POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

Krzysztof KOŁOWROCKI

ASYMPTOTYCZNE PODEJŚCIE DO ANALIZY NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW

ASYMPTOTYCZNE PODEJŚCIE DO ANALIZY NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW

Polska Akademia Nauk • Instytut Badań Systemowych

Seria: BADANIA SYSTEMOWE
tom 27

Redaktor naukowy:

Prof. dr hab. Jakub Gutenbaum

Warszawa 2001

Krzysztof KOŁOWROCKI

ASYMPTOTYCZNE PODEJŚCIE DO ANALIZY NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW

Publikację opiniowali do druku:

Prof. dr hab. inż. Janusz Karpiński
Dr hab. inż. Józef Żurek

Publikacja współfinansowana przez KOMITET BADAŃ NAUKOWYCH w ramach projektu badawczego Nr 9 T12C 022 16 nt. "Graniczne funkcje niezawodności dużych systemów wielostanowych oraz ich zastosowania w zagadnieniach transportowych i wytrzymałościowych"

ISBN 83-85847-58-8
ISSN 0208-8029

7. Ocena niezawodności wybranych systemów transportu portowego i stoczniowego Aplikacja metody

Rozdział ten przedstawia możliwości zastosowań wielostanowego asymptotycznego podejścia do oceny niezawodności wybranych systemów transportu portowego i stoczniowego. W oparciu o wyniki poprzednich rozdziałów sformułowane i uzasadnione zostały dwa fakty pozwalające wyznaczać wielostanowe graniczne funkcje niezawodności niejednorodnych systemów szeregowo-równoległych i szeregowych oraz dwa fakty pozwalające wyznaczać wielostanowe graniczne funkcje niezawodności jednorodnych systemów równoległo-szeregowych w przypadku, gdy ich elementy posiadają weibullowskie funkcje niezawodności. Na ich podstawie znalezione zostały oszacowania funkcji niezawodności, średnich czasów przebywania w podzbiorach stanów, ich odchyleń standardowych, średnich czasów przebywania w poszczególnych stanach, funkcji ryzyka i chwil przekroczenia dopuszczalnego poziomu ryzyka dla trzech systemów transportowych eksploatowanych w Porcie Gdynia oraz jednego systemu transportowego eksploatowanego w Stoczni Marynarki Wojennej w Gdyni. Niezbędne dane wyjściowe dotyczące procesów eksploatacji oraz charakterystyk niezawodnościowych elementów systemów uzyskane zostały od ekspertów eksploatujących te systemy, z certyfikatów technicznych ich producentów oraz z obowiązujących norm [Kołowrocki, 2000j, Krajewski, Pawluk, 1999, Norma Branżowa BN-75/2118-01, Polska Norma PN-68/M-80-200, Polska Norma PN-81/M-46-650]. Przyjęte dane niezawodnościowe elementów z konieczności są przybliżone i dotyczą szacunkowych wartości ich średnich czasów przebywania w podzbiorach stanów oraz hipotetycznych typów rozkładów tych czasów. Wyznaczone zostały charakterystyki niezawodnościowe portowego systemu transportu zboża zbudowanego z trójstanowych niejednorodnych podsystemów szeregowo-równoległych, rurociągowego systemu transportu paliw zbudowanego z trójstanowych niejednorodnych podsystemów szeregowo-równoległych, portowego systemu transportu towarów sypkich zbudowanego z czterostanowych podsystemów szeregowo-równoległych i szeregowych oraz linowego podnośnika statków będącego jednorodnym czterostanowym systemem równoległo-szeregowym. Zilustrowana i przeanalizowana została także dokładność asymptotycznego podejścia do oceny niezawodności tych systemów.

Sposób postępowania podczas szacowania niezawodności innych dużych systemów technicznych, których elementy posiadają także inne niż weibullowskie funkcje niezawodności jest analogiczny i sprowadza się do sformułowania niezbędnych faktów, udowodnienia ich w oparciu o twierdzenia pomocnicze zawarte w pracy, a następnie ich zastosowania.

7.1. *Wyniki pomocnicze*

Fakt 7.1

Jeśli elementy niejednorodnego regularnego wielostanowego systemu szeregowo-równoległego mają weibullowskie wielostanowe funkcje niezawodności

$$R^{(i,j)}(t,u) = 1 \text{ dla } t < 0,$$

$$R^{(i,j)}(t,u) = \exp[-\beta_{ij}(u)t^{\alpha_{ij}(u)}] \text{ dla } t \geq 0,\ \alpha_{ij}(u) > 0,\ \beta_{ij}(u) > 0, \tag{7.1}$$

$$i = 1,2,\ldots,a,\ j = 1,2,\ldots,e_i,\ u = 1,2,\ldots,z$$

oraz

$$k_n \to k,\ k > 0,\ l_n \to \infty, \tag{7.2}$$

$$a_n(u) = (\beta(u)l_n)^{-1/\alpha(u)},\ b_n(u) = 0, \tag{7.3}$$

gdzie

$$\alpha_i(u) = \min_{1 \leq j \leq e_i}\{\alpha_{ij}(u)\},\ \beta_i(u) = \sum_{(j:\alpha_{ij}(u)=\alpha_i(u))} p_{ij}\beta_{ij}(u), \tag{7.4}$$

$$\alpha(u) = \max_{1 \leq i \leq a}\{\alpha_i(u)\},\ \beta(u) = \min\{\beta_i(u) : \alpha_i(u) = \alpha(u)\}, \tag{7.5}$$

to

$$\mathfrak{R}'_9(t,\cdot) = [1, \mathfrak{R}'_9(t,1), \ldots, \mathfrak{R}'_9(t,z)]$$

gdzie

$$\mathfrak{R}'_9(t,u) = 1 \text{ dla } t < 0,$$

$$\mathfrak{R}'_9(t,u) = 1- \prod_{\{i:\alpha_i(u)=\alpha(u)\}} [1-\exp[-(\beta_i(u)/\beta(u))t^{\alpha(u)}]]^{q_i k} \text{ dla } t \geq 0,$$

jest jego graniczną funkcją niezawodności.

Uzasadnienie: Ponieważ dla każdego ustalonego u, zgodnie z (7.2) i (7.3), mamy

$$a_n(u)t + b_n(u) = a_n(u)t \to 0^- \text{ dla } t < 0$$

oraz

$$a_n(u)t + b_n(u) = a_n(u)t \to 0^+ \text{ dla } t \geq 0 \text{ przy } n \to \infty,$$

więc dla wszystkich $i = 1,2,...,a$, wobec (4.36) i (7.1), otrzymujemy

$$R^{(i)}(a_n(u)t+b_n(u),u) = 1 \text{ dla } t < 0$$

i ponadto wobec (7.4)

$$R^{(i)}(a_n(u)t+b_n(u),u) = \exp[-\sum_{j=1}^{e_i} p_{ij}\beta_{ij}(u)(a_n(u)t)^{\alpha_{ij}(u)}]$$

$$= \exp[-(a_n(u)t)^{\alpha_i(u)} \sum_{j=1}^{e_i} p_{ij}\beta_{ij}(u)(a_n(u)t)^{\alpha_{ij}(u)-\alpha_i(u)}]$$

$$= \exp[-\beta_i(a_n(u)t)^{\alpha_i(u)} + o(1)] \text{ dla } t \geq 0.$$

Przyjmując

$$R(t,u) = 1 \text{dla } t < 0 \text{ oraz } R(t,u) = \exp[-\beta(u)t^{\alpha(u)}] \text{ dla } t \geq 0,\ u = 1,2,\ldots,z,$$

dla wszystkich $i = 1,2,...,a$ mamy

$$\lim_{n\to\infty} \frac{R^{(i)}(a_n(u)t + b_n(u),u)}{R(a_n(u)t + b_n(u),u)} = 1 \text{ dla t} < 0$$

oraz dla $t \geq 0$, uwzględniając (7.3) i (7.5), mamy

$$\lim_{n\to\infty} \frac{R^{(i)}(a_n(u)t + b_n(u),u)}{R(a_n(u)t + b_n(u),u)}$$

$$= \lim_{n\to\infty} \frac{\exp[-\beta_i(u)(a_n(u)t + b_n(u))^{\alpha_i(u)}]}{\exp[-\beta(u)(a_n(u)t + b_n(u))^{\alpha(u)}]}$$

$$= \lim_{n\to\infty} \exp[-\beta(u)(a_n(u)t)^{\alpha(u)}[\frac{\beta_i(u)}{\beta(u)}(a_n(u)t)^{\alpha_i(u)-\alpha(u)} - 1]] \le 1\,.$$

Powyższe oznacza, że warunek (vii) Lematu 6.8 jest spełniony z $t_0(u) = \infty$.
Z powyższego, zgodnie z (6.32) i (6.33), po uwzględnieniu (7.3), otrzymujemy także

$$d_i(t,u) = \begin{cases} 1 & dla\ t < 0 \\ \exp[-[\beta_i(u)/\beta(u) - 1]t^{\alpha(u)}] & dla\ t \ge 0 \end{cases}$$

dla i takich, że

$$\alpha_i(u) = \alpha(u)$$

oraz

$$d_i(t,u) = \begin{cases} 1\ dla\ t < 0 \\ 0\ dla\ t \ge 0 \end{cases}$$

w przeciwnym przypadku.
Ponadto, zgodnie z (6.35), mamy

$$\mathfrak{R}_0(t,u) = \lim_{n\to\infty}[R(a_n(u)t + b_n(u),u)]^{l_n} = 1 \text{ dla } t < 0$$

oraz

$$\mathfrak{R}_0(t,u) = \lim_{n\to\infty}[R(a_n(u)t + b_n(u),u)]^{l_n}$$

$$= \lim_{n\to\infty} \exp[-l_n\beta(u)(a_n(u)t)^{\alpha(u)}]$$

$$= \exp[-t^{\alpha(u)}] \text{ dla } t \ge 0,$$

co po uwzględnieniu (6.36), wobec Lematu 6.8, kończy dowód. □

Fakt 7.2
Jeśli elementy i-tego typu niejednorodnego wielostanowego systemu szeregowego mają weibullowskie wielostanowe funkcje niezawodności

$$R^{(i)}(t,u) = 1 \text{ dla } t < 0,$$

$$R^{(i)}(t,u) = \exp[-\beta_i(u)\, t^{\alpha_i(u)}] \text{ dla } t \geq 0,\ \alpha_i(u) > 0,\ \beta_i(u) > 0, \tag{7.6}$$

$$i = 1,2,\ldots,a,\ u = 1,2,\ldots,z,$$

oraz

$$a_n(u) = (\beta(u)n)^{-1/\alpha(u)},\ b_n(u) = 0 \text{ dla } u = 1,2,\ldots,z, \tag{7.7}$$

gdzie

$$\alpha(u) = \min_{1\leq i\leq a}\{\alpha_i(u)\},\ \beta(u) = \max_{(i:\alpha_i(u)=\alpha(u))}\{\beta_i(u)\} \text{ dla } u = 1,2,\ldots,z, \tag{7.8}$$

to

$$\overline{\mathfrak{R}}'_2(t,\cdot) = [1,\ \overline{\mathfrak{R}}'_2(t,1),\ \ldots,\ \overline{\mathfrak{R}}'_2(t,z)],$$

gdzie

$$\overline{\mathfrak{R}}'_2(t,u)) = 1 \text{ dla } t < 0,$$

$$\overline{\mathfrak{R}}'_2(t,u)) = \exp[-\ \overline{d}(t,u)t^{\alpha(u)}] \text{ dla } t \geq 0,\ u = 1,2,\ldots,z,$$

oraz

$$\bar{d}(t,u) = \sum_{(i:\alpha_i(u)=\alpha(u))} q_i\beta_i(u)/\beta(u)\,,$$

jest jego graniczną funkcją niezawodności.

Uzasadnienie: Ponieważ dla każdego ustalonego u, zgodnie z (7.7), mamy

$$a_n(u)t + b_n(u) = a_n(u)t \to 0^- \text{ dla } t < 0$$

oraz

$$a_n(u)t + b_n(u) = a_n(u)t \to 0^+ \text{ dla } t \geq 0 \text{ przy } n \to \infty,$$

to wobec (7.6)

$$F^{(i)}(a_n(u)t+b_n(u),u) = 0 \text{ dla } t<0$$

oraz

$$F^{(i)}(a_n(u)t+b_n(u),u) = 1 - \exp[-\beta_i(u)\,(a_n(u)t+b_n(u))^{\alpha_i(u)}] \text{ dla } t \geq 0.$$

Przyjmując

$$F(t,u) = 0 \text{ dla } t < 0 \text{ oraz } F(t,u) = 1\text{-}\exp[-\beta(u)\, t^{\alpha(u)}] \text{ dla } t \geq 0,$$

dla wszystkich $i = 1,2,\ldots,a$ oraz $t \geq 0$, wobec (7.6) i (7.8), mamy

$$\lim_{n\to\infty}\frac{F^{(i)}(a_n(u)t+b_n(u),u)}{F(a_n(u)t+b_n(u),u)} = \lim_{n\to\infty}\frac{1-\exp[-\beta_i(u)(a_n(u)t)^{\alpha_i(u)}]}{1-\exp[-\beta(u)(a_n(u)t)^{\alpha(u)}]}$$

$$= \lim_{n\to\infty}\frac{\beta_i(u)}{\beta(u)}(a_n(u)t)^{\alpha_i(u)-\alpha(u)} \leq 1.$$

Oznacza to, że warunek (vi) Lematu 6.2 jest spełniony z $t_0(u)=0$. Ponadto z powyższego, wobec (6.5) i (6.6), otrzymujemy

$$\bar{d}(t,u) = \begin{cases} 0 & dla\; t < 0 \\ \sum\limits_{(i:\alpha_i(u)=\alpha(u))} q_i\beta_i(u)/\beta(u) & dla\; t \geq 0. \end{cases}$$

Dlatego też, zgodnie z (6.8), mamy

$$\bar{V}(t,u) = \lim_{n\to\infty} nF(a_n(u)t+b_n(u),u)\,\bar{d}(t,u) = 0 \text{ dla } t < 0,\ u = 1,2,\ldots,z,$$

oraz

$$\bar{V}(t,u) = \lim_{n\to\infty} nF(a_n(u)t+b_n(u),u)\,\bar{d}(t,u)$$

$$= \lim_{n\to\infty} n[1-\exp[-\beta(u)(a_n(u)t)^{\alpha(u)}]]\bar{d}(t,u)$$

$$= \lim_{n\to\infty} n\beta(u)(a_n(u)t)^{\alpha(u)}\bar{d}(t,u)$$

$$= \bar{d}(t,u)t^{\alpha(u)} \text{ dla } t \geq 0,\ u = 1,2,\ldots,z,$$

co na podstawie Lematu 6.2 kończy dowód.

Przyjmując w powyższym fakcie

$$a_n(u) = (\bar{d}(t,u))^{-1/\alpha(u)}(\beta(u)n)^{-1/\alpha(u)} = (n \sum_{(i:\alpha_i(u)=\alpha(u))} q_i\beta_i(u))^{-1/\alpha(u)},$$

$$b_n(u) = 0 \text{ dla } u = 1,2,\ldots,z,$$

po uwzględnieniu uzasadnienia poprzedzającego wprowadzenie Definicji 2.5, otrzymujemy następujący wniosek

Wniosek 7.1
Jeśli elementy i-tego typu niejednorodnego wielostanowego systemu szeregowego mają weibullowskie wielostanowe funkcje niezawodności

$$R^{(i)}(t,u) = 1 \text{ dla } t < 0,$$

$$R^{(i)}(t,u) = \exp[-\beta_i(u)\, t^{\alpha_i(u)}] \text{ dla } t \geq 0,\ \alpha_i(u) > 0,\ \beta_i(u) > 0, \tag{7.6'}$$

$$i = 1,2,\ldots,a,\ u = 1,2,\ldots,z,$$

oraz

$$a_n(u) = (\beta(u)n)^{-1/\alpha(u)},\ b_n(u) = 0 \text{ dla } u = 1,2,\ldots,z, \tag{7.7'}$$

gdzie

$$\alpha(u) = \min_{1\leq i\leq a}\{\alpha_i(u)\},\ \beta(u) = \sum_{(i:\alpha_i(u)=\alpha(u))} q_i\beta_i(u) \text{ dla } u = 1,2,\ldots,z, \tag{7.8'}$$

to

$$\bar{\mathfrak{R}}'_2(t,\cdot) = [1,\ \bar{\mathfrak{R}}'_2(t,1),\ \ldots,\ \bar{\mathfrak{R}}'_2(t,z)],$$

gdzie

$$\overline{\mathfrak{R}}'_2(t,u) = 1 \text{ dla } t < 0,\ \overline{\mathfrak{R}}'_2(t,u) = \exp[-t^{\alpha(u)}] \text{ dla } t \geq 0,\ u = 1,2,\ldots,z,$$

jest jego graniczną funkcją niezawodności.

Fakt 7.3
Jeśli elementy jednorodnego regularnego wielostanowego systemu równoległo-szeregowego mają weibullowskie funkcje niezawodności

$$R(t,u) = 1 \text{ dla } t < 0,$$

$$R(t,u) = \exp[-\beta(u)\, t^{\alpha(u)}] \text{ dla } t \geq 0,\ \alpha(u) > 0,\ \beta(u) > 0, \tag{7.9}$$

$$u = 1,2,\ldots,z,$$

oraz

$$k_n = n,\quad l_n - c \log n >> s,\ c > 0,\ s > 0, \tag{7.10}$$

$$a_n(u) = b_n(u)/(\alpha(u)\beta(u)(b_n(u))^{\alpha(u)}\log n),$$

$$b_n(u) = [(1/\beta(u))\log(l_n/\log n)]^{1/\alpha(u)},\ u = 1,2,\ldots,z, \tag{7.11}$$

to

$$\overline{\mathfrak{R}}_3(t,\cdot) = [1,\ \overline{\mathfrak{R}}_3(t,1),\ \ldots,\ \overline{\mathfrak{R}}_3(t,z)],\ t \in (-\infty,\infty),$$

gdzie

$$\overline{\mathfrak{R}}_3(t,u) = \exp[-\exp[t]] \text{ dla } t \in (-\infty,\infty),\ u = 1,2,\ldots,z,$$

jest jego graniczną wielostanową funkcją niezawodności.

