

**Agnieszka BŁOKUS-ROSZKOWSKA, Sambor GUZE,  
Krzysztof KOŁOWROCKI, Joanna SOSZYŃSKA-BUDNY**  
Akademia Morska w Gdyni

## **KOMPUTEROWA PREDYKCJA NIEZAWODNOŚCI I RYZYKA ZŁOŻONYCH SYSTEMÓW TECHNICZNYCH**

### **Słowa kluczowe**

System techniczny, niezawodność, ryzyko, predykcja.

### **Streszczenie**

W artykule zaprezentowany jest program komputerowy pozwalający na ocenę i predykcję charakterystyk niezawodności i ryzyka złożonych systemów technicznych wraz z przykładem jego zastosowania. Algorytmy programu przygotowane zostały w oparciu o modele złożonych systemów technicznych, łączących modele ich niezawodności z modelami ich procesów eksploatacji, przy uwzględnieniu zmiennych w różnych stanach eksploatacyjnych ich struktur niezawodnościowych. Przy założeniu, że elementy systemów mają wykładnicze funkcje niezawodności, program wyznacza ich warunkowe funkcje niezawodności w poszczególnych stanach eksploatacyjnych systemów, bezwarunkowe funkcje niezawodności wraz z wykresami, wartości średnie oraz odchylenia standardowe bezwarunkowych czasów przebywania systemów w podzbiorach stanów niezawodnościowych oraz w poszczególnych stanach niezawodnościowych rozważanych systemów. Program wykreśla także funkcję ryzyka oraz wyznacza moment do przekroczenia dopuszczalnego poziomu funkcji ryzyka systemów.

## Wprowadzenie

Wiele rzeczywistych systemów technicznych należy do klasy systemów złożonych zmieniających swoje struktury niezawodnościowe oraz parametry niezawodnościowe elementów w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Zmiany stanów procesów eksploatacji tych systemów powodują zmiany ich struktur niezawodnościowych oraz niekiedy także zmianę charakterystyk niezawodnościowych ich elementów, co czyni analizę ich niezawodności trudną. Wygodnym podejściem do rozwiązania tego problemu jest opis procesów eksploatacji tych systemów za pomocą procesów semimarkowskich w połączeniu z wielostanowym modelem ich niezawodności i gotowości [3, 6]. Takie podejście pozwala na zbudowanie łącznego ogólnego modelu niezawodności i gotowości złożonych systemów uwzględniającego ich procesy eksploatacji [5].

### 1. Niezawodność systemów wielostanowych w zmiennych warunkach eksploatacyjnych

Zakładamy, że zmiany procesu eksploatacji systemu wielostanowego mają wpływ na funkcje niezawodności elementów systemu  $E_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  oraz na jego strukturę niezawodnościową. Przy tych założeniach wprowadzamy pojęcie warunkowej wielostanowej funkcji niezawodności elementu  $E_i$  systemu, podczas gdy system znajduje się w stanie eksploatacyjnym  $z_b$ ,  $b = 1, 2, \dots, v$ , [7]:

$$[R_i(t, \cdot)]^{(b)} = [1, [R_i(t, 1)]^{(b)}, \dots, [R_i(t, z)]^{(b)}],$$

gdzie  $[(R_i(t, u)]^{(b)} = P(T_i^{(b)}(u) > t \mid Z(t) = z_b)$  dla  $t \in \langle 0, \infty \rangle$  oraz  $T_i^{(b)}(u)$  jest warunkowym czasem przebywania elementu  $E_i$  systemu w podzbiorze stanów niezawodnościowych  $\{u, u+1, \dots, z\}$ ,  $u = 1, 2, \dots, z$ .

