

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

KOMPUTEROWA OPTYMALIZACJA NIEZAWODNOŚCI I RYZYKA LĄDOWEGO LINOWEGO TRANSPORTERA STATKÓW

Słowa kluczowe

Proces eksploatacji, niezawodność, optymalizacja, systemy transportowe.

Streszczenie

W artykule przedstawiona jest metoda optymalizacji procesu eksploatacji i niezawodności złożonych systemów technicznych oraz program komputerowy pozwalający na automatyczne zastosowanie proponowanej procedury. Program wyznacza chwilowe prawdopodobieństwa przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych, które maksymalizują czasy przebywania systemu w podziorach stanów niezawodnościowych nie gorszych niż stan krytyczny, a następnie korzystając z otrzymanych rezultatów pozwala na predykcję optymalnych charakterystyk niezawodności i ryzyka złożonych systemów technicznych.

Program jest zastosowany do optymalizacji niezawodności i ryzyka lądowego linowego transportera statków. Ustalone są następujące optymalne charakterystyki: optymalna bezwarunkowa funkcja niezawodności systemu, optymalne wartości średnie bezwarunkowych czasów przebywania systemu w podziorach stanów niezawodnościowych, optymalna funkcja ryzyka systemu oraz optymalny moment, kiedy funkcja ryzyka przekroczy ustalony poziom.

Wprowadzenie

Podczas analizy niezawodnościowej rzeczywistych spotykamy się ze złożonymi systemami o skomplikowanych procesach eksploatacji, które mają istotny wpływ na ich niezawodność. Przedstawiona metoda optymalizacji procesu eksploatacji oparta jest na wynikach ogólnego modelu łączącego semimarkowskie modelowanie procesu eksploatacji systemu z wielostanowym podejściem do niezawodności systemu [3, 8]. Metoda ta oraz programowanie liniowe [4] służą do optymalizacji eksploatacji i niezawodności złożonych systemów technicznych w zmiennych warunkach eksploatacyjnych [7].

1. Niezawodność systemu w zmiennych warunkach eksploatacyjnych

Przyjmujemy, że system podczas eksploatacji w ustalonej chwili t , $t \in \langle 0, \infty \rangle$ może znajdować się w jednym z v , $v \in N$ różnych stanów eksploatacyjnych. Następnie definiujemy proces eksploatacji systemu $Z(t)$, $t \in \langle 0, \infty \rangle$ jako funkcję zmiennej ciągłej t , przyjmującą wartości dyskretne w zbiorze stanów eksploatacyjnych $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_v\}$. Ponadto przyjmujemy semimarkowski model [3, 6] procesu eksploatacji systemu $Z(t)$. Definiujemy warunkową wielostanową funkcję niezawodności systemu, podczas gdy system znajduje się w stanie eksploatacyjnym z_b , $b = 1, 2, \dots, v$:

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

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 [9]:

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

Wartość średnia bezwarunkowego czasu $T(u)$ przebywania systemu w podzbiorze stanów niezawodności $\{u, u+1, \dots, z\}$ określona jest wzorem [9]:

$$\mu(u) \cong \sum_{b=1}^v p_b \mu_b(u), \quad u = 1, 2, \dots, z, \quad (2)$$

gdzie p_b są granicznymi wartościami prawdopodobieństw chwilowych przebywania procesu eksploatacji systemu $Z(t)$ w poszczególnych stanach eksploatacyjnych z_b , $b = 1, 2, \dots, v$, natomiast $\mu_b(u)$, $b = 1, 2, \dots, v$, $u = 1, 2, \dots, z$ są wartościami średnimi warunkowych czasów przebywania systemu w podzbiorze stanów niezawodnościowych $\{u, u+1, \dots, z\}$, $u = 1, 2, \dots, z$.