Uzasadnienie: Ponieważ dla każdego ustalonego u, dla dostatecznie dużych n oraz wszystkich $t \in (-\infty,\infty)$, wobec (7.10) i (7.11), mamy

$$a_n(u)t + b_n(u) > 0 \text{ oraz } a_n(u)/b_n(u) \to 0 \text{ przy } n \to \infty,$$

więc zgodnie z (7.9)

$$F(a_n(u)t + b_n(u),u)$$

$$= 1\text{-}\exp[-\beta(u)(a_n(u)t + b_n(u))^{\alpha(u)}]$$

$$= 1\text{-}\exp[-\beta(u)(b_n(u))^{\alpha(u)}(1 + (a_n(u)/b_n(u))t)^{\alpha(u)}]$$

$$= 1\text{-}\exp[[-\beta(u)(b_n(u))^{\alpha(u)}(1 + \alpha(u)(a_n(u)/b_n(u))t) + o(a_n(u)/b_n(u))].$$

Ponadto

$$\alpha(u)\beta(u)(b_n(u))^{\alpha(u)}\, a_n(u)/b_n(u) = 1/\log n \to 0 \text{ przy } n \to \infty,$$

toteż

$$F(a_n(u)t + b_n(u),u) = 1 - \exp[-\log(l_n/\log n) - t/\log n + o(1/\log n)]$$

$$= 1 - (\log n)/l_n(1 - t/\log n + o(1/\log n)$$

$$= 1 - (\log n)/l_n + t/l_n + o(1/l_n) \text{ dla } t \in (-\infty,\infty),$$

oraz zgodnie z (6.42)

$$\bar{V}(t,u) = \lim_{n\to\infty} k_n[F(a_n(u)t + b_n(u),u)]^{l_n}$$

$$= \lim_{n\to\infty} \mathrm{n}[1 - (\log n)/l_n + t/l_n + o(1/l_n)]^{l_n}$$

$$= \lim_{n\to\infty} \exp[\log n - \log n + t + l_n o(1/l_n)]$$

$$= \exp[t] \text{ dla } t \in (-\infty,\infty),$$

co, wobec Lematu 6.9, kończy dowód. □

Fakt 7.4
Jeśli elementy jednorodnego regularnego wielostanowego systemu równoległo-szeregowego mają weibullowskie funkcje niezawodności

$$R(t,u) = 1 \text{ dla } t < 0,$$

$$R(t,u) = \exp[-\beta(u)t^{\alpha(u)}] \text{ dla } t \ge 0,\ \alpha(u) > 0,\ \beta(u) > 0, \tag{6.12}$$

$$u = 1,2,\dots,z,$$

oraz

$$k_n \to k,\ k > 0\ ,\ l_n \to \infty, \tag{7.13}$$

$$a_n(u) = b_n(u)/(\alpha(u)\beta(u)(b_n(u))^{\alpha(u)}),\ b_n(u) = [(\log l_n)/\beta(u)]^{1/\alpha(u)}, \tag{7.14}$$

$$u = 1,2,\ldots,z,$$

to

$$\overline{\mathfrak{R}}_{10}(t,\cdot) = [1,\ \overline{\mathfrak{R}}_{10}(t,1),\ \ldots,\ \overline{\mathfrak{R}}_{10}(t,z)],\ t \in (-\infty,\infty),$$

gdzie

$$\overline{\mathfrak{R}}_{10}(t,u) = [1 - \exp[-\exp[-t]]^k \text{ dla } t \in (-\infty,\infty),\ u = 1,2,\ldots,z,$$

jest jego graniczną wielostanową funkcją niezawodności.

Uzasadnienie: Ponieważ dla każdego ustalonego u, dostatecznie dużych n oraz wszystkich $t \in (-\infty,\infty)$, zgodnie z (7.13) i (7.14), mamy

$$a_n(u)t + b_n(u) > 0,$$

więc wobec (7.12)

$$F(a_n(u)t + b_n(u),u) = 1 - \exp[-\beta(u)(a_n(u)t + b_n(u))^{\alpha(u)}] \text{ dla } t \in (-\infty,\infty),$$

i następnie zgodnie z (6.44)

$$\mathfrak{I}_0(t,u) = \lim_{n\to\infty} [F(a_n(u)t + b_n(u),u)]^{l_n}$$

$$= \lim_{n\to\infty} [1 - \exp[-\beta(u)(b_n(u))^{\alpha(u)}((1 + ((a_n(u)/b_n(u))t)^{\alpha(u)}]]^{l_n}$$

$$= \lim_{n\to\infty} [1 - \exp[-(\log l_n)(1 + t/(\alpha(u)\log l_n))^{\alpha(u)}]]^{l_n}$$

$$= \lim_{n\to\infty} [1 - (1/l_n)\exp[-t + o(1)]]^{l_n}$$

$$= \exp[-\exp[-t]] \text{ dla } t \in (\infty,\infty).$$

Zatem po uwzględnieniu (6.45), wobec Lematu 6.10, $\overline{\overline{\mathfrak{R}}}_{10}(t,\cdot)$ jest graniczną funkcją niezawodności systemu. □

7.2. *Oszacowanie niezawodności portowego sytemu transportu zboża*

Elewator zbożowy jest podstawowym obiektem Bałtyckiego Terminalu Zbożowego Portu Gdynia przeznaczonym do obsługi eksportu i importu zboża oraz jego uszlachetniania. Rozwiązania technologiczne elewatora pozwalają na łączenie różnych relacji załadunkowych i wyładunkowych statków, samochodów i wagonów. Jego wydajność w procesie przyjmowania zboża wynosi około 400 ton/godz., a w procesie wydawania około 360 ton/godz. Cały proces technologiczny sterowany jest elektronicznie. Stanowisko komputerowe dostarcza pełnej wizualnej informacji o przebiegu strumienia zboża, jego bilansie i stanie pracy urządzenia.

Jedną z podstawowych funkcji elewatora jest załadunek wagonów zbożem. Załadunek wagonów odbywa się w kolejno po sobie następujących etapach:
- grawitacyjne podanie zboża z miejsca składowania znajdującego się na 8 piętrze elewatora poprzez 45 komór na przenośniki poziome, znajdujące się w suterenie elewatora,
- transport zboża poprzez przenośniki poziome do podnośników kubełkowych pionowych transportujących zboże do rozdzielni głównej znajdującej się na 9 piętrze elewatora,
- grawitacyjny przesyp zboża przez rozdzielnię główną do wagi znajdującej się na 6 piętrze elewatora,
- przesyp zważonego zboża przez zespół klap znajdujących się na 4 piętrze elewatora na przenośniki poziome, znajdujące się na 2 piętrze elewatora,
- przesyp zboża z przenośników poziomych na przenośniki ślimakowe,
- przesyp zboża z przenośników ślimakowych do wagonów kolejowych.

W procesie załadunku wagonów zbożem uczestniczą następujące podsystemy transportowe elewatora: S_1 - poziome przenośniki taśmowe typu 1, S_2 - pionowe podnośniki kubełkowe, S_3 - poziome przenośniki taśmowe typu 2, S_4 - przenośniki ślimakowe oraz rozdzielnia i waga. Rozdzielnia jest systemem kanałów przesypowych w postaci skrzyni metalowej z przegrodami, mających na celu kierowanie zboża z przenośników kubełkowych w miejsce ważenia. Elementy wykonawcze składają się z 3 metalowych rękawów i elementów pneumatyki w postaci trzech siłowników. Waga elektroniczna dokonuje ważenia przesypującego się zboża za pomocą czujników elektronicznych. Elementami wykonawczymi podczas napełniania i opróżniania wagi są zasuwy otwierane i zamykane przez 5 siłowników pneumatycznych.

Podsystemy transportowe posiadają metalowe obudowy oraz wyposażone są w napęd w postaci silników elektrycznych z przekładniami. W analizie niezawodności pomijamy ich napędy, które są urządzeniami innego typu. Pomijamy także obudowy przenośników, które charakteryzują się wysoką niezawodnością i praktycznie nie uszkadzają się. Z uwagi na wydajność systemu transportowego wyróżniamy trzy stany niezawodnościowe jego elementów: stan 2 – zapewniający największą wydajność przenośnika, stan 1 – zapewniający mniejszą wydajność przenośnika wymuszoną przez wysypywanie się zboża z taśmy, stan 0 – powodujący niezdatność przenośnika.

Podsystem S_1 składa się z dwóch identycznych przenośników taśmowych typu 1, z których każdy zbudowany jest z taśmy gumowej wieloprzekładkowej, bębna napędzającego taśmę, bębna zwrotnego, 117 rolek nieckowych oraz 9 rolek podtrzymujących taśmę. Podsystem S_1 jest zatem zbudowany z $k_n = 2$ przenośników, z których każdy zbudowany jest z $l_n = 129$ elementów. W każdym przenośniku znajdują się:
1 taśma, mająca funkcje niezawodności

$$R^{(1,1)}(t,1) = \exp[-0.0125t^2],\ R^{(1,1)}(t,2) = \exp[-0.022t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

2 bębny, mające funkcje niezawodności

$$R^{(1,2)}(t,1) = \exp[-0.0015t^2],\ R^{(1,2)}(t,2) = \exp[-0.0018t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

117 rolek nieckowych, mających funkcje niezawodności

$$R^{(1,3)}(t,1) = \exp[-0.005t^2],\ R^{(1,3)}(t,2) = \exp[-0.0075t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

oraz 9 rolek podtrzymujących, mających funkcje niezawodności

$$R^{(1,4)}(t,1) = \exp[-0.004t^2],\ R^{(1,4)}(t,2) = \exp[-0.005t^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Jest to zatem niejednorodny regularny wielostanowy system szeregowo-równoległy, w którym zgodnie z Definicją 4.17 mamy

$$k_n = k = 2,\ l_n = 129,\ a = 1,\ q_1 = 1,$$

$$e_1 = 4,\ p_{11} = 1/129,\ p_{12} = 2/129,\ p_{13} = 117/129,\ p_{14} = 9/129,$$

i zgodnie z (4.34)-(4.36) jego dokładną wielostanową funkcją niezawodności jest

$$\boldsymbol{R}'_{2,129}(t,\cdot) = [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.6365t^2]]^2,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.9481t^2]]^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Następnie stosując Fakt 7.1, ponieważ zgodnie z (7.4)

$$\alpha_1(1) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta_1(1) = \frac{1}{129}0.0125 + \frac{2}{129}0.0015 + \frac{117}{129}0.005 + \frac{9}{129}0.004$$

$$= 0.004934108,$$

$$\alpha_1(2) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta_1(2) = \frac{1}{129}0.022 + \frac{2}{129}0.0018 + \frac{117}{129}0.0075 + \frac{9}{129}0.005$$

$$= 0.007349612,$$

zgodnie z (7.5)

$$\alpha(1) = \max\{2\} = 2,\ \beta(1) = \min\{0.004934108\} = 0.004934108,$$

$$\alpha(2) = \max\{2\} = 2,\ \beta(2) = \min\{0.007349612\} = 0.007349612,$$

oraz zgodnie z (7.3)

$$a_n(1) = (0.004934108 \cdot 129)^{-1/2} = 1.253432119,\ b_n(1) = 0,$$

$$a_n(2) = (0.007349612 \cdot 129)^{-1/2} = 1.027005872,\ b_n(2) = 0,$$

wnioskujemy, że graniczną funkcją niezawodności podsystemu S_1 jest

$$\mathfrak{R}'_9(t,\cdot) = [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^2]]^2,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^2]]^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać (wzór jest dokładny w tym przypadku)

$$\boldsymbol{R}'_{2,129}(t,\cdot) \cong \mathfrak{R}'_9((t-b_n(u))/a_n(u)\,,\cdot)$$

$$= [1,\ 1-[1-\exp[-0.6365t^2]]^2,\ 1-[1-\exp[-0.9481t^2]]^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$$M(1) \cong 1.44 \text{ lat},\ M(2) \cong 1.18 \text{ lat},$$

$$\sigma(1) \cong 0.53 \text{ lat},\ \sigma(2) \cong 0.44 \text{ lat}.$$

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$$\overline{M}(1) \cong 0.26 \text{ lat},\ \ \overline{M}(2) \cong 1.18 \text{ lat}.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym podsystemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$\boldsymbol{r}(t) \cong [1-\exp[-0.9481t^2]]^2.$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny $\delta = 0.05$, wynosi

$$\tau = \boldsymbol{r}^{-1}(\delta) = [-(1/0.9481)\log(1-\sqrt{\delta})]^{1/2} \cong 0.52 \text{ roku}.$$

Podsystem S_2 składa się z trzech identycznych podnośników kubełkowych, z których każdy zbudowany jest z taśmy gurtowej, bębna napędu, bębna zwrotnego, 740 kubełków. Podsystem ten jest zatem zbudowany z $k_n = 3$ podnośników, z których każdy zbudowany jest z $l_n = 743$ elementów. W każdym podnośniku znajdują się:
1 taśma, mająca funkcje niezawodności

$$R^{(1,1)}(t,1) = \exp[-0.025t^2],\ R^{(1,1)}(t,2) = \exp[-0.026t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

2 bębny, mające funkcje niezawodności

$$R^{(1,2)}(t,1) = \exp[-0.0015t^2],\ R^{(1,2)}(t,2) = \exp[-0.0018t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

740 kubełków, mających funkcje niezawodności

$$R^{(1,3)}(t,1) = \exp[-0.03t^2],\ R^{(1,3)}(t,2) = \exp[-0.06t^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Jest to zatem niejednorodny regularny wielostanowy system szeregowo-równoległy, w którym zgodnie z Definicją 4.17 mamy

$$k_n = k = 3,\ l_n = 743,\ a = 1,\ q_1 = 1,$$

$$e_1 = 3,\ p_{11} = 1/743,\ p_{12} = 2/743,\ p_{13} = 740/743,$$

i zgodnie z (4.34)-(4.36) jego dokładną wielostanową funkcją niezawodności jest

$$\boldsymbol{R}'_{3,743}(t,\cdot) = [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-22.228t^2]]^3,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-44.4296t^2]]^3] \text{ dla } t \geq 0.$$

Następnie stosując Fakt 7.1, ponieważ zgodnie z (7.4)

$$\alpha_1(1) = \min\{2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta_1(1) = \frac{1}{743}0.025 + \frac{2}{743}0.0015 + \frac{740}{743}0.03 = 0.029916554,$$

$$\alpha_1(2) = \min\{2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta_1(2) = \frac{1}{743}0.026 + \frac{2}{743}0.0018 + \frac{740}{743}0.06 = 0.059797577,$$

zgodnie z (7.5)

$$\alpha(1) = \max\{2\} = 2,\ \beta(1) = \min\{0.029916554\} = 0.029916554,$$

$$\alpha(2) = \max\{2\} = 2,\ \beta(2) = \min\{0.059797577\} = 0.059797577,$$

oraz zgodnie z (7.3)

$$a_n(1) = (0.029916554 \cdot 743)^{-1/2} = 0.212104464,\ b_n(1) = 0,$$

$$a_n(2) = (0.059797577 \cdot 743)^{-1/2} = 0.0150025056,\ b_n(2) = 0,$$

więc graniczną funkcją niezawodności podsystemu S_2 jest

$$\mathfrak{R}'_9(t,\cdot) = [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^2]]^3,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^2]]^3] \text{ dla } t \geq 0.$$

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać (wzór jest dokładny w tym przypadku)

$$\boldsymbol{R}'_{3,743}(t,\cdot) \cong \mathfrak{R}'_9((t\text{-}b_n(u))/a_n(u),\cdot)$$

$$= [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-22.228t^2]]^3,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-44.4296t^2]]^3] \text{ dla } t \geq 0.$$

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$M(1) \cong 0.27$ lat, $M(2) \cong 0.19$ lat,

$\sigma(1) \cong 0.10$ lat, $\sigma(2) \cong 0.07$ lat.

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$\bar{M}(1) \cong 0.08$ lat, $\bar{M}(2) \cong 0.19$ lat.

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym podsystemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$r(t) \cong [1\text{-}\exp[-44.2296t^2]]^3.$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny $\delta = 0.05$, wynosi

$$\tau = \boldsymbol{r}^{-1}(\delta) = [-(1/44.2296)\log(1-\sqrt[3]{\delta}\ )]^{1/2} \cong 0.10 \text{ roku.}$$

Podsystem S_3 składa się z dwóch identycznych przenośników taśmowych typu 2, z których każdy zbudowany jest z taśmy gumowej, bębna napinającego taśmę, bębna zwrotnego, 117 rolek nieckowych oraz 19 rolek podtrzymujących taśmę. Podsystem ten jest zatem zbudowany z $k_n = 2$ przenośników, z których każdy zbudowany jest z $l_n = 139$ elementów. W każdym przenośniku znajduje się:
1 taśma, mająca funkcje niezawodności

$$R^{(1,1)}(t,1) = \exp[-0.0125t^2],\ R^{(1,1)}(t,2) = \exp[-0.022t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

2 bębny, mające funkcje niezawodności

$$R^{(1,2)}(t,1) = \exp[-0.0015t^2],\ R^{(1,2)}(t,2) = \exp[-0.0018t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

117 rolek nieckowych, mających funkcje niezawodności

$$R^{(1,3)}(t,1) = \exp[-0.005t^2],\ R^{(1,3)}(t,2) = \exp[-0.0075t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

oraz 19 rolek podtrzymujących, mających funkcje niezawodności

$$R^{(1,4)}(t,1) = \exp[-0.004t^2],\ R^{(1,4)}(t,2) = \exp[-0.005t^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Jest to zatem niejednorodny regularny wielostanowy system szeregowo-równoległy, w którym zgodnie z Definicją 4.17 mamy

$$k_n = k = 2,\ l_n = 139,\ a = 1,\ q_1 = 1,$$

$$e_1 = 4,\ p_{11} = 1/139,\ p_{12} = 2/139,\ p_{13} = 117/139,\ p_{14} = 19/139,$$

i zgodnie z (4.34)-(4.36) jego dokładną wielostanową funkcją niezawodności jest

$$\boldsymbol{R}'_{2,139}(t,\cdot) = [1,\ 1-[1-\exp[-0.6765t^2]]^2,\ 1-[1-\exp[-0.9981t^2]]^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Następnie stosując Fakt 7.1, ponieważ zgodnie z (7.4)

$$\alpha_1(1) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta_1(1) = \frac{1}{139}0.0125 + \frac{2}{139}0.0015 + \frac{117}{139}0.005 + \frac{19}{139}0.004$$

$$\cong 0.004866906,$$

$$\alpha_1(2) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta_1(2) = \frac{1}{139}0.022 + \frac{2}{139}0.0018 + \frac{117}{139}0.0075 + \frac{19}{139}0.005$$

$$\cong 0.007180575,$$

zgodnie z (7.5)

$\alpha(1) = \max\{2\} = 2, \beta(1) = \min\{0.004866906\} = 0.004866906,$

$\alpha(2) = \max\{2\} = 2, \beta(2) = \min\{0.007180575\} = 0.007180575,$

oraz zgodnie z (7.3)

$a_n(1) = (0.004866906 \cdot 139)^{-1/2} = 1.215811147, b_n(1) = 0,$

$a_n(2) = (0.007180575 \cdot 139)^{-1/2} = 1.000951394, \ b_n(2) = 0,$

wnioskujemy, że graniczną funkcją niezawodności podsystemu S_3 jest

$\mathfrak{R}'_9(t,\cdot) = [1, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^2]]^2, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^2]]^2]$ dla $t \geq 0$.

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać (wzór jest dokładny w tym przypadku)

$\boldsymbol{R}'_{2,139}(t,\cdot) \cong \mathfrak{R}'_9((t\text{-}b_n(u))/a_n(u),\cdot)$

$= [1, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.6765t^2]]^2, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.9981t^2]]^2]$ dla $t \geq 0$.

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$M(1) \cong 1.39$ lat, $M(2) \cong 1.15$ lat,

$\sigma(1) \cong 0.53$ lat, $\sigma(2) \cong 0.42$ lat.

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$\bar{M}(1) \cong 0.24$ lat, $\bar{M}(2) \cong 1.15$ lat.

