

291/2005

Raport Badawczy

RB/27/2005

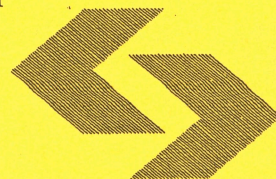
Research Report

**Algorytmy oceny żywotności
systemów technicznych**

J. Karpiński

**Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk**

**Systems Research Institute
Polish Academy of Sciences**



POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 8373578

fax: (+48) (22) 8372772

Kierownik Pracowni zgłaszający pracę:
Prof. dr hab. inż. Olgierd Hryniewicz

Warszawa 2005

Algorytmy oceny żywotności systemów technicznych

SPIS TREŚCI

1. Wstęp
2. Sformułowanie zagadnienia
3. Ocena żywotności
4. Efektywna ocena żywotności – algorytm i program komputerowy

1. Wstęp

Żywotność systemu jest cechą charakteryzującą odporność systemu na oddziaływanie czynników zewnętrznych w stosunku do systemu i powodujących uszkodzenia pewnej części elementów systemu. Inna definicja żywotności pod tym pojęciem rozumie zdolność systemu do zachowania podstawowych funkcji przy oddziaływaniu czynników otoczenia zewnętrznego o charakterze katastroficznym.

W analizie żywotności systemów technicznych, w odróżnieniu od klasycznego podejścia stosowanego w teorii niezawodności, uwzględnia się – obok tzw. czynników wewnętrznych, również. tzw. czynniki zewnętrzne. Czynniki zewnętrzne o charakterze katastroficznym oddziałujące na system można podzielić na dwie grupy [Karpinski (2004)]:

- czynniki o charakterze żywiołowym (naturalnym), np. pożary, wyładowania atmosferyczne, obsunięcia ziemi, powodzie, wichury, duże opady atmosferyczne;
- czynniki umyślne, związane z działaniami nieprzyjaciela, np. atak terrorystyczny, atak artyleryjski, atak raketowy, bomby, radio-elektroniczny, dywersja itp.

Istnieją pewne podobieństwa między niezawodnością a żywotnością systemów. W obu przypadkach rozważane są uszkodzenia elementów systemu. W podobny sposób definiuje się wskaźniki niezawodności i żywotności. Istnieją jednakże również istotne różnice. W analizie żywotności, w przeciwieństwie do analizy niezawodności, główną rolę odgrywają czynniki zewnętrzne w stosunku do systemu, zarówno o charakterze żywiołowym, jak też umyślnym. Analiza żywotności systemów charakteryzuje się następującymi cechami:

- występują równoczesne uszkodzenia lub zniszczenia wielu elementów systemu, tzw. uszkodzenia mnogie spowodowane wspólną przyczyną;
- charakter czynników umyślnych, a więc i uszkodzeń nimi spowodowanych, nie jest czysto losowy, chociaż w przypadku niewystarczającej informacji o przyszłych zamierzeniach nieprzyjaciela można założyć losowość uszkodzeń mnogich;
- uszkodzenia mają zazwyczaj charakter długotrwały, usuwanie uszkodzeń jest kosztowne i pracochłonne.

W Karpinski (2004)] przedstawiono pewną metodę analizy niezawodności systemów w połączeniu z pewnymi elementami analizy ich żywotności. Przyjęto ogólne założenie, że destrukcyjne oddziaływania zewnętrzne na system mają charakter losowy i wpływają na pogorszenie parametrów niezawodnościowych pewnych grup elementów lub nawet wszystkich elementów. Rozpatrywane zagadnienie można ująć następująco: **interesuje nas zachowanie się systemu (z punktu widzenia niezawodności) w sytuacji oddziaływania na system pewnych narażeń powodujących przyspieszone uszkodzenie wyróżnionej grupy elementów.**

Żywotność systemu jest oceniana rozkładem czasu życia systemu po wystąpieniu uszkodzenia elementów wyróżnionego zbioru elementów. W celu uzyskania liczbowych charakterystyk oceniających żywotność systemu można – korzystając z tego rozkładu prawdopodobieństwa - w prosty sposób wyznaczyć przydatne wskaźniki, na przykład wartość oczekiwaną.

