

Capitolul 3. FIABILITATEA SISTEMELOR MECANICE

-
- 3.1. Aspecte particulare ale fiabilității sistemelor
 - 3.2. Definițiile fiabilității
 - 3.3. Indicatori de fiabilitate
 - 3.4. Limitele indicatorilor de fiabilitate
 - 3.5. Legi de distribuție
 - 3.6. Încercări de fiabilitate
 - 3.7. Teste pentru identificarea legii de distribuție
 - 3.8. Tipuri de fiabilitate
 - 3.9. Mentenabilitatea și indicatorii acesteia
 - 3.10. Sistemul de mentenanță după necesitate, pe baza de diagnostic
 - 3.11. Aplicații la fiabilitatea și mentenabilitatea sistemelor
 - 3.12. Fiabilitatea examinării nedistructive (NDE)
-

3.1. Aspecte particulare ale fiabilității sistemelor

Importanța tot mai mare a fiabilității se datorează următorilor factori: creșterea complexității sistemelor tehnice și a importanței funcțiunilor ce 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 operații fizice și/sau procese chimice, alături de care se află utilaje auxiliare, utilajele 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 .

3.2. Definițiile fiabilității

Se definește conceptul calitativ al fiabilității, drept aptitudinea unui sistem, bloc, produs, element 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, bloc, produs, element 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; de asemenea alte discipline cum sunt: statistica matematică, programarea matematică, teoria așteptării, a jocurilor, deciziei și informației, teoria reglării automate, analiza spectrală etc., sunt utilizate pentru analiza fiabilității.

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 funcționare;
 - Buna stare a unui sistem;
 - Capacitatea de stocare;
 - Durata de viață;
 - Funcționarea fără defecțiuni;
 - Disponibilitatea;
 - Capabilitatea;
 - Capacitatea de reparare;
 - Restabilirea.

Sistemele de felul celor care se examinează aici pot fi reprezentate în moduri diferite. Pentru exemplificare, în figura 3.1, se prezintă o parte a unui sistem mai complex, parte ce este proiectată pentru:

1. micșorarea temperaturii unui curent de gaze fierbinți (gaze reziduale de la un fierbător industrial);
2. saturarea gazului cu vapori de apă;
3. îndepărtarea particulelor solide antrenate de gaz.

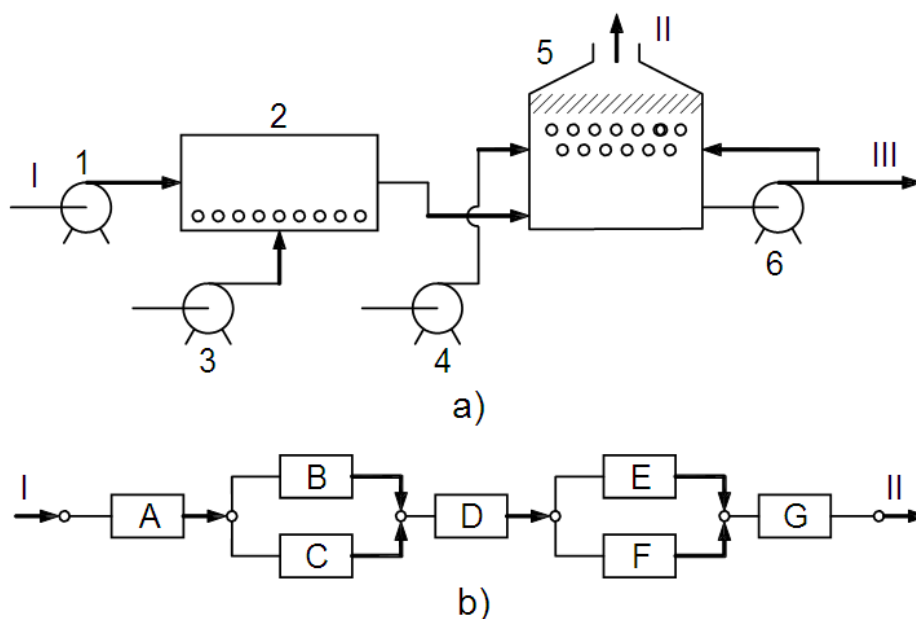


Fig. 3.1. Schema unei instalații de apă

a - schema tehnologică:

1 - suflantă; 2 răcitor; 3 grup două pompe pentru apă de răcire;

4 - pompă pentru apă de alimentare; 5 - epurator eu preîncălzitor de apă, dispozitiv de pulverizare și strat filtrant; 6 - grup două pompe pentru apă de pulverizare, cu recirculare; I - gaz rezidual; II - gaz la absorbție; III - abur de purjă;

b - schemă bloc;

A - suflanta 1; B,C - pompele 3; D - pompa 4; E,F - pompele 6; G - stratul filtrant din 5.

Figura 3.1a redă schema tehnologică a instalației, iar figura 3.1b – schema bloc corespunzătoare. Din compararea figurilor se poate constata că diagrama bloc este simplificată prin eliminarea elementelor schemei tehnologice care sunt neesențiale pentru studiul fiabilității sistemului. În continuare, se vor prezenta metode de evaluare a fiabilității sistemului și de construire a arborelui de defectări, pornind de la schema bloc.

Se constată că schema bloc din figura 3.1b este alcătuită dintr-o succesiune de tronsoane în serie, unele dintre tronsoane rezultând, la rândul lor, din legarea în paralel a unor elemente. Dispunerea în paralel a unor elemente identice, măsură ce se ia la proiectarea sistemului pentru asigurarea redundanței în vederea sporirii fiabilității, este caracteristică instalațiilor tehnologice. Redundanța este “existența într-un dispozitiv a mai mult decât un mijloc pentru îndeplinirea unei funcții specificate”.

Problema care se pune este de a stabili, pe cale analitică, funcția de fiabilitate a unui sistem, înțeles ca un complex de unități, ale căror funcții de fiabilitate sunt cunoscute. Dacă nu se face vreo altă mențiune, în toate considerațiile privind sistemul se admite că unitățile ce-l alcătuiesc sunt independente: ieșirea sau intrarea în funcțiune a unei unități nu influențează celelalte unități.

Studiul fiabilității unui sistem presupune mai întâi o analiză a “structurii” sistemului, prin care se stabilește dependența stării 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 component să fie în stare bună sau defect iar starea echipamentului (bun sau defect) depinde numai de starea componentelor;
- c) fiecare component al 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).

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).

3.3. Indicatori de fiabilitate

Indicatorii de fiabilitate sunt mărimi care exprimă, calitativ și cantitativ, fiabilitatea produselor. Indicatorii de fiabilitate mai sunt denumiți și parametri sau caracteristici de fiabilitate.

3.3.1. Probabilitatea de bună funcționare $p(t)$

Funcției de fiabilitate $R(t)$ îi corespunde expresia:

$$R(t) = p(t) = \Pr ob(t > T) \quad (3.1)$$

unde:

$p(t)$ - este probabilitatea de buna funcționare, adică însăși funcția de fiabilitate;

t - variabila de timp;

T - o limita precizată a duratei de bună funcționare.

Ca orice probabilitate, se înțelege că și funcția de fiabilitate va îndeplini condiția :

$$0 < p(t) < 1$$

adică: la $t=0$, $p(t)=1$ ceea ce înseamnă că produsul este în stare de funcționare la momentul începerii exploatării, după care scade după o anumita lege până la $p(t)=0$, teoretic la $t=\infty$, când produsul se afla în stare de nefuncționare.

$$\hat{R}(t_i) = \frac{N_0 - n}{N_0} \quad (3.2)$$

Pentru determinarea experimentală a funcției de fiabilitate $\hat{R}(t_i)$, se urmărește de-a lungul unei perioade de timp t_i , o populație statistică formată din N_0 produse identice, numărându-se cele "n" produse defecte.

3.3.2. Probabilitatea de defectare $F(t)$

Probabilitatea de defectare, sau funcția de defectare $F(t)$ se definește ca:

$$F(t) = \text{Pr ob}(t < T) \quad (3.3)$$

și reprezintă probabilitatea complementară în raport cu $R(t)$, putându-se scrie relația:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (3.4)$$

Reprezentarea grafică celor două funcții, de fiabilitate și de defectare este prezentată în figura 3.2.

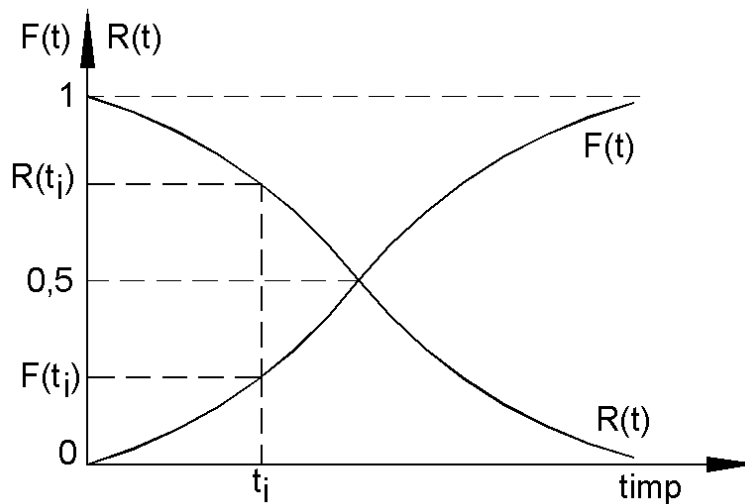


Fig. 3.2. Funcția de fiabilitate și cea de defectare

Pentru determinarea pe cale experimentală a indicatorului $F(t)$ se procedează la fel ca în cazul precedent:

$$\hat{F}(t_i) = 1 - \hat{R}(t_i) = \frac{n}{N_0} \quad (3.5)$$

3.3.3. Cuantila timpului de funcționare (t_F)

Timpul t_F , în care un produs funcționează cu probabilitatea $1-F$, se numește cuantila timpului de funcționare:

$$\text{Prob}(t \leq t_F) = F \quad (3.6)$$

3.3.4. Funcția de frecvență sau densitatea distribuției sau densitatea de probabilitate a căderilor $f(t)$

Acest indicator, exprima frecvența relativă a căderilor Δn_i , într-un interval de timp Δt_i :

$$\hat{f}(t_i) = \frac{\Delta n_i}{\Delta t_i N_0} \quad (3.7)$$

unde: $\Delta n_i = N(t) - N(t + \Delta t)$.