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym podsystemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$\boldsymbol{r}(t) \cong [1\text{-}\exp[-0.9981t^2]]^2.$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$$\tau = r^{-1}(\delta) = [-(1/0.9981)\log(1-\sqrt{\delta})]^{1/2} \cong 0.50 \text{ roku.}$$

Podsystem S_4 składa się z trzech przenośników zgrzebłowych (łańcuchowych), które zbudowane są z koła napędowego, koła zwrotnego oraz odpowiednio 160, 160 i 240 ogniw. Podsystem ten jest zatem zbudowany z 3 przenośników, z których dwa zbudowane są z 162 elementów oraz jeden z 242 elementów. Podsystem ten jest więc niejednorodnym wielostanowym systemem szeregowo-równoległym nieregularnym. Aby otrzymać system regularny dwa przenośniki zbudowane ze 162 elementów umownie uzupełniamy 80 elementami nie uszkadzającymi się. Wtedy rozważmy system składa się z $k_n = 3$ przenośników, z których każdy jest zbudowany z $l_n = 242$ trójstanowych elementów. W dwóch przenośnikach podsystemu znajdują się:
2 koła napędowe o funkcjach niezawodności

$$R^{(1,1)}(t,1) = \exp[-0.005t^2],\ R^{(1,1)}(t,2) = \exp[-0.008t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

160 ogniw o funkcjach niezawodności

$$R^{(1,2)}(t,1) = \exp[-0.012t^2],\ R^{(1,2)}(t,2) = \exp[-0.018t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

oraz 80 elementów o „funkcjach niezawodności"

$$R^{(1,3)}(t,1) = \exp[-\beta_1 t^2],\ R^{(1,3)}(t,2) = \exp[-\beta_2 t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

gdzie

$$\beta_1 = \beta_2 = 0.$$

Trzeci przenośnik składa się z 2 kół napędowych o funkcjach niezawodności

$$R^{(2,1)}(t,1) = \exp[-0.022t^{3/2}],\ R^{(2,1)}(t,2) = \exp[-0.026t^{3/2}] \text{ dla } t \geq 0,$$

oraz 240 ogniw o funkcjach niezawodności

$$R^{(2,2)}(t,1) = \exp[-0.034t^{3/2}],\ R^{(2,2)}(t,2) = \exp[-0.042t^{3/2}] \text{ dla } t \geq 0.$$

Jest to zatem niejednorodny regularny wielostanowy system szeregowo-równoległy, w którym zgodnie z Definicją 4.17 mamy

$$k_n = k = 3,\ l_n = 242,\ a = 2,\ q_1 = 2/3,\ q_2 = 1/3,$$

$$e_1 = 3,\ p_{11} = 2/242,\ p_{12} = 160/242,\ p_{13} = 80/242,$$

$$e_2 = 2,\ p_{21} = 2/242,\ p_{22} = 240/242,$$

i zgodnie z (4.34)-(4.36) jego dokładną wielostanową funkcją niezawodności jest

$$\boldsymbol{R}'_{3,242}(t,\cdot) = [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-1.93t^2]]^2\cdot[1\text{-}\exp[-8.204t^{3/2}],$$

$$1\text{-}[1\text{-}\exp[-2.896t^2]]^2\cdot[1\text{-}\exp[-10.132t^{3/2}]]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Następnie stosując Fakt 7.1, ponieważ zgodnie z (7.4)

$$\alpha_1(1) = \min\{2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta_1(1) = \frac{2}{242}0.005 + \frac{160}{242}0.012 + \frac{80}{242}0 = 0.007975206,$$

$$\alpha_2(1) = \min\{3/2, 3/2\} = 3/2,$$

$$\beta_2(1) = \frac{2}{242}0.022 + \frac{240}{242}0.034 \cong 0.033900826,$$

$$\alpha_1(2) = \min\{2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta_1(2) = \frac{2}{242}0.008 + \frac{160}{242}0.018 + \frac{80}{242}0 = 0.011966942,$$

$$\alpha_2(2) = \min\{3/2, 3/2\} = 3/2,$$

$$\beta_2(2) = \frac{2}{242}0.026 + \frac{240}{242}0.042 \cong 0.041867768,$$

zgodnie z (7.5)

$$\alpha(1) = \max\{2, 3/2\} = 2,\ \beta(1) = \min\{0.007975206\} = 0.007975206,$$

$$\alpha(2) = \max\{2, 3/2\} = 2,\ \beta(2) = \min\{0.011966942\} = 0.011966942,$$

oraz zgodnie z (7.3)

$$a_n(1) = (0.007975206 \cdot 242)^{-1/2} = 0.719815778,\ b_n(1) = 0,$$

$$a_n(2) = (0.011966942 \cdot 242)^{-1/2} = 0.587625622,\ b_n(2) = 0,$$

więc graniczną funkcją niezawodności podsystemu S_4 jest

$$\mathfrak{R}'_9(t,\cdot) = [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t]]^2,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t]]^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać

$$R'_{3,242}(t,\cdot) \cong \mathfrak{R}'_9((t\text{-}b_n(u))/a_n(u),\cdot)$$

$$= [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-1.93t^2]]^2,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-2.896t^2]]^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Przybliżone wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$$M(1) \cong 0.82 \text{ lat},\ M(2) \cong 0.67 \text{ lat},$$

$$\sigma(1) \cong 0.32 \text{ lat},\ \sigma(2) \cong 0.26 \text{ lat}.$$

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$$\overline{M}(1) \cong 0.15 \text{ lat},\ \overline{M}(2) \cong 0.67 \text{ lat}.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym podsystemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$r(t) \cong [1\text{-}\exp[-2.896t^2]]^2.$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny $\delta = 0.05$, wynosi

$$\tau = r^{-1}(\delta) = [-(1/2.896)\log(1-\sqrt{\delta})]^{1/2} \cong 0.30 \text{ roku}.$$

Ponieważ podsystemy transportowe tworzą strukturę szeregową w sensie niezawodności, więc zgodnie z Definicją 4.15 i wzorami (4.29)-(4.30) wielostanową funkcją niezawodności całego systemu transportowego jest

$$\overline{\boldsymbol{R}}'(t,\cdot) \cong [1,\ \overline{\boldsymbol{R}}'(t,1),\ \overline{\boldsymbol{R}}'(t,2)],$$

gdzie

$$\overline{\boldsymbol{R}}'(t,1) \cong 24\exp[-25.471t^2] - 12\exp[-27.401t^2] - 12\exp[-26.1475t^2]$$
$$+ 6\exp[-28.0775t^2] - 24\exp[-47.699t^2] + 12\exp[-49.629t^2]$$
$$+ 12\exp[-48.3755t^2] - 6\exp[-50.3055t^2] + 8\exp[-69.927t^2]$$
$$- 4\exp[-71.857t^2] - 4\exp[-70.6035t^2] + 2\exp[-72.5335t^2]$$
$$- 12\exp[-26.1075t^2] + 6\exp[-28.0375t^2] + 6\exp[-26.784t^2]$$
$$- 3\exp[-28.714t^2] + 12\exp[-48.3355t^2] - 6\exp[-50.2655t^2]$$
$$- 6\exp[-49.012t^2] + 3\exp[-50.942t^2] - 4\exp[-70.5635t^2]$$
$$+ 2\exp[-72.4935t^2] + 2\exp[-71.24t^2] - \exp[-73.17t^2],$$

$$\overline{\boldsymbol{R}}'(t,2) \cong 24\exp[-49.2718t^2] - 12\exp[-52.1678t^2] - 12\exp[-50.2699t^2]$$
$$+ 6\exp[-53.1659t^2] - 24\exp[-93.7014t^2] + 12\exp[-96.5974t^2]$$
$$+ 12\exp[-94.6995t^2] - 6\exp[-97.5955t^2] + 8\exp[-138.131t^2]$$
$$- 4\exp[-141.027t^2] - 4\exp[-139.1291t^2] + 2\exp[-142.0251t^2]$$
$$- 12\exp[-50.2199t^2] + 6\exp[-53.1159t^2] + 6\exp[-51.218t^2]$$
$$- 3\exp[-54.114t^2] + 12\exp[-94.6495t^2] - 6\exp[-97.5455t^2]$$
$$- 6\exp[-95.6476t^2] + 3\exp[-98.5436t^2] - 4\exp[-139.0791t^2]$$
$$+ 2\exp[-141.9751t^2] + 2\exp[-140.0772t^2] - \exp[-142.9732t^2].$$

Przybliżone wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$M(1) \cong 0.27$ lat, $M(2) \cong 0.19$ lat,

$\sigma(1) \cong 0.09$ lat, $\sigma(2) \cong 0.07$ lat.

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania systemu w poszczególnych stanach są:

$\bar{M}(1) \cong 0.08$ lat, $\bar{M}(2) \cong 0.19$ lat.

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym systemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$r(t) \cong 1 - \bar{\boldsymbol{R}}'(t,2).$

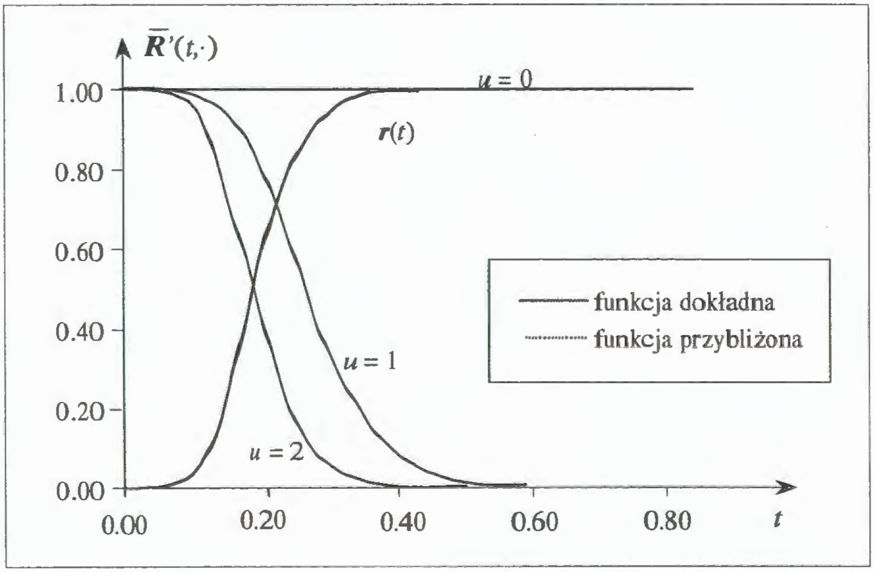
Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$\tau = \boldsymbol{r}^{-1}(\delta) \cong 0.10$ roku.

Zachowanie się dokładnej i przybliżonej funkcji niezawodności oraz funkcji ryzyka rozważanego systemu przedstawione jest w Tablicy 7.1 oraz na Rysunku 7.1. Ponadto w Tablicy 7.1 przedstawione są różnice pomiędzy dokładnymi oraz przybliżonymi wartościami składowych wielostanowej funkcji niezawodności systemu oznaczone przez $\Delta(1)$ i $\Delta(2)$. Różnice te świadczą o tym, że zastąpienie dokładnej funkcji niezawodności systemu przez jej postać przybliżoną nie prowadzi do znaczących błędów oszacowania.

Tablica 7.1 Wartości składowych wielostanowej funkcji niezawodności oraz funkcji ryzyka portowego systemu transportu zboża

t	$\overline{R}'(t,1)$ funkcja dokładna	$\overline{R}'(t,1)$ funkcja przybliżona	$\Delta(1)$	$\overline{R}'(t,2)$ funkcja dokładna	$\overline{R}'(t,2)$ funkcja przybliżona	$\Delta(2)$	$r(t)$
0.00	1.00000	1.00000	0.00000	1.00000	1.00000	0.00000	0.00000
0.05	0.99984	0.99981	0.00003	0.99882	0.99877	0.00005	0.00123
0.10	0.99191	0.99164	0.00027	0.95345	0.95288	0.00057	0.04712
0.15	0.93800	0.93695	0.00105	0.74554	0.74389	0.00165	0.25611
0.20	0.79233	0.79023	0.00210	0.42211	0.42005	**0.00206**	0.57789
0.25	0.57025	0.56759	**0.00266**	0.17068	0.16933	0.00135	0.83067
0.30	0.34445	0.34213	0.00232	0.05099	0.05046	0.00053	0.94954
0.35	0.17559	0.17411	0.00148	0.01162	0.01148	0.00014	0.98852
0.40	0.07652	0.07579	0.00073	0.00205	0.00203	0.00002	0.99797
0.45	0.02885	0.02857	0.00028	0.00028	0.00028	0.00000	0.99972
0.50	0.00948	0.00940	0.00008	0.00003	0.00003	0.00000	0.99997
0.55	0.00273	0.00271	0.00002	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
0.60	0.00069	0.00069	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000



Rys. 7.1 Wykresy składowych wielostanowej funkcji niezawodności oraz funkcji ryzyka portowego systemu transportu zboża

7.3. *Oszacowanie niezawodności portowego systemu transportu paliwa*

Baza Paliw Nr 21 w Dębogórzu 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. Do realizacji tych zadań posiada zaplecze techniczne zdolne realizować przeładunki w granicach 1500 tys. ton rocznie. Zadania te wykonują trzy części A, B i C Bazy, połączone rurociągowymi systemami transportowymi. Bezpośredni rozładunek tankowców odbywa się na pirsie rozładunkowym znajdującym się na falochronie Portu Gdynia. Jest to pirs zdolny do rozładunku tankowców o pojemności maksymalnej rzędu 25 tys. ton., wyposażony w urządzenia przystosowane do przyłączania instalacji tankowców, umożliwiających podawanie ich własnymi siłami załadunku do rurociągowego systemu transportowego Bazy Paliw. 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. Rurociąg ten na długości około 766 m położony jest pod wodą, a na długości około 1310 m pod ziemią na głębokości około 1 m. W części A Bazy Paliw znajduje się stacja podporowa wzmacniająca pompy tankowca i umożliwiająca dalszy transport produktu. Posiada ona agregaty pompowe dużej wydajności służące do tłoczenia produktu podsystemem transportowym S_2 do części B Bazy Paliw. Podsystem transportowy S_2 stanowią dwie nitki rurociągów zbudowanych z segmentów rur stalowych o średnicy 600 mm o długości około 8605 m położonych pod ziemią na głębokości około 1-1.5 m. Część B Bazy Paliw jest częścią magazynową, w której znajdują się zespoły zbiorników stalowych z dachami pływającymi na produkcie oraz systemy technologiczne (pompy, kolektory, instalacje wewnętrzne), umożliwiające załadunek produktu do autocystern. 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. System ten położony jest pod ziemią na głębokości 1.2 m i ma długość około 3854 m. Część C Bazy Paliw przeznaczona jest do załadunku produktem cystern kolejowych oraz do ekspedycji pociągów (formowanie składów, itp.) do węzła kolejowego Gdynia Port i dalej w głąb kraju.

Z uwagi na bezpieczeństwo eksploatacji rurociągu wyróżniamy trzy stany niezawodnościowe ich elementów: stan 2 – zapewniający pełne bezpieczeństwo eksploatacji rurociągu, stan 1 – zapewniający mniejsze bezpieczeństwo eksploatacji rurociągu związane z zagrożeniem zanieczyszczenia środowiska naturalnego, stan 0 – powodujący niezdatność rurociągu.

Podsystem S_1 składa się z dwóch identycznych rurociągów, z których każdy zbudowany jest z 176 segmentów rur o długości 12 m oraz 2 zasuw. Podsystem ten jest zatem zbudowany z $k_n = 2$ nitek rurociągów, z których każdy zbudowany jest z $l_n = 178$ elementów. W każdym rurociągu znajdują się:

176 segmentów rur, mających funkcje niezawodności

$$R^{(1,1)}(t,1) = \exp[-0.000000001t^4],\ R^{(1,1)}(t,2) = \exp[-0.000000004t^4],\ t \geq 0,$$

oraz 2 zasuwy, mające funkcje niezawodności

$$R^{(1,2)}(t,1) = \exp[-0.000000052t^4],\ R^{(1,2)}(t,2) = \exp[-0.000000107t^4],\ t \geq 0,$$

Jest to zatem niejednorodny regularny wielostanowy system szeregowo-równoległy, w którym zgodnie z Definicją 4.17 mamy

$$k_n = k = 2,\ l_n = 178,\ a = 1,\ q_1 = 1,$$

$$e_1 = 2,\ p_{11} = 176/178,\ p_{12} = 2/178,$$

i zgodnie z (4.34)-(4.36), dokładną wielostanową funkcją niezawodności rurociągu jest

$$\boldsymbol{R}'_{2,178}(t,\cdot) = [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.00000028t^4]]^2,$$

$$1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.000000918t^4]]^2],\ t \geq 0.$$

Następnie stosując Fakt 7.1, ponieważ zgodnie z (7.4)

$$\alpha_1(1) = \min\{4, 4\} = 4,$$

$$\beta_1(1) = \frac{176}{178}0.000000001 + \frac{2}{178}0.000000052 = 0.00000001573,$$

$$\alpha_1(2) = \min\{4, 4\} = 4,$$

$$\beta_1(2) = \frac{176}{178}0.000000004 + \frac{2}{178}0.000000107 = 0.0000000051573,$$

zgodnie z (7.5)

$\alpha(1) = \max\{4\} = 4$, $\beta(1) = \min\{0.000000001573\} = 0.000000001573$,

$\alpha(2) = \max\{4\} = 4$, $\beta(2) = \min\{0.000000005157\} = 0.0000000051573$,

oraz zgodnie z (7.3)

$a_n(1) = (0.000000001573 \cdot 178)^{-1/4} = 43.47208719$, $b_n(1) = 0$,

$a_n(2) = (0.000000005157 \cdot 178)^{-1/4} = 32.30645681$, $b_n(2) = 0$,

więc graniczną funkcją niezawodności podsystemu jest

$\mathfrak{R}'_9(t\,,\cdot) = [1\,,\, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^4]]^2,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^4]]^2]$ dla $t \geq 0$.

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać (wzór jest dokładny w tym przypadku)

$\boldsymbol{R}'_{2,178}(t\,,\cdot) \cong \mathfrak{R}'_9((t\text{-}b_n(u))/a_n(u)\,,\cdot)$

$= [1,\, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.00000028t^4]]^2,$

$1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.000000918t^4]]^2]$ dla $t \geq 0$.

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$M(1) \cong 45.67$ lat, $M(2) \cong 33.94$ lat,

$\sigma(1) \cong 8.92$ lat, $\sigma(2) \cong 6.63$ lat.

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$\bar{M}(1) \cong 11.73$ lat, $\bar{M}(2) \cong 33.94$ lat.

