

FIABILITATEA SISTEMELOR MECATRONICE

An I ICMR

2019

Scurt istoric

- în epoca modernă (sec. XVIII - XIX) natura conceptelor despre siguranța în funcționare era cvasiempirică
- în epoca contemporană (sec. XX - XXI) fiabilitatea se bazează pe concepte strict științifice. Inițial, produselor li se asociau caracteristici care se puteau controla, după ce acestea erau realizate (și se probau, în special, la vânzare). Mai târziu s-a pus un accent tot mai pronunțat pe prevenirea defecțiunilor și pe exprimarea cantitativă a comportării în timp a produselor.
- ~1930: fiabilitatea sau nonfiabilitatea se exprima sub forma unui număr mediu de defecțiuni admise într-un anumit context funcțional.
- expresii ale fiabilității s-au formulat la început în domeniul aviației, unde s-a admis un număr maxim de defecțiuni raportat la o anumită durată de zbor.
 - 1940 s-a acceptat un accident la 100.000 ore de zbor
 - după 1950, s-a promovat un alt criteriu și o altă limită: o aterizare forțată la un milion de aterizări
 - odată cu introducerea sistemelor automate de aterizare s-au impus alte limite: o aterizare nereușită la cel puțin 10^7 aterizări.

- Fiabilitatea s-a dezvoltat organizat și științific în urma unor observații (de ex. în 1949 în SUA echipamentele de radiolocație au fost în stare de nefuncționare 84% din timp, cele hidroacustice 48%, iar de radiotelecomunicații 14%. După 10 ani de cercetări teoretice și experimentale, legate de creșterea fiabilității, timpii de nefuncționare se prezentau astfel: 2.9% pentru echipamente de radiolocație, 6.7% pentru echipamente hidroacustice respectiv 7.7% pentru echipamente de radiotelecomunicații.

- Studiile și experiențele din domeniul fiabilității exclud totuși posibilitatea unei previziuni certe a funcționării produselor, succesul admițându-se oricât de apropiat de certitudine, dar niciodată 100% sigur (există un anumit risc de insucces).

Ingineria fiabilității s-a dezvoltat inițial ca necesitate în evitarea unor catastrofe cauzatoare de distrugeri materiale importante și pierderi umane (Boeing a fost una dintre primele companii care a investit în siguranța zborurilor comerciale și de pasageri), apoi s-a extins la întreaga producție de bunuri materiale.

Ingineria fiabilității este aplicată tuturor produselor pentru că are consecințe atât pentru compania producătoare, cât și pentru consumator.

- Consumatorul de astăzi este informat și conștient de calitatea și fiabilitatea produselor. El remarcă și nu tolerează produsele care nu performează conform declarațiilor din documentațiile tehnice anexe produsului la cumpărare sau a celor care rezultă din reclame. Non-satisfacția consumatorului poate avea consecințe dezastruoase asupra companiei producătoare. Statisticile arată că un client mulțumit de un produs achiziționat, comunică acest fapt la 8 persoane, în timp ce un client nemulțumit își va manifesta insatisfacția, în medie, altor 22 de oameni
- Ingineria fiabilității a dobândit o importanță tot mai ridicată, pe măsură ce tehnologizarea industrială, a serviciilor, dar și casnică a devenit tot mai pregnantă (de exemplu, defectarea unui calculator este mult mai importantă astăzi decât acum 20 de ani. Implementarea informatizării în toate domeniile face ca defectarea unui calculator să poată avea efecte care acoperă întreaga gamă posibilă, de la consecințe neglijabile până la catastrofe de mari proporții, atât materiale cât și în ceea ce privește siguranța vieții)

Scopurile implementarii ingineriei fiabilității:

- **optimizarea timpului de rodaj**
- **optimizarea perioadei de garanție** și estimarea costurilor garanției
- **proiectarea schemei de înlocuire preventivă** a unor componente dintr-un sistem reparabil
- **estimarea necesarului de piese de schimb** și proiectarea corectă a producției în acest sens
- **depistarea componentelor care se defectează** și implicarea cercetării și proiectării în scăderea ratei de defectare
- **stabilirea momentului din perioada de funcționare când apare un anumit defect** în scopul indicării schimbării piesei înainte de ieșirea efectivă din uz a acesteia
- **studiul efectelor vârstei**, a duratei efective de funcționare, a condițiilor de operare asupra fiabilității și elaborarea unor normative sau recomandări care pot conduce la creșterea fiabilității
- **crearea unei baze de comparație a două sau mai multe proiecte** pentru același produs, în scopul aplicării criteriului celei mai bune fiabilități
- **evaluarea și estimarea nivelului de redundanță** în proiectul unui produs

- **elaborarea unor ghiduri în aplicarea acțiunilor corective** destinate minimizării numărului defectelor și reducerii timpului și costului mentenanței
- **stabilirea practicilor de control** ale produsului
- **optimizarea fiabilității la nivel de proiectare**, astfel încât costurile de deținere, operare și mentenanță pe durata de viață a produsului să fie minime
- **dezvoltarea unor algoritmi de studiu** care să opereze cu un complex de parametri, cum ar fi fiabilitatea, mentenabilitatea, disponibilitatea, costul, greutatea, volumul, ergonomia, valoarea de întrebuințare etc. în scopul obținerii unui proiect optim
- **reducerea costurilor de garanție** sau creșterea perioadei de garanție la aceleași costuri
- **orientarea consumatorilor** privind potențialii furnizori, din punct de vedere al fiabilității
- **dezvoltarea unor indici sau măsuri cantitative ale fiabilității**, în scopul utilizării acestora de către departamentele de marketing în promovarea produselor
- **creșterea gradului de satisfacție a clientului**, în scopul creșterii numărului de vânzări
- **creșterea profitului**, sau la același profit, crearea unor produse mai fiabile
- **promovarea imaginii pozitive a companiilor** producătoare, crearea unor branduri.

Fiabilitatea poate fi definită ca:

- ansamblul caracteristicilor calitative ale unui sistem tehnic care reflectă **capacitatea acestuia de a fi utilizat, în condiții prescrise, un timp cât mai îndelungat** (conceptul calitativ al fiabilității)
- **măsura probabilității de bună funcționare** a unui sistem în conformitate cu normele prescrise (conceptul cantitativ al fiabilității)
- mărime care exprimă **siguranța în funcționare** a unui sistem tehnic.

Calitatea - totalitatea proprietăților unui produs care îl fac apt pentru o destinație anume.

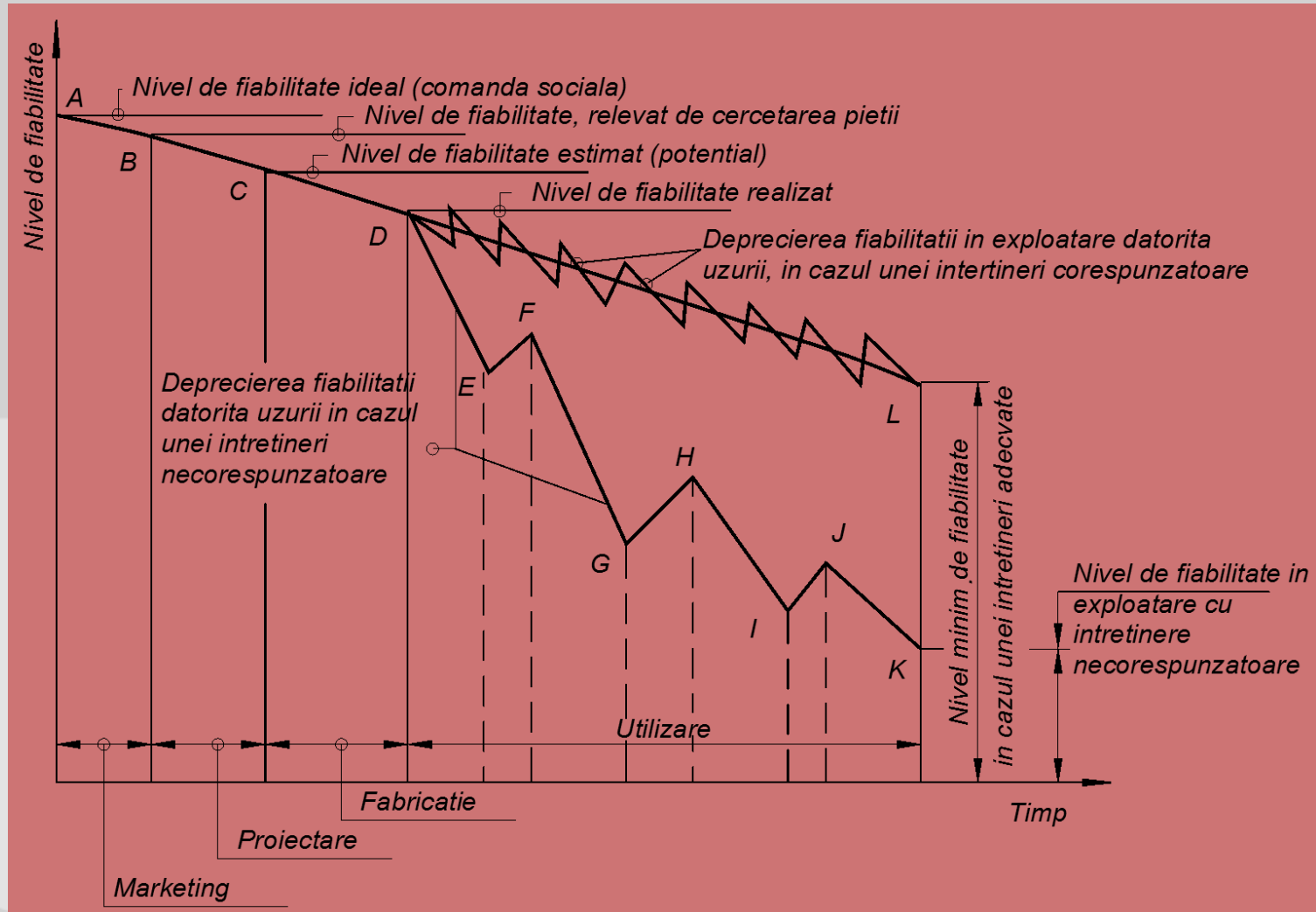
Fiabilitatea - **calitatea produsului extinsă în timp (proprietate dinamică a calității)**, respectiv capacitatea produsului de a-și menține calitatea pe toată durata de utilizare.

Termenul de fiabilitate provine din limba franceză:

Fiabilité - mărime caracterizând securitatea funcționării unui mecanism; măsură a probabilității de funcționare a unei aparaturi conform normelor prescrise.

În limba engleză termenul corespunzător este **reliability** - demn de încredere, sigur, pe care te poți bizui.

De-a lungul vieții unui produs (dispozitiv) se operează cu mai mulți termeni asociați noțiunii de fiabilitate.



Factorii care influențează fiabilitatea

Factorii care influențează fiabilitatea pot fi de natură:

- umană
- materială
- economică
- socială.

După efectul pe care îl au, acești factori, se disting:

a. factori care măresc fiabilitatea, și anume:

a1. factori care măresc perioada de funcționare fără defecte: proiectarea fiabilă, execuția riguroasă a produsului conform documentelor tehnico-economice, controlul în execuție, aplicarea unor tehnologii avansate (execuție, montaj etc.), executarea unor operații de testare, experimentare, rodare, asigurarea termoizolării, ermetizării, aclimatizării, conceperea unor tehnici moderne de prognoză, diagnoză, profilaxie, utilizarea unor elemente de siguranță, prevederea unor soluții tehnice rezistente la șocuri și suprasarcini, calificarea adecvată a personalului

a2. **factori care măresc posibilitatea de repunere rapidă în funcțiune:** asigurarea unor condiții tehnice adecvate pentru reparare, aprovizionarea promptă cu piese de schimb, adoptarea unor metode moderne și eficace de depistare a defectelor, pregătirea personalului desemnat pentru executarea mentenanței, apelarea unor tehnologii adecvate de reparare, aplicarea standardizării și tipizării, conceperea unor sisteme automate de supraveghere a parametrilor în exploatare

b. **factori care micșorează fiabilitatea:**

b1. **factori obiectivi:** acțiunea mediului (temperatură, umiditate, impurități etc.), regim inadecvat de funcționare, sarcini dinamice pronunțate la pornire, absenta soluțiilor tehnice eficiente împotriva vibrațiilor, variația nepermisă a temperaturii de funcționare, uzura fizică avansată

b2. **factori subiectivi:** suprasolicitări ale ansamblului, soluții tehnice inadecvate, nefiabile, condiții reale de lucru necorespunzătoare, soluții neergonomice, stare de dezinteres din partea personalului, insuficienta pregătire de specialitate a personalului, nerespectarea normelor privind întreținerea, nerespectarea tehnologiilor de reparare, uzura morală.

DEFECTAREA (DEFECȚIUNEA). CONCEPTE. CLASIFICĂRI

Defecțiunea este o noțiune legată de întreruperea sau degradarea stării de funcționare a unui produs.

Defecțiunea reprezintă o pierdere totală sau parțială a calității de funcționare, precum și orice modificare a valorilor parametrilor constructivi și funcționali în afara limitelor impuse de documentație.

Cele mai multe defecte apar în urma unor **greșeli de concepție** (cele mai costisitoare), **de fabricație** (în principal datorită nerespectării documentației tehnice) sau **de exploatare** (în cauză fiind condiții improprii de folosire, personal cu calificare necorespunzătoare ș.a.).