Reprezentarea grafică a funcției de frecvență se face pe baza datelor privind momentele de apariție a defectelor în funcție de legea de distribuție care guvernează procesul respectiv (fig.3.3).

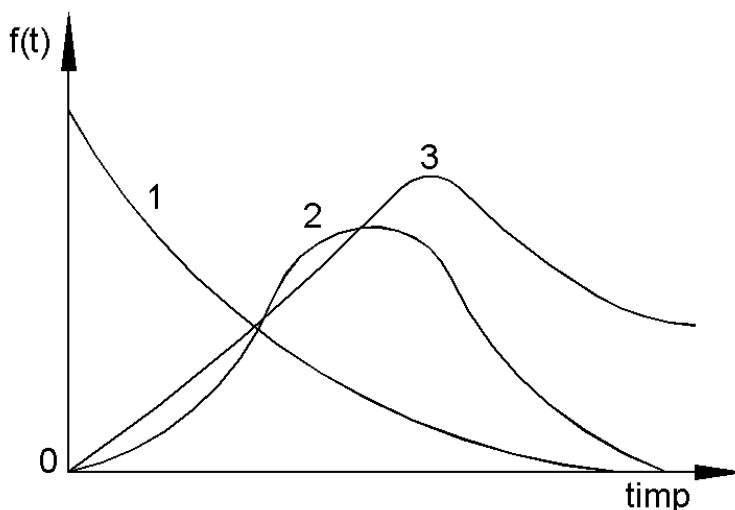


Fig. 3.3. Funcția de frecvență

Intre indicatorii de fiabilitate introduși până acum există următoarele relații:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \quad (3.8)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^\infty f(t)dt \quad (3.9)$$

3.3.5. Rata de defectare $z(t)$

Rata de defectare, sau intensitatea căderilor, se definește prin relația:

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.10)$$

Si acest indicator se poate determina experimental pentru un interval de timp Δt_i , în funcție de frecvența absolută a căderilor Δn_i :

$$\hat{z}(t_i) = \frac{\Delta n_i}{\Delta t_i \cdot N}$$

Dimensional, intensitatea căderilor se exprimă în h^{-1} .

Pentru foarte multe cazuri practice, funcția $z(t)$ se reprezintă ca în fig. 3.4, cunoscută și sub numele de formă de "cadă de baie".

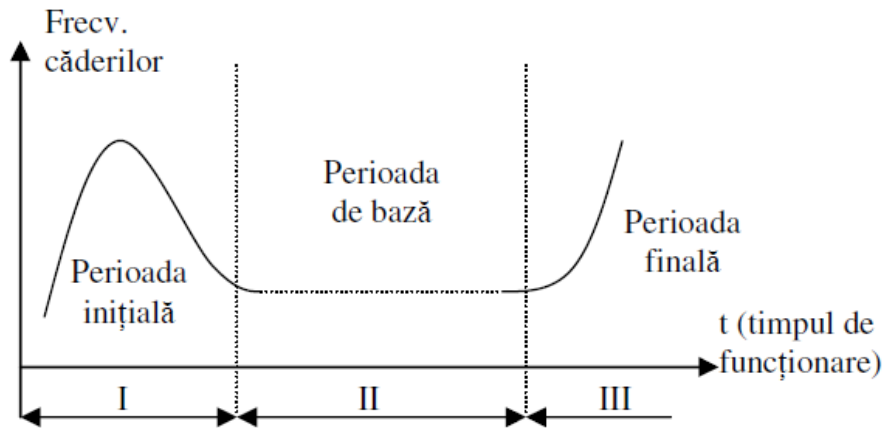


Fig. 3.4. Variația în timp a ratei de defectare

În fig.3.4. ,se deosebesc trei zone ale graficului $z(t)$:

- zona I, în care se manifestă căderile precoce, datorate unor cauze ascunse și deficiențelor de control de fabricație, durata $0-t_1$ numindu-se și perioada de rodaj;
- zona II, în care se manifestă căderile aleatorii, normale, reprezentând perioada de funcționare normală; în acest interval de timp (t_1-t_2), valoarea indicatorului $z(t)$ rămânând aproape constantă;
- zona III, în care se manifestă uzura sau îmbătrânirea materialelor constructive ale produsului considerat.

Ca urmare, intervalul $0-t_2$, reprezintă durata de viață utilă a produsului studiat.

Timpul mediu de bună funcționare - (MTBF)

Timpul mediu de bună funcționare, reprezintă media duratelor de bună funcționare pentru populația statistică ce a fost luată în considerație. Astfel din cele N_0 produse supuse observației, fiecare reprezintă o anumită durată de funcționare t_{Fi} , (fig.3.5).

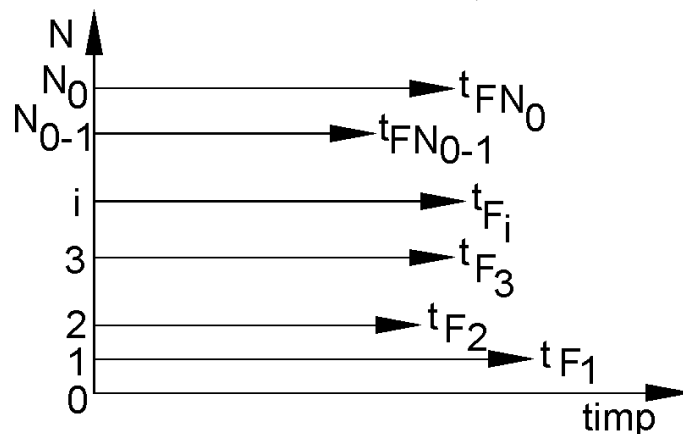


Fig. 3.5. Timpul mediu până la defectare

Media aritmetică a acestor timpi este dată de relația:

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_{Fi}}{N_0} \quad (3.11)$$

Din punct de vedere dimensional, MTBF se exprimă în ore. Dacă funcția de frecvență $f(t)$, este continuă atunci:

$$MTBF = m = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.12)$$

Tabelul 3.1. prezintă repartitia căderilor (defecțiunilor) în cazul unui experiment.

Tab. 3.1. Repartitia defecțiunilor (căderilor)

Interval de observare	Frecvența absolută a căderilor	Frecvența relativă a căderilor	Frecvența absolută cumulată a căderilor	Frecvența relativă cumulată a căderilor
t_0, t_1	k_1	k_1/N_0	k_1	k_1/N_0
\vdots				
t_{i-1}, t_i	k_i	k_i/N_0	$k_1+k_2+..k_i = \sum_1^i k_i$	$k_1/N_0+k_i/N_0 = \frac{\sum_1^i k_i}{N_0}$
t_{c-1}, t_c	k_c	k_c/N_0	$k_1+k_2+..k_c = N_0$	$\frac{\sum_1^c k_i}{N_0} = 1$
<u>Total</u> t_0, t_c	$\sum_{i=1}^c k_i = N_0$	$\sum = 1$	—	—

Tabelul a fost conceput în ipoteza că experimentul a durat până când toate cele N_0 produse supuse experimentării s-au defectat.

3.3.7. Dispersia (σ^2) și abaterea medie pătratică (σ)

Dispersia (σ^2) este indicatorul care exprima în (h^2) abaterea valorilor timpilor de bună funcționare față de media aritmetică a acestora:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - m)^2 f(t) dt \quad (3.13)$$

Abaterea medie pătratică (σ) exprima în (h), gradul de împrăștiere a timpilor de bună funcționare:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_0 - 1} \sum_{i=1}^{N_0} (t_i - m)^2} \quad (3.14)$$

Se remarcă faptul că, fiind dat sau determinat unul din cei patru indicatori de fiabilitate $R(t)$, $F(t)$, $f(t)$, $z(t)$, se pot deduce conform relațiilor din tabelul 3.2.

Tab. 3.2. Relații între indicatorii de fiabilitate

Nr. crt.	indicator	exprimat în funcție de indicatorul			
		F(t)	f(t)	R(t)	z(t)
1	F(t)	-	$\int_0^t f(t)dt$	$1 - R(t)$	$1 - \exp \left[- \int_0^t z(t)dt \right]$
2	f(t)	$\frac{dF(t)}{dt}$	-	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$z(t) \exp \left[- \int_0^t z(t)dt \right]$
3	R(t)	$1 - F(t)$	$\int_0^\infty f(t)dt$	-	$\exp \left[- \int_0^t z(t)dt \right]$
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	m	$\int_0^\infty [1 - F(t)] dt$	$\int_0^\infty t \cdot f(t)dt$	$\int_0^\infty R(t)dt$	$\int_0^\infty \exp \left[- \int_0^t z(t)dt \right] dt$

3.4. Limitele indicatorilor de fiabilitate

În mod curent, fiabilitatea produselor este exprimată prin indicatorul $z(t)$ sau prin MTFB.

Rata de defectare $z(t)$ se exprimă de obicei printr-un număr $x \cdot 10^{-6} h^{-1}$ iar timpul mediu de bună funcționare (MTBF) printr-un număr y de ore. Cifrele corespunzătoare provin din încercări de fiabilitate, organizate conform celor expuse. Dacă se cunoaște și legea de distribuție $f(t)$, atunci se pot determina și ceilalți indicatori de fiabilitate.

Totdeauna, pentru un anumit timp de lucru t , probabilitatea de bună funcționare $R(t)$ are o valoare mai mică decât 1, iar $z(t)$ are o valoare oricât de mică dar diferită de zero. Nu există produs care să prezinte $z(t) = 0$ și respectiv $R(t) = 1$, pentru un timp de lucru t dat. Un produs este cu atât mai bun, cu cât $R(t)$ are o valoare mai apropiată de 1 și respectiv $z(t)$ o valoare cât mai apropiată de zero.

Nivele cât mai ridicate de fiabilitate, respectiv indicatori cât mai buni în concepția de mai sus, nu se pot realiza în orice condiții și nici nu se justifică în orice împrejurare. Fiabilitatea superioară înseamnă, materiale și tehnologii perfecționate, studii și încercări aprofundate și îndelungate, în final costuri mai ridicate. De aceea trebuie corelat nivelul de fiabilitate cu cerințele tehnico-economice.

3.5. Legi de distribuție

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.

3.5.1. 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:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3.15)$$

unde: $m=MTBF$ are semnificația de la punctul 3.3.6 iar σ pe cea de la punctul 3.3.7, reprezentând parametrii distribuției normale .