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym systemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$r(t) \cong [1\text{-}\exp[-0.000000918t^4]]^2.$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$$\tau = r^{-1}(\delta) = [-(1/0.000000918)\log(1-\sqrt{\delta})]^{1/4} \cong 22.91 \text{ roku.}$$

Podsystem S_2 składa się z dwóch identycznych rurociągów, z których każdy zbudowany jest z 717 segmentów rur o długości 12 m oraz 2 zasuw. Podsystem ten jest zatem zbudowany z $k_n = 2$ nitek rurociągów, z których każdy zbudowany jest z $l_n = 719$ elementów. W każdym rurociągu znajdują się:
717 segmentów rur, mających funkcje niezawodności

$$R^{(1,1)}(t,1) = \exp[-0.000000001t^4],\ R^{(1,1)}(t,2) = \exp[-0.000000004t^4],\ t \geq 0,$$

oraz 2 zasuwy, mające funkcje niezawodności

$$R^{(1,2)}(t,1) = \exp[-0.000000052t^4],\ R^{(1,2)}(t,2) = \exp[-0.000000107t^4],\ t \geq 0.$$

Jest to zatem niejednorodny regularny wielostanowy system szeregowo-równoległy, w którym zgodnie z Definicją 4.17 mamy

$$k_n = k = 2,\ l_n = 719,\ a = 1,\ q_1 = 1,$$

$$e_1 = 2,\ p_{11} = 717/719,\ p_{12} = 2/719,$$

i zgodnie z (4.34)-(4.36) dokładną wielostanową funkcją niezawodności rurociągu jest

$$\boldsymbol{R}'_{2,719}(t,\cdot) = [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.000000821t^4]]^2,$$

$$1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.000003082t^4]]^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Następnie stosując Fakt 7.1, ponieważ zgodnie z (7.4)

$$\alpha_1(1) = \min\{4, 4\} = 4,$$

$$\beta_1(1) = \frac{717}{719}0.000000001 + \frac{2}{719}0.000000052 = 0.000000011418,$$

$$\alpha_1(2) = \min\{4, 4\} = 4,$$

$$\beta_1(2) = \frac{717}{719} 0.000000004 + \frac{2}{719} 0.000000107 = 0.0000000042865,$$

zgodnie z (7.5)

$$\alpha(1) = \max\{4\} = 4, \beta(1) = \min\{0.0000000011418\} = 0.0000000011418,$$

$$\alpha(2) = \max\{4\} = 4, \beta(2) = \min\{0.0000000042865\} = 0.0000000042865,$$

oraz zgodnie z (7.3)

$$a_n(1) = (0.0000000011418 \cdot 719)^{-1/4} = 33.22111547, b_n(1) = 0,$$

$$a_n(2) = (0.0000000042865 \cdot 719)^{-1/4} = 23.86667072, \; b_n(2) = 0,$$

wnioskujemy, że graniczną funkcją niezawodności podsystemu jest

$$\mathfrak{R}'_9(t,\cdot) = [1, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^4]]^2, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^4]]^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać (wzór jest dokładny w tym przypadku)

$$\boldsymbol{R}'_{2,719}(t,\cdot) \cong \mathfrak{R}'_9((t\text{-}b_n(u))/a_n(u),\cdot)$$

$$= [1, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.000000821t^4]]^2,$$

$$1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.000003082t^4]]^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$$M(1) \cong 34.90 \text{ lat}, M(2) \cong 25.07 \text{ lat},$$

$$\sigma(1) \cong 6.82 \text{ lat}, \sigma(2) \cong 4.92 \text{ lat}.$$

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$$\overline{M}(1) \cong 9.83 \text{ lat}, \; \overline{M}(2) \cong 25.07 \text{ lat}.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym systemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$r(t) \cong [1-\exp[-0.000003082t^4]]^2.$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$$\tau = r^{-1}(\delta) = [-(1/0.000003082)\log(1-\sqrt{\delta})]^{1/4} \cong 16.93 \text{ roku.}$$

Podsystem S_3 składa się z trzech nitek rurociągów, które zbudowane są odpowiednio z 360 segmentów rur o długościach 10 m lub 7.5 m oraz z 2 zasuw, przy czym w dwóch z nich rury mają średnicę 350 mm, a w trzeciej rury mają średnicę 500 mm. Podsystem ten jest zatem zbudowany z $k_n = 3$ nitek rurociągów, z których każdy składa się z $l_n = 362$ elementów. W dwóch nitkach rurociągu znajduje się:
360 segmentów rur o funkcjach niezawodności

$$R^{(1,1)}(t,1) = \exp[-0.0000000008t^4],\ R^{(1,1)}(t,2) = \exp[-0.000000002t^4],\ t \geq 0,$$

oraz 2 zasuwy o funkcjach niezawodności

$$R^{(1,2)}(t,1) = \exp[-0.000000052t^4],\ R^{(1,2)}(t,2) = \exp[-0.000000107t^4],\ t \geq 0.$$

W trzeciej nitce znajdują się:
360 segmentów rur o funkcjach niezawodności

$$R^{(2,1)}(t,1) = \exp[-0.00000022t^3],\ R^{(2,1)}(t,2) = \exp[-0.0000003t^3],\ t \geq 0,$$

oraz 2 zasuwy o funkcjach niezawodności

$$R^{(2,2)}(t,1) = \exp[-0.000000052t^4],\ R^{(2,2)}(t,2) = \exp[-0.000000107t^4],\ t \geq 0.$$

Jest to zatem niejednorodny regularny wielostanowy system szeregowo-równoległy, w którym zgodnie z Definicją 4.17 mamy

$$k_n = k = 3,\ l_n = 362,\ a = 2,\ q_1 = 2/3,\ q_2 = 1/3,$$

$$e_1 = 2,\ p_{11} = 360/362,\ p_{12} = 2/362,$$

$$e_2 = 2,\ p_{21} = 360/362,\ p_{22} = 2/362,$$

i zgodnie z (4.34)-(4.36), dokładną wielostanową funkcją niezawodności rurociągu jest

$$R'_{3,362}(t,\cdot)$$

$$= [1, 1-[1-\exp[-0.000000392t^4]]^2 \cdot [1-\exp[-0.0000792t^3-0.000000104t^4],$$

$$1-[1-\exp[-0.000000934t^4]]^2 \cdot [1-\exp[-0.000108t^3-0.000001294t^4]]], \ t \geq 0.$$

Następnie stosując Fakt 7.1, ponieważ zgodnie z (7.4)

$$\alpha_1(1) = \min\{4, 4\} = 4,$$

$$\beta_1(1) = \frac{360}{362}0.0000000008 + \frac{2}{362}0.000000052 = 0.0000000010828,$$

$$\alpha_2(1) = \min\{3, 4\} = 3,$$

$$\beta_2(1) = \frac{360}{362}0.00000022 = 0.000000218,$$

$$\alpha_1(2) = \min\{4, 4\} = 4,$$

$$\beta_1(2) = \frac{360}{362}0.000000002 + \frac{2}{362}0.000000107 = 0.0000000025801,$$

$$\alpha_2(2) = \min\{3, 4\} = 3,$$

$$\beta_2(2) = \frac{360}{362}0.0000003 = 0.000000298,$$

zgodnie z (7.5)

$$\alpha(1) = \max\{4, 3\} = 4,$$

$$\beta(1) := \min\{0.0000000010828\} = 0.0000000010828,$$

$$\alpha(2) = \max\{4, 3\} = 4,$$

$$\beta(2) = \min\{0.0000000025801\} = 0.0000000025801,$$

oraz zgodnie z (7.3)

$$a_n(1) = (0.000000010828 \cdot 362)^{-1/4} = 39.96487724,\ b_n(1) = 0,$$

$$a_n(2) = (0.000000025801 \cdot 362)^{-1/4} = 32.1672016,\ b_n(2) = 0,$$

więc graniczną funkcją niezawodności podsystemu jest

$$\mathfrak{R}'_9(t,\cdot) = [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^4]]^2,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^4]]^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać

$$R'_{3,362}(t,\cdot)$$

$$\cong \mathfrak{R}'_9((t-b_n(u))/a_n(u),\cdot)$$

$$= [1,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.000000392t^4]]^2,\ 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.000000934t^4]]^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Przybliżone wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$$M(1) \cong 41.99 \text{ lat},\ M(2) \cong 33.80 \text{ lat},$$

$$\sigma(1) \cong 8.17 \text{ lat},\ \sigma(2) \cong 6.57 \text{ lat}.$$

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$$\bar{M}(1) \cong 8.19 \text{ lat},\ \bar{M}(2) \cong 33.80 \text{ lat}.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym systemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$r(t) \cong [1\text{-}\exp[-0.000000934t^4]]^2.$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$$\tau = r^{-1}(\delta) = [-(1/0.000000934)\log(1-\sqrt{\delta})]^{1/4} \cong 22.82 \text{ lat.}$$

Ponieważ podsystemy transportowe tworzą strukturę szeregową w sensie niezawodności, więc zgodnie z Definicją 4.15 i wzorami (4.29)-(4.30) wielostanową funkcją niezawodności całego systemu transportowego jest

$$\bar{R}'(t,\cdot) \cong [1,\ \bar{R}'(t,1),\ \bar{R}'(t,2)],$$

gdzie

$$\bar{R}'(t,1) \cong 8\exp[-0.000001493t^4] - 4\exp[-0.000001885t^4]$$
$$- 4\exp[-0.000002314t^4] + 2\exp[-0.000002706t^4]$$
$$- 4\exp[-0.000001773t^4] + 2\exp[-.000002165t^4]$$
$$+2\exp[-0.000002594t^4] - \exp[-0.000002986t^4],$$

$$\bar{R}'(t,2) \cong 8\exp[-0.000004934t^4] - 4\exp[-0.000005868t^4]$$
$$- 4\exp[-0.000008016t^4] + 2\exp[-0.00000895t^4]$$
$$- 4\exp[-0.000005852t^4] + 2\exp[-0.000006786t^4]$$
$$+2\exp[-0.000008934t^4] - \exp[-0.000009868t^4].$$

Przybliżone wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$$M(1) \cong 32.60 \text{ lat},\ M(2) \cong 23.98 \text{ lat},$$

$$\sigma(1) \cong 5.90 \text{ lat},\ \sigma(2) \cong 4.43 \text{ lat}.$$

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania systemu w poszczególnych stanach są:

$$\bar{M}(1) \cong 8.62 \text{ lat},\ \bar{M}(2) \cong 23.98 \text{ lat}.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym systemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$r(t) \cong 1 - \bar{\boldsymbol{R}}'(t,2).$$

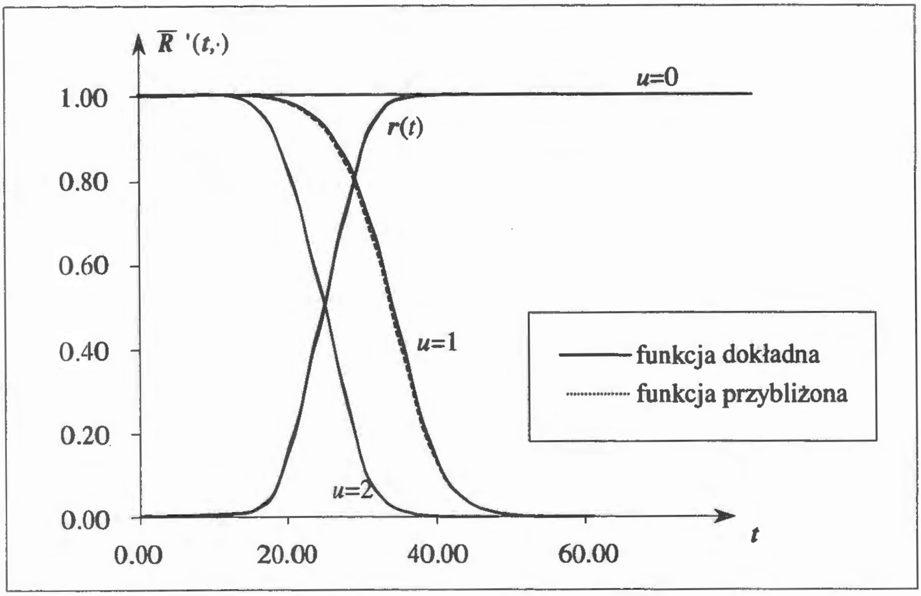
Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$$\tau = r^{-1}(\delta) \cong 16.50 \text{ roku.}$$

Zachowanie się dokładnej i przybliżonej funkcji niezawodności oraz funkcji ryzyka rozważanego systemu przedstawione jest w Tablicy 7.2 oraz na Rysunku 7.2. Ponadto w Tablicy 7.2 przedstawione są różnice pomiędzy dokładnymi oraz przybliżonymi wartościami składowych wielostanowej funkcji niezawodności systemu oznaczone przez $\Delta(1)$ i $\Delta(2)$. Różnice te świadczą o tym, że zastąpienie dokładnej funkcji niezawodności systemu przez jej postać przybliżoną nie prowadzi do znaczących błędów oszacowania.

Tablica 7.2 Wartości składowych wielostanowej funkcji niezawodności oraz funkcji ryzyka portowego systemu transportu paliwa

t	$\bar{\boldsymbol{R}}'(t,1)$		$\Delta(1)$	$\bar{\boldsymbol{R}}'(t,2)$		$\Delta(2)$	$r(t)$
	funkcja dokładna	funkcja przybliżona		funkcja dokładna	funkcja przybliżona		
0.00	1.00000	1.00000	0.00000	1.00000	1.00000	0.00000	0.00000
4.00	1.00000	1.00000	0.00000	1.00000	1.00000	0.00000	0.00000
8.00	0.99999	0.99998	0.00001	0.99983	0.99981	0.00002	0.00019
12.00	0.99967	0.99962	0.00005	0.99574	0.99545	0.00029	0.00455
16.00	0.99674	0.99628	0.00046	0.96187	0.95986	0.00201	0.04014
20.00	0.98122	0.97932	0.00190	0.82208	0.81658	0.00550	0.18342
24.00	0.92630	0.92181	0.00449	0.51602	0.51032	**0.00570**	0.48968
28.00	0.79042	0.78421	**0.00621**	0.18509	0.18326	0.00183	0.81674
32.00	0.55756	0.55282	0.00474	0.02933	0.02919	0.00014	0.97081
36.00	0.29212	0.29028	0.00184	0.00161	0.00161	0.00000	0.99839
40.00	0.10179	0.10146	0.00033	0.00002	0.00002	0.00000	0.99998
44.00	0.02121	0.02118	0.00003	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
48.00	0.00239	0.00239	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
52.00	0.00013	0.00013	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
56.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000
60.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000



Rys. 7.2 Wykresy składowych wielostanowej funkcji niezawodności oraz funkcji ryzyka portowego systemu transportu paliwa

Rozważona struktura niezawodnościowa systemu transportu paliwa jest właściwa w przypadku gdy każdy z trzech produktów może być transportowany przez każdą z nitek. Wtedy jednakże część jednego produktu która ulega zmieszaniu z innym produktem, musi podlegać rafinacji. Jeśli nie dopuszcza się do mieszania produktów w czasie transportu strukturę systemu należy traktować jako szeregową zbudowaną z n = 2880 elementów, tzn. z 1786 segmentów rur o funkcjach niezawodności

$$R^{(1)}(t,1) = \exp[-0.000000001t^4],\ R^{(1)}(t,2) = \exp[-0.000000004t^4],\ t \geq 0,$$

720 segmentów rur o funkcjach niezawodności

$$R^{(2)}(t,1) = \exp[-0.0000000008t^4],\ R^{(2)}(t,2) = \exp[-0.000000002t^4],\ t \geq 0,$$

360 segmentów rur o funkcjach niezawodności

$$R^{(3)}(t,1) = \exp[-0.00000022t^3],\ R^{(3)}(t,2) = \exp[-0.0000003t^3],\ t \geq 0,$$

oraz 14 zasuw o funkcjach niezawodności

$$R^{(4)}(t,1) = \exp[-0.000000052t^4],\ R^{(4)}(t,2) = \exp[-0.000000107t^4],\ t \geq 0.$$

Wtedy rozważany system jest niejednorodnym wielostanowym systemem szeregowym, w którym zgodnie z Definicją 4.15 mamy

$$n = 2880,\ a = 4,$$

$$q_1 = 1786/2880,\ q_2 = 720/2880173,\ q_3 = 360/2880,\ q_4 = 4/2880,$$

i zgodnie z (3.29)-(3.30) dokładną wielostanową funkcją niezawodności rurociągu jest

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{2880}(t,\cdot) = [1,\ \exp[-0.00000309t^4 - 0.0000792t^3],$$

$$\exp[-0.000010082t^4 - 0.000108t^3]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Wartości oczekiwane i odchylenia standardowe czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$$M(1) \cong 17.30 \text{ lat},\ M(2) \cong 14.00 \text{ lat},$$

$$\sigma(1) \cong 5.60 \text{ lat},\ \sigma(2) \cong 4.40 \text{ lat}.$$

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania systemu w poszczególnych stanach są:

$$\overline{M}(1) \cong 3.30 \text{ lat},\ \overline{M}(2) \cong 14.00.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym systemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$\boldsymbol{r}(t) \cong 1 - \exp[-0.000010082t^4 - 0.000108t^3].$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$$\tau \cong \boldsymbol{r}^{-1}(\delta) \cong 6.20 \text{ roku}.$$

7.4. *Oszacowanie niezawodności portowego systemu transportu towarów sypkich*

Bałtycka Baza Masowa jest podmiotem gospodarczym zajmującym się przeładunkiem towarów sypkich w relacji eksportowej z magazynów Bazy na statki. Załadunek odbywa się z magazynów za pośrednictwem 3 samobieżnych ładowarek oraz systemu transportowego będącego zespołem przenośników taśmowych oraz nabrzeżowego urządzenia załadowczego. System transportowy składa się z 3 metalowych koszy zasypowych wyposażonych w taśmowe przenośniki dozujące tworzące podsystem transportowy S_1, z dwóch przenośników taśmowych tworzących odpowiednio podsystemy transportowe S_2, S_3, z przenośnika dozującego z buforem zabezpieczającego równomierny transport towaru i tworzącego podsystem transportowy S_4, z przenośnika taśmowego tworzącego podsystem S_5 oraz z urządzenia załadowczego będącego podsystemem transportowym S_6.

Podsystemy transportowe osadzone są na konstrukcjach stalowych i wyposażone są w napęd w postaci silników elektrycznych z przekładniami. W analizie niezawodności pomijamy ich napędy, które są urządzeniami innego typu. Pomijamy także konstrukcje stalowe, które charakteryzują się wysoką niezawodnością i praktycznie nie uszkadzają się. Z uwagi na wydajność systemu transportowego wyróżniamy cztery stany niezawodnościowe jego elementów: stan 3 – zapewniający największą wydajność przenośnika, stan 2 – zapewniający mniejszą wydajność przenośnika wymuszoną przez wysypywanie się towaru z taśmy, stan 1 – umożliwiający transport z mniejszą wydajnością przy bezpośredniej regulacji przebiegu taśmy przez człowieka, stan 0 – powodujący niezdatność przenośnika.

Podsystem S_1 składa się z 3 identycznych przenośników taśmowych, taśmy gumowej, bębna napędzającego taśmę, bębna zwrotnego, 12 rolek nieckowych oraz 3 rolek podtrzymujących taśmę. Podsystem ten jest zatem zbudowany z $k_n = 3$ przenośników, z których każdy zbudowany jest z $l_n = 18$ elementów. W każdym przenośniku znajdują się:

1 taśma, mająca funkcje niezawodności

$$R^{(1,1)}(t,1) = \exp[-0.012t^2],\ R^{(1,1)}(t,2) = \exp[-0.022t^2],$$

$$R^{(1,1)}(t,3) = \exp[-0.049t^2] \text{ dla } t \ge 0,$$

2 bębny, mające funkcje niezawodności

$$R^{(1,2)}(t,1) = \exp[-0.0019t^2],\ R^{(1,2)}(t,2) = \exp[-0.0024t^2],$$

$R^{(1,2)}(t,3) = \exp[-0.0029t^2]$ dla $t \geq 0$,

12 rolek nieckowych, mających funkcje niezawodności

$R^{(1,3)}(t,1) = \exp[-0.028t^2]$, $R^{(1,3)}(t,2) = \exp[-0.03t^2]$,

$R^{(1,3)}(t,3) = \exp[-0.032t^2]$ dla $t \geq 0$,

oraz 3 rolki podtrzymujące o funkcjach niezawodności

$R^{(1,4)}(t,1) = \exp[-0.0075t^2]$, $R^{(1,4)}(t,2) = \exp[-0.01t^2]$,

$R^{(1,4)}(t,3) = \exp[-0.02t^2]$ dla $t \geq 0$.