Ca termeni, se deosebesc:

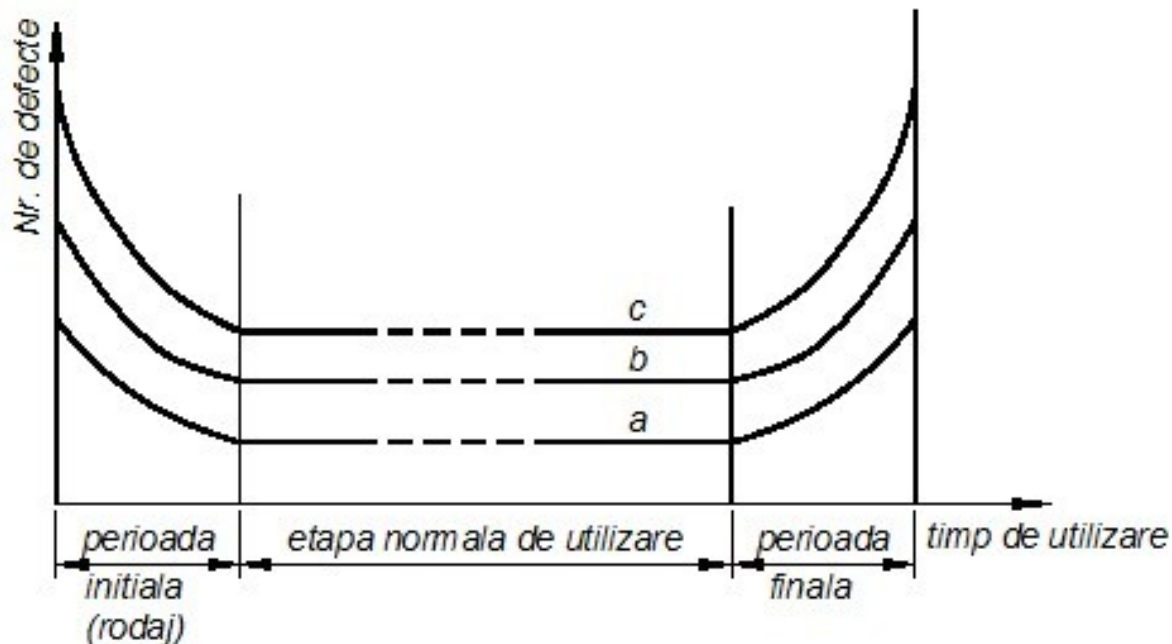
Neconformitatea sau nonconformanța – o abatere a unei caracteristici de calitate de la nivelul dorit sau stare care apare cu o severitate suficientă ca produsul sau serviciul asociat să nu îndeplinească cerința unei specificații.

Defectul – abatere a unei caracteristici de calitate de la nivelul dorit sau stare, care apare, la un moment dat, cu o severitate suficientă pentru ca produsul sau serviciul să nu satisfacă cerințele de utilizare.

Deci **nonconformanța** este un **termen specific controlului calității la producător** sau la recepția unui produs, iar **defectul** este un **termen utilizat în exploatare**. O defecțiune are întotdeauna asociată o nonconformanță.

Durata de functionare a unui produs

În figură, curbele a, b sunt specifice unor produse caracterizate prin proiectare și fabricație îngrijite, iar curba c este specifică unui produs cu carențe de proiectare și fabricație.



Criterii de clasificare a defecțiunilor:

➤ după durata defecțiunii:

- defecțiune temporară
- defecțiune intermitentă
- defecțiune stabilă.

➤ **după momentul apariției defectării:**

- defecte timpurii - sunt datorate unor imperfecțiuni de proiectare sau de fabricație
- defecțiuni întâmplătoare - manifestate pe timpul duratei normale de viață
- defecțiuni de uzură sau îmbătrânire - tipice pentru perioada finală.

➤ **după modul de depistare:**

- vizibile
- ascunse

➤ **după metoda de eliminare a defectelor:**

- schimbarea piesei defecte
- repararea piesei defecte
- reglare

➤ **după posibilitatea eliminării cauzei:**

- eliminabilă
- neeliminabilă

➤ **după nivelul de defectare:**

- totală
- parțială

➤ **după pondere și efect:**

- minore
- majore
- critice
- inadmisibile

➤ **după evoluție:**

- progresiv
- în salt (brusc)
- după anumite legi statistice

➤ **după cauzele care le generează:**

- concepția constructivă
- concepția tehnologică și de execuție
- uzarea
- deformațiile și jocuri
- mediul ambiant
- factorul uman

➤ după cauzele care le generează:

- concepția constructivă
- concepția tehnologică și de execuție
- uzarea
- deformațiile și jocuri
- mediul ambiant
- factorul uman

Defecțiuni generate de forma constructivă

Sunt defecțiuni premature, care apar accidental.

Cauzele care le determină pot fi:

- din proiectare: subevaluarea sarcinilor nominale sau a condițiilor de mediu
- utilizarea unor metode neadecvate de dimensionare
- adoptarea unor scheme cinematice eronate, nefuncționale pentru care se dau soluții constructive greșite cu efecte asupra fiabilității.

Defecțiuni cauzate de proiectarea tehnologică, de execuție și montaj

Pentru evitarea unor astfel de defecțiuni se impune:

- controlul riguros al materialelor
- calificarea corespunzătoare a personalului
- alegerea adecvată a traseelor tehnologice, mașinilor, utilajelor, SDV-urilor, aparatelor și echipamentelor metrologice
- stabilirea corespunzătoare a tehnologiilor pentru a nu micșora capacitatea portantă a pieselor (conservarea fibrajului, regimuri de prelucrare adecvate, tratamente termice și termochimice compatibile etc.)
- asigurarea calității suprafețelor (implicarea corectă a factorilor tehnologici, economici, funcționali etc.)

Uzarea și principalul său efect – **uzura** – pot influența hotărâtor fiabilitatea. În principiu, defecțiunile condiționate de procesul de uzare se datorează:

➤ soluțiilor constructive neadecvate:

- alegerii necorespunzătoare a cuplurilor de materiale
- alegerii sau folosirii greșite a lubrifiantilor
- formei necorespunzătoare a cuplelor cinematice (superioare, inferioare, cu alunecare, cu rostogolire etc.)

➤ proceselor tehnologice de:

- fabricație
- montaj
- ajustare – reglare

➤ condițiilor de exploatare:

- regim de lucru necorespunzător: sarcini și viteze inadecvate
- calității mediului: temperatură, umiditate, puritate
- calității întreținerii.

ELEMENTE DE TRIBOLOGIE

Tribologia este știința care se ocupă cu studiul frecării, ungerii și uzării.

Etimologie: tribos – frecare, logos – vorbire (lb. greacă)

Tribologia este o știință interdisciplinară, care utilizează cunoștințe fundamentale din fizica generală, chimie, știința mecanismelor și organelor de mașini, hidraulică, știința materialelor, fiabilitatea sistemelor ș.a.

Tribologia are ca scop:

- **Stabilirea legilor fundamentale** care guvernează procesele de frecare, ungere și uzare
- **Elaborarea unor algoritmi de calcul al uzurii** sistemelor tehnice în regimuri de funcționare și condiții de mediu diverse, în scopul prelungirii duratei de viață a acestora

În general, tribologia studiază fenomenele care au loc la suprafața de contact a două corpuri cu mișcare relativă de alunecare, rostogolire, pivotare sau combinații ale acestora, între care există sau nu un fluid de lubrifiere.

Frecarea

Frecarea este un proces complex de natura moleculară, mecanică și energetică ce are loc între două suprafețe de contact aflate în mișcare relativă sau între care există tendința de mișcare relativă.

Cu toate că frecarea produce uzarea suprafețelor în contact și consumă energie reducând randamentul, mișcarea nu poate fi concepută fără frecare.

Frecarea poate avea caracter util (în cazul frânelor, cuplajelor, transmisiilor prin frecare, îmbinărilor prin strângere etc.), respectiv un caracter nedorit în cazul lagărelor, angrenajelor etc.

Cupla de frecare

Cupla de frecare formează legătura între două sau mai multe elemente în contact, supuse unei mișcări relative de alunecare, rostogolire, pivotare sau combinații ale acestora.

Cuplele de frecare se clasifică pe criteriul raportului dintre ariile de contact astfel:

➤ **cuple de clasa I** – contact teoretic punctiform (înainte de deformare contactul este punctiform)



Cupla tribologică de clasă I Cupla tribologică de clasa a II-a Cupla tribologică de clasa a III-a

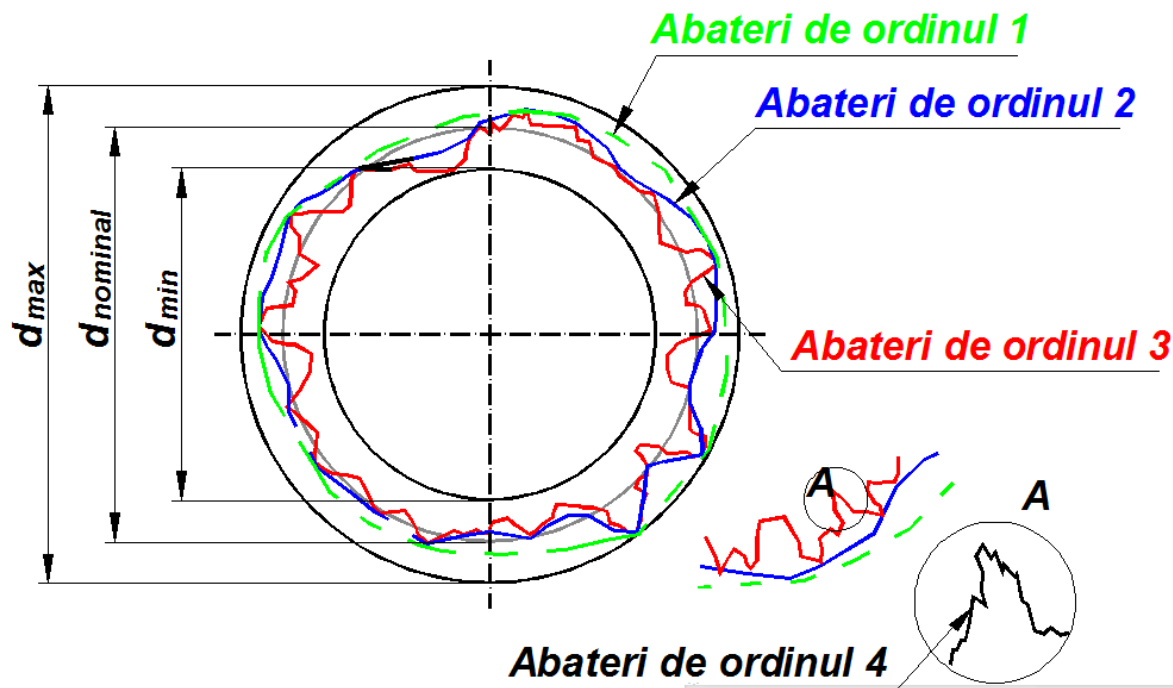
- **cuple de clasa a II-a** - contact teoretic liniar (înainte de deformare contactul este liniar)
- **cuple de clasa a III-a** – contact pe suprafață.

Cuplele de clasa I și a II-a se numesc **cuple superioare** sau **cuple hertziene** (solicitarea se calculează cu ecuațiile lui Hertz). În calcule se ia în considerare deformația elastică a suprafețelor de contact deoarece aceasta determină în mare măsură comportamentul cuplei în exploatare. Cuplele de clasa a III-a se numesc **cuple inferioare**. La aceste cuple deformația elastică nu este semnificativă și, ca urmare, nu este implicată în calcule.

Suprafața de frecare

Indiferent de material și de procedeul tehnologic de obținere, piesele sunt afectate de erori de formă și de prezența rugozităților. Caracterul discret al materiei și imperfecțiunile generate de orice procedeu tehnic în condiții reale, conduc la imposibilitatea obținerii unor suprafețe ideale, perfect plane, cilindrice, sferice etc.

