

Kołowrocki Krzysztof

Soszyńska-Budny Joanna

Akademia Morska w Gdyni, Gdynia, Polska

Current problems of technical systems reliability and safety Aktualne zagadnienia niezawodności i bezpieczeństwa systemów technicznych

Keywords / Słowa kluczowe

complex system, reliability, safety, operation process, evaluation, prediction, optimization
system złożony, niezawodność, bezpieczeństwo, proces eksploatacji, ocena, predykcja, optymalizacja

Abstract

Integrated Safety and Reliability Decision Support System - IS&RDSS is presented in the form of detailed and clear scheme-algorithm. There is also presented the methodology of IS&RDSS that is composed of the methods of complex technical systems operation processes modelling, their unknown parameters concerning operation, reliability, availability, safety models identification, their reliability, availability and safety evaluation and prediction, their reliability, availability and safety improvement and their operation, reliability, availability, safety and cost optimization. The newest trends in the reliability and safety of complex technical systems analysis directed to the critical infrastructures and the nanosystems are describe as well.

1. Wprowadzenie

Większość systemów technicznych jest bardzo złożona i trudno jest analizować ich niezawodność oraz bezpieczeństwo podczas eksploatacji. Duża liczba elementów oraz złożoność ich procesu eksploatacji powodują, że identyfikacja, ocena, predykcja i optymalizacja ich niezawodności, bezpieczeństwa i efektywności ich eksploatacji są skomplikowane [3]. Złożoność procesów eksploatacji systemów oraz ich wpływ na zmieniające się w czasie struktury tych systemów oraz parametry niezawodności i bezpieczeństwa ich elementów są często spotykane w rzeczywistej praktyce [8], [6].

Zwykle są to systemy szeregowo zbudowane z dużej liczby elementów podstawowych, zmieniające podczas eksploatacji swoje struktury niezawodności lub bezpieczeństwa. Niekiedy, systemy te mają rezerwowane elementy lub całe podsystemy i są wtedy strukturami równoległo-szeregowymi lub szeregowo-równoległymi w sensie niezawodności. Systemy szeregowo złożone z dużej liczby elementów spotykamy między

innymi w transporcie rurociągowym przy dystrybucji wody, gazu, ropy oraz innych substancji chemicznych. Duże systemy tego typu stosowane są także w energetyce do dystrybucji energii elektrycznej.

Innym modelowym przykładem systemu szeregowego może być system miejskiego transportu samochodowego, w którym każda z linii autobusowych obsługiwana jest przez jeden autobus i system uważany jest za zdalny, gdy na każdej z linii zapewniony jest przewóz pasażerów. Jeśli poszczególne linie dysponują kilkoma autobusami do przewozu pasażerów, system ten można uważać za równoległo-szeregowy lub progowo-szeregowy. Najprostszym przykładem systemu równoległego lub progowego jest kabel energetyczny zbudowany z określonej liczby drutów będących jego elementami podstawowymi, podczas gdy linia przesyłowa energii elektrycznej może być potraktowana jako system równoległo-szeregowy lub progowo-szeregowy.

Duże systemy tego typu eksploatowane są także w telekomunikacji, w transporcie linowym oraz w transporcie wykorzystującym przenośniki

i podnośniki taśmowe. Systemy transportu linowego takie jak dźwigi portowe i stoczniowe oraz linowe podnośniki statków są modelowymi przykładami systemów równoległo-szeregowych lub progowo-szeregowych. Systemy przenośników i podnośników taśmowych stosowane w transporcie portowym są modelowymi przykładami systemów szeregowych i szeregowo-równoległych.

Z uwagi na bezpieczeństwo oraz efektywność eksploatacji systemów technicznych podczas analizy ich niezawodności wskazanym jest odejście od dwustanowego modelu ich niezawodności. Przyjęcie założenia, że są one wielostanowymi systemami starzejącymi się z powodu pogarszających się w czasie stanów niezawodnościowych lub bezpieczeństwa ich elementów jest podstawą do bardziej dokładnej analizy procesu eksploatacji tych systemów.

