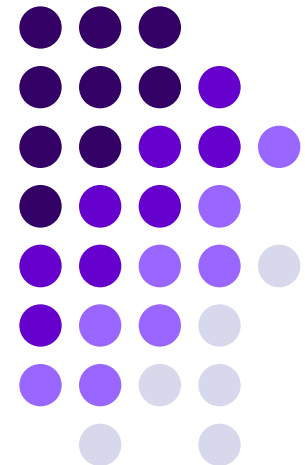
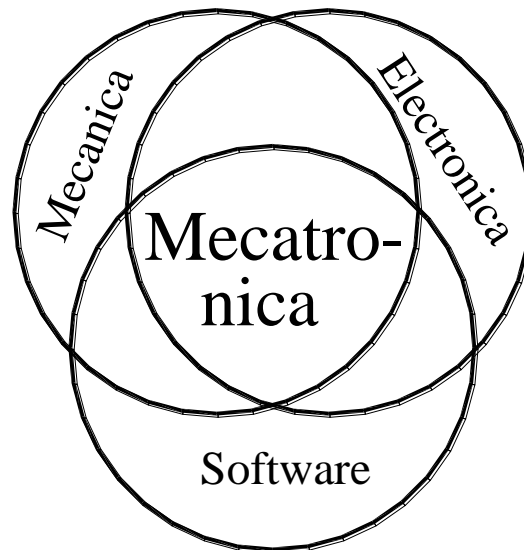
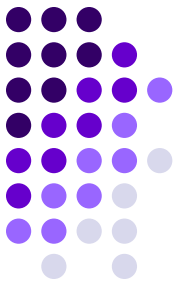


# PROIECTAREA SISTEMELOR MECATRONICE





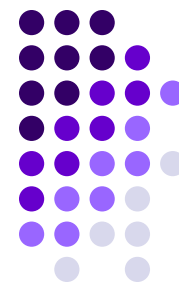
# Cuprins

## Hazard, fiabilitate si proiectare

### / 2

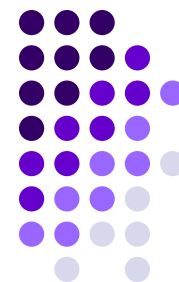
- Metoda FMEA
- Metoda ETA
- Metoda FTA
- Fiabilitate

# Metoda FMEA



- FMEA - Analiza defectelor și a efectelor **F**ailure **M**odes and **E**ffects **A**nalysis - metodologie de identificare a modurilor potențiale de defecțiune și a hazardului asociat cu proiectarea detaliată a produsului sau procesului;
- Literatura de specialitate face referire la următorii pași:
  - ❖ descrierea sistemului sau procesului în condițiile unei defecțiuni luate în considerare;
  - ❖ identifică toate căile prin care un sistem sau un proces se poate defecta. Se utilizează informațiile din baza de date, experienței personale sau a unui proces de creație (asemănător brainstorming);
  - ❖ identifică simptomele fiecărui mod de defecțiune care ar putea ajuta la detecție;
  - ❖ determină efectul fiecărui mod de defectare;
  - ❖ evaluează probabilitatea fiecărui mod de defectare posibil;
  - ❖ evaluează probabilitatea pierderile (pagubele) personale și proporția avariei pentru fiecare mod de defectare;
  - ❖ calculează indicele de pericol (*danger index*) de la pașii 5 & 6 și multiplică probabilitățile sau rangurile împreună.

# FMEA / gravitatea pericolului

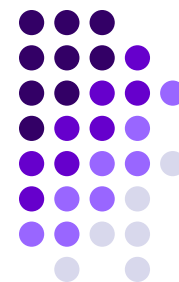


- Gravitatea pericolului este luată în considerare pe baza unei scări cu patru valori:

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

- McDermott, 1996 și Dieter, 2000 - propun o ierarhizare pentru nivelul de risc prin calcul pe baza de:
  - ❖ probabilitatea de apariție;
  - ❖ gravitatea pericolului.

# Nivelul riscului



**Nivelul riscului:**

$$risc = (p\_a) \cdot (c\_g)$$

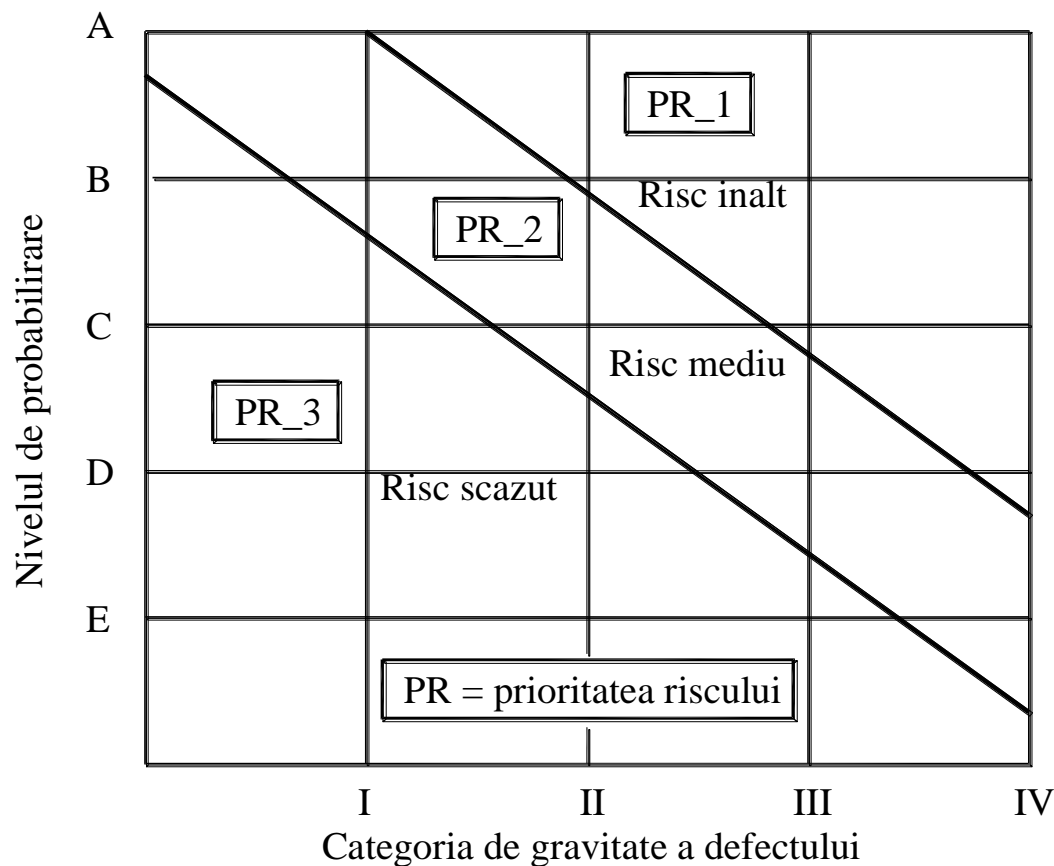
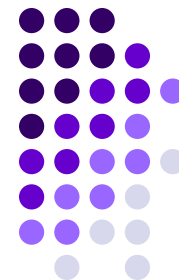
unde:  $p\_a$  – reprezintă probabilitatea de apariție;