În raport cu profilul ideal (nominal) al unei suprafețe, profilul real va prezenta următoarele tipuri de abateri:



Abateri de la forma nominală a unei suprafețe tehnice

- **abateri de ordinul 1 (de formă)**, care reprezintă abateri de la forma nominală prescrisă a profilului piesei. Acest tip de erori de formă sunt generate de imprecizia prelucrării mecanice prin factori care depind de condițiile de lucru (deformații elastice ale sistemului tehnologic mașină – sculă – piesă, deformații termice ale componentelor mașinii sau piesei, deformații cauzate de tensiuni interne din substratul piesei, deformații datorate uzării sculei) și factori care nu depind de condițiile de lucru (imprecizia geometrică și cinematică a mașinii, imprecizia de reglare și măsurare a dispozitivelor de control dimensional)

➤ **abateri geometrice de ordinul 2 (ondulații)**, care reprezintă neregularități a căror lungime de undă este de câteva ori mai mare decât amplitudinea lor. Ondulațiile pot fi generate paralel sau perpendicular pe direcția de prelucrare și se datorează vibrațiilor din procesul de prelucrare. Ondulațiile longitudinale au amplitudinea și frecvența acestor vibrații, cu caracter, în general sinusoidal. Ondulațiile perpendiculare pe direcția de deplasare a sculei sunt mai puțin importante, fiind mai mici decât cele longitudinale

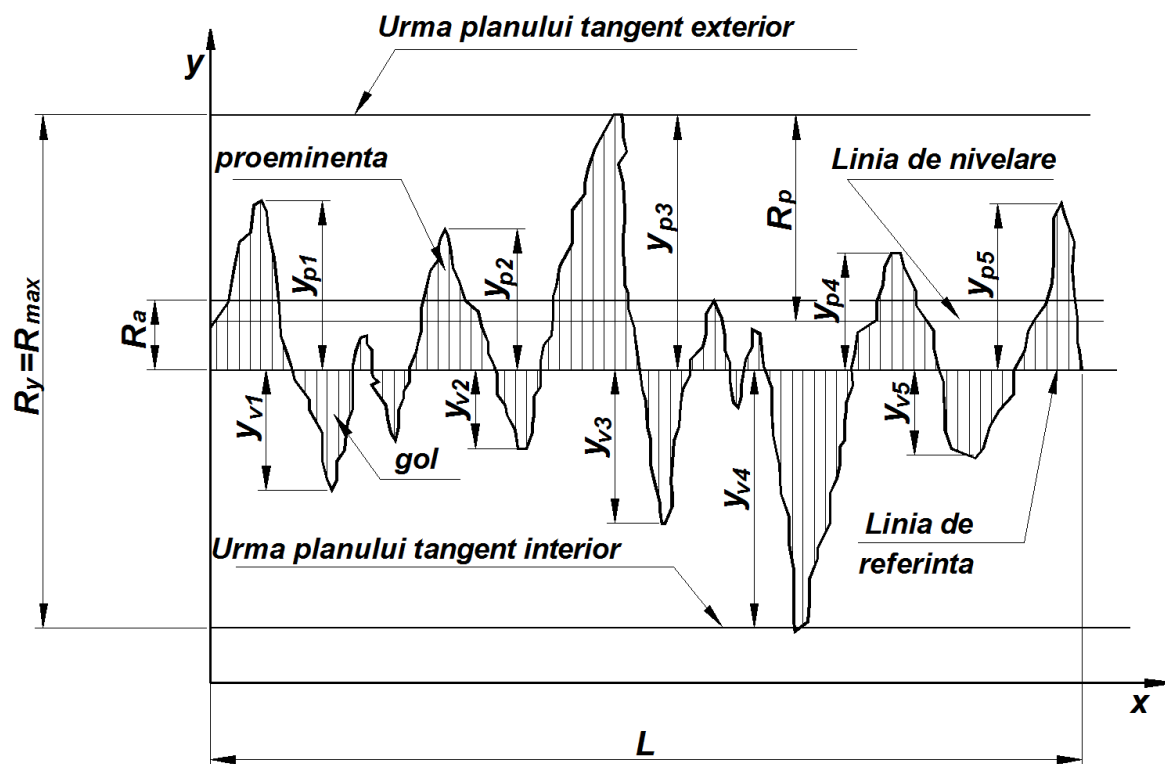
➤ **abateri geometrice de ordinul 3 (rugozități)**, care reprezintă caracteristica principală în topografia unei suprafețe și se materializează printr-o succesiune de proeminente și goluri. Se mai pot defini abateri de ordinul patru sau mai mare ca fiind smulgeri, urme de sculă, goluri aperiodice etc.

La proiectarea unei piese se prescriu direct indicații referitoare la abaterile de formă și la rugozitate. Aceasta este evaluată printr-un set de parametri, care descriu generic **starea suprafeței**.

Evaluarea rugozității se poate aborda clasic, bidimensional sau tridimensional (prin maparea suprafeței prin diverse metode – baleierea suprafeței pe principiul abordării clasice, planimetrarea simultană a întregii arii cu mijloace optice – și convertirea informației primare într-un model matematic, care permite extragerea unui set mai extins de parametri).

La scară industrială și pentru tehnologii de execuție tradiționale se utilizează, în marea majoritate a cazurilor, evaluarea bidimensională.

Determinarea parametrilor de rugozitate presupune prelucrarea statistică a datelor furnizate de o profilogramă. Aceasta se prezintă ca o curbă $y(x)$, direcția axei x fiind paralelă cu profilul nominal, iar direcția axei y fiind perpendiculară pe aceasta. Conform standardelor europene și americane, cei mai importanți parametri de rugozitate sunt:



Profilogramă cu figurarea principalilor parametri de rugozitate

➤ abaterea medie a profilului față de linia medie

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \cong \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

unde $y(x)$ este înălțimea profilului în raport cu o orizontală oarecare, paralelă cu direcția de deplasare a sculei (în figura se poate alege ca referință urma planului tangent interior, axa x sau orice altă orizontală situată sub nivelul celui mai adânc gol)

L – lungimea de referință (mărime indicată în standard funcție de valoarea estimată a parametrului R_a . Există, de asemenea, recomandarea trasării profilului pe cel puțin cinci lungimi de referință. Valorile standardizate ale lungimii de referință sunt 0.08; 0.25; 0.8; 2.5; 25 mm)

n – număr de măsurări ale înălțimilor y ale profilului (practic, lungimea profilului se împarte în $n-1$ intervale echidistante și se fac măsurări în n puncte discrete)

i – numărul curent al punctului în care se măsoară înălțimea y .

Parametrul R_a se măsoară de la linia medie sau de referință a profilului (determinată ca acea linie pentru care abaterea medie pătratică a profilului este minimă)

➤ abaterea medie pătratică a profilului

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx}$$

Abaterea medie pătratică a profilului este o mărime de calcul care nu are corespondent fizic.

➤ înălțimea maximă a rugozităților

$$R_{\max} = |y_{p\max}| + |y_{v\max}|$$

unde $y_{p\max}$ este cota celei mai înalte proeminențe care apare pe intervalul de măsurare,
 $y_{v\min}$ – cota celui adânc gol care apare pe intervalul de măsurare.

În alte standarde $R_{\max}$ este echivalent cu R_y .

$R_{\max}$ determină poziția planelor tangente exterior și interior la profil.

➤ înălțimea rugozităților în zece puncte

$$R_{zDIN} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 R_{ti} \right) = \frac{1}{5} (R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + R_{t4} + R_{t5})$$

unde R_{ti} reprezintă înălțimea maximă a profilului pe cinci segmente în care este împărțită lungimea de referință.

➤ adâncimea de nivelare

$$R_p = \frac{1}{L} \int_0^L y(x) dx$$

Parametrul R_p reprezintă cota la care s-ar genera o suprafață perfect netedă prin redistribuirea proeminențelor în goluri și se măsoară de la planul tangent exterior.

➤ lungimea de undă a ondulațiilor profilului: W

Pentru o caracterizare mai detaliată, profilogramele mai pot fi prelucrate pentru a furniza și alți parametri mai sofisticăți, cum ar fi: înălțimea medie a proeminențelor și a golurilor, cea mai mare cotă a proeminențelor și golurilor (raportate la linia medie), panta proeminențelor, densitatea vârfurilor suprafeței, coeficientul de asimetrie al profilului etc.

Literatura de specialitate indică relații aproximative între principalii parametri de rugozitate:

$$R_z \cong 4.5R_a^{0.97}$$

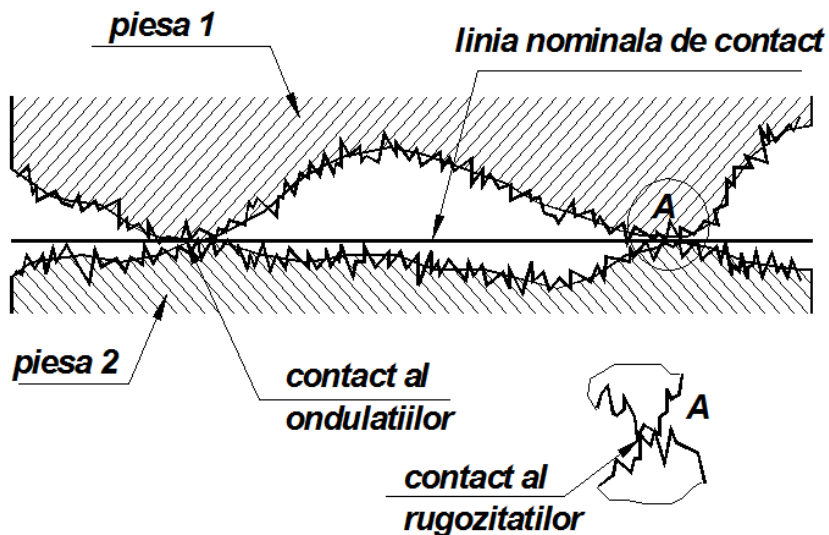
$$R_{\max} \cong 93.325R_a^{0.98} \cong 20.41R_z^{1.01}$$

$$R_q \cong (1.25 \dots 1.3)R_a$$

În toată lumea, cel mai utilizat parametru de rugozitate este R_a , a cărei valoare este înscrisă pe desenele de execuție ca indicație pentru starea suprafeței.

Pentru a caracteriza contactul a două suprafețe este necesară cunoșterea abaterilor de ordinul 1, 2 și 3 pentru ambele suprafețe. Abaterile de ordinul 1 și 2 sunt mai ușor de măsurat, dar influența lor asupra comportării suprafețelor în contact este mai greu de cuantificat. Se introduc noțiunile de **apropiere absolută** și **relativă** a suprafețelor.

Abaterea de la forma ideală a suprafețelor sugerează faptul că, la o apropiere relativă oricât de ridicată, practic, contactul nu va avea loc pe aria nominală (determinată de dimensiunile geometrice nominale, macroscopice ale acestora). Aria reală de contact va fi doar o anumită parte din aria nominală, mărimea ariei reale fiind determinată de suma microariilor rugozităților care vin în contact direct. Se definesc noțiunile de **arie nominală, aparentă și reală de contact**.



Linia teoretică de contact,
contactul undulațiilor și al rugozităților

Aria aparentă reprezintă suma ariilor de contact ale undulațiilor suprafețelor în contact. Între cele trei tipuri de arii există relația generală:

$$A_n \geq A_a \geq A_r$$

unde A_n este aria nominală de contact

A_a – aria aparentă de contact

A_r – aria reală de contact.

Pentru cuplele tribologice de clasă I (contact punctiform) se admite egalitatea acestor arii. Pentru cuplele de clasă II (contact liniar) se admite egalitatea ariei reale cu cea aparentă. Pentru cuplele tribologice de clasă III (contact pe suprafață), însă, aria reală este cu două, trei sau mai multe ordine de mărime mai mică decât aria nominală, fapt care are implicații directe asupra presiunii reale de contact și asupra portanței cuplei.

Nr. crt.	Tipul și clasa cuplei de frecare	Relația între ariile de contact
1.	Punctiform – clasa I	$A_n = A_a = A_r$
2.	Liniar – clasa a II-a	$A_n = A_a > A_r$
3.	De suprafață – clasa a III-a	$A_n > A_a \gg A_r$

În funcție de aria de contact considerată, se definesc următoarele categorii de solicitări de contact:

➤ **presiunea nominală** (medie): $p_n = \frac{F}{A_n}$

➤ **presiunea aparentă**: $p_a = \frac{F}{A_a}$

➤ **presiunea reală** (efectivă): . $p_r = \frac{F}{A_r}$

Apropierea absolută a două suprafețe are o valoare care se află într-un interval mărginit teoretic de $R_{\max}$ și 0.

Se definește **apropierea relativă** ca raport al apropierii absolute și înălțimea maximă a rugozităților:

$$\varepsilon = \frac{a}{R_{\max}}$$

unde ε este apropierea relativă,
 a – apropierea absolută.

Apropierea absolută este dificil de măsurat experimental. Pentru apropierea relativă, în aplicațiile curente, sunt valabile valori de aproximativ 0.4.

Frecarea

Frecarea este un fenomen complex, manifestat ca rezistență la mișcarea relativă a două suprafețe și are ca urmare modificarea fizico-chimică și a energiei libere a stratului superficial al elementelor în contact.

Forța paralelă cu direcția de mișcare și cu sens opus mișcării, se definește ca **forță de frecare**. Forța care se opune inițierii mișcării relative reprezintă **forța de frecare statică**, iar forța de rezistență la mișcarea propriu-zisă, reprezintă **forța de frecare cinematică (sau dinamică)**. Frecarea dinamică este, în general, mai mică decât cea statică.

Pe lângă aceste categorii ale frecării exterioare, există și o categorie de frecare interioară, care reprezintă rezistența pe care o opune un corp mișcării relative a componentelor sale volumice (atomi, molecule etc.). Această frecare se numește generic **viscozitate** (obiect al reologiei).

În tribologie, funcție de starea suprafețelor în contact se definesc următoarele tipuri de frecare:

- **uscată** - între suprafețele de frecare contactul este nemijlocit
- **limită** - suprafețele în contact sunt separate printr-un strat de lubrifiant, extrem de subțire dar continuu (strat monomolecular, eventual plurimolecular)
- **fluidă** - între suprafețele de frecare există film continuu de lubrifiant lichid sau gazos, film care este produs hidrostatic (HS)/(GS), hidrodinamic (HD)/(GD); în cazul cuplelor de clasa I-a sau a II-a, când regimul de ungere este puternic influențat de deformația elastică, rezultă un regim specific, numit elastohidrodinamic (EHD)
- **mixtă** – între suprafețele de frecare coexistă contacte uscate și fluide.