Założenie to pozwala na wyróżnienie progowego stanu krytycznego niezawodności lub bezpieczeństwa systemu, którego przekroczenie jest niebezpieczne dla otoczenia lub też nie zapewnia odpowiedniego poziomu efektywności eksploatacji tego systemu. Wtedy, podstawową charakterystyką niezawodności lub bezpieczeństwa systemu staje się rozkład czasu do przekroczenia stanu progowego zwany funkcją ryzyka systemu. Rozkład ten jest ściśle wyznaczony przez wielostanową funkcję niezawodności systemu lub odpowiednio wielostanową funkcję bezpieczeństwa systemu.

Przedstawiony w drugim rozdziale niniejszego artykułu, schemat poradnika: Zintegrowany System Wspomagania Decyzji dotyczących Bezpieczeństwa i Niezawodności - ZSWDBiN [5] jest oparty na wynikach zawartych w monografii [6] dotyczącej metod modelowania, identyfikacji, oceny, predykcji i optymalizacji procesów eksploatacji, niezawodności, gotowości i bezpieczeństwa oraz kosztów eksploatacji złożonych systemów technicznych.

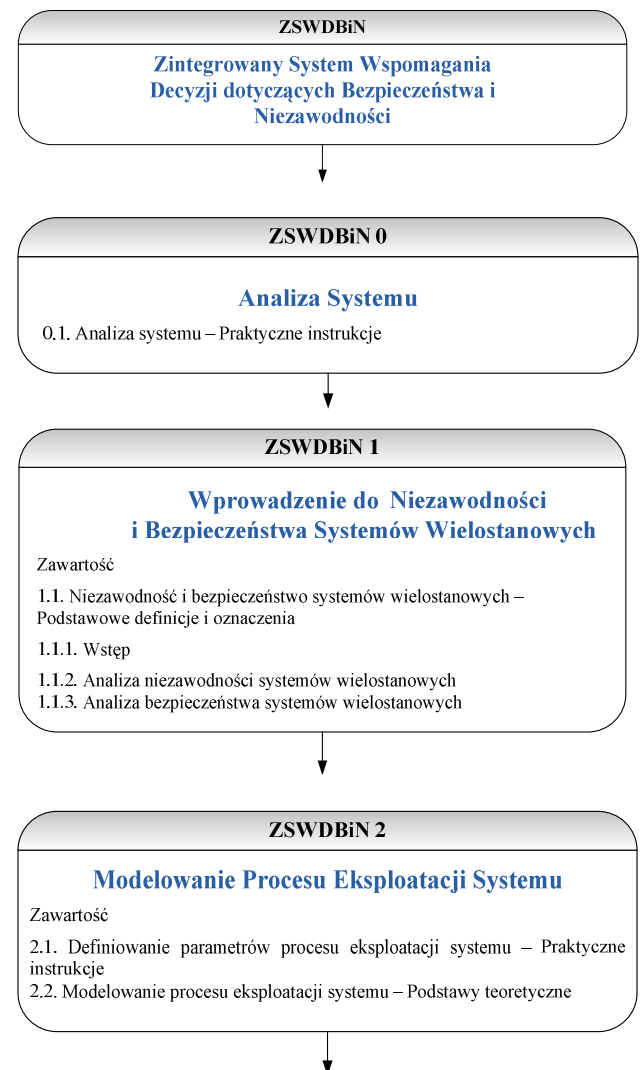
Procedura korzystania z ZSWDBiN jest ujęta w postaci schematycznie przedstawionego algorytmu. Ta procedura powinna zaczynać się od części ZSWDBiN 0 algorytmu, a następnie, jeśli to konieczne, od studiowania wstępnej części ZSWDBiN 1 lub ominąć ją, jeśli to studiowanie nie jest konieczne, a następnie powinna być kontynuowana zgodnie z częściami składowymi algorytmu ZSWDBiN 2-15.

