- condițiile de suprafață;
- materialul de inspectare;
- compatibilitatea;
- mediul de inspectare;
- specificații/proceduri NDE directe;
- calificări operatori;
- organizarea muncii și disciplină, motivație, etc.

O înțelegere primară a *ingeriei NDE*, presiunile economice și sociale pentru a rezolva sistemele tehnologice cu probleme și atitudinea și practica sistemelor în conexiune, poate conduce la un optimism excesiv și la o relație negativă relativă la evaluarea NDE și funcționalitatea și fiabilitatea sistemului. Așadar, consecvența și fiabilitatea ridicate ale recunoașterii și discriminării modelului se pot realiza de către operatorii umani.

Examinarea și măsurătorile NDE sunt de regulă indirecte. Semnalele pozitive ale defectelor pot fi generate de surse nerelevante cum ar fi:

- rugozitatea suprafeței, structura granulară, tensiunile remanente, etc.;
- semnalele pozitive de la sursele nerelevante generează un "zgomot" inerent specific NDE

aplicat, *figurile 10.21, 10.22 și 10.23.*

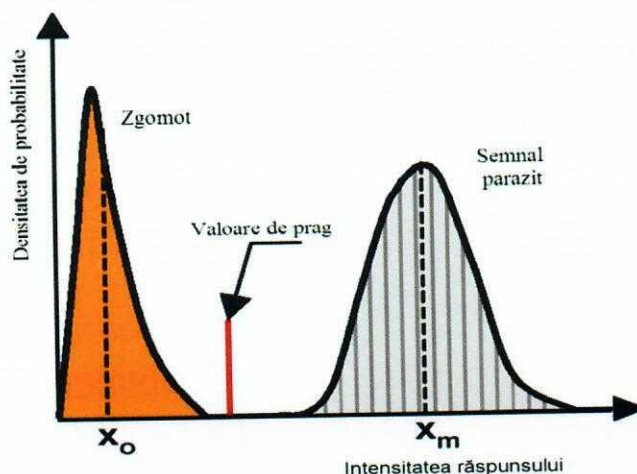


Fig. 10.21. Defecte mari

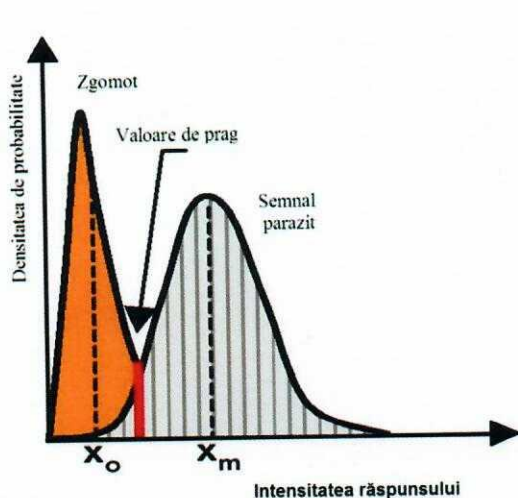


Fig. 10.22. Defecte medii

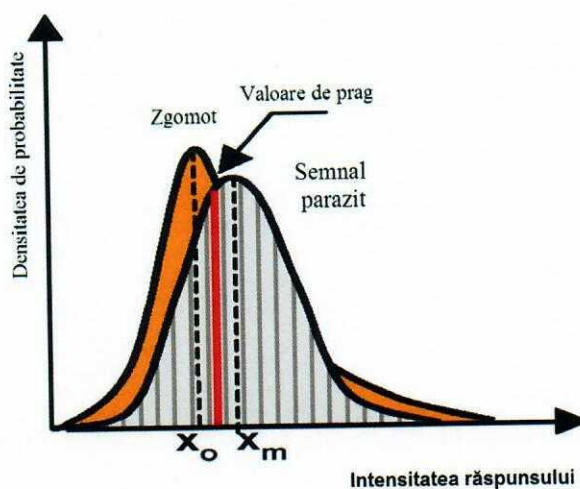


Fig. 10.23. Defecte mici

Discriminarea semnalelor de ieșire NDE trebuie derivate din acele semnale care trec pragul zgomotului de aplicare.