2. Optymalizacja procesu eksploatacji systemu

Biorąc pod uwagę równanie (1), zasadnym jest przyjęcie założenia, że proces eksploatacji systemu ma istotny wpływ na jego niezawodność. Wpływ ten jest uwidoczniiony także we wzorze (2) na wartości średnie bezwarunkowych czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów niezawodnościowych. Zatem może być tutaj zaproponowane podejście do optymalizacji czasu przebywania systemu w podzbiorach stanów niezawodnościowych oparte na programowaniu liniowym [4]. Mianowicie możemy znaleźć odpowiednie optymalne wartości \check{p}_b , $b = 1, 2, \dots, v$, granicznych prawdopodobieństw chwilowych przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych, które maksymalizują wartość średnią $\mu(r)$ bezwarunkowego czasu przebywania systemu w podzbiorze stanów niezawodnościowych $\{r, r+1, \dots, z\}$:

$$\mu(r) = \sum_{b=1}^v p_b \mu_b(r) \quad (3)$$

dla ustalonego stanu krytycznego systemu r , $r \in \{1, 2, \dots, z\}$ i następujących ograniczeń:

$$\sum_{b=1}^v p_b = 1, \quad \check{p}_b \leq p_b \leq \widehat{p}_b, \quad b = 1, 2, \dots, v, \quad (4)$$

gdzie $\mu_b(r)$, $\mu_b(r) \geq 0$, $b = 1, 2, \dots, v$ są ustalonymi wartościami średnimi warunkowych czasów przebywania systemu w podzbiorze stanów niezawodnościowych $\{r, r+1, \dots, z\}$ oraz

$$\check{p}_b, \quad 0 \leq \check{p}_b \leq 1 \quad \text{i} \quad \widehat{p}_b, \quad 0 \leq \widehat{p}_b \leq 1, \quad \check{p}_b \leq \widehat{p}_b, \quad b = 1, 2, \dots, v$$

są odpowiednio dolnymi i górnymi ograniczeniami nieznanymi prawdopodobieństw chwilowych p_b , $b = 1, 2, \dots, \nu$, [6, 7].

W tym celu najpierw porządkujemy warunkowe wartości średnie $\mu_b(r)$, $b = 1, 2, \dots, \nu$, w kolejności nierosnącej:

$$\mu_{b_1}(r) \geq \mu_{b_2}(r) \geq \dots \geq \mu_{b_\nu}(r), \text{ gdzie } b_i \in \{1, 2, \dots, \nu\} \text{ dla } i = 1, 2, \dots, \nu.$$

Następnie podstawiamy:

$$x_i = p_{b_i}, \quad \tilde{x}_i = \tilde{p}_{b_i}, \quad \hat{x}_i = \hat{p}_{b_i} \text{ dla } i = 1, 2, \dots, \nu$$

i poszukujemy wartości x_i , $i = 1, 2, \dots, \nu$, które maksymalizują funkcję liniową określoną przez (3) przyjmującą, po tym podstawieniu, następującą postać:

$$\mu(r) = \sum_{i=1}^{\nu} x_i \mu_{b_i}(r) \quad (5)$$

dla ustalonego $r \in \{1, 2, \dots, z\}$.

Definiujemy

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^{\nu} \tilde{x}_i, \quad \hat{y} = 1 - \tilde{x}$$

oraz

$$\tilde{x}^0 = 0, \quad \hat{x}^0 = 0 \quad \text{ i } \quad \tilde{x}^I = \sum_{i=1}^I \tilde{x}_i, \quad \hat{x}^I = \sum_{i=1}^I \hat{x}_i \text{ dla } I = 1, 2, \dots, \nu.$$

i znajdujemy największą wartość $I \in \{0, 1, \dots, \nu\}$ taką, że $\hat{x}^I - \tilde{x}^I < \hat{y}$.

Optymalne rozwiązanie, dla którego średni czas $\mu(r)$ określony przez (5) jest maksymalny, znajdujemy w sposób następujący:

1) jeśli $I = 0$, to optymalnym rozwiązaniem jest

$$\dot{x}_1 = \hat{y} + \tilde{x}_1 \text{ oraz } \dot{x}_i = \tilde{x}_i \text{ dla } i = 2, 3, \dots, \nu;$$

2) jeśli $0 < I < \nu$, to optymalnym rozwiązaniem jest

$$\dot{x}_i = \hat{x}_i \text{ dla } i = 1, 2, \dots, I, \quad \dot{x}_{I+1} = \hat{y} - \hat{x}^I + \tilde{x}^I + \tilde{x}_{I+1}$$

$$\text{ oraz } \dot{x}_i = \tilde{x}_i \text{ dla } i = I + 2, I + 3, \dots, \nu;$$

