

PROJEKTOWANIE TECHNOLOGII NURKOWANIA W SYSTEMIE WOJNY MINOWEJ CZ.II NIEZAWODNOŚĆ

Ryszard Kłós

Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni

STRESZCZENIE

Artykuł jest kolejnym z niezamierzonego cyklu dotyczącego projektowania technologii nurkowania [1,2,3]. Artykuł odnosi się do elementów metodyki¹ stosowanej przy pracach nad opracowaniem technologii wykorzystania aparatu nurkowego typu Mx/O₂-SCR CRABE SCUBA² w systemie wojny minowej, jako przykładu [4,5]. W poprzednim artykule skupiono się na wpływie wymagań standaryzacyjnych NATO Standardization Organization na cel głównego procesu realizowanego w systemie stanowiącym wspomnianą technologię nurkowania. W tym artykule omówiono niezawodność procesu realizowanego w systemie.

Słowa kluczowe: technologia nurkowania, niezawodność, wojna minowa.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2022 Vol. 79 Issue 2 pp. 7 – 26

ISSN: 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2022-0007

Strony: 21, rysunki: 5, tabele: 3

page www of the periodical: www.phr.net.pl

Typ artykułu: oryginalny

Termin nadesłania: 16.08.2021 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 27.11.2021 r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



WSTĘP

Analiza przyczyn powstawania sytuacji problemowych, na podstawie właściwości funkcjonalnych struktury systemu może być prowadzona z wykorzystaniem różnych metod: FMEA³, FMECA⁴, PHA⁵, FHA⁶, DFM⁷, modele ścieżki sukcesu⁸, drzewa zdarzeń⁹ FT¹⁰ jak i inne metody dyskryminacyjne itp. Przykład zastosowania metody FMEA omówiono wcześniej w tym cyklu artykułów [2]. Metody analizy dyskryminacyjnej stanowią podstawę budowy sztucznej inteligencji AI¹¹ i są stosowane w ilościowej ocenie ryzyka.

RYZIKO I ZAGROŻENIE

W języku potocznym ryzyko i zagrożenie funkcjonują jako synonimy. Turaj zagrożenie Z jest definiowane jako integralna wartość ryzyka R : $Z=f(R)=\int_t R dt$, gdzie t jest czasem ekspozycji na ryzyko R . Przy analizie sytuacji problemowej powinno się podawać w sposób jawny funkcję ryzyka $R(t)$ i zagrożenia $Z(t)$, gdyż operację całkowania ogólnego można wykonać jedynie z dokładnością do wartości przesunięcia o wartość stałą $a=const$, która to wartość a może być istotna w procesie analizy ryzyka przy rozpatrywanej sytuacji problemowej.

POZYSKIWANIE DANYCH DO ANALIZY

Ilościowe szacowanie ryzyka R wymaga znajomości prawdopodobieństwa występowania poszczególnych zdarzeń. Są one pozyskiwane na drodze: analiz danych archiwalnych podczas eksploatacji analizowanych *systemów*¹³ w oparciu o zebraną dotąd wiedzę, obliczeń teoretycznych¹⁴, informacji otrzymanywanych w wyniku różnego rodzaju badań¹⁵ i testów¹⁶.

Istnieją różne opinie, co do sposobów wykorzystania danych, zależnie od ich pochodzenia. Z praktycznego punktu widzenia powinno się wykorzystywać te dane, które dobrze odzwierciedlały przebiegające *procesy* realizowane w oparciu o strukturę analizowanego *systemu*. Dane powinny odzwierciedlać możliwie szerokie spektrum zachowania się *procesu* realizowanego w oparciu o analizowaną strukturę *systemu* co ma zagwarantować dobrą predykcję scenariuszy przebiegu zdarzeń, które mogą wystąpić w przyszłości. Przy korzystaniu z dostępnych danych należy mieć na względzie, że w ocenie bezpieczeństwa może istnieć wiele skomplikowanych interakcji pomiędzy zmiennymi, które charakteryzują zachodzące *procesy*. Metody opisowe szacowania ryzyka R dają jakościową ocenę zagrożeń¹⁷, która w wielu sytuacjach jest niewystarczająca, gdyż nie daje możliwości porównania ryzyka pomiędzy różnymi *procesami* występującymi w rozpatrywanych sytuacjach problemowych¹⁸. Wykorzystanie metod analitycznych opartych o metody statystyczne może prowadzić do wystarczająco spójnej, ilościowej oceny ryzyka R i na tej podstawie przewidywanego zagrożenia, choć czasami zastosowanie metod i danych probabilistycznych może prowadzić także do znacznych rozbieżności w ocenie ryzyka R dla przewidywanych zdarzeń. Taka sytuacja może mieć miejsce, gdy istnieją pozorne interakcje/korelacje¹⁹ pomiędzy rozpatrywanymi *procesami*.

Do rzetelnej oceny prawdopodobieństwa wystąpienia zjawiska potrzebna jest stosunkowo duża populacja, gdyż oparcie wnioskowania statystycznego na małą liczną próbę może być obciążone znacznymi błędami *I-go*²⁰ i *II-go*²¹ rodzaju, co może prowadzić do całkowicie nieuprawnionych wniosków [6].

Często dane do analizy zagrożenia podawane są w wybranym odcinku czasu odniesienia²². Tego rodzaju statystyki mogą znacznie się różnić, zależnie od wybranego czasookresu²³.

NIEZAWODNOŚĆ

Analiza ryzyka²⁴ R jest częścią sposobu zarządzania bezpieczeństwem zapewniającym uporządkowane i konsekwentne działanie *systemu* w zakresie ciągłej jego zdatności do zapewnienia bezawaryjnej realizacji *procesów* leżących w sferze zainteresowania twórców *systemu*. Analiza ryzyka R jest powiązana z *modelem niezawodnościowym* struktury analizowanego *systemu*.

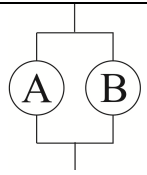
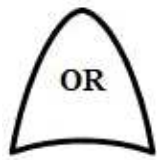
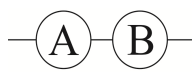
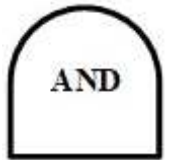



W *modelu niezawodnościowym* zastępuje się istniejące rzeczywiste²⁵ ich *modelem* odtwarzającym niezawodność tej *struktury*, który często różni się występującymi interakcjami od struktury fizycznej *systemu*. Przykładowo, jeśli od *systemu* oświetlenia o strukturze złożonej z dwóch punktów świetlnych, których wzajemna, fizyczna interakcja polega na tym, że są one połączone równoległe, wymaga się, aby świeciły oba²⁶, to struktura tego *systemu* ma szeregową strukturę niezawodnościową.

MODEL

Można przyjąć różne modele niezawodnościowe, lecz najczęściej wykorzystuje się *drzewa zdarzeń*. Metoda oparta o *drzewa zdarzeń* polega na zapisie deterministycznych relacji pomiędzy przyczyną a skutkiem z wykorzystaniem algebry *Boole'a*. W analizie ryzyka *systemów* spotyka się aplikacje tej metody wykorzystujące relacje pokazane w tab.1.

Tab. 1

Podstawowe operatory stosowane w konstrukcji drzew zdarzeń oraz łańcuchów Markowa²⁷.

Rodzaj operacji	Działanie	Struktura	Symbole drzewa zdarzeń	dla	Relacje teorii mnogości	Operatory logiczne	Symbole inżynierskie
Substytucja <i>OR</i> (lub)	musi A lub jednocześnie A i B†	działać B 			\cup	\vee	$+$
Przecięcie <i>AND</i> (i)	musi A i B	działać 			\cap	\wedge	. czy .
Przeczenie	zaprzeczenie działania				\sim	\neg	$\bar{\square}$
Wyjście/ wejście	kontynuowanie struktury drzewa w innym miejscu						
Zdarzenie	zaszło A						

Zasady algebry Boole'a.

