

**Krzysztof KOŁOWROCKI, Joanna SOSZYŃSKA**  
Akademia Morska w Gdyni

## **OPTYMALIZACJA PROCESU EKSPLOATACJI PORTOWEGO SYTEMU TRANSPORTU PALIWA**

### **Słowa kluczowe**

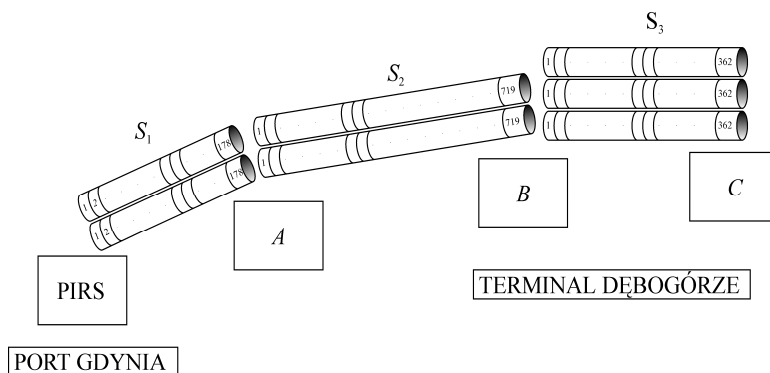
Niezawodność, system złożony, proces eksploatacji, optymalizacja, transport rurociągowy.

### **Streszczenie**

W artykule zintegrowany ogólny model niezawodności złożonych systemów technicznych w zmiennych warunkach eksploatacyjnych, łączący wielostanowe podejście do analizy niezawodności systemów z modelem semi-markowskim ich procesu eksploatacji oraz programowanie liniowe zastosowane są w transporcie morskim do optymalizacji procesu eksploatacji skutkującej podwyższeniem niezawodności portowego rurociągowego systemu transportu paliwa.

### **1. Proces eksploatacji portowego systemu transportu paliwa**

Baza Paliw Nr 21 w Dębogórzcu jest zakładem przeznaczonym do odbioru ze statków, magazynowania i wysyłki drogą kolejową lub transportem samochodowym produktów naftowych, takich jak benzyna, olej napędowy oraz olej opałowy. Baza ta przeznaczona jest także do odbioru tych mediów z wagonów kolejowych lub cystern samochodowych, magazynowania i załadunku ich na statki. Zadania te wykonują trzy części A, B i C Bazy, połączone rurociągowymi systemami transportowymi. Schemat systemu przedstawiony jest na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat portowego systemu transportu paliwa

Rozładunek lub załadunek tankowców odbywa się na pirsie znajdującym się na falochronie Portu Gdynia. Pirs jest połączony z częścią A Bazy Paliw poprzez podsystem transportowy  $S_1$  dwóch nitek rurociągów zbudowanych z segmentów rur stalowych o średnicy 600 mm. W części A Bazy Paliw znajduje się stacja podporowa wzmacniająca pompy tankowca i umożliwiająca dalszy transport produktu. Posiada ona agregaty pompowe służące do tłoczenia produktu podsystemem transportowym  $S_2$  do części B Bazy Paliw. Podsystem transportowy  $S_2$  stanowią dwie niteki rurociągów zbudowanych z segmentów rur stalowych o średnicy 600 mm. Część B Bazy Paliw jest częścią magazynową, w której znajdują się zespoły zbiorników stalowych oraz systemy technologiczne, umożliwiające ich wyładunek lub załadunek. Część B połączona jest podsystemem transportowym  $S_3$  z częścią C Bazy Paliw. Podsystem transportowy  $S_3$  składa się z jednej nitki rurociągu zbudowanego z segmentów rur stalowych o średnicy 500 mm oraz dwóch nitek rurociągów zbudowanych z segmentów rur stalowych o średnicy 350 mm. Część C Bazy Paliw przeznaczona jest do wyładunku lub załadunku produktem cystern kolejowych oraz do ekspedycji pociągów do węzła kolejowego Gdynia Port i dalej w głąb kraju.