Raportul semnal - zgomot (de ex. $SZ = x_m/x_0$) este o măsură a calității unei proceduri NDE.

Procedurile standard pentru SZ crescător pot fi folosite pentru creșterea performanței globale a procedurilor NDE. Sursa dominantă de zgomotul la NDE nu este zgomotul electronic (care poate fi redus prin filtrare și alte tehnici) ci este generat de semnale nerelevante (condiții de suprafață, dimensiunea grăuntelui, etc.).

10.5.2. Managementul NDE

Măsurătorile NDE și evaluarea datelor reprezintă un proces complex cu variații accidentale inerente, atât în ceea ce privește procesul de măsurare cât și obiectul testului. Atunci când este implicată și detectarea fisurilor, acceptarea/respingerea reprezintă un proces de luare a deciziilor probabilistic binar, figura 10.24.

		Stimuli	
		Pozitivi, d	Negativi, n
Raspuns	Pozitiv, P	Real pozitiv (RP) (defect detectat) $M(D,d)$ $P(D/d)$ (fara eroare)	Fals pozitiv (FP) (alarma falsa) $M(D,n)$ $P(D/n)$ (eroare de tipul II)
	Negativ, N	Fals negativ (FN) (defect nedetectat) $M(N,d)$ $P(N/d)$ (eroare de tipul I)	Real negativ (RN) (fara defecte) $M(N,n)$ $P(N/n)$ (fara eroare)

Fig. 10.24. Procesul de luare a deciziilor

Real Pozitiv (RP): există o fisură și ea se detectează:

$M(D,d)$ - numărul total de observații pozitive reale;

$P(D/d)$ - probabilitatea de a avea observații pozitive reale.

Fals Pozitiv (FP): nu există o fisură dar ea se detectează:

$M(D,n)$ - numărul total de observații pozitive false;

$P(D/n)$ - probabilitatea de a avea observații pozitive false.

Fals Negativ (FN): există o fisură dar nu se detectează:

$M(N,d)$ - numărul total de observații negative false;

$P(N/d)$ - probabilitatea de a avea observații negative false.

Real Negativ (RN): nu există o fisură și nu se detectează:

$M(N,n)$ - numărul total de observații negative reale;

$P(N/n)$ - probabilitatea de a avea observații negative reale.

$M(D,d) + M(N,d)$ = numărul total de defecte existente (numărul de rezultate ce dau naștere unor șanse pentru apeluri pozitive).

$M(D,n) + M(N,n)$ = numărul total de observații fără defecte (numărul de șanse pentru alarme false). Probabilitățile de tip $P(X/x)$ sunt probabilități condiționale. Datorită interdependenței (prin definiție) trebuie luate în considerare doar două probabilități pentru a cuantifica decizia de acceptare / refuz.

10.5.3. Probabilități condiționale în procesul de discriminare prin NDE

Probabilitatea observațiilor pozitive adevărate $P(D,d)$ se identifică cu probabilitatea detectării, **PDD**:

$$PDD = P(D,d) = \frac{M(D,d)}{M(D,d) + M(N,d)} \text{ sau } \frac{\text{Numarul apelurilor pozitive reale}}{\text{Numarul defectelor}}$$

Probabilitatea observațiilor pozitive false $P(D,n)$ se identifică cu probabilitatea alarmelor false, **PAF**:

$$PAF = P(D,n) = \frac{M(D,n)}{M(D,n) + M(N,n)} \text{ sau } \frac{\text{Numarul de alarme false reale}}{\text{Sanse de alarme false}}$$

Generarea curbelor PDD

Un număr de piese de testare ce conțin defecte (fisuri) sunt supuse unei proceduri NDE specifice iar rezultatele sunt înregistrate ca un singur punct - mostră în termeni de apelare pozitivă (defect detectat) sau apelare negativă (lipsă defect). Se evaluează dimensiunea defectului, a . Procedura NDE este repetată de către același operator sau de operatori diferiți.