	Relacje teorii mnogości	Relacje inżynierskie	Prawo
1a	$A \cap B = B \cap A$	$A \cdot B = B \cdot A$	przemienności
1b	$A \cup B = B \cup A$	$A + B = B + A$	
2a	$(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$	$(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$	łączności
2b	$(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$	$(A + B) + C = A + (B + C)$	
3a	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$	$A \cdot (B + C) = (A \cdot B) + (A \cdot C)$	rozdzielności (dystrybucji)
3b	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$	$A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$	
4a	$A \cap A = A$	$A \cdot A = A$	niezmienności (idempotentności)
4b	$A \cup A = A$	$A + A = A$	
5a	$A \cap (A \cup B) = A$	$A \cdot (A + B) = A$	absorpcji
5b	$A \cup (A \cap B) = A$	$A + A \cdot B = A$	
6a	$\bar{A} \cap A = \emptyset$	$\bar{A} \cdot A = \emptyset$	uzupełnienia
6b	$\bar{A} \cup A = \Omega$	$\bar{A} + A = \Omega = 1$	
7	$\sim(\sim A) = A$	$\bar{\bar{A}} = A$	podwójnego przeczenia
8a	$\sim(A \cap B) = \sim A \cup \sim B$	$\overline{A \cap B} = \bar{A} \cup \bar{B}$	De Morgana
8b	$\sim(A \cup B) = \sim A \cap \sim B$	$\overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B}$	
9a	$\emptyset \cap A = \emptyset$	$\emptyset \cdot A = \emptyset$	operacji na zbiorach pustych i całej przestrzeni
9b	$\emptyset \cup A = A$	$\emptyset + A = A$	
9c	$\Omega \cap A = A$	$\Omega \cdot A = A$	
9d	$\Omega \cup A = \Omega$	$\Omega + A = \Omega$	
9e	$\sim \emptyset = \Omega$	$\bar{\emptyset} = \Omega$	
9f	$\sim \Omega = \emptyset$	$\bar{\Omega} = \emptyset$	
10a	$A \cup (\sim A \cap B) = A \cup B$	$A + \bar{A} \cdot B = A + B$	operacji upraszczających
10b	$\sim A \cap (A \cup \sim B) = \sim A \cap \sim B = \sim(A \cup B)$	$\bar{A} \cdot A + \bar{B} = \bar{A} \cdot \bar{B} = \overline{A + B}$	

gdzie: X – oznacza wynik zdarzenia X , $X \cdot Y$ – oznacza wynik zdarzenia X i Y , $X + Y$ – oznacza wynik zdarzenia X lub Y , \bar{X} – oznacza wynik zdarzenia przeciwnego do zdarzenia X , Ω ; 1 – oznacza zdarzenie pewne, \emptyset – oznacza zdarzenie niemożliwe

Analizy wykorzystujące *drzewa zdarzeń* realizowane są w dwojaki sposób. *Drzewo zagrożeń* analizowane jest metodą dedukcji „od góry”, w celu poszukiwania przyczyn powstawania sytuacji problemowej. Ten sposób postępowania wykorzystywany jest często w technice do analizy ryzyka zawodności eksploatacyjnej *R* dla projektowanych *systemów*.

Drzewo przyczyn analizowane jest „od dołu”, przedstawiając wpływ różnych zdarzeń na zabezpieczenie przez *system* możliwości niezakłóconej realizacji *procesu*. Ten sposób postępowania może być wykorzystywany do analizy ryzyka *R* projektowanych *systemów*, choć częściej jest stosowany do analizy ryzyka *R* przy eksploatacji *systemów*.

RELACJE

W tab. 2 zebrano zasady algebry zbiorów *Boole’a*. Na rys.1 przedstawiono schematycznie prawdopodobieństwo zdarzenia warunkowego $P(A|B)$, które można zapisać w postaci równania: $P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$, stąd ogólnie dla zdarzenia $A \cap B$ przebiegającego sekwencyjnie $\text{---} \textcircled{A} \textcircled{B} \text{---}$, oznaczanego w tab.1 jako bramka *AND*, można zapisać:

$$P(A \cap B) = P(A|B) \cdot P(B) \tag{1}$$

gdzie: $P(A)$ –oznacza prawdopodobieństwo zdarzenia *A*, $P(A \cap B)$ –oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia *A* i *B*, $P(A|B)$ –oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenie *B* pod warunkiem wcześniejszego zajścia zdarzenia *A*

Dla zdarzeń niezależnych $P(A|B) \equiv P(A)$, stąd zależność (1) można przepisać do prostszej postaci – tab.3:

$$\forall_{P(A|B) \equiv P(A)} P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \tag{2}$$

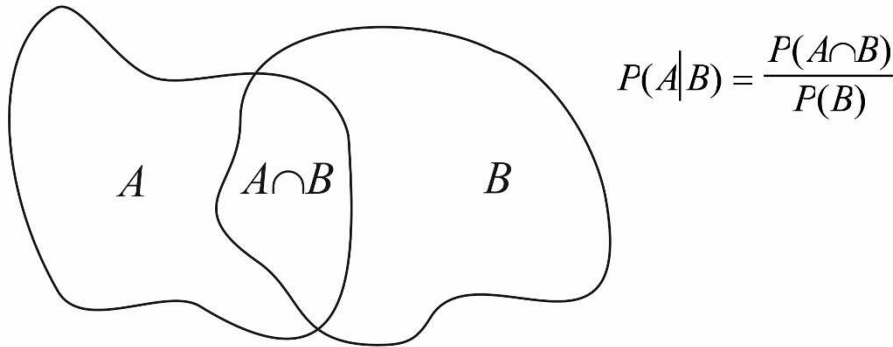


Fig. 1 Interpretacja relacji zachodzących pomiędzy zbiorami zdarzeń.

Tab. 3

Zasady obliczania prawdopodobieństw zdarzeń dla operacji AND i OR.

Operator Prawdopodobieństwo

dla zdarzeń zależnych $A \cap B \neq \emptyset$

AND $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B|A) = P(B) \cdot P(A|B)$

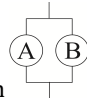
OR $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$

dla zdarzeń niezależnych $A \cap B = \emptyset$

AND $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$

OR $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$

OR $P(A \cup B) = 1 - P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B})$



Na podstawie rys.1, dla zdarzeń alternatywnych , oznaczanych w tab.1, jako bramka OR, można zapisać:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \quad (3)$$

gdzie: $P(A)$ – oznacza prawdopodobieństwo zdarzenia A , $P(A \cup B)$ – oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia A lub B , $P(A \cap B)$ – oznacza prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia A i B

Wykorzystując zależność (3), dla niezależnych zdarzeń alternatywnych, można równanie (4) przepisać do postaci – tab. 3:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B) \quad (4)$$