System transportu paliwa jest zbudowany z trzech podsystemów  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ :

- podsystem  $S_1$  jest zbudowany z dwóch identycznych nitek rurociągów, każda zbudowana z 178 segmentów o długości 12 m oraz dwóch zasuw,
- podsystem  $S_2$  jest zbudowany z dwóch identycznych nitek rurociągów, każda zbudowana z 717 segmentów o długości 12 m oraz dwóch zasuw,
- podsystem  $S_3$  zbudowany jest z dwóch identycznych oraz jednej innej nitek rurociągów, każda zbudowana z 360 segmentów o długości 10 m lub 7,5 m oraz dwóch zasuw.

Podsystemy  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  tworzą szeregową strukturę niezawodnościową portowego systemu transportu paliwa. Struktura niezawodnościowa portowego systemu transportu paliwa oraz niezawodność jego podsystemów i elementów zależą od zmiennych w czasie stanów eksploatacyjnych systemu [7].

Biorąc pod uwagę zmienne w czasie warunki eksploatacyjne rozpatrywanego systemu zostało wyróżnionych 8 następujących stanów eksploatacyjnych:

- stan eksploatacyjny  $z_1$  – transport jednego rodzaju medium z części B do części C z użyciem dwóch z trzech nitek podsystemu  $S_3$ ,
- stan eksploatacyjny  $z_2$  – transport jednego rodzaju medium z części C, z wagonów kolejowych do części B z użyciem jednej z trzech nitek podsystemu  $S_3$ ,
- stan eksploatacyjny  $z_3$  – transport jednego rodzaju medium z części B przez część A do Pirsu z użyciem jednej z dwóch nitek podsystemu  $S_2$  oraz jednej z dwóch nitek podsystemu  $S_1$ ,
- stan eksploatacyjny  $z_4$  – transport dwóch rodzajów medium z Pirsu przez część A i część B do części C z użyciem jednej z dwóch nitek podsystemu  $S_1$ , jednej z dwóch nitek podsystemu  $S_2$  oraz dwóch z trzech nitek podsystemu  $S_3$ ,
- stan eksploatacyjny  $z_5$  – transport jednego rodzaju medium z Pirsu przez część A do części B z użyciem jednej z dwóch nitek podsystemu  $S_1$  oraz jednej z dwóch nitek podsystemu  $S_2$ ,
- stan eksploatacyjny  $z_6$  – transport jednego rodzaju medium z części B do części C z użyciem dwóch z trzech nitek podsystemu  $S_3$  i jednoczesny transport jednego rodzaju medium z Pirsu przez część A do części B z użyciem jednej z dwóch nitek podsystemu  $S_1$  oraz jednej z dwóch nitek podsystemu  $S_2$ ,
- stan eksploatacyjny  $z_7$  – brak transportu medium (system nie pracuje),
- stan eksploatacyjny  $z_8$  – transport jednego rodzaju medium z części B do części C z użyciem jednej z trzech nitek podsystemu  $S_3$ , i jednoczesny transport innego rodzaju medium z części C do części B z użyciem jednej z trzech nitek podsystemu  $S_3$ .

Na podstawie danych statystycznych zawartych w [7] oszacowane zostały prawdopodobieństwa  $p_{bl}$  przejść systemu ze stanu eksploatacyjnego  $z_b$  do stanu eksploatacyjnego  $z_l$  dla  $b, l = 1, 2, \dots, 8$ . Ich przybliżone wartości zawarte są w poniższej macierzy

$$[p_{bl}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0,06 & 0,06 & 0,86 & 0,02 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,125 & 0,687 & 0,063 \\ 0,4 & 0 & 0 & 0 & 0,6 & 0 & 0 & 0 \\ 0,82 & 0 & 0 & 0 & 0,16 & 0 & 0 & 0,02 \\ 0,67 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,33 & 0 \end{bmatrix}.$$