Reprezentarea grafică a funcției $f(t)$ este data în fig.3.6 și se numește curba normală sau clopotul lui Gauss, cu valori maxime pentru $t=m=MTBF$.

Variația indicatorilor de fiabilitate este dată în fig.3.7, din care se remarcă faptul că această lege este valabilă pentru sfârșitul duratei de viață a produselor, adică zona III din fig.3.4.

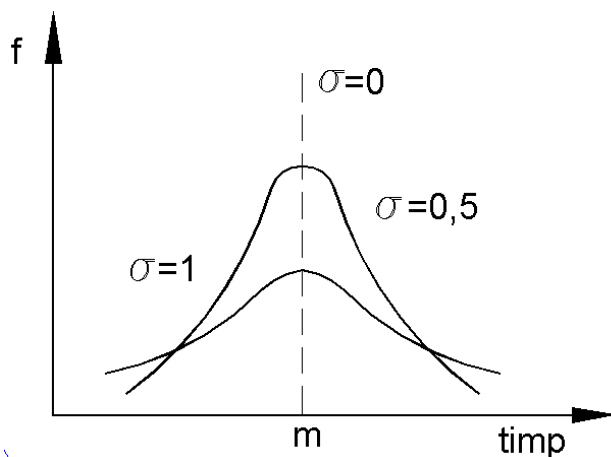


Fig.3.6. Reprezentarea grafică a funcției $f(t)$

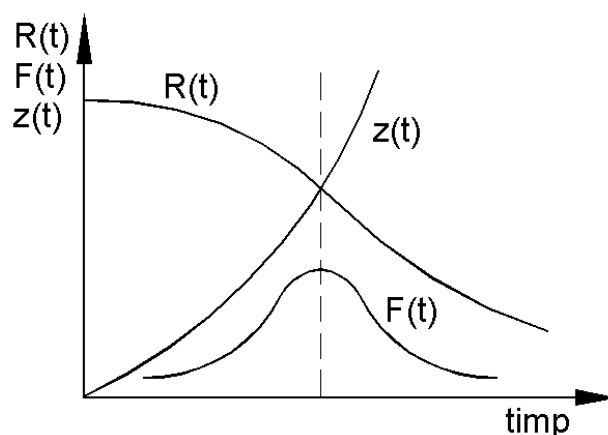


Fig.3.7. Variația indicatorilor de fiabilitate

3.5.2. Distribuția (negativ) exponențială

Această lege se caracterizează prin $z(t)=\text{constant} = \lambda$.

Funcția de frecvență are expresia:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (3.16)$$

Folosind relațiile din tabelul 3.1 se determină indicatorii de fiabilitate specifici acestei distribuții a timpilor de defectare:

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (3.17)$$

$$z(t) = \lambda \quad (3.18)$$

$$m = MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (3.19)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (3.20)$$

Graficele de variație a indicatorilor de fiabilitate sunt prezentate în fig.3.8, din care se vede că manifestarea acestei legi are loc pe durata vieții utile a produsului, adică zona II din fig.3.4.

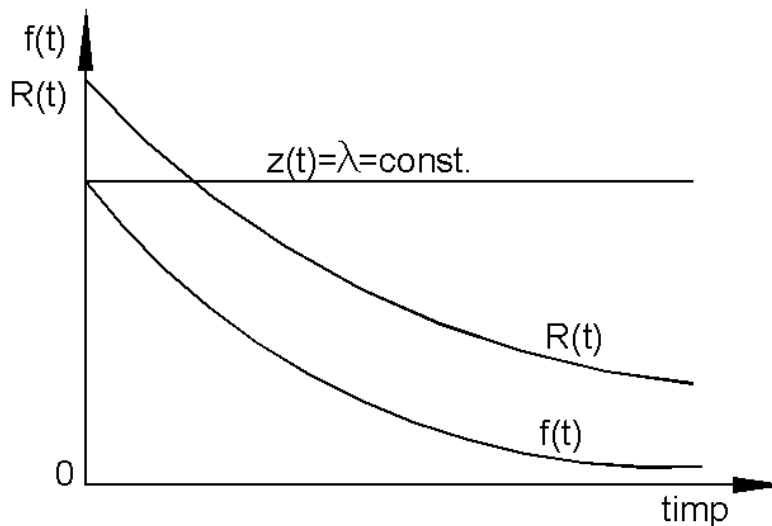


Fig. 3.8. Graficele de variație a indicatorilor de fiabilitate

3.5.3. Distribuția Weibull

Această distribuție are caracterul cel mai general și se utilizează acolo unde distribuția timpilor de defectare nu se supune nici legii normale și nici celei exponențiale. Expresia matematică a acestei legi este:

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t-t_0}{\theta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-t_0}{\theta} \right)^\beta \right] \quad (3.21)$$

sau:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3.22)$$

unde: β , θ , η și t_0 sunt parametrii distribuției Weibull și au următoarele semnificații: β - este parametrul de formă (reflectând nivelul procesului intim de degradare); θ - este parametrul de

scară; η - este viața caracteristică; t_0 - este parametrul de loc (exprimând durată minimă până la care nu se manifesta nici un defect).

Graficele de variație ale indicatorilor de fiabilitate sunt prezentate în fig.3.9.

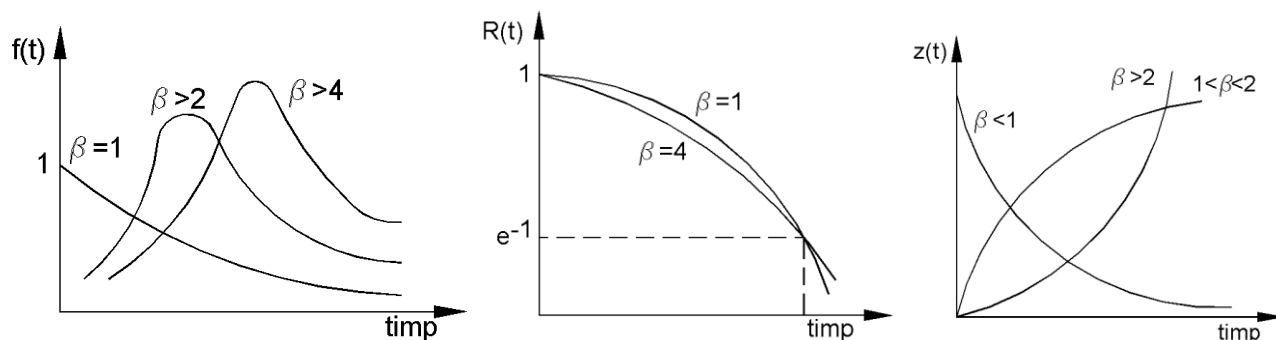


Fig.3.9. Graficele de variație a indicatorilor de fiabilitate în funcție de β

Pentru cele trei legi de distribuție prezentate în tabelul 3.3 se dau expresiile indicatorilor de fiabilitate.

Tab. 3.3. Expresiile indicatorilor de fiabilitate

Indicator de fiabilitate	Legea de distribuție		
	Normală	Exponențială	Weibull
$f(t)$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right]$	$\lambda \exp(-\lambda t)$	$\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^\beta}{\eta}\right]$
$R(t)$	$1 - \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right] dt$	$\exp(-t)$	$\exp\left[-\frac{(t-t_0)^\beta}{\eta}\right]$
$F(t)$	$\int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right] dt$	$1 - \exp(-t)$	$1 - \exp\left[-\frac{(t-t_0)^\beta}{\eta}\right]$
$z(t)$	$\frac{\int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right] dt}{1 - \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2\right] dt}$		$\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{\beta-1}$
MTBF	m	$\frac{1}{\lambda}$	$t_0 + \eta \int_0^\infty t^{1/\beta} \exp(-t) dt$
		$\frac{1}{\lambda^2}$	$\eta^2 \left[\int_0^\infty t^{2/\beta} \exp(-t) dt - \left(\int_0^\infty t^{1/\beta} \exp(-t) dt \right)^2 \right]$

3.6. Încercări de fiabilitate

Determinarea indicatorilor de fiabilitate ai unui produs se face în condiții de laborator, similar cu modul în care se determină statistic calitatea produselor.

În funcție de etapa în care se fac, încercările de fiabilitate sunt de două feluri :

- de determinare - care are ca scop, stabilirea valorii unui indicator de fiabilitate al unui produs nou aflat în faza de concepție și asimilare, nivelul acestui indicator de fiabilitate urmând a fi trecut în norma produsului;
- de conformitate - care are ca scop verificarea dacă valoarea unui indicator de fiabilitate al unui produs este sau nu conformă cu cea prescrisă prin norma produsului respectiv. Aceasta încercare se face în faza de fabricație curentă, la recepția loturilor de produse .

Încercările de laborator simulează în general, condițiile de exploatare (fig. 3.10a), având cel puțin pe durata inițială, o rezervă de rezistență suficientă (adică $R \gg S$), unde R este rezistența produsului la solicitarea S . De obicei însă, se recurge la o încercare de duranță în timpul căreia produsul funcționează în condiții particulare de solicitare, de-a lungul unei durate date cu o solicitare constantă $S = S_{\max} < R$ (fig. 3.10b).

Un alt tip de încercare este încercarea la oboseală (mecanică, termică, electrică), unde solicitarea are loc la o valoare $S > S_{\max}$, astfel încât rezerva de rezistență este minimă (fig. 3.10c), urmărindu-se prin aceasta punerea în evidență a elementelor slabe ale unui produs.

