

3. HAZARD, FIABILITATE SI PROIECTARE

3.1. Complemente de teoria probabilităților

3.1.1. Introducere

În natură fenomenele se manifestă în mod determinist sau în mod aleatoriu. Fenomenele deterministe sunt caracterizate printr-o evoluție după o lege determinată matematic. Fenomenele aleatorii sunt fenomenele în care stările nu sunt cunoscute în mod determinist dar pot fi interpretate prin intermediul noțiunii de probabilitate. Noțiunea fundamentală a teoriei probabilităților este aceea de eveniment. Ce este un eveniment ?

Rezultatul unui experiment, adică producerea sau absența unui fenomen în experiență, în condițiile unor ipoteze și restricții impuse se numește eveniment. Acesta poate fi elementar sau compus (notat A_i). Evenimentul sigur (E) dintr-un experiment este cel care se produce sigur pe parcursul acestuia.

Ce este un eveniment elementar și ce este un eveniment compus? Pentru simplitate considerăm un experiment legat de apariția unui număr la aruncarea unui zar. Experimentul are o mulțime de cazuri posibile: $\mathfrak{R} = \{1,2,3,4,5,6\}$. Legat de acest experiment se pot considera diverse evenimente:

- A – apariția unui număr par;
- B – apariția unui număr impar;
- C – apariția numărului “2”;
- D – apariția unui număr ≥ 4 ;

Apariția numărului “3” atrage după sine realizarea evenimentului B și nerealizarea evenimentelor A, C, D. Evenimentelor A, B și D le sunt favorabile o mulțime finită de cazuri. De exemplu evenimentului A îi corespunde submulțimea $\{2, 4, 6\}$ a mulțimii $\mathfrak{R} = \{1,2,3,4,5,6\}$ s.a.m.d.

Evenimentele care au un singur caz favorabil se numesc elementare.

Exemplu 3.1

Un robot industrial mobil trebuie să execute o operație într-un mediu dat pe una din traiectoriile disponibile (1, 2,3), printr-o coordonare asigurată de senzori optici, acustici, termici cu utilizarea efectorului final (varianta I și II). Se consemnează următoarele evenimente:

- *Atingerea punctului țintă – evenimentul “A”; Evenimentului “A” îi corespund cazurile favorabile definite de traiectoria 1, 2 sau 3;*
- *Detectarea obstacolelor din spațiul de lucru – evenimentul “B”; Evenimentului “B” îi corespund cazurile favorabile definite de locația obstacolelor pe bază de senzorii vizuali, acustici și cei termici;*
- *Preluarea obiectului vizat în aplicație – evenimentul “C”; Evenimentului “C” îi corespund cazurile oferite de prehensarea obiectului cu ajutorului efectorului I sau II.*

Aceste evenimente vor fi compuse.

Două evenimente sunt incompatibile dacă producerea unuia exclude posibilitatea producerii celuilalt. Dacă două evenimente incompatibile reunite conduc la evenimentul sigur acestea se numesc complementare (A, \bar{A}) . Evenimentul complementar elementului sigur este evenimentul imposibil.

Spunem că evenimentul A implică evenimentul B dacă realizarea lui A atrage după sine realizarea lui B. Ca relație între mulțimi $A \subset B$.

Mulțimea tuturor evenimentelor elementare definește un spațiu de evenimente elementare. Se poate considera că orice eveniment legat de o experiență, cu un număr finit de cazuri posibile, poate fi interpretat ca o submulțime a unei mulțime. Există astfel o dualitate de limbaj (tabelul 3.1).

Tabelul 3.1

Limbajul evenimentelor	Limbajul mulțimilor
Eveniment;	Submulțimea lui A;
Eveniment sigur;	Mulțimea totală A;
Eveniment imposibil;	Mulțimea vidă \emptyset
A implică B	$A \subset B$
A sau B	$A \cup B$
A și B	$A \cap B$
Non A	\bar{A}
A și B incompatibile	$A \cap B = \emptyset$
Eveniment elementar	$A_i, \{A_i\}, A_i \in A$

Fiecărui experiment A asociat unui corp borelian K de evenimente îi este asociat un număr pozitiv $P(A)$ numit probabilitatea lui de realizare. Dacă într-o serie de “n” probe evenimentul A s-a realizat de $m \leq n$ ori atunci numim probabilitatea evenimentului A raportul:

$$P(A) = \frac{m}{n} \quad (3.1)$$

3.1.2. Considerente teoretice privind calculul probabilistic

Pornind de la dualitatea limbajului eveniment – mulțime se pot scrie relațiile:

$$\begin{aligned}
0 < P(A) < 1 \\
P(E) &= 1 \\
P(A \cup B) &= P(A) + P(B) - P(A \cap B) \\
P(A - B) &= P(A) - P(B) \\
P(A \cap B) &= P(A) \cdot P(B)
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

Dacă evenimentele unei submulțimi au aceeași probabilitate de apariție se numesc echiprobabile. În acest caz probabilitatea unui eveniment cu “k” cazuri favorabile generează o probabilitate:

$$P(A) = \frac{k}{n} \tag{3.3}$$

unde “n” este numărul total al cazurilor posibile ale experienței.

Fie evenimentele A și B cu probabilitățile P(A) și P(B). Se definește probabilitatea evenimentului B condiționată de evenimentul A prin:

$$P(B|A) = P_A(B) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \tag{3.4}$$

Relația anterioară se poate generaliza pentru calculul probabilităților intersecției de evenimente.

Dacă evenimentele A și B își modifică probabilitatea în funcție de realizarea sau nerealizarea celuilalt se spune că evenimentele sunt dependente.

Formula probabilității totale definește probabilitatea de realizare a unui eveniment o dată cu realizarea unuia din evenimentele incompatibile A_1, A_2, \dots, A_n :

$$P_{(B)} = \sum P_{(A_i)} \cdot P_{A_i(B)} \tag{3.5}$$

Legat de același aspect este teorema lui Bayes. Dacă evenimentul B se poate realiza o dată cu unul din evenimentele incompatibile A_1, A_2, \dots , atunci probabilitatea ca o dată cu B să se realizeze și A_i este:

$$P_{B(A_i)} = \frac{P_{(A_i)} \cdot P_{A_i(B)}}{P_{(B)}} \tag{3.6}$$

Starea de funcționare sau de defecțiune a unui sistem în condiții precizate de exploatare este un eveniment în câmpul de evenimente asociat experimentului considerat.

Una din metodele de calcul probabilistic are la bază schema binomială generalizată. Fie A_1, A_2, \dots, A_n “n” evenimente independente. Probabilitatea să se realizeze k din cele “n” evenimente – și să nu se realizeze “n-k” – este egală cu coeficientul lui x^k din dezvoltarea polinomului:

$$(p_1 \cdot x + q_1) \cdot (p_2 \cdot x + q_2) \cdot (p_3 \cdot x + q_3) \cdot \dots \cdot (p_n \cdot x + q_n) \tag{3.7}$$

unde $p_i = P_{(A_i)}$ și $q_i = 1 - p_i$.

O formă particulară de calcul este oferită de schema binomială (Bernouli). Dacă evenimentele A_1, A_2, \dots, A_n au aceeași probabilitate $p_i = p$ și $q_i = 1 - p$, atunci probabilitatea realizării a "k" din cele evenimente, este egală cu coeficientul lui x^k din polinomul $(p \cdot x + q)^k$ adică $C_n^k \cdot p^k \cdot q^{n-k}$.

Exemplu 3.2

Pentru iluminarea frontală a unei scene se utilizează două surse de lumină de producție și timp de utilizare diferiți. Se cere să se determine probabilitatea defectării sistemului. Sistemul se consideră defect la nefuncționarea simultană a celor două surse. Se cunosc $P_{(A)} = \frac{1}{9}$ și $P_{(B)} = \frac{1}{11}$ probabilitățile de îndeplinire a evenimentului A și respectiv B (defectarea sursei A și B).

Evenimentele sunt independente astfel că

$$P_{(A \cap B)} = P_{(A)} \cdot P_{(B)} = \frac{1}{9} \cdot \frac{1}{11} = \frac{1}{99} \quad (3.8)$$

Exemplu 3.3

Un sistem de iluminare tolerant la defectare presupune utilizarea a două surse de lumină. Care este probabilitatea de funcționare a sistemului (cel puțin una din surse să funcționeze). Probabilitatea funcționării corecte a surselor este $P_{(A)} = P_{(B)} = 0.8$

Sistemul de iluminare funcționează dacă funcționează fie sursa A fie sursa B.

$$P_{(A \cup B)} = P_{(A)} + P_{(B)} - P_{(A \cap B)} = 0.8 + 0.8 - 0.64 = 0.96 \quad (3.9)$$

Exemplu 3.4

Schema sistemului de acționare electrică a roții motoare pentru un robot industrial mobil este prezentată în figura 3.1. Care este probabilitatea funcționării sistemului de acționare ?

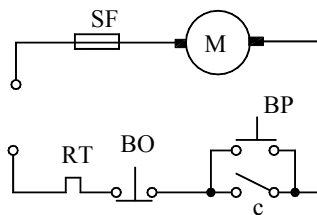


Fig. 3.1 Schemă de acționare cu m.c.c.

Se definesc evenimentele:

- Evenimentul A – funcționarea siguranței fuzibile SF;
- Evenimentul B – motorul M să fie funcțional (fără defecte);
- Evenimentul C – releul termic RT să fie funcțional;

- Evenimentul D – butonul BO să nu fie apăsat;
- Evenimentul E – să fie apăsat butonul BP ;
- Evenimentul G – să fie închis contactul c ;

Sistemul de acționare este funcțional dacă se îndeplinesc evenimentele A , B , C , D și unul dintre E sau G . Probabilitatea funcționării sistemului va fi:

$$P_{(O)} = P_{(A)} \cdot P_{(B)} \cdot P_{(C)} \cdot P_{(D)} \cdot P_{(EUG)} \quad (3.10)$$

Exemplu 3.5

O operație de deminare se realizează cu ajutorul unui RI mobil dedicat. Se presupune cunoscută probabilitatea de înscriere pe traiectoria din teren $P(O) = 0.8$. Probabilitatea de funcționarea a echipamentului de localizare a minei este $P(L) = 0.9$. Probabilitatea de reușită a deminării $P(D1) = 0.55$. Care este probabilitatea de reușită a operației preconizate dacă cele trei evenimente sunt independente?

$$P_{(A)} = P_{(O)} \cdot P_{(L)} \cdot P_{(D1)} = 0.8 \cdot 0.9 \cdot 0.55 = 0.396 \quad (3.11)$$

Probabilitatea de reușită oferită de echipamentul în cauză se consideră redusă motiv pentru care se admite existența unui al doilea sistem cu probabilitatea $P(D2) = 0.85$. Nu este posibilă realizarea simultană a celor două încercări de deminare. A doua se pune în aplicare dacă prima este nesatisfăcătoare.

Care este probabilitatea de reușită a celei de-a doua variante?

Care este probabilitatea de eșec total ?

Evenimentul $D2$ trebuie să se realizeze când nu se realizează $D1$. Acest lucru se poate scrie ca fiind:

$$P_{(B|CA)} = \frac{P_{(B \cap CA)}}{P_{(CA)}} \quad (3.12)$$

$$P_{(CA)} = 1 - 0.396 = 0.604 \quad (3.13)$$

$$P_{(B \cap CA)} = P_{(B)} \cdot P_{(CA)} = P_{(O \cap L \cap D2)} \cdot P_{(CA)} = 0.8 \cdot 0.9 \cdot 0.85 \cdot 0.604 = 0.3696$$

$$P_{(B|CA)} = \frac{0.3696}{0.604} = 0.612 \quad (3.14)$$

Probabilitatea de eșec total va fi:

$$P_{(ET)} = P_{(CA)} \cdot P_{(C(B|CA))} = 0.604 \cdot (1 - 0.612) = 0.234 \quad (3.15)$$

3.1.3. Variabile aleatoare și performanța

Noțiunea de variabilă aleatoare reprezintă una din noțiunile de bază ale teoriei probabilităților și implicit de cel de performanță. În studiul unui fenomen se fac, în general, măsurători al căror rezultat se exprimă prin valori numerice reale. Utilizând

noțiunea de variabilă aleatoare se pot descrie evenimentele în cauză prin intermediul acestor valori.

Dar, ce este o *variabilă aleatoare*?

Mărimile caracteristice fenomenului aleatoriu se numesc variabile aleatoare. Acestea se reprezintă ca funcții pe câmpul de evenimente asociat fenomenului cu valori din mulțimea valorilor posibile ale fenomenului considerat, cu o anumită probabilitate. De exemplu: numărul de puncte care apar la aruncarea unui zar, numărul de bile care albe care apar în "n" extrageri dintr-o urnă care conține bile de diferite culori, rezultatul obținut în urma măsurării unei mărimi fizice etc. Fiecare din mărimile de mai sus poate lua diferite valori în diversele efectuări ale experienței, chiar dacă toate condițiile rămân neschimbate la fiecare efectuare a experienței. Modificarea valorilor are la bază factori întâmplători. Precizarea este mult mai bună dacă cunoaștem și probabilitatea cu care este luată fiecare valoare.

Vom nota o variabilă aleatoare X printr-o reprezentare schematică de tip tablou:

$$X \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdot & \cdot & x_n \\ p_1 & p_2 & \cdot & \cdot & p_n \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

unde prima linie a tabloului este formată din valorile posibile ale variabilei iar cea de-a doua linie corespunde probabilităților cu care se iau aceste valori. Tabloul de mai sus se numește distribuția sau repartiția variabilei X .

Dintre variabilele aleatoare frecvent întâlnite frecvent întâlnite în teoria fiabilității se pot menționa:

- Numărul de defecțiuni care apar într-o anumită perioadă de funcționare a unui dispozitiv;
- Numărul produselor defecte dintr-un lot examinat;
- Timpul de funcționare fără defecțiuni;
- Timpul de restabilire;
- Nivelul parametrilor tehnici ai dispozitivelor etc.

Exemplu 3.6

Ocuparea de către un obiect a unei poziții bine determinate în raport cu un reper anumit se numește ordonare. O piesă cilindrică pe o suprafață plană poate fi ordonată în una din cele două poziții reprezentate cu probabilitățile p_1 și p_2 .