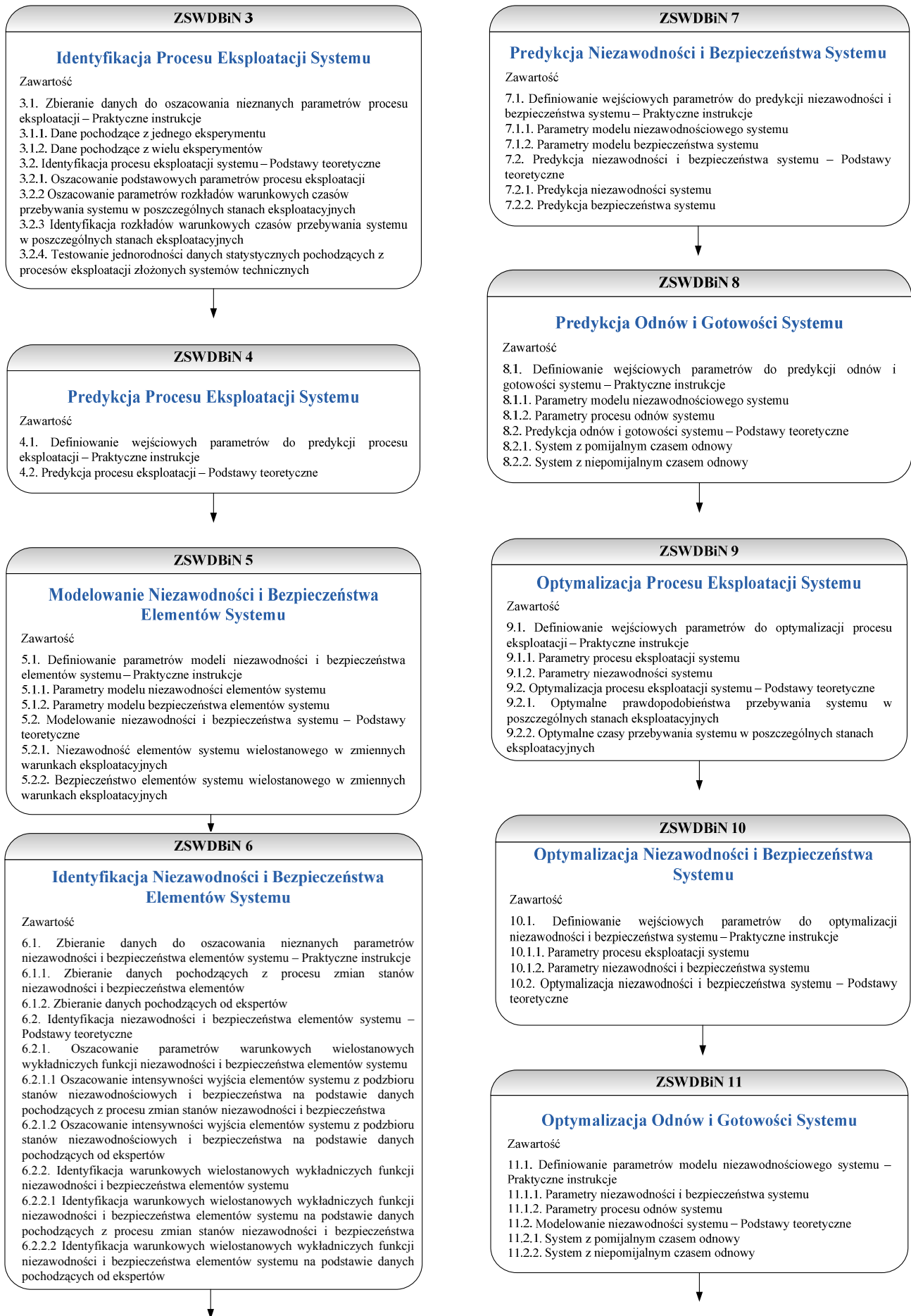
Użytkownik powinien postępować zgodnie z kolejnymi krokami schematu, korzystając z pomocy w postaci instrukcji praktycznych oraz podstaw teoretycznych znajdujących się w tych częściach poradnika ZSWDBiN [5].