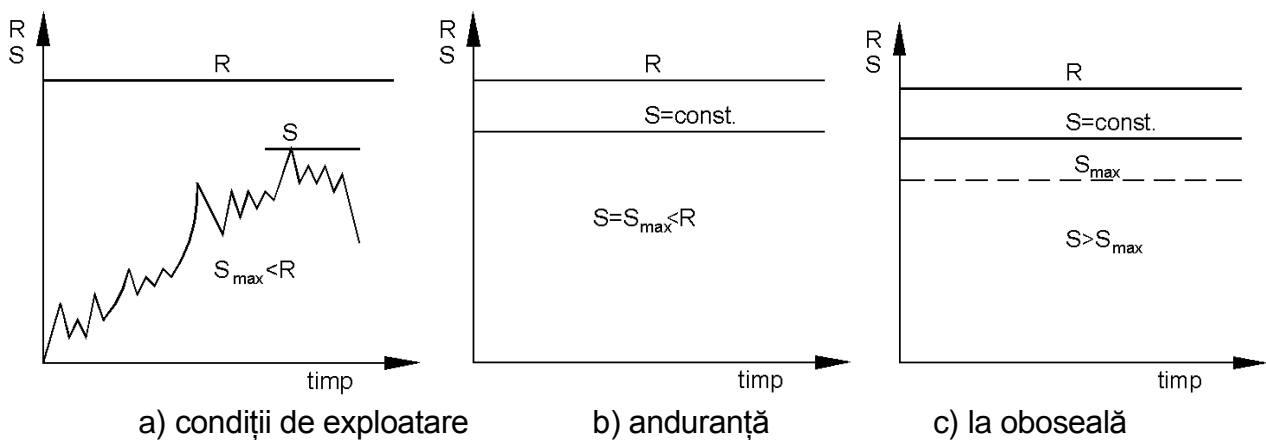


Fig. 3.10. Încercări de laborator

Încercările corecte de fiabilitate, au loc atunci când pot fi simulate, concomitent, toate solicitările care au loc în exploatarea produsului. De multe ori însă, acest lucru fiind greu de realizat în laborator, produsul este încercat succesiv, la diferiți factori, în standuri speciale: camere climatice pentru încercarea la temperaturi ridicate, scăzute, sau umiditate ridicată; standuri de vibrații, șocuri și zdruncinături; stand de încercare la tensiunea de străpungere; stand electric sau mecanic pentru verificarea funcționării de durată, etc.

Uneori, dat fiind faptul că multe produse sunt de bună calitate și prin urmare, aceste încercări de laborator devin costisitoare, defectiunile având loc după durate lungi de timp, se apelează la încercările accelerate, în cursul cărora nivelul ales al solicitărilor aplicate este peste cel fixat prin norma produsului. Pentru a fi validată, o încercare accelerată nu trebuie

să altereze legea fizică a mecanismului de defectare, respectiv caracterul legii de distribuție a timpilor de funcționare fără defectare.

Organizarea încercărilor de laborator se face pe loturi de produse identice, utilizând metodologia controlului statistic. Astfel dacă se studiază un lot de N_0 produse identice supuse încercărilor de fiabilitate și se notează timpii de defectare, se poate proceda în două feluri cu organizarea experimentului (fig.3.11):

- încercarea censurată - la care experimentul se oprește în momentul când din cele N_0 produse, care alcătuiesc eșantionul studiat, s-au defectat K produse, K fiind dinainte stabilit.
- încercarea trunchiată - la care experimentul se oprește după scurgerea unui anumit timp T , momentul T fiind dinainte stabilit.

Pentru ambele tipuri de încercări, pe lângă mărimea eșantionului (N_0), se mai precizează și dacă experimentul se face cu sau fără înlocuirea produselor defectate.

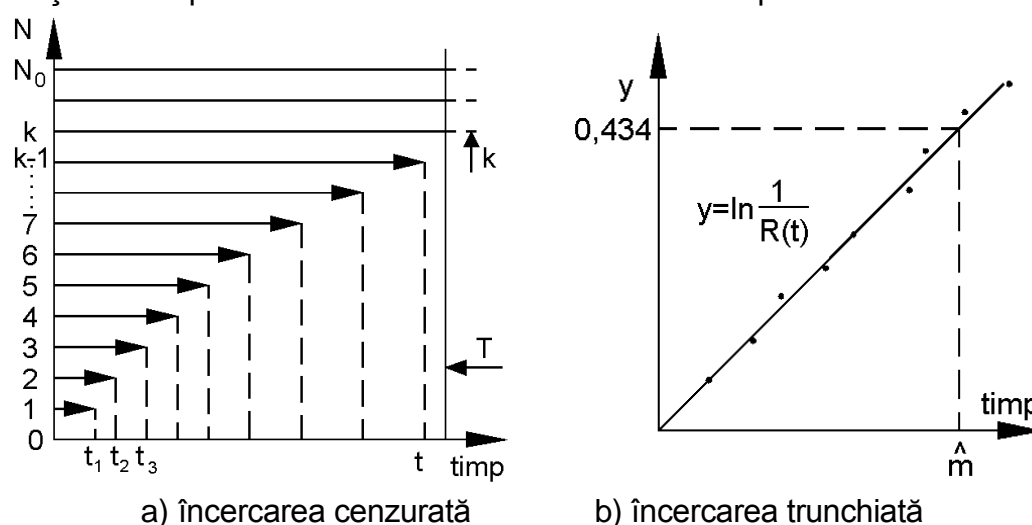


Fig. 3.11. Tipuri de încercări

3.7. Teste pentru identificarea legii de distribuție

După obținerea rezultatelor din experimente, se impune identificarea legii de distribuție care guvernează procesul respectiv.

3.7.1. Testul grafic exponențial

Pornind de la expresia probabilității de bună funcționare (3.17) în care se substituie relația (3.19), se ajunge la:

$$R(t) = \exp\left(-\frac{t}{m}\right) \quad (3.23)$$

Prin logaritmarea ecuației (3.23) se obține:

$$y = \ln\left[\frac{1}{R(t)}\right] = \frac{t}{m} \quad (3.24)$$

care reprezintă ecuația unei drepte, ce trece prin originea planului $y(t)$.

Dacă din datele experimentale punctele obținute sunt situate aproximativ de-a lungul unei drepte, fig. 3.11b, se poate considera că distribuția timpilor de defectare este exponențială; în caz contrar se renunță la această ipoteză.

3.7.2. Testul grafic normal

Acest test se realizează plecând de la expresia funcției de defectare $F(t)$ din cazul legării normale (tabelul 3.3). Dacă rezultatele obținute în urma experimentului sunt situate aproximativ de-a lungul unei drepte fixe într-un sistem de coordonate care are pe abscisă timpul iar pe ordonată (în coordonate logaritmice) procentajul cumulat de defectări (fig.3.12a), atunci procesul respectiv este supus unei legi de distribuție normale.

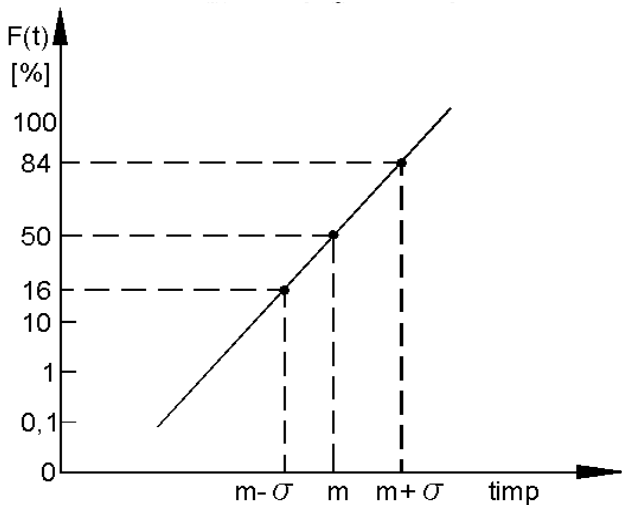


Fig. 3.12. Funcția de defectare pentru testul grafic

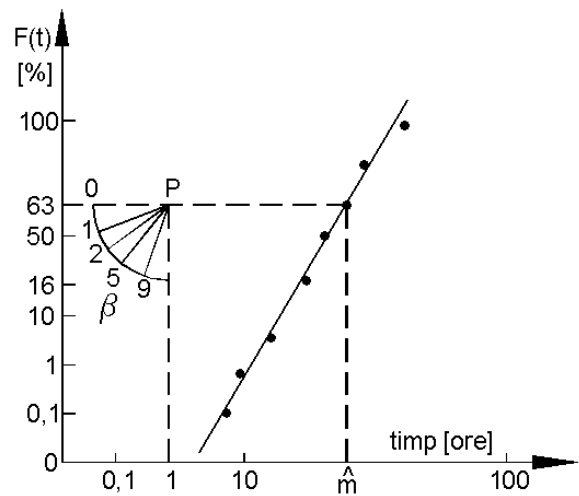


Fig. 3.13. Funcția de defectare testul Weibull

3.7.3. Testul grafic Weibull

Testul se realizează plecând de la relația (3.22), în care parametrul $t_0=0$:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3.25)$$

Prin inversare și dublă logaritmare relația (3.25) devine:

$$y = \ln \left(\ln \frac{1}{R(t)} \right) = \beta \ln t - \ln \eta \quad (3.26)$$

Din relația (3.26) se vede că pentru un β dat avem:

$$y = f(\ln t) \quad (3.27)$$

Ca urmare, graficul pentru probabilitatea în cazul testului grafic Weibull este dată în fig.3.13, unde: pe ordonata în coordonate logaritmice se fixează procentajul cumulat al defectelor, $\hat{F}(t)=1-\hat{R}(t)$, iar pe abscisa în coordonate logaritmice este fixat timpul de

defectare. Dacă punctele ce reprezintă rezultatele experimentale se figurează în sistemul de coordonate de mai sus și sunt aliniate aproximativ după o dreaptă, se poate concluziona că procesul de fiabilitate studiat se supune unei legi de distribuție de tip Weibull. Panta dreptei experimentale reprezintă valoarea parametrului de forma β și se citește cu ajutorul unei paralele dusa prin polul P al graficului. Intersecția paralelei la abscisă, dusă prin punctul corespunzător probabilității de defectare egală cu 0,63, cu dreapta experimentală, determină durata de viață caracteristică $\hat{\eta}$ pentru lotul de produse studiat.

3.8. Tipuri de fiabilitate

În funcție de modul de determinare, fiabilitatea poate fi de trei feluri:

- Fiabilitate previzională - se calculează pe baza unui model matematic, plecând de la datele proiectului și fiabilitatea cunoscută a elementelor componente ale sistemului, ținând cont de regimurile de funcționare și condițiile de exploatare.
- Fiabilitate experimentală - determinată prin măsurători și încercări de laborator, pe mai multe exemplare identice puse în funcțiune.
- Fiabilitatea operațională - determinată pe baza prelucrării datelor obținute din exploatare, adică pe baza urmăririi în exploatare a mai multor exemplare identice, pe o perioadă determinată de timp.

3.9. Mentenabilitatea și indicatorii acesteia

Prezentarea noțiunilor din capitolul de față s-a referit la produsele cu funcție unică (simplă), la care defectarea constituie și finalul duratei lor de viață. Aceste concepte se pot aplica și la produse complexe, la care elementele defecte pot fi înlocuite cu altele noi, produsele au caracter reparabil și sunt denumite cu funcție repetată sau sisteme cu reînnoire (restabilire).