Jest to zatem niejednorodny regularny wielostanowy system szeregowo-równoległy, w którym zgodnie z Definicją 4.17 mamy

$k_n = k = 3$, $l_n = 18$, $a = 1$, $q_1 = 1$,

$e_1 = 4$, $p_{11} = 1/18$, $p_{12} = 2/18$, $p_{13} = 12/18$, $p_{14} = 3/18$,

i zgodnie z (4.34)-(4.36) jego dokładną wielostanową funkcją niezawodności jest

$$\boldsymbol{R}'_{3,18}(t,\cdot) = [1,\ 1-[1-\exp[-0.3743t^2]]^3,\ 1-[1-\exp[-0.4168t^2]]^3,$$

$$1-[1-\exp[-0.4988t^2]]^3] \text{ dla } t \geq 0.$$

Następnie stosując Fakt 7.1, zgodnie z (7.4)

$$\alpha_1(1) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta_1(1) = \frac{1}{18}0.012 + \frac{2}{18}0.0019 + \frac{12}{18}0.028 + \frac{3}{18}0.0075 = 0.020794444,$$

$$\alpha_1(2) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta_1(2) = \frac{1}{18}0.022 + \frac{2}{18}0.0024 + \frac{12}{18}0.03 + \frac{3}{18}0.01 = 0.023155555,$$

$\alpha_1(3) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$

$$\beta_1(3) = \frac{1}{18}0.049 + \frac{2}{18}0.0029 + \frac{12}{18}0.032 + \frac{3}{18}0.02 = 0.027711111,$$

zgodnie z (7.5)

$$\alpha(1) = \max\{2\} = 2, \beta(1) = \min\{0.020794444\} = 0.020794444,$$

$$\alpha(2) = \max\{2\} = 2, \beta(2) = \min\{0.023155555\} = 0.023155555,$$

$$\alpha(3) = \max\{2\} = 2, \beta(3) = \min\{0.027711111\} = 0.027711111,$$

oraz zgodnie z (7.3)

$$a_n(1) = (0.020794444 \cdot 18)^{-1/2} = 1.634519443, b_n(1) = 0,$$

$$a_n(2) = (0.023155555 \cdot 18)^{-1/2} = 1.548945546, \; b_n(2) = 0,$$

$$a_n(3) = (0.027711111 \cdot 18)^{-1/2} = 1.415913682, \; b_n(3) = 0,$$

i wnioskujemy, że graniczną funkcją niezawodności podsystemu jest

$$\mathfrak{R}'_9(t,\cdot) = [1, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^2]]^3, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^2]]^3, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-t^2]]^3] \text{ dla } t \geq 0.$$

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać (wzór jest dokładny w tym przypadku)

$$\boldsymbol{R}'_{3,18}(t,\cdot) \cong \mathfrak{R}'_9((t\text{-}b_n(u))/a_n(u), \cdot)$$

$$= [1, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.3743t^2]]^3, 1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.4168t^2]]^3,$$

$$1\text{-}[1\text{-}\exp[-0.4988t^2]]^3] \text{ dla } t \geq 0.$$

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$M(1) \cong 2.11$ lat, $M(2) \cong 2.00$ lat, $M(3) \cong 1.83$ lat,

$\sigma(1) \cong 0.67$ lat, $\sigma(2) \cong 0.63$ lat, $\sigma(3) \cong 0.57$ lat.

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$$\bar{M}(1) \cong 0.11 \text{ lat}, \quad \bar{M}(2) \cong 0.17 \text{ lat}, \quad \bar{M}(3) \cong 1.83 \text{ lat}.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym podsystemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$\boldsymbol{r}(t) \cong [1\text{-}\exp[-0.4168t^2]]^3.$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$$\tau = \boldsymbol{r}^{-1}(\delta) = [-(1/0.4168)\log(1- \sqrt[3]{\delta}\,)]^{1/2} \cong 1.05 \text{ roku}.$$

Podsystem S_2 składa się z jednego przenośnika taśmowego zbudowanego z taśmy gumowej, bębna napędu, bębna zwrotnego, 125 rolek nieckowych oraz 45 rolek podtrzymujących taśmę. Podsystem ten jest zatem zbudowany z jednego przenośnika zbudowanego z $n = 173$ elementów. W przenośniku znajdują się:

1 taśma, mająca funkcje niezawodności

$$R^{(1)}(t,1) = \exp[-0.012t^2], R^{(1)}(t,2) = \exp[-0.022t^2],$$

$$R^{(1)}(t,3) = \exp[-0.049t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

2 bębny, mające funkcje niezawodności

$$R^{(2)}(t,1) = \exp[-0.0019t^2], R^{(2)}(t,2) = \exp[-0.0024t^2],$$

$$R^{(2)}(t,3) = \exp[-0.0029t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

125 rolek nieckowych, mających funkcje niezawodności

$$R^{(3)}(t,1) = \exp[-0.0074t^2], R^{(3)}(t,2) = \exp[-0.012t^2],$$

$$R^{(3)}(t,3) = \exp[-0.021t^2] \text{ dla } t \geq 0$$

oraz 45 rolek podtrzymujących, mających funkcje niezawodności

$$R^{(4)}(t,1) = \exp[-0.002t^2], R^{(4)}(t,2) = \exp[-0.0025t^2],$$

$$R^{(4)}(t,3) = \exp[-0.003t^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Jest to zatem niejednorodny wielostanowy system szeregowy, w którym zgodnie z Definicją 4.15 mamy

$$n = 173,\ a = 4,\ q_1 = 1/173,\ q_2 = 2/173,\ q_3 = 125/173,\ q_4 = 45/173,$$

i zgodnie z (4.29)-(4.30), jego dokładną wielostanową funkcją niezawodności jest

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{173}(t,\cdot) = [1, \exp[-1.0308t^2], \exp[-1.6393t^2], \exp[-2.8148t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Następnie stosując Fakt 7.2, zgodnie z (7.8)

$$\alpha(1) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta(1) = \max\{0.012, 0.0019, 0.0074, 0.002\} = 0.012,$$

$$\alpha(2) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta(2) = \max\{0.022, 0.0024, 0.012, 0.0025\} = 0.022,$$

$$\alpha(3) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta(3) = \max\{0.049, 0.0029, 0.021, 0.003\} = 0.049,$$

oraz zgodnie z (7.7)

$$a_n(1) = (0.012 \cdot 173)^{-1/2} = 0.694042915,\ b_n(1) = 0,$$

$$a_n(2) = (0.022 \cdot 173)^{-1/2} = 0.512584663,\ b_n(2) = 0,$$

$$a_n(3) = (0.049 \cdot 173)^{-1/2} = 0.343462169,\ b_n(3) = 0,$$

i ponadto

$$\bar{d}(t,1) = \frac{1}{173}\frac{0.012}{0.012} + \frac{2}{173}\frac{0.0019}{0.012} + \frac{125}{173}\frac{0.0074}{0.012} + \frac{45}{173}\frac{0.002}{0.012}$$

$$= 0.49653175,$$

$$\bar{d}(t,2) = \frac{1}{173}\frac{0.022}{0.022} + \frac{2}{173}\frac{0.0024}{0.022} + \frac{125}{173}\frac{0.012}{0.022} + \frac{45}{173}\frac{0.0025}{0.022}$$

$$= 0.430714636,$$

$$\bar{d}(t,3) = \frac{1}{173}\frac{0.049}{0.049} + \frac{2}{173}\frac{0.0029}{0.049} + \frac{125}{173}\frac{0.021}{0.049} + \frac{45}{173}\frac{0.003}{0.049}$$

$$= 0.332051428,$$

i wnioskujemy, że graniczną funkcją niezawodności podsystemu jest

$$\bar{\mathfrak{R}}'_2(t,\cdot) = [1, \exp[-0.49653175t^2], \exp[-0.430714636t^2],$$

$$\exp[-0.332051428t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać (wzór jest dokładny w tym przypadku)

$$\bar{R}'_{173}(t,\cdot) \cong \bar{\mathfrak{R}}'_2((t-b_n(u))/a_n(u),\cdot)$$

$$= [1, \exp[-1.0308t^2], \exp[-1.6393t^2], \exp[-2.8148t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$M(1) \cong 0.87$ lat, $M(2) \cong 0.69$ lat, $M(3) \cong 0.53$ lat,

$\sigma(1) \cong 0.46$ lat, $\sigma(2) \cong 0.36$ lat, $\sigma(3) \cong 0.28$ lat.

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$\bar{M}(1) \cong 0.18$ lat, $\bar{M}(2) \cong 0.16$ lat, $\bar{M}(3) \cong 0.53$.

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym systemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$r(t) \cong 1 - \exp[-1.6393t^2].$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$$\tau = r^{-1}(\delta) = [-(1/1.6393)\log(1-\delta)]^{1/2} \cong 0.18 \text{ roku.}$$

Ocenę niezawodności pozostałych podsystemów oprzemy na Wniosku 7.1, który jest mniej pracochłonny w zastosowaniu niż Fakt 7.2.

Podsystem S_3 składa się z jednego przenośnika taśmowego zbudowanego z taśmy gumowej, bębna napędu, bębna zwrotnego, 65 rolek nieckowych oraz 20 rolek podtrzymujących taśmę. Podsystem ten jest zatem zbudowany z jednego przenośnika zbudowanego z n = 88 elementów. W przenośniku znajdują się:
1 taśma, mająca funkcje niezawodności

$$R^{(1)}(t,1) = \exp[-0.012t^2],\ R^{(1)}(t,2) = \exp[-0.022t^2],$$

$$R^{(1)}(t,3) = \exp[-0.049t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

2 bębny, mające funkcje niezawodności

$$R^{(2)}(t,1) = \exp[-0.0019t^2],\ R^{(2)}(t,2) = \exp[-0.0024t^2],$$

$$R^{(2)}(t,3) = \exp[-0.0029t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

65 rolek nieckowych, mających funkcje niezawodności

$$R^{(3)}(t,1) = \exp[-0.0074t^2],\ R^{(3)}(t,2) = \exp[-0.012t^2],$$

$$R^{(3)}(t,3) = \exp[-0.021t^2] \text{ dla } t \geq 0$$

oraz 20 rolek podtrzymujących, mających funkcje niezawodności

$$R^{(4)}(t,1) = \exp[-0.002t^2],\ R^{(4)}(t,2) = \exp[-0.0025t^2],$$

$$R^{(4)}(t,3) = \exp[-0.003t^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Jest to zatem niejednorodny wielostanowy system szeregowy, w którym zgodnie z Definicją 4.15 mamy

$$n = 88,\ a = 4,\ q_1 = 1/88,\ q_2 = 2/88,\ q_3 = 65/88,\ q_4 = 20/88,$$

i zgodnie z (4.29)-(4.30), jego dokładną wielostanową funkcją niezawodności jest

$$\bar{\boldsymbol{R}}'_{88}(t,\cdot) = [1, \exp[-0.5368t^2], \exp[-0.8568t^2], \exp[-1.4798t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Następnie stosując Wniosek 7.1, zgodnie z (7.8')

$$\alpha(1) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta(1) = \frac{1}{88}0.012 + \frac{2}{88}0.0019 + \frac{65}{88}0.0074 + \frac{20}{88}0.002 = 0.0061,$$

$$\alpha(2) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta(2) = \frac{1}{88}0.022 + \frac{2}{88}0.0024 + \frac{65}{88}0.012 + \frac{20}{88}0.0025 = 0.009736363,$$

$$\alpha(3) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta(3) = \frac{1}{88}0.049 + \frac{2}{88}0.0029 + \frac{65}{88}0.021 + \frac{20}{88}0.003 = 0.01681 5909,$$

oraz zgodnie z (7.7')

$$a_n(1) = (0.0061 \cdot 88)^{-1/2} = 1.364877726, \; b_n(1) = 0,$$

$$a_n(2) = (0.009736363 \cdot 88)^{-1/2} = 1.080339575, \; b_n(2) = 0,$$

$$a_n(3) = (0.01681 5909 \cdot 88)^{-1/2} = 0.822050484, \; b_n(3) = 0,$$

i wnioskujemy, że graniczną funkcją niezawodności systemu jest

$$\bar{\mathfrak{R}}'_2(t,\cdot) = [1, \exp[-t^2], \exp[-t^2], \exp[-t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać (wzór jest dokładny w tym przypadku)

$$\bar{\boldsymbol{R}}'_{88}(t,\cdot) \cong \bar{\mathfrak{R}}'_2((t-b_n(u))/a_n(u),\cdot)$$

$$= [1, \exp[-0.5368t^2], \exp[-0.8568t^2], \exp[-1.4798t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$$M(1) \cong 1.21 \text{ lat}, M(2) \cong 0.96 \text{ lat}, M(3) \cong 0.73 \text{ lat},$$

$$\sigma(1) \cong 0.63 \text{ lat}, \sigma(2) \cong 0.50 \text{ lat}, \sigma(3) \cong 0.38 \text{ lat}.$$

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$$\bar{M}(1) \cong 0.25 \text{ lat}, \bar{M}(2) \cong 0.23 \text{ lat}, , \bar{M}(3) \cong 0.73.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym podsystemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$r(t) \cong 1 - \exp[-0.8568t^2].$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$$\tau = r^{-1}(\delta) = [-(1/0.8568)\log(1-\delta)]^{1/2} \cong 0.24 \text{ roku}.$$

Podsystem S_4 składa się z jednego przenośnika taśmowego, taśmy gumowej, bębna napędzającego taśmę, bębna zwrotnego, 12 rolek nieckowych oraz 3 rolek podtrzymujących taśmę. Podsystem ten jest zatem zbudowany z $n = 18$ elementów. W przenośniku znajdują się:
1 taśma, mająca funkcje niezawodności

$$R^{(1)}(t,1) = \exp[-0.012t^2], R^{(1)}(t,2) = \exp[-0.022t^2],$$

$$R^{(1)}(t,3) = \exp[-0.049t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

2 bębny, mające funkcje niezawodności

$$R^{(2)}(t,1) = \exp[-0.0019t^2], R^{(2)}(t,2) = \exp[-0.0024t^2],$$

$$R^{(2)}(t,3) = \exp[-0.0029t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

12 rolek nieckowych, mających funkcje niezawodności

$$R^{(3)}(t,1) = \exp[-0.028t^2], R^{(3)}(t,2) = \exp[-0.03t^2],$$

$$R^{(3)}(t,3) = \exp[-0.032t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

oraz 3 rolki podtrzymujące o funkcjach niezawodności

$$R^{(4)}(t,1) = \exp[-0.0075t^2],\ R^{(4)}(t,2) = \exp[-0.01t^2],$$

$$R^{(4)}(t,3) = \exp[-0.02t^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Jest to zatem niejednorodny wielostanowy system szeregowy, w którym zgodnie z Definicją 4.15 mamy

$$n = 18,\ a = 1,\ q_1 = 1/18,\ q_2 = 2/18,\ q_3 = 12/18,\ q_4 = 3/18,$$

i zgodnie z (4.29)-(4.30), jego dokładną wielostanową funkcją niezawodności jest

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{18}(t,\cdot) = [1, \exp[-0.3743t^2], \exp[-0.4168t^2], \exp[-0.4988t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Następnie stosując Wniosek 7.1, zgodnie z (7.8')

$$\alpha(1) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta(1) = \frac{1}{18}0.012 + \frac{2}{18}0.0019 + \frac{12}{18}0.028 + \frac{3}{18}0.0075 = 0.020794444,$$

$$\alpha(2) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta(2) = \frac{1}{18}0.022 + \frac{2}{18}0.0024 + \frac{12}{18}0.03 + \frac{3}{18}0.01 = 0.023155555,$$

$$\alpha(3) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta(3) = \frac{1}{18}0.049 + \frac{2}{18}0.0029 + \frac{12}{18}0.032 + \frac{3}{18}0.02 = 0.027711111,$$

oraz zgodnie z (7.7')

$$a_n(1) = (0.020794444 \cdot 18)^{-1/2} = 1.634519443,\ b_n(1) = 0,$$

$$a_n(2) = (0.023155555 \cdot 18)^{-1/2} = 1.548945546, \; b_n(2) = 0,$$

$$a_n(3) = (0.027711111 \cdot 18)^{-1/2} = 1.415913682, \; b_n(3) = 0,$$

i wnioskujemy, że graniczną funkcją niezawodności podsystemu jest

$$\mathfrak{R}'_2(t\,,\cdot) = [1, \exp[-t^2], \exp[-t^2], \exp[-t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać (wzór jest dokładny w tym przypadku)

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{18}(t\,,\cdot) \cong \mathfrak{R}'_2((t-b_n(u))/a_n(u)\,,\cdot)$$

$$= [1, \exp[-0.3743t^2], \exp[-0.4168t^2], \exp[-0.4988t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$$M(1) \cong 1.45 \text{ lat}, M(2) \cong 1.37 \text{ lat}, M(3) \cong 1.25 \text{ lat},$$

$$\sigma(1) \cong 0.76 \text{ lat}, \sigma(2) \cong 0.72 \text{ lat}, \sigma(3) \cong 0.66 \text{ lat}.$$

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$$\overline{M}(1) \cong 0.08 \text{ lat}, \; \overline{M}(2) \cong 0.12 \text{ lat}, \; \overline{M}(3) \cong 1.25 \text{ lat}.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym podsystemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$r(t) \cong 1 - \exp[-0.4168t^2].$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny $\delta = 0.05$, wynosi

$$\tau = r^{-1}(\delta) = [-(1/0.4168)\log(1-\delta)]^{1/2} \cong 0.35 \text{ roku}.$$

Podsystem S_5 składa się z jednego przenośnika taśmowego zbudowanego z taśmy gumowej, bębna napędu, bębna zwrotnego, 162 rolek nieckowych oraz 53 rolek podtrzymujących taśmę. Podsystem ten jest zatem zbudowany

z jednego przenośnika zbudowanego z $n = 218$ elementów. W przenośniku znajdują się:
1 taśma, mająca funkcje niezawodności

$$R^{(1)}(t,1) = \exp[-0.012t^2],\ R^{(1)}(t,2) = \exp[-0.022t^2],$$

$$R^{(1)}(t,3) = \exp[-0.049t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

2 bębny, mające funkcje niezawodności

$$R^{(2)}(t,1) = \exp[-0.0019t^2],\ R^{(2)}(t,2) = \exp[-0.0024t^2],$$

$$R^{(2)}(t,3) = \exp[-0.0029t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

162 rolek nieckowych, mających funkcje niezawodności

$$R^{(3)}(t,1) = \exp[-0.0074t^2],\ R^{(3)}(t,2) = \exp[-0.012t^2],$$

$$R^{(3)}(t,3) = \exp[-0.021t^2] \text{ dla } t \geq 0$$

oraz 53 rolki nieckowe o funkcjach niezawodności

$$R^{(4)}(t,1) = \exp[-0.002t^2],\ R^{(4)}(t,2) = \exp[-0.0025t^2],$$

$$R^{(4)}(t,3) = \exp[-0.003t^2] \text{ dla } t \geq 0.$$

Jest to zatem niejednorodny wielostanowy system szeregowy, w którym zgodnie z Definicją 4.15 mamy

$$n = 218,\ a = 4,\ q_1 = 1/218,\ q_2 = 2/218,\ q_3 = 162/218,\ q_4 = 53/218,$$

i zgodnie z (4.29)-(4.30), jego dokładną wielostanową funkcją niezawodności jest

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{218}(t,\cdot) = [1, \exp[-1.3206t^2], \exp[-2.1033t^2], \exp[-3.6158t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Następnie stosując Wniosek 7.1, zgodnie z (7.8')

$$\alpha(1) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$$

$$\beta(1) = \frac{1}{218}0.012 + \frac{2}{218}0.0019 + \frac{162}{218}0.0074 + \frac{53}{218}0.002$$

$= 0.006057798,$

$\alpha(2) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$

$$\beta(2) = \frac{1}{218}0.022 + \frac{2}{218}0.0024 + \frac{162}{218}0.012 + \frac{53}{218}0.0025$$

$= 0.009648165,$

$\alpha(3) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2,$

$$\beta(3) = \frac{1}{218}0.049 + \frac{2}{218}0.0029 + \frac{162}{218}0.021 + \frac{53}{218}0.003$$

$= 0.016586238,$

oraz zgodnie z (7.7')

$$a_n(1) = (0.006057798 \cdot 218)^{-1/2} = 0.870190543, \; b_n(1) = 0,$$

$$a_n(2) = (0.009648165 \cdot 218)^{-1/2} = 0.689524008, \; b_n(2) = 0,$$

$$a_n(3) = (0.016586238 \cdot 218)^{-1/2} = 0.525893504, \; b_n(3) = 0,$$

i wnioskujemy, że graniczną funkcją niezawodności podsystemu jest

$$\overline{\mathfrak{R}}'_2(t,\cdot) = [1, \exp[-t^2], \exp[-t^2], \exp[-t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać (wzór jest dokładny w tym przypadku)

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{218}(t,\cdot) \cong \overline{\mathfrak{R}}'_2((t-b_n(u))/a_n(u),\cdot)$$

$$= [1, \exp[-1.3206t^2], \exp[-2.1033t^2], \exp[-3.6158t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$M(1) \cong 0.77$ lat, $M(2) \cong 0.61$ lat, $M(3) \cong 0.47$ lat,

$\sigma(1) \cong 0.40$ lat, $\sigma(2) \cong 0.32$ lat, $\sigma(3) \cong 0.24$ lat.