Następnie definiujemy warunkową wielostanową funkcję niezawodności systemu:

$$[\mathbf{R}(t, \cdot)]^{(b)} = [1, [\mathbf{R}(t, 1)]^{(b)}, \dots, [\mathbf{R}(t, z)]^{(b)}],$$

gdzie  $[\mathbf{R}(t, u)]^{(b)} = P(T^{(b)}(u) > t \mid Z(t) = z_b)$  dla  $t \in \langle 0, \infty \rangle$  oraz  $T^{(b)}(u)$  jest warunkowym czasem przebywania systemu w podzbiorze stanów niezawodnościowych  $\{u, u+1, \dots, z\}$ ,  $u = 1, 2, \dots, z$ .

W przypadku gdy czas eksploatacji systemu jest dostatecznie duży, bezwarunkowa funkcja niezawodności systemu:

$$\mathbf{R}(t, \cdot) = [1, \mathbf{R}(t, 1), \dots, \mathbf{R}(t, z)],$$

gdzie  $\mathbf{R}(t, u) = P(T(u) > t)$  dla  $t \in \langle 0, \infty \rangle$  oraz  $T(u)$  jest bezwarunkowym czasem przebywania systemu w podzbiorze stanów niezawodnościowych  $\{u, u+1, \dots, z\}$  określona jest wzorem [7]:

$$\mathbf{R}(t, u) \cong \sum_{b=1}^v p_b [\mathbf{R}(t, u)]^{(b)} \quad \text{dla } t \geq 0, u = 1, 2, \dots, z \quad (1)$$

gdzie  $p_b$  są granicznymi wartościami prawdopodobieństw chwilowych przebywania procesu eksploatacji systemu  $Z(t)$  w poszczególnych stanach eksploatacyjnych  $z_b, b = 1, 2, \dots, v$ .

Korzystając z powyższego wzoru, można wyznaczyć [7] wartości średnie  $\mu(u)$  i odchylenia standardowe  $\sigma(u)$  bezwarunkowego czasu przebywania systemu w podzbiorach stanów niezawodnościowych  $\{u, u+1, \dots, z\}, u = 1, 2, \dots, z$ , wartości średnie  $\bar{\mu}(u)$  bezwarunkowego czasu przebywania systemu w poszczególnych stanach niezawodnościowych  $u = 1, 2, \dots, z$ , oraz funkcję ryzyka systemu zdefiniowaną jako:

$$\mathbf{r}(t) = 1 - \mathbf{R}(t, u), t \in \langle 0, \infty \rangle \quad (2)$$

a także moment, kiedy funkcja ryzyka systemu przekroczy dopuszczalny poziom  $\delta$  określony wzorem:

$$\tau = \mathbf{r}^{-1}(\delta) \quad (3)$$

gdzie  $\mathbf{r}^{-1}(t)$  jest funkcją odwrotną funkcji ryzyka systemu  $\mathbf{r}(t)$ .

Korzystając z (1) i w oparciu o wyniki prac [4, 7], można sformułować następujące twierdzenie.

### **Twierdzenie**

Jeśli elementy wielostanowego systemu w stanach eksploatacyjnych  $z_b, b = 1, 2, \dots, v$  mają wykładnicze funkcje niezawodności określone wzorem:

$$[R_{ij}(t, \cdot)]^{(b)} = [1, [R_{ij}(t, 1)]^{(b)}, \dots, [R_{ij}(t, z)]^{(b)}], \quad t \in (-\infty, \infty), \quad b = 1, 2, \dots, \nu \quad (4)$$

gdzie

$$[R_{ij}(t, u)]^{(b)} = \exp[-[\lambda_{ij}(u)]^{(b)} t] \quad \text{dla } t \geq 0, \quad [\lambda_{ij}(u)]^{(b)} > 0. \quad (5)$$

dla  $i = 1, 2, \dots, k, j = 1, 2, \dots, l_i, u = 1, 2, \dots, z, b = 1, 2, \dots, \nu$  oraz czas eksploatacji systemu jest dostatecznie duży, to bezwarunkowa funkcja niezawodności określona jest odpowiednio wzorem:

1) dla systemu szeregowo-równoległego

$$\mathbf{R}_{k, l_1, l_2, \dots, l_k}(t, \cdot) = [1, \mathbf{R}_{k, l_1, l_2, \dots, l_k}(t, 1), \dots, \mathbf{R}_{k, l_1, l_2, \dots, l_k}(t, z)],$$

gdzie

$$\mathbf{R}_{k, l_1, l_2, \dots, l_k}(t, u) \cong 1 - \sum_{b=1}^{\nu} p_b \prod_{i=1}^k [1 - \exp[-\sum_{j=1}^{l_i} [\lambda_{ij}(u)]^{(b)} t]] \quad \text{dla } t \geq 0, \\ u = 1, 2, \dots, z \quad (6)$$

gdzie  $k$  jest liczbą podsystemów równoległych, natomiast  $l_i, i = 1, 2, \dots, k$ , są liczbami elementów w podsystemach;

2) dla systemu szeregowo-progowego

$$\mathbf{R}_{k, l_1, l_2, \dots, l_k}^{(m)}(t, \cdot) = [1, \mathbf{R}_{k, l_1, l_2, \dots, l_k}^{(m)}(t, 1), \dots, \mathbf{R}_{k, l_1, l_2, \dots, l_k}^{(m)}(t, z)],$$

gdzie

$$\mathbf{R}_{k, l_1, l_2, \dots, l_k}^{(m)}(t, u) \cong 1 - \sum_{b=1}^{\nu} p_b \sum_{\substack{r_1, r_2, \dots, r_k=0 \\ r_1+r_2+\dots+r_k \leq m-1}} \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^{l_i} \exp[-[\lambda_{ij}(u)]^{(b)} t]^{r_i} \\ \cdot [1 - \prod_{j=1}^{l_i} \exp[-[\lambda_{ij}(u)]^{(b)} t]]^{1-r_i} \quad \text{dla } t \geq 0, \quad u = 1, 2, \dots, z \quad (7)$$

gdzie  $k$  jest liczbą podsystemów progowych, natomiast  $l_i, i = 1, 2, \dots, k$  są liczbami elementów w podsystemach;

- 3) dla innych typowych systemów, tzn. systemu szeregowego, równoległego, progowego, progowego typu kolejnych “ $m$  z  $n$ : F”, równoległo-szeregowego, progowo-szeregowego, szeregowo-progowego typu kolejnych “ $m$  z  $k$ : F”, progowo typu kolejnych “ $m$  z  $l$ : F”-szeregowego oraz systemu szeregowego powyższych systemów funkcje niezawodności określone są np. w [1, 2, 4].

## 2. Opis programu komputerowego do oceny i predykcji niezawodności i ryzyka systemów

Prezentowany program komputerowy oparty jest na metodach oceny niezawodności i ryzyka złożonych systemów technicznych zawartych w [1]. Program napisany jest w języku Java z wykorzystaniem biblioteki SSJ V2.1.3. Biblioteka SSJ, rozwijana w Katedrze Informatyki i Badań Operacyjnych (DIRO) Uniwersytetu w Montrealu, wspomaga prowadzenie symulacji stochastycznych. Dokumentacja dostępna jest pod adresem internetowym <http://www.iro.umontreal.ca/~simardr/ssj/indexe.html>. Schemat programu przedstawiony jest na rys. 1.