Ansamblul tuturor acțiunilor tehnico-organizatorice necesare, efectuate în scopul menținerii sau restabilirii unui produs în starea de îndeplinire a funcției curente, poartă numele de mentenanță. Deosebim următoarele tipuri de mentenanță:

- mentenanța reactivă - care are ca scop, depistarea naturii și cauzelor unei defecțiuni, repararea defectului prin înlocuirea completă sau parțială a unuia sau mai multor elemente ce au reprezentat sediul defecțiunii, verificarea corectitudinii operațiunilor de mentenanță întreprinse;
- mentenanța preventivă - care constă din lucrări de revizie, reglaje, verificări și reparații planificate, executate în vederea evitării unor viitoare defecțiuni inerente;
- mentenanța predictivă - este un concept nou care elimină chiar unele neajunsuri introduse de mentenanța preventivă, prin repetatele intervenții efectuate asupra produselor sau elementelor componente ale acestora, verificarea stării în care se afla sistemul făcându-se ON-LINE, prin tehnici avansate, iar la sistemele foarte importante

făcându-se chiar monitorizare permanentă. Personalul și baza materială, necesare acestor acțiuni, constituie suportul mentenanței.

- mentenabilitatea corectivă (practica), reprezintă aptitudinea unui produs ca în condiții date de utilizare, să fie menținut sau restabilit, în stare de a-și îndeplini funcția specificată, atunci când acțiunile de mentenanță se efectuează în condiții precizate și într-un timp dat, cu procedee și remedieri prescrise. Exprimarea cantitativă a acestui concept se face ca și în cazul fiabilității, printr-o probabilitate:

$$M(t_r) = \text{Prob}(t_r \leq T_r) \quad (3.28)$$

unde: t_r - este timpul de restabilire; T_r - este o limita impusă duratei de restabilire; $M(t_r)$ - este funcția de mentenabilitate.

Ca și fiabilitatea, mentenabilitatea se creează încă în procesul de concepție al produselor, între problemele care trebuie să-și găsească soluționarea, cu prilejul studiilor de model, cele mai importante fiind:

- asigurarea accesibilității, adică crearea posibilității de montare - demontare a oricărui element component și măsurare direct pe produs a unor mărimi fizice, în condiții de timp și efort minim;
- determinarea defecțiunilor tipice care pot avea loc, modul și mijloacele de înlăturare rapidă a acestora;
- asigurarea unui timp minimal de remediere a oricărei defecțiuni.

Trebuie avute de asemenea în vedere efectele economice ale acțiunilor de mentenanță, în sensul ca acestea să fie realizate cu costuri cât mai mici și în timp cât mai scurt care să nu micșoreze capacitatea de producție. După cum se observă, mentenabilitatea este o însușire a produselor și se referă la perioada de exploatare propriu-zisă a unui sistem, respectiv la modul de exploatare și menținerea acestuia în stare de funcționare, în strânsă conexiune cu fiabilitatea.

Pe lângă funcția de mentenabilitate $M(t_r)$, mentenabilitatea se caracterizează și cu alți indicatori de mentenabilitate, cum ar fi:

- rata (intensitatea) reparației - $\mu(t_r)$ - și atunci funcția de mentenabilitate are expresia:

$$m(t_r) = M(t_r) = 1 - \exp\left[-\int_0^{t_r} \mu(t_r) dt_r\right] \quad (3.29)$$

- media timpilor de reparație - MTR - care corespunde indicatorului MTBF al fiabilității și care are expresia:

$$MTR = \frac{n_1 \lambda_1 t_{1r} + n_2 \lambda_2 t_{2r} + \dots + n_k \lambda_k t_{kr}}{n_1 \lambda_1 + n_2 \lambda_2 + \dots + n_k \lambda_k} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i t_{ir}}{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i} \quad (3.30)$$

unde:

- n_i - este numărul de componente de același tip;
- λ_i - este rata de defectare a componentelor de tip i ;
- t_{ir} - este timpul mediu apreciat pentru înlăturarea defectării unei componente din grupul n_i ;
- $(n\lambda)_i$ - este numărul mediu orar de defecte pentru grupul de elemente n_i ;
- k - este numărul de grupe distincte de elemente componente ale unui sistem.

În cazul unui experiment, sau pe bază de observații în exploatare, dacă se consemnează de-a lungul unei perioade de timp, un șir t_{ri} de timpi de restabilire observați referitori la un număr n de acțiuni de mentenanță, valoarea estimată a MTR va fi:

$$MTR = \frac{t_{r1} + t_{r2} + \dots + t_{rn}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ri}}{n} \quad (3.31)$$

Admițând ca media timpilor de restabilire, urmează o lege de distribuție exponențială, atunci:

$$\mu(t_r) = \text{const} = \mu \quad (3.32)$$

și

$$MTR = \frac{1}{\mu} \quad (3.33)$$

iar relația (3.29) devine:

$$M(t_r) = 1 - \exp\left(-\frac{t_r}{MTR}\right) = 1 - \exp(-\mu \cdot t_r) \quad (3.34)$$

3.10. Sistemul de mentenanță după necesitate, pe baza de diagnostic

În scopul realizării unui nivel înalt de fiabilitate și a unei disponibilități optime a produselor realizate, se apreciază că există două sisteme de mentenanță: preventivă și corectivă. *Mentenanța preventivă* este clasificată în trei categorii: sistematică, condițională și previzionară, iar cea *corectivă* în două categorii: curativă și paliativă, [29]. Mentenanța după necesitate face parte din mentenanța corectivă; ea se mai numește și mentenanța paliativă și constă din activități de mentenanță corectivă destinate a permite unui mijloc de producție îndeplinirea integrală sau parțială a funcțiilor sale. Așadar, această categorie de mentenanță trebuie continuată cu lucrări de mentenanță curativă.

Din practica exploatarea mașinilor complexe a reieșit faptul că, se impune alegerea unui sistem mixt de mentenanță care să conțină atât lucrări (operațiuni) de mentenanță preventivă cât și corectivă.

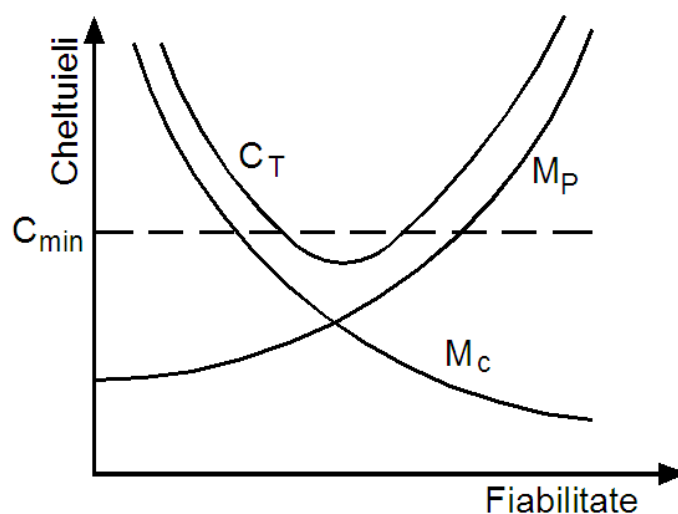


Fig. 3.14. Cheltuieli totale (C_T) de mentenanță

Acest nou sistem a rezultat din necesitatea reducerii cheltuielilor totale de mentenanță (C_T) spre costurile minime (C_{min}) dar cu menținerea unui *nivel de fiabilitate* acceptabil, *figura 3.3*.

Conform graficului din *figura 3.14*, cu cât volumul lucrărilor de mentenanță preventivă (M_p) și cheltuielile aferente sunt mai mari, cu atât crește nivelul fiabilității și disponibilității produselor tehnice. Totuși, oricât ar crește cheltuielile pentru mentenanța preventivă (M_p), nu se va ajunge niciodată la valoarea de 100% a funcției de fiabilitate $R(t)$. Se poate observa că, pentru un asemenea nivel de fiabilitate, cheltuielile tind în mod asimptotic spre ∞ . Așadar, nu este rațional să se exagereze cu aplicarea unui volum prea mare de lucrări de mentenanță preventivă în detrimentul mentenanței corective (M_C).

Din aceeași figură rezultă că, pe măsură ce scad cheltuielile pentru mentenanța preventivă, cresc cele destinate mentenanței corective. Dacă se adună costurile corespunzătoare celor două categorii de mentenanță rezultă curba cheltuielilor totale (C_T) de mentenanță. O politică rațională în acest domeniu ne obligă să reducem cheltuielile totale de mentenanță. Din graficul prezentat rezultă că, dacă se micșorează cheltuielile totale de mentenanță și în primul rând cele corespunzătoare mentenanței preventive, fiabilitatea produselor scade în mod continuu. Ca urmare, este normal să se accepte o reducere a valorilor indicatorilor de fiabilitate până când se ajunge la cheltuielile minime (C_{min}) de mentenanță. În continuare, nu mai este rațională reducerea cheltuielilor de mentenanță preventivă deoarece, în acest caz, ar începe să crească cheltuielile pentru mentenanța corectivă și, implicit, cheltuielile totale de mentenanță. În același timp, ar continua să scadă fiabilitatea produselor tehnice, așa cum relevă graficele din *figura 3.14*, [29]. Cheltuielile de mentenanță corectivă și preventivă, precum și cheltuielile totale pe întreg ciclul de viață a produsului, trebuie urmărite și precizate încă din primele faze de cercetare – proiectare pentru a se ajunge la cheltuieli minime.

