

ABSTRACT

Reliability analysis is a method by which the degree of successful performance of a system, under certain stipulated conditions, may be expressed in quantitative terms.

Techniques of quantitative reliability analysis for control rod drive systems, which are presented, consist in drawing up of system block diagrams as basis for the reliability analysis for normal and scram operation; determination of possible fault rates ("mean rates") of system components; reliability analysis of the complete control system (total number of control rod drive mechanisms) on the basis of the analysis of the individual rod drives.

1. Introducere

Prin fiabilitatea unui dispozitiv se înțelege aptitudinea lui de a-și îndeplini funcția specificată în condiții date de-a lungul unei durate de timp date. Fiabilitatea este o proprietate internă a oricărui dispozitiv, o realitate obiectivă inerentă lui.

Cantitativ fiabilitatea oricărui dispozitiv se caracterizează prin indicatori de fiabilitate. Unul dintre primii indicatori de interes în evaluarea fiabilității este "rata medie de defectare", λ {ore⁻¹}. Defectările, interpretate ca evenimente aleatoare succesive, formează un flux de defectări caracterizat în modul cel mai general printr-o distribuție statistică de forma:

$$f(t) = z(t) \cdot \exp\left(-\int_0^t z(t) \cdot dt\right) \quad (1)$$

unde: $f(t)$ este densitatea de repartiție și definește legea de repartiție a timpului de funcționare (fără defectare),

$z(t)$ - rata de defectare și definește probabilitatea instantanee de defectare sau riscul de defectare /2/,

t - durata misiunii și definește perioada de funcționare (nu este un timp calendaristic).

Numai atunci când riscul instantaneu de defectare este constant, fluxul de defectări este complet definit de rata medie de defectare, $z(t) = \lambda$, iar repartiția timpului de funcționare între două defectări consecutive este exponențială, adică:

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \quad (2)$$

Al doilea indicator de fiabilitate, de interes, este "funcția de repartiție", $F(t)$, definită prin probabilitatea ca un dispozitiv să se defecteze în intervalul $(0, t)$, adică:

$$F(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt \quad (3)$$

Complementara acestei funcții este "funcția de fiabilitate", $R(t)$, care reprezintă probabilitatea cum lară de supraviețuire a unui dispozitiv în intervalul $(0, t)$ adică

$$R(t) = \int_t^{\infty} \bar{f}(t) \cdot dt \quad (4)$$

Intre densitatea de repartiție, $f(t)$, riscul de defectare, $z(t)$, și funcția de fiabilitate, $R(t)$ există următoarea relație generală:

$$z(t) = f(t) / R(t) \quad (5)$$

Al treilea indicator de fiabilitate, de interes, este "timpul mediu de funcționare", $m(t)$, care reprezintă valoarea medie a timpului de funcționare pînă la defectare, în cazul dispozitivelor nereparabile - sau pînă la prima defectare în cazul dispozitivelor reparabile. Dacă repararea poate fi asimilată cu înlocuire atunci timpul mediu de funcționare reprezintă valoarea medie a timpului de funcționare între două defectări succesive - notat MTBF - și este dat de următoarea relație:

$$m(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt \quad (6)$$

sau cunoscînd că $f(t) = - \frac{dR}{dt}$ și $R(0) = 1$; $R(\infty) = 0$, de:

$$m = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (7)$$

Al patrulea indicator de fiabilitate ,de interes,este "timpul mediu de restabilire", τ ,definit de suma dintre timpul mediu necesar descoperirii defectului și timpul mediu necesar reparării efective a dispozitivului. Considerînd restabilirea ca un eveniment probabilistic se pot defini în mod similar: funcția de densitate de repartiție a timpului de restabilire, $g(t)$; intensitatea de reparare , $\mu(t)$; funcția de repartiție, $G(t)$; și complementara acesteia $R_d(t)$, legate printr-o relație asemănătoare ecuației (5) :

$$\mu(t) = g(t) / R_d(t) \quad (8)$$

Cu o bună aproximare se poate considera că intensitatea de reparare nu depinde de timp și deci $\mu = \text{constant}$,similar lui λ . Combinarea acestor doi parametri conduce la cel de al cincilea indicator de fiabilitate care este "disponibilitatea", $A(t)$, definită ca fiind probabilitatea ca dispozitivul să fie în stare de funcționare la momentul t .

Ryabinin /3/ definește funcția de disponibilitate astfel:

$$A(t) = \frac{1}{1 + \rho} \{ 1 + \rho \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \} \quad (9)$$

unde: $\rho = \lambda/\mu$ este factorul de calitate,

t este,acuma,timp calendaristic.