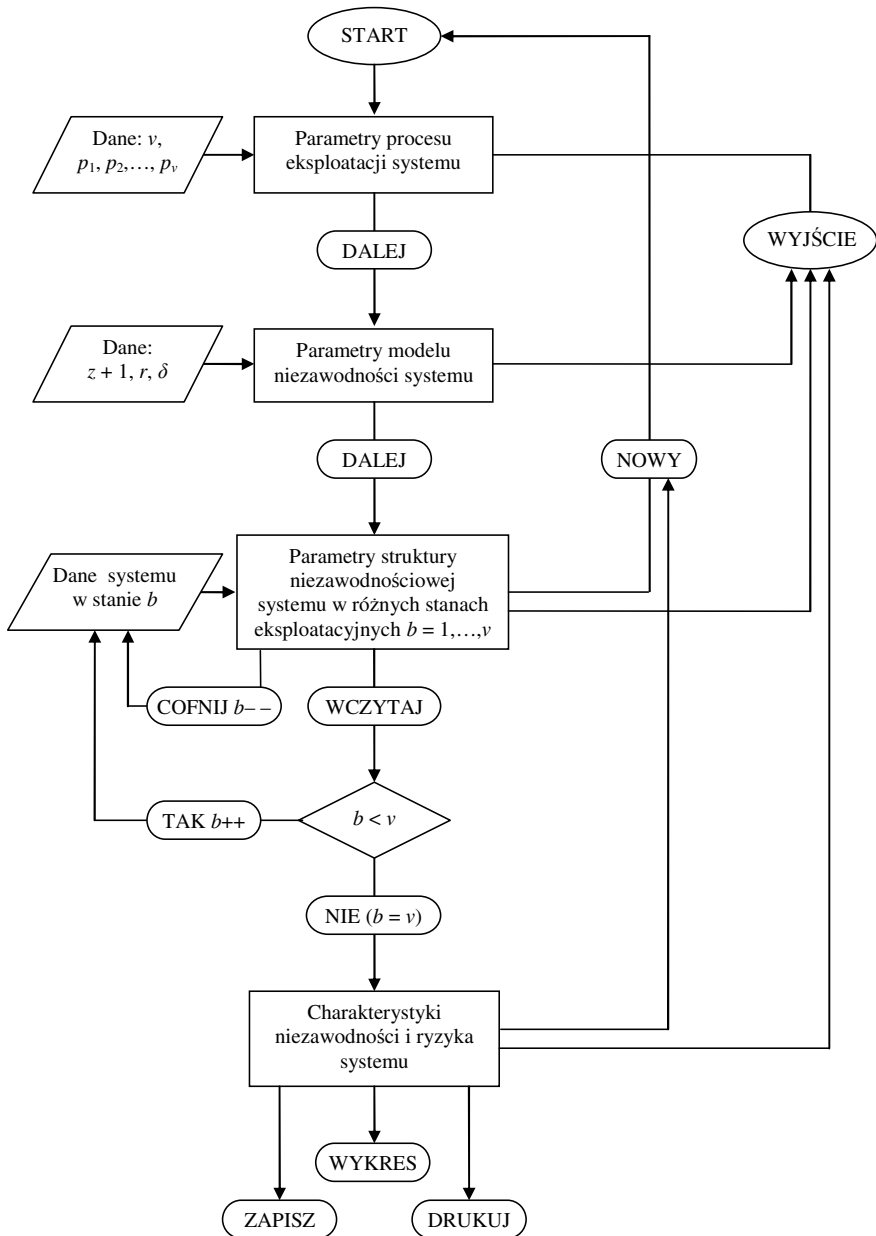
Program komputerowy składa się z trzech paneli. Panel pierwszy „Parametry procesu eksploatacji systemu” jest wykorzystywany do wczytywania wejściowych parametrów procesu eksploatacji systemu:

- liczby stanów eksploatacyjnych procesu eksploatacji systemu  $v$ ,
- chwilowych prawdopodobieństw przebywania procesu eksploatacji systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych  $p_1, p_2, \dots, p_v$ .

W drugim panelu „Parametry niezawodnościowe systemu” wczytywane są parametry wejściowe modelu niezawodności systemu:

- liczba stanów niezawodnościowych systemu oraz elementów  $z + 1$ ,
- stan krytyczny systemu oraz elementów  $r$ ,
- przyjęty poziom ryzyka systemu  $\delta$ ,
- parametry struktury niezawodnościowej systemu w różnych stanach eksploatacyjnych,
- intensywności wyjścia elementów (odpowiednio  $[\lambda_i(u)]^{(b)}$  lub  $[\lambda_{ij}(u)]^{(b)}$ ) z podzbiorów stanów niezawodnościowych  $\{u, u+1, \dots, z\}$ ,  $u = 1, 2, \dots, z$  w stanie eksploatacyjnym  $z_b$ ,  $b = 1, 2, \dots, v$ , zakładając, że funkcje niezawodności elementów systemu są wykładnicze.