Następnie na podstawie danych statystycznych pochodzących od ekspertów możliwe było oszacowanie wartości średnich  $M_{bl} = E[\theta_{bl}]$ ,  $b, l = 1, 2, \dots, 8$ ,  $b \neq l$ , warunkowych czasów przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych. Ich przybliżone wartości są następujące:

$$\begin{aligned} M_{15} &= 720, & M_{16} &= 420, & M_{17} &= 698,95, & M_{18} &= 480, \\ M_{51} &= 750, & M_{56} &= 564, & M_{57} &= 748,7, & M_{58} &= 540, \\ M_{61} &= 360, & M_{65} &= 360, \\ M_{71} &= 975,3, & M_{75} &= 872,4, & M_{78} &= 600, \\ M_{81} &= 900, & M_{87} &= 420. \end{aligned}$$

Stąd, zgodnie z (2) [3], bezwarunkowe wartości średnie czasów przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych wynoszą odpowiednio:

$$\begin{aligned} M_1 &= E[\theta_1] \cong 679,1, & M_5 &= E[\theta_5] \cong 712,63, & M_6 &= E[\theta_6] \cong 360, \\ M_7 &= E[\theta_7] \cong 951,33, & M_8 &= E[\theta_8] \cong 741,6. \end{aligned}$$

Stąd, ponieważ z układu równań (5) [3], który przyjmuje następującą postać

$$\begin{cases} [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8] = [\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8] [p_{bl}]_{8 \times 8} \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6 + \pi_7 + \pi_8 = 1, \end{cases}$$

otrzymujemy

$$\begin{aligned} \pi_1 &= 0,396, & \pi_2 &= 0, & \pi_3 &= 0, & \pi_4 &= 0, & \pi_5 &= 0,116, \\ \pi_6 &= 0,038, & \pi_7 &= 0,435, & \pi_8 &= 0,015, \end{aligned}$$

więc graniczne wartości  $p_b$  prawdopodobieństw chwilowych  $p_b(t)$  przebywania procesu eksploatacji w poszczególnych stanach eksploatacyjnych  $z_b$ , wobec (1) [6], wynoszą

$$\begin{aligned}
 p_1 = 0,34, \quad p_2 = 0, \quad p_3 = 0, \quad p_4 = 0, \quad p_5 = 0,1, \\
 p_6 = 0,02, \quad p_7 = 0,53, \quad p_8 = 0,01
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

## 2. Oszacowanie niezawodności i ryzyka portowego systemu transportu paliwa

Uwzględniając rezultaty poprzedniego rozdziału, zgodnie z (34)–(35) [3], bezwarunkowa wielostanowa (trzystanowa) funkcja niezawodności systemu określona jest wektorem

$$\bar{\mathbf{R}}_3(t, \cdot) = [1, \bar{\mathbf{R}}_3(t, 1), \bar{\mathbf{R}}_3(t, 2)]
 \tag{2}$$

o następujących składowych

$$\begin{aligned}
 \bar{\mathbf{R}}_3(t, 1) = 0,34 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(1)} + 0 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(2)} + 0 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(3)} \\
 + 0 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(4)} + 0,1 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(5)} + 0,02 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(6)} + 0,53 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(7)} \\
 + 0,01 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(8)} \text{ ] dla } t \geq 0
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{\mathbf{R}}_3(t, 2) = 0,34 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 2)]^{(1)} + 0 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 2)]^{(2)} + 0 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 2)]^{(3)} + 0 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 2)]^{(4)} \\
 + 0,1 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 2)]^{(5)} + 0,02 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 2)]^{(6)} + 0,53 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 2)]^{(7)} \\
 + 0,01 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 2)]^{(8)} \text{ ] dla } t \geq 0
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

gdzie  $[\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(b)}$ ,  $[\bar{\mathbf{R}}(t, 2)]^{(b)}$ ,  $b = 1, 2, \dots, 8$ , są wyznaczone w [6].