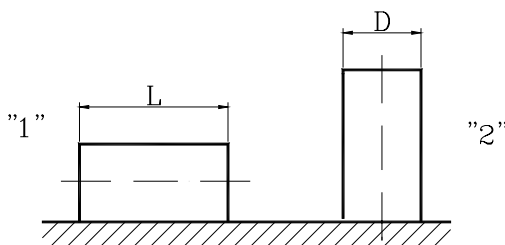


Fig. 3.2 Ordonarea unei piese cilindrice

Probabilitatea de ordonare se definește ca raportul dintre numărul obiectelor care se ordonează favorabil, și numărul posibil de piese participante la procesul de ordonare.

Variabila aleatoare definită ca și funcție de ordonare are următoarea distribuție:

$$X \left(\begin{array}{c} 1 \\ L/D \\ \sqrt{1+(L/D)^2} \end{array} \quad \begin{array}{c} 2 \\ 1-p_1 \end{array} \right) \quad (3.17)$$

Exemplu 3.7

O scenă pentru iluminarea frontală utilizează două surse de lumină de producție și timpi de funcționare diferiți. Cele două surse au probabilitățile de funcționare $P_{(A)} = 8/9$ și $P_{(B)} = 10/11$.

Variabila aleatoare definită ca și starea de funcționare a sistemului are următoarea distribuție:

$$X \left(\begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ p_1 & p_2 & p_3 \end{array} \right) \quad (3.18)$$

unde:

- starea x_1 corespunde funcționării ambelor surse cu probabilitatea:

$$p_1 = P(A) \cdot P(B) = \frac{8}{9} \cdot \frac{10}{11} = \frac{80}{99} \quad (3.19)$$

- starea x_2 corespunde funcționării unei surse:

$$p_2 = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B) = \frac{8}{9} + \frac{10}{11} - \frac{80}{99} = \frac{88 + 90 - 80}{99} = \frac{98}{99}$$

- starea x_3 corespunde nefuncționării nici unei surse:

$$p_3 = \frac{1}{9} \cdot \frac{1}{11} = \frac{1}{99} \quad (3.20)$$

Exemplu 3.8

Un sistem senzorial este format din 3 senzori de proximitate inductivi conectați în serie. Să se scrie distribuția variabilei aleatoare definită ca și stare de defectare a sistemului. Probabilitatea de defectare individuală este $P(a) = 1/10$.

Elementele fiind identice, probabilitățile de defectare se scriu ca și coeficienții binomiali ai lui x^k , $k = 1 \dots 3$. Binomul are expresia:

$$(px + q)^3 \quad (3.21)$$

unde $p = 0.1$ și $q = 0.9$, iar coeficientul binomial a lui x^k este $C_n^k p^k q^{n-k}$. Distribuția variabilei aleatoare va fi:

$$X \left(\begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ \frac{3!}{1! \cdot 2!} \cdot 0.1^1 \cdot 0.9^2 & \frac{3!}{1! \cdot 2!} \cdot 0.1^2 \cdot 0.9^1 & 0.1^3 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{ccc} 1 & 2 & 3 \\ 0.243 & 0.027 & 0.001 \end{array} \right) \quad (3.22)$$

Variabile aleatoare suportă o serie de operații matematice definite ca și produs de variabile aleatoare, sumă etc. Dacă X este variabila aleatoare cu distribuția:

$$X \left(\begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & \cdot & x_n \\ p_1 & p_2 & & p_n \end{array} \right) \quad (3.23)$$

și a este o constantă, atunci distribuția aX :

$$X \left(\begin{array}{cccc} ax_1 & ax_2 & \cdot & ax_n \\ p_1 & p_2 & & p_n \end{array} \right) \quad (3.24)$$

Dacă X și Y sunt două variabile aleatoare cu distribuțiile:

$$X \left(\begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & \cdot & x_m \\ p_1 & p_2 & & p_m \end{array} \right) \text{ și } Y \left(\begin{array}{cccc} y_1 & y_2 & \cdot & y_n \\ q_1 & q_2 & & q_n \end{array} \right) \quad (3.25)$$

atunci variabila aleatoare $Z = X + Y$ are distribuția:

$$X + Y \left(\begin{array}{cccc} x_1 + y_1 & x_1 + y_2 & \cdot & x_m + y_n \\ p_{11} & p_{12} & & p_{mn} \end{array} \right) \quad (3.26)$$

unde P_{ij} ($i=1,2,\dots,m$ și $j=1,2,\dots,n$) este probabilitatea realizării simultane a egalităților $X = x_i$ și $Y = y_j$.

Variabila aleatoare $Z = X \cdot Y$ are distribuția :

$$X \cdot Y \left(\begin{array}{cccc} x_1 \cdot y_1 & x_1 \cdot y_2 & \cdot & x_m \cdot y_n \\ p_{11} & p_{12} & & p_{mn} \end{array} \right) \quad (3.27)$$

Variabila aleatoare X^r are distribuția definită prin variabila care ia valoarea x_i^r dacă X ia valoarea x_i .

Inversa unei variabile aleatoare X , care nu ia valori nule, este variabila $1/X$ care ia valoarea $1/x_i$ când variabila X ia valoarea x_i .

Dacă evenimentele sunt independente pentru toate cazurile "m" și "n" atunci $P_{ij} = p_i \cdot q_j$.

Fiind dată variabila aleatoare X vom numi valoarea medie a acestei variabile numărul:

$$M(X) = p_1 \cdot x_1 + p_2 \cdot x_2 + \dots + p_n \cdot x_n \quad (3.28)$$

Exemplu 3.9

Intr-un container se găsesc piese de 2 categorii (de ex. albe și negre). Se extrage o piesă iar în container va cădea dintr-un alimentator o nouă piesă de aceeași

categorie.

Fie variabila aleatoare definită ca extragerea unei piese dintr-o categorie din container la prima extragere și respectiv a doua extragere. Care este distribuția sumei celor două variabile ?

Cele două variabile au următoarele distribuții:

$$X_1 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ p & q \end{pmatrix} \dots\dots\dots X_2 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ p & q \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

Conform definiției sumei variabilelor aleatoare putem scrie:

$$X_1 + X_2 \begin{pmatrix} 1+1 & 1+0 & 0+1 & 0+0 \\ p^2 & pq & qp & q^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ p^2 & 2pq & q^2 \end{pmatrix} \quad (3.30)$$

Variabila sumă reprezintă numărul de piese din aceeași categorie extrase din container la două extrageri succesive.

Exemplu 3.10

Un sistem senzorial este compus din 5 module numerotate de la 1 la 5 care se pot defecta independent cu probabilitatea individuală $p_k = 0.2 + 0.2 \cdot (k - 1)$. Să se calculeze valoarea medie a numărului de defecțiuni.

Fie X variabila aleatoare asociată defectării modulului senzorial k cu starea de defect "1" și starea de funcționare "0":

$$X \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.2 + 0.2 \cdot (k - 1) & 0.8 - 0.2 \cdot (k - 1) \end{pmatrix}; k = 1 \dots 5 \quad (3.31)$$

Variabila aleatoare care dă numărul de defecțiuni este $X = \sum_1^5 x_i$.

$$M(X) = \sum_1^5 1 \cdot [0.2 + 0.2 \cdot (k - 1)] = 3 \quad (3.32)$$

3.2. Analiza hazardului în proiectarea inginerescă

3.2.1. Introducere

Este normal pentru o mașină, un mecanism să aibă o componentă de hazard în ceea ce privește piesele / funcțiile / fluxul. Dacă riscul (probabilitatea) de apariție este ridicat atunci crește și posibilitatea apariției a noi pericole în sistem. În categoria hazardurilor tipice se pot include:

- Puncte la limită;
- Strivire, sfărâmare;
- Coliziune cu obiecte mobile;

- Cădere la înălțime;
- Suprafețe alunecoase;
- Explozie;
- Șoc electric / scurtcircuit;
- Temperatura / focul;
- Toxicitatea;
- Solicitare fizică.

Societatea Națională a Inginerilor Profesioniști (NSPE – USA), înregistrată oficial din 1934 și având aproximativ 60.000 de membri, a introdus în codul de etică pentru ingineri câteva precizări:

- “...serviciile practicate de ingineri impun onestitate, imparțialitate, cinste și echitate, și trebuie să fie dedicate pentru *protecția publicului, siguranța și prosperitatea acestuia*”;
- “inginerii în atribuțiile lor profesionale, vor ...susține la maximum *siguranța, sănătatea și bunăstarea publicului*” primul criteriu fundamental (din cele șase) ale codului;

Considerații asemănătoare se regăsesc în regulamentele asociației inginerilor și tehnologilor (ABET-USA), a societății inginerilor mecanici (ASME –USA). În codul de etică profesională a ASME (American Society of Mechanical Engineering) (pct. b și c2) se completează precizările anterioare cu referire directă la activitatea de proiectare efectuată de ingineri.

Proiectarea conceptuală (metoda proiectării sistemelor Taguchi, 1989) generează soluții potențiale multiple. După o analiză “quick and dirty” a fiecărei soluții posibile se selectează (pe baza principiilor inovative) setul de cerințe cu cele mai ridicate șanse de reușită. Proiectarea detaliată (proiectarea parametrilor și toleranțelor, Taguchi, 1989) permite o analiză detaliată a soluțiilor selectate pentru determinarea funcționalității, geometriei, dimensiunilor, ajustajului, interfaței umane, siguranței etc.

Proiectarea pentru siguranță (*Design for Safety*) este o metodologie de proiectare pentru sănătatea, siguranța și bunăstarea consumatorului, publicului și a muncitorilor care realizează sau care distribuie produsul. Se impune identificarea în faza de proiectare a aspectelor de hazard inerente în faza de fabricație, distribuție, utilizare și diminuarea acestor efecte. Chiar dacă aceste efecte nu pot fi eliminate, se impune să se realizeze minimizarea posibilă și atenționarea utilizatorului despre pericolele rămase.

Primul pas în identificarea hazardelor asociate cu orice sistem este de a identifica toate căile posibile de defecțiune datorate stărilor interne, utilizării consumatorului sau a abuzurilor și utilizării în medii variabile (modificabile). Potențiale deficiențe pentru componentele mecanice ar putea fi:

- Deformațiile elastice;
- Rupere fragilă (casantă);
- Deformații plastice, fluaj,
- Defecțiuni de flambaj, rupere ductilă;
- Defecțiuni de oboseală: coroziune indusă, frecare, impact, suprafață, efecte termice induse, vibrații;
- Defecțiuni datorate impactului / șocului indus: deformații, oboseală, rupere, frecare, uzare;

- Uzare: adevivă, abrazivă, cavitație, coroziune, eroziune, pitting etc.;
 - Defecțiuni datorate efectelor termice induse: schimbarea proprietăților materialelor, deformații, șoc termic;
 - Defecte de îmbinare, exfolieri;
 - Corodare corozivă / chimică: galvanică, fisurare, agresivitate a hidrogenului, oxidare, pitting;
 - Defecte combinate: rupere datorată oboselii sau flambajului, deformațiilor induse termic etc.;
 - Defecte ale interfeței mecanice: decuplare, interferență, blocare, alunecare;
 - Agresivitate a mediului / biologică: animale, descompuneri, plante, insecte, persoane, agenți atmosferici;
 - Degradare radioactivă: infraroșu, microunde, nuclear, ultraviolete.
 - Pentru componentele și sistemele electrice se pot enumera câteva dintre posibilele defecțiuni:
 - Supratensiuni;
 - Tensiuni minime;
 - Defecțiuni de circuit deschis (în gol): ce evenimente pot avea loc la pierderea semnalului de ieșire ?
 - Defecțiuni de circuit în scurtcircuit: ce se întâmplă cu sistemul?
 - Aspecte termice: modificări a proprietăților de material, temperaturi de operare, dilatare, instabilitate termică;
 - Probleme mecanice: inserția / eliminarea componentelor, vibrații;
 - Străpungerea unei componente: în ce fel va afecta defecțiunea componentei modul de funcționare a sistemului;
 - Probleme ale sursei de alimentare: frecvența de lucru nominală, zgomotul în frecvență înaltă, tensiunea de alimentare, forma semnalului;
 - Anomalii ale semnalului (în domeniul timp): zgomot, forma semnalului, semnal perturbator;
 - Anomalii ale semnalului (în domeniul frecvență): distorsiuni, aliasing, spectru.
- Standardul military MIL-STD-1629A impune un set minim de defecțiuni ale unui sistem care trebuie să fie luate în considerare [3.13]:
- Operații premature;
 - Operații intermitente;
 - Defect de operare la prescrierea timpului;
 - Defect de încetare a operației la prescrierea timpului;
 - Lipsa / atenuarea semnalului de ieșire sau defect în timpul operației;
 - Degradarea semnalului de ieșire sau a capacității operaționale.
- O informație “istorică” a performanțelor și problemelor referitoare la produsele și procesele existente sunt strict necesare inginerului proiectant. Se impune colectarea informațiilor și arhivarea acestora atât cu privire la defectele existente cât și la modalitățile folosite pentru rezolvarea acestora.

3.2.2. Metoda FMEA

Analiza defectelor și a efectelor (Failure Modes and Effects Analysis – FMEA) se constituie într-o metodologie de identificare a modurilor potențiale de defecțiune și

hazardului asociat cu proiectarea detaliată a produsului sau procesului.

Literatura de specialitate face referire la următorii pași:

- descrierea sistemului sau a procesului în condițiile unei defecțiuni luate în considerare;
- identificarea tuturor căilor prin care un sistem sau un proces se poate defecta. Această identificare se poate realiza pe baza informațiilor din baza de date, experienței personale sau a unui proces de creație (asemănător brainstorming);
- identifică simptomele fiecărui mod de defecțiune care ar putea ajuta la detecție;
- determină efectul fiecărui mod de defectare;
- evaluează probabilitatea fiecărui mod de defectare posibil. O ierarhizare calitativă poate fi utilizată dacă datele statistice nu sunt disponibile;
- evaluează probabilitatea pierderilor (pagubelor) personale și proporția avariei pentru fiecare mod de defectare;
- calculează indicele de pericol (*danger index*) de la pașii 5 & 6 și multiplică probabilitățile sau rangurile împreună.

Gravitatea pericolului este luată în considerare pe baza unei scări cu patru valori (tabelul 3.2) [3.1], [3.2].

Tabelul 3.2

Categoria	Descriere	Definiție
I	Neglijabil	Defect funcțional a unei piese sau a unui proces fără stricăciuni
II	Critic	Defecte cu posibilități de apariție fără degradări majore a 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

FMEA se prezintă în mod normal sub formă tabelară. Indicele de pericol este o ierarhizare a riscurilor asociate fiecărui proiect.

În literatura de specialitate (McDermott, 1996 și Dieter, 2000) se propune o scară pentru gravitatea pericolului, probabilitatea de apariție și probabilitatea de detecție [3.1].