$c\_g$  – reprezintă categoria gravității apariției defectului.

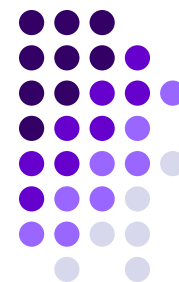
**Probabilitatea de apariție** - cuantificată pe baza a cinci nivele: A, B, C, D, E

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

# Matricea de risc



## Eveniment - probabilitate



**Numărul priorității de risc** (risk priority number – RPN):

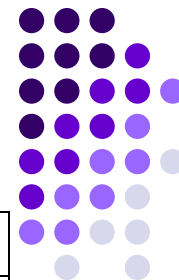
$$RPN = (g\_d) \cdot (p\_a) \cdot (p\_d)$$

unde: g\_d – reprezintă cantitativ gravitatea defectului; p\_a – reprezintă probabilitatea de apariție; p\_d – reprezintă probabilitatea de detecție

### Concluzii

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

## Scala pentru efectul produs prin defect

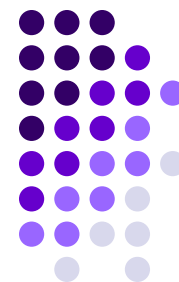


**Scala de normare pentru gravitatea efectului produs prin defect**

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



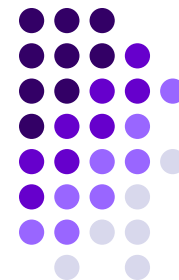
# Probabilitatea de apariție



**Scala de normare pentru probabilitatea de apariție**

Estimare	Descriere	Dieter [2000]	McDermott [1996]	
		O apariție la ? evenimente	O apariție la ? evenimente	O apariție
<b>1</b>	Extrem de îndepărtată	1.000.000	$\geq 500.000.000$	în 5 - ani
<b>2</b>	Foarte puțin probabilă	100.000	500.000.000	în 3 - 5 ani
<b>3</b>	Foarte ușor întâmplătoare	25.000	1.666.667	în 1- 3 ani
<b>4</b>	Ușor întâmplătoare	2.500	16.667	la 1 an
<b>5</b>	Ocazională	500	10.000	la 6 luni
<b>6</b>	Moderată	100	333	la 3 luni
<b>7</b>	Destul de frecventă	25	100	pe lună
<b>8</b>	Ridicată	5	20	pe săptămână
<b>9</b>	Foarte înaltă	3	3	oricare zi
<b>10</b>	Extrem de înaltă	$\leq 2$	$\leq$	pe zi

# Probabilitatea de detectie

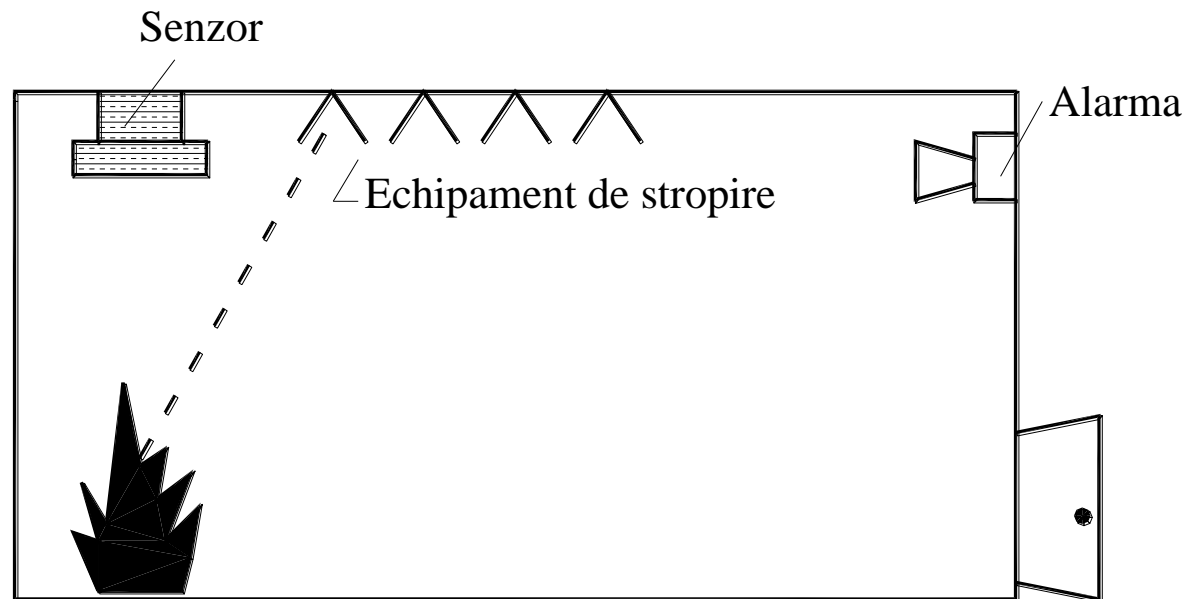


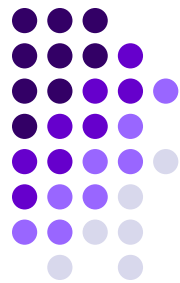
Scala de ierarhizarea a probabilității de detectare a defectului		
Estimare	Service	Fabricație
<b>1</b>	Aproape sigur	100 % inspecție automată (SPC) + calibrare & întreținere preventivă
<b>2</b>	Foarte înalt	100 % inspecție automată (SPC)
<b>3</b>	Înalt	100 % SPC ( $C_{pk} \geq 1.33$ )
<b>4</b>	Moderately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