W [7] wyznaczone są również warunkowe wartości średnie czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów niezawodnościowych  $\{1, 2\}$  oraz  $\{2\}$  i wynoszą one:

$$\begin{aligned}
 \mu_1(1) \cong 0,364, \quad \mu_1(2) \cong 0,304, \quad \mu_2(1) \cong 0,807, \quad \mu_2(2) \cong 0,666, \\
 \mu_3(1) \cong 0,307, \quad \mu_3(2) \cong 0,218, \quad \mu_4(1) \cong 0,079, \quad \mu_4(2) \cong 0,058, \\
 \mu_5(1) \cong 0,307, \quad \mu_5(2) \cong 0,218, \quad \mu_6(1) \cong 0,079, \quad \mu_6(2) \cong 0,058, \\
 \mu_7(1) \cong 0,110, \quad \mu_7(2) \cong 0,085, \quad \mu_8(1) \cong 0,364, \quad \mu_8(2) \cong 0,079.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Po uwzględnieniu (1)–(5) oraz zgodnie z (11) [3] wartości średnie czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów niezawodnościowych  $\{1, 2\}$  oraz  $\{2\}$ , przed optymalizacją, odpowiednio wynoszą:

$$\begin{aligned} \mu(1) = & p_1\mu_1(1) + p_2\mu_2(1) + p_3\mu_3(1) + p_4\mu_4(1) + p_5\mu_5(1) + p_6\mu_6(1) + p_7\mu_7(1) \\ & + p_8\mu_8(1) = 0,34 \cdot 0,364 + 0,00 \cdot 0,807 + 0,00 \cdot 0,307 + 0,00 \cdot 0,079 \\ & + 0,10 \cdot 0,307 + 0,02 \cdot 0,079 + 0,53 \cdot 0,110 + 0,01 \cdot 0,364. \cong 0,218 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu(2) = & p_1\mu_1(2) + p_2\mu_2(2) + p_3\mu_3(2) + p_4\mu_4(2) + p_5\mu_5(2) + p_6\mu_6(2) \\ & + p_7\mu_7(2) + p_8\mu_8(2) = 0,34 \cdot 0,304 + 0,00 \cdot 0,666 + 0,00 \cdot 0,218 \\ & + 0,00 \cdot 0,058 + 0,10 \cdot 0,218 + 0,02 \cdot 0,058 + 0,53 \cdot 0,083 + 0,01 \cdot 0,304 \cong 0,173 \end{aligned} \quad (7)$$

natomiast bezwarunkowe wartości średnie czasów przebywania systemu w poszczególnych stanach niezawodnościowych dla  $u = 1$  oraz  $u = 2$ , przed optymalizacją, wynoszą:

$$\bar{\mu}(1) = \mu(1) - \mu(2) = 0,045, \quad \bar{\mu}(2) = \mu(2) = 0,173.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym jest  $r = 1$ , to zgodnie z (7) [3] funkcja ryzyka systemu przyjmuje postać

$$r(t) = 1 - \bar{R}_3(t, 1) \quad \text{dla } t \geq 0,$$

gdzie  $\bar{R}_3(t, 1)$  jest określona wzorem (3).

Stąd, chwilą kiedy ryzyko przekroczy umowny poziom krytyczny, np.  $\delta = 0,05$ , jest

$$\tau = r^{-1}(\delta) \cong 0,011 \text{ lat.}$$

### 3. Optymalizacja procesu eksploatacji portowego systemu transportu paliwa

Funkcja celu (5) [6], w przypadku gdy stanem krytycznym jest stan  $r = 1$ , przyjmuje postać

$$\begin{aligned} \mu(1) = & p_1 \cdot 0,364 + p_2 \cdot 0,807 + p_3 \cdot 0,307 + p_4 \cdot 0,079 + p_5 \cdot 0,307 \\ & + p_6 \cdot 0,079 + p_7 \cdot 0,110 + p_8 \cdot 0,364. \end{aligned} \quad (8)$$