3) jeśli $I = v$, to optymalnym rozwiązaniem jest

$$\dot{x}_i = \hat{x}_i \text{ dla } i = 1, 2, \dots, v.$$

3. Optymalne charakterystyki niezawodności systemu

Korzystając z wyznaczonych optymalnych granicznych prawdopodobieństw przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych, można wyznaczyć [2, 7] następujące optymalne charakterystyki:

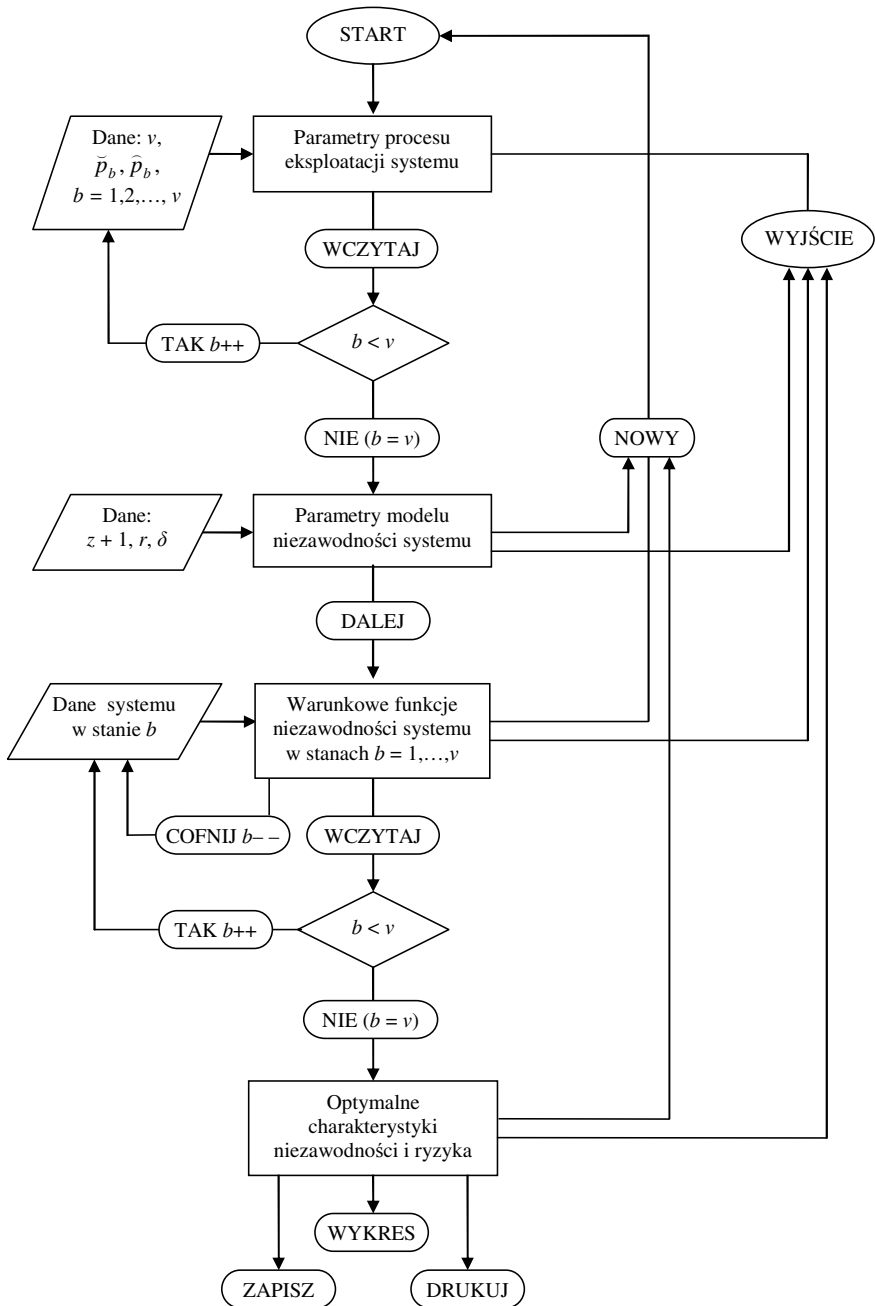
- optymalne bezwarunkowe funkcje niezawodności systemu $\hat{R}(t, \cdot)$,
- optymalne wartości średnie $\hat{\mu}(u)$ oraz odchylenia standardowe $\hat{\sigma}(u)$ bezwarunkowych czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów niezawodnościowych $\{u, u+1, \dots, z\}$, $u = 1, 2, \dots, z$,
- optymalne wartości średnie $\hat{\bar{\mu}}(u)$ bezwarunkowych czasów przebywania systemu w poszczególnych stanach niezawodnościowych $u = 1, 2, \dots, z$,
- optymalną funkcję ryzyka systemu $\hat{r}(t)$,
- moment \hat{t} , kiedy funkcja ryzyka systemu przekroczy dopuszczalny poziom δ .