W niniejszej pracy przedstawiono praktycznie użyteczną metodę wyznaczania dystrybuanty rozkładu czasu życia systemu po uszkodzeniu się elementów przynajmniej jednego spośród określonych wcześniej tzw. zbiorów inicjalnych

2. Sformułowanie zagadnienia

Przypomnijmy, że [Karpiński 2004] w ogólnym przypadku rozpatrywania żywotności systemów możemy postawić następujące pytanie: jaki jest rozkład czasu poprawnej pracy systemu po uszkodzeniu wyróżnionej grupy elementów, poddanych zwiększonym narażeniom zewnętrznym? Rozkład ten określa zachowanie się systemu po ewentualnym uszkodzeniu pewnej grupy elementów poddanej nienormalnym narażeniom (burza, wichura, powódź itp.), a tym samym określa jego żywotność. Umiejętność wyznaczania takiego rozkładu jest zatem ważna dla praktyki.

Wprowadźmy następujące oznaczenia, używane w niniejszym punkcie:

OZNACZENIA

S	system
c_i	element i systemu
n	liczba elementów systemu
T_i	czas poprawnej pracy elementu c_i , zmienna losowa
F_i, f_i	dystrybuanta i gęstość rozkładu prawdopodobieństwa czasu popr. pracy elementu c_i
C_i	i-ty minimalny przekrój niezdatności systemu
N	liczba minimalnych przekrojów niezdatności systemu
T	czas poprawnej pracy systemu, zmienna losowa
$G(t_1, t_2, \dots, t_n, t)$	dystrybuanta rozkładu łącznego wektora losowego T_1, T_2, \dots, T_n, T

NAZEWNICTWO I DEFINICJE

- T_r resztkowy czas życia systemu, zmienna losowa
- ℓ_j inicjalny zbiór j , tzn. taki zbiór elementów systemu, że z chwilą uszkodzenia ostatniego z nich zaczyna się resztkowy czas życia systemu
- $L = \{\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_M\}$ zbiór wszystkich rozpatrywanych zbiorów inicjalnych
- L_i zbiór; połączenie pewnych inicjalnych zbiorów ℓ_j
- K_i liczba zbiorów inicjalnych tworzących L_i
- I liczba zbiorów L_i
- F_r dystrybuanta zmiennej losowej T_r
- R_r Funkcja niezawodności resztkowego czasu poprawnej pracy systemu: $R_r = 1 - F_r$
- $F_{r,i}$ pomocnicza funkcja używana przy wyznaczaniu F_r
- $Q_i(t_1, t_2, \dots, t_n, t)$ funkcja otrzymana z $G(t_1, t_2, \dots, t_n, t)$ dla L_i
- $A(x, y, \tau, S, L)$
- $A_i(x, y, \tau, S, L_i)$ złożone zdarzenia losowe
- $A^x(x, S, L)$
- $A^y(y, \tau, S)$
- A skrót dla $A(x, y, \tau, S, L)$
- $i: c_i \in H$ zbiór indeksów dla wszystkich c_i zawartych w H
- $C_k \setminus \ell_i$ C_k bez tych c_j , które należą do ℓ_i

Objaśnienia

Zbiór L wszystkich zbiorów inicjalnych określa warunki do rozpoczęcia resztkowego czasu poprawnej pracy systemu: T_r zaczyna się, gdy uszkodzi się ostatni element przynajmniej jednego zbioru inicjalnego. Na przykład, jeśli dla systemu o strukturze niezawodnościowej „2-z-3:F/G” ustalimy trzy jednoelementowe zbiory inicjalne, to T_r zaczyna się, gdy uszkodzi się którykolwiek z elementów tego systemu. W przypadku gdy ustalimy tylko jeden jednoelementowy zbiór inicjalny, to T_r zaczyna się z chwilą uszkodzenia się tego elementu. Zauważmy jednak, że wcześniej, tzn. przed uszkodzeniem elementu będącego zbiorem inicjalnym, jeden – lub oba – z pozostałych elementów może się uszkodzić, a tym samym z niezerowym prawdopodobieństwem $T_r = 0$.