Dolne  $\check{p}_b$  i górne  $\hat{p}_b$  ograniczenia nieznanymi prawdopodobieństw chwilowych  $p_b$ ,  $b = 1, 2, \dots, 8$ , uzyskane od ekspertów, wynoszą odpowiednio:

$$\check{p}_1 = 0,25, \check{p}_2 = 0,01, \check{p}_3 = 0,01, \check{p}_4 = 0,01, \check{p}_5 = 0,08, \\ \check{p}_6 = 0,01, \check{p}_7 = 0,40, \check{p}_8 = 0,01;$$

$$\widehat{p}_1 = 0,50, \widehat{p}_2 = 0,05, \widehat{p}_3 = 0,05, \widehat{p}_4 = 0,05, \widehat{p}_5 = 0,20, \\ \widehat{p}_6 = 0,05, \widehat{p}_7 = 0,75, \widehat{p}_8 = 0,05,$$

Zatem, zgodnie z (6)–(8) [6], przyjmujemy następujące ograniczenia

$$\sum_{b=1}^8 p_b = 1,$$

$$0,25 \leq p_1 \leq 0,50, \quad 0,01 \leq p_2 \leq 0,05, \quad 0,01 \leq p_3 \leq 0,05, \quad 0,01 \leq p_4 \leq 0,05, \\ 0,08 \leq p_5 \leq 0,20, \quad 0,01 \leq p_6 \leq 0,05, \quad 0,40 \leq p_7 \leq 0,75, \quad 0,01 \leq p_8 \leq 0,05.$$

Zanim znajdziemy optymalne wartości  $\dot{p}_b$  dla granicznych prawdopodobieństw chwilowych  $p_b, b = 1, 2, \dots, 8$ , przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych, które maksymalizują wartość funkcji celu (8), porządkujemy warunkowe wartości średnie czasów przebywania systemu w podzbiórach stanów niezawodnościowych  $\mu_b(1), b = 1, 2, \dots, 8$ , w kolejności nierosnącej

$$\mu_2(1) \geq \mu_1(1) \geq \mu_8(1) \geq \mu_3(1) \geq \mu_5(1) \geq \mu_7(1) \geq \mu_4(1) \geq \mu_6(1).$$

Następnie, zgodnie z (9) [6], podstawiamy

$$x_1 = p_2 = 0,00, \quad x_2 = p_1 = 0,34, \quad x_3 = p_8 = 0,01, \quad x_4 = p_3 = 0,00, \\ x_5 = p_5 = 0,10, \quad x_6 = p_7 = 0,53, \quad x_7 = p_4 = 0,00, \quad x_8 = p_6 = 0,02 \quad (9)$$

oraz

$$\check{x}_i = 0,01, \quad \widehat{x}_i = 0,95 \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, \nu$$

i poszukujemy argumentów  $x_i, i = 1, 2, \dots, 8$ , maksymalizujących liniową funkcję celu (6), która zgodnie z (10) [6] przyjmuje postać

$$\mu(1) = x_1 \cdot 0,807 + x_2 \cdot 0,364 + x_3 \cdot 0,364 + x_4 \cdot 0,307 + x_5 \cdot 0,307 + x_6 \cdot 0,110 \\ + x_7 \cdot 0,079 + x_8 \cdot 0,079 \quad (10)$$

z następującymi ograniczeniami

$$\sum_{i=1}^8 x_i = 1,$$

$$0,01 \leq x_1 \leq 0,05, \quad 0,25 \leq x_2 \leq 0,50, \quad 0,01 \leq x_3 \leq 0,05, \quad 0,01 \leq x_4 \leq 0,05, \\ 0,08 \leq x_5 \leq 0,20, \quad 0,40 \leq x_6 \leq 0,75, \quad 0,01 \leq x_7 \leq 0,05, \quad 0,01 \leq x_8 \leq 0,05,$$