# Metoda ETA

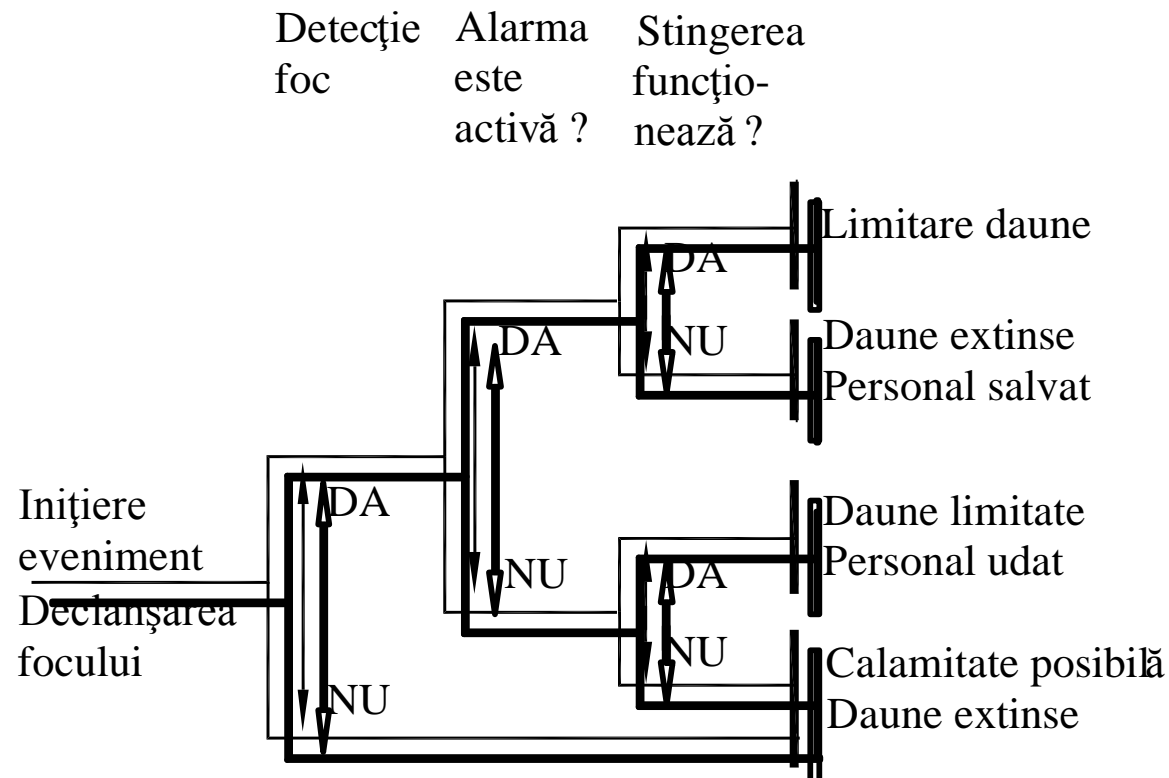
- o metodă de apreciere a riscului;
- utilizeaza graful evenimetelor;
- **Event Tree Analysis** – ETA;
- o metodă de analiză și cuantificare bazată pe logică binară.

## Exemplul\_1





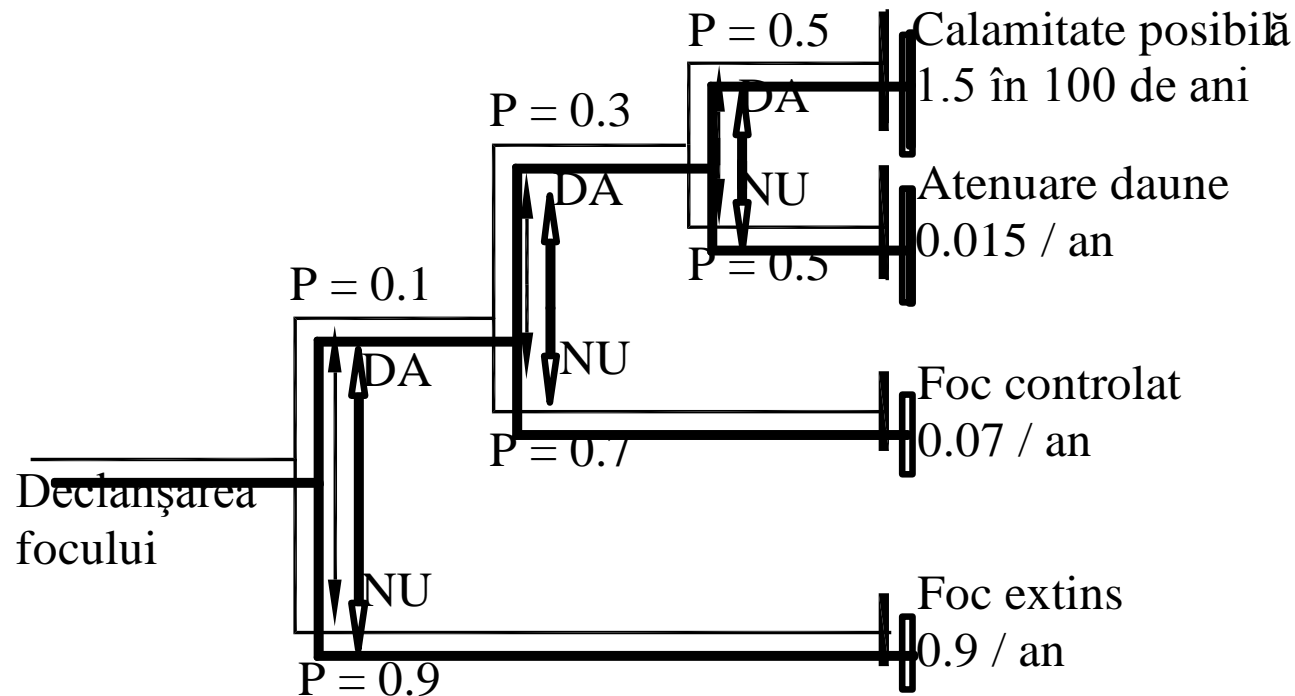
- Arborele evenimentelor pentru cazul analizat;
- Sunt sugestionate în afara evenimentelor și rezultate previzionale