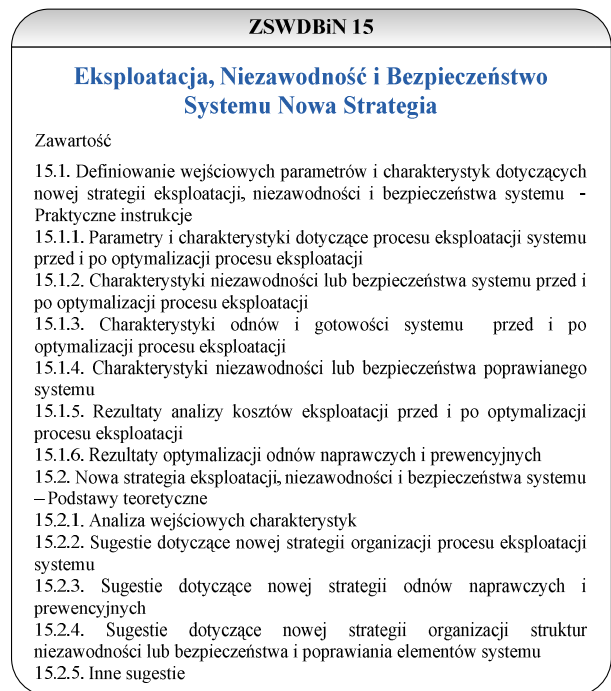
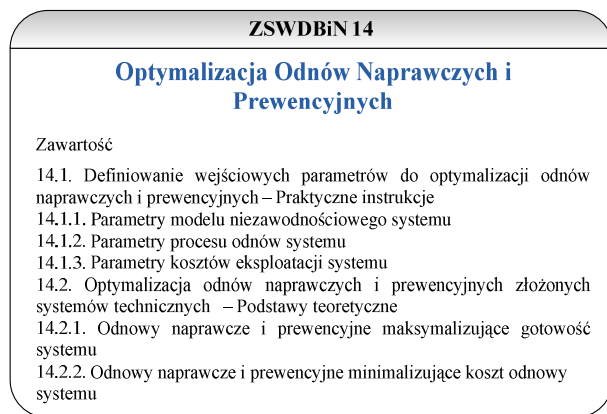
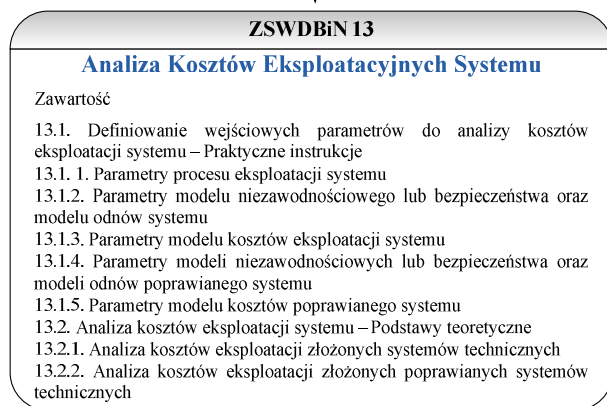
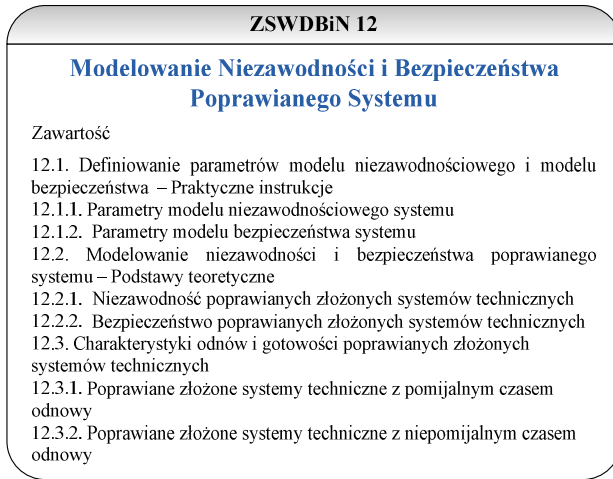
Aby uczynić korzystanie z ZSWDBiN łatwym i płynnym sugerowane jest przestudiowanie jego praktycznych zastosowań do analizy niezawodności i bezpieczeństwa przykładowego złożonego systemu oraz szerokiego praktycznych zastosowań do nabrzeżnych i morskich złożonych systemów transportowych przeprowadzonych w [6], [7].

