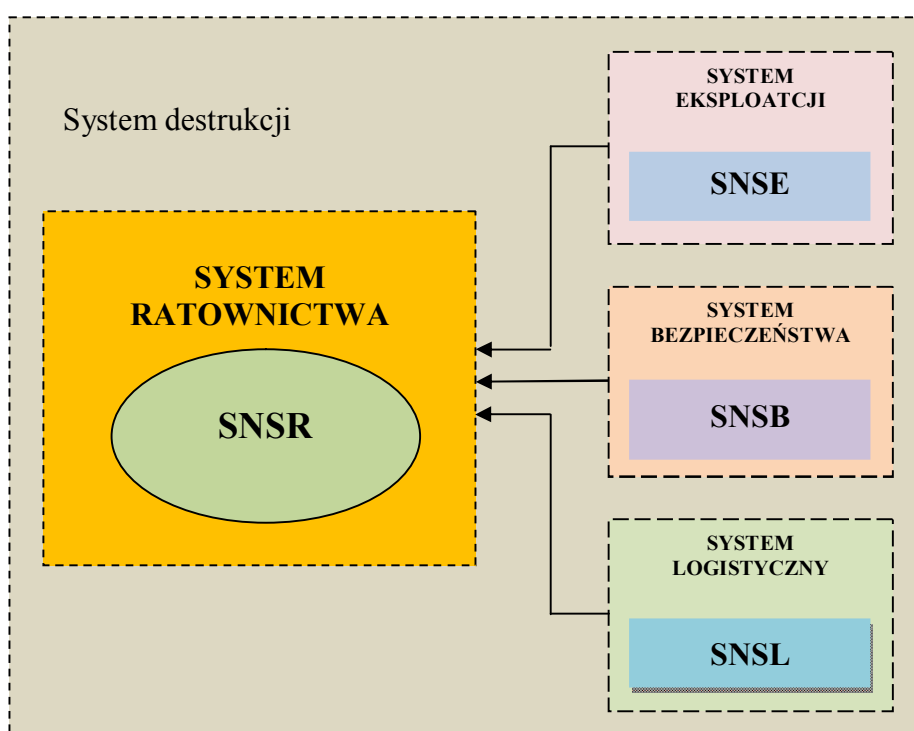


## Niezawodność strukturalna w systemach logistycznych ratownictwa

## WPROWADZENIE

Bezpieczeństwo systemów, w tym systemów ratowniczych i decyzyjnych zależy od niezawodności tych systemów w czasie eksploatacji oraz od ich odporności na penetrację czynników wpływających negatywnie na system logistyczny (brak łączności ze sztabem kryzysowym) i penetrację czynników zakłócających procesy ratownicze (warunki atmosferyczne, awarie i utrudnienia techniczne).

Działania dla zachowania bezpieczeństwa w ratownictwie są spójne z działaniami poprawnego wykonania zadania zespołu ratowniczego. Każde działanie zależy od niezawodności systemu w konfiguracjach odpowiadających procesowi ratownicemu i bezpieczeństwu systemu ratowniczego. Skuteczność procesu ratowniczego i zachowanie bezpieczeństwa systemu ratowniczego jest więc funkcją niezawodności procesu ratowniczego i bezpieczeństwa systemu. Funkcja niezawodności wynika ze struktury niezawodnościowej. Można więc zauważyć że system ratownictwa, systemy logistyczne operacji ratowniczych, system bezpieczeństwa oraz systemy destrukcji oddziałują na rzeczywisty system eksploatacji przez odpowiadające im struktury niezawodnościowe. Sposób oddziaływania systemów przedstawiono na rysunku 1.



**Rys. 1.** Struktury niezawodnościowe oddziałujące na system ratowniczy

- SNSR – struktura niezawodnościowa systemu ratownictwa
- SNSE – struktura niezawodnościowa systemu eksploatacji
- SNSB – struktura niezawodnościowa systemu bezpieczeństwa
- SNSL – struktura niezawodnościowa systemu logistycznego

Wynika z tego, że nadrzędną rolę w procesie ratowniczym oraz w systemie bezpieczeństwa zajmują zagadnienia dotyczące struktur niezawodnościowych tych systemów a następnie

<sup>1</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Szynowych,  
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków 12 374 33 22, [mlynarski@m8.mech.pk.edu.pl](mailto:mlynarski@m8.mech.pk.edu.pl)

niezawodności elementów tych systemów. Trzeba też wspomnieć o ogromnych możliwościach, jakie daje aplikacja teorii niezawodności do zagadnień ratownictwa i bezpieczeństwa w systemach eksploatacji. Dzięki zaawansowanym metodom komputerowym niezawodności jest możliwa symulacja i optymalizacja struktur ratowniczych i bezpieczeństwa dla potrzeb maksymalnej ich niezawodności [4,5,6]. Zastosowanie w logistyce ratownictwa komputerowych metod z analizy niezawodności umożliwi lepszą ocenę zagrożenia, znacznie szybsze osiągnięcie dużej skuteczności ratowniczej i większego bezpieczeństwa działania.