## Exemplul\_1


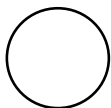
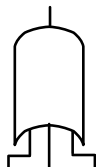
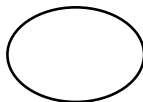

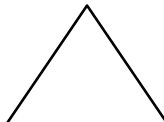
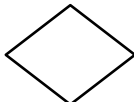
### Analiza cantitativă a protecției sistemului

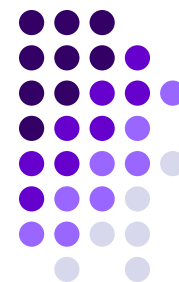
Inițiere eveniment	Focul se extinde repede ?	Stingerea este absentă ?	Personalul poate evada ?	Rezultat eveniment
-----------------------	---------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----------------------



# Metoda FTA (Fault Tree Analysis)

**Metoda FTA** - o metodă grafică de conectare a defectelor posibile dintr-un sistem / proces într-o schemă logică de analiză.

	<p>“Poarta” <b>AND</b></p> <p>Semnalul de ieșire este prezent numai dacă toate semnalele de intrare sunt prezente simultan</p>		<p>Simbolul <b>circular</b></p> <p>reprezintă evenimentul de baza.</p>
	<p>“Poarta” <b>SAU</b></p> <p>Semnalul de ieșire va fi prezent dacă unul sau mai multe semnale de intrare sunt prezente</p>		<p>Simbolul <b>oval</b></p> <p>reprezintă o situație specială defintă de existența unui evinement sigur.</p>
	<p>Simbolul <b>rectangular</b></p> <p>este principalul bloc pentru graficul analitic</p>		<p>Simbolul <b>triunghi</b></p> <p>semnifica transferul ramificației spre o altă locație</p>
	<p>Simbolul <b>romb</b> identifica un evenimet terminal nede dezvoltat. Acest lucru se datoreaza lipsei de informație sau semnificație.</p>		



Procedura **metodei FTA** respectă următoarea etapizare:

- Identifică evenimentului de prim rang pentru a fi analizat;
- Identifică evenimentele sau seria de elemente care contribuie în mod direct la evenimentul de rang superior;
- Continuă aceste etape până la nivelul de bază;
- Realizează schema logică și implementează modelul
- Consideră situații alternative și propune soluții.

Poarta “**ȘI**”

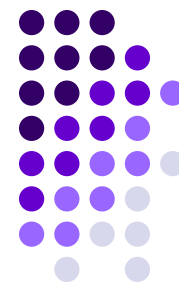
$$p(A) = p(B) \cdot p(C)$$

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

Poarta “**SAU**”

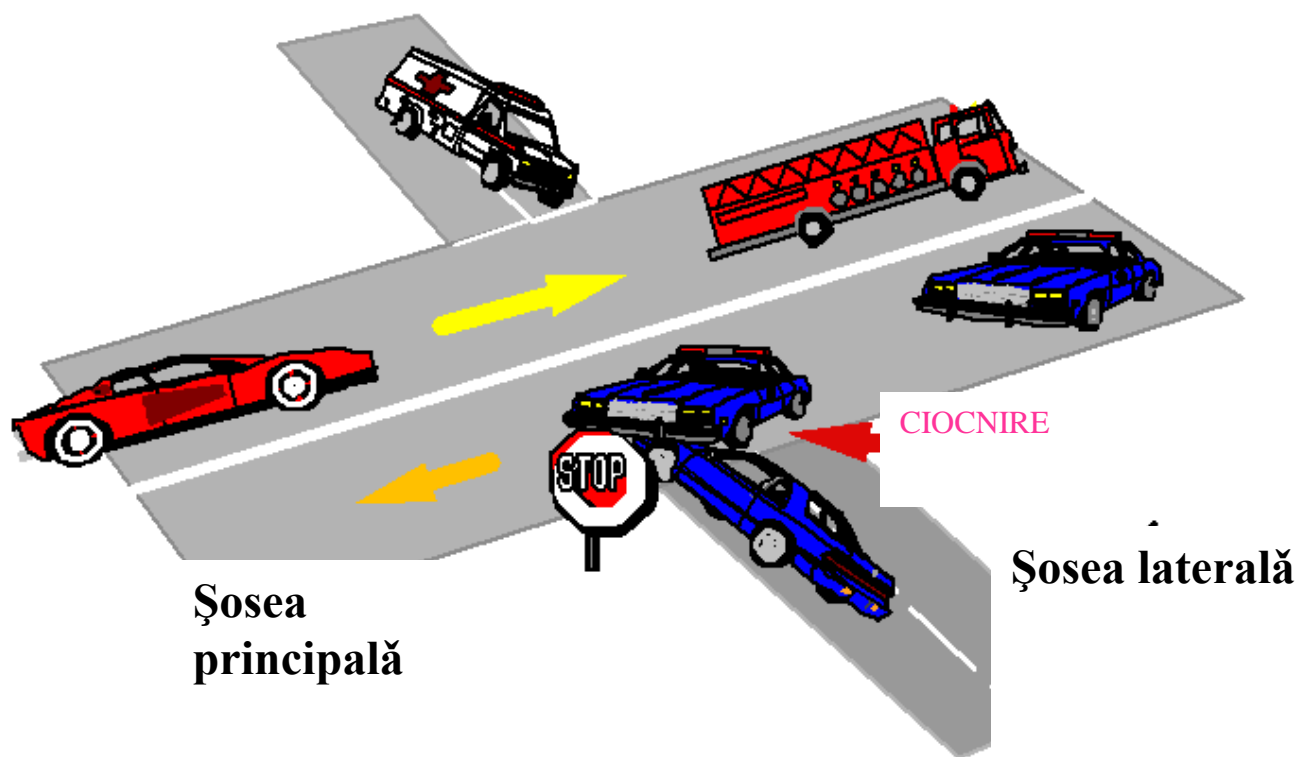
$$p(A) = p(B) + p(C) - p(B) \cdot p(C)$$

$$\begin{aligned}
 p(A) = & p(B) + p(C) + p(D) - [p(B) \cdot p(C) \\
 & + p(B) \cdot p(D) + p(C) \cdot p(D)] - p(B) \cdot p(C) \cdot p(D)
 \end{aligned}$$