Nivelul riscului este determinat prin:

$$risc = (p_a) \cdot (c_g) \quad (3.33)$$

unde: p_a – reprezintă probabilitatea de apariție; c_g – reprezintă categoria gravității apariției defectului. Probabilitatea poate fi cuantificată pe baza a cinci nivele conform datelor din tabelul 3.3

Pe baza datelor anterioare se poate stabili matricea de risc (fig.3.3).

Numărul priorității de risc (risk priority number – RPN) se calculează ca fiind:

$$RPN = (g_d) \cdot (p_a) \cdot (p_d) \quad (3.34)$$

unde: g_d – reprezintă cantitativ gravitatea defectului; p_a – reprezintă probabilitatea de apariție; p_d – reprezintă probabilitatea de detecție.

Tabelul 3.3

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

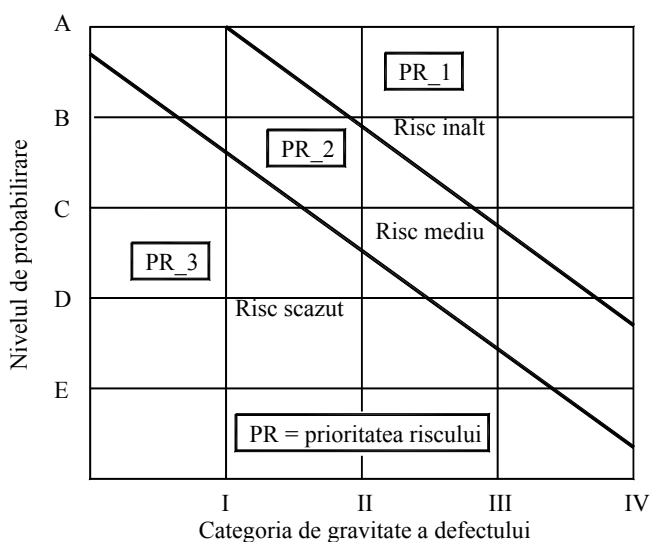


Fig. 3.3 Categoria de gravitate a defectului

Un RPN de valoare ridicată indică un risc semnificativ pentru sistem și se impune reproiectarea produsului urmărindu-se eliminarea sau cel puțin reducerea acestui risc.

Tabelul 3.4

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
2	Foarte mic	Observabil	Aproape nimic	Aproape nimic

(continuare Tabelul 3.4)

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

Tabelul 3.5

Scala de normare pentru probabilitatea de apariție				
Esti - mare	Descriere	Dieter [2000, p. 552]	McDermott [1996, p. 371]	
		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	≤ 2	pe zi

Tabelul 3.6

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

Departamentul Apărării a SUA a publicat MIL-STD-1629A (1980) care definește procedurile standard pentru analiza modului de defectare, a efectelor și a stării critice (**Failure Modes, Effects and Criticality Analysis**) (FMECA) [3.13].

În cadrul metodei FMECA fiecărui mod de defectare îi este asociată o probabilitate de apariție. În cazul absenței informațiilor necesare de calcul a probabilității, se pot utiliza nivelele calitative (5 nivele) din tabelul 3.7. Fiecare defect, funcție de gravitate, este ierarhizat pe 4 categorii (tabelul 3.8)[3.2].

Tabelul 3.7

Nivelul	Descriere	Operație singulară	Evidență
A	Frecvent	De multe ori întâmplător	Toate căile sunt întâmplătoare
B	Probabil	Are loc la diverse momente pe durata de viață a produsului	Au loc frecvent
C	Ocazional	Are loc la un moment pe durata de viață a produsului	Au loc în diverse momente
D	Vag (slab, îndepărtat)	Există posibilitatea să aibă loc în timpul vieții produsului	Nu obișnuit
E	Improbabil	Rareori are loc	Rareori

Tabelul 3.8

Categoria	Descriere	Definiție
I	Catastrofic	Pierdere de echipament sau pierdere de vieți omenești
II	Critic	Avarie majoră, deteriorare sistem
III	Marginal / de graniță	Avarie minoră, deteriorare sistem
IV	Neglijabil	Pierdere nesemnificativă a funcțiilor

Metoda FMECA stabilește o asociere între probabilitatea de apariție a defectului și gravitatea acestuia. Indicele de gravitate definește această asociere (tabelul 3.9).

Tabelul 3.9

	I Catastrofic	II Decisiv	III Marginal / graniță	IV Neglijabil
A: frecvent	1	3	7	13
B: probabilistic	2	5	9	16
C: ocazional	4	6	11	18
D: slab	8	10	14	19
E: improbabil	12	15	17	20

Finalizarea analizei impune emiterea unei concluzii funcție de indicele de gravitate (tabelul 3.10).

Tabelul 3.10

Indicele de risc	Criteriul
1 – 5	inacceptabil
6 – 9	nedorit
10 – 17	Acceptabil cu control
18 - 20	Acceptabil fără control

3.2.3. Metoda ETA

O metodă de apreciere a riscului este cea a grafului evenimentelor (Event Tree Analysis – ETA). Este o metodă de analiză și cuantificare bazată pe logică binară.

Exemplu 3.11

Se consideră sistemul de protecție împotriva focului din componența unei clădiri (fig.3.4). Un senzor detectează existența focarului dintr-o cameră. Prezența pericolului este semnalizată acustic.

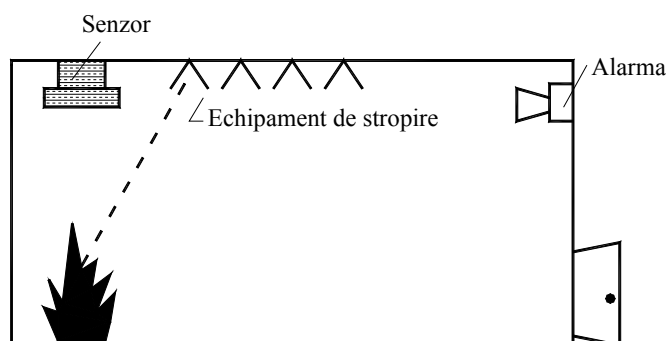


Fig. 3.4 Sistemul de protecție

În același timp un sistem de stropire este acționat în vederea eliminării extinderii focului

Arborele evenimentelor pentru cazul analizat este prezentat în figura 3.5. Sunt sugestionate în afara evenimentelor și rezultate previzionale .

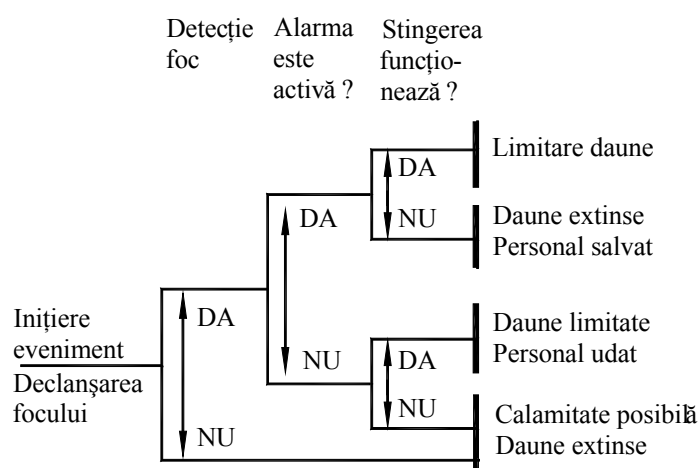


Fig. 3.5 Arborele evenimentelor

Analiza cantitativă a protecției sistemului este prezentată în figura 3.6.

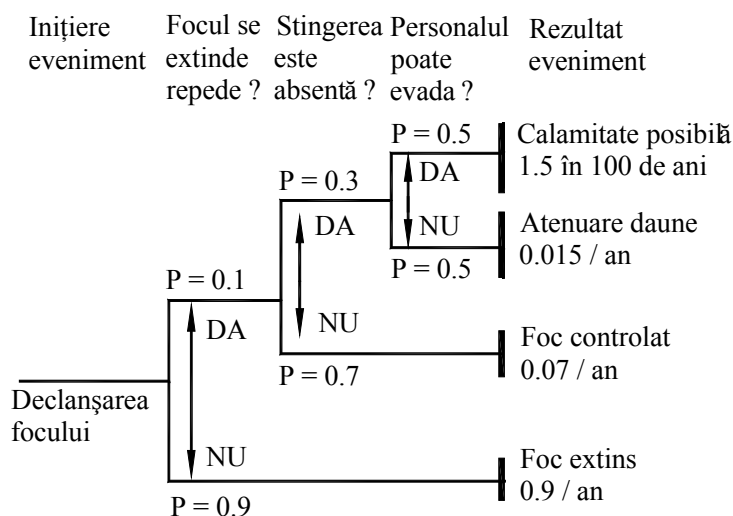


Fig. 3.6 Analiza cantitativă a protecției sistemului

3.2.4. Metoda FTA (Fault Tree Analysis)

Metoda FTA are la bază o metodă grafică de conectare a defectelor posibile dintr-un sistem / proces într-o schemă logică de analiză. S-a dezvoltat pentru analiza sistemelor electrice, fiind apoi abordată pentru siguranța sistemelor în general.

Schema bloc de pregătire a metodei FTA este prezentată în figura 3.7.

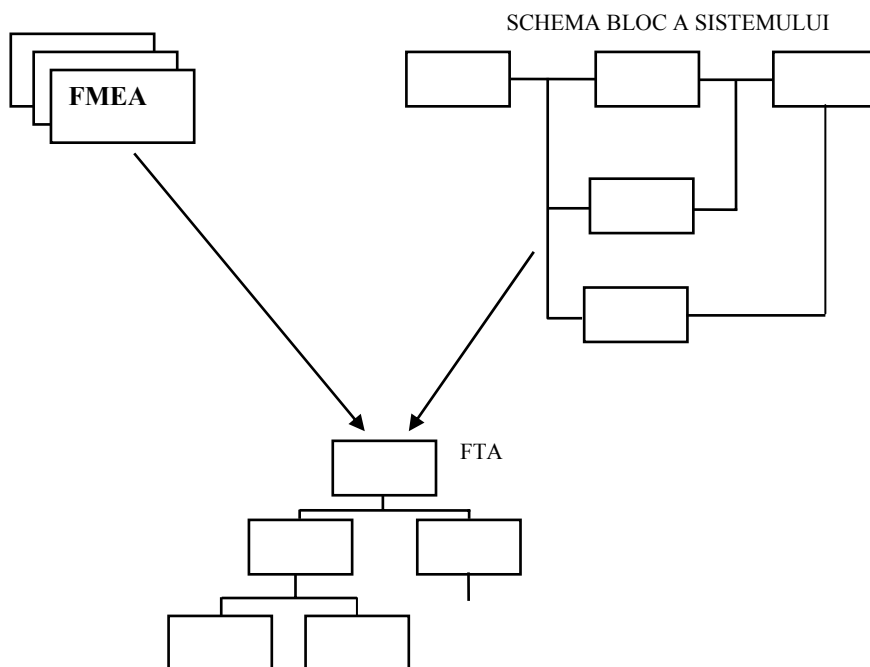


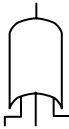
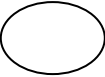

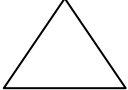



Fig. 3.7 Schema bloc de pregătire a metodei FTA

Simbolurile standard utilizate pentru construcția schemei logice FTA și semnificația lor este prezentată în tabelul 3.11

Tabelul 3.11

	<p>“Poartă” AND</p> <p>Semnalul de ieșire este prezent numai dacă toate semnalele de intrare sunt prezente simultan</p>		Simbolul circular reprezintă evenimentul de bază.
	<p>“Poartă” SAU</p> <p>Semnalul de ieșire va fi prezent dacă unul sau mai multe semnale de intrare sunt prezente</p>		Simbolul oval reprezintă o situație specială defintă de existența unui eveniment sigur.
	Simbolul rectangular este principalul bloc pentru graful analitic		Simbolul triunghi semnifică transferul ramificației spre o altă locație
	Simbolul romb identifică un eveniment terminal nedevelopat. Acest lucru se datorează lipsei de informație sau semnificație.		

Procedura metodei FTA respectă următoarea etapizare:

- Identifică evenimentul de prim rang pentru a fi analizat;
- Identifică evenimentele sau seria de elemente care contribuie în mod direct la evenimentul de rang superior;
- Continuă aceste etape până la nivelul de bază;
- Realizează schema logică pe baza simbolurilor grafice utilizate și implementează modelul în cadrul soft-ului avut la dispoziție;
- Consideră situații alternative și propune soluții.

Un exemplu principal de arbore al defectelor, cu utilizarea simbolurilor anterioare, este prezentat în figura 3.8 iar cuantificarea generalizată a unui astfel de arbore în relațiile 3.35 și 3.38.

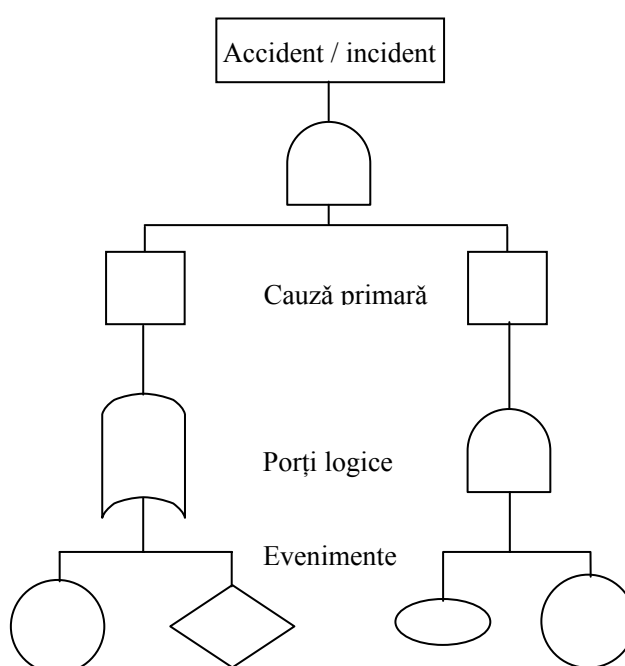


Fig. 3.8 Exemplu principal de arbore al defectelor

Analiza cantitativă a evenimentelor se bazează pe algebra booleană generalizată pentru arborele sistemului analizat.