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$\bar{M}(1) \cong 0.16$ lat, $\bar{M}(2) \cong 0.14$ lat, , $\bar{M}(3) \cong 0.47$.

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym podsystemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18) jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$\boldsymbol{r}(t) \cong 1 - \exp[-2.1033t^2].$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny $\delta = 0.05$, wynosi

$$\tau = \boldsymbol{r}^{-1}(\delta) = [-(1/2.1033)\log(1-\delta)]^{1/2} \cong 0.16 \text{ roku.}$$

Podsystem S_6 jest zespołem przenośników taśmowych umieszczonych na poruszającym się po torach portalu i posiadających możliwość przemieszczania się względem siebie. Podsystem ten składa się z urządzenia obrotowego, stałego przenośnika portalu oraz części obrotowej urządzenia załadowczego zbudowanej z jednego przenośnika stałego i jednego podnośnika ruchomego tworzących strukturę szeregową w sensie niezawodności. Przenośnik stały portalu zbudowany jest z taśmy gumowej, bębna napędu, bębna zwrotnego, 34 rolek nieckowych oraz 10 rolek podtrzymujących taśmę. Przenośnik stały części obrotowej urządzenia załadowczego zbudowany jest z taśmy gumowej, bębna napędu, bębna zwrotnego, 15 rolek nieckowych oraz 5 rolek podtrzymujących taśmę. Przenośnik ruchomy części obrotowej urządzenia załadowczego zbudowany jest z taśmy gumowej, bębna napędu, bębna zwrotnego, 15 rolek nieckowych oraz 5 rolek podtrzymujących taśmę. Podsystem ten jest zatem zbudowany z $n = 93$ elementów 4 typów.
W podsystemie znajdują się:
3 taśmy, mające funkcje niezawodności

$$R^{(1)}(t,1) = \exp[-0.012t^2],\ R^{(1)}(t,2) = \exp[-0.022t^2],$$

$$R^{(1)}(t,3) = \exp[-0.049t^2] \text{ dla } t \geq 0,$$

6 bębnów, mających funkcje niezawodności

$R^{(2)}(t,1) = \exp[-0.0019t^2]$, $R^{(2)}(t,2) = \exp[-0.0024t^2]$,

$R^{(2)}(t,3) = \exp[-0.0029t^2]$ dla $t \geq 0$,

64 rolki nieckowe, mające funkcje niezawodności

$R^{(3)}(t,1) = \exp[-0.0046t^2]$, $R^{(3)}(t,2) = \exp[-0.0075t^2]$,

$R^{(3)}(t,3) = \exp[-0.012t^2]$ dla $t \geq 0$

oraz 20 rolek podtrzymujących, mających funkcje niezawodności

$R^{(4)}(t,1) = \exp[-0.0012t^2]$, $R^{(4)}(t,2) = \exp[-0.0018t^2]$,

$R^{(4)}(t,3) = \exp[-0.0024t^2]$ dla $t \geq 0$.

Jest to zatem niejednorodny wielostanowy system szeregowy, w którym zgodnie z Definicją 4.15 mamy

$n = 93$, $a = 4$, $q_1 = 3/93$, $q_2 = 6/93$, $q_3 = 64/93$ $q_4 = 20/93$,

i zgodnie z (4.29)-(4.30), jego dokładną wielostanową funkcją niezawodności jest

$\overline{R}'_{93}(t,\cdot) = [1, \exp[-0.3658t^2], \exp[-0.5964t^2], \exp[-0.9804t^2]]$ dla $t \geq 0$.

Następnie stosując Wniosek 7.1, zgodnie z (7.8')

$\alpha(1) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2$,

$$\beta(1) = \frac{3}{93}0.012 + \frac{6}{93}0.0019 + \frac{64}{93}0.0046 + \frac{20}{93}0.0012 = 0.003933333,$$

$\alpha(2) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2$,

$$\beta(2) = \frac{3}{93}0.022 + \frac{6}{93}0.0024 + \frac{64}{93}0.0075 + \frac{20}{93}0.0018 = 0.006412903,$$

$\alpha(3) = \min\{2, 2, 2, 2\} = 2$,

$$\beta(3) = \frac{3}{93}0.049 + \frac{6}{93}0.0029 + \frac{64}{93}0.012 + \frac{20}{93}0.0024 = 0.010541935,$$

oraz zgodnie z (7.7')

$$a_n(1) = (0.003933333 \cdot 93)^{-1/2} = 1.6534000893,\ b_n(1) = 0,$$

$$a_n(2) = (0.006412903 \cdot 93)^{-1/2} = 1.294884971,\ \ b_n(2) = 0,$$

$$a_n(3) = (0.010541935 \cdot 93)^{-1/2} = 1.009946454,\ \ b_n(3) = 0,$$

i wnioskujemy, że graniczną funkcją niezawodności podsystemu jest

$$\overline{\mathfrak{R}}'_2(t\,,\cdot) = [1, \exp[-t^2], \exp[-t^2], \exp[-t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Toteż, wobec (4.40), wzór przybliżony przyjmuje postać (wzór jest dokładny w tym przypadku)

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{93}(t\,,\cdot) \cong \overline{\mathfrak{R}}'_2((t-b_n(u))/a_n(u)\,,\cdot)$$

$$= [1, \exp[-0.3658t^2], \exp[-0.5964t^2], \exp[-0.9804t^2]] \text{ dla } t \geq 0.$$

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania podsystemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$$M(1) \cong 1.47 \text{ lat},\ M(2) \cong 1.15 \text{ lat},\ M(3) \cong 0.90 \text{ lat},$$

$$\sigma(1) \cong 0.77 \text{ lat},\ \sigma(2) \cong 0.60 \text{ lat},\ \sigma(3) \cong 0.47 \text{ lat}.$$

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania podsystemu w poszczególnych stanach są:

$$\overline{M}(1) \cong 0.32 \text{ lat},\ \ \overline{M}(2) \cong 0.25 \text{ lat},\ \ \overline{M}(3) \cong 0.90 \text{ lat}.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym podsystemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18), jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$\boldsymbol{r}(t) \cong 1\text{- } \exp[-0.5964t^2].$$

Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$$\tau = r^{-1}(\delta) = [-(1/0.5964)\log(1-\delta)]^{1/2} \cong 0.29 \text{ roku.}$$

Ponieważ podsystemy transportowe tworzą strukturę szeregową w sensie niezawodności, więc zgodnie z Definicją 4.15 i wzorami (4.29)-(4.30), wielostanową funkcją niezawodności całego systemu transportowego jest

$$\overline{\boldsymbol{R}}'(t,\cdot) \cong [1, \overline{\boldsymbol{R}}'(t,1), \overline{\boldsymbol{R}}'(t,2), \overline{\boldsymbol{R}}'(t,3)],$$

gdzie

$$\overline{\boldsymbol{R}}'(t,1) = 3\exp[-4.0026t^2] - 3\exp[-4.3769t^2] + \exp[-4.7512t^2],$$

$$\overline{\boldsymbol{R}}'(t,2) = 3\exp[-6.0294t^2] - 3\exp[-6.4462t^2] + \exp[-6.8630t^2],$$

$$\overline{\boldsymbol{R}}'(t,3) = 3\exp[-9.8884t^2] - 3\exp[-10.3872t^2] + \exp[-10.8860t^2].$$

Wartości oczekiwane oraz odchylenia standardowe czasów przebywania systemu w podzbiorach stanów, wobec (4.13)-(4.15), wynoszą:

$$M(1) \cong 0.45 \text{ lat}, M(2) \cong 0.37 \text{ lat}, M(3) \cong 0.29 \text{ lat},$$

$$\sigma(1) \cong 0.27 \text{ lat}, \sigma(2) \cong 0.20 \text{ lat}, \sigma(3) \cong 0.15 \text{ lat}.$$

Stąd i z (4.17) średnimi czasami przebywania systemu w poszczególnych stanach są:

$$\overline{M}(1) \cong 0.08 \text{ lat}, \overline{M}(2) \cong 0.08 \text{ lat}, \overline{M}(3) \cong 0.29 \text{ lat}.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym systemu jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18), jego funkcja ryzyka przyjmuje postać

$$r(t) \cong 1 - \overline{\boldsymbol{R}}'(t,2).$$

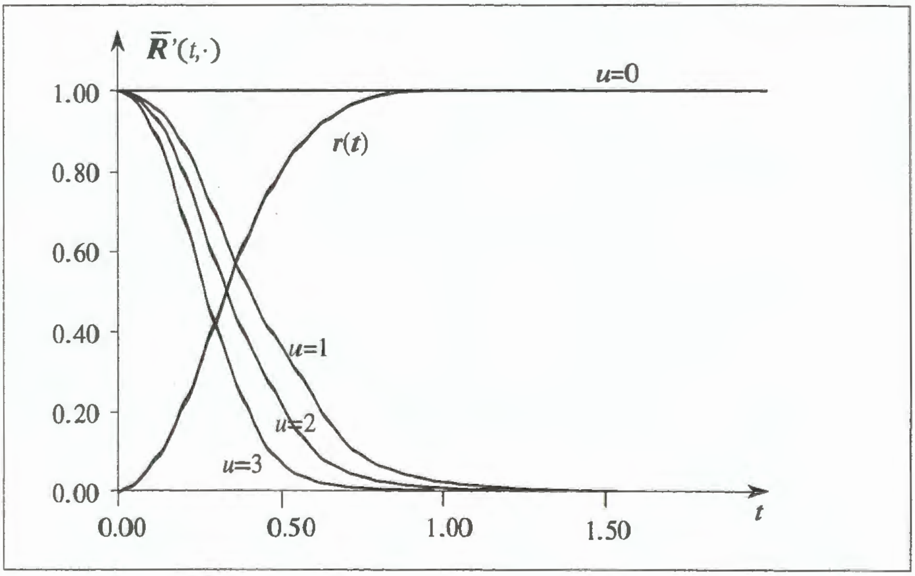
Stąd i z (4.19) chwila, w której ryzyko przekroczy poziom krytyczny δ = 0.05, wynosi

$$\tau = r^{-1}(\delta) \cong 0.10 \text{ roku.}$$

Zachowanie się dokładnej funkcji niezawodności, która jest identyczna z jej postacią przybliżoną oraz funkcji ryzyka rozważanego systemu przedstawione jest w Tablicy 7.3 oraz na Rysunku 7.3.

Tablica 7.3 Wartości składowych wielostanowej funkcji niezawodności oraz funkcji ryzyka portowego systemu transportu towarów sypkich

t	$\overline{R}'(t,1)$	$\overline{R}'(t,2)$	$\overline{R}'(t,3)$	$r(t)$
0.00	1.00000	1.00000	1.00000	0.00000
0.10	0.96437	0.94542	0.91038	0.05458
0.20	0.86490	0.79891	0.68683	0.20109
0.30	0.72138	0.60339	0.42949	0.39661
0.40	0.55949	0.40727	0.22251	0.59273
0.50	0.40342	0.24558	0.09546	0.75442
0.60	0.27031	0.13223	0.03389	0.86777
0.70	0.16820	0.06351	0.00994	0.93649
0.80	0.09712	0.02719	0.00241	0.97281
0.90	0.05198	0.01036	0.00048	0.98964
1.00	0.02575	0.00351	0.00008	0.99649
1.10	0.01180	0.00105	0.00001	0.99895

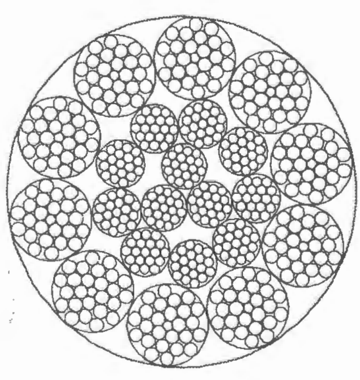


Rys. 7.3 Wykresy składowych wielostanowej funkcji niezawodności oraz funkcji ryzyka portowego systemu transportu towarów sypkich

7.5. *Oszacowanie niezawodności stoczniowego systemu transportu linowego*

Podczas dokowania oraz wydokowania statków przypływających do stoczni w celu przeprowadzenia remontu używane są okrętowe elewatory linowe. Elewator podlegający ocenie składa się ze stalowej platformy przemieszczającej się pionowo w niecce elewatora za pomocą 10 linowych wciągarek elektrycznych o udźwigu 300 ton każda wyposażonych w liny typu Casar Superplast. Podczas dokowania statku platformę opuszcza się do wody w dolne położenie, wprowadza do niecki elewatora statek i przystępuje do podnoszenia platformy ze statkiem osadzonym w specjalnych wózkowych podporach do poziomu nabrzeża. Następnie statek wyprowadza się na ląd na stanowiska remontowe. Proces wydokowania statku jest odwrotny. Platforma podczas operacji wprowadzania statku i podczas postoju w górnym położeniu spoczywa na hakach i liny są odciążone. W analizie niezawodności systemu pomijamy silniki elektryczne bowiem są one urządzeniami innego typu. Pomijamy także platformę, która charakteryzuje się dużą niezawodnością w porównaniu z linami, które pracują w ekstremalnie niszczących warunkach (sól, woda, wiatr, zanieczyszczenia, itd.). Zatem, w dalszej analizie będziemy zajmować się tylko niezawodnością systemu lin.

Każda z lin składa się z 22 splotek: 10 zewnętrznych oraz 12 wewnętrznych. Zewnętrzne splotki liny składają się z 26 stalowych drutów. Jej wewnętrzne splotki składają się z 19 stalowych drutów i tworzą rdzeń liny pokryty materiałem plastikowym. Przekrój poprzeczny liny przedstawiony jest na Rysunku 7.4.



Rys. 7.4 Przekrój poprzeczny liny Casar Superplast.

Przyjmując splotki za elementy podstawowe systemu oraz uwzględniając fakt, że jest on zdatny gdy wszystkie jego liny są zdatne, zgodnie z Definicjami 4.12-4.14 wnioskujemy, że jest to jednorodny regularny system równoległo-szeregowy zbudowany z k_n = 10 szeregowo połączonych podsystemów równoległych o l_n = 22 elementach. Wobec wymagań dotyczących bezpieczeństwa oraz aby można było uważać, że zewnętrzne oraz wewnętrzne splotki mają porównywalnie taką samą niezawodność (wytrzymałość), po uwzględnieniu norm [Norma Branżowa BN-75/2118-01, Polska Norma PN-68/M-80-200] oraz opinii ekspertów [Krajewski, Pawluk, 1999] zostały wyróżnione następujące stany niezawodnościowe splotek:

stan 3 – splotka jest nowa, bez jakichkolwiek defektów,

stan 2 – liczba zerwanych drutów w splotce jest większa niż 0 oraz mniejsza niż 25% wszystkich drutów oraz korozja jest większa niż 0% oraz mniejsza niż 25%,

stan 1 – liczba przerwanych drutów jest nie mniejsza niż 25% oraz mniejsze niż 50% wszystkich drutów w splotce lub korozja jest nie mniejsza niż 25% oraz mniejsza niż 50%,

stan 0 – w przeciwnym przypadku (splotka jest uszkodzona).

Uwzględniając wyróżnione stany niezawodnościowe elementów, zgodnie z Definicjami 4.12-4.14, wnioskujemy, że system lin jest jednorodnym regularnym cztero-stanowym, tzn. $z = 3$, systemem równoległo-szeregowym. Tak więc, zgodnie z (4.26)-(4.27), jego funkcja niezawodności określona jest wzorem

$$\overline{\boldsymbol{R}}_{10,22}(t,\cdot) = [1, \overline{\boldsymbol{R}}_{10,22}(t,1), \overline{\boldsymbol{R}}_{10,22}(t,2), \overline{\boldsymbol{R}}_{10,22}(t,3)],$$

gdzie

$$\overline{\boldsymbol{R}}_{10,22}(t,u) = [1-[F(t,u)]^{22}]^{10},\ t\in(-\infty,\infty),\ u = 1,2,3. \tag{7.15}$$

Według opinii ekspertów średnia liczba dokowań i wydokowań w ciągu roku jest równa 80, co oznacza że elewator jest aktywny 160 razy w ciągu roku. Ponadto jego niezawodność zasadniczo zależy od tonażu dokowanych statków i dlatego zostały wyróżnione następujące stany obciążenia elewatora:

stan 4 – obciążenie od 2250 do 1750 ton,

stan 3 – obciążenie od 1750 do 1250 ton,

stan 2 – obciążenie od 1250 do 750 ton,

stan 1 – obciążenie od 750 do 250 ton,

stan 0 – bez obciążenia.