Legile frecării, enunțate de L. da Vinci și preluate de Amontons-Coulomb arată că:

- **forța de frecare este direct proporțională cu sarcina normală**
- **forța de frecare este independentă de mărimea suprafeței de contact**
- **forța de frecare este independentă de viteza de alunecare relativă**
- **forța de frecare depinde de natura materialelor în contact.**

Cea mai simplă lege de exprimare a forței de frecare introduce un coeficient adimensional, **numit coeficient de frecare**, aplicat forței normale:

$$F_f = \mu F_n$$

Coeficientul de frecare nu este o constantă și nu caracterizează o proprietate de material. Coeficientul de frecare este o caracteristică de sistem.

A fost pusă în evidență dependența sa de:

- aria reală de contact
- mărimea forței normale
- viteza relativă
- temperatură
- presiune
- natura materialelor
- chimia mediului ambiant
- prezența sau absența lubrifiantului etc.

Uzarea

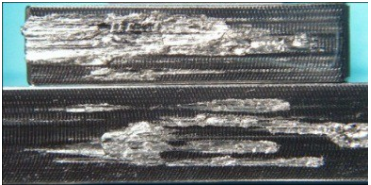
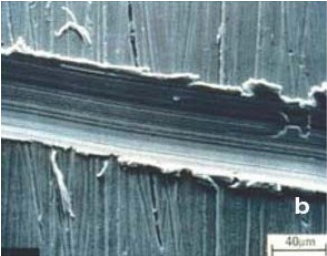
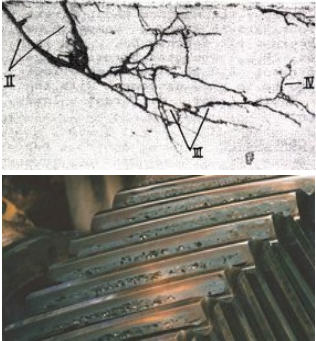
Pierderea de material de către un corp, ca urmare a contactului și mișcării relative față de alt corp, definește **fenomenul de uzare**. **Uzura** este rezultatul fenomenului de uzare. Uzura poate fi evaluată cantitativ prin pierdere masică sau volumică de material.

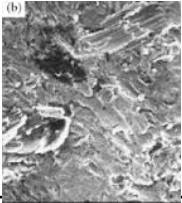
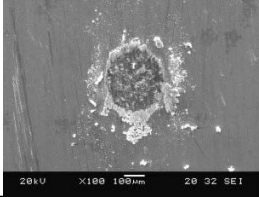
Uzarea cu intensitate ridicată este caracteristică perioadei de rodaj (care din punct de vedere tribologic corespunde adaptării suprafețelor) și perioadei de defectare distructivă din viața unui sistem tehnic. Uzarea cu intensitate redusă caracterizează perioada a doua, de funcționare normală a sistemului, pe curba de evoluție a defectelor.

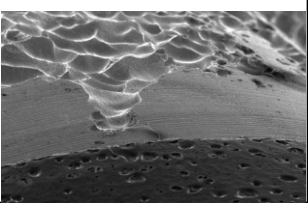
Uzarea se clasifică în patru mari categorii:

- **uzarea de adeziune**
- **uzarea de abraziune**
- **uzarea de oboseală**
- **uzarea de coroziune.**

Pentru fiecare tip de uzare există modele care explică deteriorarea suprafețelor, cu pierdere de material, prin procese combinate de natură mecanică, termică și chimică, având preponderență variabilă, funcție de tipul de uzare.

Tipuri fundamentale și derivate de uzare - efecte	Natura uzării	Tipuri de cuple de frecare (organe de mașini) afectate
ADEZIUNE Transfer de material, adeziune moderată sau severă, gripaj 	mecanică, metalurgică și termică	cele mai multe și variate cuple de frecare: îmbinări demontabile, fus-cuzinet; glisiere, ghidaje; piston-cilindru; angrenaje, variatoare, scule așchietoare etc.
ABRAZIUNE Microașchiere, generare de rizuri, brazde, zgârieturi 		organele active ale mașinilor de lucru în mediu abraziv (brăzdare, cupe, ciocane etc.) lanțuri de antrenare, cuple de frecare insuficient protejate sau supuse direct acțiunii abrazivului aflat în suspensie în mediul lubrifiant (rulmenți, angrenaje, lagăre cu alunecare, piston-cilindru etc)
OBOSEALĂ Pitting progresiv, exfoliere, fisuri în substrat 	mecanică	organe de mașini supuse la solicitări mari în prezența lubrifiantului lichid (rulmenți, angrenaje, șuruburi cu bile, camă-tachet, role de lanț)
COROZIUNE Produse de coroziune chimică, rugină	chimică	cuple supuse acțiunii corozive (lagăre unse cu acid) sau cele unse cu lubrifiant degradat amestecat cu apă cuple neprotejate față de oxigen sau vapori de apă din mediu.

COROZIUNE TERMOMECHANICĂ Fisuri de oboseală	termo- mecanică	organe de mașini solicate periodic cu frecare uscată sau tratament termic defectuos (roata locomotivă (vagon) – șină, angrenaje)
TRIBOCOROZIUNE 	chimică-mecanică	cuple de frecare la care stratul de oxid sau stratul protector se distruge continuu prin efecte mecanice (ghidaje, cilindru-piston, lagăre de alunecare sau rostogolire etc)
COROZIUNE GALVANICĂ 	electrochimică	cuple unse aflate sub acțiunea curentului electric (lagăre de alunecare sau rulmenți; angrenaje etc)
CIUPIRE ELECTRICĂ	electrică	cuple de suprafață pe care se produc descărcări electrice (contacte electrice mobile, prelucrări prin electroeroziune, cuplă roată-șină de tramvai)
COROZIUNE DE CONTACT (FRETARE) 	chimică-mecanică	cuple de contact, cu strângeri mari, supuse la mișcări de mică amplitudine (rulment arbore, caneluri, îmbinări filetate, bandaj pe roată, coroană melcată cu corp roată.
BIOCOROZIUNE	biochimică	organe de mașini sub acțiunea lichidelor de răcire sau lubrifiantilor degradați (ghidaje de mașini unelte, lagăre, piston-cilindru etc.)

Tipuri secundare de uzare		
Cavitație	mecanică	suprafețe care lucrează în medii fluide (palete de turbină, elice de vapoare, pompe etc)
		
Uzare de impact		cuple de frecare solicate periodic cu particule sau corpuri dure (instalații de foraj, mașini de scris, mașini de tricotat etc.)
Uzare prin rulare la rece		suprafețe solicate puternic cu deformare plastică (angrenaje, rulmenți, camă – tachtet)
Brinelare		cuple hertziene puternic solicate în stare staționară (rulmenți, angrenaje, camă-tachtet)
Uzare prin interferență		flancuri ale roților dințate, în cazul unor deplasări de profil incorect alese
Uzare prin cojire superficială	termomecanică	contacte hertziene de alunecare sau rostogolire plus alunecare, puternic solicate durificate pe adâncime redusă
Fisurare de tratament termic		tratament termic defectuos (angrenaje, rulmenți, camă-tachtet)
Uzare prin deformare la cald	termică	suprafețe care prezintă deformări plastice, datorate solicitărilor mecanice și a creșterilor locale de temperatură
Decolorare (pătare)		suprafețe supraîncălzite local (cămăși de cilindru, flancuri ale roților dințate, discuri de frână etc.)

Uzarea abrazivă este procesul de deteriorare a suprafețelor solide prin acțiuni mecanice de așchiere sau tăiere, la care participă fie asperitățile dure din masa eterogenă a materialelor, fie particulele abrazive rezultate în urma unui proces de uzare de contact sau care provin din mediul din exterior cuplei de frecare.

Uzarea abrazivă are ca rezultat prezența microzgârieturilor, a microașchierilor, a deformărilor plastice ale suprafețelor aflate în contact. Particulele dure se pot încadra în materialele de bază mai moi, inițiind procese noi de deteriorare mecanică.

Uzarea abrazivă este forma cea mai simplă de degradare a suprafețelor aflate în contact.

Principali factorii care influențează uzarea abrazivă sunt:

- natura materialelor în contact
- natura abrazivului
- încărcarea cuplei, viteza relativă, timpul de funcționare consumat etc.

Uzarea de adeziune se mai numește și **uzare de aderență** sau **de contact** și se manifestă prin:

➤ transfer de material de pe o suprafață pe cealaltă ca o consecință a adeziunilor moleculare. Este o formă ușoară de uzare și determină, de fapt, frecarea dintre materiale. În această fază pot să apară microjoncțiuni și forme de gripaj incipient, ecruisări, abraziuni

sau/si

➤ formarea și ruperea de microsuduri ale asperităților. Principala formă de manifestare este gripajul.

Susceptibilitatea la sudare este influențată în mare măsură de compatibilitatea materialelor din care sunt confecționate suprafețele conjugate aflate în contact (compatibilitatea - gradul de adeziune reciprocă), în funcție de capacitatea lor de a forma aliaje interstițiale sau substiționale.

Perechile de materiale se pot clasifica în 4 grupe:

- care nu formează aliaje (pot să apară topiri locale ale materialelor dacă materialul de bază este foarte moale)
- cu solubilitate redusă (pot forma compuși intermetalici - duritatea și rezistența acestor compuși determină locul în care se vor rupe microjoncțiunile, în zona materialului mai moale sau a sudurii)
- cu solubilitate parțială (în faza solidă au o comportare apropiată de cele cu solubilitate maximă)
- cu solubilitate maximă (prezintă frecări mari și uzări intense).

Gripajul, ca formă tipică de manifestare a uzării de adeziune, poate fi provocat de:

- rodajul necorespunzător
- jocuri prea mici între suprafețe
- prezența unui lubrifiant puțin vâscos, neaditivat sau îmbătrânit
- depășirea parametrilor funcționali privind sarcina și viteza
- ineficacitatea sistemului de răcire.

Uzarea de oboseală apare în cazul solicitărilor ciclice și se manifestă prin plastifieri locale, exfoliere, fracturi în substrat, pitting, fretting etc.

Uzarea de coroziune denumește generic fenomenele chimice sau electrochimice manifestate la nivelul contactului de frecare, al căror rezultat se concretizează în particule chimic străine de materiale de bază ale elementelor cuplei. Reacțiile chimice pot avea loc între materialele pieselor, între unul sau ambele materiale și lichidul lubrifiant sau compuși din mediul de funcționare al sistemului.

TERMENI REFERITORI LA DURATA DE FUNCȚIONARE

Timpul de bună funcționare

Pentru sisteme reparabile, timpul de bună funcționare reprezintă intervalul dintre două defecțiuni succesive, în care aceste sisteme funcționează conform specificațiilor.

Pentru sisteme nereparabile acesta reprezintă durata de utilizare, adică perioada de funcționare până la defectare (durata de viață).

Funcție de componentă, subansamblu sau ansamblu, timpul de bună funcționare se exprimă în unități de timp, distanța parcursă măsurată în kilometri, numărul de cicluri de funcționare, toate măsurate între defecțiuni.

Timpul mediu de bună funcționare

Întrucât la produsele de același tip, timpii de funcționare între defecțiuni sunt variabili, în practică se apelează curent la **timpul mediu de bună funcționare** sau **media timpului de bună funcționare**. Pentru dispozitivele nereparabile se utilizează și noțiunea de **timp mediu de viață** sau **durata medie de viață**.

Timpul maxim admis de folosire (resursa)

Timpul maxim admis de folosire, sau **resursa dispozitivului**, reprezintă durata de utilizare până când acesta atinge o situație limită admisă pentru parametrii de funcționare.

În cazul dispozitivelor pentru care sunt prescrise diverse intervenții pe durata de folosință se mai prescriu ca parametri specifici și alți timpi:

- **timpul de funcționare până la efectuarea reviziei**
- **timpul de funcționare până la efectuarea reparației**
- **timpul de funcționare până la cădere și înlocuire.**

Pentru un lot de dispozitive se utilizează frecvent **timpul mediu de folosire admis** sau **resursa medie**.

Mentenanța

Ansamblul **acțiunilor tehnice și organizatorice** având ca scop menținerea sau restabilirea stării de functionare a unui sistem astfel se numește **mentenanță**.

Mentenabilitatea

Capacitatea produsului de a fi reparat, restabilit și repus în funcțiune după o defectare se numeste **mentenabilitate**.

Sub aspect tehnic mentenabilitatea reprezintă aptitudinea unui produs, ca în condiții date de utilizare, să fie menținut sau restabilit pentru a-și îndeplini funcția specifică, atunci când acțiunile de mentenanță se efectuează în condiții precizate, într-un timp dat, cu procedee și remedii prescrise.

Din punct de vedere matematic mentenabilitatea reprezintă o probabilitate de restabilire a funcției, în cazul unei căderi a dispozitivului.

Disponibilitatea

În cazul dispozitivelor reparabile trebuie avute în vedere aptitudinile combinate de fiabilitate și mentenabilitate.

Disponibilitatea reprezintă aptitudinea unui sistem de a-și îndeplini funcția specifică după o durată de timp consumată pentru reparații.