- Poarta “ȘI”. Două evenimente (B) și (C) sunt intrări pentru evenimentul (A) prin intermediul porții “și”:

$$p(A) = p(B) \cdot p(C) \quad (3.35)$$

Dacă trei evenimente (B, C, D) sunt intrări pentru evenimentul (A) probabilitatea acestuia va fi:

$$p(A) = p(B) \cdot p(C) \cdot p(D) \quad (3.36)$$

- Poarta “SAU”. Două evenimente (B și C) sunt intrări pentru evenimentul (A)

printr-o poartă “SAU”:

$$p(A) = p(B) + p(C) - p(B) \cdot p(C) \quad (3.37)$$

Dacă trei evenimente (B, C și D) sunt intrări pentru evenimentul (A) prin intermediul porții “SAU”, vom avea:

$$p(A) = p(B) + p(C) + p(D) - [p(B) \cdot p(C) + p(B) \cdot p(D) + p(C) \cdot p(D)] - p(B) \cdot p(C) \cdot p(D) \quad (3.38)$$

Exemplu 3.12

Se analizează riscul de producere a unui accident într-o intersecție (fig.3.9) [3.22]

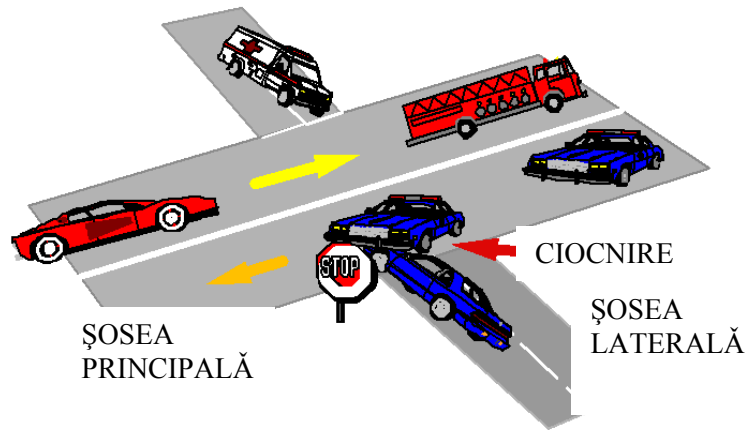


Fig. 3.9 Riscul de producere a unui accident de circulație

Arborele defectelor este construit prin înlănțuirea de secvențe și evenimente (fig.3.10). Sunt ilustrate și probabilitățile pe evenimente și pe principiul analizei cantitative prezentate anterior. În analiza cantitativă proiectantul are posibilitatea de a decide dacă pentru poarta “SAU” considera evaluarea prin relația (3.38) sau va lucra aproximativ cu o relație de forma:

$$p(a) \approx p(b) + p(C) + p(D) \quad (3.39)$$

3.3. Fiabilitate și proiectare

3.3.1. Considerații privind teoria fiabilității

Fiabilitatea unui “obiect” se definește ca și capacitatea acestuia de a-și îndeplini funcția pentru care a fost proiectat, un anumit interval de timp și cu o probabilitate cunoscută. Din punctul de vedere al teoriei metrologice aceasta înseamnă 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 caracterizat de

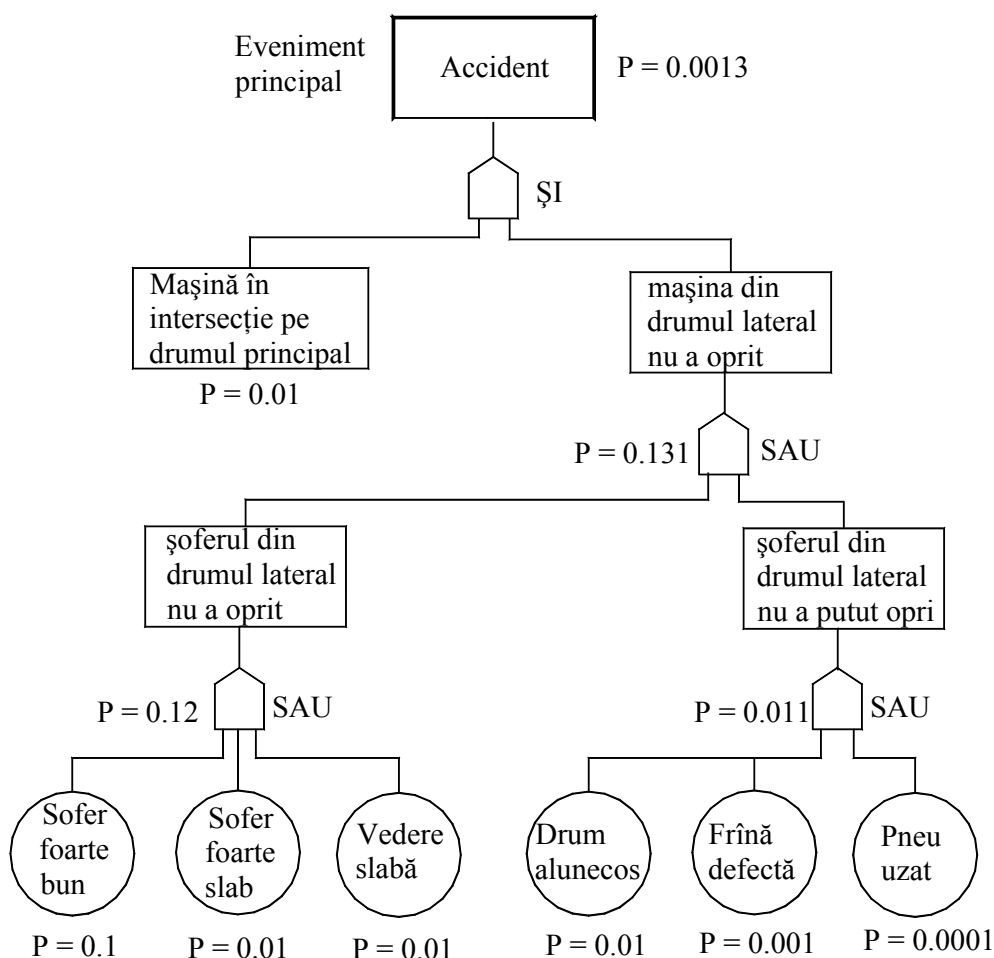


Fig. 3.10 Arborele defectelor și calculul riscului de producere a accidentului

parametrii săi de performanță: capacitatea de funcționare, buna stare a unui sistem, capacitatea de stocare, durata de viață, funcționarea fără defecțiuni, disponibilitatea, dependabilitatea, capabilitatea, ieșirea din funcțiune, deranjamentul, capacitatea de reparare, restabilirea.

Pentru aceasta să stabilim însă la început cui se aplică teoria fiabilității ?

Teoria fiabilității se aplică unui produs, dispozitiv, sistem și element.

Produsul reprezintă orice rezultat material al producției destinat unei probleme practice.

Dispozitivul este un produs cu o construcție finită și poate îngloba: piese, mecanisme, bloc, aparate, elemente etc.

Sistemul este un ansamblu de obiecte care funcționează în comun pentru realizarea unei anumite funcțiuni. Acestea pot fi *monofuncționale* sau *multifuncționale* (telesemnalizare, telemăsură, telecomandă, ...). Sistemul multifuncțional iese total din funcțiune numai când nu mai realizează toate funcțiunile.

Elementul reprezintă o anumită parte din sistem capabilă să îndeplinească o anumită funcțiune în cadrul sistemului. În general nu este destinat unei aplicații practice independente. Împărțirea unui sistem într-un număr de elemente este arbitrară dar trebuie făcută astfel încât toate elementele să fie cuprinse în schemă.

Indicatorii de *fiabilitate* sunt:

- **Funcția de fiabilitate.** Intervalul de timp în care sistemul sau elemental funcționează fără defectare este o variabilă aleatoare pe care o numim timp de funcționare fără defecțiuni și o notăm cu T . Funcția $p(t)$ - notată și $R(t)$ - se numește funcția fiabilității sistemului:

$$p(t) = R(t) = P(T > t) \quad (3.40)$$

și definește probabilitatea ca sistemul să funcționeze fără defecțiuni în intervalul $(0, t)$ [3.8].

- **Funcția de repartiție.** Uneori este comodă utilizarea probabilității ieșirii din funcțiune a sistemului în intervalul de timp prescris t , în condiții date [3.8]:

$$q(t) = F(t) = P(T \leq t) \quad (3.41)$$

Probabilitatea $q(t)$ se mai numește și funcția de non-fiabilitate. Evident între cei doi indicatori există și relația:

$$p(t) + q(t) = 1 \quad (3.42)$$

- **Rata defectărilor** definește numărul de defectări, în procente sau relative, pe unitatea de timp:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{p(t)} \cdot \frac{dp(t)}{dt} \quad (3.43)$$

Pe baza acestui indicator se poate determina funcția de fiabilitate a sistemului. O caracteristică tipică $\lambda(t)$ pentru toată viața unui produs este prezentată în figura 3.11.

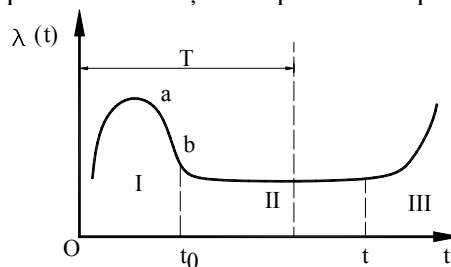


Fig. 3.11 Defecte și durata de viață

Perioada inițială – în care au loc o serie de defecțiuni datorită erorilor de fabricație (elemente slabe, montaj neglijent, îmbinări necorespunzătoare etc.). Coeficientul unghiular al dreptei (între punctele a și b) poate servi ca un indicator al nivelului tehnic al producției. Cu cât calitatea producției – execuție și control - este mai bună cu atât mai repede scade rata defecțiunilor. Este de dorit ca această perioadă să fie cât mai redusă [3.8].

Sursele de informații referitoare la rata de defectare necesare unei predicții a fiabilității unui sistem se încadrează în două categorii (tabelul 3.12).

Tabelul 3.12

Surse interne	Teste simple de laborator : cercetare, prototip, mediu, etc. Sunt necesare informații referitoare la : componentele încercate, condițiile de mediu (tipul testului, temperatură, vibrații etc.), mărimea testului, descrierea defectelor.
	Baze de date ale laboratoarelor
Surse externe	Baze de date din industrie
	Surse publice (cărți, standarde etc.)

Dacă rata defectărilor $\lambda(t) = \lambda = const.$ funcția de fiabilitate va fi:

$$p(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (3.44)$$

- **Valoarea medie a repartiției M ;**
- **Dispersia $D2$.**

Fiabilitatea mecanică este un subiect de tradiție. Abordarea subiectului de fiabilitate mecanică impune un domeniu larg de cunoștințe din știința materialelor, tribologie, rezistența materialelor, statistică. Sursele defecțiunilor din sfera componentelor mecanice se identifică cu deformațiile acestora, ruperea, uzura, coroziunea, etc.

Pentru mai multe componente mecanice standard – rulmenți cu bile, rulmenți cu role, știfturi / bolțuri, ventile de reglare, etc.- se dispune de o bază de date “istorică” referitoare la defecțiunile în timp.

În același timp, mai mulți producători de componente standard împreună cu oficialități militare au contribuit la generarea unei largi baze de date referitoare la componente, solicitări și fiabilitatea acestora.

Un extras din vasta documentație existentă referitoare la fiabilitatea componentelor este prezentat în tabelul 3.13 [3.19]. Valori sursă pentru rata de defectare a diverselor componente standard sunt prezentate în tabelele 3.13, 3.14 (componente mecanice), 3.15, 3.16, 3.17, 3.18.

Tabelul 3.13

Componenta	$\lambda \times 10^6$ ore
Lagăre	0.5
Rulmenți cu bile (pentru viteze mici)	0.875
Rulmenți cu bile (pentru viteze mari)	1.8
Ghidaje de translație	0.21
Came	0.002
Cuplaje	0.04
Cuplaje magnetice	0.6
Cuplaje cu fricțiune	0.3

Tabelul 3.14

Componenta	$\lambda \times 10^6$ ore
Ventilatoare	2.4
Roți dințate	0.12
Cutii de viteze	0.2
Roți dințate cilindrice	2.175
Cuplaje cardanice	2.5
Etanșări rotative	0.7
Etanșări glisante	0.3
Arbori	0.35
Arcuri	0.11
Frâne electrice	0.3
Supape cu bilă	4.6
Îmbinări mecanice	0.02
Îmbinări prin lipire	0.04
Furtun de presiune	3.93

Tabelul 3.15

Componentă	λ
Condensator ceramic	0.00360
Condensator electrolitic	0.02400
Condensator cu tantal	0.00180
Conector	0.00540
Diode (în general)	0.00360
Diodă electroluminiscentă	0.00047
Circuit integrat, bipolar	0.00950
Circuit integrat, CMOS	0.00570
Optocuplor	0.02700
Bobină, turnată	0.00170
Oscilator cu cristal	0.03200
Redresor de putere	0.00280
Rezistor pelicular metalic	0.00120
Rezistor (de putere)	0.01400
Îmbinare prin lipire	0.00007
Termistor	0.06500
Transformator	0.02300
Tranzistor bipolar	0.00015
Comutator	0.00100

Tabelul 3.16

Componentă	Defecte / an
Indicator telefonic	0.00647
Alimentator acumulator	0.06384
Accumulator cu acid	0.0189
Accumulator, nichel-cadmiu	0.00211
Contactator c.a.	0.0147
Contactator c.c.	0.03192
Compresor	12.012
Compresor (acționare electrică)	20.748
Controler	0.29
Ventil de reglare	0.6
Transportor elicoidal (melc)	7.9128
Ventilator	0.07636
Sistem de detecție a focului	0.00958
Sistem de stingere a focului (uscat)	0.01184
Sistem de stingere a focului (umed)	0.08114
Detector de flacără	3.6288
Sistem pentru măsurarea debitului (fluid)	1.14
Sistem pentru măsurarea debitului (solid)	3.75
Siguranță (electrică)	0.00533
Cromatograf	30.6
Generator electric (cu acționare disel)	18.9
Ventil manual	0.13
Furtun	0.00479
Schimbător căldură	0.26124

Tabelul 3.17

Componentă	Defecte / an
Indicator de temperatură	2.0832
Invertor	0.24108
Măsurarea nivelului de lichid	1.7
Măsurarea nivelului (solide)	6.86
Diode (în general)	0.00360
LED	0.00047
Motor (c.a)	0.12768
Motor (c.c)	0.189
Analizor de oxigen	5.65
pH meter	5.88
Record metalic	0.00479

Tabelul 3.18

(continuare Tabelul 3.18)