gdzie

$$\begin{aligned} \check{x}_1 &= 0,01, & \check{x}_2 &= 0,25, & \check{x}_3 &= 0,01, & \check{x}_4 &= 0,01, \\ \check{x}_5 &= 0,08, & \check{x}_6 &= 0,40, & \check{x}_7 &= 0,01, & \check{x}_8 &= 0,01, \\ \hat{x}_1 &= 0,05, & \hat{x}_2 &= 0,50, & \hat{x}_3 &= 0,05, & \hat{x}_4 &= 0,05, \\ \hat{x}_5 &= 0,20, & \hat{x}_6 &= 0,75, & \hat{x}_7 &= 0,05, & \hat{x}_8 &= 0,05 \end{aligned}$$

są odpowiednio dolnymi i górnymi ograniczeniami nieznanymi prawdopodobieństw  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 8$ , przebywania w poszczególnych stanach eksploatacyjnych

Zgodnie z (11) [6], wyznaczamy

$$\check{x} = \sum_{i=1}^8 \check{x}_i = 0,78, \quad \hat{y} = 1 - \check{x} = 1 - 0,78 = 0,22 \quad (11)$$

oraz zgodnie z (12) [6] znajdujemy

$$\begin{aligned} \check{x}^0 &= 0, & \hat{x}^0 &= 0, & \hat{x}^0 - \check{x}^0 &= 0, \\ \check{x}^1 &= 0,01 & \hat{x}^1 &= 0,05, & \hat{x}^1 - \check{x}^1 &= 0,04, \\ \check{x}^2 &= 0,26 & \hat{x}^2 &= 0,55, & \hat{x}^2 - \check{x}^2 &= 0,29, \\ \dots & & & & & \\ \check{x}^8 &= 0,78 & \hat{x}^8 &= 1,70, & \hat{x}^8 - \check{x}^8 &= 0,92. \end{aligned}$$

Z powyższych rezultatów, zgodnie z (11) [3], nierówność (13) [6] przyjmuje postać

$$\hat{x}^I - \check{x}^I < 0,22,$$

więc największą wartością  $I \in \{0, 1, \dots, 8\}$ , która spełnia tę nierówność, jest  $I = 1$ .

Zatem, aby wyznaczyć rozwiązanie optymalne, dla którego funkcja liniowa określona przez (10) osiąga wartość maksymalną, postępujemy zgodnie z regułą (14) [6] i otrzymujemy

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \hat{x}_1 = 0,05, \\ \dot{x}_2 &= \hat{y} - \hat{x}^1 + \check{x}^1 + \check{x}_2 = 0,22 - 0,05 + 0,01 + 0,25 = 0,43, \\ \dot{x}_3 &= \check{x}_3 = 0,01, \quad \dot{x}_4 = \check{x}_4 = 0,01, \quad \dot{x}_5 = \check{x}_5 = 0,08, \quad \dot{x}_6 = \check{x}_6 = 0,40, \\ \dot{x}_7 &= \check{x}_7 = 0,01, \quad \dot{x}_8 = \check{x}_8 = 0,01. \end{aligned}$$



Ostatecznie, po zastosowaniu podstawienia odwrotnego do (9), otrzymujemy optymalne prawdopodobieństwa chwilowe przebywania w poszczególnych stanach eksploatacyjnych

$$\begin{aligned} \dot{p}_2 = \dot{x}_1 = 0,05, \quad \dot{p}_1 = \dot{x}_2 = 0,43, \quad \dot{p}_8 = \dot{x}_3 = 0,01, \quad \dot{p}_3 = \dot{x}_4 = 0,01, \\ \dot{p}_5 = \dot{x}_5 = 0,08, \quad \dot{p}_7 = \dot{x}_6 = 0,40, \quad \dot{p}_4 = \dot{x}_7 = 0,01, \quad \dot{p}_6 = \dot{x}_8 = 0,01 \end{aligned} \quad (12)$$