Disponibilitatea este condiționată de două probabilități:

- **probabilitatea de funcționare fără căderi pe o anumită perioadă de timp;**
- **probabilitatea înregistrării unei căderi** precum și a restabilirii capacității de bună funcționare **în decursul unui interval de timp.**

Creșterea disponibilității prin fiabilitate reprezintă un compromis între costul investiției, serviciul solicitat și riscul acceptat. Frecvent este mai avantajos să cumpărăm produse mai scumpe dar mai fiabile decât produse ieftine dar cu risc de căderi mai pronunțat, întrucât în această ecuație intervine și costul întreținerii.

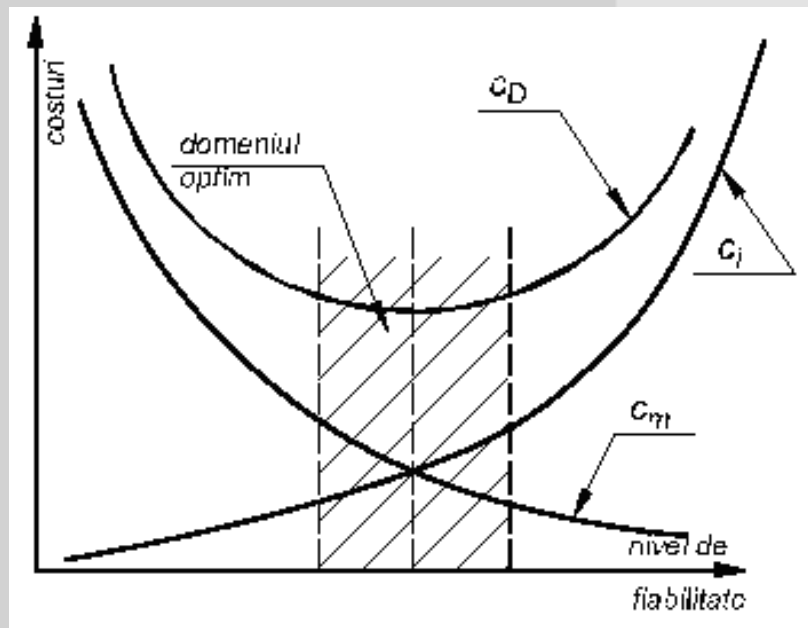
Avantajele fiabilității foarte ridicate sunt limitate, întrucât produsele foarte fiabile pot fi mult mai scumpe.

Corelația fiabilitate-cost

Eficiența globală a unui produs tehnic în general, trebuie raportată la:

- **nivelul performanțelor tehnice**
- **indicatorii de fiabilitate, mentenabilitate, disponibilitate, capabilitate**
- **costul deținerii.**

La un moment de timp t , cheltuielile cu un anumit produs reprezintă **suma costului de achiziție**, a **costului de întreținere** (mentenanță) și, eventual, cheltuielile asociate **imobilizării**.



În mod normal, **costul investițiilor**, C_i , crește odată cu creșterea fiabilității, iar **costurile de mentenanță**, C_m scad.

$$C_D = C_i + C_m$$

INDICATORI DE FIABILITATE AI ELEMENTELOR NEREPARABILE

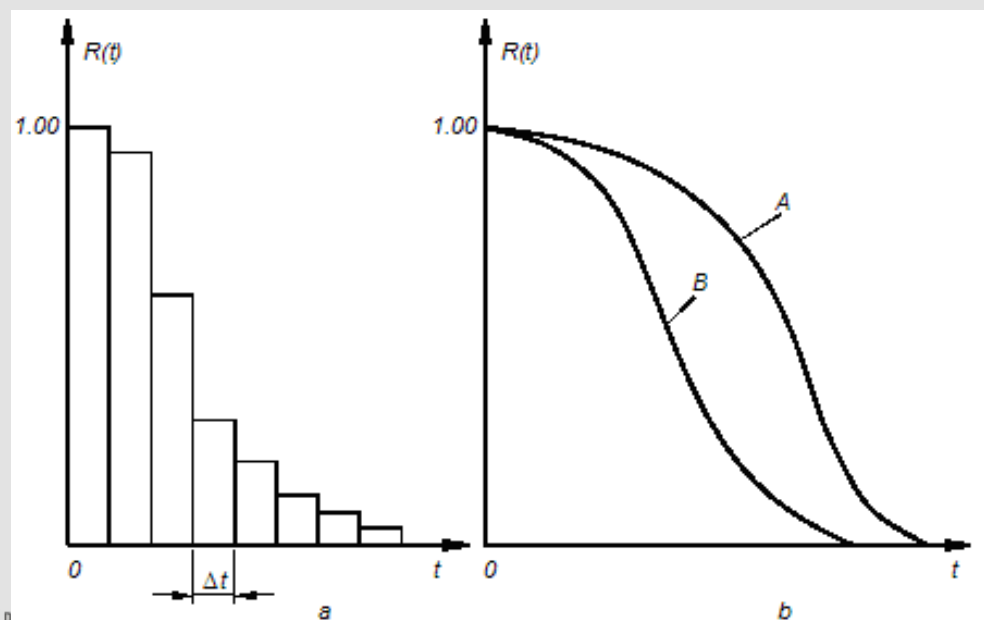
Funcția de fiabilitate $R(t)$

Funcția de fiabilitate, numită și **probabilitate de funcționare fără defecțiuni** (sau de bună funcționare), constituie principala expresie cantitativă a fiabilității:

$$R(t) = P(t > T)$$

în care t este variabila timp (variabila aleatoare), iar T – o limită a timpului de funcționare. Funcția $R(t)$ exprimă probabilitatea ca un element să funcționeze în condiții determinate de-a lungul unei durate date $(0, t)$, respectiv exprimă probabilitatea ca timpul t la care apare defecțiunea să fie mai mare decât T .

Variația graficului funcției de fiabilitate $R(t)$ se poate stabili pe baza datelor statistice provenite din spațiul experimental sau din exploatare.



Pentru toate cazurile în momentul pornirii:

$$t = 0, \Rightarrow P(t) = P(t = 0) = 1 = R(t).$$

După un timp suficient de mare ($t \rightarrow \infty$) $\Rightarrow P(t) = P(t \rightarrow \infty) = 0 = R(t)$.

Dacă în exploatare (sau experimental) sunt prevăzute N_0 elemente de același tip, care lucrează în aceleași condiții, iar la un moment t au mai rămas $N(t)$ elemente în stare de funcționare, se poate calcula raportul:

$$\frac{N(t)}{N_0} \text{ echivalent cu funcția de fiabilitate.}$$

Dacă N_0 este foarte mare, raportul de mai sus tinde către probabilitatea de funcționare fără defectare a elementului la momentul t .

Astfel, se poate admite:

$$R(t) = P(t > T) = \frac{N(t)}{N_0}$$

Se observă că funcția de fiabilitate are următoarele proprietăți:

1. $R(t=0) = 1$
2. $R(t \rightarrow \infty) = 0$
3. $1 \geq R(t) \geq 0$

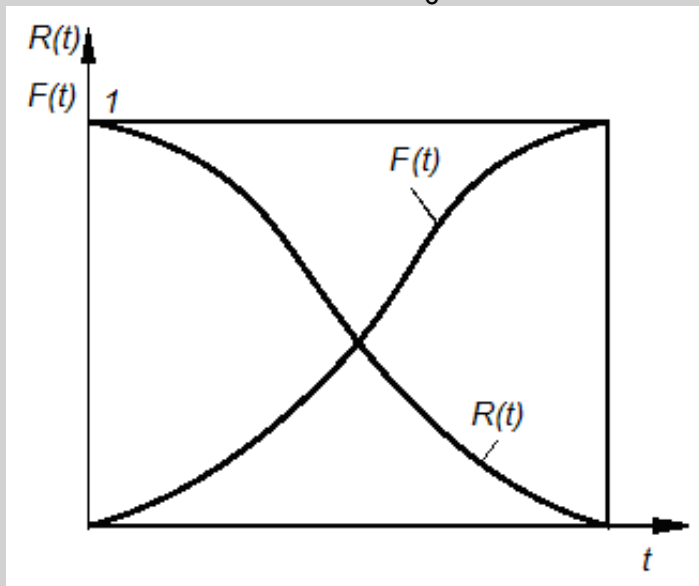
Din relațiile de mai sus rezultă că funcția de fiabilitate este descrescătoare, de la valoarea 1 (pentru $t = 0$) la valoarea 0 (pentru $t \rightarrow \infty$), este pozitivă și continuă pentru tot intervalul de timp $(0, \infty)$.

Funcția de nonfiabilitate (probabilitatea de defectare)

Această funcție pune în evidență lipsa fiabilității produselor.

Prin definiție această funcție exprimă **probabilitatea ca un element să se defecteze** în intervalul $(0, t)$:

$$F(t) = P(t \leq T) = \frac{n(t)}{N_0} \quad \text{unde } n(t) \text{ este numărul pieselor defecte la timpul } t.$$



1. $F(t = 0) = 0$
2. $F(t \rightarrow \infty) = 1$
3. $0 \leq F(t) \leq 1$.

Funcția $F(t)$ este crescătoare, pozitivă și continuă pe tot intervalul $(0, \infty)$.

Se observă că:

$$F(t) = 1 - R(t) \text{ sau } F(t) + R(t) = 1.$$

Cele două evenimente, funcționarea (supraviețuirea) și defectarea sunt complementare, se exclud reciproc, nu se produc simultan.

Funcția densității defectiunilor

Pentru a obține o reprezentare mai concludentă a caracterului distribuției timpului de funcționare (fără defectiuni) s-a introdus indicatorul **funcția densității defectiunilor $f(t)$** . Acesta se exprimă ca raport dintre probabilitatea de defectare în intervalul $(t, t + \Delta t)$ și mărimea intervalului Δt :

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t, t + \Delta t)}{\Delta t}$$

Statistic, acest indicator reprezintă **raportul dintre numărul de defectiuni în unitatea de timp și numărul inițial de elemente aflate în funcțiune**.

Notând cu $n(\Delta t)$ numărul de defectiuni manifestate în intervalul $(t, t + \Delta t)$, $f(t)$ devine:

$$f(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}$$

Întrucât numărul de elemente aflate în funcțiune la momentul t , este $N(t) = N_0 R(t)$, analog numărul de elemente în funcție la momentul $t + \Delta t$ va fi:

$$N(t + \Delta t) = N_0 R(t + \Delta t).$$

Rezultă numărul de elemente care se defectează în intervalul Δt :

$$n(\Delta t) = N(t) - N(t + \Delta t) = N_0 [R(t) - R(t + \Delta t)],$$

de unde:

$$f(t) = \frac{N_0 [R(t) - R(t + \Delta t)]}{N_0 \Delta t}$$

Pentru $\Delta t \rightarrow 0$ se obține:

$$f(t) = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t + \Delta t) - R(t)}{\Delta t} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

Indicatorul $f(t)$ caracterizează viteza de reducere a posibilităților de funcționare fără defecțiuni (de scădere a fiabilității), respectiv viteza de producere a defecțiunilor.

Se observă că $f(t) \geq 0$. Integrând $f(t)$ între 0 și ∞ se obține:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$$

Prin urmare, indiferent de modul de variație a funcției $f(t)$, aria de sub curba sa este întotdeauna egală cu unitatea.

Între funcțiile densitate a defecțiunilor, nonfiabilitate și fiabilitate, la un moment dat, t , există relațiile:

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

Indicatorul $f(t)$ poate servi la luarea deciziei cu privire la modul în care se organizează intervenția în cazul apariției unei căderi. Astfel, dacă elementul studiat are o fiabilitate ridicată un timp îndelungat și apoi scade brusc, se recomandă înlocuirea preventivă a elementelor de același tip.

Rata (intensitatea) de defectare

Rata de defectare reprezintă probabilitatea ca un element care a funcționat fără defecțiuni până la momentul t să se defecteze în intervalul $(t, t + \Delta t)$.

Acest indicator pune în evidență pericolul de defectare, permițând în același tip stabilirea fiabilității elementului în orice moment.

Rata defectării redă numărul de defecțiuni în unitatea de timp, la un moment dat, cu considerarea numărului de elemente care se găsesc în funcționare în acel moment. Se consideră un indicator local al fiabilității.

Prin definiție, rata de defectare este **raportul dintre probabilitatea de defectare în intervalul (Δt) și mărimea intervalului Δt , pentru $\Delta t \rightarrow 0$:**

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(\Delta t)}{\Delta t}$$

Statistic, rata de defectare reprezintă raportul dintre numărul de defecțiuni care au loc în unitatea de timp, la momentul t și numărul de elemente care supraviețuiesc la acest moment:

$$z(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(t)\Delta t} \cup \begin{cases} N(t) = N_0 R(t) \\ n(\Delta t) = f(t)N_0\Delta t \end{cases} \quad z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{dR(t)}{R(t)} \cdot \frac{1}{dt}$$

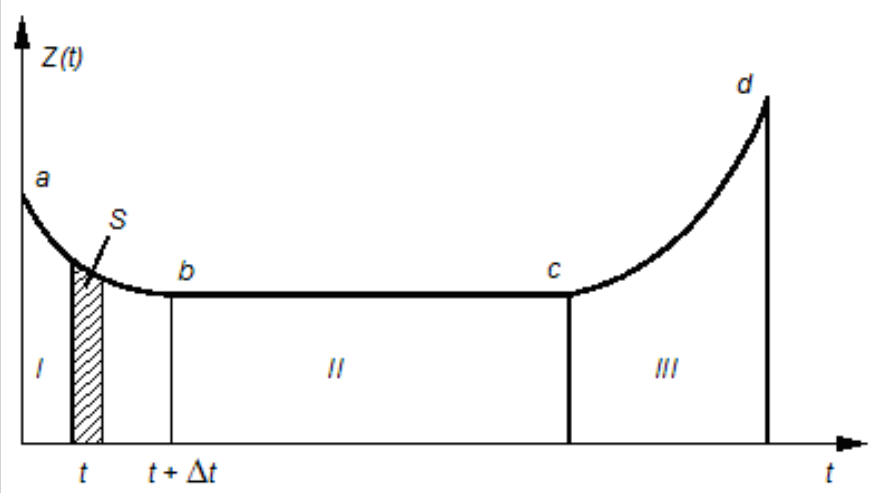
$$z(t) = -\frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dt} \quad \ln R \Big|_0^t = -\int_0^t z(t)dt$$

$$\text{Întrucât la } t = 0, R = 1 \Rightarrow R(t) = e^{-\int_0^t z(t)dt}$$

o expresie generală a funcției de fiabilitate, valabilă pentru toate categoriile posibile de legi de repartiție a defecțiunilor.

