

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE**

EXPLO-SHIP 2004

Leszek Chybowski, Zbigniew Matuszak

**Podstawy analizy jakościowej i ilościowej
metody drzewa niezdatności**

Słowa kluczowe: drzewo niezdatności, analiza jakościowa, analiza ilościowa, algorytm, przekroje niezdatności, kalkulacja, symulacja

Scharakteryzowano podstawy analizy systemu technicznego metodą drzewa niezdatności w odniesieniu do siłowni okrętowej. Przedstawiono podstawy jakościowej i ilościowej analizy drzewa niezdatności, przytaczając wyznaczone podstawowe parametry oraz sposób ich szacowania wybranymi metodami.

**Basics of Qualitative and Quantitative Analysis
of the Fault Tree Method**

Key words: fault tree, qualitative analysis, quantitative analysis, algorithm, fault cut sets, calculation, simulation

Basic principles of the fault tree analysis are discussed in reference with the marine power plant. The basics of qualitative and quantitative analysis of the fault tree are presented. Principal parameters being determined and the manner of their estimation by selected methods are given.

Wprowadzenie

Metodą drzewa niezdatności (ang. *Fault Tree Analysis* – FTA) modeluje się graficznie zapis logiczny kombinacji możliwych zdarzeń, mogących wystąpić w czasie eksploatacji systemu technicznego.

Analiza drzewa niezdatności dla obiektów technicznych może być prowadzona na trzech poziomach [4]: *operacyjnym*, wskazującym podczas jakich warunków eksploatacji siłowni nastąpiło uszkodzenie (jazda morska, manewrowa, praca z dynamicznym pozycjonowaniem, postój w porcie, postój w stoczni, próby morskie itp.); *systemowym*, określającym, jakie podsystemy morskiego układu transportowego (statek, personel obsługujący, wpływ otoczenia) mogły być przyczyną uszkodzenia; *przyczynowym*, wskazującym, jakie zdarzenia mogły być przyczyną uszkodzenia systemu.

Analiza systemu metodą drzewa niezdatności jest przeprowadzana etapami, których prawidłowy przebieg warunkuje uzyskanie miarodajnych wyników i wniosków. Kolejne kroki analizy stanowią:

1. Opisanie systemu podlegającego analizie. Głównymi informacjami pomocnymi w charakterystyce obiektu analizy są: procesy fizyczne, chemiczne oraz tribologiczne, jakim podlegają elementy systemu oraz podsystemy; informacje charakterystyczne o procesach zachodzących w systemie; budowa systemu opisana w dokumentacji i na schematach technologicznych; wpływ czynników zewnętrznych; stosowany sprzęt, specyfikacje techniczne oraz procedury eksploatacyjne.

2. Identyfikacja zagrożeń i wybór zdarzenia szczytowego (czasami kilku). Wynikiem tego etapu jest lista zdarzeń szczytowych, które będą następnie rozwijane. Dla systemów siłowni okrętowej mogą to być w m.in. uwolnienie substancji toksycznych i palnych do środowiska zewnętrznego; pożar lub eksplozja w przedziałach maszynowych, niesprawność systemów technicznych jak np. awaria elektrowni okrętowej czy napędu głównego statku. Istotne jest, aby określić zdarzenie wierzchołkowe i lokalizację niezdatności oraz scharakteryzować warunki w jakich ona zachodzi.

3. Budowa drzewa niezdatności. Po zdefiniowaniu zdarzenia szczytowego (lub kilku), w celu określenia pozostałych elementów drzewa, stosuje się tzw. zasadę bezpośredniej przyczyny. Wyróżnia się trzy metody konstrukcji: ręczną (analityk tworzy drzewo stosując określone reguły, opierając się na doświadczeniu itp.), algorytmiczną (tworzenie drzew z zastosowaniem algorytmów konstrukcyjnych) i zautomatyzowaną (bezpośrednie tworzenie drzewa na bazie schematów przepływowych, np. systemów orurowania, diagramów kontrolno-pomiarowych, itp.).