Cunoscînd că în cazul respectării "legii exponențiale $m = 1/\lambda$ și că $\tau = 1/\mu$,rezultă valoarea staționară spre care tinde disponibilitatea ,după un timp t_s ,

$$A(t) \Big|_{\infty} = k = \frac{1}{1 + \lambda\tau} = \frac{m}{m + \tau} \quad (10)$$

și reprezintă raportul dintre timpul mediu de funcționare și valoarea medie a unui ciclu funcționare - reparare.

2. Calculul fiabilității mecanismelor de acționare

a barelor de control

Analiza de fiabilitate a sistemelor permite calcularea valorilor prevăzute ale indicatorilor de fiabilitate. Metoda de analiză utilizată în lucrare este o metodă statică bazată pe analiza structurală a sistemului studiat.

Plecând deci, de la structura mecanismelor de acționare se face o analiză de fiabilitate obținând în final o valoare prevăzută pentru rata medie de defectare, λ . Analiza de fiabilitate se face pentru perioade corespunzătoare duratei de viață utilă când riscul instantaneu de defectare este constant și egal cu rata medie de defectare, adică $z(t) = \lambda = \text{constant}$.

Structura mecanismelor de acționare este cunoscută, din punct de vedere al fiabilității, prin modelul structural (schema logică de fiabilitate), model ce pune în evidență legătura existentă între fiabilitatea fiecărui element component și fiabilitatea mecanismelor în ansamblul lor.

Mecanismele de acționare a barelor de control îndeplinesc în principal două funcțiuni distincte /4/ :

- normală, corespunzătoare regimurilor de reglare a puterii și de pornire - oprire controlată a reactorului;
- de "scram", corespunzătoare regimului de oprire rapidă de avarie a reactorului.

Analiza de fiabilitate se va face separat pe cele două funcțiuni, obținându-se în final două valori pentru rata medie de defectare :

- λ_N , rata medie de defectare în funcționare normală și
- λ_S , rata medie de defectare în funcționare la "scram".

Se procedează astfel : se întocmește schema logică structural - funcțională (formată din elemente independente legate în serie

și/sau paralel) pentru fiecare regim de funcționare și
fiecărui element independent i se atribuie o rată medie de defec-
tare, λ_i , luată în general din tabele /5/,/6/.

În continuare se va aplica această metodă de analiză la
prototipul mecanismelor de acționare a barelor de control NCS-80,
prototip realizat de firma INTERATOM din R.F.G. pentru un reactor
PWR de 220 MW_{th} /4/. În figura 1 sînt prezentate schemele logice
structural - funcționale pentru cele două funcțiuni ale prototi-
pului NCS-80.

Avînd, din punct de vedere al analizei de fiabilitate,
pentru fiecare din funcțiuni cîte o schemă logică cu blocuri le-
gate în serie rezultă imediat :

- pentru funcționarea normală $\lambda_N = 5,3 \cdot 10^{-6}$ ore⁻¹
- pentru funcționarea la "scram" $\lambda_S = 4,2 \cdot 10^{-6}$ ore⁻¹.

Aceste valori se vor interpreta astfel : se prevede că în
10⁶ (ore x bare) în funcționare normală să apară 5,3 defectări și
respectiv 4,2 defectări în 10⁶ (ore x bare) în funcționare la
"scram". Perioada de 10⁶ (ore) funcționare la reactorii nuc.
are semnificația de 100 ("ani-reactor"), ceea ce înseamnă o pe-
rioadă de 30 - 35 (ani) de funcționare simultană a 3 (trei) reac-
tori de același tip, perioadă care corespunde duratei de servi-
ciu la CNE. Un al doilea indicator de fiabilitate important
pentru sistemele de exploatare a unei CNE este disponibilitatea.
După cum s-a arătat în introducere calculul disponibilității îm-
plică cunoașterea atât a ratelor de defectare, λ , cît și a pro-
gramului de mentenanță propriu sistemului studiat.

Ehrentreich și Maurer /6/ propun pentru mecanismele de
acționare legate de funcția normală un ciclu de inspecție săp-
tăminal cu $\tau_N = 3,5$ zile = 84 ore, iar pentru cele legate de
funcționarea la "scram" un ciclu de inspecție trimest. al cu
 $\tau_S = 42$ zile = 1008 ore.