Dacă rata de defectare este constantă în timp (caz frecvent), $z(t)$ se înlocuiește cu λ , iar ecuația funcției de fiabilitate devine:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$



Curba tipică de variație a ratei de defectare (curba denumită "cadă de baie")

Din alura curbei se disting 3 perioade caracteristice: I – perioada de inițiere, de rodaj, II – perioada de viață utilă (de bază), III – perioada finală.

I. În **perioada inițială** defectările au o apariție frecventă. Cad componentele cele mai vulnerabile, cu vicii ascunse (defecte precocce). În continuare, defectele se vor produce din ce în ce mai rar. Perioada de rodaj servește pentru aducerea produsului în condiții de funcționare specificate. Reducerea valorii $\lambda(t)$ până la $\lambda = \text{constant}$ în zona a doua este o preocupare a constructorilor.

II. În **perioada de bază** – perioada principală de funcționare și cea mai lungă – defectele apar cu o frecvență redusă, fără a putea fi prevăzute. Eventualele înlocuiri periodice, datorită uzurii, țin de conceptul de **mentenanță**.

Defectele specifice au un caracter accidental (aleator). Caracteristicile funcției din această perioadă constituie baza pentru studiul și estimarea fiabilității.

III. În **perioada finală** se manifestă o creștere bruscă a frecvenței defectărilor datorită uzurii accelerate.

Timpul de bună funcționare

Timpul de bună funcționare este un indicator de fiabilitate frecvent utilizat în calculele probabilistice. Se mai numește și **media timpului de bună funcționare (MTBF)** sau speranța matematică a timpului de funcționare, respectiv media timpului de bună funcționare fără defectiuni.

Media timpului de bună funcționare se stabilește cu relația:

$$m = \text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Geometric MTBF se exprimă prin aria de sub curba $R(t)$.

Dacă rata de defectare este constantă în timp ($\lambda(t) \rightarrow \lambda$), $R(t) = e^{-\lambda t}$ și MTBF devine:

$$m = \text{MTBF} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

Dispersia timpului de funcționare

Acest indicator, notat cu D sau σ^2 , este o expresie cantitativă a împrăstierii timpului de funcționare și reprezintă **abaterea timpilor de bună funcționare față de media aritmetică** a acestora:

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

Pentru N_0 elemente, defectate la timpii $t_1, t_2, \dots$ dispersia are expresia:

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

Dacă timpul total t_T s-a divizat în intervale Δt în care au avut loc n_i defecțiuni, pentru calculul dispersiei se utilizează relația:

$$D = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{\frac{t_T}{\Delta t}} n_i (t_i - m)^2}{N_0}$$

Dispersia timpului de funcționare se recomandă, de obicei, ca indicator pentru cazul când timpul de funcționare al elementelor de același tip are o împrăștiere relativ mică.

Abaterea medie pătratică a timpului de funcționare

Acest indicator notat cu σ , denumit și abatere standard, permite o mai bună comparare a diferitelor legi de distribuție a timpului de funcționare.

Prin definiție, abaterea medie pătratică este:

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

respectiv
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} (t_i - m)^2}$$
 sau
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{\frac{t_T}{\Delta t}} n_i (t_i - m)^2}$$

Observatie: În practică cei mai utilizați indicatori de fiabilitate sunt:

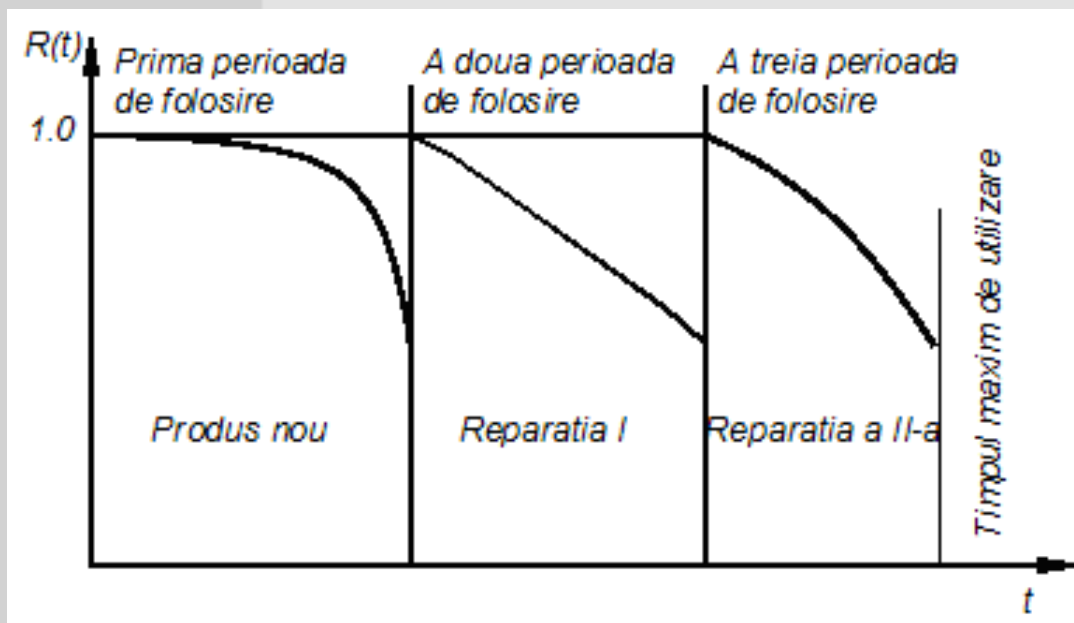
- ☐ rata de defectare
- ☐ media timpului de bună funcționare
- ☐ probabilitatea de bună funcționare.

INDICATORI DE FIABILITATE AI ELEMENTELOR REPARABILE

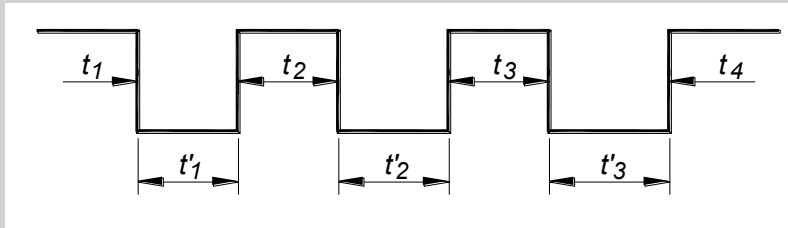
Din punct de vedere funcțional și constructiv sistemele sunt formate din:

- **elemente cu funcție unică**, pentru care prima defectare înseamnă sfârșitul duratei de viață
- **elemente reparabile** care pot fi recondiționate și reintroduse în sistem.

Produsele care pot fi recondiționate sau la care elementele cu funcție unică pot fi înlocuite, aducând sistemul la parametri nominali de funcționare se numesc produse cu **funcție repetată** sau produse cu restabilire.



Media timpului de reparare. Rata reparațiilor



media timpilor de reparare:

$$MTR = \frac{\sum t'_i}{n}$$

rata reparațiilor:

$$\mu = \frac{1}{MTR}$$

$$MTR = \int_0^{\infty} e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu}$$

Pentru a previziona, la proiectare, media timpilor de reparare trebuie cunoscute:

n – numărul de componente de același tip, λ – rata de defectare a elementelor de același tip, $n_i \lambda_i$ – numărul mediu orar de defecte pentru grupul de elemente n_i ale sistemului, t_i – timpul mediu apreciat pentru înlăturarea defectiunii unei componente din grupul n_i .

Cu aceste date valoarea previzionată a mediei timpilor de reparare este:

$$MTR = \frac{n_1 \lambda_1 t'_1 + n_2 \lambda_2 t'_2 + \dots + n_k \lambda_k t'_k}{n_1 \lambda_1 + n_2 \lambda_2 + \dots + n_k \lambda_k} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i t'_i}{\sum_{i=1}^k n_i \lambda_i}$$

Mentenabilitatea reprezinta probabilitatea unui sistem de a fi repus în stare de funcționare într-o perioadă de timp dată. Dacă T este timpul de restabilire a unui produs, în caz de defectare, atunci probabilitatea ca produsul să fie restabilit în intervalul $(0, t)$ este:

$$M(t) = P(T < t).$$

$$M(t_r) = 1 - e^{-\int_0^{t_r} \mu(t_r) dt_r}$$

Pentru $\mu(t_r) = \mu = \text{const} = \frac{1}{m_{t_r}} = \frac{1}{MTR}$

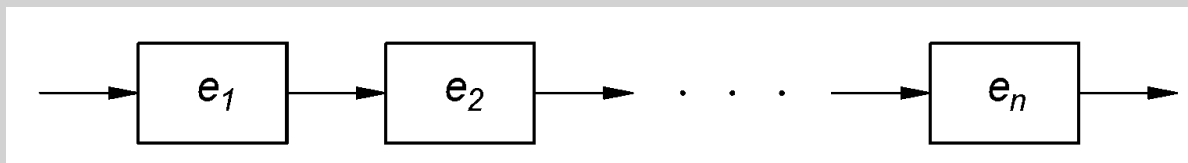
rezulta $M(t_r) = 1 - e^{-\mu t_r} = 1 - e^{-\frac{t_r}{MTR}}$

INDICATORI DE FIABILITATE A SISTEMELOR COMPUSE

Sisteme cu structura de tip serie

Indicatori de fiabilitate

Produsul cu structura serie se defectează odată cu căderea oricăreia dintre componentele sale.



Admițând că defectările reprezintă evenimente independente, iar elementele $e_1, e_2, \dots, e_n$ au fiabilitățile $R_1(t), R_2(t), \dots, R_n(t)$, fiabilitatea globală a sistemului serie este:

$$R_{\text{sis}}(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t), \quad \in [0,1]$$

Rezultă că fiabilitatea sistemului, este mai mică decât fiabilitatea oricărui element, micșorându-se cu creșterea numărului de elemente. Pentru structuri de tip serie se recomandă să se utilizeze numai elemente cu fiabilitate foarte ridicată.

Dacă $z_1(t), z_2(t) \dots$ reprezintă legile de variație a ratelor defectiunilor pe cele n elemente, fiabilitatea sistemului cu structura de tip serie se poate scrie:

$$R_{\text{sis}}(t) = e^{-\int_0^t z_1(t) dt} \cdot e^{-\int_0^t z_2(t) dt} \cdot \dots \cdot e^{-\int_0^t z_n(t) dt}$$

Funcția de defectare (nonfiabilitate) a sistemelor serie

$$F_{\text{sis}}(t) = 1 - R_{\text{sis}}(t) \quad F_{\text{sis}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i(t))$$

Rata de defectare a sistemului serie

$$z_{\text{sis}}(t) = z_1(t) + z_2(t) + \dots + z_n(t)$$

pentru $z(t) = \lambda = \text{const}$

$$\lambda_{\text{sis}} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Media timpului de bună funcționare

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda_{\text{sis}}} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} = \frac{1}{\frac{1}{T_{01}} + \frac{1}{T_{02}} + \dots + \frac{1}{T_{0n}}}$$

unde T_{0i} reprezintă timpii medii de funcționare fără defecțiuni ai elementelor i .