Korzystając z tego, że $P(\bar{A}) = 1 - P(A)$ można obliczyć iloczyn: $P(A) \cdot P(B) = [1 - P(\bar{A})] \cdot [1 - P(\bar{B})] = 1 - P(\bar{B}) - P(\bar{A}) + P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B}) = P(B) - P(\bar{A}) + P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B})$. Wstawiając to rozwiązanie do zależności (5) można otrzymać: $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(B) + P(\bar{A}) - P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B}) = P(A) + P(\bar{A}) - P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B})$. Ponieważ $P(A) + P(\bar{A}) = P(A \cup \bar{A}) = P(\Omega) = 1$, to zależność (5) można zapisać w postaci alternatywnej:

$$P(A \cup B) = 1 - P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B}) \quad (5)$$

gdzie: $P(\bar{A})$ – oznacza prawdopodobieństwo odwrotne do zdarzenia A

Zgodnie z zależnością (3), dla iloczynu trzech sekwencyjnych zdarzeń niezależnych $A \cap B \cap C$ prawdopodobieństwo $P(A \cap B \cap C)$ wyniesie: $P(A \cap B \cap C) = P(A) \cdot P(B \cap C) = P(A) \cdot P(B) \cdot P(C)$. Stąd ogólnie można zapisać, że dla i sekwencyjnych zdarzeń niezależnych podobieństwo ich zajścia wyniesie:

$$P(\cap_i A_i) = \prod_i P(A_i) \quad (6)$$

gdzie: $\cap_i A_i$ – oznacza iloczyn złożony z i zdarzeń A_i

Dla sumy trzech alternatywnych zdarzeń niezależnych $A \cup B \cup C$ ich prawdopodobieństwo $P(A \cup B \cup C)$ wyniesie: $P(A \cup B \cup C) = 1 - P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B} \cap \bar{C}) = 1 - P(\bar{A}) \cdot P(\bar{A} \cap \bar{B})$. Stąd zgodnie z (6) można zapisać: $P(A \cup B \cup C) = 1 - P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B}) \cdot P(\bar{C})$. Ogólnie dla i alternatywnych zdarzeń niezależnych, podobieństwo ich zajścia można zapisać w postaci²⁹:

$$P(\cup_i A_i) = 1 - \prod_i P(\bar{A}_i) \quad (7)$$

gdzie: $\cup_i A_i$ – oznacza sumę złożoną z i zdarzeń A_i ,

STRUKTURA DUALNA

Dla systemu złożonego z dwóch elementów, które mogą być jedynie w dwóch stanach: *zdatności* i *niezdatności*, można wykazać, że możliwe struktury³⁰ to: *równoległa* i *szeregowa* [7].

Modelem analitycznym struktury niezawodnościowej może być wyrażenie algebraiczne, które w sposób jednoznaczny określa stan systemu X na podstawie stanu jego elementów: $X(x_1..x_i) \mid X; x_i \in \{1,0\}$. Ścieżki zdatności dla struktury *systemu* można dzielić na podstruktury, nazywane *cięciami*, dla których przy niezdatności wszystkich jej elementów *system* będzie niezdatny. Cięcia struktury zdatności, odpowiadają ścieżkom *struktury dualnej*, definiowane są wzorem [7,8].

$$X_D(x_1..x_i) \stackrel{\text{def}}{=} 1 - X(1 - x_1..1 - x_i) \mid X_D; X; x_i \in \{1,0\} \wedge (X_D)_D \equiv X \quad (8)$$

gdzie: X_D – stan systemu ze strukturą dualną, X – stan rozpatrywanego systemu, x_i – stan elementu i dla rozpatrywanej struktury systemu

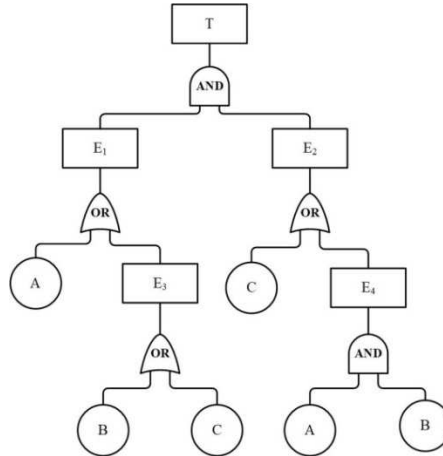
Zdarzenie szczytowe T w strukturze drzewa błędów FT^{31} oznacza awarię *systemu*. Z punktu widzenia niezawodności bardziej interesujące jest zapobieganie awarii *systemu*. Aby górne zdarzenie w drzewie błędów zastąpić brakiem występowania zdarzenia szczytowego³² \bar{T} , to w oryginalnym drzewie błędów należy wstawić dopełnienia wszystkich zdarzeń i zastąpić bramki OR bramkami AND i odwrotnie [8]. Takie drzewo posiada tzw. *strukturę dualną* do oryginalnego drzewa błędów.

Dla zdarzeń niezależnych, *strukturą dualną* dla konfiguracji równoległej jest konfiguracja szeregową i odwrotnie, ponieważ zgodnie z (3), (5) i (9) [7].:

$$\begin{aligned} X_D(A \cup B) &= A + B - A \cdot B \stackrel{\text{def}}{=} 1 - (1 - A) - (1 - B) + (1 - A) \cdot (1 - B) = \\ &= A \cdot B = X(A \cap B) \end{aligned} \quad (9)$$

CIĘCIA

Zgodnie z definicją, zestaw minimalnych cięć stanowi najmniejszą kombinację³³ głównych zdarzeń, wystarczającą do wystąpienia zdarzenia szczytowego T . W kombinacji tej wszystkie niezdatności muszą wystąpić, aby doszło do zdarzenia szczytowego³⁴ T . Każde drzewo błędów FT będzie składało się ze skończonej liczby minimalnych zestawów cięć, które są unikalne dla rozpatrywanego wydarzenia szczytowego T . Jeśli istnieją jednoskładnikowe zestawy minimalnych cięć, to reprezentują one pojedyncze niezdatności³⁵, które spowodują wystąpienie zdarzenia szczytowego T . Dwuskładnikowe zestawy minimalnych cięć, reprezentują podwójne niezdatności, które razem spowodują wystąpienie zdarzenia szczytowego T . W przypadku n –komponentowego minimalnego cięcia, wszystkie n komponentów w cięciu muszą wystąpić, aby wystąpiło zdarzenie szczytowe T . Zgodnie z algebrą zbiorów *Boole’a* można zapisać wyrażenia na minimalny zestaw cięć M dla zdarzenia szczytowego T , jako: $T = \sum M_i$, gdzie każde minimalne cięcie M_i jest kombinacją zdarzeń X : $M_i = \prod X_j$. Do upraszczania struktury podczas analiz opartych o drzewa zdarzeń stosuje się najczęściej prawo dystrybucji³⁶ i absorpcji³⁷. Przykład struktury drzewa zdarzeń pokazano na rys. 2 [8].



Rys. 2 Przykładowa struktura drzewa zdarzeń [8].

Zapis przedstawionej struktury można przedstawić zgodnie z algebrą zbiorów *Boole’a*, jako [8]:

$$\begin{aligned}
 T &= E_1 \cdot E_2 \\
 E_1 &= A + E_3 \\
 E_3 &= B + C \\
 E_2 &= C + E_4 \\
 E_4 &= A \cdot B
 \end{aligned}
 \rightarrow
 \begin{aligned}
 T &= (A + E_3) \cdot (C + E_4) = A \cdot C + E_3 \cdot C + E_4 \cdot A + E_3 \cdot E_4 \\
 T &= A \cdot C + (B + C) \cdot C + E_4 \cdot A + (B + C) \cdot E_4 \\
 T &= A \cdot C + B \cdot C + C \cdot C + E_4 \cdot A + E_4 \cdot B + E_4 \cdot C \\
 &= A \cdot C + B \cdot C + C \cdot C + E_4 \cdot C = C \\
 T &= A \cdot C + B \cdot C + C \cdot C + E_4 \cdot A + E_4 \cdot B + E_4 \cdot C \\
 T &= C + A \cdot C \cdot A + A \cdot B \cdot B = A \cdot B + C
 \end{aligned}$$

Dualną strukturą do otrzymanej będzie:

$$\begin{aligned}
 \bar{T} &= \overline{A \cdot B + C} = \overline{A \cdot B} \cdot \bar{C} \\
 \bar{T} &= (\bar{A} + \bar{B}) \cdot \bar{C} \\
 \bar{T} &= \bar{A} \cdot \bar{C} + \bar{B} \cdot \bar{C}
 \end{aligned}$$

Stąd, nie wystąpi niezdatność struktury przedstawionej na rys.2 jeżeli nie wystąpią jednocześnie zdarzenia A i C lub nie wystąpią jednocześnie zdarzenia B i C .