Acceptând și pentru cazul prototipului NCS-30 aceeași mentenanță rezultă :

- pentru funcționarea normală

$$\mu_N = 1/\tau_N = 0,0119047 \text{ (ore}^{-1}\text{)}; \rho_N = \lambda_N \cdot \tau_N = 45,2 \cdot 10^{-6}$$

- pentru funcționarea la "scram"

$$\mu_S = 1/\tau_S = 0,000992 \text{ (ore}^{-1}\text{)}; \rho_S = 4233,6 \cdot 10^{-6}$$

Cu aceste date funcțiile de disponibilitate date de relația (9)

sînt : - pentru funcționarea normală

$$A_N(t) = 0,9995549 (1 + 445,2 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0,01191 \cdot t}) \quad (11)$$

cu valoarea $k_N = \frac{1}{1 + \rho_N} = \frac{10^6}{10^6 + 445,2} = 0,99955$

- pentru funcționarea la "scram"

$$A_S(t) = 0,9957842 (1 + 4233,6 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0,0009962 \cdot t}) \quad (12)$$

cu valoarea $k_S = \frac{1}{1 + \rho_S} = \frac{10^6}{10^6 + 4233,6} = 0,9958$

În figurile 2 și 3 s-au reprezentat grafic cele două funcții de disponibilitate (11) și (12). Analiza acestora conduce la următoarele două concluzii: 1- pentru mecanismele legate de funcționarea normală valoarea staționară a disponibilității, k_N , se atinge după cca. 400 ore (aproximativ 2 săptămîni și jumătate) de la prima punere în funcțiune și corespunde la un timp de oprire de 445 ore în 10^6 ore de funcționare; 2- pentru mecanismele legate de funcționarea la "scram" valoarea staționară a disponibilității, k_S , se atinge după cca. 4000 ore (aproximativ 6 luni) de la prima punere în funcțiune și corespunde la un timp de oprire de 4234 ore în 10^6 ore de funcționare.

Cunoscînd atît rata medie de defectare cît și disponibilitatea mecanismelor se poate calcula probabilitatea de funcționare

fără defectare a mecanismelor condiționată de supraviețuirea lor la începutul duratei misiunii t . Presupunând ca momentul începerii duratei misiunii este suficient de îndepărtat de momentul punerii în funcțiune, încât disponibilitatea mecanismului să fi atins valoarea staționară k , atunci fiabilitatea generală va fi:

$$R(\infty, t) = k \cdot R(t) = \frac{1}{1 + \lambda t} \cdot e^{-t/m} \quad (13)$$

În tabelul I sînt prezentate sintetic rezultatele calculului fiabilității prototipului mecanismului de acțiune la NCS-80. Pentru ca aceste rezultate să fie mai apropiate de practica exploatarea reactorilor nucleari, intervalele de timp s-au exprimat în săptămîni (10^6 ore = 5960 săptămîni).

3. Calculul fiabilității sistemului de mecanisme de acționare a barelor de control

La un reactor nuclear totalitatea mecanismelor de acționare a barelor de control formează un sistem independent. Mecanismele care îndeplinesc funcția normală formează sistemul de reglaj al reactorului, iar mecanismele cu funcționare la "scram" formează sistemul de securitate, cî bare, al reactorului respectiv. Există reactori la care mecanismele de acționare îndeplinesc atât funcția normală cît și pe cea de "scram" și în acest caz totalitatea mecanismelor formează un sistem independent cu două funcțiuni.

În continuare se va prezenta o metodă de calcul a fiabilității sistemului de mecanisme de acționare cu funcționare la "scram". Datorită atât aranjării barelor de control în zona activă cît și faptului că fiecărei bare de control îi corespunde un mecanism propriu de acționare, sistemul de mecanisme constituie, din punct de vedere al calculului fiabilității, un sistem paralel și redondant activă.

Rezultă deci că este suficient ca 'n' mecanisme, din cele "m" cît cuprinde sistemul, să funcționeze corect pentru ca sistemul de mecanisme, în ansamblu, să fie considerat fiabil (numărul "n" fiind determinat de raportul de securitate al reactorului). Altfel spus chiar dacă $r = (m - n)$ mecanisme sînt defecte nu este periclitată capacitatea sistemului de a-și îndeplini funcția de securitate specificată.

Fiabilitatea sistemului de mecanisme cu funcționare la "scram", cînd se admit "r" mecanisme defecte, poate fi calculată cu ajutorul distribuției Poisson cumulative /7/, și anume :

$$R_r(t) = \sum_{i=0}^r \frac{(\lambda_s \cdot t)^i}{i!} \cdot e^{-\lambda_s \cdot t} \quad (14)$$

unde: λ_s reprezintă rata medie de defectare a unui mecanism în funcționarea la "scram";

t reprezintă durata misiunii sistemului de mecanisme;

r numărul de mecanisme "acceptate" a fi defecte.