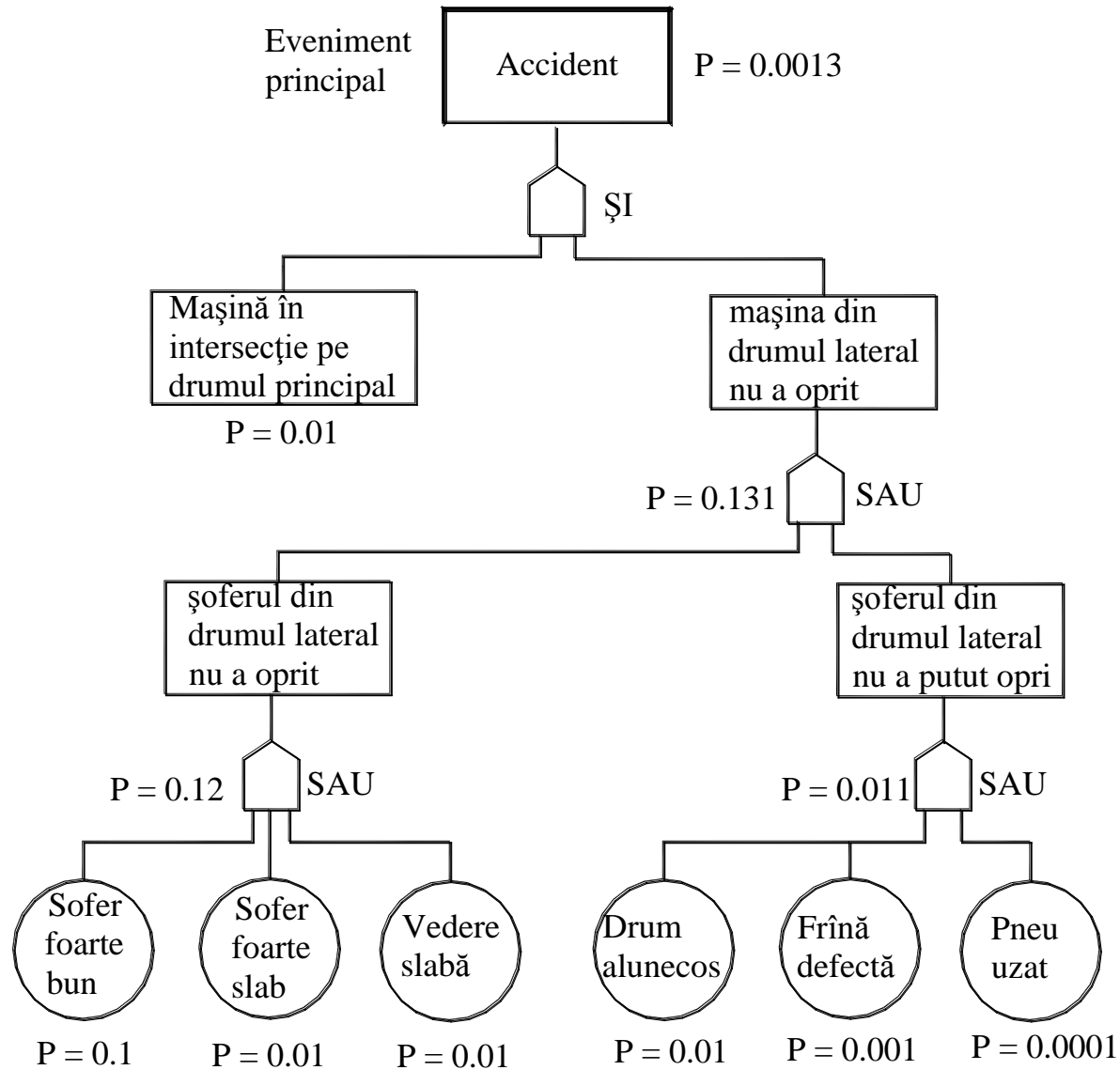
## Exemplul\_2

Se analizează riscul de producere a unui accident într-o intersecție (SCANIA)



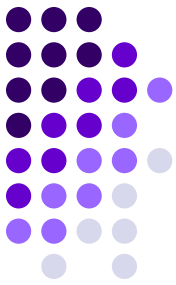


## Exemplul\_2

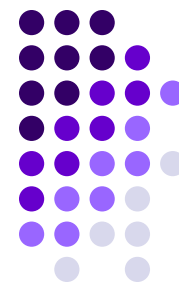


**Arborele defectelor și  
calculul riscului de  
producere a  
accidentului**

## Fiabilitate



- **Fiabilitatea unui “obiect”** - capacitatea acestuia de a-și îndeplini funcția pentru care a fost proiectat, un anumit interval de timp și cu o probabilitate cunoscută;
- Metrologic - 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 - parametrii săi de performanță:
  - ❖ capacitatea de funcționare;
  - ❖ buna stare a unui sistem;
  - ❖ capacitatea de stocare;
  - ❖ durata de viață;
  - ❖ funcționarea fără defecțiuni;
  - ❖ disponibilitatea;
  - ❖ dependabilitatea;
  - ❖ capabilitatea;
  - ❖ capacitatea de reparare;
  - ❖ restabilirea.