4. Opis programu komputerowego do oceny i predykcji niezawodności i ryzyka systemów

Schemat programu komputerowego przedstawiony jest na rys. 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>.

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 ,
- dolnych ograniczeń prawdopodobieństw chwilowych p_1, p_2, \dots, p_v w poszczególnych stanach eksploatacyjnych $\check{p}_1, \check{p}_2, \dots, \check{p}_v$,
- górnych ograniczeń prawdopodobieństw chwilowych p_1, p_2, \dots, p_v w poszczególnych stanach eksploatacyjnych $\hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots, \hat{p}_v$.



Rys. 1. Schemat algorytmu programu komputerowego do optymalizacji procesu eksploatacji i niezawodności złożonych systemów technicznych

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 ,
- składowe warunkowych funkcji niezawodności systemu $[R(t, \cdot)]^{(b)}$ w stanie eksploatacyjnym $z_b, b = 1, 2, \dots, v$,
- przyjęty poziom ryzyka systemu δ .

Po zakończeniu wprowadzania danych program automatycznie przechodzi do panelu „Optymalne charakterystyki niezawodności i ryzyka systemu”, w którym wyznaczone są optymalne prawdopodobieństwa chwilowe procesu eksploatacji systemu oraz optymalne charakterystyki niezawodności i ryzyka systemów wymienione w punkcie 1.

5. Predykcja optymalnej niezawodności i ryzyka lądowego linowego transportera statków

Lądowy linowy transporter statków złożony jest z trzech elektrycznych przyciągarek linowych pracujących niezależnie. Przyciągarki wyposażone są w stalowe liny typu „Drutem” o średnicy 30 mm. System ten jest używany do transportu okrętów, przybywających do stoczni w celu remontu, z platformy na stanowiska remontowe i z powrotem ze stanowisk remontowych na platformę.

Rozpatrujemy system lin lądowego transportera statków złożony z trzech podsystemów lin S_1, S_2, S_3 tworzących szeregową strukturę niezawodnościową. Każdy z podsystemów wyposażony jest w linę, składającą się z 6 zwitek, a każda zwitka składa się z 36 drutów z rdzeniem parcianym, będących ich elementami. Struktura niezawodnościowa oraz charakterystyki niezawodnościowe elementów zmieniają się w różnych stanach eksploatacyjnych. Niezawodność systemu lin lądowego transportera statków zależy głównie od tonażu transportowanych statków oraz stanowiska, na które statek ma zostać przetransportowany.

Biorąc pod uwagę opinię ekspertów dotyczącą procesu eksploatacji rozpatrywanego systemu lin lądowego linowego transportera statków wyróżniamy 7 następujących stanów eksploatacyjnych [1]:

- stan eksploatacyjny z_1 – statek o ciężarze do 1300 ton jest transportowany z platformy na przesuwnicę, z przesuwnicy na stanowiska remontowe R1-R5 lub ze stanowisk remontowych R6-R9 na przesuwnicę (system składa się tylko z podsystemu S_1),
- stan eksploatacyjny z_2 – statek o ciężarze do 1300 ton jest transportowany z przesuwnicy na stanowiska remontowe R6-R9, ze stanowisk remontowych