Założenia

1. System oraz jego elementy są dwustanowe w sensie niezawodności, tzn. mogą jedynie być w stanie zdadności albo też w stanie niezdadności (uszkodzenia).
2. W systemie występuje jedynie elementy bazowe, tzn. nie jest rozpatrywana rezerwa zimna.
3. System jest koherentny, tzn. jest monotoniczny, a wszystkie elementy są istotne, i znana jest jego struktura niezawodnościowa.
4. Znany jest rozkład łączny czasów poprawnej pracy elementów systemu (jeśli uszkodzenia elementów systemu są stochastycznie niezależne, to znane są rozkłady czasu poprawnej pracy wszystkich jego elementów).

3. Ocena żywotności

Do wyznaczenia rozkładu prawdopodobieństwa resztkowego czasu poprawnej pracy systemu – opisującego żywotność systemu - przydatne jest rozpatrzenie zdarzenia [Karpieński 2004]

$$A(x,y,\tau,S,L) \equiv \{A'(x,S,L) \cap A''(y, \tau, S)\} \quad (3.1)$$

gdzie

$$A'(x,S,L) \equiv \left\{ \bigcup_{j=1}^M \bigcap_{i:c_i \in \ell_j} (T_i < x) \right\}$$

jest zdarzeniem losowym polegającym na tym, że do chwili x wszystkie elementy przynajmniej jednego zbioru inicjalnego ℓ_i uszkodzą się, zaś

$$A''(y, \tau, S) \equiv (T > y + \tau)$$

jest zdarzeniem polegającym na tym, że do chwili $(y+\tau)$ system nie uszkodzi się.

Prawdopodobieństwo $P\{A(x,y,\tau,S,L)\}$ jest kompozycją rozkładu łącznego czasów poprawnej pracy elementów pewnego podsystemu i funkcji niezawodności systemu. Z zależności (3.1) oraz z definicji T_r wynika, że funkcja niezawodności R_r resztkowego czasu poprawnej pracy systemu ma postać:

$$R_r(\tau) = P\{T_r > \tau\} = \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial x} P\{A(x,y,\tau,S,L)\} \Big|_{x=y=t} dt \quad (3.2)$$

Musimy obecnie wyznaczyć $P\{A\}$. Na podstawie wzoru Poincare otrzymujemy

$$\begin{aligned} P\{A(x,y,\tau,S,L)\} &= \sum_{i=1}^M P \left\{ \bigcap_{j:c_j \in \ell_j} (T_j < x) \cap (T > y + \tau) \right\} + \\ &- \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^M P \left\{ \bigcap_{m:c_m \in (\ell_i \cup \ell_j)} (T_m < x) \cap (T > y + \tau) \right\} + \\ &+ \dots + (-1)^{M+1} P \left\{ \bigcap_{m:c_m \in \bigcup_{i=1}^M \ell_i} (T_m < x) \cap (T > y + \tau) \right\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

W celu otrzymania prawdopodobieństw innych zdarzeń podobnych do przedstawionego wzorem (3.3) przyjmijmy, że

$$L_i \equiv \{\ell_{i_1} \cup \ell_{i_2} \cup \dots \cup \ell_{i_{k_i}}\} \quad i_1 \neq i_2 \neq \dots \neq i_{k_i}, \quad K_i \leq M. \quad (3.4)$$

(Liczba zbiorów typu L_i jest równa $2^m - 1$).