Revenind la aplicarea sistemului de mentenanță după necesitate, pe baza de diagnostic, trebuie să precizăm faptul că, din experiența diagnosticării tehnice s-a constatat inexistența unei metode de *evaluare și predicție* a timpului probabil de funcționare fără defectarea unui produs, bazată pe analiza rezultatelor diagnosticării acestuia. Aceasta disfuncție în determinarea perioadei până la apariția primei defecțiuni se datorează faptului că, metoda de prezicere se bazează pe ipoteza absenței defectelor instalate, iar după instalarea acestora, pe ipoteza existenței datelor statistice a mediei timpilor de bună funcționare pentru fiecare defect în parte și pentru fiecare subansamblu din compunerea structurilor respective. Stabilirea cu precizie a perioadei optime de diagnosticare reprezintă o problemă ce trebuie rezolvată. S-a încercat determinarea valorilor admisibile și limită ai parametrilor de diagnosticare și ai celor de funcționare a diferitelor ansambluri de produse pe baza anumitor criterii (tehnic, tehnologic sau funcțional, economic, al siguranței în funcționare, etc.). Toate aceste criterii ridică anumite probleme. Astfel, criteriul tehnic presupune determinarea valorilor limită ale parametrilor menționați, bazându-se pe date statistice și pe măsurarea efectivă a unui anumit parametru. Ca urmare, dificultatea determinării perioadei optime de diagnosticare și a timpului probabil la care se va produce defecțiunea se explică prin faptul că este dificil de creat o bază de date despre tipul, pericolozitatea și intensitatea tuturor defectărilor la toate piesele și componentele ce fac parte dintr-un ansamblu.

3.11. Aplicații la fiabilitatea și mentenabilitatea sistemelor

Dacă notăm cu R fiabilitatea unui sistem (probabilitatea de supraviețuire) și cu F probabilitatea de apariție a unei defecțiuni oarecare a sistemului, vom avea: $R+F=1$.

3.11.1 Sisteme în serie

Un sistem este de *tip serie* dacă funcționarea sa necesită funcționarea tuturor celor n subansamble ale sale (sistemul va fi în defect dacă un singur element este defect), fig. 3.15. Fie A_i evenimentul conform căruia "elementul i funcționează", $i=1 \div n$. Rezultă că fiabilitatea sistemului sau probabilitatea de funcționare a acestuia va fi dată de probabilitatea ca fiecare element al său să funcționeze:

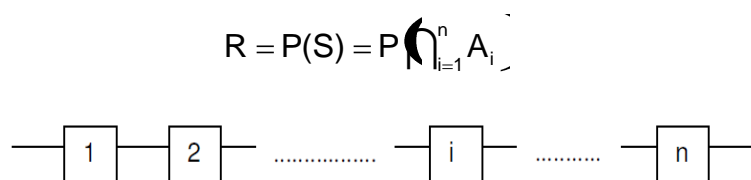


Fig.3.15. Sistem serie

Dacă evenimentele A_i sunt independente, asta înseamnă că buna funcționare a elementului i nu depinde de starea lui j (adică defectarea lui j nu conduce la defectarea lui i) iar regula probabilității compuse conduce la:

$$R=P(\cap A_i)=P(A_1)P(A_2).....P(A_n),$$

deci:

$$R = P\left(\bigcap_{i=1}^n A_i\right) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \dots \cdot P(A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i) = \prod_{i=1}^n R_i$$

unde $R_i=P_i$.

Cum $R_i < 1$, oricare ar fi i , rezultă $R < R_i$ minim, ceea ce înseamnă că fiabilitatea unui astfel de sistem este totdeauna inferioară celei ale componentei cu fiabilitatea cea mai redusă.

3.11.2 Sisteme în paralel

Un sistem este de *tip paralel* dacă funcționarea unei singure componente este suficientă pentru funcționarea sistemului, figura 3.16. În acest caz, sistemul va fi defect dacă toate elementele sale sunt defecte. Cum S reprezintă evenimentul *sistemul funcționează*, vom spune că \bar{S} reprezintă evenimentul *sistemul nu funcționează*. Vom avea:

$$\bar{S} = \bigcap_{i=1}^n \bar{A}_i$$

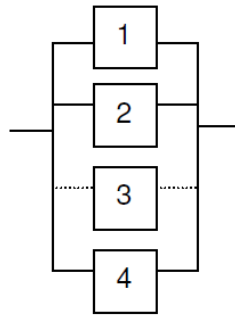


Fig. 3.16. Sistem paralel

Rezultă că probabilitatea de supraviețuire R la un moment dat va fi:

$$R = 1 - F = 1 - P(\bar{S}) = 1 - P\left(\bigcap_{i=1}^n \bar{A}_i\right)$$

Dacă evenimentele A_i (și \bar{A}_i) sunt independente, rezultă:

$$R = 1 - P(\bar{A}_1) \cdot P(\bar{A}_2) \cdot \dots \cdot P(\bar{A}_n) = 1 - \prod_{i=1}^n P(\bar{A}_i)$$

sau:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n F_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Ca urmare, expresia funcției de fiabilitate va fi:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Un astfel de sistem se numește redundant (montaj redundant), iar probabilitatea de funcționare satisface relația: $R > R_i$, oricare ar fi i , adică fiabilitatea unui astfel de sistem este mai mare decât fiabilitatea elementului celui mai fiabil.

3.11.3 Sisteme mixte

Putem avea două situații:

a) În cazul unor astfel de sisteme montajul poate cuprinde de m ori în paralel n elemente în serie, figura 3.17.

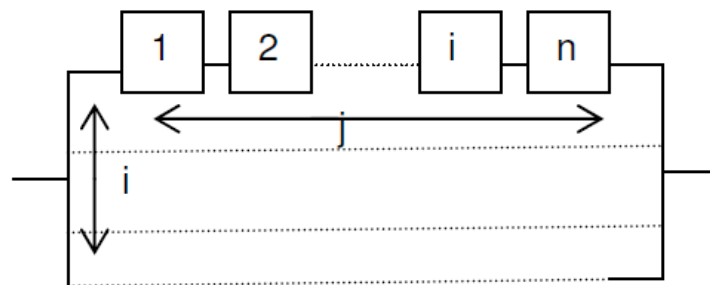


Fig. 3.17. Sistem mixt

În acest caz, fiabilitatea seriei i va fi:

$$R_i = P\left(\bigcap_{j=1}^n S_{ij}\right)$$

unde S_{ij} este evenimentul de tipul: elementul j al liniei i funcționează. Cu aceasta, fiabilitatea ansamblului va fi:

$$R = 1 - P\left(\bigcap_{i=1}^m \bar{S}_i\right)$$

unde \bar{S}_i reprezintă evenimentul de tipul: seria i nu funcționează.

Dacă cele $(m \cdot n)$ evenimente elementare sunt independente vom avea:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_i) = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \prod_{j=1}^n R_{ij}\right)$$

b) Un sistem mixt poate cuprinde ansambluri paralele dispuse în serie, adică, de n ori înseriate m elemente în paralel, figura 3.18.

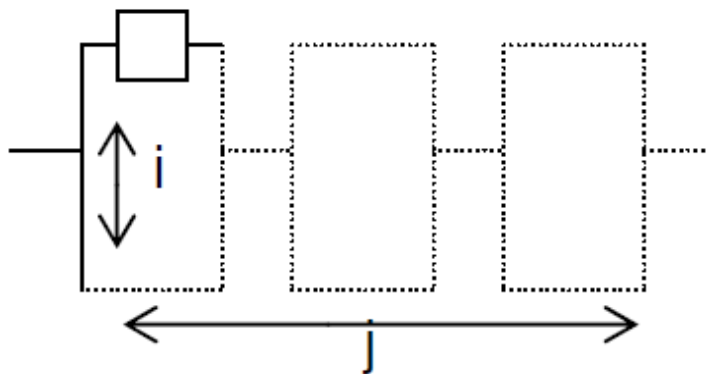


Fig. 3.18. Sistem mixt

Fiabilitatea subansamblului paralel j va fi:

$$R_j = 1 - P\left(\bigcap_{i=1}^m \bar{S}_{ij}\right)$$

unde \bar{S}_{ij} este evenimentul de tipul: elementul i al coloanei j nu funcționează. În acest caz, fiabilitatea ansamblului este dată de relația:

$$R = P\left(\bigcap_{j=1}^n S_j\right)$$

unde S_j este evenimentul de tipul: ansamblul j funcționează. Dacă cele $(m \cdot n)$ evenimente sunt independente rezultă:

$$R = \prod_{j=1}^n R_j = \prod_{j=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_{ij})\right)$$

unde R_{ij} este probabilitatea de funcționare a elementului i din coloana j.

3.12. 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.

O caracteristică comună a tuturor tehnicilor NDE este 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 elementului component;
- 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.

3.12.1. Probabilitatea detectării fisurii (POD)

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 POD, capacitatea unei tehnici NDE se exprimă în termeni probabilistici, *figura 3.19*.

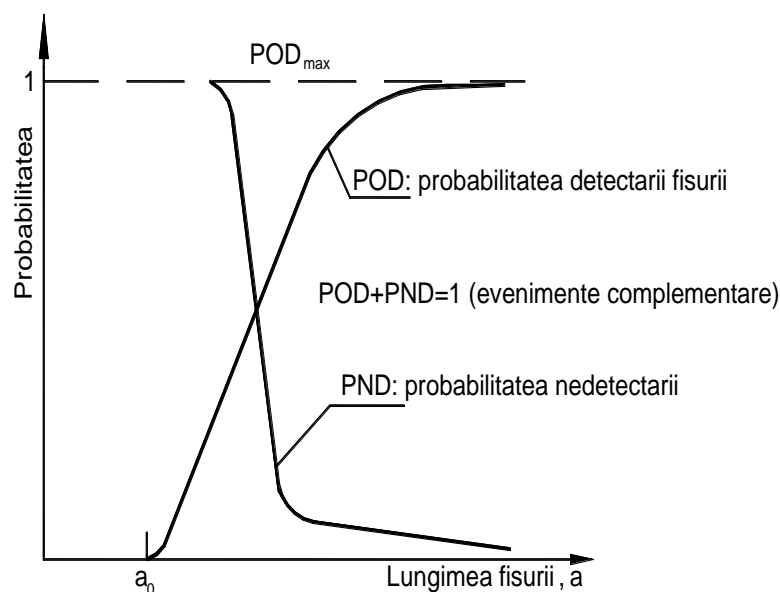


Fig. 3.19. Probabilitatea detectării fisurii

Variația POD-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 POD crește o dată cu dimensiunea defectului.

Curba POD atinge în final o valoare maximă POD_{max} unde nedetectarea este guvernată de alți factori cum ar fi eroarea umană, (fiabilitatea umană) care domină procesul de detectare.

Creșterea POD 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 POD ridicată, și o tehnică NDE de încredere ar trebui să aibă o acuratețe corespunzătoare de determinare a dimensiunii. 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.

POD și PND reprezintă probabilități legate de evenimente complementare (exclusiv reciproc).