które maksymalizują, wartość średnią bezwarunkowego czasu przebywania systemu w podzbiorach stanów niezawodnościowych  $\{1, 2\}$  i zgodnie z (15) [6] oraz (12) jej maksymalna wartość wynosi

$$\begin{aligned} \dot{\mu}(1) = +0,01 \cdot 0,307 + 0,01 \cdot 0,079 + 0,08 \cdot 0,307 + 0,01 \cdot 0,079 \\ + 0,40 \cdot 0,110 + 0,01 \cdot 0,364 = 0,274 \end{aligned} \quad (13)$$

Następnie, zgodnie z (19) [6], podstawiając optymalne rozwiązanie (12) do wzoru (7), otrzymujemy rozwiązanie optymalne dla wartości średniej bezwarunkowego czasu przebywania systemu w podzbiorze stanów niezawodnościowych  $\{2\}$

$$\begin{aligned} \dot{\mu}(2) = 0,43 \cdot 0,304 + 0,05 \cdot 0,666 + 0,01 \cdot 0,218 + 0,01 \cdot 0,058 \\ + 0,08 \cdot 0,218 + 0,01 \cdot 0,058 + 0,40 \cdot 0,085 + 0,01 \cdot 0,079 = 0,220 \end{aligned} \quad (14)$$

Wtedy, zgodnie z (19) [6], optymalne rozwiązania dla bezwarunkowych wartości średnich czasów przebywania systemu w poszczególnych stanach niezawodnościowych dla  $u = 1$  oraz  $u = 2$ , wynoszą:

$$\dot{\bar{\mu}}(1) = \dot{\mu}(1) - \dot{\mu}(2) = 0,054, \quad \dot{\bar{\mu}}(2) = \dot{\mu}(2) = 0,220.$$

Ponadto, zgodnie z (17)–(18) [6] oraz (2)–(4), optymalna bezwarunkowa wielostanowa funkcja niezawodności systemu określona jest odpowiednio wektorem

$$\dot{\bar{\mathbf{R}}}_3(t, \cdot) = [1, \dot{\bar{\mathbf{R}}}_3(t, 1), \dot{\bar{\mathbf{R}}}_3(t, 2)] \quad (15)$$

o następujących składowych

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\mathbf{R}}}_3(t, 1) = 0,43 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(1)} + 0,05 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(2)} + 0,01 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(3)} + 0,01 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(4)} \\ + 0,08 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(5)} + 0,01 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(6)} + 0,40 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(7)} \\ + 0,01 \cdot [\bar{\mathbf{R}}(t, 1)]^{(8)}, \text{ dla } t \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{\bar{R}}_3(t,2) = & 0,43 \cdot [\bar{R}(t,2)]^{(1)} + 0,05 \cdot [\bar{R}(t,2)]^{(2)} + 0,01 \cdot [\bar{R}(t,2)]^{(3)} \\ & + 0,01 \cdot [\bar{R}(t,2)]^{(4)} + 0,08 \cdot [\bar{R}(t,2)]^{(5)} + 0,01 \cdot [\bar{R}(t,2)]^{(6)} + 0,40 \cdot [\bar{R}(t,2)]^{(7)} \\ & + 0,01 \cdot [\bar{R}(t,2)]^{(8)} \quad ] \text{ dla } t \geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

gdzie  $[\bar{R}(t,1)]^{(b)}$ ,  $[\bar{R}(t,2)]^{(b)}$ ,  $b = 1,2,\dots,8$ , są wyznaczone w [7].

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym jest  $r = 1$ , to zgodnie z (7) oraz (20) [6], optymalna funkcja ryzyka systemu przyjmuje postać

$$\dot{r}(t) = 1 - \dot{\bar{R}}_3(t,1) \text{ dla } t \geq 0,$$

gdzie  $\dot{\bar{R}}_3(t,1)$  jest określona wzorem (16).