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

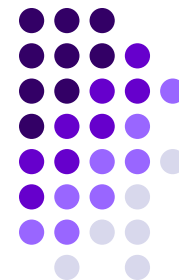
$$p(t) = R(t) = P(T > t)$$

**Funcția de repartiție** –  $q(t)$ ; Uneori este comodă utilizarea probabilității ieșirii din funcțiune a sistemului în intervalul de timp prescris  $t$ , în condiții date

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

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

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

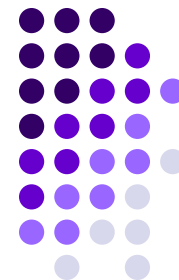


<b>Surse interne</b>	Teste simple de laborator: cercetare, prototip, mediu, etc. Sunt necesare informații referitoare la: componentele încercate, condițiile de mediu (tipul testului, temperatură, vibrații etc.), mărimea testului, descrierea defectelor.
	Baze de date ale laboratoarelor
<b>Surse externe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

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

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

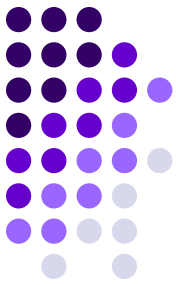
# Rata de defectare



Componenta	$\lambda \times 10^6$ ore
Lagăre	0.5
Rulmenți cu bile (pentru viteze mici)	0.875
Rulmenți cu bile (pentru viteze mari)	1.8
Ghidaje de translație	0.21
Came	0.002
Cuplaje	0.04
Cuplaje magnetice	0.6
Cuplaje cu fricțiune	0.3
Cilindri hidraulici	0.008
Cilindri pneumatici	0.004
Etanșare din cauciuc	0.02
Etanșare - inel "O"	0.02

unitate de măsură pentru rata de defectare:

$$1 \text{ FIT} = \frac{1 \text{ defectiune}}{10^9 \text{ h}}$$



## Exemplul\_3

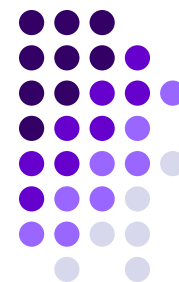
Se consideră un sistem stereo compus din 3 elemente. Ratele de defectare a celor trei componente sunt : CD drive - 0.0002 defecte / h, ammplificator – 0.00001 defecte / h, difuzor – 0.0001 defecte / h. Care este fiabilitatea sistemului pentru 100 h de funcționare ?



$$\sum \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0.0002 + 0.00001 + 0.0001 = 0.00031 \text{ defecte / h}$$

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

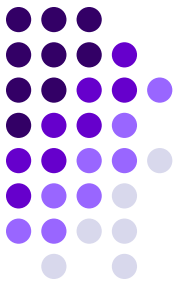
## Exemplul\_4



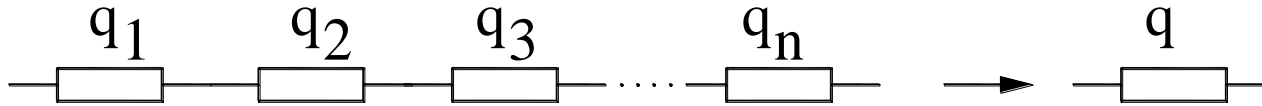
*Un sistem complex este format dintr-un anumit număr de elemente componente cu ratele medii de defectare specificate. Se cere să se estimeze fiabilitatea sistemului pentru o funcționare de 750 h.*

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

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

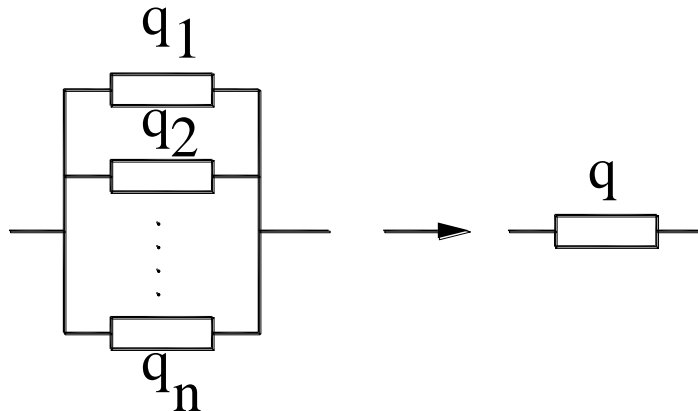


## elemente conectate în serie



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

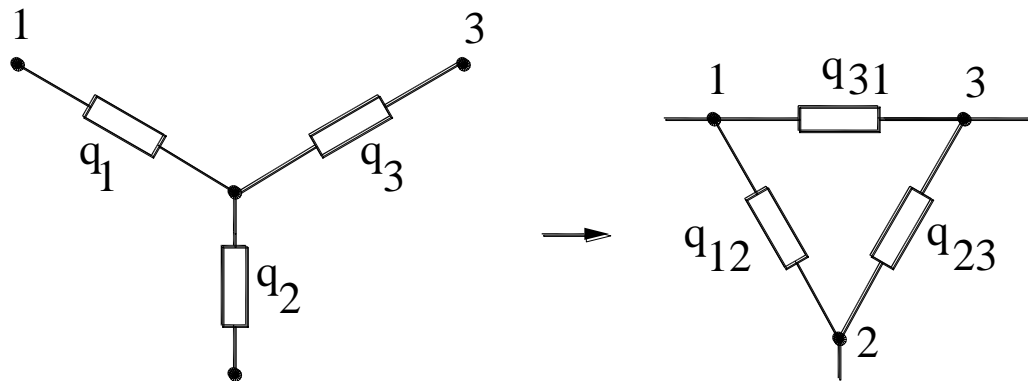
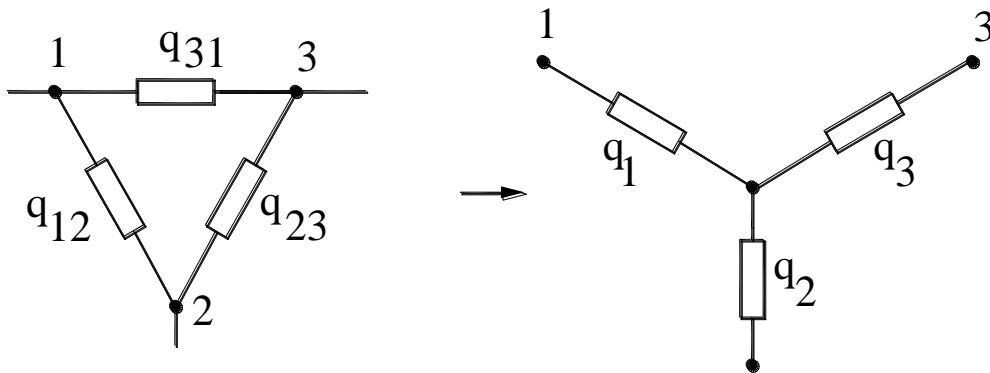
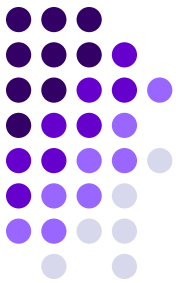
## elemente conectate in paralel