## 1. STRUKTURY NIEZAWODNOŚCIOWE WYKORZYSTYWANE DO PREZENTACJI SYSTEMÓW RATOWNICZYCH, LOGISTYCZNYCH I BEZPIECZEŃSTWA

Zagadnienie znajomości struktury niezawodnościowej jest bardzo istotne z kilku powodów. Racjonalne oddziaływanie na system eksploatacji dla zapewnienia bezpieczeństwa i optymalizacji ekonomicznej systemu – wszystko to wymaga znajomości struktury niezawodnościowej. Struktura niezawodnościowa systemów jest zmienna w czasie eksploatacji. Zachodzi więc potrzeba jej identyfikacji w czasie rzeczywistym. Jest to identyfikacja dynamiczna. Współczesne systemy składają się z bardzo dużej ilości elementów, w związku z czym występuje w rzeczywistości potencjalnie ogromna liczba struktur.

Prowadząc rozważania nad niezawodnością systemów zakłada się ich dwustanowość. Oznacza to, że system oraz jego elementy są dwustanowe w sensie niezawodności i mogą znajdować się w jednym z dwóch stanów: zdatności lub niezdatności. Takie podejście sprawia, że istnieje a następnie, że musi być określone kryterium przyporządkowujące, element lub cały system do zbioru obiektów zdatnych lub niezdatnych. Oczywiście stan elementów wpływa na stan systemu. Natomiast odwzorowanie stanów elementów na stan systemu nazywa się strukturą niezawodnościową systemu. Tak, więc struktura niezawodnościowa systemu zależy od [1,3,6]:

- a) podziału systemu na części składowe (elementy);
- b) funkcjonalnych powiązań między elementami, tzn. od struktury funkcjonalnej systemu;
- c) przyjętego kryterium uszkodzenia elementów i systemu;
- d) zadania wykonywanego przez system.

Dla potrzeb określenia struktury niezawodnościowej należy dokonać szczegółowej analizy systemu. Wymaga to szczegółowej wiedzy, co do budowy systemu, budowy i funkcjonowania jego elementów oraz zadań wykonywanych przez system i kryteriów ich oceny. Bardzo istotne jest również doświadczenie w modelowaniu i analizie niezawodności rzeczywistych systemów technicznych. Szczegółową analizę strukturalną przeprowadzili autorzy pozycji lit. [1,7].

Poddany analizie zostanie system o zbiorze  $n \geq 1$  elementów.  $B + \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ . Wprowadzane są następujące zmienne binarne na oznaczenie stanu elementów i systemu [1,3]:

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{jeśli } i \text{ ty element jest w stanie zdatnym} \\ 0 & \text{jeśli } i \text{ ty element jest w stanie niezdatnym} \end{cases}$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{jeśli system jest w stanie zdatnym} \\ 0 & \text{jeśli system jest w stanie niezdatnym} \end{cases}$$

Zmienna binarna  $X_i$  (0 lub 1) występuje jako indykator stanu elementu  $b_i$ , natomiast  $\delta$  jest indykatorem stanu systemu.

Wektor binarny  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  opisuje stan wszystkich elementów i określany jest wektorem stanu elementów (w.s.e.).

Zbiór wszystkich w.s.e. oznaczany będzie przez S:

$$S = \{0, 1\}^n = \{X: X = (X_1, \dots, X_n), X_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, n\}. \quad (1)$$

Zgodnie z założeniem stan systemu jest jednoznacznie określony stanem jego elementów. Wynika z tego, że  $\delta$  jest funkcją określoną na zbiorze S i przyjmuje wartości ze zbioru  $\{0, 1\}$ :

$$\delta: S \rightarrow \{0, 1\}.$$

W związku z tym  $\delta(X) = \delta(X_1, X_2, \dots, X_n)$  jest stanem systemu, odpowiadającym stanom elementów  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Funkcję  $\delta$  można nazwać funkcją strukturalną systemu, lub wprost, strukturą systemu. System o zbiorze elementów  $B$  i strukturze  $\delta$  stanowi parę  $\langle B, \delta \rangle$  i nazywany jest systemem binarnym lub dwustanowym.

Zgodnie z przyjętym założeniem, struktura  $\delta$  jest binarną funkcją w.s.e.  $X$ . Natomiast przy odwzorowaniu rzeczywistych systemów technicznych występują takie, które nie spełniają tego założenia.

W rzeczywistych systemach często występują takie, których struktura niezawodnościowa ulega ciągłym zmianą w czasie w sposób losowy lub zdeterminowany. Wówczas stan systemu zależy od w.s.e.  $X$ , ale również od upływającego czasu  $t$ . Właśnie takie odwzorowanie stanów systemu najlepiej charakteryzuje rzeczywiste systemy techniczne.

Więc systemem binarnym o zbiorze elementów  $B$  i funkcji strukturalnej  $\delta$  nazywamy parę  $\langle B, \delta \rangle$ , gdzie  $\delta : S \rightarrow \{0, 1\}$  jest dowolną funkcją binarną  $n$  zmiennych.

Dla danego zbioru elementów  $B$  istnieje wiele struktur  $\delta$  definiujących system  $\langle B, \delta \rangle$ , jest ich tyle, ile jest wszystkich funkcji binarnych  $n$  zmiennych. Przykładowo wszystkich funkcji binarnych  $n$  zmiennych jest  $2^n$ , natomiast liczba niezdegradowanych funkcji binarnych  $n$ -zmiennych czyli takich funkcji  $\delta$ , dla których wszystkie zmienne są istotne jest wyrażona zależnością (2).

$$a(n) = \sum \binom{n}{k} (-1)^{n-k} 2^k \quad (2)$$

Liczba struktur monotonicznych i koherentnych dla ogólnych przypadków nie jest znana.