4. Analiza jakościowa drzewa niezdatności. Dla skonstruowanego drzewa niezdatności przeprowadza się proces poszukiwania jego przekrojów minimalnych, choć mogą to być również minimalne ścieżki zdatności lub równania bołowskie. Możliwe jest wówczas wyciągnięcie wniosków dotyczących jakościowej oceny drzewa niezdatności. Przeprowadza się m.in. ranking jakościowy przekrojów minimalnych oraz określa parametry jakościowe przekrojów minimalnych, takie jak rząd najmniejszego przekroju czy też analizuje się udział poszczególnych zdarzeń pierwotnych w wybranych przekrojach minimalnych.

5. Analiza ilościowa drzewa niezdatności. Etap ten występuje tylko wówczas, gdy metoda FTA stanowi narzędzie oceny ilościowej w analizach systemu technicznego. W analizie ilościowej drzewa niezdatności konieczne jest określenie parametrów niezawodnościowych poszczególnych zdarzeń pierwotnych (kwantyfikacja zdarzeń). Dysponując zbiorem danych o zdarzeniach w postaci prawdopodobieństw ich zaistnienia lub parametrami rozkładów opisujących np. procesy powstawania uszkodzeń elementów, możliwe jest znalezienie wybranych parametrów niezawodnościowych dla wszystkich zdarzeń pośrednich, przekrojów minimalnych oraz zdarzeń szczytowych. Zwykle poszukiwanymi parametrami są niegotowość systemu, niezawodność systemu, niegotowości cząstkowe systemu, częstość zachodzenia zdarzenia szczytowego, czas do pierwszego uszkodzenia systemu, oczekiwana ilość uszkodzeń w zadanym czasie czy też postaci rozkładów statystycznych wybranych zmiennych losowych, stanowiących parametry niezawodnościowe obiektu analizy. Oprócz tych podstawowych celów, na analizie ilościowej składa się ocena ważności poszczególnych komponentów w systemie (wyznaczenie niezawodnościowych i strukturalnych miar ważności). Wymagane jest także oszacowanie błędów, jakimi są obarczone końcowe wyniki analiz, dlatego finalną część etapu analizy ilościowej stanowi ocena niepewności, polegająca na propagacji przez opracowany model logiczny rozkładów prawdopodobieństw wskaźników charakteryzujących zdarzenia pierwotne w celu estymacji błędów analizy.

Drzewo niezdatności jest budowane ze zbioru symboli połączonych wzajemnie relacjami przyczynowo-skutkowymi. Różne konwencje i standardy zalecają stosowanie różnej symboliki. Najczęściej używa się symboliki zgodnej z dokumentem NUREG 0492 [27].

Dzięki procesowi strukturyzacji możliwe jest ustalenie wpływu uszkodzeń elementów oraz czynnika ludzkiego i zdarzeń zewnętrznych na działanie całego systemu. Wyróżnia się trzy rodzaje mechanizmów, powodujących uszkodzenie systemu:

- 1) *uszkodzenia pierwszego rodzaju*, wynikające z fizycznych właściwości elementu;

- 2) *uszkodzenia drugiego rodzaju*, powiązane z nieoczekiwanym wpływem środowiska lub operacji na element;
- 3) *uszkodzenia sterowane*, które są związane z awariami pewnych elementów sterujących.

Dwa pierwsze rodzaje uszkodzeń wymagają naprawy lub wymiany niezdatnego elementu dla przywrócenia pełnej funkcjonalności systemu. Uszkodzenie sterowane ustępuje wówczas, gdy element sterujący powróci do stanu zdadności.

Wszystkie rodzaje uszkodzeń są obserwowalne w trakcie eksploatacji siłowni okrętowych i ich podsystemów. Dlatego istotne jest ich rozróżnienie i odpowiednia reprezentacja w modelu drzewa niezdatności.