Componentă	Defecte / an
Conductă (plastic)	0.00743
Conductă (cu înveliș)	0.00371
Conductă (metal)	0.00023
Sistem pentru măsurarea presiunii	1.41
Ventil de reducere a presiunii	0.022
Înterupător pneumatic	0.14
Pompă (inclusive motor)	2.4528
Înregistrator	0.21084
Releu (protecție)	0.01604
Ventil de siguranță (cu arc)	0.01411
Ventil electromagnetice	0.42
Motor pas cu pas (m.p.p.)	0.044
Înregistrator cu bandă	0.22
Comutator electric de debit	0.22512
Comutator electric de nivel	0.01462
Comutator electric de presiune	0.41664
Comutator electric de temperatură	0.02856
Comutator debit pneumatic	0.0336
Comutator pneumatic de presiune	0.04368
Comutator pneumatic de temperatură	0.042
Termocuplu	0.52
Termometru	0.027
Convertor presiune - curent	0.52752
Transformator (de putere)	0.02125
Transformator (pentru redresor)	0.00899
Traductor de temperatură	0.8148
Ventil (clapetă manuală)	0.02671
Ventil (acționat prin motor)	0.01142
Ventil (acționat pneumatic)	0.03016
Ventil (acționat electromagnetice)	0.40908
Rezervor (metalice, în atmosferă)	0.00827
Rezervor (nemetalic, în atmosferă)	0.01016
Rezervor (de presiune, metalice)	9.2E-05

Ca unitate de măsură pentru rata de defectare se folosește:

$$1 \text{ FIT} = \frac{1 \text{ defectiune}}{10^9 \text{ h}} \quad (3.45)$$

Pentru calculul corect al fiabilității sistemului este necesar ca indicii de fiabilitate ai elementelor să fie aleși corespunzător regimurilor reale de funcționare și condițiilor reale de exploatare a sistemelor. Totodată este necesar să fie definite corect defecțiunile elementelor sistemului. Fiabilitatea sistemului și a elementelor sale depind de defecțiunile acestora [3.8]:

$$P_s(t) = P_c(t) \cdot P_u(t) \cdot P_r(t) \quad (3.46)$$

unde: $P_s(t)$ – este probabilitatea absenței defecțiunilor catastrofice (lege exponențială de repartiție); $P_u(t)$ – este probabilitatea defecțiunilor de uzură (parametrice) (lege normală de repartiție); $P_r(t)$ – probabilitatea rateurilor.

Evitarea consecințelor ce decurg din defectarea unor componente (subansamble) ale unui sistem se poate face principal în două moduri:

- Proiectarea și realizarea unui sistem sigur, fără defecte, situație evident ideală;
- Proiectarea și realizarea unui sistem tolerant la defecte.

Prima variantă presupune analiza cantitativă a fiabilității sistemului și este cazul abordat în prezentul paragraf. Cea de a doua variantă reprezintă o abordare realistă, ea fiind accesibilă tehnologiilor actuale.

3.3.2. Fiabilitatea sistemelor

Calculul estimativ al fiabilității unui sistem în faza conceptuală are la bază succesiunea de operații: stabilirea numărului de elemente de fiecare tip (categorie) care compun sistemul; se extrag din materialele informative valorile intensităților medii ale ieșirilor din funcțiune ale elementelor; se determină rata defectelor variantei sistemului; se determină probabilitatea funcționării fără defecțiuni a sistemului (rel.3.44).

Exemplu 3.13

Un sistem complex este format dintr-un anumit număr de elemente componente (tabelul 3.19) cu ratele medii de defectare specificate. Se cere să se estimeze fiabilitatea sistemului pentru o funcționare de 750 h.

Conform celor specificate anterior în tabelul 3.18 sunt prezentate etapele de calcul a ratei de defectare a ansamblului. Dacă durata impusă de lucru este 750 ore, probabilitatea de funcționare a ansamblului este:

$$P_{(t<750)} = e^{-750 \cdot 376,416 \cdot 10^{-6}} = e^{-0,282312} = 0.754 \quad (3.47)$$

Tabelul 3.19

Componenta	Cant. buc.	Rata de defectare / 10 ⁶ ore funcționare	Rata de defectare totală
Rulment cu bile, condiții grele de lucru	6	14.4	86.4
Sistem de frânare	4	16.8	67.2
Camă	2	0.016	0.032
Tub pneumatic	4	29.28	117,12
Pompă	1	1.464	1.464
Conductă	1	8.80	8.80
Bolț de ghidare	5	13.0	65.0
Ventil de control	2	15.20	30.4
Rata de defectare a ansamblului		376.416	

Exemplu 3.14

Se consideră un sistem stereo compus din 3 elemente conform schemei bloc din figura 3.12. Ratele de defectare a celor trei componente sunt: CD drive - 0.0002 defecte / h, amplificator - 0.00001 defecte / h, difuzor - 0.0001 defecte / h.

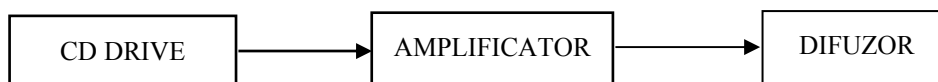


Fig. 3.12 Schema bloc a unui sistem stereo

Care este fiabilitatea sistemului pentru 100 h de funcționare ?

Deoarece ratele de defectare sunt aditive, se poate determina rata medie totală de defectare a sistemului :

$$\begin{aligned} \sum \lambda_i &= \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0.0002 + 0.00001 + 0.0001 = \\ &= 0.00031 \text{ defecte/h} \end{aligned} \quad (3.48)$$

Fiabilitatea sistemului este în acest caz :

$$R_{(100)} = e^{-\sum \lambda_i t} = e^{-0.00031 \cdot 100} = e^{-0.031} = 0.9695 \quad (3.49)$$

S-a precizat că un sistem este un ansamblu cu $n > 1$ elemente conectate între ele, în vederea îndeplinirii unor sarcini tehnice concrete. Pentru calculul fiabilității se poate defini schema structurală a funcționării fără defecțiuni a sistemului cunoscută și sub numele de schema logică de fiabilitate a sistemului.

Un model structural sau o schemă structurală reprezintă o schemă logică echivalentă – formată din blocuri – care modelează funcționarea sistemului din punct de vedere al fiabilității.

La alcătuirea schemei structurale se ține cont de:

- modul de funcționare a sistemului în intervalul dat;
- se determină elementele care condiționează funcționarea acestuia;
- se stabilește care sunt defecțiunile care pot apărea în cazul fiecărui element;
- se definește funcționarea fără defecțiuni a elementelor și a sistemului în ansamblu.

Definirea corectă a stării de funcționare fără defecțiuni a sistemului presupune evident cunoașterea influenței pe care o exercită defecțiunile elementelor asupra fiabilității sistemului.

Echivalențe a unor sisteme și relații de calcul a probabilităților de nefuncționare sunt prezentate în figurile 3.13- 3.18. Aplicarea metodei de transfigurare permite calcul fiabilității sistemelor complexe. Se va prefera (când este posibil) transfigurarea triunghi – stea față de cea stea – triunghi.

Dacă se consideră fiabilitatea de funcționare a fiecărui element $R_i(t)$ atunci fiabilitatea sistemului va fi descris de prin relația:

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (3.50)$$

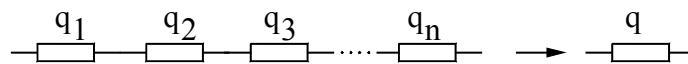


Fig. 3.13 Echivalența elementelor conectate în serie

Dacă pentru schema serie se exprimă probabilitatea de defectare a fiecărui element $q_i = 1 - R_i$, probabilitatea de defectare a sistemului este:

$$q \approx \sum_{i=1}^n q_i \quad (3.51)$$

Exemplu 3.15

Pentru sistemul prezentat în figura 3.12 se cunosc fiabilitatea fiecărei componente: $R_1(t)=0.91$, $R_2(t)=0.999$, $R_3(t)=0.94$. Se cere să se determine fiabilitatea de funcționare a sistemului.

Sistemul are la bază un model serie de fiabilitate. Conform relației (3.50) fiabilitatea sistemului este:

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot R_3(t) = 0.91 \cdot 0.9999 \cdot 0.94 = 0.8553 \quad (3.52)$$

Exemplu 3.16

Un sistem de calcul se compune din punct de vedere hard dintr-un terminal cu fiabilitatea $P_{(T)}$, o linie de mare viteză cu fiabilitatea $P_{(L)}$, o unitate centrală cu fiabilitatea $P_{(UC)}$, de la care datele sunt transferate printr-un floppy-disk cu probabilitatea $P_{(FD)}$ pe un disc cu fiabilitatea $P_{(D)}$ (fig.3.14). Care este schema logică pentru analiza fiabilității ?

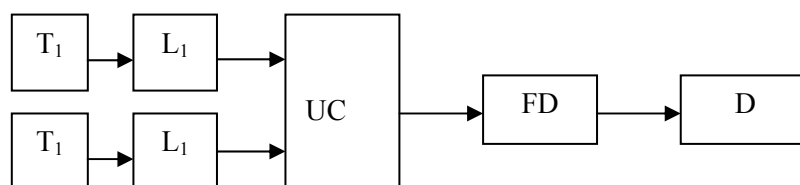


Fig. 3.14 Schema bloc a sistemului

Din punctul de vedere al funcționării sistemului, terminalele și liniile sunt conectate în paralel. Totuși ieșirea din uz a unuia conduce la declararea stării de defect al sistemului. Schema logică este în acest caz o schemă în serie.

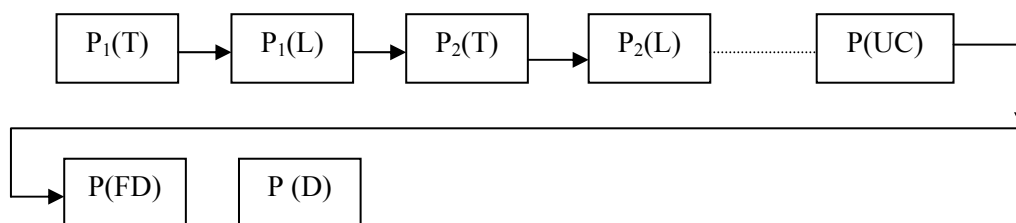


Fig. 3.15 Conexiunea serie a elementelor sistemului

Exemplu 3.17

Pentru exemplul anterior se cunosc: $P(T) = 0.971$, $P(L)=0.982$, $P(UC)=0.997$, $P(FD)=0.925$, $P(D)=9.69$. Câte terminale se pot conecta astfel ca fiabilitatea sistemului să nu scadă sub 0.8 ?

Elementele fiind legate în serie, probabilitatea funcționării fără defectiuni este:

$$P = (P_{(T)})^n \cdot (P_{(L)})^n \cdot P_{(UC)} \cdot P_{(FD)} \cdot P_{(D)} \quad (3.53)$$

După calcule:

$N = 1$ determină $P=0.8521 > 0.8$

$N = 2$ determină $P=0.812 > 0.8$

$N = 3$ determină $P=0.775 < 0.8$

Rezultă că se pot conecta doar 2 terminale pentru ca fiabilitatea sistemului să nu scadă sub 0.8.

Pentru a crește fiabilitatea se poate crea o structură cu rezervare prin introducerea în paralel a două F-D și două discuri D.

În acest caz schema logică a acestor elemente sunt în paralel iar probabilitatea este:

$$P_{(FD+D)} = 1 - (1 - P_{(FD)} \cdot P_{(D)})^2 = 0.9893 \quad (3.54)$$

În acest mod fiabilitatea sistemului se situează peste 0.8 pentru 4 terminale.

Unele sisteme se proiectează și se realizează în varianta cu redundanță (conexiune cu rezervare). În acest caz sistemul iese din uz dacă se produce defectarea a n_1 elemente ($a < n_1 \leq n$). Este suficient să funcționeze fără defecțiuni $n - n_1 + 1$ elemente (celelalte fiind în rezervă) pentru ca sistemul să funcționeze fără defecțiuni (normal, corect). Aceste sisteme pot fi paralelism activ (toate componentele sunt active tot timpul) sau un paralelism pasiv (în așteptare – componentele în așteptare intră în funcțiune la defectarea componentei active).

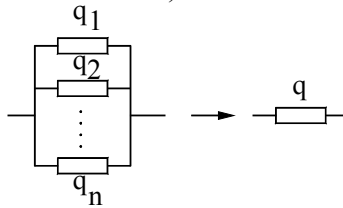


Fig. 3.16 Echivalența elementelor conectate în paralel

Probabilitatea de ieșire din uz a sistemului va fi:

$$q = \prod_{i=1}^n q_i \quad (3.55)$$

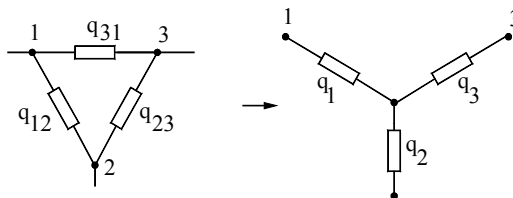


Fig. 3.17 Echivalența conexiunii triunghi - stea

$$q_1 \approx q_{12} \cdot q_{31} ; q_2 \approx q_{12} \cdot q_{23} ; q_3 \approx q_{23} \cdot q_{31} \quad (3.56)$$

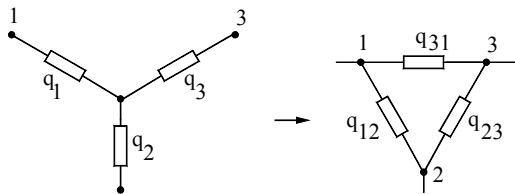


Fig. 3.18 Echivalența conexiunii stea – triunghi

În etapa de proiectare se impune o evaluare a fiabilității posibile pentru sistemul care face obiectul temei ținându-se cont de condițiile de funcționare. Pentru această etapă este necesar să se cunoască regimurile de funcționare ale elementelor componente.

Influența mediului ambiant asupra intensității defecțiunilor se exprimă prin curbe de variație a intensității defecțiunilor în raport cu temperatura. Rata de defectare a unei plăci de bază dintr-un calculator K2 [3.20] este prezentată în figura 3.19 funcție de temperatură. În figura s-a considerat rata de defectare a plăcii funcție de temperatură (250 °C - 1000 °C la nivelul coolerului).