Rzeczywiste systemy występujące w zastosowaniach technicznych w większości przypadków są kompozycją zdefiniowanych poniżej niektórych podstawowych struktur [1,7]. W rzeczywistych warunkach eksploatacji systemów technicznych takich jak np. systemy bezpieczeństwa oraz systemy ratownictwa mogą występować rodziny struktur zdeterminowane dynamicznymi warunkami wewnętrznymi i czynnikami zewnętrznymi występującymi w trakcie ich eksploatacji.

### 1.1. Struktura szeregową

Struktura systemu  $\langle B, \delta \rangle$  jest szeregową jeśli uszkodzenie dowolnego elementu powoduje uszkodzenie systemu, tzn. system jest zdalny wtedy i tylko wtedy gdy wszystkie elementy są zdalne

$$\delta(\underline{X}) = \min(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

### 1.2. Struktura równoległa

Struktura systemu  $\langle B, \delta \rangle$  jest równoległą jeśli zdalność przynajmniej jednego dowolnego elementu wystarcza dla zdalności systemu, tzn. system jest uszkodzony wtedy i tylko wtedy, gdy uszkodzone są wszystkie elementy

$$\delta(\underline{X}) = \max(X_1, X_2, \dots, X_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i) \quad (4)$$

### 1.3. Struktura progowa typu $k - z - n$ , $k = 1, 2, \dots, n$

System  $\langle B, \delta \rangle$  ma strukturę typu  $k - z - n$  jeśli system jest zdalny wtedy i tylko wtedy, gdy co najmniej  $k$  dowolnych spośród  $n$  elementów jest zdalnych.

Łatwo zauważyć, że struktury: szeregową i równoległą są szczególnym przypadkiem struktury typu  $k - z - n$ , która dla  $k = 1$  jest strukturą równoległą, natomiast dla  $k = n$  jest strukturą szeregową.

### 1.4. Struktura złożona mostkowa

System  $\langle B, \delta \rangle$  w najprostszej postaci składający się z pięciu elementów  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  ma strukturę mostkową (elementy  $b_1, b_2$  nazywane są elementami wejściowymi,  $b_3, b_4$  – wyjściowymi, natomiast  $b_5$  – elementem mostkującym lub mostkiem), jeśli system jest zdalny wtedy i tylko wtedy,

gdy zdadne są elementy  $b_1, b_3$  lub  $b_2, b_4$ , lub  $b_1, b_5, b_4$ , lub  $b_2, b_5, b_3$ :

$$\delta(\underline{X}) = \max(X_1 X_3, X_1 X_5 X_4, X_2 X_4, X_2 X_5 X_3) \quad (5)$$

W ostatnich latach, w związku z zastosowaniami do systemów sieci zaczęto badać systemy typu kolejne – k – z – n:F.

### 1.5. Struktury typu kolejne k – z – n:F, k = 2, 3, ..., n – 1

Struktura systemu  $\langle B, \delta \rangle$  o liniowo uporządkowanych elementach  $b_1 < b_2 < \dots < b_n$  ma strukturę typu liniowo kolejne k – z – n:F, jeśli system jest uszkodzony wtedy i tylko wtedy, gdy uszkodzonych jest co najmniej k kolejnych elementów  $b_i, b_{i+1}, \dots, b_{i+k-1}$ ,  $1 \leq i \leq n - k + 1$ :

$$\delta(\underline{X}) = \min_{1 \leq i \leq n-k+1} \max_{1 \leq j \leq k} x_{i+j-1} \quad (6)$$

Natomiast system  $\langle B, \delta \rangle$  o okręźnie uporządkowanych elementach  $b_1 < b_2 < b_3 < \dots < b_n$  ma strukturę typu cyrkularnie kolejne k – z – n -:F, jeśli system jest uszkodzony wtedy i tylko wtedy, gdy uszkodzonych jest co najmniej k kolejnych elementów  $b_i, b_{i+1}, \dots, b_{i+(k-1)}$ ,  $1 \leq i \leq n$  (+ reprezentuje dodawanie modulo). Ważne miejsce wśród struktur przydatnych do analizy omawianych systemów zajmują szczególnie przypadki struktury obiektów z elementami zależnymi oraz z tzn. przesuwającą się rezerwą.

Strukturę niezawodności można opisywać za pomocą funkcji strukturalnej  $\delta$  zadanej adekwatnym wzorem. Opis ten powinien być jak najbardziej ogólny i dogodny do matematycznej analizy systemu. Pozwala on uzyskać ogólne wyniki przydatne w różnych konkretnych zadaniach.

Można wyróżnić następujące sposoby opisu struktury niezawodnościowej systemu [1,3]:

1. Opis werbalny – polegający na werbalnym, tzn. przy użyciu potocznego języka, opisie struktury, bez użycia rysunków i formuł matematycznych. Sposób ten ma ograniczone zastosowania, zwłaszcza w stosunku do bardziej złożonych struktur. Może ponadto prowadzić do nieporozumień. Przykładami werbalnego opisu są przytoczone wcześniej definicje podstawowych struktur niezawodnościowych.
2. Opis graficzny – polega na graficznym przedstawieniu struktury niezawodnościowej systemu przy pomocy umownych, dobrze zdefiniowanych znaków i symboli graficznych.
3. Opis analityczny – polegający na wyrażeniu związków logicznych między stanami elementów a stanem systemu przy pomocy formuł matematycznych, np. za pomocą jawnej postaci analitycznej funkcji struktury  $\delta$ , algebry zbiorów, algebry Boole'a lub układu równań różniczkowych w przypadku procesów Markowa.
4. Opis mieszany – polega na jednoczesnym zastosowaniu kilku powyższych opisów struktury systemu.