NIEZAWODNOŚĆ

Z modelu struktury binominalnej sytemu $R(x_1..x_i) \mid X: x_i \in \{1,0\}$ można przejść do struktury probabilistycznej: $R(P_1..P_i) \mid P_i \in [1,0]$, gdzie prawdopodobieństwa P spełniają warunek:

$$\forall_{X: x_i \in \{0;1\}} \left\{ \begin{aligned} P(x_i = 1) &= p_i \\ P(x_i = 0) &= 1 - p_i \end{aligned} \right. \mid \forall_{i \in \mathbb{N}} p_i \in [0, 1] \quad (10)$$

gdzie: P –prawdopodobieństwo, p_i –wartość i –tego prawdopodobieństwa P , X –zmienna losowa, x_i –realizacja i dla zmiennej losowej X

Prawdopodobieństwo R_i nazywane jest *zawodnością elementu i* . *Zawodność R* jest równa wartości oczekiwanej EX dla zmiennej losowej X : $EX = P(X: 1 \leftarrow x) \cdot 1 + P(X: 0 \leftarrow x) \cdot 0 = p$.



Probabilistyczny model *procesu* przebiegającego w *systemie* umożliwia już nie tylko śledzenie *zdatności systemu*, gdy awarii ulegnie część jego struktury, lecz szacowanie prawdopodobieństwa prawidłowego przebiegu *procesu*. Jeśli oznaczyć czas τ poprawnego działania *procesu*, jako realizację zmiennej losowej T , to niezakończony przebieg *procesu* będzie trwał czas $t = 0$ do czasu $t = \tau$, stąd *zawodność procesu* można zapisać jak $R(T: t \leq \tau)$.

Dla struktury szeregowej układ przejdzie ze stanu *zdatności* do stanu *niezdatności*, jeśli uszkodzeniu ulegnie chociażby jeden z elementów: $\tau = \min\{\tau_1.. \tau_i\}$, gdzie $\tau_1.. \tau_i$ oznaczają realizację zmiennych losowych $T_1..T_i$, a czas τ , będący realizacją zmiennej losowej T , oznacza odcinek czasu od $t = 0$ do czasu $t = \tau$ dla nieprzerwanej realizacji *procesu*. Czas t może być jednak krótszy od czasu τ , gdyż *system* może być wyłączony przed upływem czasu τ lub zatrzymany w wyniku awarii zewnętrznej uniemożliwiającej dalsze działanie *systemu*. Dla zdarzeń niezależnych, *zawodność R* można zapisać równaniem: $R \equiv P(t \leq \tau_i) = P(t \leq \tau_1..t \leq \tau_i)$. Dla niezależnych zmiennych losowych $T_i: \forall_{i \neq j} T_i \notin T_j$ to $R = P(t \leq \tau_1) \cdot P(t \leq \tau_i)$, można zapisać:

$$\forall_{T_i \notin T_j \mid i \neq j} R = \prod_i p_i \quad \left| \quad p_i = P(T_i: t \leq \tau_i) \right. \quad (11)$$

gdzie: T_i – zmienna losowa, R – zawodność, t – czas, τ – czas bezawaryjnej pracy

Struktura równoległa pozostaje w stanie *zdatności*, gdy chociaż jeden z elementów jest w stanie *zdatności*, stąd można zapisać: $1 - R = P(t > \tau) = P(t > \tau_1..t > \tau_i)$. Dla zdarzeń niezależnych *niezawodność* $1 - R$ można zapisać równaniem: $\forall_{i \neq j} T_i \notin T_j \rightarrow 1 - R = P(t > \tau_1) \cdot P(t > \tau_i)$, co ostatecznie można zapisać:

$$\forall_{T_i \notin T_j \mid i \neq j} 1 - R = 1 - \prod_i (1 - p_i) \quad \left| \quad p_i = P(T_i: t \leq \tau_i) \right. \quad (12)$$

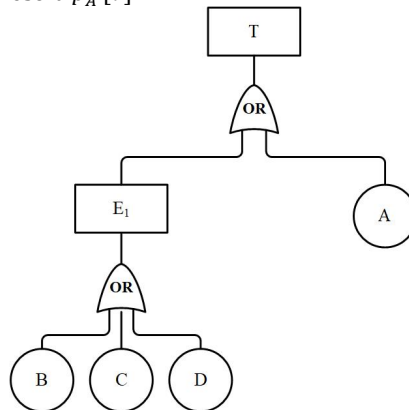
Równania (12) i (13) są analogiczne do wyprowadzonych wcześniej (7) i (8).

Sposób szacowania *zdatności systemu* do podtrzymania³⁸ przebiegających w nim *procesów*, szacowania prawdopodobieństwa awarii elementów jego struktury czy zbieraniu takich danych w oparciu o czasy bezawaryjnej pracy podczas eksploatacji *systemu*, stanowi podstawę analizy zagrożeń i ich przyczyn.

DRZEWO PRZYCZYN

Za prosty przykład analizy przyczyn zagrożeń posłuży oszacowanie prawdopodobieństwa p_T utraty zasilania powietrzem elementu *systemu* o strukturze składającej się z hełmu nurkowego wyposażonego w automat oddechowy zasilany przewodowo z *podsystemu* kompresora.

Na podstawie ponad 10-letniej obserwacji częstości występowania różnych zdarzeń zachodzących podczas eksploatacji *systemu* nurkowego, oszacowano prawdopodobieństwa uszkodzenia: przewodu zasilającego hełm nurkowy p_B , hełmu nurkowego p_C , reduktora p_D oraz kompresora p_A [9].



Rys. 3. Analiza przyczyn powstawania zagrożeń składających się na utratę zasilania czynnikiem oddechowym podczas pewnego typu nurkowań [9], gdzie: T: Utrata zasilania powietrzem $p_T \cong 2,078 \cdot 10^{-4}$; E₁: Uszkodzenie wyposażenia nurka $p_{E_1} \cong 1,678 \cdot 10^{-4}$; A: Uszkodzenie kompresora $p_A \cong 4,000 \cdot 10^{-5}$; B: Uszkodzenie przewodu $p_B \cong 7,718 \cdot 10^{-5}$; C: Uszkodzenie hełmu $p_C \cong 6,538 \cdot 10^{-5}$; D: Uszkodzenie automatu oddechowego $p_D \cong 2,526 \cdot 10^{-5}$.

Wytypowane zdarzenia elementarne można wpisać w strukturę drzewa błędów *FT*, którą przedstawiono na rys. 3.

Prawdopodobieństwo dla zdarzeń niezależnych $P(E_1)$, związanych z możliwością dysfunkcji³⁹ hełmu wyniesie: $P(E_1) = P(B \cup C \cup D)$. Zgodnie z rys.3 i zależnością (8) można oszacować je na poziomie:

$$\begin{aligned} P(E_1) &= 1 - \{[1 - P(B)] \cdot [1 - P(C)] \cdot [1 - P(D)]\} = \\ &= 1 - [(1 - 7,718 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 6,538 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 2,526 \cdot 10^{-5})] = \\ &\cong 1,678 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

Prawdopodobieństwo utraty zasilania powietrzem, jako zawodność R , można zapisać jako: $R \equiv P(T) = P(A \cup E_1) = P(A \cup B \cup C \cup D)$, które zgodnie z rys.3 i zależnością (8) można oszacować na poziomie:

$$\begin{aligned} R \equiv P(T) &= 1 - \{[1 - P(E_1)] \cdot [1 - P(A)]\} = \\ &= 1 - [(1 - 1,678 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 1,4000 \cdot 10^{-5})] = \\ &\cong 2,078 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

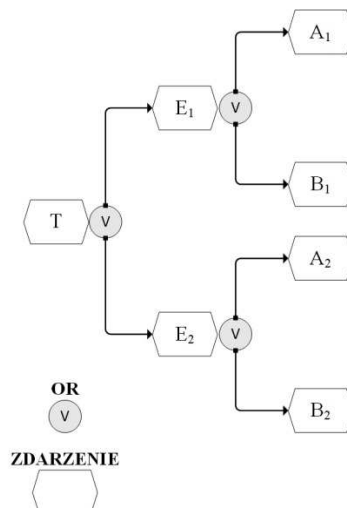
Zatem prawdopodobieństwo utraty zasilania powietrzem $P(T)$, stanowiące ryzyko zawodności R dysfunkcji rozpatrywanego *systemu*, wyniesie ok. $R \cong 2,078 \cdot 10^{-4}$, dla analizowanego rodzaju nurkowań.