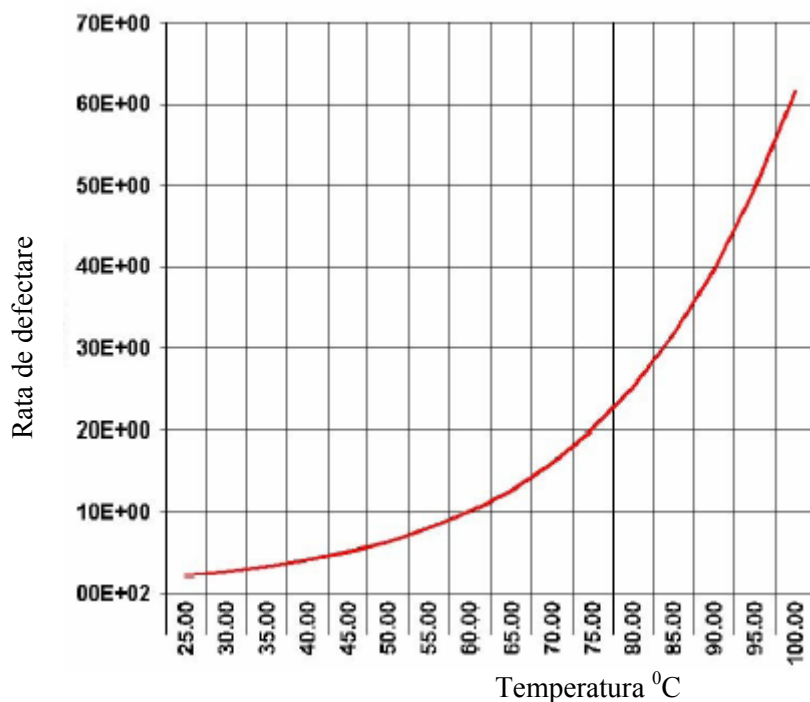


Fig. 3.19 Rata de defectare la o placă de bază

O diodă electroluminiscentă (LED) este defectă dacă nu emite lumină și nivelul de degradare este > 70 %. Rata de defectare a componentei electronice este determinată de temperatura joncțiunii. Valoarea acestei temperaturi este:

$$T_j = T_{amb} + R_{th} \cdot P_m \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.57)$$

unde: - T_{amb} este temperatura mediului ambiant [$^{\circ}\text{C}$]; R_{th} – este rezistența termică joncțiune – mediu [$^{\circ}\text{C}/\text{Watt}$]; P_m – este puterea medie disipată.

De condițiile de funcționare se ține cont prin coeficientul de sarcină. Pentru un condensator raportul între tensiunea de lucru și tensiunea nominală din catalog definește coeficientul de sarcină:

$$K_U = \frac{U}{U_n} \quad (3.58)$$

Pentru un condensator cu tantal se definește o rată de defectare fundamentală (tabelul 3.20) pe baza căreia se poate determina o rată de defectare de calcul funcție de condițiile de lucru [3.19].

Tabelul 3.20

Condensator cu tantal	Clasificare	Rata de defectare fundamentală
	Capacitate echivalentă redusă	1 % / 1000 h
	Secțiune redusă	
	Miniaturizat	
Categoria fiabilitate ridicată	0.5 % / 1000 h	

Coefficientul de corecție a condensatorului datorat temperaturii mediului ambiant este prezentat în figura 3.20.

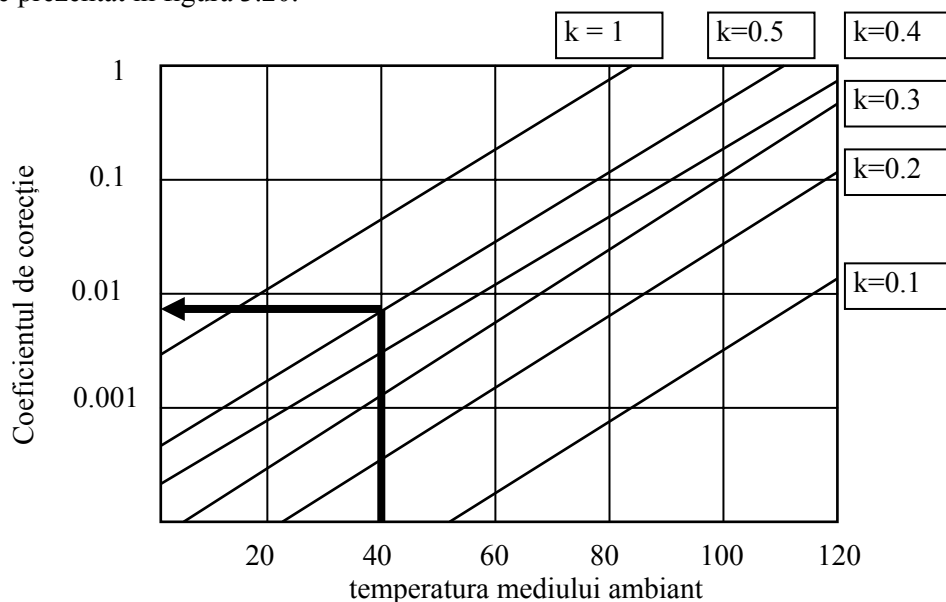


Fig. 3.20 Coeficientul de corecție funcție de temperatură

Rata de defectare de calcul se definește ca fiind:

$$\lambda = \lambda_{85} \cdot K_V \cdot K_R \quad (3.59)$$

unde: - λ_{85} este rata de defectare fundamentală (pentru 1000 h de funcționare la 85 °C) (tabelul 3.20); K_V – coeficient de corecție datorat temperaturii mediului ambiant (fig.3.20); K_R – coeficient de corecție pe circuitul rezistiv [3.19].

Tabelul 3.21

Condensatorul	Clasificare	Rata de defectare
TMR	Rezistență serie echivalentă redusă	1 % / 1000 h
TMU	Secțiune scăzută	
TMC	Dimensiune redusă	
TMX	Siguranță inclusă	
TMH	Fiabilitate ridicată	0.5 % / 1000 h

Exemplu 3.18

Un condensator cu tantal ($10 \mu\text{F}$, varianta B) are valoarea nominală a tensiunii 10 V și lucrează într-un mediu cu temperatura 40°C , la o tensiune de 5 V . Se cunoaște coeficientul de corecție $K_R = 0.38$. Să se determine rata de defectare a condensatorului în condițiile de lucru.

Coeficientul de reducere a sarcinii de funcționare are valoarea :

$$K = \frac{\text{tensiunea de operare}}{\text{tensiunea nom.}} = \frac{5}{10} = 0.5 \quad (3.60)$$

Din figura 3.20 pentru valorile de referință ale parametrilor de lucru $t = 40^\circ\text{C}$, $K = 0.5$ se obține valoarea coeficientului de corecție $KV = 0.008$. Conform tabelului 3.21 $\lambda_{85} = 1\% / 1000 \text{ h} = 1 \times 10^{-5} \text{ h}$.

În aceste condiții rata de defectare se calculează conform relației (3.59):

$$\lambda = 1 \cdot 10^{-5} \cdot 0.008 \cdot 0.38 = 30.4 \cdot 10^{-9} = 30.4 \text{ Fit} \quad (3.61)$$

Firmele constructoare utilizează metode evaluare diverse pentru același tip de reper. Estimarea ratei de defectare tot pentru un condensator cu tantal are la bază relația de calcul [λ – este rata de defectare în condițiile de lucru (tensiunea V , temperatura mediului T); λ_0 – este rata de defectare în condițiile nominale de funcționare (V_0 – tensiunea nominală, T_0 – temperatura nominală)][3.17]:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 \cdot 2^{\frac{T-T_0}{10}} \quad (3.62)$$

Exemplu 3.19

Valorile nominale ale parametrilor de lucru pentru un condensator cu tantal sunt $V_0 = 20 \text{ V c.c.}$, $T_0 = 85^\circ\text{C}$ iar parametrii de lucru $V = 5 \text{ V c.c.}$, $T = 45^\circ\text{C}$. Care este rata de defectare estimată dacă $\lambda_0 = 1\% / 1000 \text{ h}$?

Pe baza relației (3.62) și ale datelor de calcul se determină:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(\frac{5}{20}\right)^3 \cdot 2^{\frac{45-85}{10}} = \lambda_0 \cdot \frac{1}{64} \cdot \frac{1}{16} \approx 10 \text{ FIT} \quad (3.63)$$

Valori de referință ale ratei de defectare pentru diverse componente electronice (diode LED) sunt prezentate în tabelul 3.22 [3.21].

Tabelul 3.22

Componenta, caracteristici	Rata de defectare [% /1000 h]
LED, orange, $I_F = 70 \text{ mA}$, $T_{\text{amb}} = 55^\circ\text{C}$	$\leq 0.027\%$
LED, orange, $I_F = 45 \text{ mA}$, $T_{\text{amb}} = 85^\circ\text{C}$	$\leq 0.30\%$
LED, orange, $I_F = 45 \text{ mA}$, $T_{\text{amb}} = -40^\circ\text{C}$	$\leq 0.06\%$

Memoria EPROM este o componentă de bază a sistemelor de calcul. Pentru a

crește fiabilitatea acestei componente se poate utiliza un cip de corecție a erorilor (*error code correction*) (ECC). Defecte datorate unor aspecte de tehnologie de prelucrare sunt corectate prin ECC. Defecte de ordin periferic (în decodorul de adrese, în circuitul tampon de ieșire) nu sunt corectabile prin ECC [3.20]. Rata de defectare funcție de numărul de cicluri cu și fără ECC este prezentată în figura 3.21.

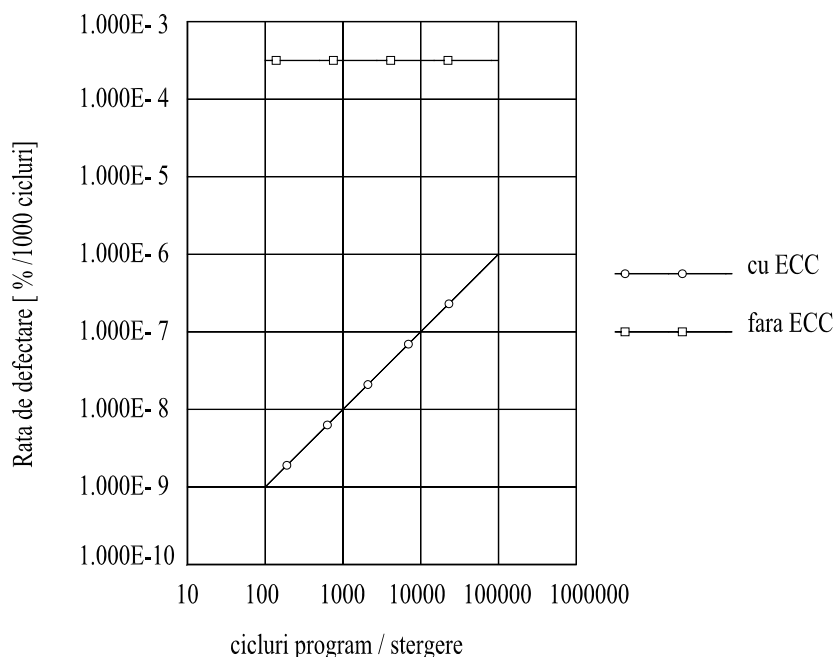


Fig. 3.21 Rata de defectare a memoriei EPROM

Sarcinile reale – mecanice, electrice, termice – ale elementelor, sistemelor nu pot fi cunoscute exact decât după ce acestea au fost executate și se încearcă. Încercările experimentale permit estimarea duratei de viață a sistemelor. Această predicție ia în considerare condițiile nominale impuse produsului și condiții referitoare la exploatare reală. Testele sunt dinamice la diverși parametri ai exploatării reale.

Pentru componente electronice condițiile nominale se referă la tensiunea nominală de alimentare și temperatura (55 °C sau 60 °C) pentru un coeficient de încredere de 60 %. Testul dinamic se realizează la 125 °C pentru 1000 h de funcționare, cu notificări a valorilor la 168, 504, 1000 ore.

Rata de defectare se calculează în acest caz ca fiind [3.15]:

$$\lambda = \frac{N}{K_T \cdot K_U \cdot H} \quad (3.64)$$

unde: N – este numărul de defecte în t ore funcționare, K_T – factorul de accelerare pentru temperatură, K_U – factorul de accelerare pentru temperatură, H – număr de ore dispozitiv definit ca fiind $H = n \cdot t \cdot 10^9$ (n – numărul de dispozitive, t – durata de încercare [h]).

Factorul de accelerare pentru temperatură se definește ca fiind:

$$K_T = e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (3.65)$$

unde: $E_a = 0.70 \text{ eV}$ – este energia de activare, $k = 8.617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ – constanta lui Boltzmann, T_1 – temperatura mediului [K], T_2 – temperatura de testare [K].

Într-un mod asemnător se definește factorul de accelerare pentru tensiune:

$$K_U = e^{\beta(U_2 - U_1)} \quad (3.66)$$

unde: $\beta = 2.5 \text{ [V}^{-1}\text{]}$ - termenul de accelerare pentru tensiune, U_1 – tensiunea de testare, U_2 – tensiunea nominală.

3.4. Fiabilitatea în proiectarea elementelor constructive

3.4.1. Introducere

Mult timp la baza proiectării sistemelor tehnice a stat un criteriu de bază axat pe obținerea unei durabilități cât mai ridicate. Deteriorări întâmplătoare reduceau însă durata de funcționare a sistemelor. Echipamentele moderne sunt mult mai complexe. Mult mai frecvent pot să apară defectări aleatoare ale elementelor componente sau a sistemului total. Elemente sau sisteme aparent identice din punctul de vedere al materialului, formei, tehnologiilor, condiții de funcționare prezintă durabilități diferite.

Defectele interne ale materialelor utilizate (chiar în condițiile aceleiași șarje), calitatea suprafețelor, mărimea abaterilor dimensionale etc. au o repartiție aleatorie chiar la un proces tehnologic identic.

Fiabilitatea componentelor și a sistemelor este afectată printre alți factori și de prelucrarea manuală și operațiile de asamblare. Influența umană asupra fiabilității este scăzută printr-o instruire superioară a personalului, o scădere a stresului emoțional la locul de muncă, crearea unui mediu de lucru adecvat etc. Scăderea complexității pieselor, a proceselor de asamblare și utilizarea unor câmpuri de toleranțe adecvate influențează de asemenea pozitiv fiabilitatea. O proiectare adecvată impune luarea în considerare a erorilor din sistemul analizat.