Astfel, pentru cazul cînd nu se admite defectarea nici unui mecanism ($r=0$), fiabilitatea sistemului va fi:

$$R_0 = e^{-\lambda_s \cdot t} \quad (15)$$

Pentru cazul cînd se admite defectarea unui singur mecanism :

$$R_1 = e^{-\lambda_s \cdot t} + \lambda_s \cdot t \cdot e^{-\lambda_s \cdot t} = R_0 \cdot (1 + \lambda_s \cdot t) \quad (16)$$

Iar în cazul cînd se admite defectarea a două mecanisme :

$$R_2 = R_0 \cdot \left(1 + \lambda_s \cdot t + \frac{1}{2} (\lambda_s \cdot t)^2 \right) \quad (17)$$

Rezultă deci că fiabilitatea sistemului crește cu creșterea lui "r". Acest număr "r" este determinat de calculul de securitate a reactorului și poate lua valorile 0 ; 1 sau 2.

Aplicând această metodă la calculul fiabilității sistemului de mecanisme de la prototipul NCS-80 pentru cazurile $r=1$ și $r=0$ s-au obținut datele din tabelul 2. Deoarece în funcționare se obțin, pentru timpul mediu de funcționare, valori diferite de cele determinate teoretic calculele s-au făcut pentru diferite valori ale timpului mediu de funcționare m_g .

În figura 4 s-a reprezentat grafic fiabilitatea sistemului NCS-80 la "scram" funcție de durata misiunii și avînd ca parametru valoarea timpului mediu de funcționare fără defectare pentru cazul $r = 1$.

Analiza acestor diagrame conduce la definirea a două metode general valabile de creștere a fiabilității sistemelor de mecanisme de acționare a barelor de securitate și anume:

- prima, constă în prevederea, chiar din faza de proiectare a reactorului nuclear, ca prin calculul de securitate să se "accepte" ca cel mult un mecanism să nu fie fiabil, fără ca acesta să periclitaze capacitatea de realizare a funcției de securitate a sistemului în ansamblu;

- a doua metodă constă în aplicarea în timpul exploatării reactorului nuclear a unei mentenanțe cu ciclu de inspecție redus la minimum economic.

Astfel, din figura 4 și tabelul 2, se observă că și în cazul cel mai defavorabil, $m_g = 32$ săptămîni, pentru un ciclu de inspecție de 2 săptămîni fiabilitatea sistemului de mecanisme, după 1 săptămîna de funcționare fără inspecție este de 0,9996 pentru cazul $r = 1$; deci chiar foarte ridicată.