Media timpului de reparare

$$\text{MTR} = \frac{1}{\mu} \quad \mu = \frac{\lambda}{\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2} + \dots + \frac{\lambda_n}{\mu_n}} = \frac{\lambda}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)_i}$$

În acest caz defectarea sistemului are loc, teoretic, la defectarea tuturor elementelor, iar probabilitatea de defectare globală a sistemului va fi egală cu produsul probabilităților de defectare a fiecărui element.

e_1, I_1

e_2, I_2

e_n, I_n

Se presupun elementele e_i , cu probabilitățile de defectare $F_i(t)$, dispuse în paralel. Probabilitatea de defectare este:

$$F_{\text{sis}}(t) = F_1(t) \cdot F_2(t) \dots F_n(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t)$$

$$F_{\text{sis}}(t) = \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Probabilitatea de bună funcționare (funcția de fiabilitate)

$$R_{\text{sis}}(t) = 1 - F_{\text{sis}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

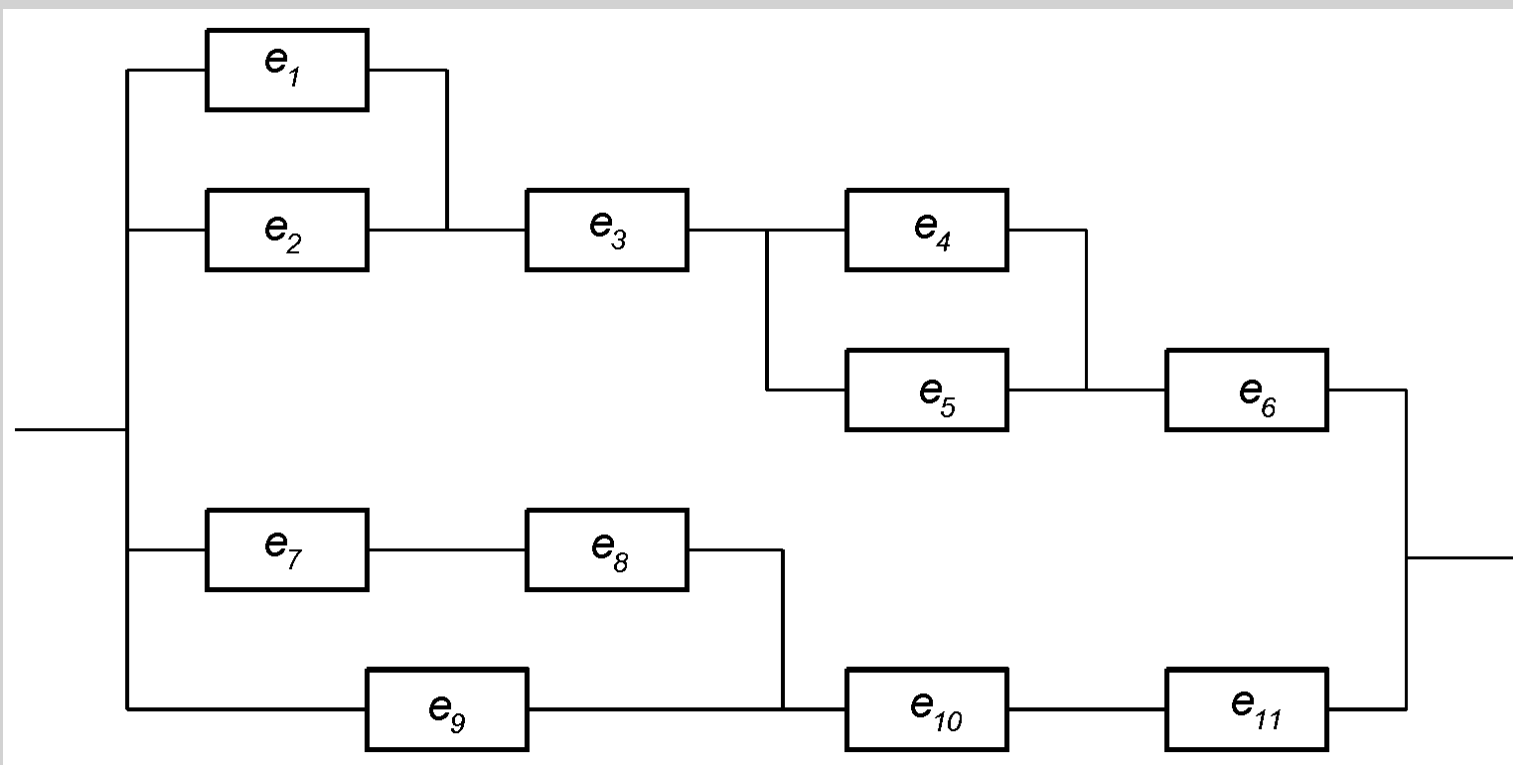
Din relațiile de mai sus rezultă că odată cu creșterea numărului de elemente dispuse în paralel scade probabilitatea de defectare a sistemului și, prin urmare, crește probabilitatea de bună funcționare.

Teoretic, sistemul are avantajul de a realiza o fiabilitate înaltă recurgând la elemente cu o fiabilitate mai redusă, fiabilitatea sistemului fiind mai mare decât fiabilitatea cea mai mare din sistem:

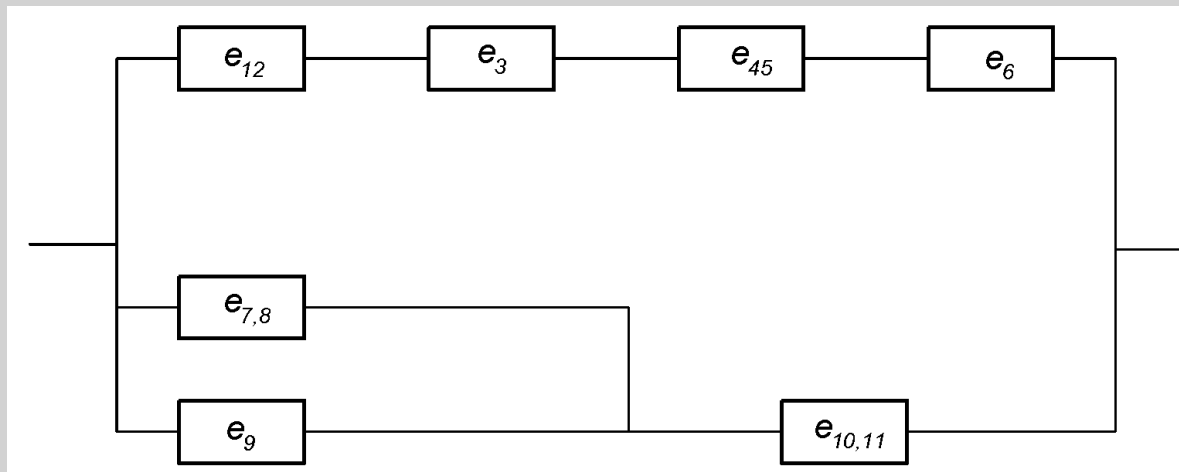
$$R_{\text{sis}}(t) > \max R_i(t)$$

Sisteme cu structură mixtă

Pentru calcule de fiabilitate se împarte schema sistemului în blocuri (grupări) care au elemente de același tip de dispunere, făcând apoi calcule pe ansambluri formate din grupuri dispuse fie în serie, fie în paralel, până la determinarea fiabilității întregului sistem.



Pentru simplificarea sistemului se calculează la început fiabilitățile $R_{1,2}$, $R_{4,5}$, $R_{7,8}$ și $R_{10,11}$, obținându-se o structură echivalentă.



$$R_{1,2} = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \rightarrow e_{12}$$

$$R_{4,5} = 1 - (1 - R_4)(1 - R_5) \rightarrow e_{45}$$

$$R_{7,8} = R_7 \cdot R_8 \rightarrow e_{7,8}$$

$$R_{10,11} = R_{10} \cdot R_{11} \rightarrow e_{10,11}$$

$$C_{1,2,3,4,5,6}$$

$$C_{7,8,9,10,11}$$

$$= 1 - (1 - R_{7,8})(1 - R_9) = 1 - (1 - R_7 R_8)(1 - R_9)$$

$$R_{7,8,9,10,11} = R_{7,8,9} \cdot R_{10,11} = [1 - (1 - R_7 R_8)(1 - R_9)] R_{10} R_{11}$$

$$R_{1,2,3,4,5,6} = R_{1,2} \cdot R_3 \cdot R_{4,5} \cdot R_6 = [1 - (1 - R_1)(1 - R_2)] R_3 [1 - (1 - R_4)(1 - R_5)] R_6$$

$Q_{12...11}$

$$R_{1,2,...11} = [1 - (1 - R_{1,2...6})(1 - R_{7,8...11})]$$

$$R_{1,2,...11} = \{1 - [1 - (1 - R_1)(1 - R_2)] \cdot [1 - (1 - R_4)(1 - R_5)]\} \cdot \\ \cdot \{1 - [1 - (1 - R_7R_8)(1 - R_9)]\} R_3 R_6 R_{10} R_{11}$$

REDUNDANȚA SISTEMELOR

Redundanța reprezintă un proces tehnic de creștere a fiabilității unui sistem, prin introducerea în paralel cu un element vulnerabil din punct de vedere al fiabilității a unor elemente sau blocuri de rezervă, care pe măsură ce apar defecțiuni să fie introduse ca elemente active în sistem, în locul elementului (blocului) defect, preluând toate funcțiile acestuia.

Ansamblul format din elementul principal și elementele sale de rezervă constituie **grupul de rezervă**.

Principial, prin acest procedeu se pot obține fiabilități oricât de mari.

Se disting trei tipuri de redundanță:

□ **redundanță activă** – la care elementele de rezervă se găsesc în același regim de funcționare ca și elementul principal. Fiabilitatea grupului depinde de momentul branșării

□ **redundanță semiactivă** – la care elementele de rezervă se găsesc în regim de funcționare redus față de cel al elementului principal, până în momentul branșării sale. În perioada de așteptare probabilitatea de defectare a elementului de rezervă este mult mai mică decât a elementului principal. Acest tip de redundanță este mai general și întrunește frecvența maximă în construcția de mașini

❑ **redundanța pasivă** – la care elementele de rezervă se află în repaus și, ca atare, nu se pot defecta înainte de accesare.

Din punct de vedere al complexității grupului de rezervă se deosebesc:

❑ **redundanța la nivel de sistem**, când se prevede dublarea, triplarea etc. a structurii inițiale a sistemului

❑ **redundanța la nivel de bloc (modul)**, când se prevede dublarea, triplarea etc. a modulului principal (blocul sau modulul conținând un grup de elemente independente care nu mai aparțin la alte grupuri)

❑ **redundanța la nivel de element**, când se prevede dublarea, triplarea etc. a unui element.

În principiu, alegerea numărului de elemente se face astfel ca un anumit parametru, în raport cu criteriul utilizat, să fie extremul unei funcții (un maxim sau un minim). Funcția de optimizare în cauză poate fi: fiabilitatea, numărul de elemente, costul elementelor, greutatea structurii, volumul structurii etc.

Principalele criterii practice sunt:

- ❑ obținerea unei fiabilități maxime, **cu un număr dat de elemente**
- ❑ obținerea unei fiabilități impuse **cu un număr minim de elemente**
- ❑ obținerea unei fiabilități maxime **la un cost dat al elementelor**
- ❑ obținerea unei fiabilități date **cu un cost minim al elementelor**.

Se admite un sistem cu elementele:

$$e = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$$

dispuse în serie, având funcția de fiabilitate:

$$h(R_1, R_2, \dots, R_n) = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n = \prod_{i=1}^n R_i$$

Se notează f_k , $k = \{k_1, k_2, \dots\}$ structura obținută prin punerea în paralel a k_i elemente identice cu elementele structurii inițiale, ($i=1, 2, \dots, n$):

$$r_i(k) = \prod_{i=1}^n r_i(k_i) \quad r_i(k_i) = 1 - (1 - R_i)^{k_i+1} \quad \text{- funcția de fiabilitate a structurii cu redundanța } k$$

Pentru un sistem serie, în structura inițială:

$$k = 0, r_i(0) = R_i \quad \text{și} \quad r(0, 0, \dots, 0) = h(R_1, R_2, \dots, R_n) = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n$$

Dacă se dublează elementul e_i al structurii inițiale ($k_i = 1$), atunci:

$$r_i(1) = 1 - (1 - R_i)^2 \quad \text{și} \quad r(0, \dots, 1, \dots, 0) = R_1 \cdot \dots \cdot [1 - (1 - R_i)^2] \cdot \dots \cdot R_n$$

Dacă $r(0, \dots, 1, \dots, 0) \geq R$, unde R este fiabilitatea impusă, atunci $k_i = 1$ este numărul minim de elemente redundante, altfel se repetă calculul prin iterații până când $r(k) \geq R$.

Algoritmul de optimizare conține următorii pași:

- ☐ se calculează fiabilitatea structurii inițiale ($k_i = 0$)
- ☐ se verifică dacă $r(k) \geq R$. Dacă $r(k) < R$, se face $k_i = 1$ și se calculează $r_i(k_i)$
- ☐ se determină creșterea maximă a funcției $r_i(k_i)$ și se stabilește care element al ei trebuie redondat
- ☐ se repetă calculul pentru o nouă iterație până când $r(k) \geq R$.

LEGI DE DISTRIBUTIE UTILIZATE ÎN STUDIILE DE FIABILITATE

În procesele de fabricație și de exploatare a sistemelor tehnice intervin o serie evenimente caracterizate prin mai multe mărimi aleatoare, utilizate pentru definirea indicatorilor de fiabilitate.

Pentru crearea unui model statistic al comportamentului din punct de vedere al fiabilității, se apelează la noțiunea de variabilă aleatoare, care este descrisă din punct de vedere matematic prin funcția de repartiție (distribuție).