Na podstawie informacji dotyczących czasów trwania oraz częstości występowania tych stanów uzyskanych od ekspertów oszacowane zostały prawdopodobieństwa ich wystąpienia [Kołowrocki, 2000f, Krajewski, Pawluk, 1999]:

$$p_0 = 0.9087,\ p_1 = 0.0046,\ p_2 = 0.0137,\ p_3 = 0.0548,\ p_4 = 0.0182. \quad (6.16)$$

Uwzględniając wyróżnione stany obciążenia elewatora otrzymujemy następujący wzór na jego funkcję niezawodności

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{10,22}(t,\cdot) = [\,1,\ \overline{\boldsymbol{R}}'_{10,22}(t,1),\ \overline{\boldsymbol{R}}'_{10,22}(t,2),\ \overline{\boldsymbol{R}}'_{10,22}(t,3)\,], \quad (7.17)$$

gdzie

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{10,22}(t,u) = p_0\ \overline{\boldsymbol{R}}^{(0)}_{10,22}(t,u) + p_1\ \overline{\boldsymbol{R}}^{(1)}_{10,22}(t,u) + p_2\ \overline{\boldsymbol{R}}^{(2)}_{10,22}(t,u)$$

$$+ p_3\ \overline{\boldsymbol{R}}^{(3)}_{10,22}(t,u) + p_4\ \overline{\boldsymbol{R}}^{(4)}_{10,22}(t,u),\ t \in (-\infty,\infty), \quad (7.18)$$

dla $u = 1.2,3,$ oraz zgodnie z (7.15)

$$\overline{\boldsymbol{R}}^{(i)}_{10,22}(t,u) = [\,1\text{-}[\,F^{(i)}(t,u)\,]^{22}\,]^{10},\ i = 0,1,2,3,4, \quad (7.19)$$

są jego wielostanowymi funkcjami niezawodności w poszczególnych stanach obciążenia, natomiast

$$R^{(i)}(t,u) = 1 - F^{(i)}(t,u),\ t \in (-\infty,\infty),\ u = 1,2,3,\ i = 0,1,2,3,4,$$

są wielostanowymi funkcjami niezawodności elementów (splotek), w różnych stanach obciążenia elewatora.

Zgodnie z danymi niezawodnościowymi zawartymi w technicznych certyfikatach lin [Certificate for steel rope, 1996] oraz z opiniami ekspertów [Krajewski, Pawluk, 1999], przyjmujemy założenie, że splotki mają weibullowskie funkcje niezawodności

$$R^{(i)}(t,u) = 1 \text{ dla } t < 0,\ R^{(i)}(t,u) = \exp[-\beta_i(u)t^{\alpha_i(u)}\,] \text{ dla } t \geq 0,$$
$$u = 1,2,3,\ i = 0,1,2,3,4,$$

z następującymi parametrami w poszczególnych stanach obciążenia podnośnika:

$$\alpha_0(u)=3,\ \ \beta_0(u)=0.003u\ ,$$

$$\alpha_1(u)=3,\ \beta_1(u)=0.006u\ ,$$

$$\alpha_2(u)=3,\ \beta_2(u)=0.008u\ ,$$

$$\alpha_3(u)=2,\ \beta_3(u)=0.090u\ ,$$

$$\alpha_4(u)=1.5,\ \ \beta_4(u)=0.250u\ ,\ u=1,2,3.$$

Stąd, na podstawie (7.18), (7.19) oraz (7.16), dokładna funkcja niezawodności systemu jest dana wzorem (7.17), gdzie

$$\begin{aligned}\overline{R}'_{10,22}(t,u) \ =\ & 0.9087[1-[1-\exp[-0.003ut^3]]^{22}]^{10}\\ &+0.0046[1-[1-\exp[-0.006ut^3]]^{22}]^{10}\\ &+0.0137[1-[1-\exp[-0.008ut^3]]^{22}]^{10}\\ &+0.0548[1-[1-\exp[-0.09ut^2]]^{22}]^{10}\\ &+0.0182[1-[1-\exp[-0.25ut^{3/2}]]^{22}]^{10},\ u=1,2,3. \qquad (7.20)\end{aligned}$$

Ponieważ liczba podsystemów równoległych $k_n=10$ oraz liczba elementów w każdym podsystemie $l_n=22$, więc uwzględniając to, że $l_n=22>>\log k_n=\log 10\cong 2.3$, sensownym jest zastosować do przybliżonej oceny niezawodności elewatora zarówno Fakt 7.3 jak i Fakt 7.4. Zastosujemy obydwa te fakty oddzielnie dla różnych stanów obciążenia aproksymując funkcję niezawodności daną wzorem (7.19) i połączymy uzyskane wyniki zgodnie ze wzorem (7.18). Następnie porównamy otrzymane rezultaty.

Zastosowanie Faktu 7.3.

Przyjmując, zgodnie z (7.11), stałe normujące

$$b_n^{(i)}(u)=[\frac{1}{\beta_i(u)}\log\frac{l_n}{\log k_n}]^{1/\alpha_i(u)}\ ,$$

$$a_n^{(i)}(u) = (b_n^{(i)}(u))^{1-\alpha_i(u)} / (\alpha_i(u)\beta_i(u)\log k_n), \tag{7.21}$$
$$u = 1,2,3,\ i = 0,1,2,3,4,$$

wnioskujemy, że

$$\bar{\mathfrak{R}}_3^{(i)}(t,\cdot) = [1,\ \bar{\mathfrak{R}}_3^{(i)}(t,1),\ \bar{\mathfrak{R}}_3^{(i)}(t,2),\ \bar{\mathfrak{R}}_3^{(i)}(t,3)],\ t \in (-\infty,\infty),$$

gdzie

$$\bar{\mathfrak{R}}_3^{(i)}(\mathrm{t,u}) = \exp[-\exp[t]] \text{ dla } t \in (-\infty,\infty),\ u = 1.2,3,\ i = 0,1,2,3,4,$$

jest graniczną wielostanową funkcją niezawodności elewatora w i-tym stanie obciążenia. Wobec (7.21) i (4.40), dla poszczególnych stanów obciążenia mamy:

stan obciążenia 0

$$b_n^{(0)}(1) = 9.0950,\ a_n^{(0)}(1) = 0.5834,$$

$$b_n^{(0)}(2) = 7.2187,\ a_n^{(0)}(2) = 0.4630,$$

$$b_n^{(0)}(3) = 6.3061,\ a_n^{(0)}(3) = 0.4045,$$

$$\bar{\boldsymbol{R}}_{10,22}^{(0)}(t,1) \cong \exp[-\exp[1.7141t - 15.5909]],$$

$$\bar{\boldsymbol{R}}_{10,22}^{(0)}(t,2) \cong \exp[-\exp[2.1598t - 15.5909]],$$

$$\bar{\boldsymbol{R}}_{10,22}^{(0)}(t,3) \cong \exp[-\exp[2.4722t - 15.5909]],$$

stan obciążenia 1

$$b_n^{(1)}(1) = 7.2187,\ a_n^{(1)}(1) = 0.4630,$$

$$b_n^{(1)}(2) = 5.7295,\ a_n^{(1)}(2) = 0.3675,$$

$$b_n^{(1)}(3) = 5.0052,\ a_n^{(1)}(3) = 0.3210,$$

$$\bar{\boldsymbol{R}}_{10,22}^{(1)}(t,1) \cong \exp[-\exp[2.1598t - 15.5909]],$$

$$\bar{R}^{(1)}_{10.22}(t,2) \cong \exp[-\exp[2.7211t - 15.5909]],$$

$$\bar{R}^{(1)}_{10.22}(t,3) \cong \exp[-\exp[3.1153t - 15.5909]],$$

stan obciążenia 2

$$b_n^{(2)}(1) = 6.5587, \; a_n^{(2)}(1) = 0.4207,$$

$$b_n^{(2)}(2) = 5.2056, \; a_n^{(2)}(2) = 0.3339,$$

$$b_n^{(2)}(3) = 4.5475, \; a_n^{(2)}(3) = 0.2917,$$

$$\bar{R}^{(2)}_{10.22}(t,1) \cong \exp[-\exp[2.3771t - 15.5909]],$$

$$\bar{R}^{(2)}_{10.22}(t,2) \cong \exp[-\exp[2.9950t - 15.5909]],$$

$$\bar{R}^{(2)}_{10.22}(t,3) \cong \exp[-\exp[3.4282t - 15.5909]],$$

stan obciążenia 3

$$b_n^{(3)}(1) = 5.0078, \; a_n^{(3)}(1) = 0.4818,$$

$$b_n^{(3)}(2) = 3.5410, \; a_n^{(3)}(2) = 0.3407,$$

$$b_n^{(3)}(3) = 2.8912, \; a_n^{(3)}(3) = 0.2782,$$

$$\bar{R}^{(3)}_{10.22}(t,1) \cong \exp[-\exp[2.0756t - 10.3939]],$$

$$\bar{R}^{(3)}_{10.22}(t,2) \cong \exp[-\exp[2.9351t - 10.3939]],$$

$$\bar{R}^{(3)}_{10.22}(t,3) \cong \exp[-\exp[3.5945t - 10.3939]],$$

stan obciążenia 4

$$b_n^{(4)}(1) = 4.3357, \; a_n^{(4)}(1) = 0.5562,$$

$$b_n^{(4)}(2) = 2.7313, \; a_n^{(4)}(2) = 0.3504,$$

$$b_n^{(4)}(3) = 2.0844, \; a_n^{(4)}(3) = 0.2674,$$

$$\overline{\boldsymbol{R}}^{(4)}_{10.22}(t,1) \cong \exp[-\exp[1.7979t - 7.7954]],$$

$$\overline{\boldsymbol{R}}^{(4)}_{10.22}(t,2) \cong \exp[-\exp[2.8539t - 7.7954]],$$

$$\overline{\boldsymbol{R}}^{(4)}_{10.22}(t,3) \cong \exp[-\exp[3.7397t - 7.7954]].$$

Łącząc uzyskane wyniki, zgodnie z (7.17) i (7.18), otrzymujemy wzór przybliżony na funkcję niezawodności elewatora

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{10.22}(t,\cdot)$$

$$= [1, \; \overline{\boldsymbol{R}}'_{10.22}(t,1), \; \overline{\boldsymbol{R}}'_{10.22}(t,2), \; \overline{\boldsymbol{R}}'_{10.22}(t,3)], \; t \in (-\infty,\infty), \tag{7.22}$$

gdzie

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{10.22}(t,1) \cong 0.9087 \exp[-\exp[1.7141t - 15.5909]]$$

$$+ 0.0046 \exp[-\exp[2.1598t - 15.5909]]$$

$$+ 0.0137 \exp[-\exp[2.3771t - 15.5909]]$$

$$+ 0.0548 \exp[-\exp[2.0756t - 10.3939]]$$

$$+ 0.0182 \exp[-\exp[1.7979t - 7.7954]],$$

$$\overline{\boldsymbol{R}}'_{10.22}(t,2) \cong 0.9087 \exp[-\exp[2.1598t - 15.5909]]$$

$$+ 0.0046 \exp[-\exp[2.7211t - 15.5909]]$$

$$+ 0.0137 \exp[-\exp[2.9950t - 15.5909]]$$

$$+ 0.0548 \exp[-\exp[2.9351t - 10.3939]]$$

$$+ 0.0182 \exp[-\exp[2.8539t - 7.7954]],$$

$$\overline{R}'_{10,22}(t,3) \cong 0.9087 \exp[-\exp[2.4722t - 15.5909]]$$

$$+0.0046 \exp[-\exp[3.1153t - 15.5909]]$$

$$+0.0137 \exp[-\exp[3.4282t - 15.5909]]$$

$$+0.0548 \exp[-\exp[3.5945t - 10.3939]]$$

$$+0.0182 \exp[-\exp[3.7397t - 7.7954]].$$

Wartości średnie czasów T(u) przebywania elewatora w podzbiorach stanów liczone w latach, w oparciu o wzór (7.22), wynoszą [Kołowrocki, 2000f]:

$$M(1) \cong 8.40, M(2) \cong 6.70, M(3) \cong 6.30.$$

Stąd, wobec (4.17), średnimi czasami przebywania elewatora w poszczególnych stanach są:

$$\overline{M}(1) \cong 1.70, \quad \overline{M}(2) \cong 0.40, \quad \overline{M}(3) \cong 6.30.$$

Jeśli krytycznym stanem jest $r = 2$, to jego funkcją ryzyka, zgodnie z (4.18), jest

$$r(t) = 1 - \overline{R}'_{10,22}(t,2)$$

$$\cong 1 - 0.9087 \exp[-\exp[2.1598t - 15.5909]]$$

$$-0.0046 \exp[-\exp[2.7211t - 15.5909]]$$

$$-0.0137 \exp[-\exp[2.9950t - 15.5909]]$$

$$-0.0548 \exp[-\exp[2.9351t - 10.3939]]$$

$$-0.0182 \exp[-\exp[2.8539t - 7.7954]]. \tag{7.23}$$

Chwila, w której ryzyko przekroczy dopuszczalny poziom $\delta = 0.05$, zgodnie z (4.19), jest równa

$$\tau = r^{-1}(\delta) \cong 3.50 \text{ roku}.$$

Zastosowanie Faktu 7.4.

Przyjmując, zgodnie z (7.14), stałe normujące

$$b_n^{(i)}(u) = [\frac{1}{\beta_i(u)}\log l_n]^{1/\alpha_i(u)}, \; a_n^{(i)}(u) = (b_n^{(i)}(u))^{1-\alpha_i(u)}/(\alpha_i(u)\beta_i(u)), \quad (7.24)$$

$u = 1,2,3, \; i = 0,1,2,3,4,$

otrzymujemy, że

$$\overline{\mathfrak{R}}_{10}^{(i)}(t,\cdot) = [1, \; \overline{\mathfrak{R}}_{10}^{(i)}(t,1), \; \overline{\mathfrak{R}}_{10}^{(i)}(t,2), \; \overline{\mathfrak{R}}_{10}^{(i)}(t,3)], \; t \in (-\infty,\infty),$$

gdzie

$$\overline{\mathfrak{R}}_{10}^{(i)}(t,u) = [1\text{-}\exp[\text{-}\exp[\text{-}t]]^k \text{ dla } t \in (-\infty,\infty), \; u = 1,2,3, \; i = 0,1,2,3,4,$$

jest graniczną wielostanową funkcją niezawodności elewatora w i-tym stanie obciążenia. Stąd, wobec (7.24) i (4.40), w szczególności mamy:

stan obciążenia 0

$$b_n^{(0)}(1) = 10.1002, \; a_n^{(0)}(1) = 1.0892,$$

$$b_n^{(0)}(2) = 8.0165, \; a_n^{(0)}(2) = 0.8645,$$

$$b_n^{(0)}(3) = 7.0031, \; a_n^{(0)}(3) = 0.7552,$$

$$\overline{\boldsymbol{R}}_{10,22}^{(0)}(t,1) \cong [1 - \exp[-\exp[-0.9181t + 9.2731]]]^{10},$$

$$\overline{\boldsymbol{R}}_{10,22}^{(0)}(t,2) \cong [1 - \exp[-\exp[-1.1568t + 9.2731]]]^{10},$$

$$\overline{\boldsymbol{R}}_{10,22}^{(0)}(t,3) \cong [1 - \exp[-\exp[-1.3242t + 9.2731]]]^{10},$$

stan obciążenia 1

$$b_n^{(1)}(1) = 8.01650, \; a_n^{(1)}(1) = 0.8645,$$

$$b_n^{(1)}(2) = 6.3627, \; a_n^{(1)}(2) = 0.6861,$$

$$b_n^{(1)}(3) = 5.5583,\ a_n^{(1)}(3) = 0.5994,$$

$$\overline{R}^{(1)}_{10,22}(t,1) \cong [1-\exp[-\exp[-1.1568t+9.2731]]]^{10},$$

$$\overline{R}^{(1)}_{10,22}(t,2) \cong [1-\exp[-\exp[-1.4574t+9.2731]]]^{10},$$

$$\overline{R}^{(1)}_{10,22}(t,3) \cong [1-\exp[-\exp[-1.6683t+9.2731]]]^{10},$$

stan obciążenia 2

$$b_n^{(2)}(1) = 7.2835,\ a_n^{(2)}(1) = 0.7854,$$

$$b_n^{(2)}(2) = 5.7809,\ a_n^{(2)}(2) = 0.6234,$$

$$b_n^{(2)}(3) = 5.0501,\ a_n^{(2)}(3) = 0.5446,$$

$$\overline{R}^{(2)}_{10,22}(t,1) \cong [1-\exp[-\exp[-1.2732t+9.2731]]]^{10},$$

$$\overline{R}^{(2)}_{10,22}(t,2) \cong [1-\exp[-\exp[-1.6041t+9.2731]]]^{10},$$

$$\overline{R}^{(2)}_{10,22}(t,3) \cong [1-\exp[-\exp[-1.8362t+9.2731]]]^{10},$$

stan obciążenia 3

$$b_n^{(3)}(1) = 5.8605,\ a_n^{(3)}(1) = 0.9480,$$

$$b_n^{(3)}(2) = 4.1440,\ a_n^{(3)}(2) = 0.6703,$$

$$b_n^{(3)}(3) = 3.3835,\ a_n^{(3)}(3) = 0.5473,$$

$$\overline{R}^{(3)}_{10,22}(t,1) \cong [1-\exp[-\exp[-1.0549t+6.1821]]]^{10},$$

$$\overline{R}^{(3)}_{10,22}(t,2) \cong [1-\exp[-\exp[-1.4918t+6.1821]]]^{10},$$

$$\overline{R}^{(3)}_{10,22}(t,3) \cong [1-\exp[-\exp[-1.8271t+6.1821]]]^{10},$$

stan obciążenia 4

$$b_n^{(4)}(1) = 5.3470,\ a_n^{(4)}(1) = 1.1532,$$

$$b_n^{(4)}(2) = 3.3684,\ a_n^{(4)}(2) = 0.7265,$$

$$b_n^{(4)}(3) = 2.5706,\ a_n^{(4)}(3) = 0.5544,$$

$$\overline{R}^{(4)}_{10,22}(t,1) \cong [1-\exp[-\exp[-0.8671t + 4.6366]]]^{10},$$

$$\overline{R}^{(4)}_{10,22}(t,2) \cong [1-\exp[-\exp[-1.3765t + 4.6366]]]^{10},$$

$$\overline{R}^{(4)}_{10,22}(t,3) \cong [1-\exp[-\exp[-1.8037t + 4.6366]]]^{10}.$$