R1-R5 na przesuwnicę lub z przesuwnicy na platformę (system składa się tylko z podsystemu S_3),

- stan eksploatacyjny z_3 – statek o ciężarze do 1300 ton jest transportowany ze stanowisk remontowych R1-R5 na przesuwnicę i utrudniony jest dostęp do przeciągarki numer 3 (system składa się tylko z podsystemu S_2),
- stan eksploatacyjny z_4 – statek o ciężarze powyżej 1300 do 1800 ton jest transportowany z platformy na przesuwnicę, z przesuwnicy na stanowiska remontowe R1-R5 lub ze stanowisk remontowych R6-R9 na przesuwnicę (system składa się z podsystemów S_1 oraz S_3 połączonych szeregowo),
- stan eksploatacyjny z_5 – statek o ciężarze powyżej 1300 up to 1800 ton jest transportowany z platformy na przesuwnicę, z przesuwnicy na stanowiska remontowe R1-R5 lub ze stanowisk remontowych R6-R9 na przesuwnicę oraz utrudniony jest dostęp do przeciągarki numer 3 (system składa się z podsystemów S_1 oraz S_2 połączonych szeregowo),
- stan eksploatacyjny z_6 – statek o ciężarze powyżej 1300 up to 1800 ton jest transportowany z przesuwnicy na stanowiska remontowe R6-R9, ze stanowisk remontowych R1-R5 na przesuwnicę lub z przesuwnicy na platformę (system składa się z podsystemów S_2 oraz S_3 połączonych szeregowo),
- stan eksploatacyjny z_7 – transportowany jest statek o ciężarze powyżej 1800 ton (system składa się z podsystemów S_1 , S_2 oraz S_3 połączonych szeregowo).

Na podstawie opinii ekspertów dotyczących procesu eksploatacji rozpatrywanego systemu lin przyjmujemy dolne:

$$\check{p}_1 = 0.103, \check{p}_2 = 0.086, \check{p}_3 = 0.025, \check{p}_4 = 0.019, \check{p}_5 = 0.021, \\ \check{p}_6 = 0.105, \check{p}_7 = 0.037$$

oraz górne:

$$\hat{p}_1 = 1.000, \hat{p}_2 = 0.543, \hat{p}_3 = 0.117, \hat{p}_4 = 0.025, \hat{p}_5 = 0.063, \\ \hat{p}_6 = 0.180, \hat{p}_7 = 0.083$$

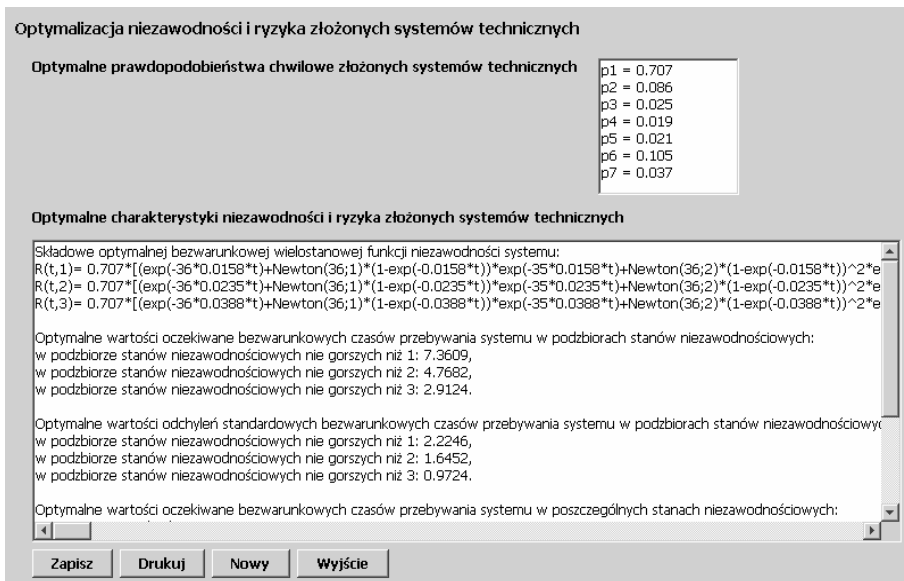
ograniczenia prawdopodobieństw chwilowych p_b , $b = 1, 2, \dots, 7$.