DRZEWO ZAGROŻEŃ

Przykładowa analiza przyczyn powstawania ryzyka zawodności R , na drodze analizy *drzewa zagrożeń*, pokazano na przykładzie zasilania nurka powietrzem z *systemu* złożonego ze sprężarki, sprężarki awaryjnej oraz zbiorników zlokalizowanych na podeście opustowym⁴⁰ dla nurka.

Na podstawie wieloletnich obserwacji ustalono, że dla powietrznych nurkowań przewodowych prowadzonych w wyżej zdefiniowanym *systemie*, prawdopodobieństwo utraty zasilania czynnikiem oddechowym p_T wyniosło tyle samo co w poprzednio omawianym przykładzie [9]. Analiza działań podejmowanych przez nurków, polegających na przełączeniu się na zasilanie z butli zlokalizowanych na platformie opustowej E_2 oraz podejmowanych przez obsługę, polegającą na zmianie sprężarki zasadniczej na zapasową E_1 , pokazała że działania te podejmowano tak samo często dla zdefiniowanego *systemu*. Zatem, częstość względna v dla tych przypadków wyniosła: $v_{E_1} = v_{E_2} = 0,5$. Na podstawie definicji częstościowej prawdopodobieństwa można zatem przyjąć, że: $p_{E_1} = p_{E_2} = 0,5$ – rys. 4.

Na podstawie ponad 10-letniej obserwacji częstości występowania różnych zdarzeń zachodzących podczas eksploatacji różnych *systemów* nurkowych wiadomo, że prawdopodobieństwo dysfunkcji sprężarki p_1 wynosi w przybliżeniu $p_1 \cong 4,000 \cdot 10^{-5}$.



Rys. 4 Analiza od góry dotycząca przyczyn powstawania zagrożeń utraty zasilania powietrzem oddechowym dla zdefiniowanego typu nurkowania [9], gdzie: T: Utrata zasilania powietrzem $p_T \cong 2,078 \cdot 10^{-4}$; E_1 : Przejście na sprężarkę awaryjną $p_{E_1} = 0,5$; E_2 : Przejście na zasilanie awaryjne $p_{E_2} = 0,5$; A_1 : Wypadek nurkowy $p_{A_1} \cong 0,3871$; A_2 : Wypadek nurkowy $p_{A_2} \cong 0,3871$; B_1 : Awaryjne przerwanie nurkowania $p_{B_1} \cong 0,6129$; B_2 : Awaryjne przerwanie nurkowania $p_{B_2} \cong 0,6129$.

Na tej samej podstawie oszacowano także, na tym samym poziomie, prawdopodobieństwo p_1 nieprawidłowego działania systemu po przełączeniu się na zasilanie z butli dzwonowych: $p_2 \cong 4,000 \cdot 10^{-5}$. Prawdopodobieństwa dysfunkcji sprężarki p_1 i dysfunkcji zbiorników gazu na dzwonie nurkowym p_2 odnosiły się do sytuacji potencjalnie niebezpiecznej B_1 i B_2 , polegającej na konieczności przejścia przez nurka na awaryjne zasilanie z aparatu ucieczkowego co powodowało przerwanie nurkowania, lecz bez wystąpienia wypadku nurkowego.

Prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku nurkowego p_3 po zaistnieniu dysfunkcji sprężarki awaryjnej E_1 oraz p_4 po zaistnieniu dysfunkcji zbiornika gazu E_2 oszacowano na tym samym poziomie co prawdopodobieństwo uszkodzenia reduktora zapotrzebowania⁴¹, $p_3 = p_4 \cong 2,526 \cdot 10^{-5}$.

Należy zauważyć, że wyżej przedstawione oszacowania prawdopodobieństw, dla darzenia dysfunkcji sprężarki awaryjnej B_1 , dysfunkcji zbiorników gazu na dzwonie nurkowym B_2 , zaistnienia wypadku nurkowego po przełączeniu zasilania na zasilanie ze sprężarki awaryjnej⁴² $A_1|E_1$, oraz zaistnienia wypadku nurkowego po przełączeniu zasilania na zasilanie ze zbiorników dzwonowych⁴³ $A_2|E_2$, zostały oszacowane z obserwacji dla wszystkich obserwowanych *systemów*, nie tylko dla zdefiniowanego wyżej. Ponieważ zdarzenia te mogły odnosić się do występowania wielu innych potencjalnych zdarzeń, to powinny być one znormalizowane⁴⁴ do sytuacji przedstawionej na rys.4.

Znormalizowane do jedności prawdopodobieństwa, poprawnego działania aparatu ucieczkowego po awarii zasilania ze sprężarki zapasowej, jak i z zestawu butli zlokalizowanych na dzwonie $p_{B_1} + p_{B_2} = 1$ można obliczyć na podstawie znanych prawdopodobieństw: $p_{B_1} = p_{B_2} = \frac{p_1}{p_1+p_3} = \frac{p_2}{p_2+p_4} \cong 0,6129$ oraz dla p_{A_1} i p_{A_2} jako dopełnienie: $p_{A_1} = p_{A_2} = 1 - 0,6129 \cong 0,3871$.

Oszacowanie interesującego prawdopodobieństwa zagrożenia wypadkiem nurkowym po utracie zasilania czynnikiem oddechowym T można przedstawić rachunkiem zdarzeń: $R \triangleq P(T) \cdot P[(E_1 \cap A_1) \cup (E_2 \cap A_2)]$ [9]. Stąd: $R = p_T \cdot (p_{E_1} \cdot p_{A_1} + p_{E_2} \cdot p_{A_2}) \cong 2,078 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 0,3871 \cong 8,044 \cdot 10^{-5}$.

Uwidoczniony na rys. 4, przykład analizy przyczyn powstawania ryzyka zawodności R , na drodze analizy *drzewa zagrożeń*, najczęściej ma miejsce, gdy występują luki w wartościach prawdopodobieństw dla poszczególnych zdarzeń. Wtedy szacuje się niektóre zdarzenia w sposób przybliżony lub na tym samym poziomie, gdyż w przeciwnym razie wykonanie oszacowań byłoby niemożliwe.

NURKOWANIA WOJSKOWE

Proces szacowania zagrożenia R dla technologii nurkowania przedstawiono na przykładzie analizy sytuacji potencjalnie niebezpiecznej związanej z wystąpieniem choroby nurkowej DCI^{45} . Dane zaczerpnięto z badań nad technologią nurkowania z wykorzystaniem aparatu nurkowego $Mx/O_2 - SCR CRABE SCUBA$.

Przy pomocy drzewa przyczyn można zaproponować podobny schemat dla oszacowania wystąpienia sytuacji potencjalnie niebezpiecznej związanej podczas nurkowania z wykorzystaniem aparatu nurkowego typu $Mx/O_2 - SCC CRABE SCUBA$. Założono, że sytuacja potencjalnie niebezpieczna związana jest z:

- E_1 : ekspozycją na ośrodkową formę zatrucia tlenowego $CNSyn$
- E_2 : ekspozycją hiperbaryczną związaną z możliwością wystąpienia objawów choroby ciśnieniowej DCS
- E_3 : ekspozycją na ryzyko związane z utratą zasilania aparatu nurkowego

Średnie ryzyko p_{E_1} związane z możliwością wystąpienia ośrodkowej formy zatrucia tlenowego $CNSyn$ określono tutaj na 5,5%: $p_{E_1} = 5,50 \cdot 10^{-2}$.