Jako zdarzenia należy traktować wszelkie dynamiczne zmiany w strukturze i działaniu elementów będących fizyczną częścią systemu, błędy operatora systemu oraz wpływ czynników zewnętrznych. Tak więc zdarzenia podlegające analizie systemowej mogą być zakwalifikowane do jednej z poniższych grup:

- zdarzenia związane z nieprawidłowym funkcjonowaniem elementów systemu oraz jego podsystemów;
- zdarzenia związane z przeprowadzaniem prac konserwacyjnych i naprawczych, przeglądów okresowych i kontroli stanu elementów systemu;
- zdarzenia związane z zachowaniem się personelu eksploatacyjnego i wpływem otoczenia.

W metodzie FTA wyróżnia się trzy klasy zdarzeń w zależności od lokalizacji zdarzenia. Na poziomie elementarnym znajdują się tzw. zdarzenia pierwotne (ang. *primary events*), które nie podlegają już dalszej dekompozycji.

W klasie zdarzeń pierwotnych wyróżnia się kilka ich rodzajów, co wynika z cech zdarzenia (informacji o nim) oraz co z tym związane przyjętych modeli matematycznych je opisujących. Do najważniejszych zdarzeń pierwotnych zalicza się:

1. Zdarzenia elementarne lub inaczej bazowe (ang. *basic events*). Zdarzenia te nie wymagają dalszego rozwijania. Zwykle modelują one uszkodzenia pierwszego rodzaju elementów systemu, a także podstawowe błędy operatora i zdarzenia odzwierciedlające wpływ środowiska.

2. Zdarzenia nierozwinięte (ang. *undeveloped events*) czyli takie, które mogą być dalej rozwijane, a nie są (nie osiągnięto założonego poziomu dekompozycji w strukturze drzewa niezdatności). Bardzo często zdarzenia nierozwinięte modelują uszkodzenia drugiego rodzaju elementów systemu oraz błędy człowieka (operatora).

3. Zdarzenia warunkowe (ang. *conditional events*) służące do zamodelowania pewnych warunków i ograniczeń, których spełnienie pozwala na wygenerowanie odpowiednich zdarzeń pośrednich.

4. Zdarzenia zewnętrzne (ang. *house event, external event*), reprezentujące warunek lub zdarzenie, które jest albo prawdziwe $H = 1$ (ang. *true, ON*) albo fałszywe $H = 0$ (ang. *false, OFF*), zachodzi w normalnych warunkach lub nie zachodzi. Najczęstszym zastosowaniem tego zdarzenia jest funkcja przełącznikowa w drzewie, do załączania i wyłączania części drzewa w zależności od stanu lub warunków pracy systemu, podlegające analizie.

Oprócz wymienionych zdarzeń, do zdarzeń pierwotnych czasami dodaje się ich inne rodzaje, jak np. zdarzenia rozwinięte (ang. *developed events*), zdarzenia specjalne, definiowane przez analityka (ang. *user events, special events*) itp.

Kombinacja zdarzeń pierwotnych może wyzwolić zaistnienie określonych zdarzeń pośrednich (ang. *intermediate events*), które prezentują określone stany podsystemów rozpatrywanego obiektu analizy, a ich kombinacje pośredniczą w powstaniu kolejnych zdarzeń pośrednich i ostatecznie prowadzą do rozpatrywanego zdarzenia szczytowego (ang. *top event*), stanowiącego cel analizy. Istnieje odmiana metody FTA, dopuszczająca istnienie wielu zdarzeń szczytowych.

1. Analiza jakościowa drzewa niezdatności

Drzewo niezdatności dostarcza informacji o możliwych kombinacjach zdarzeń wejściowych, które mogą prowadzić w krytycznej sytuacji do zaistnienia zdarzenia szczytowego, jakim jest uniemożliwienie spełnienia funkcji do jakich został przewidziany system. Kombinacje te prowadzą do zaistnienia przekrojów niezdatności.

Dla małych i niezłożonych drzew niezdatności możliwe jest znalezienie minimalnych przekrojów i ścieżek przez przegląd drzewa bez wykorzystania żadnych formalnych procedur i algorytmów. W przypadku dużych lub złożonych drzew niezdatności konieczne jest zastosowanie odpowiednio efektywnych metod.