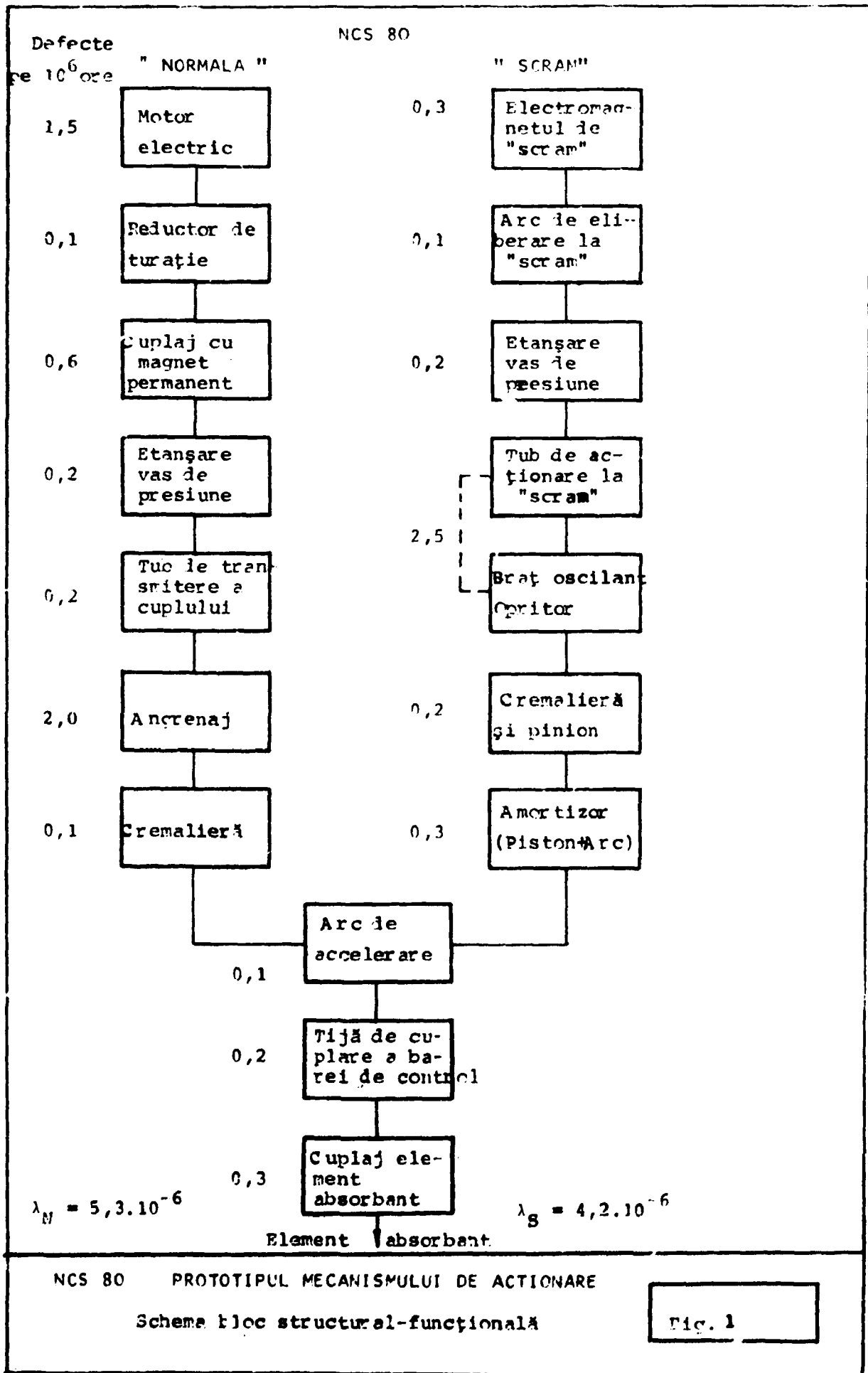
4. Concluzii

Cele două metode de calcul al fiabilității prezentate în lucrare, sînt universal valabile, ele putînd fi aplicate la calculul fiabilității oricărui tip de mecanism de acționare a barelor de control, sau oricărui sistem de mecanisme pentru funcționarea la "scram". Exemplificarea metodelor pe prototipul mecanismului de acționare NCS-30, se datorește faptului că autorii au participat efectiv la testarea acestui prototip /8/.

Ambel metode de calcul al fiabilității fac parte integrantă dintr-o metodă mai generală, denumită "risic - siguranță în funcționare - testare", pe care autorii și-o propun să o de-voteze la studiul teoretic și experimental al sistemelor de acționare a barelor de control la reactori nucleari.

Bibliografie

- /1/. Bazovsky, I. "Reliability Theory and Practice", Prentice - Hall, INC., New Jersey, 1961.
- /2/. Cioclov, D. "Rezistență și fiabilitate la solicitări variabile", Ed. Pacla, Timișoara, 1975.
- /3/. Ryabinin, I. "Reliability of Engineering Systems. Principles and Analysis", Mir Publishers, Moscow, 1976.
- /4/. Cojan, M. "Mecanisme de acționare a barelor de control", referat de doctorat, IFIN, 1973.
- /5/. Green, A. E. "Reliability and risk analysis of nuclear power plants as systems", Course no. 3001, Berlin, Germany, 23-27 June 1975.
- /6/. Ehrentreich, J. Maurer, H. "Reliability Consideration for Electro-mechanical and Hydraulic Control Rod Drive Systems", CREST - Meeting Ispra, 1968.
- /7/. Ciucu, G. și alții "Statistică matematică și cercetări operaționale", vol. II, Ed. Did. Ped., București, 1978.
- /8/. Peters, C. H. Cojan, M. și alții "Erprobung eines Stellstabantriebes für NCS-60", GKSS, Hamburg, 1976.