Z kolei, przyjmijmy, że

$$A_i(x,y,\tau,S,L_i) \equiv \left\{ \bigcap_{j:c_j \in L_i} (T_j < x) \cap (T \geq y + \tau) \right\} \quad (3.5)$$

Ze wzoru (3.3), dla odpowiednio zdefiniowanych zbiorów L_i mamy:

$$P\{A(x, y, \tau, S, L)\} = \sum_{i=1}^J (-1)^{K_i+1} P\{A_i(x, y, \tau, S, L_i)\}. \quad (3.6)$$

Używając podstawienia

$$F_{r,i}(\tau) = \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial x} P\{A_i(x, y, \tau, S, L_i)\}_{x=y=t} dt, \quad (3.7)$$

$$R_r(\tau) = \sum_{i=1}^J (-1)^{K_i+1} F_{r,i}(\tau) \quad (3.8)$$

ze wzorów (3.2) oraz (3.6) otrzymujemy:

Obecnie należy zamodelować to, że T_r zaczyna się wtedy kiedy wszystkie elementy dowolnego zbioru inicjalnego ℓ_j uszkodzą się i kończy się gdy wszystkie elementy dowolnego minimalnego przekroju niezdatności C_k uszkodzą się. Pokażemy, że $F_{r,i}(\tau)$ może być wyznaczony za pomocą dystrybuanty rozkładu łącznego wektora losowego (T_1, T_2, \dots, T_n) . Można wykazać, że dystrybuanta rozkładu łącznego wektora losowego (T_1, T_2, \dots, T_n) jest równa

$$G(t_1, t_2, \dots, t_n, t) = P\left\{ \bigcup_{k=1}^N \left[\bigcap_{i:c_j \in C_k} (T_i < \min(t_i, t)) \cap \bigcap_{j:c_j \notin C_k} (T_j < t) \right] \right\} \quad (3.9)$$

Przypomnijmy [Karpínski 2004], że funkcja $G(t_1, t_2, \dots, t_n, t)$ jest nieciągła w punkcie $t_i = t$. Dlatego różniczkowanie w $t_i = t$ jest utrudnione. Jednakże, dla potrzeb wyznaczania prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia A_i wystarczy rozpatrywać chwile $t_j < t$ dla wszystkich $j:c_j \in L_i$, gdyż interesują nas uszkodzenia elementów należących do zbioru L_i przed chwilą y będącą początkiem T_i . Ponadto, dla $j:c_j \notin L_i$ wystarczy rozpatrywać chwile $t_j > t$, ponieważ

interesują nas uszkodzenia elementów nie należących do L_j tylko po chwili $y+\tau$. A zatem, do wyznaczenia $F_{r,i}(\tau)$ możemy używać, zamiast funkcji $G(t_1, t_2, \dots, t_n, t)$, prostszej funkcji $Q_i(t_1, t_2, \dots, t_n, t)$ otrzymywanej z $G(t_1, t_2, \dots, t_n, t)$, przy czym zamiast wyrażeń rodzaju $\min(t_j, t)$ wstawiamy tylko t_j dla $j:c_j \in L_i$ i t dla $j:c_j \notin L_i$. Oznacza to, że [Karpinski 2004]

$$Q_i(t_1, t_2, \dots, t_n, t) = P \left\{ \bigcup_{k=1}^N \left[\bigcap_{j:c_j \in C_k \cap L_i} (T_j < t_j) \cap \bigcap_{l:c_l \in C_k \setminus L_i} (T_l < t) \cap \bigcap_{m:c_m \in C_k} (T_m < t_m) \right] \right\} =$$

$$= P \left\{ \bigcup_{k=1}^N \left[\bigcap_{j:c_j \in L_i} (T_j < t_j) \cap \bigcap_{l:c_l \in C_k \setminus L_i} (T_l < t) \right] \right\} \quad (3.10)$$