W praktyce najczęściej stosowany jest opis mieszany, zwykle w taki sposób, że podstawą jest opis graficzny uzupełniony opisem analitycznym i/lub werbalnym. Opis analityczny jest najbardziej ścisły, lecz często jest mało czytelny i trudny do wykonania. Ponadto wykonanie opisu analitycznego wymaga najczęściej wcześniejszego sporządzenia opisu graficznego.

Obecnie coraz większego znaczenia nabiera opis graficzny. Związane jest to z rozpowszechnionym użyciem oprogramowania komputerowego wykorzystującego wprowadzanie danych przy pomocy dogodnych metod grafiki komputerowej. Konwersja opisu graficznego na opis analityczny, niezbędna do obliczeń numerycznych, wykonywana jest automatycznie przy pomocy odpowiedniego algorytmu

## 2. ANALITYCZNA POSTAĆ FUNKCJI STRUKTURALNEJ SYSTEMU TECHNICZNEGO

Funkcja strukturalna  $\delta$  jest, zgodnie z definicją, funkcją binarną n zmiennych binarnych  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Dla wyznaczenia stanu systemu przy zadanym wektorze stanu elementów  $X \in S$  należy  $\delta$  przedstawić w odpowiedniej postaci. Można to zrobić następująco [1,7]:

1. Przedstawienie  $\delta$  w postaci wyrażenia arytmetycznego zawierającego zmienne binarne  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , traktowane jako liczby naturalne (0 lub 1) oraz operacje arytmetyczne +, -, \*

Wartość  $\delta(X)$  dla zadanej realizacji  $X = x$  wektor stanu elementów wyznacza się wykonując operacje arytmetyczne zgodne z formułą arytmetyczną zadającą  $\delta$ . Przedstawienie  $\delta$  za pomocą formuły arytmetycznej czasem jest trudne. Prowadzi czasem do bardzo złożonych wyrażeń arytmetycznych.

2. Przedstawienie  $\delta$  w postaci zapisów i wyrażeń logicznych zawierających zmienne boolowskie  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , stałe 1 (prawda, sukces, zdatność) i 0 (fałsz, niepowodzenie, uszkodzenie) oraz operacje boolowskie:  $\vee$  (alternatywa, lub, OR),  $\wedge$  (koniunkcja, i, AND),  $\bar{\phantom{x}}$  (negacja, nie, NOT). Zbiór  $\{0, 1\}$  wraz z operacjami boolowskimi jest algebrą Boole'a.

$$c \wedge d = \min(c, d) = cd,$$

$$c \vee d = \max(c, d) = c + d - cd,$$

$$\bar{b} = 1 - b$$

Wyrażenia boolowskie dają zwykle bardziej zwartą postać funkcji struktury  $\delta$  niż wyrażenia arytmetyczne. Ponadto, stosując powyższe definicje, można dowolne wyrażenie boolowskie doprowadzić do dogodnego do obliczeń wyrażenia arytmetycznego. Istnieje wiele algorytmów opracowanych niektóre z nich zaprezentowano w poz. [3,4,5].

3. Przedstawienie  $\delta$  w postaci tablicy wartości, w której każdej kombinacji stanów elementów przypisany jest stan systemu (wartość funkcji  $\delta$ ). Przykładowo, jeśli  $\delta(X_1, X_2, X_3) = X_1 \vee (X_2 \wedge X_3)$  (wyrażenie boolowskie) =  $X_1 + X_1X_2 - X_1X_2X_3$  (wyrażenie arytmetyczne), to tablica wartości  $\delta$  ma postać jak w tabeli 1:

**Tab. 1.** Tablica wartości analizowanej funkcji  $\delta$  [1].

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\delta$
1	1	1	1
1	1	0	1
1	0	1	1
0	1	1	1
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	0

W przypadku, kiedy system zawiera  $n$  elementów, to tablica wartości struktury  $\delta$  zawiera  $2^n$  wierszy, stąd jest mało przydatna w praktyce.

Odmianą tablicy wartości jest lista wektorów zdatności lub lista wektorów niezdatności. Wektor stanu elementów  $X$  nazywamy wektorem zdatności (niezdatności), jeśli  $\delta(X) = 1$  ( $\delta(X) = 0$ ).

Niech  $S_+ = \{X \in S: \delta(X) = 1\}$  – zbiór wektorów zdatności struktury  $\delta$ ,  $S_- = \{X \in S: \delta(X) = 0\}$  – zbiór wektorów niezdatności struktury  $\delta$ . Jeśli  $\delta$  jest monotoniczna nietrywialna, to  $S_+$  ( $S_-$ ) zawierają wektory graniczne odpowiadające minimalnym ścieżkom cięcia (przekrojom) systemu. Stąd  $\delta$  można przedstawić w postaci listy minimalnych ścieżek lub minimalnych przekrojów.