Na podstawie przeprowadzonych badań, średnie ryzyko p_{E_2} związane z możliwością wystąpienia choroby dekompresyjnej DCS zarówno dla nurków Tx jak i Nx oszacowano na poziomie $P(DCS; \alpha_0 \cong 5\%; \alpha_1 \cong 20\%) \in [1,58; 2,95]\%$: $p_{E_2} = 2,95 \cdot 10^{-2}$. Przyjęto tak ponieważ, dla estymacji przedziałowej rozwiązanie przy założonej istotności krytycznej $\alpha_k \lesssim 0,05$ i krytycznej mocy wnioskowania $\beta_k \lesssim 0,8$ ze względu na przedział pokrycia $\hat{R} \in (\rho_l; \rho_r)$ dla estymowanej wartości prawdziwej ryzyka \hat{R} spontanicznego wystąpienia objawów DCS dla $N = 101$ nurków eksperymentalnych, $n = 0$ przypadków DCI , można obliczyć numerycznie z układu równań [6]:

$$\forall i \in \{0;1\} P(H_{1-i}|H_i) \equiv \alpha_i \begin{cases} 1 - \sum_{x=0}^N \left[\frac{N!}{x!(N-x)!} \cdot \rho_l^x \cdot (1 - \rho_l)^{N-x} \right] = \beta_k \\ \sum_{x=0}^N \left[\frac{N!}{x!(N-x)!} \cdot \rho_r^x \cdot (1 - \rho_r)^{N-x} \right] = \alpha_k \end{cases} \quad (13)$$

gdzie: H_0 –hipoteza zerowa; H_1 –hipoteza alternatywna; N –liczba nurków; n –liczba przypadków DCS ; ρ_l –lewa granica zagrożenia R wystąpieniem przypadku DCS ; ρ_r –prawa granica zagrożenia R wystąpienia przypadku DCS ; α_k –krytyczna wartość istotności α_0 ; β_k –krytyczna wartość mocy wnioskowania $\beta = 1 - \alpha_1$; α_0 –błąd I –rodzaju; α_1 –błąd II –rodzaju.

Estymowany zakres wartości zagrożenia \hat{R} wystąpieniem objawów DCS , powinien zawierać się w przedziale: $\hat{R} \in [0,0158; 0,0292]$ przy wartości błędu I –go rodzaju $\alpha_0 \cong 5\%$, polegającego na odrzuceniu prawdziwej H_0 , oraz $\alpha_1 \cong 0,2$ prawdopodobieństwie popełnienia błędu II –rodzaju, polegającego na akceptacji fałszywej hipotezy zerowej H_0 .

Tab. 4

Wyniki estymacja przedziałowej dla wyników walidacji systemu dekompresji według podejścia AMW, dla: $N=101$; $n(DCS)=0$; $\beta=0,8\%$.

	Istotność α_0 [%]		
	10	5	1
Prawdopodobieństwo ρ wystąpienia objawów DCS [%]	$\rho_l \cong 1,58$ $\rho_r \cong 2,25$	$\rho_l \cong 1,58$ $\rho_r \cong 2,92$	$\rho_l \cong 1,58$ $\rho_r \cong 4,46$

Jak dotąd na kilkaset nurków wystąpił jedynie jeden przypadek utraty tlenu w aparacie nurkowym. Nie było to jednoznaczne z utratą zasilania w czynnik oddechowy z integralnego zestawu aparatu, lecz przyjęto tutaj, że maksymalna praktyczna częstotliwość utraty czynnika oddechowego ν wyniosła $\nu = 1/300$, stąd prawdopodobieństwo wystąpienia utraty czynnika oddechowego wyniesie $p_{E_3} = 3,33 \cdot 10^{-3}$.

Z powyższych danych można oszacować prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji potencjalnie niebezpiecznej R : $R \triangleq P(E_1 \cup E_2 \cup E_3)$. Dla zdarzeń niezależnych, zgodnie z równaniem (6) można zatem prawdopodobieństwo wystąpienia sytuacji potencjalnie niebezpiecznej R zapisać w postaci: $R = 1 - P(\bar{E}_1) \cdot P(\bar{E}_2) \cdot P(\bar{E}_3)$ i dalej $R = 1 - (1 - p_{E_1}) \cdot (1 - p_{E_2}) \cdot (1 - p_{E_3})$. Wstawiając dane i wykonując obliczenia można w rezultacie otrzymać: $R = 1 - [(1 - 5,5 \cdot 10^{-2}) \cdot (1 - 2,95 \cdot 10^{-2}) \cdot (1 - 3,33 \cdot 10^{-3})] \cong 8,59 \cdot 10^{-2} \triangleq 8,59\%$.

Obliczone zagrożenie R wystąpieniem sytuacji potencjalnie niebezpiecznej podczas nurkowania przy wykorzystaniu aparatu nurkowego $Mx/O_2 - SCRCRABE SCUBA$ jest stosunkowo wysokie i zostało tutaj oszacowane na ok. 8,6%. Ryzyko związane z możliwością wystąpienia zagrożenia chorobą ciśnieniową DCS i ośrodkową formą zatrucia tlenowego $CNSyn$ występuje zawsze. Jednak możliwy jest do wyboru niższy poziom zagrożenia ośrodkową formą zatrucia tlenowego $CNSyn$. Jeśli zostanie obniżone zagrożenie ośrodkową formą zatrucia tlenowego $CNSyn$ do wartości $p_{E1} \sim 1,00 \cdot 10^{-2}$, to ryzyko sytuacji potencjalnie niebezpiecznej R zmniejszy się o połowę.

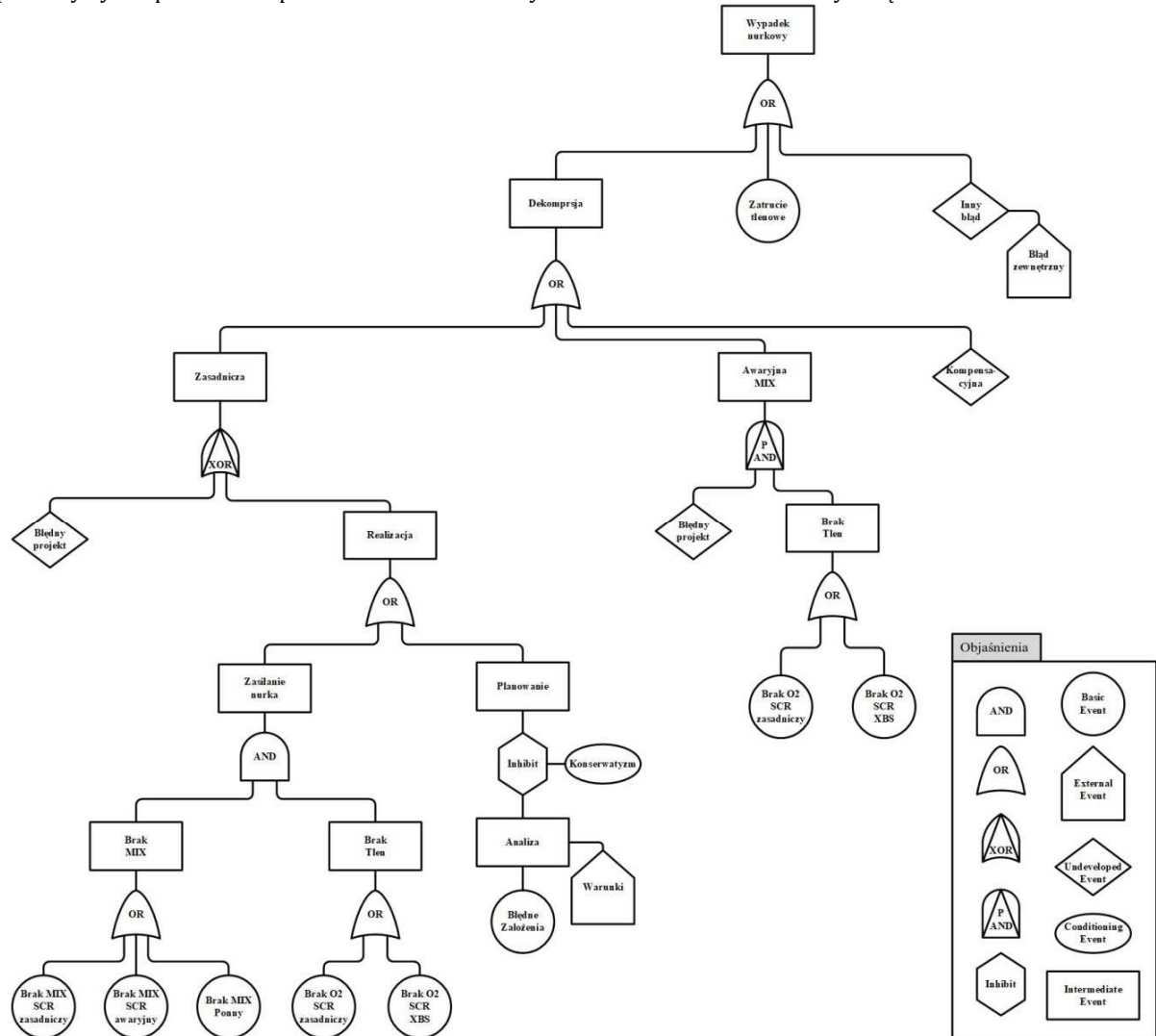
Ryzyko związane z możliwością wystąpienia zagrożenia chorobą ciśnieniową DCS może być zminimalizowane jedynie w drodze dokładnego jego ustalenia, poprzez przeprowadzenie długiej serii nurkowań eksperymentalnych, o ile jest ono mniejsze od już określonego. Jak stwierdzono wyżej, jeśli zostanie obniżone zagrożenie ośrodkową formą zatrucia tlenowego $CNSyn$ do wartości $p_{E1} \sim 1,00 \cdot 10^{-2}$, to ryzyko sytuacji potencjalnie niebezpiecznej R zmniejszy się o połowę. Przy jednoczesnym zminimalizowaniu ryzyka związanego z możliwością wystąpienia zagrożenia chorobą ciśnieniową DCS do tego samego poziomu $p_{E2} \sim 1,00 \cdot 10^{-2}$, ryzyko sytuacji potencjalnie niebezpiecznej R spadnie do poziomu $R \cong 2,3\%$.