Z definicji Q_i wynika, że dla $t_j > t$ ($j:c_j \in L_i$) oraz dla $t_j < t$ ($j:c_j \notin L_i$) mamy $Q_i \equiv 0$. Dla $t_j < t$ ($j:c_j \in L_i$) funkcja Q_i jest ciągła a w punkcie $t_j = t$ jest lewostronnie ciągła. Ponadto, dla $t_j > t$ ($j:c_j \notin L_i$) Q_i jest ciągła i jest ona prawostronnie ciągła w punkcie $t_j = t$. Oznacza to, że dla $t_j \leq t$ ($j:c_j \in L_i$) i dla $t_j \geq t$ ($j:c_j \notin L_i$) Q_i ma pochodne cząstkowe względem t_j oraz t . Wobec tego możemy napisać:

$$P\{A_i(x, y, \tau, S, L_i)\}_{x=y=t} = \int_0^t \int_{t+\tau}^{\infty} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial z_i \partial y} Q_i(\infty, \dots, z_i, \dots, \infty, z_i, \dots, \infty, y) \right\} dy dz_i \quad (3.11)$$

We wzorze (3.11) z_i występuje zamiast t_j ($j:c_j \in L_i$); ∞ występuje zamiast t_m ($m:c_m \notin L_i$). Całkując (3.11) względem y otrzymujemy

$$P\{A_i(x, y, \tau, S, L_i)\}_{x=y=t} = \int_0^t \frac{\partial}{\partial z_i} \left\{ Q_i(\infty, \dots, z_i, \dots, \infty, z_i, \dots, \infty, \infty) - Q_i(\infty, \dots, z_i, \dots, \infty, z_i, \dots, \infty, y) \right\} dz_i \quad (3.12)$$

Z zależności (3.7) oraz (3.12) mamy:

$$F_{r,i}(\tau) = \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial z_i} \{Q_i(\infty, \dots, z_i, \dots, \infty, z_i, \dots, \infty, \infty) - Q_i(\infty, \dots, z_i, \dots, \infty, z_i, \dots, \infty, y)\} \Big|_{z_i = t} dt \quad (3.13)$$

Wstawiając (3.13) do (3.8) na koniec otrzymujemy podstawowy wynik [Karpieński 2004]:

$$F_r(\tau) = 1 - \sum_{i=1}^l (-1)^{k_i+1} \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial z_i} \{Q_i(\infty, \dots, z_i, \dots, \infty, z_i, \dots, \infty, \infty) - Q_i(\infty, \dots, z_i, \dots, \infty, z_i, \dots, \infty, y)\} \Big|_{z_i = t} dt \quad (3.14)$$

4. Efektywna ocena żywotności – algorytm i program komputerowy

W [Karpieński 2004] przedstawiono kilka przykładów ilustrujących ocenę żywotności systemu, tzn. wyznaczanie postaci funkcyjnej dystrybuanty $F_r(\tau)$. Z przykładów tych wynika, że jest to zadanie dość trudne, nawet dla systemów o niedużej liczbie elementów. Zaletą otrzymanych w ten sposób wyników jest to, że otrzymujemy dystrybuantę F_r w postaci analitycznej, co znacznie ułatwia dalsze rozważania. Jest to jednakże możliwe tylko dla kilkuelementowych systemów.

Do oceny żywotności systemów składających się z większej niż 10 liczby elementów należy podejść w inny sposób. Spośród kilku możliwości w niniejszej pracy wybrano rozwiązanie polegające na bezpośredniej numerycznej implementacji przedstawionej wyżej metody analitycznej. Korzysta się ze wszystkich zależności opisanych w punkcie 3, by na koniec na podstawie wzoru (3.14) uzyskać chwilowe wartości dystrybuanty F_r w dowolnie wybranych punktach.