### 3. GRAFICZNA WIZUALIZACJA STRUKTURY SYSTEMÓW QUASI RZECZYWISTYCH.

Prostym, wygodnym w zrozumiały sposób graficznym przedstawieniem struktury systemu jest blokowy schemat struktury niezawodnościowej.

Blokowy schemat struktury niezawodnościowej jest to diagram, w którym poszczególne elementy systemu przedstawione są za pomocą opisanych bloków w postaci prostych figur geometrycznych, których połączenia liniami ciągłymi odwzorowują wpływ stanu elementów, na jakość wykonania przez system zadania. Wizualizacja tej zależności odpowiada graficznej prezentacji struktury niezawodnościowej systemu [1,5,7].

Ponadto wyróżnione są dwa punkty końcowe nazywane węzłami: wejście i wyjście, między którymi odbywa się hipotetyczny przepływ sygnałów. Stosuje się klasyczne ukierunkowanie, że wejście jest po lewej stronie, a wyjście po stronie prawej. Jeśli schemat nie zawiera linii ze strzałkami



przedstawiającymi założony kierunek przepływu sygnałów, to rozróżnienie wejścia i wyjścia jest nieistotne. Punkty przecięcia się linii, które są punktami rozgałęzienia przepływu zaznaczone są w postaci węzła.

Dla pełniejszego opisu struktury, a także celem kolejnych uproszczeń, używane są dodatkowe symbole takie, jak funktry progowe albo operatory typu k-z-n, przełączniki, linie przerywane oraz strzałki.

Każdemu blokowi odpowiada dokładnie jeden element systemu, co uwidocznione jest przy pomocy opisu bloku (np. numeru, nazwy, zmiennej binarnej  $X_i$  odpowiadającej elementowi  $b_i$ ).

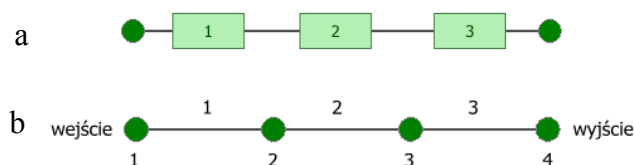
Zazwyczaj żąda się, by każdemu elementowi odpowiadał dokładnie jeden blok schematu. Jednakże w przypadku złożonych struktur żądanie takie może być niewykonalne. Wówczas bloki odpowiadające temu samemu elementowi muszą być jednakowo opisane.

Podstawowymi połączeniami stosowanymi w blokowym schemacie struktury niezawodnościowej są: połączenie szeregowe odpowiadające strukturze szeregowej, połączenie równoległe, odpowiadające strukturze równoległej oraz połączenie progowe z użyciem funktra k-z-n, odpowiadające strukturze typu k-z-n. Używane jest również połączenie kaskadowe dla zobrazowania rezerwowania nieobciążonego.

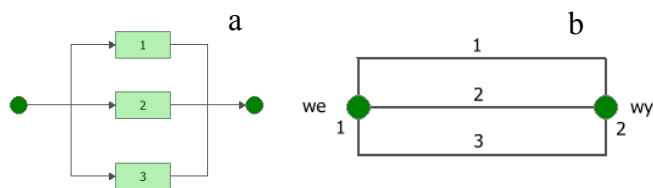
Schemat blokowy można interpretować jako sieć łączności w systemach ratownictwa zapewniająca łączność między komórkami regionalnymi: sygnał przez urządzenia przetwarzające podawany jest do punktów końcowych, bloki są komórkami regionalnymi systemu, natomiast linie – kanałami lub magistralami przekazującymi (dla uproszczenia pomijamy funktry progowe). Przy tej interpretacji zdatności lub niezdatności elementu odpowiada odebranie informacji i wykonanie zadania ratowniczego przez jedną lub więcej komórek albo nieodebranie informacji i niewykonanie zadania przez przyporządkowaną komórkę. Zdatności systemu odpowiada wykonanie zadania przynajmniej przez jedną komórkę natomiast niezdatność jest interpretowana, jako brak wykonania zadania. Schemat blokowy może być również interpretowany, jako dwuprzylączeniowa sieć przełączająca typu przekąźnikowego złożona z bloków przełączeniowych: blok odpowiadający danemu elementowi systemu jest złączony, gdy element ten jest zdalny oraz rozłączony, gdy dany element jest uszkodzony. Oczywiście, bloki odpowiadające jednemu elementowi rozłączają i załączają się jednocześnie. Wówczas uszkodzeniu systemu odpowiada brak możliwości przepływu sygnału natomiast w rzeczywistych warunkach brak łączności pomiędzy komórkami systemu ratowniczego od wejścia do wyjścia, zdatności systemu odpowiada istnienie możliwości przepływu sygnału, czyli realizacji funkcji łączności. W pozycji lit. [4 i 5] opisano struktury systemów maszynowych wytwarzania i eksploatacji maszyn, których konfiguracja może przybierać podobne jak w systemach ratowniczych formy.

Warto zaznaczyć, że struktury niezawodnościowe opisane schematem blokowym lub blokową siecią przełączającą złożoną z central przełączeniowych są monotoniczne. Dla opisu struktur niemonotonicznych należy wprowadzić tzw. bloki rozłączeniowe przepuszczające sygnał, gdy są rozłączone.