Modelele reale ale defectelor existente la piesele de testare sunt evaluate printr-o metodă de referință (exactitatea acceptată) sau, în cele mai multe cazuri, prin tăierea piesei de testare pentru examinarea existenței defectelor și măsurarea geometriei și locației dimensiunii defectelor. Prin compararea apelurilor pozitive și negative cu modelul real (număr, dimensiune, locație) ale defectelor din piesa de testare, se evaluează numărul apelurilor pozitive reale și numărul de defecte determinat post - factum. PDD se calculează funcție de dimensiunea fisurii cu formula de mai sus. Evaluarea PDD este o întreprindere lungă și costisitoare.

Noi tendințe sunt reprezentate de simularea PDD pe computer. RAF sau rata apelurilor false nu se reflectă în curbele PDD. Ea trebuie înregistrată separat și folosită ca supliment în evaluarea calității procedurilor NDE.

10.5.4. Curbele COR (caracteristici operaționale relative)

Datele necesare pentru formarea curbelor COR sunt datele PDD și RAF la o anumită dimensiune a fisurii, a .

PDD (evaluarea pozitivă reală) este evaluată ca opusul lui RAF (evaluare pozitivă falsă) la o anumită dimensiune a fisurii, a . De regulă, dimensiunea fisurii este fixată la limita critică de prag a procedurii NDE, aproximativ 0,1 mm.

Performanța ridicată a operatorului pentru o anumită procedură NDE se vede atunci când se obțin PDD ridicate și RAF scăzute. În aceste condiții se realizează graficul pentru o curbă COR dorită (țintă). Procedura se repetă pentru diferiți operatori și se estimează PDD și RAF. Performanța celor mai calificați operatori ajunge aproape de partea superioară - stângă a graficului COR (discriminare ridicată). Astfel, se stabilește o zonă de acceptare pentru operatorii calificați.

Operatorii cu performanțe ce nu se înscriu în zona de acceptare sunt recalificați prin formare sau sunt distribuiți în alte domenii. Diagonala în reprezentarea COR este legată de discriminarea independentă de procesul NDE, mai exact reprezintă linia unei presupunerii total aleatoare.

10.5.5. Influența pragului de acceptare

Se consideră aplicarea unei proceduri NDE pentru un defect mare, la o separare corectă a semnalului și sunetului. Posibilități privind poziționarea pragului de acceptare:

- Pragul de acceptare se plasează prea sus; unele defecte nu se vor observa; PDD este redusă;
- Pragul de acceptare se plasează prea jos; numărul de respingeri va crește și vor rezulta alarme false; RAF este crescută și se vor respinge părți bune;
- Pragul de acceptare se plasează la un nivel corespunzător; va rezulta discriminarea clară.

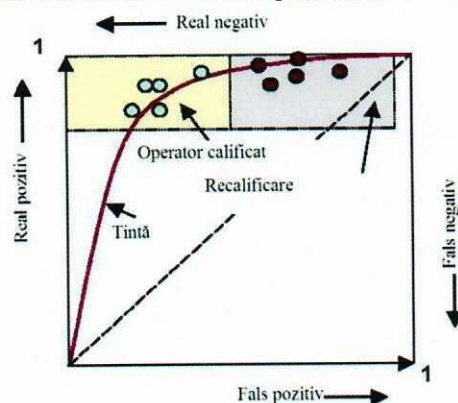
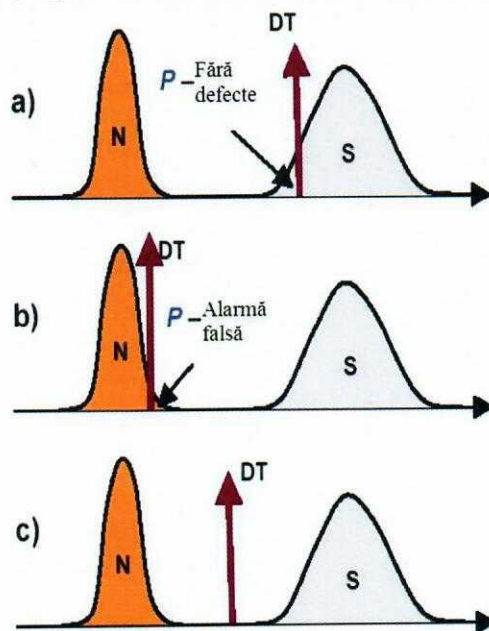