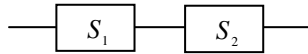
Po zakończeniu wprowadzania danych program automatycznie przechodzi do panelu „Charakterystyki niezawodności i ryzyka systemu”, w którym wyznaczone są charakterystyki niezawodności i ryzyka systemów wymienione w punkcie 1 artykułu.



Rys. 1. Schemat algorytmu programu komputerowego do oceny i predykcji niezawodności i ryzyka złożonych systemów technicznych

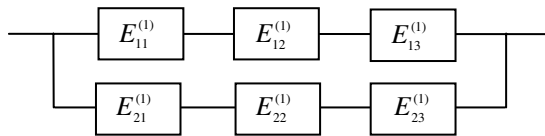
### 3. Ocena i predykcja niezawodności i ryzyka przykładowego systemu w zmiennych warunkach eksploatacyjnych

Rozważmy przykładowy system  $S$  składający się z dwóch podsystemów  $S_1$ ,  $S_2$  połączonych szeregowo, jak na rys. 2.



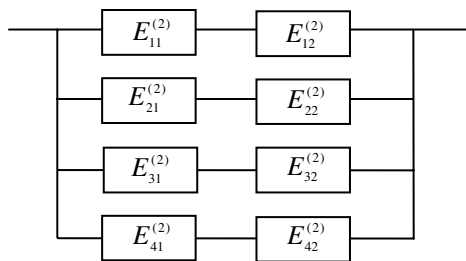
Rys. 2. Ogólny schemat struktury niezawodnościowej systemu  $S$

Podsystem  $S_1$  składa się z dwóch podsystemów szeregowych, gdzie każdy złożony jest z 3 elementów, oznaczonych odpowiednio przez  $E_{ij}^{(1)}$ ,  $i = 1, 2$ ,  $j = 1, 2, 3$ , ze strukturą niezawodności przedstawioną na rys. 3.



Rys. 3. Ogólny schemat struktury niezawodnościowej systemu  $S_1$

Podsystem  $S_2$  złożony jest z czterech szeregowych podsystemów, z których każdy składa się z 2 elementów, oznaczonych odpowiednio przez  $E_{ij}^{(2)}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ,  $j = 1, 2$ , ze strukturą niezawodnościową przedstawioną na rys. 4.



Rys. 4. Ogólny schemat struktury niezawodnościowej systemu  $S_2$

Przyjmujemy, że struktura niezawodnościowa systemu oraz niezawodność elementów podsystemów zależy od zmiennych w czasie warunków eksploatacyjnych i wyróżniamy cztery następujące stany eksploatacyjne:

- stan eksploatacyjny  $z_1$  – system składa się z podsystemu  $S_1$ , będącego systemem szeregowo-równoległym ze schematem przedstawionym na rys. 3,