3.4.2. Analiza incertitudinilor

Incertitudinea este componentă naturală pentru toate sistemele din lumea înconjurătoare. În domeniul experimental expresia face referire la variația unei mărimi pentru măsurări repetate a aceluiași parametru în condiții identice de lucru. Se poate anticipa că valoarea măsurată se încadrează într-un interval:

$$\begin{aligned} \text{valoarea_medie} - \text{incertitudine} &\leq \text{valoarea_masurata} \leq \\ &\leq \text{valoarea_medie} + \text{incertitudine} \end{aligned} \quad (3.67)$$

unde valoarea_medie se obține în urma unui număr de măsurători.

Valoarea medie a unei mărimi aleatoare este definită ca fiind:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.68)$$

unde “n” este numărul de măsurători iar x_i este valoarea corespunzătoare din măsurătoarea “i”.

În multe aplicații nu este practic a se realiza un număr specificat de măsurători și a calcula valoarea medie și deviația standard. În aceste cazuri o singură valoare măsurată se echivalează cu valoarea medie. Incertitudinea trebuie estimată pe baza unei analize a surselor potențiale de erori din procesul analizat:

1. erori de achiziție

- A. erori de acuratețe – sunt erori constante (sistematice) și se pot elimina;
- 1) erori de calibrare a instrumentelor de măsurare – eliminabile prin calibrare proprie pe bază de standarde corespunzătoare;
 - 2) erori de măsurare datorate senzorului – eliminabile prin calibrarea senzorului și ridicarea caracteristicii;
 - 3) erori de condiționarea semnalului – eliminabile prin calibrarea senzorului cu circuitele de condiționare conectate și ridicarea caracteristicii;
 - 4) erori de instalare a senzorului – eliminabile prin instruirea personalului și experiență;
 - 5) erori de aranjare spațială a senzorului;
 - 6) erori temporale – eliminabile prin controlul mediului;
 - 7) erori datorate temperaturii – eliminabile prin calibrare și măsurări la aceeași temperatură.
- B. erori de precizie – sunt erori aleatoare (se estimează cu o incertitudine)
- 1) erori de citire a instrumentelor de măsurare;
 - 2) erori datorate modificărilor în condițiile de experiment;
- C. tehnici de măsurare mediocre – erori de operator – informațiile obținute se elimină;
- D. erori grosolane - informațiile obținute se elimină.

2. erori de prelucrare a datelor

- A. acuratețea calculului valorilor din măsurători
- B. acuratețea modelului de măsurare instalat

Multiplele surse de eroare de măsurare impun definirea unei incertitudini globale:

$$u_m = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (3.69)$$

unde: u_m este incertitudinea valorii măsurate, n este numărul surselor potențiale de eroare din măsurători, u_i – este incertitudinea estimată a măsurătorii provenind de la sursa i .

Dacă valoarea măsurată este utilizată pentru compunerea unor noi valori, se impune estimarea incertitudinii valorii rezultate pe baza unei metode adecvate.

Această valoare se poate determina pornind de la ecuația de compunere și

dezvoltarea în serie Taylor cu aproximația de ordinal întâi:

$$u_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot u_i^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{x_i=x_{i0}}^2 \cdot u_i^2} \quad (3.70)$$

unde: n – este numărul de valori măsurate utilizate în compunerea noi valori; u_i – este incertitudinea valorii măsurate de ordinal i .

Exemplu 3.20

Măsurarea puterii dissipate într-un rezistor se poate realiza prin trei metode:

- Se măsoară curentul prin rezistorul R : $P = I^2 \cdot R$
 - Se măsoară căderea de tensiune pe rezistorul R : $P = \frac{U^2}{R}$
 - Se măsoară atât curentul cât și tensiunea pe rezistor: $P = I \cdot U$.
- Incertitudinea cunoașterii valorii puterii va fi pentru cele trei cazuri:

$$\bullet \quad u_P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial I} \right)^2 \cdot u_I^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial R} \right)^2 \cdot u_R^2} = \sqrt{4 \cdot I^2 \cdot R^2 \cdot u_I^2 + I^4 \cdot u_R^2} \quad (3.71)$$

unde u_I și u_R sunt incertitudinile de cunoaștere ale curentului și rezistenței;

$$\bullet \quad u_P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial U} \right)^2 \cdot u_U^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial R} \right)^2 \cdot u_R^2} = \sqrt{4 \cdot \left(\frac{U}{R} \right)^2 \cdot u_U^2 + \left(\frac{U^2}{R^2} \right)^2 \cdot u_R^2} \quad (3.72)$$

unde u_U și u_R sunt incertitudinile de cunoaștere ale tensiunii și rezistenței;

$$u_P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial U} \right)^2 \cdot u_U^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I} \right)^2 \cdot u_I^2} = \sqrt{I^2 \cdot u_U^2 + U^2 \cdot u_I^2} \quad (3.73)$$

unde u_U și u_I sunt incertitudinile de cunoaștere ale tensiunii și curentului.

Estimarea calitativă a incertitudinii oferă posibilitatea stabilirii, în faza de proiectare, a celei mai bune metode pentru obținerea informației despre puterea disipată.

Exemplu 3.21

Rigiditatea unui arc se definește ca și raportul dintre forța generalizată aplicată și deformația arcului pe direcția forței. Acest parametru permite ridicarea caracteristicii statice a elementului elastic. În mod experimental acest parametru se determină prin aplicarea unor greutateți de valori cunoscute și măsurarea deformațiilor rezultate. Matematic acest model se exprimă printr-o relație de forma:

$$K = C \cdot \frac{F}{\Delta L} \quad (3.74)$$

unde: K este rigiditatea calculată a elementului elastic; C este o constantă de conversie a unităților de măsură; F – este forța gravitațională aplicată sistemului elastic; ΔL – este deformația elementului elastic la aplicarea forței F .

Aplicând relația (3.70) pentru ecuația (3.74) se obține incertitudinea de calcul a valorii rigidității:

$$u_K^2 = \left(\frac{\partial K}{\partial F}\right)^2 \cdot u_F^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial \Delta L}\right)^2 \cdot u_{\Delta L}^2 = \left(\frac{C}{\Delta L}\right)^2 \cdot u_F^2 + \left(-\frac{C \cdot F}{\Delta L^2}\right)^2 \cdot u_{\Delta L}^2 \quad (3.75)$$

unde: u_F este incertitudinea cunoașterii valorii forței F ; $u_{\Delta L}$ este incertitudinea cunoașterii valorii deformației măsurate.

3.4.3. Bazele statistice ale incertitudinii experimentale

Relațiile de bază pentru bazele statisticii experimentale sunt cele cunoscute din literatura de specialitate:

$$\sigma = \frac{1}{n-1} \cdot \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad (3.76)$$

$$\gamma = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3.77)$$

$$\mu - a \cdot \sigma \leq \text{valoarea}_{\text{masurata}} \leq \mu + a \cdot \sigma \quad (3.78)$$

unde a este o constantă bazată pe nivelul de încredere dorit (tabelul 3.23)

Tabelul 3.23

Nivel de încredere	90 %	95 %	99 %	99.7 % *	99.9 %	99.99 %	99.999 %	99.9999 %
a	1.65	1.96	2.58	3	3.29	3.89	4.42	4.89

* - limita "six" sigma

Dacă valorile măsurate sunt utilizate pentru calculul altor valori, este recomandabilă estimarea determinării incertitudinii de cunoaștere a noii valori. Estimarea se poate realiza aplicând relațiile funcționale prezentate în tabelul 3.23. Pentru o combinație liniară a șirului de variabile aleatoriu x_1, x_2, \dots, x_n relațiile de calcul devin:

$$y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i \quad (3.79)$$

$$\mu_y = a_1 \cdot \mu_1 + a_2 \cdot \mu_2 + \dots + a_n \cdot \mu_n = \sum a_i \cdot \mu_i \quad (3.80)$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot a_j \cdot \rho_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j = \sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot \sigma_i^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_i \cdot a_j \cdot \rho_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j \quad (3.81)$$

unde ρ_{ij} sunt coeficienții de corelație dintre valorile x_i & x_j ($0 \leq \rho_{ij} \leq 1$, $\rho_{ii} = 1$).

Tabelul 3.24

Relație funcțională	Valoarea medie (μ)	Deviația funcțională standard (σ)	Coefficientul funcțional al varianței ($\gamma = \sigma/\mu$)
a (constantă)	a	0	0
x (variabilă)	μ_x	σ_x	$\left(\gamma_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x}\right)$
$x + a$	$\mu_x + a$	σ_x	$\gamma_x \approx \frac{\sigma_x}{\mu_x + a}$
$a \cdot x$	$a \cdot \mu_x$	$a \cdot \sigma_x$	γ_x
x^2	μ_x^2	$2 \cdot \gamma_x \cdot \mu_x^2$	$2 \cdot \gamma_x$
x^3	μ_x^3	$3 \cdot \gamma_x \cdot \mu_x^3$	$3 \cdot \gamma_x$
$\frac{1}{x}$	$\frac{1}{\mu_x}$	$\frac{\gamma_x}{\mu_x}$	γ_x
$x \pm y$	$\mu_x \pm \mu_y$	$\frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}{\mu_x \pm \mu_y}$	$\frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}{\mu_x \pm \mu_y}$
$x \cdot y$	$\mu_x \cdot \mu_y$	$\mu_x \cdot \mu_y \cdot \sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2}$	$\sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2}$
$\frac{x}{y}$	$\frac{\mu_x}{\mu_y}$	$\frac{\mu_x}{\mu_y} \cdot \sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2}$	$\sqrt{\gamma_x^2 + \gamma_y^2}$

3.4.4. Coeficient de siguranță

Conceptul de coeficient de siguranță este recunoscut în istorie. În Roma antică proiectantul de poduri / punți utiliza o verificare a durabilității construcției pentru evitarea defecțiunilor. Ideia a fost preluată ajungându-se la noțiunea de coeficient de siguranță.

Coeficientul de siguranță pentru sistemele structurale propus de Philon din Bizanț (mort în 220 BC) este definit prin:

$$N = \frac{\text{capacitate}}{\text{sarcina}} = \frac{\text{rezistența admisibilă}}{\text{solicitare}} \quad (3.82)$$

Unul dintre scopurile creșterii fiabilității este cel de reducere a defectelor în perioada de rodaj și de extindere astfel a duratei de viață.

Problema asigurării funcționării unei piese sau a unui sistem în timpul exploatarii lor pune în centrul atenției problema raportării stării reale de tensiune a

acestora sub acțiunea sarcinilor de exploatare față de starea reală de tensiune limită la ruperea, distrugerea sau ieșirea din uz a piesei [3.11].

Valorile acestui coeficient de siguranță depind de domeniile avute în vedere. Discuțiile privind aceste valori sunt vechi, controversate.

În *domeniul aerospațial* se impun structuri cu greutate minimală ceea ce recomandă coeficienți de siguranță scăzuți. Pentru a asigura fiabilitatea sistemelor realizate, se execută testări complexe ale materialelor, componentelor și structurilor pentru a valida sistemul. Toate acestea conduc însă la un cost ridicat și consum ridicat de timp.

În *domeniul proiectilelor militare* un coeficient de siguranță unitar se consideră suficient întrucât produsul este de funcționare unică. *Avioanele de luptă* pot avea un coeficient de siguranță de 1.2, dar echipajul este dotat cu sisteme de aruncare și parașute iar sistemul este inspectat și menținut periodic în mod riguros.

În *domeniul avioanelor de transport* se admite un coeficient de 1.5 impunându-se însă un control periodic și extrem de precis.

Literatura de specialitate prezintă pe bază de experiență o serie de valori a coeficientului de siguranță, pe domenii de utilizare, care se iau în considerare în proiectare.

Robert L. Norton a dezvoltat teoria unui coeficient de siguranță ridicat. Coeficientul de siguranță global este o combinație a unor coeficienți de siguranță parțiali care iau în considerare proprietăți de material, acuratețea modelului ingineresc și a nivelului probabil a mediului de lucru. Astfel:

- pentru materiale elastice luându-se în considerare limita de curgere:

$$N_{elastic} \geq \max(N_1, N_2, N_3) \quad (3.83)$$

- pentru materiale fragile luându-se în considerare rezistența limită la rupere:

$$N_{fragil} \geq 2[\max(N_1, N_2, N_3)] \quad (3.84)$$

unde valorile N_1 , N_2 , N_3 se aleg din tabelul 3.25.

Tabelul 3.25

Coeficient de siguranță	N1 Parametrii de material (test)	N2 Acuratețea modelului	N3 Mediu de lucru
1.3	Complet caracterizat	Confirmat prin încercări	Același ca și în condițiile de încercare
2	Aproximații bune	Aproximații bune	Controlat, temperatura mediului ambiant
3	Aproximații corecte	Aproximații corecte	Modificări moderate
> 5	Aproximații brute	Aproximații brute	Modificări majore

Joseph P. Visodic recomanda un coeficient de siguranță minimal pe baza unei cunoașteri cumulative și a experienței (tabelul 3.26)(pentru materiale elastice și limita de curgere) [3.1].

Tabelul 3.26

Coeficient de siguranță	Cunoașterea sarcinii	Cunoașterea solicitării	Cunoașterea parametrilor de material	Cunoașterea mediului
1.2 – 1.5	Precis	Precis	Foarte bine	Controlabil
1.5 – 2.0	Bine	Bine	Foarte bine	Constant
2.0 – 2.5	Bine	Bine	Mediu	Normal
2.5 – 3.0	Mediu	Mediu	Mai puțin testate	Normal
3.0 – 4.0	Mediu	Mediu	Netestate	Normal

Aspecte ale valorilor coeficienților de siguranță și recomandări de utilizare în construcția de mașini sunt prezentate în literatura de specialitate [3.4], [3.5], [3.10].

3.4.5. Fiabilitatea la solicitări statice

Coeficientul de siguranță “c” se acceptă ca fiind

$$c = \frac{S}{\sigma} \quad (3.85)$$

unde: S – este mărimea limită – caracteristica de rezistență a materialului secțiunii concret solicitate, uzură limită, temperatură limită, vibrație (amplitudine, viteză, accelerație), presiune acustică limită etc., forța nominală sau tensiunea admisibilă; σ – este mărimea efectivă corespunzătoare, calculată, determinată etc.[3.1], [3.5].

Dificultățile de determinare a solicitărilor, metodele de calcul cu anumite imprecizii, parametrii mediului de lucru greu de estimat în timp, condițiile de lucru adeseori incerte determină pentru mărimea efectivă un caracter statistic cu o anumită lege de repartiție (fig.3.22 a). Dacă mărimea limită este o caracteristică mecanică, este evident că neuniformitățile de material, șarjele diferite, erorile de măsurare, metode imperfecte de interpretare a rezultatelor etc. îi imprimă un caracter de mărime statistică cu o anumită repartiție (fig.3.22 b).