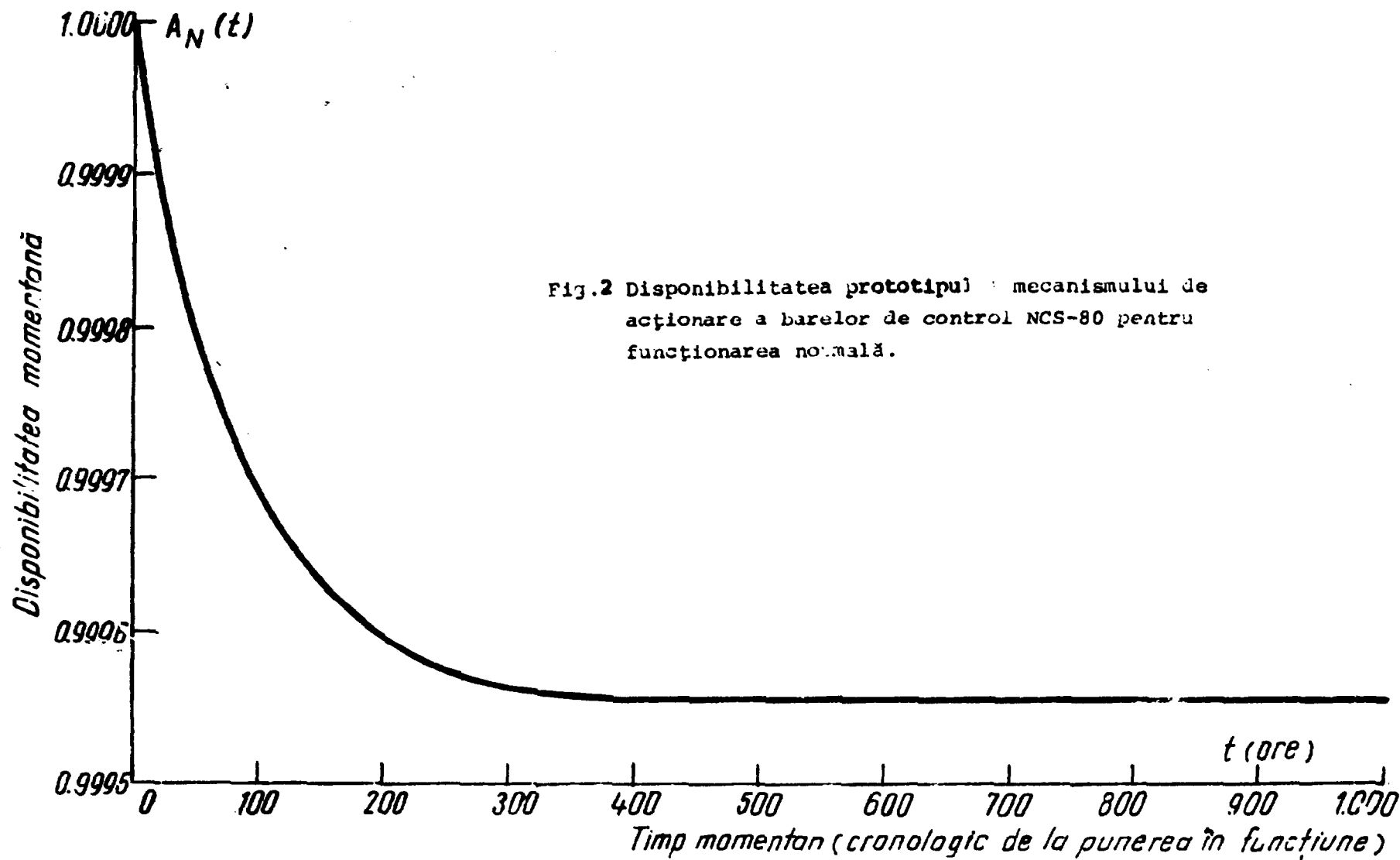


Fig.2 Disponibilitatea prototipul : mecanismului de acționare a barelor de control NCS-80 pentru funcționarea normală.