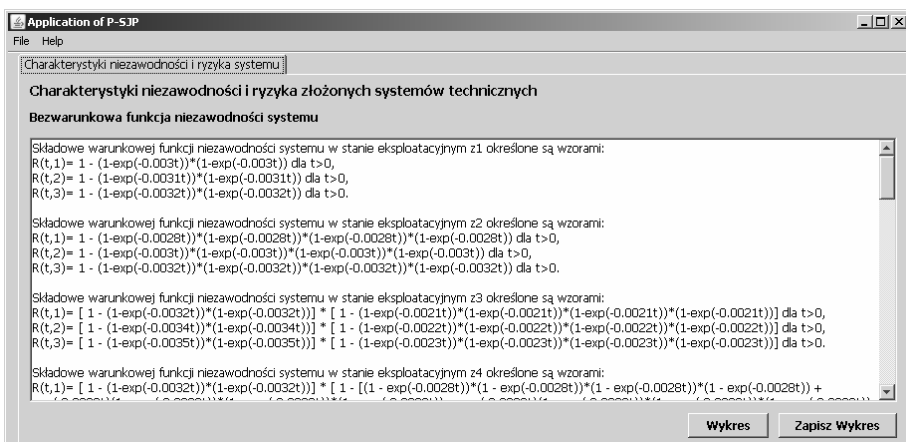
- stan eksploatacyjny  $z_2$  – system składa się z podsystemu  $S_2$ , będącego systemem szeregowo-równoległym ze schematem przedstawionym na rys. 4,
- stan eksploatacyjny  $z_3$  – system składa się z połączonych szeregowo podsystemów  $S_1$  oraz  $S_2$  (rys. 2), będących systemami szeregowo-równoległymi o schematach przedstawionych na rys. 3–4,
- stan eksploatacyjny  $z_4$  – system składa się z połączonych szeregowo podsystemów  $S_1$  oraz  $S_2$  (rys. 2), gdzie podsystem  $S_1$  jest systemem szeregowo-równoległym ze schematem przedstawionym na rys. 3, natomiast podsystem  $S_2$  jest systemem szeregowo-progowym „2 z 4” przedstawionym na rys. 4.

We wszystkich stanach eksploatacyjnych  $z_b$ ,  $b = 1, 2, 3, 4$ , wyróżniamy następujące cztery stany niezawodnościowe systemu oraz jego elementów, a mianowicie:

- stan niezawodnościowy 3 – zapewniający pełne bezpieczeństwo eksploatacji systemu,
- stan niezawodnościowy 2 – zapewniający mniej efektywną eksploatację systemu z powodu starzenia się,
- stan niezawodnościowy 1 – zapewniający mniej efektywną eksploatację systemu z powodu starzenia się oraz mniejsze bezpieczeństwo eksploatacji systemu,
- stan niezawodnościowy 0 – powodujący niezdatność systemu.

Ponadto przyjmujemy, że możliwe są przejścia pomiędzy stanami niezawodnościowymi elementów tylko z lepszego na gorszy [4].

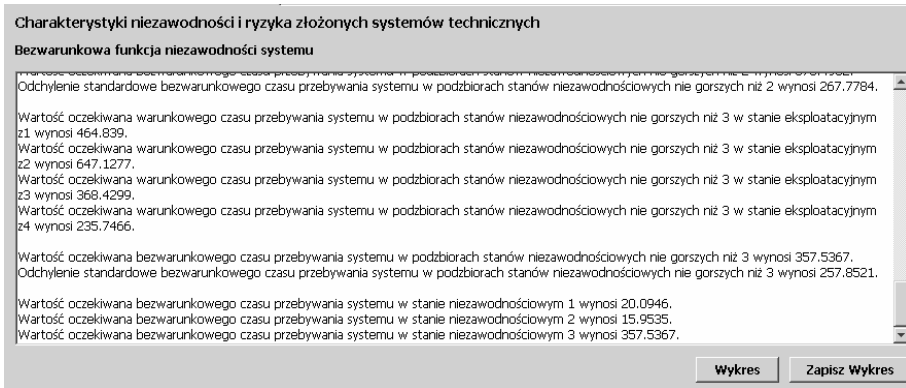
Korzystając z programu komputerowego, po wprowadzeniu wszystkich niezbędnych danych otrzymujemy w rezultacie dla omawianego systemu składowe warunkowych funkcji niezawodności systemu w stanach eksploatacyjnych oraz składowe bezwarunkowej funkcji niezawodności systemu przedstawione w oknie wynikowym (rys. 5).