Łącząc uzyskane wyniki, zgodnie z (7.17) i (7.18), otrzymujemy następujący wzór przybliżony na wielostanową funkcję niezawodności elewatora

$$\overline{R}'_{10,22}(t,\cdot) = [1,\ \overline{R}'_{10,22}(t,1),\ \overline{R}'_{10,22}(t,2),\ \overline{R}'_{10,22}(t,3)], \tag{7.25}$$

gdzie

$$\overline{R}'_{10,22}(t,1) \cong 0.9087\ [1-\exp[-\exp[-0.9181t + 9.2731]]]^{10}$$

$$+0.0046\ [1-\exp[-\exp[-1.1568t + 9.2731]]]^{10}$$

$$+0.0137\ [1-\exp[-\exp[-1.2732t + 9.2731]]]^{10}$$

$$+0.0548\ [1-\exp[-\exp[-1.0549t + 6.1821]]]^{10}$$

$$+0.0182\ [1-\exp[-\exp[-0.8671t + 4.6366]]]^{10},$$

$$\overline{R}'_{10,22}(t,2) \cong 0.9087\ [1-\exp[-\exp[-1.1568t + 9.2731]]]^{10}$$

$$+0.0046\ [1-\exp[-\exp[-1.4574t + 9.2731]]]^{10}$$

$$+0.0137\ [1-\exp[-\exp[-1.6041t + 9.2731]]]^{10}$$

$$+0.0548\,[1-\exp[-\exp[-1.4918t+6.1821]]]^{10}$$

$$+0.0182\,[1-\exp[-\exp[-1.3765t+4.6366]]]^{10},$$

$$\overline{R}'_{10,22}(t,3)\cong 0.9087\,[1-\exp[-\exp[-1.3242t+9.2731]]]^{10}$$

$$+0.0046\,[1-\exp[-\exp[-1.6683t+9.2731]]]^{10}$$

$$+0.0137\,[1-\exp[-\exp[-1.8362t+9.2731]]]^{10}$$

$$+0.0548\,[1-\exp[-\exp[-1.8271t+6.1821]]]^{10}$$

$$+0.0182\,[1-\exp[-\exp[-1.8037t+4.6366]]]^{10}.$$

Przybliżone wartości średnie czasów $T(u)$ przebywania elewatora w podzbiorach stanów liczone w latach, w oparciu o wzór (7.25), wynoszą [Kołowrocki, 200f]:

$$M(1)\cong 8.70,\ M(2)\cong 6.90,\ M(3)\cong 6.40.$$

Stąd, zgodnie z (4.17), średnie czasy przebywania systemu w poszczególnych stanach wynoszą:

$$\overline{M}(1)\cong 1.80,\quad \overline{M}(2)\cong 0.50,\ \overline{M}(3)\cong 6.40.$$

Jeśli krytycznym stanem niezawodnościowym elewatora jest $r = 2$, to zgodnie z (4.18), funkcja ryzyka ma postać

$$r(t)\cong 1-\overline{R}'_{10,22}(t,2)$$

$$\cong 1-0.9087\,[1-\exp[-\exp[-1.1568t+9.2731]]]^{10}$$

$$-0.0046\,[1-\exp[-\exp[-1.4574t+9.2731]]]^{10}$$

$$-0.0137\,[1-\exp[-\exp[-1.6041t+9.2731]]]^{10}$$

$$-0.0548\,[1-\exp[-\exp[-1.4918t+6.1821]]]^{10}$$

$$- 0.0182\, [1 - \exp[-\exp[-1.3765t + 4.6366]]]^{10}\,. \qquad (7.26)$$

Chwila, w której ryzyko przekroczy dopuszczalny poziom $\delta = 0.05$, zgodnie z (4.19), jest równa

$$\tau = \boldsymbol{r}^{-1}(\delta) \cong 3.60 \text{ roku.}$$

Porównanie wyników

Przy ocenie jakości oszacowania dokładnej funkcji niezawodności linowego podnośnika statków poprzez jej funkcje przybliżone, posłużymy się wartościami składowych tych funkcji, zawartymi w tablicach oraz ich wykresami. Zachowanie się dokładnej i przybliżonej funkcji niezawodności linowego podnośnika statków przedstawione jest w Tablicach 7.4-7.6 oraz na Rysunkach 7.5-7.7. Ponadto w Tablicach 7.4-7.6 przedstawione są różnice pomiędzy dokładnymi oraz przybliżonymi wartościami składowych wielostanowych funkcji niezawodności systemu, oznaczone przez $\Delta_1(u)$ w przypadku stosowania wzoru (7.22) oraz przez $\Delta_2(u)$ w przypadku stosowania wzoru (7.25). Wartości funkcji ryzyka podane są w Tablicy 7.7 a ich wykresy przedstawione są na Rysunku 7.8. Różnice pomiędzy dokładną funkcją niezawodności elewatora oraz jej przybliżeniami świadczą o tym, że oszacowania te są pesymistyczne w przypadku zastosowania wzoru (7.22) oraz optymistyczne w przypadku zastosowania wzoru (7.25). Ponadto zastąpienie dokładnej funkcji niezawodności przez jedną z jej postaci przybliżonych nie prowadzi do znaczących błędów oszacowania. Można oczywiście stosować obydwa przybliżenia jednocześnie, otrzymując granice pomiędzy którymi znajduje się dokładna funkcja niezawodności elewatora. Stosując to drugie podejście, można otrzymać oszacowania przedziałowe średnich czasów T(u) przebywania systemu w podzbiorach stanów [Kołowrocki, 200f]:

$$8.40 < M(1) < 8.70 \text{ lat}, \; 6.70 < M(2) < 6.90 \text{ lat}, \; 6.30 < M(3) < 6.40 \text{ lat},$$

średnich czasów przebywania w poszczególnych stanach niezawodnościowych:

$$1.70 < \bar{M}(1) < 1.80 \text{ lat}, \; 0.40 < \bar{M}(2) < 0.50 \text{ lat}, \; 6.30 < \bar{M}(3) < 6.40 \text{ lat},$$

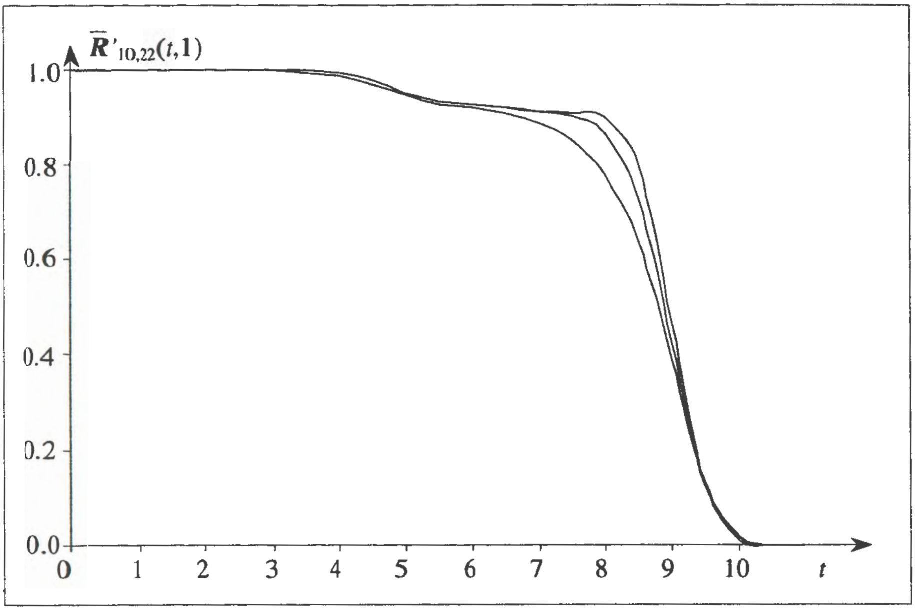
a także chwili przekroczenia dopuszczalnego poziomu ryzyka:

$$3.50 < \tau < 3.60 \text{ lat.}$$

Graniczne funkcje niezawodności weibullowskich jednorodnych regularnych systemów równoległo-szeregowych zostały tutaj zastosowane do oszacowania od dołu oraz z góry niezawodności linowego podnośnika statków. Oszacowanie to jest przybliżone, także z powodu braku dokładnych danych niezawodnościowych o elementach. W przypadku dysponowania bardziej dokładnymi danymi, przyjmując różne funkcje niezawodności elementów (splotek) systemu, jest możliwe rozszerzenie stosowanych metod na systemy niejednorodne. Jest także możliwe bardziej szczegółowe podejście do przeprowadzonej analizy niezawodności oraz zbudowanie progowo-szeregowego modelu niezawodności rozważanego systemu [Kołowrocki, 2000e]. Dobra dokładność oszacowań niezawodności elewatora weryfikuje sensowność podejścia asymptotycznego do oceny niezawodności systemów, nawet w przypadkach, gdy liczby ich elementów nie są zbyt duże.

Tablica 7.4 Zachowanie się dokładnej i przybliżonych składowych $u = 1$ wielostanowej funkcji niezawodności linowego podnośnika statków

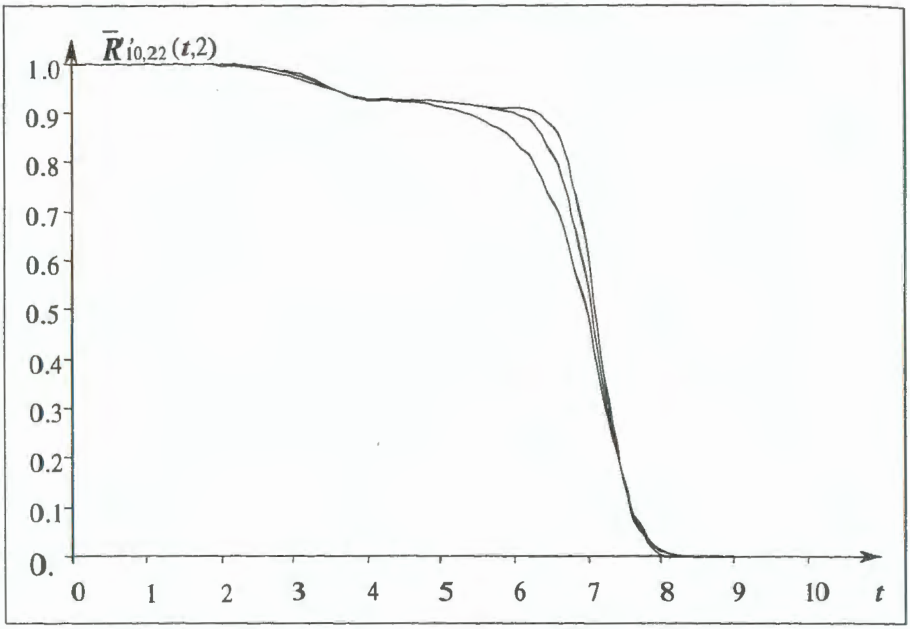
t	$\overline{\boldsymbol{R}}'_{10,22}(t,1)$				
	wzór (7.20)	wzór (7.22)	wzór (7.25)	$\Delta_1(1)$	$\Delta_2(1)$
0.00	1.00000	0.99999	1.00000	+0.00001	0.00000
1.00	1.00000	0.99994	1.00000	+0.00006	0.00000
2.00	1.00000	0.99962	1.00000	+0.00038	0.00000
3.00	0.99983	0.99755	0.99991	+0.00228	-0.00008
4.00	0.99239	0.98579	0.99344	+0.00660	-0.00105
5.00	0.95025	0.94697	0.95073	+0.00328	-0.00048
6.00	0.92547	0.91902	0.92644	+0.00645	-0.00097
7.00	0.91191	0.88727	0.91268	+0.02464	-0.00077
8.00	0.86579	0.77990	0.89943	**+0.08589**	-0.03364
9.00	0.42655	0.38888	0.46813	+0.03775	**-0.04158**
10.00	0.01781	0.00817	0.01559	+0.00964	+0.00222
11.00	0.00002	0.00000	0.00003	+0.00002	-0.00001
12.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000



Rys. 7.5 Wykres dokładnej i przybliżonych składowych $u = 1$ wielostanowej funkcji niezawodności linowego podnośnika statków

Tablica 7.5 Zachowanie się dokładnej i przybliżonych składowych $u = 2$ wielostanowej funkcji niezawodności linowego podnośnika statków

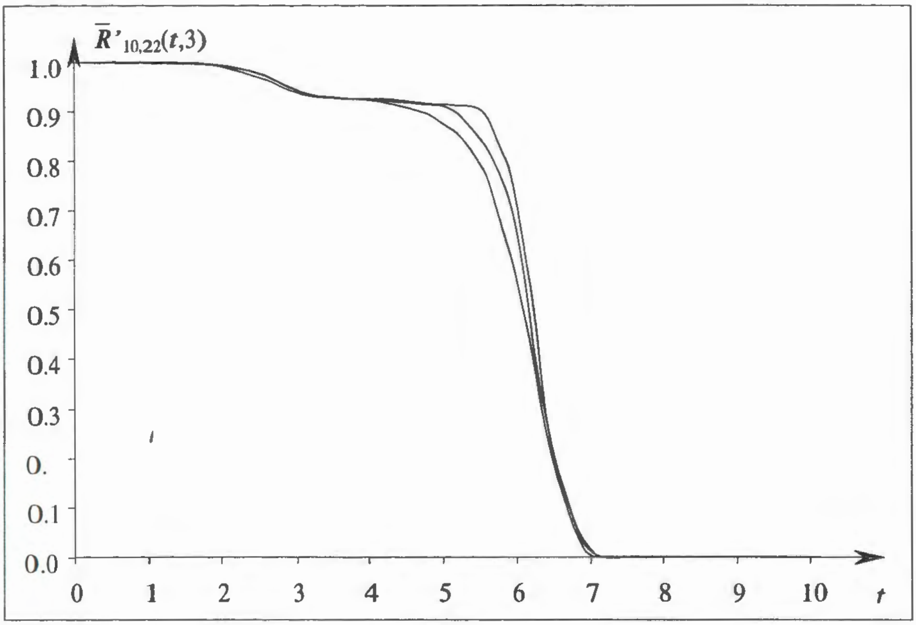
t	$\overline{R}'_{10,22}(t,2)$				
	wzór (7.20)	wzór (7.22)	wzór (7.25)	$\Delta_1(2)$	$\Delta_2(2)$
0.00	1.00000	0.99999	1.00000	+0.00001	0.00000
1.00	1.00000	0.99984	1.00000	+0.00016	0.00000
2.00	0.99961	0.99727	0.99975	+0.00234	-0.00014
3.00	0.98009	0.97367	0.98184	+0.00642	-0.00175
4.00	0.92903	0.92690	0.92880	+0.00213	+0.00023
5.00	0.92215	0.91318	0.92335	+0.00897	-0.00112
6.00	0.90136	0.84621	0.90902	+0.05515	-0.00766
7.00	0.54698	0.48709	0.60936	**+0.05971**	**-0.06238**
8.00	0.01183	0.00408	0.01031	+0.00775	+0.00152
9.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
10.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
11.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
12.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000



Rys. 7.6 Wykres dokładnej i przybliżonych składowych $u = 2$ wielostanowej funkcji niezawodności linowego podnośnika statków

Tablica 7.6 Zachowanie się dokładnej i przybliżonych składowych $u = 3$ wielostanowej funkcji niezawodności linowego podnośnika statków

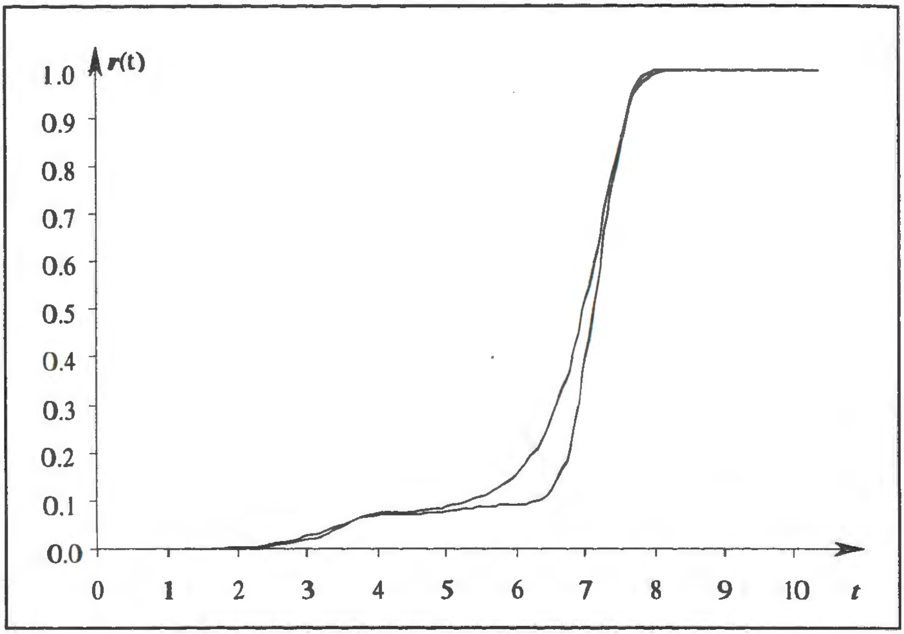
t	$\overline{R}'_{10,22}(t,3)$				
	wzór (7.20)	wzór (7.22)	wzór (7.25)	$\Delta_1(3)$	$\Delta_2(3)$
0.00	1.00000	0.99999	1.00000	+0.00001	0.00000
1.00	1.00000	0.99962	1.00000	+0.00038	0.00000
2.00	0.99152	0.98838	0.99151	+0.00314	0.00001
3.00	0.94035	0.93919	0.94011	+0.00116	+0.00024
4.00	0.92634	0.92183	0.92686	+0.00451	-0.00052
5.00	0.90922	0.87529	0.91095	+0.03393	-0.00173
6.00	0.64678	0.56865	0.72020	**+0.07813**	**-0.07342**
7.00	0.01084	0.00352	0.00946	+0.00732	+0.00138
8.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
9.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
10.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
11.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
12.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000



Rys. 7.7 Wykres dokładnej i przybliżonych składowych $u = 3$ wielostanowej funkcji niezawodności linowego podnośnika statków

Tablica 7.7 Zachowanie się funkcji ryzyka linowego podnośnika statków

t	$r(t)$	
	wzór (7.23)	wzór (7.26)
0.00	0.00001	0.00000
1.00	0.00016	0.00000
2.00	0.00273	0.00025
3.00	0.02633	0.01816
4.00	0.07310	0.07120
5.00	0.08682	0.07665
6.00	0.15379	0.09098
7.00	0.51291	0.39064
8.00	0.99592	0.98969
9.00	1.00000	1.00000
10.00	1.00000	1.00000



Rys. 7.8 Wykres przybliżonej funkcji ryzyka linowego podnośnika statków

Krzysztof Kołowrocki

ASYMPTOTYCZNE PODEJŚCIE DO ANALIZY NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW

Książka zawiera opis metod oraz wyniki badań niezawodności dużych systemów.

Rozważane są nieodnawialne systemy dwustanowe oraz systemy wielostanowe ze starzejącymi się elementami uszkadzającymi się niezależnie.

Ustalone zostały klasy możliwych granicznych funkcji niezawodności dla dwu i wielostanowych jednorodnych i niejednorodnych systemów szeregowych, równoległych, szeregowo-równoległych i równoległo-szeregowych. Problem wyznaczania granicznych funkcji niezawodności dla tych systemów został rozwiązany całościowo przy dowolnych funkcjach niezawodności ich elementów.

Przytoczone zostały przykłady zastosowań wyników do oceny niezawodności modelowych dużych systemów dwustanowych. Wyniki dotyczące systemów wielostanowych zastosowane zostały do oszacowania charakterystyk niezawodnościowych dużych systemów transportu portowego i stoczniowego.

Sformułowane zostały problemy otwarte oraz wytyczona została perspektywa dalszych badań nad metodami oceny i optymalizacji niezawodności dużych systemów.

Monografia przeznaczona jest dla czytelników zainteresowanych badaniami niezawodności oraz bezpieczeństwa eksploatacji dużych systemów technicznych na etapach ich projektowania i eksploatacji.

ISSN 0208-8029

ISBN 83-85847-58-8

W celu uzyskania bliższych informacji i zakupu dodatkowych egzemplarzy prosimy o kontakt z Instytutem Badań Systemowych PAN
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa
tel. 837-35-78 w. 241 e-mail: bibliote@ibspan.waw.pl