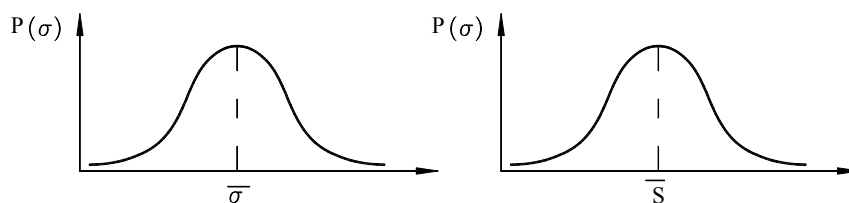


Fig. 3.22 Repartiția unei mărimi statistice

Coeficientul de siguranță se impune să fie supraunitar. Mărimea suprafeței hașurate indică posibilitatea ca tensiunile efective să fie mai mari decât cele limită și

implicit un coeficient de siguranță subunitar (fig.3.23).

Mărimile definiții pentru coeficientul de siguranță – mărimea limită și cea efectivă – se pot prezenta ca și rezultatul unor calcule matematice pe baza unor alte mărimi statistice. Admițându-se o repartiție normală pentru toate aceste mărimi de calcul, fiecare va fi caracterizată de o valoare medie și o dispersie calculabile. Se poate calcula în acest mod fiabilitatea și coeficientul de siguranță global.

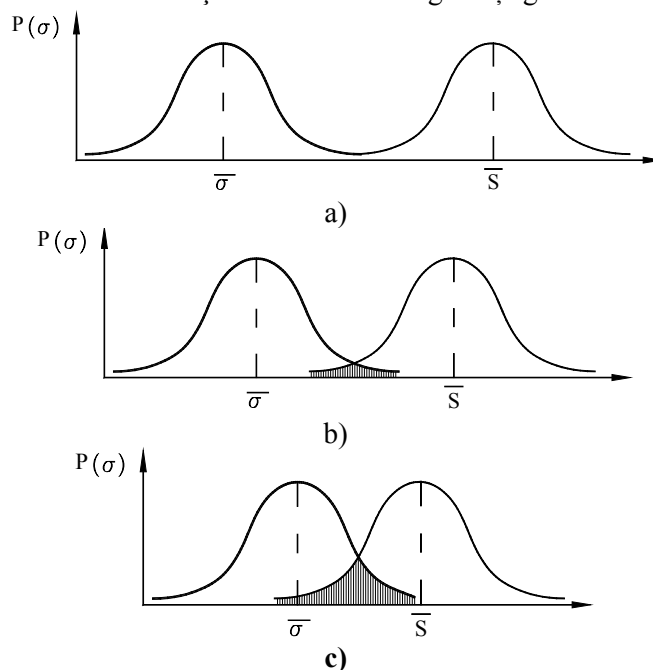


Fig. 3.23 Corelație fiabilitate – coeficient de siguranță

Pentru a reduce probabilitatea de defect este necesară redefinirea coeficientului de siguranță incluzând și varianța tensiunii și a forței:

$$c_F = c \cdot \left(\frac{1 - a \cdot \gamma_S}{1 + a \cdot \gamma_\sigma} \right) \quad (3.86)$$

unde:

- c_F – factorul de siguranță incluzând fiabilitatea;
- c – coeficientul de siguranță mediu bazat pe valori medii sau valori scontate ;
- a – este numărul deviației standard pentru a asigura nivelul dorit (tabelul 3.27)
- γ_σ – este coeficientul de variație a valorii tensiunii (estimativ);
- γ_S – este coeficientul de variație a tensiunii admisibile (publicat sau estimat)

Tabelul 3.27

a	0	1.65	2.33	3	3.08	3.62	4.42	4.89
Fiabilitate	50	95	99	99.87	99.9	99.99	99.999	99.9999
	%	%	%	%	%	%	%	%
Rata defectărilor	50	5 %	1 %	0.13	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
	%			%				

3.4.6. Fiabilitatea în proiectarea lagărelor cu rulmenți

Cercetările asupra loturilor de rulmenți au demonstrat o ieșire din uz datorită unei solicitări la oboseală. Defectele se pot încadra într-o distribuție Weibull. Luând în considerare probabilitatea de funcționare fără defecțiune, sarcina radială de calcul pentru rulmentul cu bile (sarcina de alegere a rulmentului din catalog) este [3.2]:

$$F_r = F_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{(L_0 \cdot n_0 / L_r \cdot n_r)}{0.02 + 4.439 \cdot [\ln(1/R)]^{1.438}}} \quad (3.87)$$

unde:

- F_0 – este sarcina de calcul pe rulment;
- L_0 – durata de viață a rulmentului impusă prin proiect [minute];
- n_0 – turația în funcționare a rulmentului [rot/min];
- L_r – durata nominală de viață a rulmentului (din catalog) [minute];
- n_r – turația nominală a rulmentului (din catalog) [rot/min];
- R – fiabilitatea impusă ($0.90 \leq R \leq 1.00$)

În același mod se poate calcula sarcina de calcul și pentru rulmentul cu role:

$$F_r = F_0 \cdot \sqrt[3]{\frac{(L_0 \cdot n_0 / L_r \cdot n_r)}{4.48 \cdot [\ln(1/R)]^{1.5}}} \quad (3.88)$$

3.4.7. Fiabilitatea în proiectarea roților dințate

AGMA (American Gear Manufacturers Association) recomandă abordarea calculului probabilistic pentru evaluarea stării de solicitare din dantura roților dințate.

$$S_{inc} = S_y \cdot \frac{K_1 \cdot K_2}{K_t \cdot K_r} \quad (3.89)$$

$$S_{contact} = S_c \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_3 \cdot C_4} \quad (3.90)$$

unde notațiile folosite au următoarea semnificație :

- S_{inc} – rezistența admisibilă (corectată) la încovoiere a materialului;
- $S_{contact}$ – rezistența admisibilă (corectată) la contact a materialului;
- S_y – rezistența admisibilă la curgere a materialului;
- S_c – rezistența admisibilă la contact a materialului;
- K_1, C_1 – factor de corecție a duratei de viață
- K_2, C_2 – factor de corecție a durității;
- K_3, C_3 – factor de corecție a temperaturii;
- K_4, C_4 – factor de corecție a fiabilității:

$$K_4 = C_4 = 0.7 - 0.15 \cdot \lg(1 - R) ; 0.90 \leq R \leq 0.99 \quad (3.91)$$

$$K_4 = C_4 = 0.5 - 0.25 \cdot \lg(1 - R) ; 0.99 \leq R \leq 0.9999 \quad (3.92)$$

3.4.8. Fiabilitatea în solicitarea la oboseală

Rezistența la oboseală pentru oțel se poate cuantifica sub formă corectată printr-o relație de forma [3.1]:

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot S'_e \quad (3.93)$$

unde:

- K_a – este factor de corecție a condițiilor de suprafață;
- K_b – este factor de corecție al mărimii;
- K_c – factorul de corecție a sarcinii;
- K_d – factorul de corecție a temperaturii;
- K_e – factorul de corecție a concentratorului;
- K_f – factorul de corecție a altor efecte;
- S'_e – rezistența limită la oboseală a unei epruvete în mișcare de rotație

Considerând o distribuție normală a factorilor de influență, relația anterioară corectată este:

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot S'_e \cdot (1 - a \cdot \gamma_{Se}) \quad (3.94)$$

$$\gamma_{Se} = \sqrt{\gamma_a^2 + \gamma_b^2 + \gamma_c^2 + \gamma_d^2 + \gamma_e^2 + \gamma_f^2 + \gamma_{S'_e}^2} \quad (3.95)$$

unde S_e , K_a , K_b , K_c , K_d , K_e , K_f și S'_e sunt valorile medii, iar constanta a are valori conform tabelului 3.27 iar γ este coeficientul de variație.

Tabelul 3.28

	Încovoiere	Torsiune	Întindere / compresiune
K_a	$= a \cdot S_{ut}^b$; $a = \begin{cases} 5.84 \\ 3.92 \\ 1.617 \\ 1.317 \end{cases}$; $b = \begin{cases} -0.995 \\ -0.7427 \\ -0.2653 \\ -0.0848 \end{cases}$; $\gamma_a = \begin{cases} 0.078 \rightarrow \text{forjat} \\ 0.098 \rightarrow \text{laminat} \\ 0.06 \rightarrow \text{prelucrat} \\ 0.131 \rightarrow \text{sol} \end{cases}$; S_{ut} [MPa]		
K_b	$= 0.604 \cdot d^{-0.1133}$; $2.8 \leq d \leq 51$; $\gamma_b = 0$; d [mm]	$= 1$; $\gamma_b = 0$	
K_c	$= 1$; $\gamma_c = 0$	$= 0.583$; $\gamma_c = 0.123$	$= 0.774$; $\gamma_c = 0.163$; $S_{ut} \leq 1520$ MPa
K_d	$= \begin{cases} 1 & \rightarrow 21 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 1.018 & \rightarrow 200 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases}$; $\gamma_d = 0$		
S'_e	$= 3.475 \cdot S_{ut}$ $\gamma_{Se} = 0.146$	$= 2.027 \cdot S_{ut}$ $\gamma_{Se} = 0.269$	$= 2.69 \cdot S_{ut}$ $\gamma_{Se} = 0.309$

3.5. Probleme propuse

- Un sistem constă din patru subsisteme conectate în serie. Fiabilitatea individuală a subsistemelor este: subsistemul A = 0.98; subsistemul B = 0.87; subsistemul C = 0.95; subsistemul D = 0.88. Să se determine fiabilitatea sistemului.
- Un sistem constă din trei subsisteme conectate în paralel, pentru a se asigura redundanța sistemului. Fiabilitatea individuală a fiecărui subsistem este: subsistemul A = 0.98; subsistemul B = 0.90; subsistemul C = 0.92. Să se determine fiabilitatea sistemului.
- Se consideră sistemul din figura 3.24 compus din subsistemele A, B, C1, C2, D1, D2, E. Subsistemele C1 și C2 respectiv D1 și D2 asigură redundanța în sistem. Fiabilitatea individuală a subsistemelor este: subsistemul A = 0.95; subsistemul B = 0.98; subsistemul C1 = subsistemul C2 = 0.94; subsistemul D1 = subsistemul D2 = 0.92; subsistemul E = 0.96. Se cere să se determine fiabilitatea sistemului.

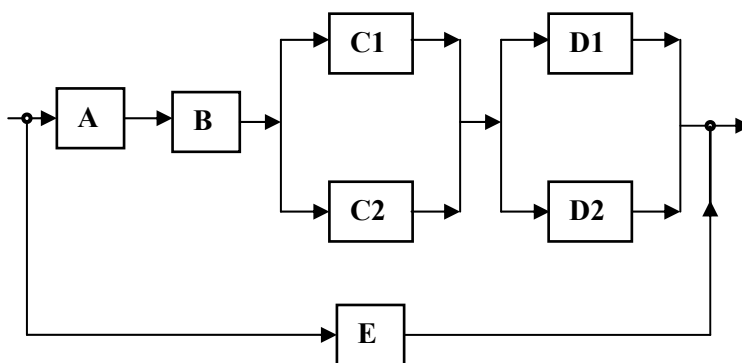


Fig. 3.24

- Un sistem este compus din mai multe componente, conform tabelului 3.29, având rata de defectare precizată. Să se calculeze fiabilitatea sistemului pentru o durată de funcționare impusă de 750 de ore.

Tabelul 3.29

Componenta	Numărul de componente în sistem	Rata de defectare (% 1000 ore)
A	2	0.135
B	1	0.118
C	4	0.225
E	4	0.092
F	1	0.102

3.6. Bibliografia capitolului 3

- [3.1] Anderson, D.O., Hazard Analysis in Engineering Design, Louisiana Tech. Univ.
- [3.2] Anderson, D.O., Design for Reliability, Louisiana Tech. University, 2000
- [3.3] Anderson, D.O., Making Engineering Design Decisions, Louisiana Tech. University, 2000
- [3.4] Demian, Tr., Elemente constructive de mecanică fină, EDP, București, 1980
- [3.5] Gafițanu, M., Organe de mașini, vol.I, Editura Tehnică, București, 1981
- [3.6] Inacio, C., Mechanical Reliability, http://www.ece.cmu.edu/~koopman/des_s99
- [3.7] Karna, A., Environmentally oriented product design. A Guide for Companies in the Electrical and Electronics Industry, Helsinki, 1998
- [3.8] Mihoc, Ghe., Muja, A., Diatcu, E., Bazele matematice ale teoriei fiabilității, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1976
- [3.9] Militaru, C., Fiabilitatea și precizia în tehnologia construcțiilor de mașini, Editura Tehnică, București, 1987
- [3.10] Popinceanu, N.G., Puiu, V., Organe de mașini. Principii de proiectare, Ed. Junimea Iași, 2003
- [3.11] Teodorescu, P.P., Ilie, V., Teoria elasticității și introducerea în mecanica solidelor deformabile, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1980
- [3.12]***, Moore's law, http://www.webopedia.com/TERM/M/Moores_Law.html
- [3.13]***, Silicon. Moore's Law, <http://www.intel.com/research/silicon/mooreslaw.htm>
- [3.14]***, MIL-STD-1629A, Military Standard Procedures For Performing A Failure Mode, Effects And Criticality Analysis, Department of Defense, <http://users.compaqnet.be/cn099845/MILSTD1629.htm>
- [3.15]***, Failure Rate Prediction, document nr.8013, Catalyst Semiconductor Inc., 2004
- [3.16]***, Reliability Life Test Failure Rate, http://www.ieews.na.baesystems.com/ads/pdf/reliability_fit_equations.pdf
- [3.17]***, Application guidelines for using tantalum capacitors, TN-189 R4, www.koaspeer.com
- [3.18]***, Reliability Data Sheet SnapLED 150 Emitter, Reliability Datasheet RD03, www.luxeon.com
- [3.19]***, NTC SERIES. Tantalum Chip Capacitors, NIC Doc #R-NTC02, NIC Components Corp. (USA)
- [3.20]***, E2PROM Reliability: On-chip Error Code Correction for E2PROMs, Catalyst Semiconductor Inc., 5207 FHD, 1998
- [3.21]***, High-Flux, High-Power LEDs. Reliability Data, www.luxeon.com
- [3.22]***, Fault Tree Analysis, http://reliability.sandia.gov/Reliability/Fault_Tree_Analysis
- [3.23]***, Moore's Law for Intel CPUs, <http://www.physics.udel.edu/wwwusers/watson/scen103/intel.html>