Rys. 5. Wyniki programu komputerowego do oceny i predykcji niezawodności i ryzyka złożonych systemów technicznych

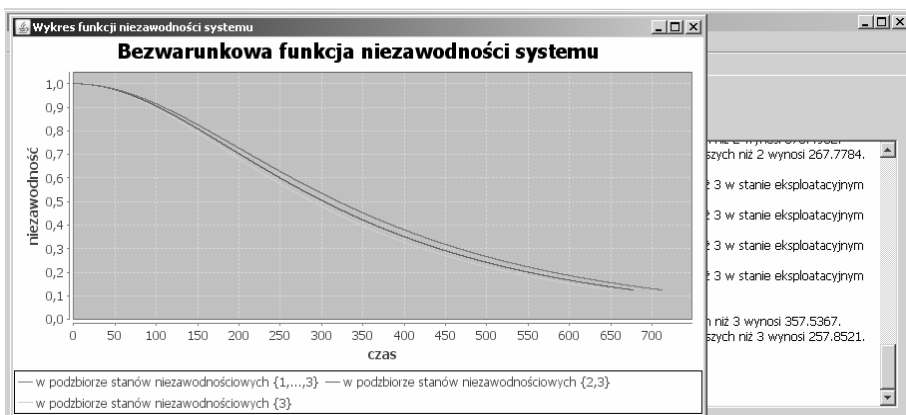


Program wyznacza wartości średnie warunkowych czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów niezawodnościowych  $\{u, u+1, \dots, z\}$ , podczas gdy system znajduje się w stanie eksploatacyjnym  $z_b$ ,  $b = 1, 2, 3, 4$ , wartości średnie oraz odchylenia standardowe bezwarunkowego czasu przebywania systemu w podzbiorach stanów niezawodnościowych  $\{1, 2, 3, 4\}$ ,  $\{2, 3, 4\}$ ,  $\{3, 4\}$ ,  $\{4\}$  oraz wartości średnie bezwarunkowego czasu przebywania systemu w poszczególnych stanach niezawodnościowych  $u = 1, 2, 3, 4$ , (rys. 6).



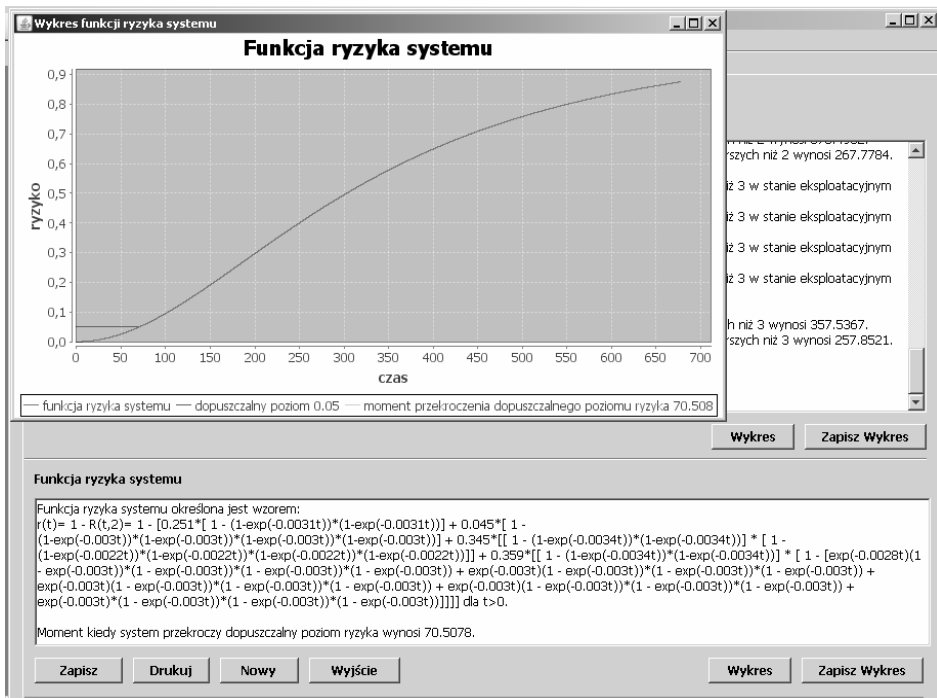
Rys. 6. Okno wyznaczonych charakterystyk niezawodności systemu

Program pozwala na pokazanie wykresu składowych bezwarunkowej funkcji niezawodności systemu w podzbiorach stanów niezawodnościowych (rys. 7).