Istnieją różne algorytmy służące do poszukiwania przekrojów/ścieżek drzew niezdatności. Historycznie pierwszym szeroko opisanym i wciąż wykorzystywanym algorytmem był opracowany na początku lat siedemdziesiątych przez Fussell'a i Vesely'a [10, 11] algorytm MOCUS (ang. *Method of Obtaining Cut Sets* – metoda otrzymywania przekrojów). Algorytm ten jest oparty na metodzie analizy drzewa w kierunku od góry do dołu (ang. *Top – Down Method*). Drzewo niezdatności może być także analizowane w kierunku od dołu do góry (ang. *Bottom – Up Method*). Autorami pierwszego popularnego algorytmu o tym kierunku dekompozycji nazwanego MICSUP (ang. *Minimal Cut Sets Upward* – przekroje minimalne poszukiwane w kierunku ku górze) byli P. Pande, M. Spector oraz P. Chatterjee [20]. Metody znajdowania przekrojów minimalnych doczekały się wielu odmian. Jedną z pierwszych opracowali D. Rasmuson i

N. Marshall [22], którzy zbudowali algorytm efektywniejszy niż MOCUS, nazywany FATRAM. Jedną z udoskonalonych wersji algorytmu MOCUS [24] jest wykorzystywana w programie komputerowym CARA-FaultTree. Inne metody i algorytmy związane z poszukiwaniem przekrojów i ścieżek minimalnych przedstawiono m.in. w pracach [1, 3, 6, 12, 13, 14]. Należy podkreślić, iż możliwa jest analiza ilościowa drzewa niezdatności z pominięciem procesu poszukiwania minimalnych przekrojów lub ścieżek, a metody te zaprezentowano m.in. w pracach [5, 17, 18, 19, 21, 23].

Proces poszukiwania ścieżek i przekrojów minimalnych przeprowadza się (zwykle z zastosowaniem programów komputerowych) poprzez wykorzystanie zasad algebry Boole'a równaniem opisującym drzewo niezdatności. Często, zwłaszcza dla dużych drzew niezdatności zawierających zwielokrotnione zdarzenia, zachodzi konieczność redukcji drzewa niezdatności do równoważnego, ale mniej złożonego modelu.

Na jakościową analizę drzewa niezdatności składa się proces poszukiwania przekrojów lub ścieżek minimalnych albo reprezentacja modelu drzewa niezdatności w formie zredukowanych równań boolowskich. Na podstawie wyników powyższych operacji możliwe jest wyciągnięcie jakościowych wniosków o analizowanym systemie.

Ważność przekroju minimalnego zależy często od ilości zdarzeń elementarnych wchodzących w jego skład. Liczbę zdarzeń składowych danego przekroju nazywa się rzędem przekroju. Bardzo często zdarza się, iż przekrój rzędu pierwszego jest dla systemu bardziej krytyczny niż rzędu drugiego i wyższych. Jeśli drzewo niezdatności zawiera przekrój z tylko jednym zdarzeniem pierwotnym, wówczas zdarzenie szczytowe zachodzi w przypadku zaistnienia stanu niezdatności elementu reprezentowanego przez zdarzenie w tym przekroju minimalnym. Odnosi się to do elementów systemu tworzących szeregową strukturę niezawodnościową.

Rząd najmniejszego przekroju minimalnego zawierającego i -te zdarzenie określa miara jakościowa $I^O(i)$. Jeśli przez $C_{1i}, C_{2i}, \dots, C_{ni}$ oznaczy się zbiór wszystkich przekrojów zawierających zdarzenie E_i , to:

$$I^O(i) = \min_{k=1i, 2i, \dots, ni} [\text{card}(C_k)] \quad (1)$$

Należy zwrócić uwagę, że miara $I^O(i)$ nie jest zależna od parametrów niezawodnościowych zdarzeń.