Program LIVE do oceny żywotności systemów dwustanowych

Wersja źródłowa programu do oceny żywotności systemów dwustanowych o elementach dwustanowych. Program służy do wyznaczania dystrybuanty rozkładu resztkowego czasu życia systemu pod pewnymi warunkami określającymi wcześniejsze uszkodzenia pewnych wyróżnionych grup elementów

PROGRAM LIVE

```
C
C ***** Wyznaczanie dystrybuanty resztkowego czasu życia systemu
C
  logical PR,SC,TLOG,TAB,FF
  integer XR(256,8),MAT(256),RR(256)
  dimension PR(8,10),SC(256,10),TLOG(10),IZAM(128),
  *SH(10),SL(10),WD(10),XLZ(10),AT(10),YY(2),TAB(256,10)
C
  open(1,file='set1.dat')
C
C ***** set1 – zbiór z wynikami obliczeń
C ***** N – liczba elementów systemu
C ***** NR – liczba minimalnych przekrojów
C ***** NC – liczba rozpatrywanych zbiorów inicjalnych
C ***** DELTA – krok całkowania
C ***** DIS – wartość dystrybuanty resztkowego czasu życia systemu
C ***** DTAU – długość kroku obliczeń dystrybuanty
C ***** TAU - argument dystrybuanty resztkowego czasu życia systemu
C ***** TAUMAX – maksymalna wartość TAU
C
C
C
  4 format(10i5)
  5 format(/1x,'Przekrój',I1,4x,8(I2,2x))
  6 format(/15X,'N = ',I1,8X,'NR = ',I1,8X,'NC = ',I1/)
  7 format(/15X,'DELTA = ',F6.4,5X,'TAUMAX = ',F6.2/)
  8 format(/1X,'Parametry skali',3x,8(F4.2,2x)/)
  9 format(/1X,'Parametry kształtu',1x,8(F4.2,2x)/)
C
  801 write(5,60)
  60 format(/20X,'Enter N, NR, NC/')
  read(5,4,err=801) N,NR,NC
  write(1,6) N,NR,NC
  805 write(5,62)
  62 format(/15X,'Enter DELTA, DTAU and TAUMAX/')
  read(5,3,err=805) DELTA, DTAU, TAUMAX
  write(1,7) DELTA, TAUMAX
  802 write(5,61)
  61 format(/20X,'Wprowadź minimalne przekroje/')
  do 20 K=1,NR
  read(5,4,err=802)(IZAM(J),J=1,N)
  write(1,5) K,(IZAM(J),J=1,N)
  do 20 L=1,N
  PR(K,L)=.false.
```

```

20 if(IZAM(L).eq.1) PR(K,L)=.true.
803 write(5,63)
C
C ***** SL – parametry skali rozkładów czasu poprawnej pracy elementów systemu
C
63 format(/20X,'Wprowadź parametry skali rozkł. czasu popr. pracy elementów systemu '/')
read(5,3,err=803)(SL(I),I=1,N)
write(1,8)(SL(I),I=1,N)
804 write(5,64)
C
C ***** SH – parametry kształtu rozkładów czasu poprawnej pracy elementów systemu
C
64 format(/20X,'Wprowadź parametry kształtu rozkł. czasu popr. pracy elem. systemu '/')
read(5,3,err=804)(SH(I),I=1,N)
write(1,9)(SH(I),I=1,N)
C
do 12 I=1,256
do 12 J=1,10
TAB(I,J)=.false.
12 SC(I,J)=.false.
C
SS=0
do 14 I=1,N
14 SS=amax1(SS,SL(I))
SS=1./SS
806 write(5,66)
66 format(15X,'Wprowadź zbiory inicjalne/')
do 19 K=1,NC
read(5,4,err=806)(IZAM(I),I=1,N)
write(1,67) K,(IZAM(I),I=1,N)
C Zapisywanie w wierszach tablicy S.C. informacji o kolejnych zbiorach inicjalnych
do 19 L=1,N
SC(K,L)=.false.
19 if(IZAM(L).eq.1) SC(K,L)=.true.
C
67 format(/1X,'Zbiór inicjalny ',I1,7x,8(I2,2x))
write(1,75)
C
C Zapisywanie kolejnych liczb naturalnych (numerów kolejnych przekrojów niezdatności)
C w postaci liczb dwójkowych i umieszczanie ich w tablicy IZAM, a następnie w tablicy TAB
C zawierającej - w kolejnych wierszach – informacje o przynależności poszczególnych
C elementów do zbiorów elementów występujących w kolejnych składnikach we wzorze
C Poincare
C
do 40 I=1,NR
40 IZAM(I)=0
LS=2**NR-1
do 41 LL=1,LS
do 42 I=1,NR
IZAM(I)=IZAM(I)+1
if(IZAM(I).eq.1) go to 43