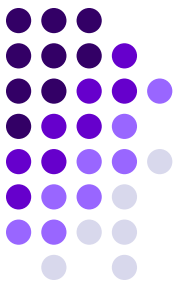
$$q = \prod_{i=1}^n q_i$$



# Fiabilitate/scheme

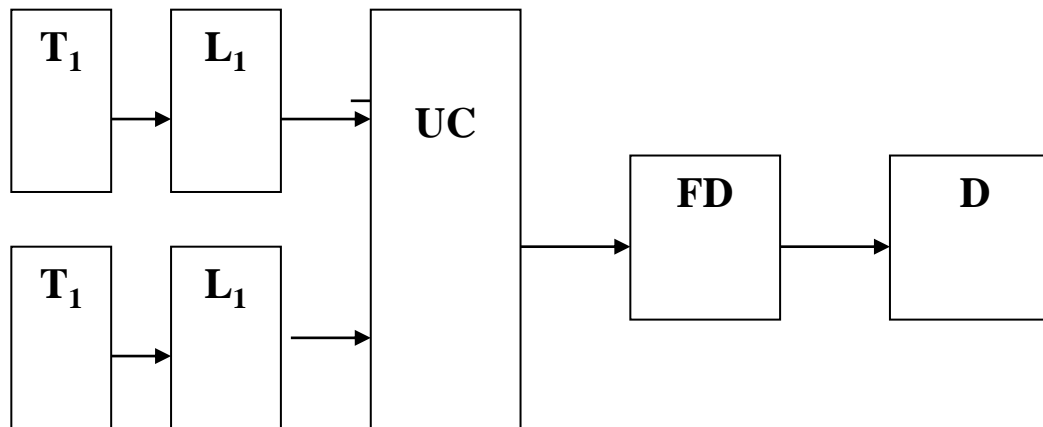


$$q_1 \approx q_{12} \cdot q_{31} ; q_2 \approx q_{12} \cdot q_{23} ; q_3 \approx q_{23} \cdot q_{31}$$



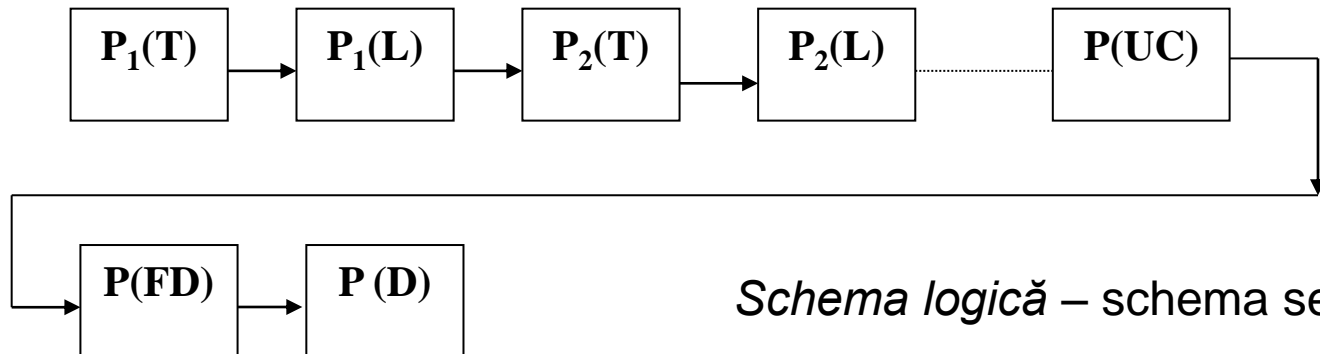
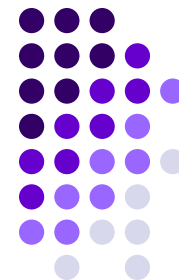
## Exemplul\_5

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



## Observatie

**Din punctul de vedere al funcționării sistemului, terminalele și liniile sunt conectate în paralel. Totuși ieșirea din uz a unuia conduce la declararea stării de defect a sistemului.**



Schema logică – schema serie

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

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

$n=1$  determină  $P=0.8521 > 0.8$

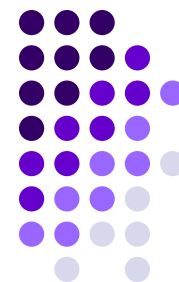
$n=2$  determină  $P=0.812 > 0.8$

$n=3$  determină  $P=0.775 < 0.8$

Observatie - se introduc in paralel: 2 FD si 2 D

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

## Calculul fiabilitati / exemple



**O diodă electroluminiscentă (LED)** este defectă dacă nu emite lumină și nivelul de degradare este  $> 70 \%$ .

Rata de defectare a componentei electronice este determinată de temperatura joncțiunii. Valoarea acestei temperaturi este:

$$T_J = T_{amb} + R_{th} \cdot P_m$$

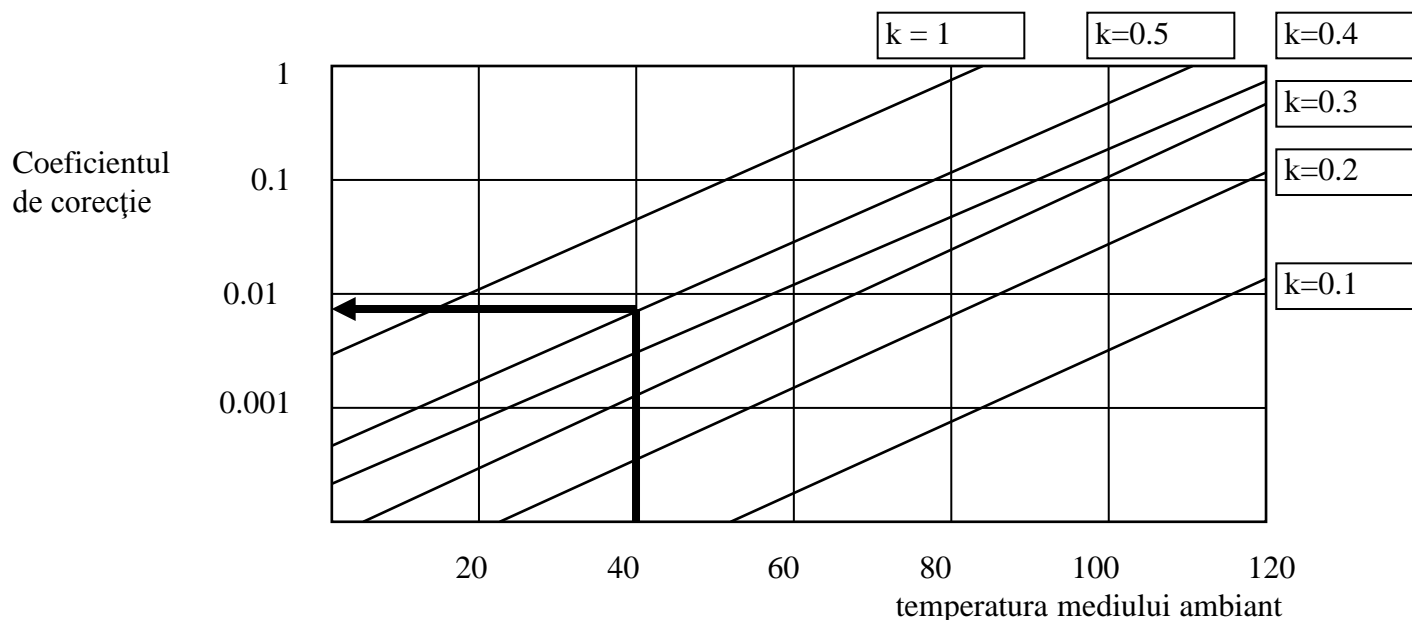
unde: -  $T_{amb}$  este temperatura mediului ambiant [0C];  $R_{th}$  – este rezistența termică joncțiune – mediu [°C/Watt];  $P_m$  – este puterea medie disipată.

Pentru un **condensator** raportul între tensiunea de lucru și tensiunea nominală din catalog definește coeficientul de sarcină:

$$K_U = \frac{U}{U_n}$$

# Coeficientul de corectie functie de temperatura

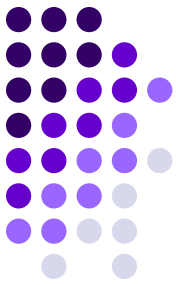
Pentru un condensator:



**Exemplu:** Un condensator cu tantal ( $10 \mu F$ ) are valoarea nominală a tensiunii  $10 V$  și lucrează într-un mediu cu temperatura  $40 ^\circ C$ , la o tensiune de  $5 V$ . Coeficientul de reducere a sarcinii de funcționare are valoarea :

$$K = \frac{\text{tensiunea de operare}}{\text{tensiunea nom.}} = \frac{5}{10} = 0.5 \quad \rightarrow K_V = 0.008$$

## Rata de defectare a condensatorului

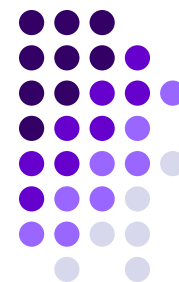


Rata de defectare de calcul pentru condensatoare se definește ca fiind:

$$\lambda = \lambda_{85} \cdot K_V \cdot K_R$$

unde: -  $\lambda_{85}$  este rata de defectare fundamentală (pentru 1000 h de funcționare la 85 °C) (tabel);  $K_V$  – coeficient de corecție datorat temperaturii mediului ambiant;  $K_R$  – coeficient de corecție pe circuitul rezistiv

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



- Firmele constructoare utilizează metode evaluare diverse pentru același tip de reper;
- Estimarea ratei de defectare a condensatoarelor cu tantal are la bază relația de calcul [ $\lambda$  – este rata de defectare în condițiile de lucru (tensiunea  $V$ , temperatura mediului  $T$ );  $\lambda_0$  – este rata de defectare în condițiile nominale de funcționare ( $V_0$  – tensiunea nominală,  $T_0$  – temperatura nominală)]:

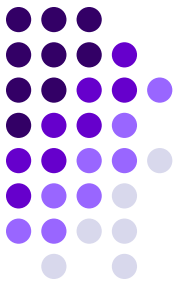
$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left( \frac{V}{V_0} \right)^3 \cdot 2^{\frac{T-T_0}{10}}$$

### Exemplul\_6

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

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

## Fiabilitate / estimare rata de defectare



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

• rata de defectare: 
$$\lambda = \frac{N}{K_T \cdot K_U \cdot H}$$

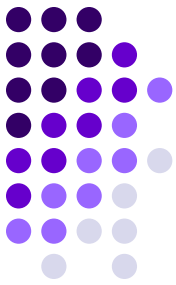
unde:  $N$  – este numărul de defecte în  $t$  ore funcționare,  $K_T$  – factorul de accelerare pentru temperatură,  $K_U$  – factorul de accelerare pentru tensiune,  $H$  – număr de ore dispozitiv definit ca fiind

$$H = n \cdot t \cdot 10^9$$

( $n$  – numărul de dispozitive,  $t$  – durata de încercare [h]).



# Fiabilitate / estimare rata de defectare



**Factorul de accelerare pentru temperatură:**

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

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

**Factorul de accelerare pentru tensiune:**

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

unde:  $\beta = 2.5$  [V<sup>-1</sup>] - termenul de accelerare pentru tensiune,  $U_1$  – tensiunea de testare,  $U_2$  – tensiunea nominală