Podobną rolę pełni wskaźnik określający ilość wystąpień i -tego zdarzenia w analizowanym drzewie niezdatności. Jest to związane z ilością przekrojów minimalnych zawierających i -te zdarzenie. Zwykle element jest tym ważniejszy, im więcej razy występuje w drzewie niezdatności (jest składnikiem większej ilości przekrojów minimalnych).

Innym ważnym czynnikiem jakościowym jest analiza typu zdarzeń pierwotnych w danym przekroju minimalnym. Ranga krytyczności [24] danego przekroju może być wówczas przyjęta na podstawie następującego rankingu składowych zdarzeń pierwotnych, zaprezentowanego w tabeli 1.

Powyższy ranking zdarzeń opiera się na założeniu, że błędy człowieka występują znacznie częściej niż uszkodzenia elementów aktywnych, a uszkodzenia elementów aktywnych są częstsze niż elementów biernych. Opierając się na powyższym rankingu możliwe jest jakościowe sklasyfikowanie ważności przekrojów minimalnych złożonych z dwóch i więcej zdarzeń pierwotnych. Tabela 2 przedstawia rangi dwuelementowych przekrojów minimalnych.

Tabela 1

Ranking zdarzeń pierwotnych dla analizy jakościowej przekrojów minimalnych
The ranking of primary events for the qualitative analysis of the minimal cut sets

Priorytet zdarzenia pierwotnego	Typ zdarzenia
1	Błąd człowieka (operatora)
2	Uszkodzenie elementu aktywnego
3	Uszkodzenie elementu biernego

Tabela 2

Rangi przekrojów minimalnych złożonych z dwóch zdarzeń pierwotnych
Ranks of the minimal cut sets composed of two primary events

Ranga przekroju minimalnego	Typ zdarzenia pierwotnego nr 1	Typ zdarzenia pierwotnego nr 2
1	Błąd człowieka	Błąd człowieka
2	Błąd człowieka	Uszkodzenie elementu aktywnego
3	Błąd człowieka	Uszkodzenie elementu biernego
4	Uszkodzenie elementu aktywnego	Uszkodzenie elementu aktywnego
5	Uszkodzenie elementu aktywnego	Uszkodzenie elementu biernego
6	Uszkodzenie elementu biernego	Uszkodzenie elementu biernego

2. Analiza ilościowa drzewa niezdatności

Jeżeli dla każdego zdarzenia pierwotnego są dostępne dane niezawodnościowe, możliwa jest analiza ilościowa drzewa niezdatności. Poniżej zestawiono podstawowe parametry niezawodnościowe systemów, będące wynikiem analizy drzewa niezdatności. Podstawowe parametry gotowościowe systemu szacowane z wykorzystaniem analiz FTA zestawiono w tabeli 3. W dalszej części przybli-

żono wybrane metody rozwijania drzewa niezdatności pod kątem uzyskania wartości tych parametrów.

Tabela 3

Zestawienie podstawowych parametrów wyznaczanych na podstawie FTA
Basic parameters determined with FTA

Parametr niezawodnościowy	Opis
$Q_0(t)$	Prawdopodobieństwo, że zdarzenie szczytowe wystąpi w chwili t
$R(t)$	Prawdopodobieństwo, że zdarzenie szczytowe nie wystąpi w przedziale czasu $[0,t)$
T	Średni czas do uszkodzenia systemu
$f(ZS)$	Częstość występowania zdarzenia szczytowego
$E(n)$	Przewidywana liczba uszkodzeń w danym okresie
$A_0(t)$	Średnia gotowość systemu w $[0,t)$