```

```

42 IZAM(I)=0
43 KS=0
   do 44 I=1,NR
   if(IZAM(I).eq.0) go to 44
   KS=KS+1
   do 45 J=1,N
45 if(PR(I,J)) TAB(LL,J)=.true.
44 continue
41 MAT(LL)=(-1)**(KS+1)
C
C MAT(I) – znak (+ lub -) stojący przy kolejnym składniku we wzorze Poincare
C
   DT=0.01*DELTA
C DT – krok całkowania
C
   DW=1./DT
   DH=0.1*DT
   LZ=0
C
   KK=NC
   L=0
117 L=L+1
   if(L.gt.KK) go to 121
   do 118 I=1,NR
   do 119 J=1,N
   if(.not.PR(I,J)) go to 119
   if(PR(I,J).and..not.SC(L,J)) go to 118
119 continue
   do 120 LL=1,N
120 SC(L,LL)=SC(KK,LL)
   KK=KK-1
   L=L-1
   go to 117
118 continue
C
121 LM=2**KK-1
C
   TAU=-DTAU
   ff=.false.
   if(KK.LE.(NR+1)/2) go to 200
C
   do 36 I=1,N
36 TLOG(I)=.false.
   do 30 I=1,KK
   do 30 J=1,N
30 if(SC(I,J)) TLOG(J)=.true.
   J=0
   do 31 I=1,N
31 if(TLOG(I)) J=J+1
   if(J.eq.N) FF=.true.
C

```

C ***** Jeśli FF=.true., to DIS=0. dla TAU=0.

C

200 TAU=TAU+DTAU

C

DIS=0

if(LZ.ne.0) go to 84

do 83 I=1,10

XLZ(I)=0

83 WD(I)=0

84 LZ=LZ+1

XLZ(LZ)=TAU

if(FF.and.TAU.lt.1.E-10) go to 80

do 21 I=1,KK

21 IZAM(I)=0

C

do 100 LL=1,LM

DPI=0.

TMAX=10000.

do 27 I=1,N

27 TLOG(I)=.false.

do 22 I=1,KK

IZAM(I)=IZAM(I)+1

if(IZAM(I).eq.1) go to 23

22 IZAM(I)=0

23 LF=0

C

do 25 I=1,KK

if(IZAM(I).eq.0) go to 25

LF=LF+1

do 26 J=1,N

26 if(SC(I,J)) TLOG(J)=.true.