Blokowy schemat struktury niezawodnościowej stosowany jest zazwyczaj do systemów o konstrukcji modułowej, np. mogą mieć zastosowanie do dużych systemów ratownictwa rozmieszczonych na znacznym terytorium złożonych z wielu komórek regionalnych zawierających odwzorowane i standaryzowane podsystemy wewnętrzne, itp. Schematy stosowanych struktur przedstawiono na rys. 2-7 [1].

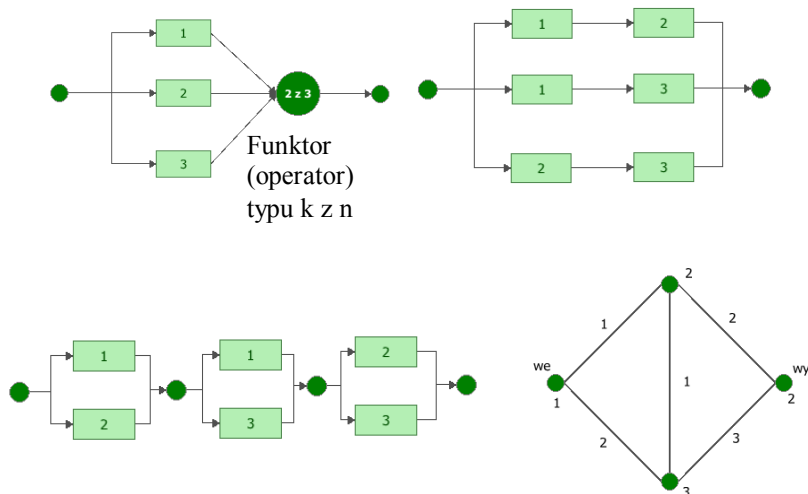


Rys. 2. Schemat blokowy struktury szeregowej trójelementowej (a) i odpowiadający jej graf (b) [1]



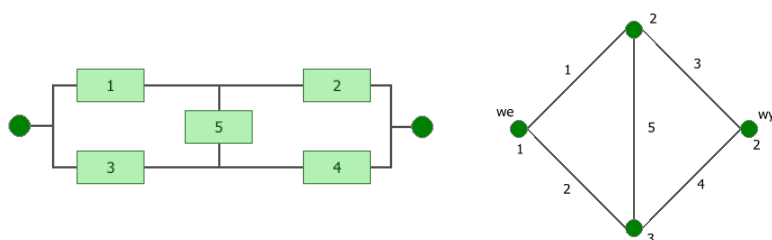
Rys. 3. Schemat blokowy struktury równoległej trójelementowej (a) i odpowiadający jej graf (b) [1]

Innym, zbliżonym do schematu blokowego, graficznym przedstawieniem struktury systemu jest graf (skierowany lub nieskierowany) z wyróżnionymi dwoma węzłami (wierzchołkami): początkowym (wejście) i końcowym (wyjście). Gałęzie grafu: skierowane (krawędzie) lub nieskierowane (łuki) odpowiadają elementom systemu, natomiast węzły grafu obrazują sposób połączeń elementów. Zazwyczaj żąda się, by każdemu elementowi systemu odpowiadała dokładnie jedna gałąź grafu. W niektórych przypadkach pewnym elementom systemu przyporządkowuje się węzły – otrzymujemy wtedy tzw. graf o zwartych węzłach.



Rys. 4. Równoważne schematy blokowe struktury typu k-z-n dla k=2, n=3 [1]:

- przy użyciu funkтора progowego,
- przy pomocy minimalnych ścieżek,
- przy pomocy minimalnych przekrojów,
- przy pomocy grafu z powtarzającymi się gałęziami 1 i 2.



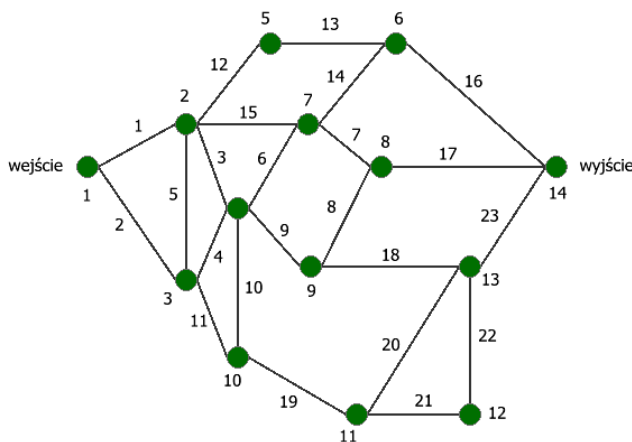
Rys. 5. Schemat blokowy struktury mostkowej (a) i odpowiadający jej graf (b) [1]

Interpretacja niezawodnościowa grafu opisującego strukturę danego systemu jest następująca. Jeśli element systemu jest uszkodzony, to odpowiadająca mu gałąź jest usuwana z grafu (lub blokowana) - mówimy, że gałąź ta jest niezdatna lub nie istnieje. Jeśli elementowi przyporządkowany jest węzeł, to w przypadku uszkodzenia jest on usuwany z grafu (lub blokowany), przy czym wraz z nim usuwane są (lub blokowane) wszystkie incydentne z nim gałęzie (zarówno wchodzące jak i wychodzące). Warunkiem zdatności systemu jest istnienie, zgodnego ze skierowaniem odcinków, przejścia od węzła początkowego do węzła końcowego przez zdatne (niezablokowane) gałęzie i węzły. Jeśli węzeł początkowy s jest zarazem węzłem końcowym t ( $s = t$ ), to przyjmuje się, że bez względu na stan