Metodyka zawartego w ZSWDBiN podejścia do niezawodności i bezpieczeństwa złożonych systemów technicznych jest krótko przedstawiona w części trzeciej niniejszego artykułu.

2. Schemat ZSDBiN







3. Metodyka

Podczas analizy procesu eksploatacji złożonego systemu technicznego z wyróżnionymi stanami eksploatacji z_1, z_2, \dots, z_v , aby skonstruować jego ogólny model probabilistyczny, można posłużyć się procesem semi-Markowa [5], [6]. W celu zbudowania tego modelu definiowane są następujące parametry:

- wektor prawdopodobieństw $[p_b(0)]_{1 \times v}$ początkowych stanów eksploatacyjnych procesu eksploatacji systemu,
 - macierz $[p_{bl}]_{v \times v}$ prawdopodobieństw przejść pomiędzy stanami eksploatacyjnymi procesu eksploatacji systemu,
 - macierz $[H_{bl}(t)]_{v \times v}$ warunkowych dystrybuant warunkowych czasów θ_{bl} przebywania procesu eksploatacji systemu w stanach eksploatacyjnych.
- Do opisu warunkowych czasów przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych sugeruje się następujące rozkłady: rozkład równomierny, rozkład trójkątny, rozkład podwójnie trapezowy, rozkład quasi-trapezowy, rozkład wykładniczy, rozkład Weibulla, rozkład normalny oraz rozkład kominowy.

W oparciu o te definicje i założenia można dokonać predykcji następujących charakterystyk procesu eksploatacji:

- wektor $[H_b(t)]_{1 \times v}$, bezwarunkowych dystrybucji czasów θ_b przebywania procesu eksploatacji w stanach eksploatacyjnych,
- wektor $[M_b]_{1 \times v}$, wartości średnich bezwarunkowych czasów θ_b ,
- wektor $[p_b]_{1 \times v}$ granicznych prawdopodobieństw przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych,
- wektor $[\hat{M}_b]_{1 \times v}$ wartości średnich sumarycznych czasów $\hat{\theta}_b$ przebywania systemu w poszczególnych stanach eksploatacyjnych dla dowolnie dużego czasu eksploatacji θ .

Do analizy niezawodności systemu z praktycznego punktu widzenia rozsądnym jest rozszerzenie dwu stanowego modelu niezawodnościowego na wielostanowy model [1], [3], [9]. Wprowadzając wielostanowe podejście do analizy niezawodnościowej systemu ze starzejącymi się elementami zakładamy, że:

- n jest liczbą elementów systemu,
- $E_i, i = 1, 2, \dots, n$, są elementami systemu,
- wszystkie rozważane elementy oraz system mają zbiór stanów niezawodnościowych $\{0, 1, \dots, z\}$, $z \geq 1$,
- stany są uporządkowane, 0 jest stanem najgorszym natomiast stan z jest najlepszym
- $T_i(u), i = 1, 2, \dots, n$, są niezależnymi zmiennymi losowymi reprezentującymi czasy przebywania elementów E_i w podzbiore stanów $\{u, u+1, \dots, z\}$, podczas gdy elementy te w chwili $t = 0$ znajdowały się w stanie z ,
- $T(u)$ jest zmienną losową reprezentującą czas przebywania systemu w podzbiore stanów $\{u, u+1, \dots, z\}$ podczas gdy w chwili $t = 0$ system ten znajdował w stanie z ,
- stany systemu oraz elementów pogarszają się wraz z upływem czasu t bez napraw,
- $e_i(t)$ jest stanem elementu E_i w chwili $t, t \in \langle 0, \infty \rangle$, podczas gdy element w chwili $t = 0$ znajdował się w stanie z ,
- $s(t)$ jest stanem systemu w chwili $t, t \in \langle 0, \infty \rangle$, podczas gdy system w chwili $t = 0$ znajdował się w stanie z .