25 continue

C

do 29 I=1,NR

do 28 J=1,N

if(.not.PR(I,J)) go to 28

if(PR(I,J).and..not.TLOG(J)) go to 29

28 continue

go to 100

29 continue

do 46 I=1,LS

do 46 J=1,N

XR(I,J)=0

if(TAB(I,J)) XR(I,J)=1

46 if(TLOG(J)) XR(I,J)=2

LA=LS

do 310 I=1,LA

310 RR(I)=MAT(I)

I=0

309 I=I+1

if(I.gt.LA) go to 306

```

K=I
308 K=K+1
    if(K.gt.LA) go to 309
    do 303 J=1,N
    if(XR(I,J).ne.XR(K,J)) go to 308
303 continue
    RR(I)=RR(I)+RR(K)
    if(K.eq.LA) go to 307
    do 304 L=1,N
304 XR(K,L)=XR(LA,L)
    RR(K)=RR(LA)
307 LA=LA-1
    K=K-1
    go to 308
306 I=0
C
305 I=I+1
    if(I.gt.LA) go to 312
    if(RR(I).ne.0) go to 305
    if(I.eq.LA) go to 314
    do 311 L=1,N
311 XR(I,L)=XR(LA,L)
314 LA=LA-1
    go to 305
312 TT1=0.
    T=0.
C
101 T=T+DELTA
    TT=0.
C
C Wzór (3.13)
C
    do 102 LD=1,2
    LP=(-1)**(LD+1)
    do 48 I=1,2
    YY(I)=0.
    do 48 L=1,LA
    do 49 K=1,N
    U=SL(K)
    V=SH(K)
    AT(K)=1.
    if(XR(L,K).eq.1.and.LD.eq.2) AT(K)=F(T+TAU,U,V)
    if(XR(L,K).eq.2) AT(K)=F(T,U,V)
    if(I.eq.1) go to 49
    if(XR(L,K).eq.2) AT(K)=F(T+DT,U,V)
49 continue
C
    HP=1.
    do 50 K=1,N
50 HP=HP*AT(K)
48 YY(I)=YY(I)+RR(L)*HP

```


$$DM=(YY(2)-YY(1))*DW$$

C DM – iloraz różnicowy (zamiast pochodnej) we wzorze (3.13)

102 TT=TT+LP*DM

ZDPI=DPI

DPI=DPI+(TT+TT1)*0.5*DELTA

SM=T*SS

if(DPI-ZDPI.LT.DH.and.SM.gt.0.2) TMAX=0.

TT1=TT

DPI=amax1(0.,DPI)

C

71 format(9x,'',6(''),'')

72 format(9x,'',6(''),'')

73 format(9x,'',6(''),'')

75 format(1X/)

76 format(9X,' | TAU | ',7(f6.3,' | '))

77 format(9X,' | DIS | ',7(f7.5,' | '))

C

90 if(T.LT.TMAX) go to 101

C

C Obliczanie wartości dystrybuanty (wzór (3.14))

C

299 DIS=DIS+(-1)**(LF+1)*DPI

C

100 continue

DIS=1.-DIS

80 if(FF.and.TAU.lt.1.E-10) DIS=0.

DIS=amax1(0.,DIS)

write(5,550) TAU, DIS

550 format(//15X,'TAU = 'F6.2,5X,'DIS = ',F6.4)

WD(LZ)=DIS

if(LZ.ne.7) go to 91

C

81 LZ=0

write(1,71)

write(1,76)(XLZ(I),I=1,7)

write(1,73)

write(1,77)(WD(I),I=1,7)

write(1,72)

C

91 if(TAU.lt.TAUMAX) go to 200

if(LZ.ne.0) go to 81

C

199 stop' Koniec programu LIVE'

C

end

C

C

function F(X,A,SP)

F=1.-EXP(-(X/A)**SP)

return

end

L I T E R A T U R A

- Karpiński J. (1983) „General probability of system failure”. *IEEE Transactions on Reliability*, vol.32, No. 5, s. 444 – 449.
- Karpiński J. (1988) „Distribution of residual system-life after partial failures”, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 37, No. 5, s. 539 – 544.
- Karpiński J. (2004) „Analiza niezawodności i żywotności sieci”, Instytut Badań Systemowych PAN, Raport Badawczy RB/40/2004
- Karpiński J., Korczak E. (1990) „Metody oceny niezawodności dwustanowych systemów technicznych”. Omnitech, Warszawa.
- Nahman J. M. (1992) „Minimal paths & cuts of networks exposed to common-cause failures. *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 41, No. 1, s. 76 - 80.
- Page L. B., Perry J. C. (1989) „Reliability of directed networks using the factoring theorem”. *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 38, No. 5, s. 556 – 562.
- Schneeweiss W., Karpiński J. (1986) „The theory of delayed repair for all systems with 2 or 3 components”, Informatik – Berichte, Fernuniversität, Hagen.
- Yuan J., Lai M. T., Ko K. L. (1989) „Evaluation of system reliability with common-cause failures, by a pseudo-environments model.”. *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 38, No. 3, s. 328 – 332.