2.1. Aproksymacja górnego kresu dla $Q_0(t)$

Przekroje minimalne drzewa niezdatności oznaczono przez C_1, C_2, \dots, C_n . Przy założeniu niezależności zdarzeń wejściowych, prawdopodobieństwo zaistnienia wszystkich wejść k -tego przekroju minimalnego C_k wynosi:

$$\tilde{Q}_k(t) = \prod_{i \in C_k} q_i(t) \quad (2)$$

Jeśli przekroje nie mają części wspólnej, czyli są statystycznie niezależne, to prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia szczytowego wynosi:

$$Q_0(t) = 1 - \prod_{k=1}^n [1 - \tilde{Q}_k(t)] \quad (3)$$

Przeważnie warunek ten nie jest prawdziwy, w takim przypadku zawsze zachodzi nierówność:

$$Q_0(t) \leq 1 - \prod_{k=1}^n [1 - \tilde{Q}_k(t)] \quad (4)$$

Prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia szczytowego $Q_0(t)$ jest w przybliżeniu równe prawej stronie nierówności (4). Błąd oszacowania jest mały,

szczególnie dla q_i bliskich zeru. Zależność, opisująca górne ograniczenie dla $Q_0(t)$ jest zwykle wystarczającym przybliżeniem rzeczywistej wartości $Q_0(t)$.

2.2. Dokładna kalkulacja $Q_0(t)$ (algorytm ERAC)

W pewnych sytuacjach aproksymacja górnego kresu $Q_0(t)$ może nie wykazywać się wystarczającą dokładnością. Istnieją jednak metody alternatywne wyznaczania $Q_0(t)$. Jedną z bardziej rozpowszechnionych alternatyw jest algorytm ERAC (ang. *Exact Reliability/Availability Calculation* – dokładna kalkulacja niezawodności/gotowości), który został opracowany przez Aven'a [2].

Algorytm ERAC jest oparty na metodzie dekompozycji opracowanej przez Doulliez i Jamouille [9], oryginalnie zaprojektowanej dla sieci transportowych. Metoda Avena doczekała się wielu modyfikacji. Poniżej zaprezentowano odmianę algorytmu wykorzystaną w programie CARA-FaultTree.

Zakłada się, że drzewo niezdatności złożone jest z n niezależnych zdarzeń wejściowych. $\bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ opisuje losowy wektor stanu zdarzeń wejściowych, gdzie y_i jest równe 1, gdy i -te zdarzenie zachodzi, zaś równe 0 w przeciwnym przypadku. A opisuje wszystkie stany \bar{y} drzewa niezdatności, dla których zachodzi zdarzenie szczytowe (ZS). Prawdopodobieństwo $Q_0(t)$ jest opisane wówczas następująco:

$$Q_0(t) = \sum_{\bar{y} \in A} P[\bar{Y}(t) = \bar{y}] \quad (5)$$

Jeśli:

$$P[Y_i(t) = 1] = q_i(t)$$

$$P[Y_i(t) = 0] = 1 - q_i(t) = p_i(t)$$

to:

$$P[\bar{Y}(t) = \bar{y}] = \prod_{i=1}^n p_i(t)^{1-y_i} q_i(t)^{y_i} \quad (6)$$

Algorytm ERAC i wiele algorytmów pochodnych opiera się na formule (6). Podstawowym problemem wszystkich tych metod jest wyznaczenie zbioru A w maksymalnie efektywny sposób [24].

2.3. Wyznaczanie $R_0(t)$, T oraz $f(ZS)$ z użyciem symulacji Monte Carlo

Metoda Monte Carlo jest jedną z metod rozwiązywania zagadnień matematycznych przez tzw. modelowanie statystyczne, polegające na dobraniu do rozwiązywanego problemu, takiego procesu losowego, którego parametry staty-

styczne przybliżałyby poszukiwanie wartości rozwiązań. Jednym z zastosowań symulacji stochastycznej jest szacowanie parametrów ilościowych drzewa niezdatności [16].

Program komputerowy CARA-FaultTree pozwala na oszacowanie dokładnej wartości funkcji niezawodności systemu wraz z innymi parametrami niezawodnościowymi na drodze symulacji stochastycznej (metoda Monte Carlo). Głównymi parametrami symulacji są: przedział czasowy symulacji $[0,t)$ oraz ilość uruchomień symulacji. W każdym uruchomieniu jest symulowana realizacja osiągow systemu w przedziałach czasowych $[0,t)$, a chwile, w których zachodzi zdarzenie szczytowe są rejestrowane. Wyniki te są następnie opracowywane w celu oszacowania następujących własności analizowanego systemu:

- $R(t)$ – niezawodność systemu;
- T – średni czas do pierwszego wystąpienia zdarzenia szczytowego;
- $f(ZS)$ – rozkład funkcji gęstości prawdopodobieństwa długości czasu do zajścia ZS;
- $A_0(t)$ – gotowość systemu w $[0,t)$.