Powyższe założenia oznaczają, że stany systemu o pogarszających się w czasie elementach mogą się zmieniać w czasie tylko z lepszego na gorszy.

Zgodnie z tymi założeniami, następujące wielostanowe charakterystyki niezawodnościowe systemu mogą zostać wprowadzone i wyznaczone:

- wielostanowa funkcja niezawodności elementu systemu

$$R_i(t, \cdot) = [R_i(t, 0), R_i(t, 1), \dots, R_i(t, z)], t \in \langle 0, \infty \rangle,$$

- gdzie: $R_i(t, u), u = 0, 1, \dots, z, i = 1, 2, \dots, n$, jest prawdopodobieństwem tego, że element E_i jest w podzbiore stanów niezawodnościowych $\{u, u+1, \dots, z\}$ w chwili $t, t \in \langle 0, \infty \rangle$, podczas gdy w chwili $t = 0$, znajdował się w stanie z ,
- wielostanowa funkcja niezawodności systemu

$$\mathbf{R}(t, \cdot) = [\mathbf{R}(t, 0), \mathbf{R}(t, 1), \dots, \mathbf{R}(t, z)], t \in \langle 0, \infty \rangle,$$

- gdzie: $\mathbf{R}(t, u), u = 0, 1, \dots, z$, jest prawdopodobieństwem tego, że system jest w podzbiore stanów niezawodnościowych $\{u, u+1, \dots, z\}$ w chwili $t, t \in \langle 0, \infty \rangle$, podczas gdy w chwili $t = 0$, znajdował się w stanie z ,
- funkcja ryzyka systemu $r(t)$, która jest prawdopodobieństwem tego, że system w chwili t znajduje się w podzbiore stanów gorszych niż stan krytyczny $r, r \in \{1, \dots, z\}$, podczas gdy w chwili $t = 0$ znajdował się w stanie z .

W celu skonstruowania ogólnego modelu niezawodnościowego, modelu gotowości i bezpieczeństwa złożonych nieodnawialnych oraz odnawialnych wielostanowych systemów technicznych w zmiennych warunkach eksploatacyjnych, uzasadnione jest połączenie modeli niezawodności, gotowości i bezpieczeństwa oraz modeli procesów eksploatacji uwzględniające zmienne w różnych stanach eksploatacyjnych struktury niezawodnościowe i bezpieczeństwa oraz parametry niezawodnościowe i bezpieczeństwa elementów [5], [6].

Tak więc, zakładamy, że zmiany procesu eksploatacji mają wpływ na wielostanowe funkcje niezawodności systemu oraz na jego strukturę niezawodnościową. Oznaczmy warunkową funkcję niezawodności elementu $E_i, i = 1, 2, \dots, n$, systemu, podczas gdy system znajduje się w stanie eksploatacyjnym z_b przez

$$[R_i(t, \cdot)]^{(b)} = [1, [R_i(t, 1)]^{(b)}, \dots, [R_i(t, z)]^{(b)}], t \in \langle 0, \infty \rangle, b = 1, 2, \dots, v.$$

Aby dokonać predykcji niezawodności i ryzyka złożonego systemu technicznego wyznaczamy następujące charakterystyki:

- warunkową funkcję niezawodności systemu podczas gdy system znajduje się w stanie z_b

$$[\mathbf{R}(t, \cdot)]^{(b)} = [1, [\mathbf{R}(t, 1)]^{(b)}, \dots, [\mathbf{R}(t, z)]^{(b)}], t \in \langle 0, \infty \rangle, b = 1, 2, \dots, v,$$

- bezwarunkową funkcję niezawodności systemu

$$\mathbf{R}(t, \cdot) = [1, \mathbf{R}(t, 1), \dots, \mathbf{R}(t, z)], t \in < 0, \infty),$$

gdzie:

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

- wartości średnie bezwarunkowego czasu przebywania systemu w podzbiorze stanów niezawodnościowych $\{u, u + 1, \dots, z\}$

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

gdzie: $\mu_b(u), u = 1, 2, \dots, z$ są wartościami średnimi warunkowych czasów przebywania systemu w podzbiorze stanów niezawodnościowych $\{u, u + 1, \dots, z\}$ podczas, gdy system znajduje się w stanie eksploatacyjnym $z_b, b = 1, 2, \dots, v,$

- odchylenia standardowe $\sigma(u), b = 1, 2, \dots, v,$ bezwarunkowych czasów przebywania systemu w podzbiorze stanów niezawodnościowych $\{u, u + 1, \dots, z\},$

- wartości średnie bezwarunkowych czasów przebywania systemu w poszczególnych stanach niezawodnościowych

$$\bar{\mu}(u) = \mu(u) - \mu(u + 1), u = 1, 2, \dots, z - 1,$$

$$\bar{\mu}(z) = \mu(z),$$

- funkcję ryzyka systemu

$$r(t) = 1 - \mathbf{R}(t, r), t \in < 0, \infty),$$

- moment w którym funkcja ryzyka przekracza dozwolony poziom δ

$$\tau = r^{-1}(\delta),$$

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

Podobnie jak powyżej, można wprowadzić wielostanowe podejście do analizy bezpieczeństwa systemów.

4. Najnowsze idee

Aktualnie, najnowszymi trendami w badaniach niezawodności i bezpieczeństwa systemów są zagadnienia związane z tzw. infrastrukturami krytycznymi (critical infrastructures) oraz z nanosystemami (nanosystems). Poprzez infrastrukturę

krytyczną rozumiane są złożone systemy [6] dużej skali [3] lub sieci złożonych systemów dużej skali, które ściśle współdziałają w celu zapewnienia ciągłego strumienia produkcji lub dostarczania dóbr oraz usług. Są to złożone systemy, których istotnymi cechami są zależności wewnątrz systemowe (inside-system dependencies) oraz zależności zewnętrzne pomiędzy systemowe (outside-system dependencies), które w przypadku niesprawności mają istotny destrukcyjny wpływ na zdrowie, bezpieczeństwo (safety and security), ekonomię oraz warunki socjalne znacznych zbiorowisk ludzkich oraz obszarów terytorialnych. Nawet małodziałające uszkodzenia, wewnątrz tych systemów krytycznych mogą powodować dużej skali konsekwencje niebezpieczne dla ich szeroko rozumianego otoczenia.

Nanosystemy są to urządzenia rozmiaru około 1 bilionowej (1×10^{-9}) metra (1 nano-meter), których elementami podstawowymi są pojedyncze atomy. Charakterystycznymi cechami tych systemów są ich bardzo małe rozmiary oraz bardzo duże liczby elementów podstawowych (atomów), z których są one zbudowane. Aktualnie, technologiczny rozwój takich systemów jest imponujący i zapowiada ich szerokie możliwości aplikacyjne we wszystkich istotnych dziedzinach aktywności ludzkiej. Problematyka badawcza dotycząca badania funkcji niezawodności i bezpieczeństwa nanosystemów oraz postaci granicznych tych funkcji [3], [6], uzyskanych przy liczbie atomów zmierzającej do nieskończoności, pojawia się w sposób naturalny.

5. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano całościowe podejście do analizy, identyfikacji, oszacowania, predykcji i optymalizacji niezawodności, bezpieczeństwa oraz eksploatacji złożonych systemów technicznych. Opisany algorytm może pełnić rolę przewodnika przydatnego przy oszacowaniu niezawodności i bezpieczeństwa rzeczywistych złożonych systemów technicznych zarówno podczas ich projektowania, jak i na etapie eksploatacji. Ogólne analityczne modele niezawodności, gotowości i bezpieczeństwa w połączeniu z programowaniem liniowym [2] są bardzo użyteczne w predykcji niezawodności, gotowości i bezpieczeństwa złożonych systemów technicznych, a także w ich poprawianiu, optymalizacji [4] i analizie kosztów [10].

Zaproponowane procedury identyfikacji procesów eksploatacji oraz modeli niezawodności i bezpieczeństwa złożonych systemów technicznych mogą być z powodzeniem stosowane do

oszacowania nieznanymi miar i wskaźników niezawodności i bezpieczeństwa rzeczywistych systemów technicznych.

Wszystkie te narzędzia mogą być użyteczne przy optymalizacji niezawodności, bezpieczeństwa i analizie kosztów eksploatacji bardzo szerokiej klasy rzeczywistych złożonych systemów technicznych eksploatowanych w zmiennych warunkach eksploatacyjnych, które wpływają na zmianę ich struktur niezawodnościowych i struktur bezpieczeństwa oraz na charakterystyki niezawodności i bezpieczeństwa poszczególnych elementów systemu.

Przedstawione modele oraz wyniki mogą być podstawowymi narzędziami, przydatnymi podczas uruchamiania nowoczesnych badań niezawodności i bezpieczeństwa infrastruktury krytycznych oraz nanosystemów.

Literatura

- [1] Aven, T. (1993). On performance measures for multistate monotone systems. *Reliability Engineering and System Safety* 41, 259-266.
- [2] Klabjan, D. & Adelman, D. (2006). Existence of optimal policies for semi-Markov decision processes using duality for infinite linear programming. *Siam Journal on Control and Optimization*, Vol. 44, No. 6, 2104-2122.
- [3] Kołowrocki, K. (2004). *Reliability of Large Systems*. Amsterdam - Boston - Heidelberg - London - New York - Oxford - Paris - San Diego - San Francisco - Singapore - Sydney - Tokyo, Elsevier, ISBN: 0080444296.
- [4] Kolowrocki, K. & Soszynska, J. (2009). Reliability, risk and availability based optimization of complex technical systems operation processes. Part 1. Theoretical backgrounds. *Electronic Journal Reliability & Risk Analysis: Theory & Applications*, Vol. 2, No 4, 141-152.
- [5] Kołowrocki, K. & Soszyńska, J. (2010). *Integrated Safety and Reliability Decision Support System – IS&RDSS. Tasks 10.0-10.15*, in WP10: Safety and Reliability Decision Support Systems for Various Maritime and Coastal Transport Sectors, Report, Poland-Singapore Joint Research Project, Gdynia Maritime University.
- [6] Kołowrocki, K & Soszyńska, J. (2011). *Reliability and Safety of Complex Technical Systems and Processes: Modeling – Identification – Prediction – Optimization*. Springer, (to appear). <http://www.springer.com/engineering/productio n+eng/book/978-0-85729-693-1>
- [7] Kołowrocki, K. & Soszyńska, J. (2011). Integrated Safety and Reliability Decision Support System Applications in Maritime Transport. *Proc. 2nd Symposium on Games and Decisions in Reliability and Risk – GDRR 2011*, Italy.
- [8] Soszyńska, J. (2010). Reliability and risk evaluation of a port oil pipeline transportation system in variable operation conditions. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 87, No 2-3, 81-87.
- [9] Xue, J. & Yang, K. (1995). Dynamic reliability analysis of coherent multi-state systems. *IEEE Transactions on Reliability* 4, Vol. 44, 683-688.
- [10] Zio, E. (2006). *An introduction to the basics of reliability and risk analysis*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