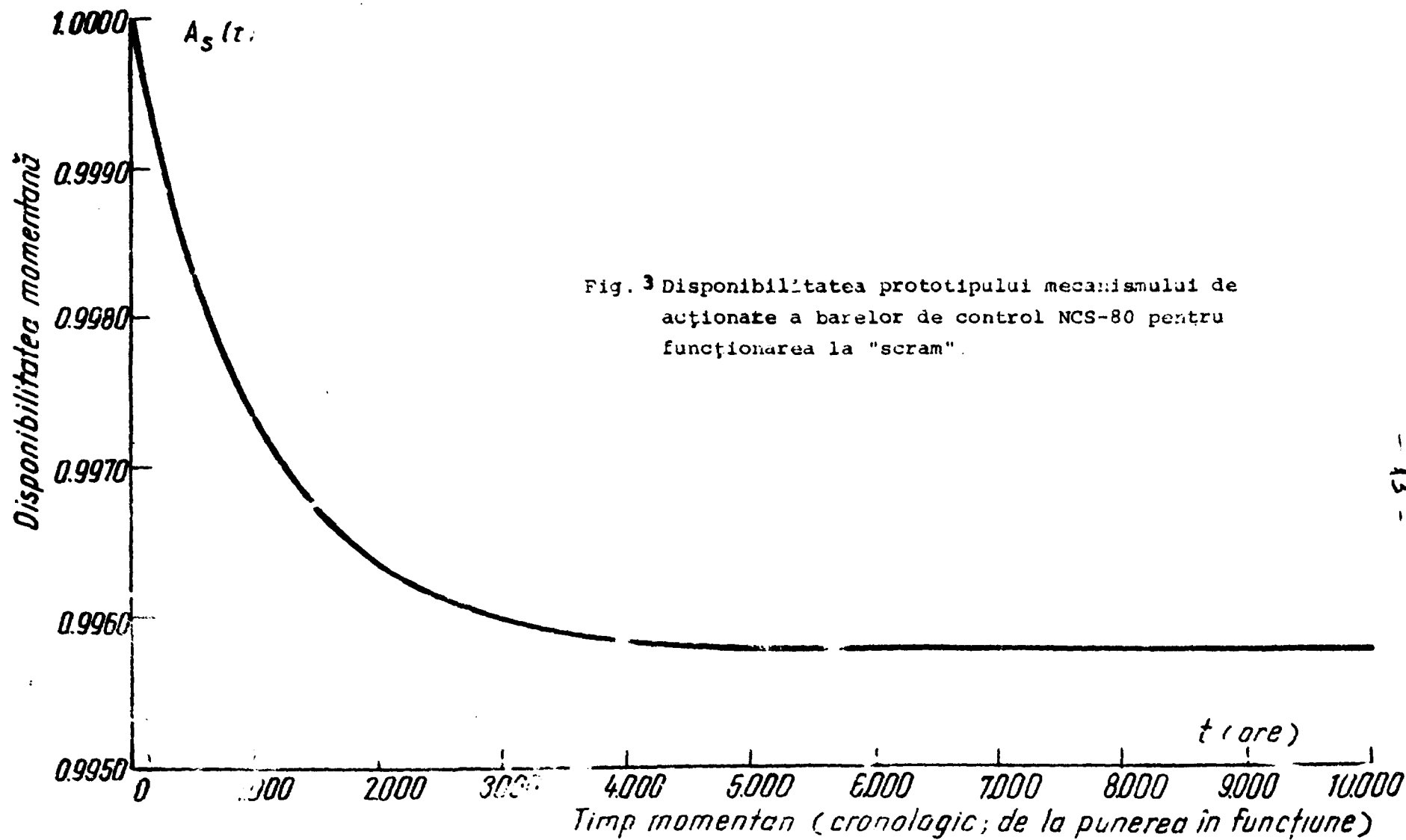


Fig. 3 Disponibilitatea prototipului mecanismului de acționare a barelor de control NCS-80 pentru funcționarea la "scram".