Fig. 10.25. Reprezentarea COR

Influența plasării pragului de acceptare (discriminare) la riscul de cedare se poate face prin



analiza sensibilității.

Intensitatea semnalului de răspuns
N – zgomot; S – semnal; DT – prag de discriminare

Fig. 10.26. Influența pragului de acceptare

10.5.6. Influența factorului uman

Cu excepția cazului în care procesul de inspecție NDE este complet automat, competența și fiabilitatea operatorului uman este cea mai mare variabilă care afectează fiabilitatea inspecției. Competența operatorului poate varia semnificativ de la un operator la altul dar și la același operator.

Factori ce afectează fiabilitatea (siguranța) factorului uman în procesul NDT:

- calificarea: educație, formare și experiență (competență);
- calități înnăscute: dexteritate, vigilență și capacitatea de discriminare vizuală (în recunoașterea tiparelor), temperament;
- mediul de lucru: temperatură, zgomot, munca personalului și echipamentul de protecție;
- sănătate, atitudine mentală, motivație;
- mediu micro-social: relații interumane cu colegii de echipă, ierarhie clară, supervizare pozitivă, tensiuni, determinare de meserie, viitoarele proiecte ale organizației (companiei).

Capacitatea, nivelul de performanță și fiabilitatea operatorilor umani pot fi măsurate, cuantificate și verificate prin demonstrații pe hardware similar și epruvete de testare care fixează limitele de performanță ale procedurii NDE.

Dacă echipamentul de inspecție, materialele sau procesul de inspecție pot varia, operatorii umani nu pot obține o discriminare corectă și stabilă și o interpretare a rezultatelor NDE.

Fiabilitatea factorului uman este considerată a fi cauza primară a rezultatelor NDE, incorecte sau deficiente.

BIBLIOGRAFIE

- [1] ***, Review of Reliability Theory, Analytical Technique and Basic Statistics, http://www.cse.cuhk.edu.hk/~lyu/book/reliability/pdf/Appendix_B.pdf
- [2] A. Potorac, D. Prodan, Fiabilitate – note de curs, Universitatea "Stefan cel Mare" Suceava, 2010.
- [3] Gh. Ilie, Securitatea proceselor și calitatea vieții - Managementul riscului, <http://www.revista-alarma.ro/PDD/Managementul%20riscului.PDD>.
- [4] H. Boudali, P. Crouzen, M. Stoelinga, Coral: a tool for compositional reliability and availability analysis, wwwhome.cs.utwente.nl/~marielle/papers/BCS07c.pdf
- [5] M. Rausand, A. Høyland, System Reliability theory, Models, Statistical Methods, and Applications, Second Edition, Wiley, 2004.
- [6] Ioan P. Viziteu, Fiabilitatea instalațiilor energetice, Editura PIM, Iași, 2010.
- [7] ***, Workshop on Tool Platforms for Embedded Systems Modeling, Analysis and Validation Reliability and Availability analysis, ARTIST workshop, CAV Berlin 2007.
- [8] T. Munteanu, G. Gurguiatu, C. Bălanuță, Fiabilitate și calitate în inginerie electrică, Editura Galați University Press, 2009.
- [9] <http://www.omtr.pub.ro/didactic/fsm/curs/fsm06.PDD>
- [10] <http://www.scribub.com/tehnica-mecanica/notiuni-generale-privind-fiabi12325.php>