POD poate fi estimată doar prin intermediul experimentelor NDT planificate statistic pe epruvete (probe) ce conțin defecte de dimensiune cunoscută.

Metodele statistice folosite pentru estimarea POD sunt:

- procesarea datelor Reușită/Eșec;
- procesarea datelor sub formă de răspunsuri-semnal corelate cu dimensiunea fisurii;
- analiza probabilității maxime dintre parametrii funcției POD;
- incertitudinea estimată prin limite de încredere inferioare (CB - conservatoare) pentru POD.

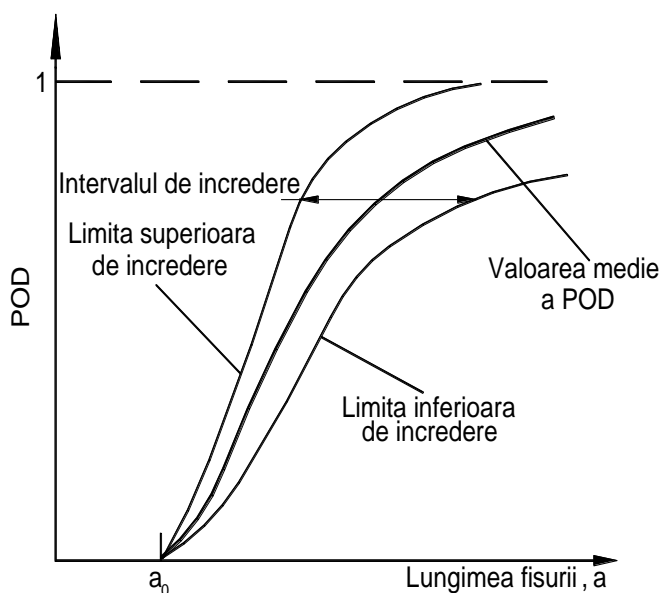


Fig. 3.20. Exemplu: CB 97,5% inferioară la curba POD pentru 95% interval de încredere.

Metodele Bootstrap (eșantionare prin simulare pe calculator) sunt foarte eficiente pentru stabilirea intervalelor de încredere parametrice și neparametrice ale POD 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 3.21.

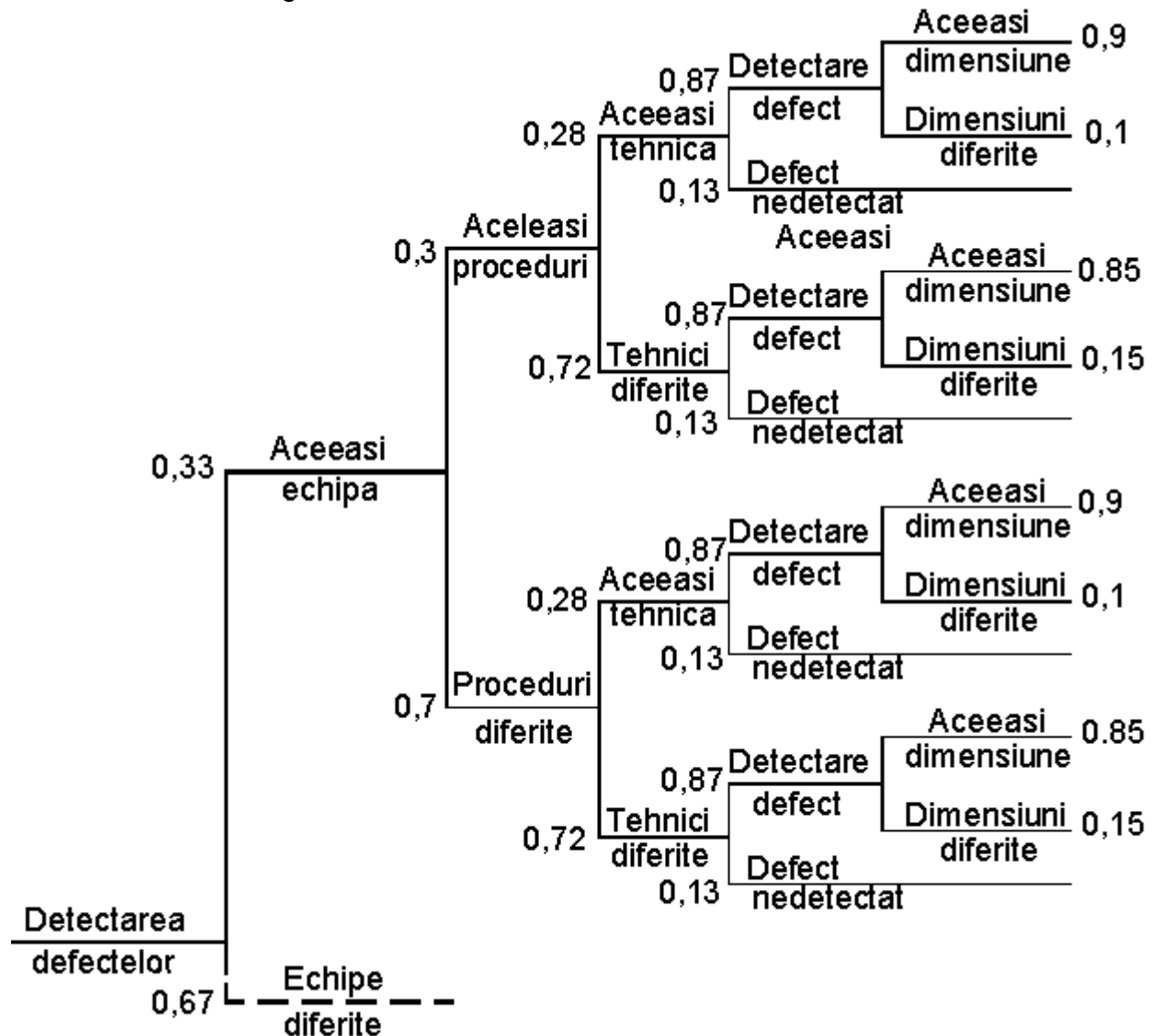


Fig. 3.21. Arbore de evenimente pentru examinări nedistructive

Evaluarea optimistă a avantajului NDE repetat

- La prima examinare, probabilitatea de reușită este POD iar probabilitatea de a nu detecta defectele este (1-POD).

- După n inspecții, probabilitatea de reușită este: $POD_n = 1 - (1 - POD)^n$, 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 evaluat prin probabilitatea maximă de detectare în inspecțiile individuale.

$$POD_n = \text{Max}(POD_1, POD_2, \dots, POD_n)$$

Exemplu: Se consideră patru NDE-uri succesive cu probabilități de 35%, 75%, 88% și 57%.

Cel mai optimist POD, după patru inspecții este:

$$POD_n = 1 - (1 - 0,65)(1 - 0,75)(1 - 0,88)(1 - 0,57) = 0,995485, \text{ mai exact } 99,5\%.$$

Cel mai pesimist este: $POD_n = 88\%$.

Ca urmare POD_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.

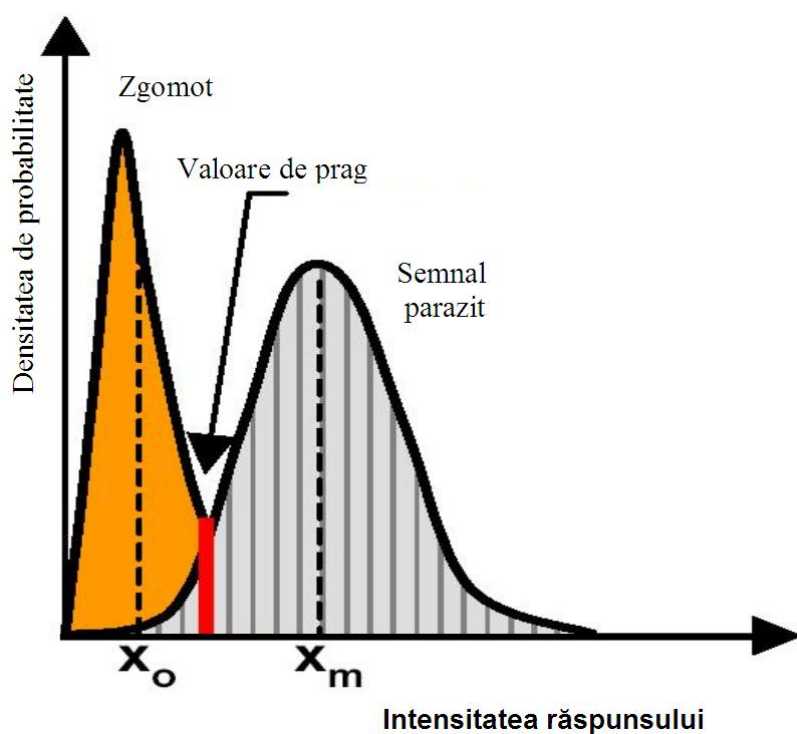
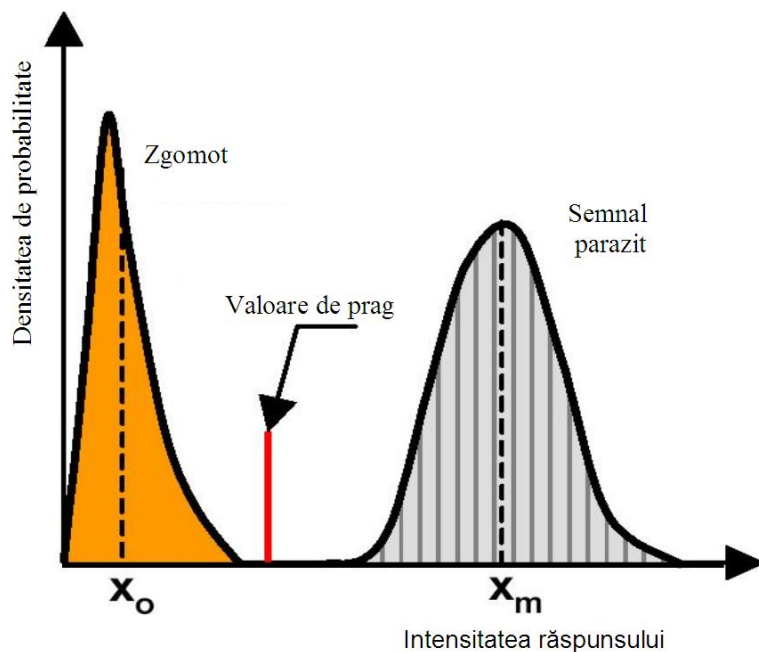
Legătura pozitivă dintre răspunsul NDE și funcționalitatea și fiabilitatea structurală a sistemului este, în principal, funcție de:

- calibrare;
- criterii de acceptare;
- accesibilitatea inspecției;
- condițiile de suprafață;
- materialul de inspecție;
- compatibilitatea;
- mediul de inspecție;
- specificații/proceduri NDE directe;
- calificări operatori;
- organizarea muncii și disciplină, motivație, etc.