Zgodnie z opinią ekspertów ustalamy następujące stany niezawodnościowe systemu i elementów:

- stan niezawodnościowy 3 – drut jest nowy, bez jakichkolwiek defektów,
- stan niezawodnościowy 2 – korozja drutu jest większa niż 0% oraz mniejsza niż 25%,
- stan niezawodnościowy 1 – korozja drutu jest nie mniejsza niż 25% oraz mniejsza niż 50%,
- stan niezawodnościowy 0 – w przeciwnym przypadku drut jest uszkodzony.

Przyjmujemy, że stanem krytycznym systemu i elementów jest stan niezawodnościowy $r = 2$. Ponadto w celu przeprowadzenia optymalizacji niezawodność i ryzyka systemu lin lądowego transportera statków korzystamy z wyznaczonych w [1] warunkowych funkcji niezawodności systemu w stanach eksploatacyjnych.

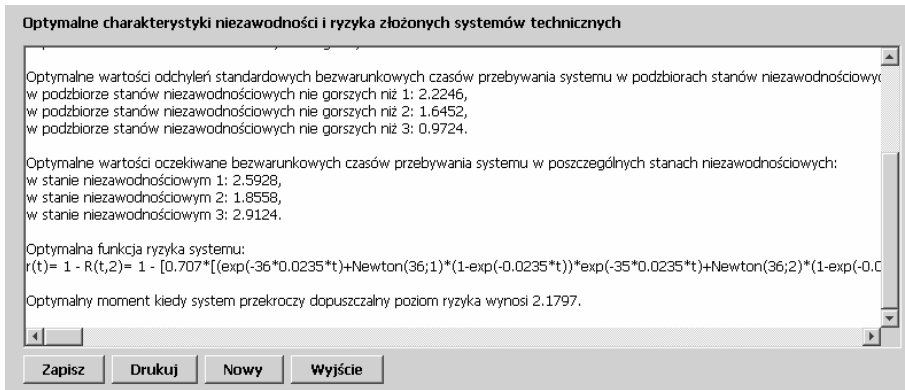
W wyniku zastosowania programu komputerowego otrzymujemy optymalne wartości prawdopodobieństw chwilowych stanów procesu eksploatacji złożonych systemów technicznych oraz optymalne następujące charakterystyki niezawodności i ryzyka po optymalizacji procesu eksploatacji systemu: składowe optymalnej bezwarunkowej funkcji niezawodności systemu wraz z możliwością pokazania wykresu oraz optymalne wartości średnich bezwarunkowych czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów niezawodnościowych (rys. 2).



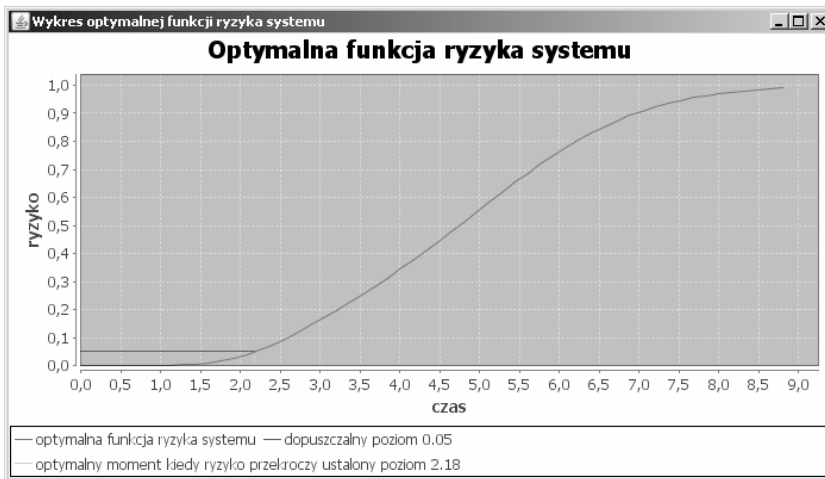
Rys. 2. Optymalne charakterystyki niezawodności lądowego linowego transportera statków

Ponadto program wyznacza optymalną funkcję ryzyka systemu oraz optymalny moment przekroczenia przyjętego dopuszczalnego poziomu ryzyka systemu (rys. 3).