Rys. 7. Okno wykresu składowych bezwarunkowej funkcji niezawodności systemu

W oknie „Funkcja ryzyka systemu” (rys. 8) program podaje także funkcję ryzyka systemu wraz z możliwością wyświetlenia wykresu oraz moment przekroczenia przyjętego dopuszczalnego poziomu ryzyka systemu.



Rys. 8. Okno wyznaczonych charakterystyk ryzyka systemu

Otrzymane wyniki mogą zostać zapisane do pliku bądź wydrukowane.

## Podsumowanie

Przedstawiony program komputerowy służący do oceny i predykcji niezawodności i ryzyka złożonych systemów technicznych został opracowany na podstawie metod i algorytmów zawartych w [1]. Program pozwala na automatyczne znajdowanie charakterystyk niezawodności i ryzyka dla systemów omawianych w artykule, przy założeniu, że rozważane systemy są wykładnicze. Program może być zastosowany do predykcji i optymalizacji eksploatacji, niezawodności i ryzyka złożonych systemów i procesów transportowych, a w szczególności portowych oraz morskich systemów transportowych.

## Podziękowania

Artykuł opisuje część prac wykonanych w ramach Polsko-Singapurskiego Wspólnego Projektu „Safety and Reliability of Complex Industrial Systems and Processes” finansowanego z grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW decyzja nr 63/N-Singapur/2007/0) oraz przez Singapurską Agencję Nauki, Techniki i Badań (grant nr 072 1340050).

## Bibliografia

1. Blokus-Roszkowska A., Guze S., Kołowrocki K., Kwiatkowska-Sarnecka B., Milczek B., Soszyńska J.: Integrated package of solutions for complex industrial systems and processes safety and reliability optimization. WP 7 – Task 7.2. Methods of complex technical systems reliability, availability and safety evaluation and prediction. Poland-Singapore Joint Project. MSHE Decision No. 63/N-Singapore/2007/0, Gdynia 2009.
2. Guze S., Kołowrocki K.: Analiza niezawodności wielostanowych starzejących się systemów progowych typu „kolejnych k z n: F”. Materiały Szkoły Zimowej Niezawodności, Szczyrk 2007, 218–229.
3. Grabski F.: Semimarkowskie modele niezawodności i eksploatacji. Monografia, Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2002.
4. Kołowrocki K.: Reliability of Large Systems. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo, Elsevier 2004.
5. Kołowrocki K.: Reliability and risk evaluation of complex systems in their operation processes. International Journal of Materials & Structural Reliability, Vol. 4, No 2, 2006, 129–147.
6. Limnios N., Oprisan G.: Semi-Markov Processes and Reliability. Birkhauser, Boston 2001.
7. Soszyńska J.: Analiza niezawodności systemów w zmiennych warunkach eksploatacji. Rozprawa doktorska, Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2007.
8. Soszyńska J.: Systems reliability analysis in variable operation conditions. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. System Reliability and Safety, Vol. 14, No 6, 2007, 617–634.

Recenzent:  
**Janusz KARPİŃSKI**

## **Computer predictions of complex technical system reliability and risk**

### **Key words**

Technical system, reliability, risk, prediction.

### **Summary**

The presented computer program for the evaluation and prediction of complex, technical system reliability and risk is based on methods and algorithms included in [1]. The computer program allows automatic determination of reliability and risk characteristics for systems considered in the paper under the assumption that the considered systems are exponential. The computer program can be applied for prediction and optimisation operation, reliability and risk of complex transportation systems and processes, particularly for port, shipyard and maritime transportation systems.