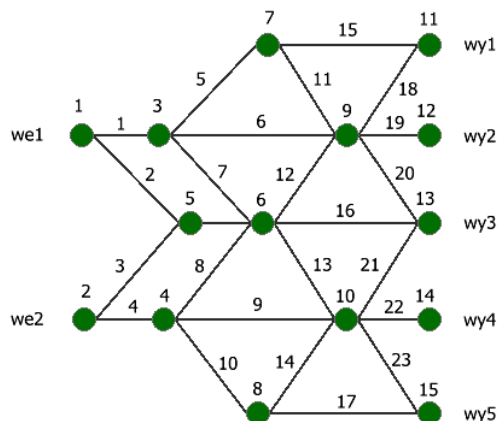
gałęzi grafu, istnieje połączenie z  $s$  do  $t$  co oznacza, że system odpowiadający takiemu grafowi jest idealnie niezawodny.

Interpretacja grafu jest zatem podobna do interpretacji schematu blokowego. Ponadto każdy graf z wyróżnionymi węzłami: początkowym i końcowym, można w prosty sposób przekształcić w równoważny mu schemat blokowy. Odwrotne przekształcenie nie zawsze jest możliwe, np. gdy schemat blokowy zawiera połączenia typu  $k$ - $z$ - $n$ , gdzie  $1 < k < n$  lub posiada nieredukowalne wielokrotne bloki przyporządkowane temu samemu elementowi (przekształcenie takie jest możliwe, jeśli dopuścimy powtarzające się gałęzie).

W przytoczonym opisie grafowym systemu zakładano, że wyróżnione są dwa węzły. Grafy takie nazywane są grafami lub sieciami dwubiegunowymi, które prezentuje rys. 6, natomiast w poz. lit. [2] opisano systemy logistyczne w magazynowaniu i transporcie, które mogą mieć rzeczywiste odwzorowanie w postaci przedstawionych na rys. 6 struktur. Istnieją systemy, dla których należy wyróżnić wiele wejść  $\delta$  i wyjść  $\tau$  natomiast w ich opisie grafowym mamy wtedy do czynienia z grafami lub sieciami wielobiegunowymi przedstawionymi na rys. 7, których interpretacja niezawodnościowa jest nieco odmienna. Mianowicie, jako warunek zdatności takiego grafu zazwyczaj przyjmuje się istnienie połączenia od każdego węzła początkowego (wejściowego)  $s \in \delta$  do dowolnego węzła końcowego (wyjściowego)  $t \in \tau$ , przy czym pewne węzły grafu, czasem nawet wszystkie, mogą być zarówno węzłami wejściowymi, jak i wyjściowymi (tzn.  $\delta \cap \tau \neq \emptyset$ ). Jeśli pewien węzeł, np.  $v$ , jest zarówno węzłem początkowym jak i końcowym, to przyjmuje się, że istnieje połączenie z  $v$  do  $v$ , bez względu na stan gałęzi grafu. Jeśli  $\delta = \tau = K$  wówczas  $K$  określa sieć węzłów lub terminali, to zdatność takiego grafu oznacza, że istnieje połączenie między każdą parą węzłów  $v, w \in K$ . W granicznym przypadku, jeśli  $\delta = \tau = K$  jest równy zbiorowi wszystkich węzłów grafu, to zdatność grafu odpowiada istnieniu połączenia między każdą parą węzłów grafu.



Rys. 6. Graf dwubiegunowego systemu sieciowego [1]



Rys.7. Graf systemu sieciowego wielobiegunowego z dwoma wejściami i pięcioma wyjściami [1]



Należy dodać, że przypadek  $\delta=\{s\}$ ,  $\tau=\{t\}$ ,  $s \neq t$ , nie jest, w ogólności, równoważny przypadkowi  $\tau=\delta=\{s,t\}$ . Dla pierwszego z nich zdatność jest określona warunkiem istnienia połączenia z s do t, dla drugiego natomiast z s do t oraz z t do s.

Grafowy opis struktury niezawodnościowej jest szczególnie przydatny przy skomplikowanych systemach typu sieciowego, np. sieci komputerowe, sieci komunikacyjne w ratownictwie i logistyce. W systemach ratowniczych struktury niezawodnościowe cały czas mogą ewoluować. Przyczyną takiego stanu może być zmiana obszaru objętego działaniem, albo np. zmieniający się stan zagrożenia. W literaturze [4,5] autor scharakteryzował metody umożliwiające automatyczną identyfikację skomplikowanych struktur systemu. Poprawna identyfikacja struktur rzeczywistych systemów technicznych jest zabiegiem kluczowym do prawidłowej analizy niezawodności i oceny zagrożenia w pracy systemu. Obecne systemy komputerowe do analizy i oceny niezawodności strukturalnej umożliwiają automatyczną szybką identyfikację struktur na podstawie opisu graficznego. Jednym z przykładów do zastosowania w pracach związanych z analizą i oceną niezawodności złożonych systemów technicznych, mogą być aplikacje pakietu programowego *BlockSim ReliaSoft Corporation* przeznaczonego do analizach niezawodności obiektów.