Program pozwala także na sporządzenie wykresu optymalnej funkcji ryzyka systemu z zaznaczonym optymalnym momentem przekroczenia przyjętego dopuszczalnego poziomu ryzyka (rys. 4).



Rys. 3. Optymalne charakterystyki ryzyka lądowego linowego transportera statków



Rys. 4. Wykres optymalnej funkcji ryzyka lądowego linowego transportera statków

Podsumowanie

Przedstawiony program komputerowy służący do oceny i predykcji optymalnych charakterystyk niezawodności i ryzyka złożonych systemów technicznych został opracowany na podstawie metod i algorytmów przedstawionych w [2]. Program wyznacza chwilowe prawdopodobieństwa przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych, które maksymalizują czasy przebywania systemu w podziorach stanów niezawodnościowych nie gorszych niż stan krytyczny systemu, a następnie korzystając z otrzymanych wyników szacu-

je optymalne charakterystyki niezawodności i ryzyka złożonych systemów technicznych.

W celu zilustrowania działania programu wyznaczone zostały optymalne charakterystyki niezawodności i ryzyka systemu lin lądowego transportera statków. Przedstawiona optymalizacja niezawodności i ryzyka rzeczywistego systemu stoczniowego może być przykładem zastosowania komputerowego wspomagania procesu eksploatacji 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., Kołowrocki K.: Reliability and risk analysis of a ground ship-rope transporter in variable operation conditions. Proc. European Safety and Reliability Conference – ESREL 2009, Prague, Vol. 3, 2009, 1643–1648.
2. Blokus-Roszkowska A., Kołowrocki K., Soszyńska J.: Integrated package of solutions for complex industrial systems and processes safety and reliability optimization. WP 7 – Task 7.5. Methods of complex technical systems operation, reliability, availability, safety and cost optimization. Poland-Singapore Joint Project. MSHE Decision No. 63/N-Singapore/2007/0, Gdynia 2009.
3. Grabski F.: Semimarkowskie modele niezawodności i eksploatacji. Monografia, Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2002.
4. Klabjan D., Adelman D.: Existence of optimal policies for semi-Markov decision processes using duality for infinite linear programming. Siam Journal on Control and Optimization, Vol. 44, No. 6, 2006, 2104–2122.
5. Kołowrocki K.: Reliability of Large Systems. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo, Elsevier 2004.
6. Kołowrocki K., Soszyńska J.: Reliability, availability and safety of complex technical systems: modeling – identification – prediction – optimization. Summer Safety and Reliability Seminars – SSARS 2010, Journal of Polish Safety and Reliability Association, Vol. 1, 2010, 133–157.

7. Kolowrocki K., Soszyńska J.: Safety and reliability optimization of complex industrial systems and processes. Proc. European Safety and Reliability Conference – ESREL 2008, Prague, Vol. 3, 2009, 1677–1686.
8. Limnios N., Oprisan G.: Semi-Markov Processes and Reliability. Birkhauser, Boston 2001.
9. Soszyńska J.: Analiza niezawodności systemów w zmiennych warunkach eksploatacji. Rozprawa doktorska, Polska Akademia Nauk, Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2007.

Recenzent:
Jan SZYBKA

Computer reliability and risk optimisation of the ground ship-rope transporter

Key words

Operation process, reliability, optimisation, transportation systems.

Summary

The presented computer program for the evaluation and prediction of the complex technical system reliability and risk of optimal characteristics is based on methods and algorithms of optimisation presented in [2, 6, 7]. The computer program determines the transient probabilities in particular operation states maximising the system lifetimes in the reliability-state subset not worse than the system critical reliability state and then using the obtained results to evaluate optimal reliability and risk characteristics of the complex technical systems.

In order to illustrate the application of the computer program, we determined optimal reliability and risk characteristics of a ground ship-rope transporter. Presented in the paper is the reliability and risk optimisation of a real shipyard system that can be an example of a computer aid for the operation process of transportation systems.