Stąd, po uwzględnieniu (21) [6], chwilą kiedy optymalne ryzyko przekroczy umowny poziom krytyczny, np.  $\delta = 0.05$ , jest

$$\dot{t} = \dot{r}^{-1}(\delta) \cong 0,19 \text{ lat.}$$

## Podsumowanie

Skonstruowany w [5] zintegrowany ogólny model niezawodności złożonych systemów technicznych w zmiennych warunkach eksploatacyjnych, łączący wielostanowe podejście do analizy niezawodności systemów z modelem semi-markowskim procesu ich eksploatacji, zastosowany został do oszacowania niezawodności portowego systemu transportu paliwa. Następnie rezultaty tego oszacowania oraz programowanie liniowe zastosowane zostały do optymalizacji procesu eksploatacji tego systemu skutkujące podwyższeniem jego niezawodności oraz zmniejszeniem ryzyka.

## 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. Grabski F.: Semi-Markowskie modele niezawodności i eksploatacji. Monograph. Instytut Badań Systemowych, Polska Akademia Nauk, Warszawa 2002.
2. Kołowrocki K.: Reliability of Large Systems. Elsevier, ISBN: 0080444296, 2004.
3. Kołowrocki K., Soszyńska J.: Reliability, risk and availability based optimization of complex technical systems operation process. Proc.3<sup>rd</sup> Summer Safety and Reliability Seminars SSARS 2009, 2009, Vol. 1, 189–196.
4. Kołowrocki K., Soszyńska J.: A general model of technical systems operation processes related to their environment and infrastructure. WP 2 – Task 2.1 – English – 31.05.2008. Poland-Singapore Joint Project, Gdynia 2008.
5. Kołowrocki K., Soszyńska J.: Safety and Reliability Optimisation of Complex Industrial Systems and Processes. WP 5 – Task 5.2. Reliability, risk and availability based optimization of complex technical systems operation processes – English – 31.05.2009. Poland-Singapore Joint Project. MSHE Decision No. 63/N-Singapore/2007/0.
6. Kołowrocki K., Soszyńska J.: Optymalizacja procesów eksploatacji złożonych systemów technicznych. Materiały konferencyjne XXXVIII Zimowej Szkoły Niezawodności, Szczyrk 2009.
7. Kołowrocki K., Soszyńska J., Baranowski Z., Golik P.: Preliminary modeling, statistical identification and evaluation of reliability, risk, availability and safety of port, shipyard and ship technical systems in constant and variable operation conditions. WP6 - Task 6.2. Preliminary reliability, risk and availability analysis and evaluation of a port oil transportation system in constant and variable operation conditions. WP6 - Sub-Task 6.2.1 – English – 31.01.2009. Poland-Singapore Joint Project. MSHE Decision No. 63/N-Singapore/2007/0.
8. Limnios N., Oprisan G.: Semi-Markov Processes and Reliability. Birkhauser, Boston 2001.
9. Ross S. M.: Introduction to Probability Models. Elsevier, San Diego 2007.
10. Soszyńska J.: Reliability of large series-parallel system in variable operation conditions. International Journal of Automation and Computing, 2006, Vol. 3, No 2, 199–206.
11. Soszyńska J.: Reliability evaluation of a port oil transportation system in variable operation conditions. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, Vol. 83, Issue 4, 304–310.

Recenzent:

**Stanisław GUCMA**

## **Optimization of port oil transportation system operation processes**

### **Key-words**

Reliability, complex system, operation process, optimization, piping transport.

### **Summary**

The joint general model of reliability of complex technical systems in variable operation conditions linking a semi-markov modeling of the system operation processes with a multi-state approach to system reliability analysis and linear programming are applied in maritime industry to operation process optimization improving reliability of a port piping oil transportation system.