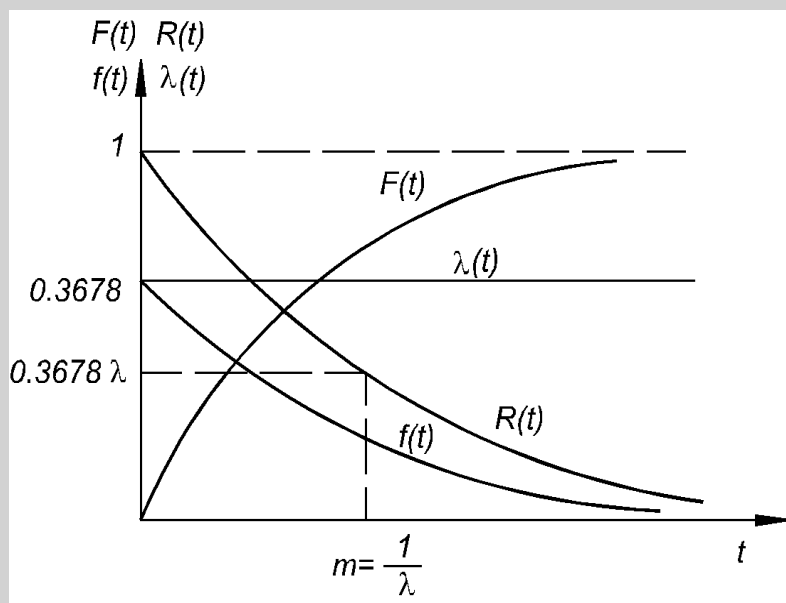
În studiile de fiabilitate repartițiile se referă, în general, la evenimente de tip defectare.

Cele mai uzuale funcții de repartiție asociate comportamentului din punct de vedere al fiabilității sistemelor tehnice sunt:

- Distribuția exponențială
- Distribuția normală
- Distribuția Weibull
- Distribuția logaritmică.

Distribuția exponențială

- legea este specifică unei rate constante de defectare, $z(t) = \lambda = \text{const.}$ și corespunde **perioadei vieții utile a sistemelor** (sisteme complexe, după trecerea perioadei de rodaj)
- pentru $t=m=1/\lambda$, rezultă $R=0.3678$



Variația parametrilor de fiabilitate
(distribuția exponențială)

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$z(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \text{const.}$$

$$m = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \frac{1}{\lambda} = \text{MTBF}$$

$$D = \int_0^{\infty} (t - m)^2 f(t) dt = \frac{1}{\lambda^2}$$

$$\sigma = \sqrt{D} = \frac{1}{\lambda} = m$$

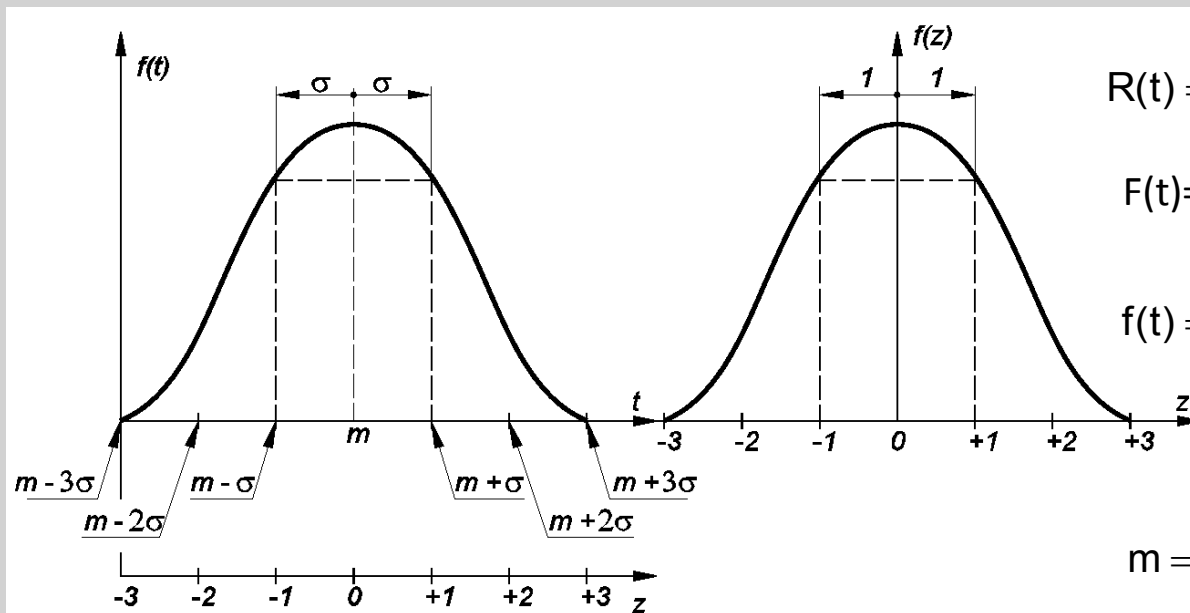
Distribuția normală

- specifică proceselor de fabricație, în special în producția de masă, în cercetarea științifică, în funcționarea produselor tehnice în perioada de îmbătrânire
- admite un punct de maxim la $t = m$:

$$f(m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

și scade asimptotic spre axa absciselor, la stânga și la dreapta acestuia

- este simetrică față de ordonata corespunzătoare valorii medii m
- are formă de clopot cu convexitatea orientată în sus; curba are două puncte de inflexiune.



$$R(t) = -\int_t^{\infty} f(t) dt = -\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt$$

$$F(t) = 1 - R(t)$$

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

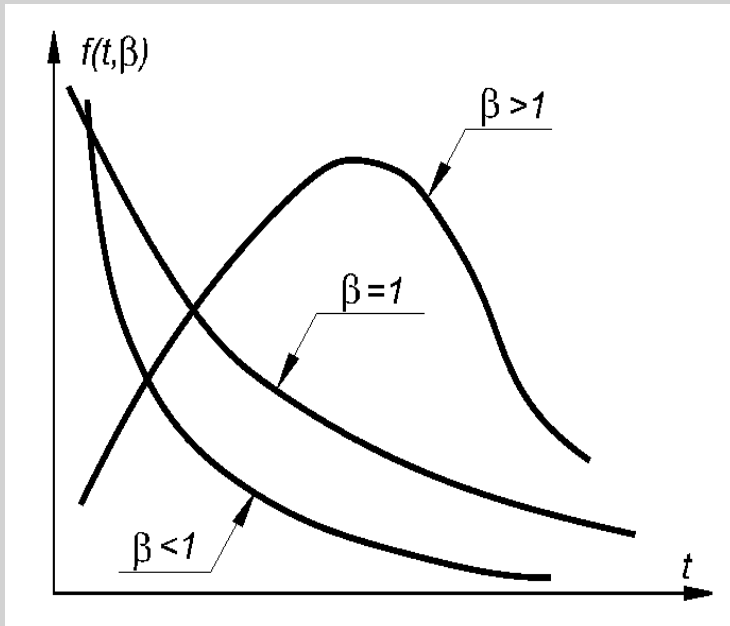
$$m = \int_{-\infty}^{\infty} t \cdot f(t) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} t e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt$$

Densitatea de probabilitate a unei variabile aleatoare normale (stânga) respectiv a unei Variabile aleatoare normale normate (dreapta)

$$D(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [t - M(t)]^2 f(t) dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (t-m)^2 e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt$$

Distribuția Weibull normalată

- se poate aplica cu succes pentru oricare din perioadele vieții produselor cu componente supuse uzurii fizice



Funcția de distribuție Weibull
pentru diferite valori ale parametrului β

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta}}$$

unde $\lambda = \frac{1}{\eta^{\beta}}$ sau $\eta = \frac{1}{\sqrt[\beta]{\lambda}}$

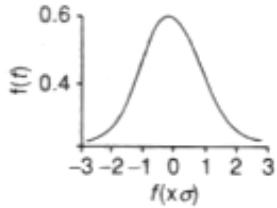
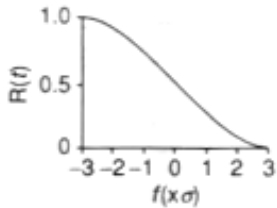
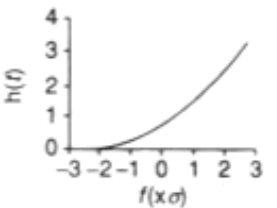
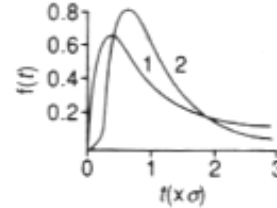
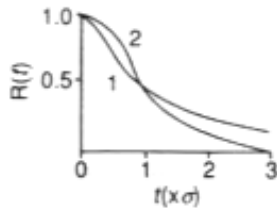
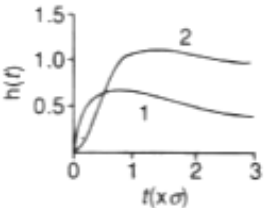
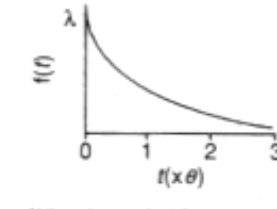
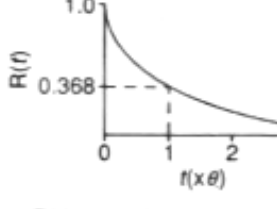
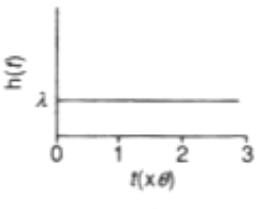
$$F(t) = \int_{-\infty}^T f(t) dt = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta}}$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta}}$$

$$MTBF = \eta \Gamma \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right)$$

$$D = \eta^2 \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]$$

Legi de distribuție și indicatori de fiabilitate

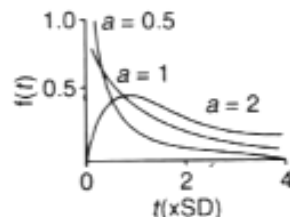
Type of distribution	Parameters	Probability density function, $f(t)$	Reliability function, $R(t) = 1 - F(t)$	Hazard function (instantaneous failure rate). $h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$
Normal	Mean, μ Standard deviation, σ	 $f(t) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp \left[-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]$	 $R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$	 $h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \text{ (general } R(t) \text{ expression)}$
Lognormal	Mean, μ Standard deviation, σ	 $f(t) = \frac{1}{\sigma t(2\pi)^{1/2}} \exp \left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]$	 $R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$	 $h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \text{ (general } R(t) \text{ expression)}$
Exponential	Failure rate, λ MTBF (=SD), θ $\theta = \lambda^{-1}$	 $f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$	 $R(t) = \exp(-\lambda t)$	 $h(t) = \lambda = \theta^{-1}$

Gamma

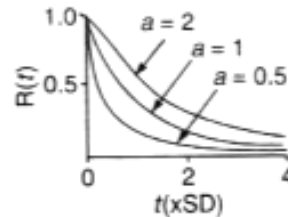
Failure rate, λ
Events per failure,
or Time to ath
failure
 $SD = a^{1/2}/\lambda$

Note: when a is
an integer

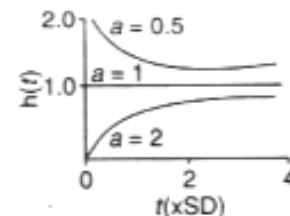
$$\Gamma(a) = (a-1)!$$



$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(a)} (\lambda t)^{a-1} \exp(-\lambda t)$$



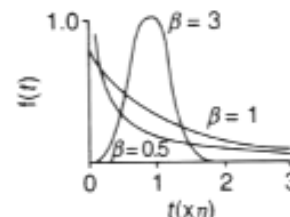
$$R(t) = \frac{\lambda^a}{\Gamma(a)} \int_t^\infty t^{a-1} \exp(-\lambda t) dt$$



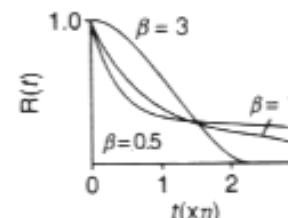
$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \text{ (general } R(t) \text{ expression)}$$

Weibull

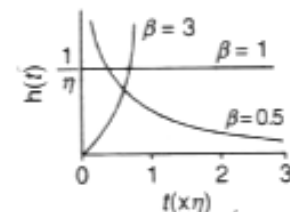
Shape, β Scale
(characteristic
life), η
Location
(minimum life), γ
Curves shown
for $\gamma = 0$



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



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



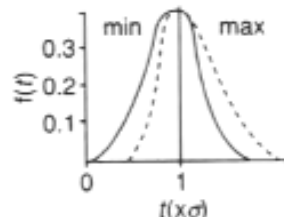
$$h(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta}$$

Extreme value

Scale, σ
Location (mode), μ
 $SD = 1.283\sigma$
Type I
Means = $\mu + 0.577\sigma$
Type II is
ln (EV)
+ for max
- for min

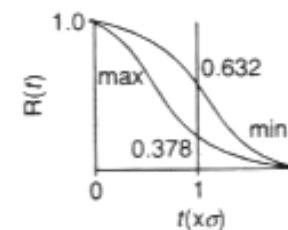
Type III (min) is Weibull

Maximum
values
Minimum
values



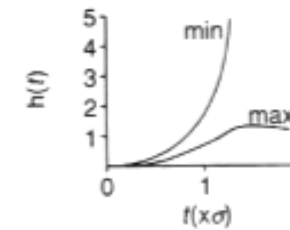
$$f(t) = \frac{1}{\sigma} \exp\left[\frac{(t-\mu)}{\sigma} \left[-\exp\left(-\frac{t-\mu}{\sigma}\right)\right]\right]$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma} \exp\left[\frac{t-\mu}{\sigma} \left(-\exp\left(-\frac{t-\mu}{\sigma}\right)\right)\right]$$



$$R(t) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{t-\mu}{\sigma}\right)\right]$$

$$R(t) = \exp\left[-\exp\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)\right]$$



$$h(t) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$$

$$h(t) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$$

FIABILITATEA SISTEMELOR MECATRONICE An I ICMR

2019