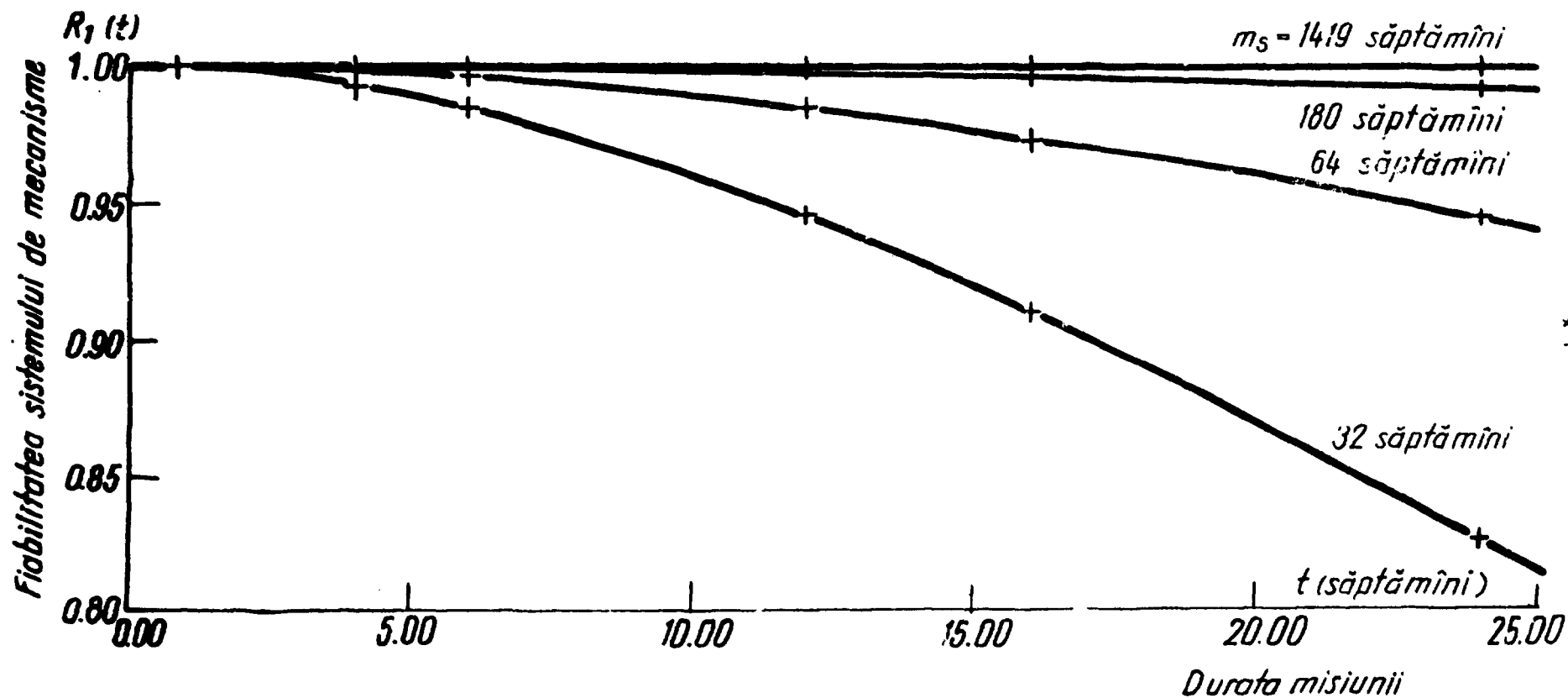


Fig. 4 Fiabilitatea la "scram" a sistemului de mecanisme de acționare a barelor de control NCS-30 pentru cazul în care se admite defectarea numai a unui singur mecanism ($r = 1$).
 (m_s = valoarea timpului de funcționare fără defectare)

Tabelul nr.1

Valorile prevăzute ale indicatorilor de fiabilitate pentru
prototipul mecanismului de acționare MCS - 80

Regimul de funcționare	Rata de defectare λ /ore ⁻¹	Timpul mediu de funcționare m /săptămîni/	Periodicitatea inspecției	Timpul mediu de restabilire τ /ore/	Disponibilitatea k	Durata misiunii t /săp./	Fiabilitatea R(t)	k.R(t)
"normal"	$5,3 \cdot 10^{-6}$	1125	săptămînal	84	0,9995	1	0,99911	0,99861
						4	0,99645	0,99595
						6	0,99468	0,99418
						12	0,98939	0,98889
						16	0,98587	0,98538
						24	0,97889	0,97840
"scram"	$4,2 \cdot 10^{-6}$	1419	trimestrial	1008	0,9958	1	0,99929	0,99509
						4	0,99718	0,99299
						6	0,99578	0,99159
						12	0,99157	0,98741
						16	0,98878	0,98463
						24	0,98322	0,97909

- 15 -

Tabela nr. 2

Fiabilitatea la rătăcirile sistemului mecanismelor
de acționare a barelor de control pentru prototipul
ES - 80 calculată pe baza distribuției Poisson.
 m_0 = timpul mediu de funcționare la "stare"
 t = durata misiunii
(calcul analitic cu calculatorul HP-97 DSP-4)

m_0 (săpt./defect)	t (săpt.)	R_0 ($r = 0$)	R_1 ($r = 1$)
1419	1	0,9993	1,0000
	4	0,9972	1,0000
	6	0,9958	1,0000
	12	0,9916	1,0000
	16	0,9888	1,0000
	24	0,9832	0,9998
180	1	0,9945	1,0000
	4	0,9780	0,9997
	6	0,9672	0,9994
	12	0,9355	0,9979
	16	0,9149	0,9963
	24	0,8752	0,9918
64	1	,984	0,9999
	4	,9394	0,9981
	6	0,9105	0,9959
	12	0,8290	0,9845
	16	0,7788	0,9735
	24	0,6873	0,9450
32	1	0,9692	0,9996
	4	0,8325	0,9928
	6	0,8290	0,9845
	12	0,687	0,9450
	16	0,60	0,9098
	24	0,4724	0,8266