O înțelegere primară a *ingineriei NDE*, presiunile economice și sociale pentru a rezolva sistemele tehnologice cu probleme și atitudinea și practica sistemelor legate, poate conduce la un optimism excesiv și la o relație negativă dintre 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, structurale granulare, tensiunile remanente, etc.;
- semnalele pozitive de la sursele nerelevante generează un "zgomot" inerent specific NDE aplicat.



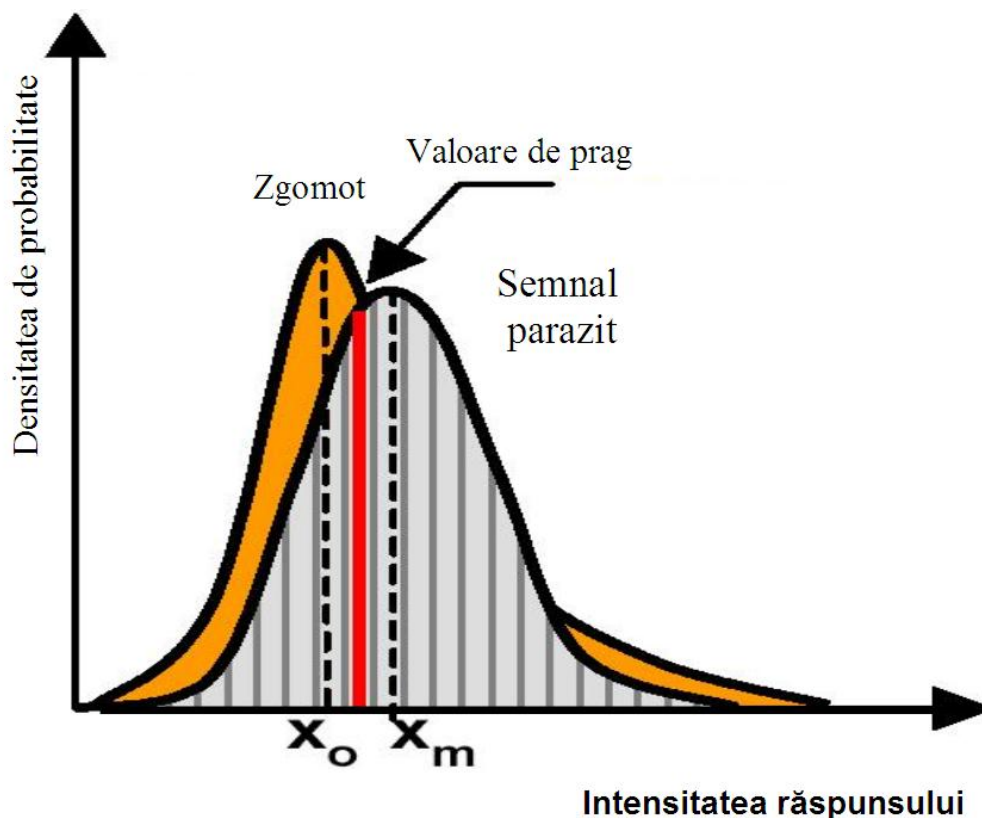


Fig. 3.24. Defecte mici

Discriminarea semnalelor de ieșire NDE trebuie derivate din acele semnale care trec pragul zgomotului de aplicare.

Raportul semnal - zgomot (de ex. $STN = x_m/x_0$) este o măsură a calității unei proceduri NDE.

Procedurile standard pentru STN 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.).

3.12.2. 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.

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.

		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. 3.25. Procesul de luare a deciziilor

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.

3.12.3. Probabilități condiționale în procesul de discriminare prin NDE

Probabilitatea observațiilor pozitive adevărate $P(D,d)$ se identifică cu probabilitatea detectării, **POD**:

$$POD = P(D,d) = \frac{M(D,d)}{M(D,d) + M(N,d)} \text{ sau } \frac{\text{Numarul apelurilor pozitive reale}}{\text{Numrul defectelor}}$$

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 POD

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. POD se calculează funcție de dimensiunea fisurii cu formula de mai sus. Evaluarea POD este o întreprindere lungă și costisitoare. Noi tendințe sunt reprezentate de simularea POD pe computer. PAF sau rata apelurilor false nu se reflectă în curbele POD. Ea trebuie înregistrată separat și folosită ca supliment în evaluarea calității procedurilor NDE.

3.12.4. Curbele ROC (caracteristici operaționale relative)

Datele necesare pentru formarea curbelor ROC sunt datele POD și PAF la o anumită dimensiune a fisurii, *a*.

POD (evaluarea pozitivă reală) este evaluată ca opusul lui PAF (evaluare pozitivă falsă) la o anumită dimensiune a fisurii, *a*. De regulă, dimensiunea fisurii este fixată la limita critică de prag a procedurii NDE.

Performanța ridicată a operatorului pentru o anumită procedură NDE se vede atunci când se obțin POD ridicate și PAF scăzute. În aceste condiții se realizează graficul pentru o curbă ROC dorită (țintă). Procedura se repetă pentru diferiți operatori și se estimează POD și PAF. Performanța celor mai calificați operatori ajunge aproape de partea superioară - stângă a graficului ROC (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 ROC este legată de discriminarea independentă de procesul NDE, mai exact reprezintă linia unei presupuneri total aleatoare.

3.12.5. 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:

a) Pragul de acceptare se plasează prea sus; unele defecte nu se vor observa; POD este redusă;

b) Pragul de acceptare se plasează prea jos; numărul de respingeri va crește și vor rezulta alarme false; PAF este crescută și se vor respinge părți bune;

c) Pragul de acceptare se plasează la un nivel corespunzător; va rezulta discriminarea clară.

Influența plasării pragului de acceptare (discriminare) la riscul de cedare se poate face prin analiza sensibilității.

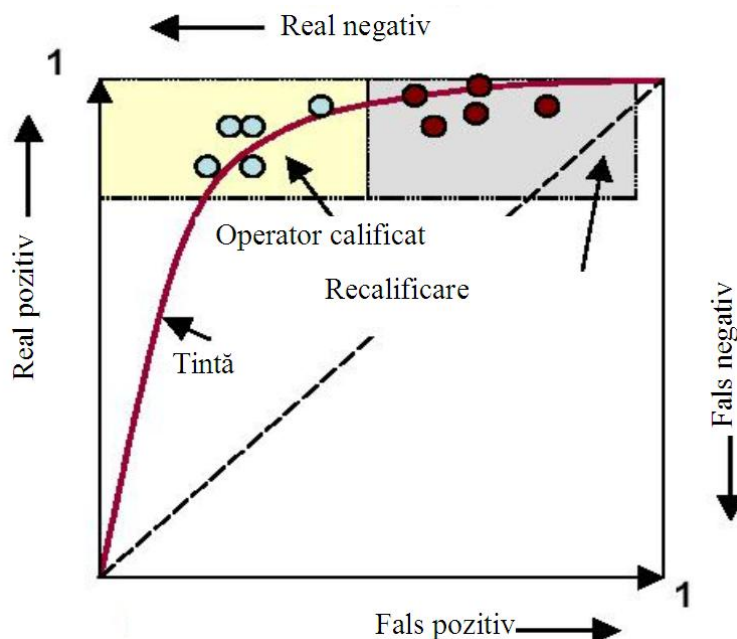
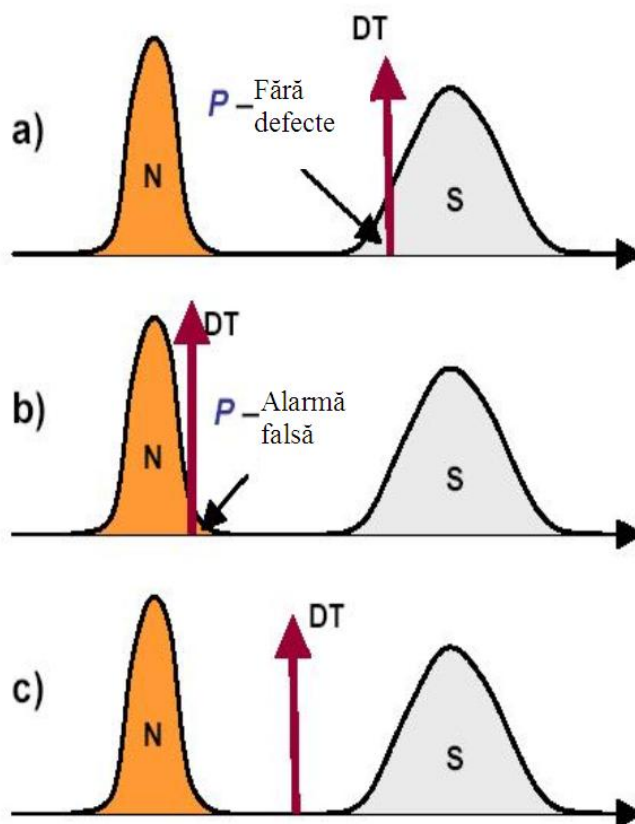


Fig. 3.26. Reprezentarea ROC



Intensitatea semnalului de răspuns
N – zgomot; S – semnal; DT – prag de discriminare

Fig. 3.25. Influența pragului de acceptare

3.12.6. Factorul 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. Gheorghe ILIE, Securitatea proceselor și calitatea vieții - Managementul riscului, <http://www.revista-alarma.ro/pdf/Managementul%20riscului.pdf>.
2. ILIE, GHEORGHE; URDĂREANU, TIBERIU – Securitatea deplină, Editura UTI, Bucuresti, 2001.
3. ILIE, GHEORGHE; STOIAN, ION; CIOBANU VIOREL – Securitatea informațiilor, Editura Militară, Bucuresti, 1996.
4. 5URDĂREANU, TIBERIU; ILIE, GHEORGHE; BLAHA, MIRCEA – Securitatea instituțiilor financiar-bancare, Editura UTI