## PODSUMOWANIE

Bezpieczeństwo systemów ratowniczych jest jednym z elementów bezpieczeństwa ogólnego. Ponieważ ratownictwo jest aktywnym elementem systemu bezpieczeństwa, niezależnie od jego rodzaju to bezpieczeństwo systemu ratownictwa powinno podlegać takiej samej ocenie jak każdy inny system techniczny. Ocena poziomu niezbędnego bezpieczeństwa w systemach ratownictwa oraz zadanie jego utrzymania z powodzeniem może być realizowane z zastosowaniem wykorzystywanych w inżynierii niezawodności metod. Coraz częściej wykorzystywane są specjalistyczne programy komputerowe do analizy niezawodności, które stanowią skuteczne narzędzie do zapewnienia wymaganego bezpieczeństwa w eksploatacji systemów. Obserwowane coraz częściej anomalie pogodowe, następnie katastrofy transportowe, pożary oraz inne zdarzenia stanowiące zagrożenie sprawiają, że zachowanie bezpieczeństwa musi być realizowane przez specjalistyczne systemy. W związku z tak powszechnym występowaniem zagrożeń niezbędne staje się opracowywanie nowych, skuteczniejszych metod dla zapewnienia bezpieczeństwa. Jednym z praktycznych rozwiązań dla oceny i zapewnienia bezpieczeństwa tak wrażliwych systemów jak systemy ratownictwa, może być właśnie aplikacja metod do analizy niezawodności obiektów i systemów technicznych. Kształtowanie struktury systemu i zapewnienie odpowiedniej redundancji odpowiedzialnych elementów w strukturze stanowi jeden z najskuteczniejszych zabiegów zwiększenia niezawodności i jednocześnie poprawy bezpieczeństwa systemu.

### Streszczenie

*Skuteczność systemów również takich jak systemy ratownicze, decyzyjne, logistyczne oraz bezpieczeństwa zależy od ich niezawodności podczas wykonywania zadań, czyli w czasie ich eksploatacji oraz od ich odporności na penetrację różnymi czynnikami zakłócającymi i destrukcyjnymi. W niniejszym opracowaniu zaproponowano możliwość aplikacji metod stosowanych w analizie niezawodności obiektów dla zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacji. Jednym z podstawowych i najważniejszych elementów w rozważaniach nad bezpieczeństwem systemów jest ich struktura. System ratownictwa, logistyczny, bezpieczeństwa i systemy destrukcji przez struktury niezawodnościowe oddziałują na system eksploatacji. Wynika z tego, że struktury niezawodnościowe stanowią kluczową rolę w systemach ratowniczych, logistycznych i bezpieczeństwa. Aplikacja teorii niezawodności daje duże możliwości w analizie zagadnień dotyczących logistyki w ratownictwie i bezpieczeństwie systemów. Rodzaje struktur niezawodnościowych, jakie mogą reprezentować omawiane systemy stanowią istotną część opracowania. Prezentacja graficzna i zapisy analityczne charakteryzują złożoność problemów podlegających analizie. Jednocześnie prezentują narzędzie umożliwiające wartościową ocenę ryzyka w eksploatacji systemów. Zastosowanie zaawansowanych metod i programów komputerowych do analizy niezawodności umożliwia symulację i optymalizację struktur systemów ratownictwa i bezpieczeństwa dla osiągnięcia maksymalnej ich niezawodności i zwiększenia skuteczności w działaniach ratowniczych i zachowaniu bezpieczeństwa systemów.*

## Structural reliability of logistics systems rescue

### **Abstract**

*The effectiveness of the systems such as rescue systems, decision-making, logistics and security depends on the reliability of task performance, that is, during the exploitation period and of their resistance to the penetration of various confounders and destructive. In this paper proposed the possibility of application of the methods used in the analysis of reliability of objects to increase operational safety. One of the basic and most important elements in the consideration of the safety systems is its structure.*

*The systems of rescue, logistics, security and reliability destruction of the structures affect the system operation. It follows that the structure reliability is a key role in rescue systems, logistics and safety. Application of reliability theory is big opportunities in the analysis of issues related to logistics in emergency and security systems. Graphical presentation and analytical entries are characterized by the complexity of the problems under analysis. At the same time represent a valuable tool for risk assessment in operating systems. The use of advanced methods and computer programs for reliability analysis enables the simulation and optimization of structures rescue and safety systems for maximum reliability and effectiveness in rescue operations and maintaining security systems.*

### **LITERATURA**

1. Karpiński J. Korczak E., *Metody oceny niezawodności dwustanowych systemów technicznych*, Omnitech Press 1990
2. Lorenc A., Więcek P., *The routes optimization of picking up commodities in stock considering their natural characteristics*, CLC 2013: Carpathian Logistics Congress - Congress Proceedings, TANGER Ltd, Ostrava, 307-312
3. Migdalski J., *Inżynieria niezawodności – poradnik*. ATR-ZETOM, Warszawa 1992.
4. Oprzędkiewicz J., *Komputerowa metoda oceny niezawodności systemów technicznych*. LTN, Lublin 1997
5. Oprzędkiewicz J., *Wspomaganie komputerowe w niezawodności maszyn*, Warszawa, WNT 1993
6. Smalko Z., *Modelowanie eksploatacyjnych systemów transportowych*. ITE, Radom 1996,
7. Zamojski W., *Niezawodność i eksploatacja systemów*. Politechnika Wroclawska, Wrocław 1981,