Możliwe jest także minimalizowanie ryzyka związanego z utratą zasilania. Jednak jeśli możliwość utraty zasilania spadnie nawet 100 krotnie do poziomu $p_{E3} \sim 3,33 \cdot 10^{-5}$, to ryzyko sytuacji potencjalnie niebezpiecznej R zmniejszy się nieznacznie o $\Delta R \cong 0,3\%$, do poziomu $R \cong 0,0829 \cong 8,29\%$.

Jak widać z powyższych oszacowań, nurkowania wojskowe niosą jedno z najwyższych zagrożeń R materializacją sytuacji potencjalnie niebezpiecznej ze wszystkich zadań wojskowych wykonywanych w warunkach pokoju.

ANALIZA TAKTYCZNA

Analizy przyczyn czy zagrożeń taktycznego wykorzystania nurków może być realizowane przy wykorzystaniu drzew zdarzeń. Przykładowo, drzew zdarzeń można użyć do oszacowania wpływu wykorzystania nurków MCM^{46} czy analizy ryzyka przewidywanych scenariuszy operacyjnych zarówno nurkowych jak i całych sytuacji taktycznych. Jednak szersze analizy powinny być wspierane komputerowo. Obliczenia dużych struktur niezawodnościowych są żmudne a ich



Rys. 5 Propozycja drzewo błędów FT dla przykładowej analizy sytuacji potencjalnie niebezpiecznej związanej z wystąpieniem choroby nurkowej DCI przy wykorzystaniu aparatu nurkowego $Mx/O_2-SCR CRABE SCUBA$.



analiza bez wsparcia komputerowego może prowadzić do wielu pomyłek, gdyż już dla małych systemów analiza może być dość skomplikowana –rys. 5.

Poszukiwania metodą dedukcji przyczyn powstawania sytuacji problemowych podczas realizacji zadania bojowego może być realizowane przy wykorzystaniu *drzew zagrożeń* budowanych „od góry do dołu”.

Analiza wpływu różnych zdarzeń na efektywność taktycznego wykorzystania nurków *MCM* może być prowadzona przy wykorzystaniu *drzew przyczyn* analizowanych „od dołu do góry”.

Wykorzystanie statystycznych metod ilościowych, jak *analizy dyskryminacyjnej* daje możliwość planowania operacji bojowych z uwzględnieniem prawdopodobieństwa sukcesu dla wszystkich operacji cząstkowych, np. działań *MCM*. Takie podejście daje możliwość zastosowania *teorii systemów* do strategicznego planowania operacji bojowych. Scenariusze operacji bojowych składają się na główny *proces w systemie*, którego struktura ma zapewnić niezakłócony jego przebieg. Kontekst dla tego *systemu* stanowią, przede wszystkim, rozpoznane zachowania przeciwnika oraz taktyka wojsk własnych⁴⁷. Główny *proces* posiada szereg *podprocesów* dotyczących poszczególnych operacji, jak operacji *MCM*. Takie podejście umożliwia określenie wpływu poszczególnych *podprocesów* na *proces* główny oraz wskazuje jaka jest minimalna, wymagana struktura⁴⁸ *systemu* do przeprowadzenia tego *procesu*.

Zastosowanie metod *analizy dyskryminacyjnej* daje możliwość ilościowego oszacowania powodzenia realizacji *procesu*, który opisuje scenariusz operacji bojowej.

PODSUMOWANIE

Myśl taktyczna podąża drogą eliminacji żołnierza z pola walki. Obecnie widać to ewidentnie w lotnictwie wojskowym, gdzie znacząco wzrosła rola bezzałogowych obiektów latających *UCAV*⁴⁹. Szczególnie jest to widoczne przy rozpoznaniu pola walki oraz kierowanie precyzyjnymi atakami. Skala wdrożeń technologii bezzałogowych *UCAV* w lotnictwie wydaje się znacznie zmniejszać rolę rozpoznania satelitarne⁵⁰.

WNIOSKI

Systemowy kontekst taktyczny⁵¹ jest podstawą precyzowania wymagań co do elementów struktury *systemu* i *podsystemów* dając podstawę do prowadzenia badań nad jego właściwościami, np.: niezawodnością, odparowalnością, redundantnością itp.

Przy realizacji zadań projektowych, należy bezwzględnie pamiętać, że nurkowanie stanowi jedynie element *systemu* służący realizacji *procesów* w ramach większego *systemu*, przykładowo wojny minowej *MCM*. W swej istocie, nurkowanie stanowi jedynie sposób przemieszczania się sił do wykonania zadań bojowych wynikających z ich celów.

W ramach krajowych zadań przypadających grupom *CDT*⁵² należy skupić się na nurkowaniach punktowych, jako podstawowym scenariuszu wynikającym z krajowych potrzeb *MCM*. Inne scenariusze stały się mniej istotne po rozformowaniu morskich sił desantowych w 1993 roku.

Należy pamiętać, że w warunkach pokoju, ze wszystkich specjalności wojskowych, to nurkowania wojskowe niosą jedno z najwyższych zagrożeń materializacją sytuacji potencjalnie niebezpiecznej, co pokazano na wykonanych szacunkach.

ZAKOŃCZENIE

Artykuł jest wynikiem realizacji projektu nr DOB-BIO-12-03-001-2022 z dnia 2 stycznia 2023 r. o wykonanie i finansowanie projektu realizowanego na rzecz obronności i bezpieczeństwa państwa w ramach Konkursu nr 12/2022 Narodowego Centrum Badań i Rozwoju pt. „Wpływ wysiłku bojowego i transportu lotniczego na bezpieczeństwo nurków bojowych podczas realizacji podwodnych działań bojowych” planowanego na lata 2023-2025.

LITERATURA

1. Kłos R. 2019a. Designing of diving technologies – process approach. *Polish Hyperbaric Research*. 1, 2019a, Tom 66, DOI: 10.2478/phr-2019-0001, strony 7-24;
2. — 2019b. Context analysis in the development of diving technologies. *Polish Hyperbaric Research*. 2, 2019b, Tom 67, DOI: 10.2478/phr-2019-0005, strony 7 – 58;
3. —. 2021. Projektowanie technologii nurkowania w systemie wojny minowej - cz.I wymagania standaryzacyjne. *Polish Hyperbaric Research*. 1, 2021, Tom będzie opublikowany;
4. — 2011. *Możliwości doboru dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE - założenia do nurkowań standardowych i eksperymentalnych*. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2011. ISBN 978-83-924989-4-0;
5. —. 2016. *System trymiksowej dekompresji dla aparatu nurkowego typu CRABE*. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2016. ISBN 978-83-938322-5-5;
6. —. 2007. *Zastosowanie metod statystycznych w technice nurkowej - Skrypt*. Gdynia : Polskie Towarzystwo Medycyny i Techniki Hiperbarycznej, 2007. ISBN 978-83-924989-2-6;
7. Praca zbiorowa. 1982. *Poradnik niezawodności - podstawy matematyczne*. [red.] J. Migdalski. Warszawa : Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego "WEMA", 1982;
8. Vesely W.E., Goldberg F.F., Roberts N.H., Haasl D.F. 1981. *Fault tree handbook*. Washington : Systems and Reliability Research Office of Nuclear Regulatory Commission, 1981. NUREG-0492;
9. HSE. 1997. *Diving Manual – Offshore technology*. Sheffield : Health and Safety Executive, 1997. Report OTO 97 805;
10. Box G.E.P., Hunter W.G., Hunter J.S. 1978. *Statistics for Experimenters: An introduction to design, data analysis, and model building*. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1978. ISBN 0-471-09135-7.

dr hab. inż. Ryszard Kłos prof. AMW
Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte
Zakład Technologii Prac Podwodnych
81 – 103 Gdynia 3
ul. Śmidowicza 69
r.klos@amw.gdynia.pl

ORCID identifier No: 0000-0002-4050-3978

- ¹ zbiór metod
- ² Mx oznacza mieszaninę oddechwą, która dla tego aparatu może być nitroksen Nx albo trymiksem Tx
- ³ Failure Mode and Effect Analysis
- ⁴ Failure Mode Effect and Criticality Analysis
- ⁵ Preliminary Hazard Analysis
- ⁶ Fault Hazard Analysis
- ⁷ Double Failure Matrix
- ⁸ Success Path Models
- ⁹ drzewa klasyfikacyjne
- ¹⁰ Fault Tree
- ¹¹ Artificial Intelligence
- ¹² całka nieoznaczona
- ¹³ dane historyczne
- ¹⁴ np. symulacje komputerowe
- ¹⁵ np. badania modelowe
- ¹⁶ np. testy niszczące
- ¹⁷ co najwyższej pół-ilościową
- ¹⁸ nie daje możliwości ilościowego porównania a przez to wyboru najbezpieczniejszego rozwiązania w *procesie* podejmowania decyzji
- ¹⁹ pozorne korelacje zdarzają się znacznie częściej niż by to wynikało z powszechnego mniemania, zwłaszcza jeśli zbierane są dane dyskretne (nieciągłe) w krótkim okresie czasu, podobnie jak w klasycznie omawianym przykładzie obserwacji w latach 1930-1936 prowadzonych w Oldenburgu stwierdzono dobrą korelację pomiędzy populacją bocianów i noworodków (Box G.E.P., Hunter W.G., Hunter J.S., 1978)
- ²⁰ odrzucenie hipotezy zerowej gdy jest ona prawdziwa
- ²¹ przyjęcie hipotezy zerowej gdy jest ona fałszywa
- ²² np. liczba awarii urządzenia w ciągu roku, czas przestoju urządzenia w ciągu roku itp.
- ²³ np. dla różnych miesięcy tego samego roku, analogicznych miesięcy w różnych latach itp.
- ²⁴ podstawy teoretyczne analizy ryzyka pochodzą z analizy przeżycia
- ²⁵ interakcje pomiędzy elementami struktury analizowanego *systemu*
- ²⁶ przykładowo dla punktów świetlnych oświetlających stosunkowo długi korytarz zakończony schodnikami
- ²⁷ *procesy Markowa* to ciągi zdarzeń, w którym prawdopodobieństwo każdego zdarzenia zależy jedynie od wyniku poprzedniego
- ²⁸ algebry zbiorów
- ²⁹ wykorzystanie rachunku prawdopodobieństw zdarzeń odwrotnych daje zauważalny zysk obliczeniowy gdyż już dla trzech alternatywnych zdarzeń niezależnych rachunek ten musiałby wyglądać w następujący sposób: $P(A \cup B \cup C) = P(A) + P(B \cup C) - P[A \cap (B \cup C)] = P(A) + P(B) + P(C) - P(B) \cdot P(C) - P(A) \cdot P(B) - P(A) \cdot P(C) + P(A) \cdot P(B) \cdot P(C)$
- ³⁰ zamiast: $P(A \cup B \cup C) = 1 - P(1 - A) \cdot P(1 - B) \cdot P(1 - C) = 1 - P(\bar{A}) \cdot P(\bar{B}) \cdot P(\bar{C})$
- ³¹ jak to pokazano wcześniej, nie należy utożsamiać struktury służącej analizie niezawodności z jej fizyczną strukturą połączeniową
- ³² Fault Tree
- ³³ dopełnienie
- ³⁴ przecięciem w rozumieniu algebry zbiorów: $A \cap B$
- ³⁵ awarie
- ³⁶ 3a i 3b w tab.2
- ³⁷ 5a i 5b w tab.2
- ³⁸ w oparciu o jego strukturę
- ³⁹ zawodnością
- ⁴⁰ bez możliwości oddychania z atmosfery dzwonu typu suchego czy mokrego
- ⁴¹ przyjęto, że prawdopodobieństwo dysfunkcji aparatu ucieczkowego kształtuje się na tym samym poziomie jak w poprzednim przykładzie dla dysfunkcji reduktora zapotrzebowania
- ⁴² przyjęto, że zdarzenia A_1 i E_1 są niezależne
- ⁴³ przyjęto, że zdarzenia A_2 i E_2 są niezależne
- ⁴⁴ normalizacja polega na takim dopasowaniu prawdopodobieństw, aby prawdopodobieństwo dla zdarzenia pewnego równało się jedności
- ⁴⁵ użyto tutaj szerokiego pojęcia choroby dekompresyjnej *Decompression Illness*, gdyż oprócz choroby ciśnieniowej *Decompression Sickness* DCS rozpatrywane jest także ryzyko wystąpienia ośrodkowej formy zatrucia tlenowego *Central Nervous Syndrome CNSyn*
- ⁴⁶ w systemie wojny minowej
- ⁴⁷ według klasycznej teorii Clausewitz *wojna jest jedynie kontynuacją polityki innymi środkami*, stąd w kontekście do *systemu* wspierającego operację bojową znajdują się także uwarunkowania polityczne oraz wiele innych czynników, jak prawo wojenne (międzynarodowe prawo humanitarne)
- ⁴⁸ stąd można ocenić konieczną redundancję system potrzebną do zapewnienia niezakłóconej realizacji podstawowego *procesu*
- ⁴⁹ Unmanned Combat Air Vehicle
- ⁵⁰ rozpoznanie satelitarne wymaga rozległych i drogich inwestycji, a jak pokazują ostatnie doświadczenia rosyjskie, bardzo łatwo jest satelitę zestrzelić, co wobec stosunkowo taniej technologii *UCAV* oraz tego, że stanowią one trudny cel do zestrzelenia, stanowi przesłankę do coraz szerszego ich stosowania
- ⁵¹ nie jest tu mowa jedynie o taktyce wojskowej
- ⁵² *Clearance Diving Team*