Wartość funkcji niezawodności jest szacowana jako względna ilość uruchomień, w których nie zaszło zdarzenie szczytowe w przedziale czasu $[0,t)$. Formułę opisującą oszacowaną wartość funkcji niezawodności na drodze symulacji można przedstawić następująco:

$$R_0^S(t) = \frac{n_{ZS0}}{n_{ZS0} + n_{ZS1}} = \frac{n_{ZS0}}{n} \quad (7)$$

gdzie:

- n_{ZS0} – ilość uruchomień symulacji, w których nie zaszło zdarzenie szczytowe;
- n_{ZS1} – ilość uruchomień symulacji, w których zaszło zdarzenie szczytowe;
- n – całkowita ilość uruchomień symulacji.

W przypadku gdy wszystkie uruchomienia symulacji dają w wyniku co najmniej jedno zdarzenie szczytowe, średni czas do pierwszego zajścia zdarzenia szczytowego T jest szacowany jako średnia arytmetyczna czasów T_i do pierwszego zajścia ZS w każdym uruchomieniu symulacji:

$$T^S = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (8)$$

Gdy jedno lub więcej uruchomień symulacji nie zakończyło się wygenerowaniem zdarzenia szczytowego w przedziale czasowym $[0,t)$, to program CARA-FaultTree szacuje wartość czasu do pierwszego uszkodzenia systemu według poniższej zależności:

$$T^S = \frac{\sum_{i=1}^m T_i}{m} \quad (9)$$

gdzie:

- T_i – czas do pierwszego uszkodzenia systemu dla uruchomienia, gdy zaszło zdarzenie szczytowe;
- m – całkowita liczba uruchomień symulacji, w których wystąpiło ZS.

Procedura symulacji nie ma zastosowania do statycznych drzew niezdatności, w których $q_i(t)$ nie jest zależne od czasu. Tak więc istotne jest, aby metodą Monte Carlo analizować dynamiczne drzewa niezdatności, czyli takie w których każdy przekrój minimalny drzewa zawiera przynajmniej jedno zdarzenie i , dla którego $q_i(t)$ jest czasowo zależne.

Symulacja Monte Carlo nie daje dużej dokładności wyników dla systemów bardzo niezawodnych. Przy analizie takich systemów zaleca się metodę całkowania numerycznego.

2.4. Kalkulacja $R_0(t)$, T i $E[n_f(t)]$ metodą całkowania numerycznego

Przedstawiono sposób uzyskiwania parametrów niezawodnościowych dla zdarzenia szczytowego z użyciem całkowania numerycznego. Metoda ta została opracowana przez Vesely'a [25], który zaimplementował ją w komputerowym programie KITT [26]. Kalkulacja tym sposobem jest określana w literaturze jako kinetyczna teoria drzewa (ang. *Kinetic Tree Theory, KTT*).

Analogicznie jak w aproksymacji górnego kresu dla $Q_0(t)$, przekroje minimalne drzewa oznaczono przez C_1, C_2, \dots, C_n . Prawdopodobieństwo wystąpienia k -tego przekroju wynosi:

$$\check{Q}_k(t) = \prod_{i \in C_k} q_i(t) \quad (10)$$

wprowadzając:

- $w_i(t)$ – częstość uszkodzeń i -tego elementu,
- $w_{C_k}(t)$ – częstość uszkodzeń przekroju C_k ,
- $w_0(t)$ – częstość uszkodzeń systemu,

częstość uszkodzeń systemu może być wyznaczona jako:

$$w_0(t) = \sum_{k=1}^n \frac{\partial Q_0(t)}{\partial Q_k(t)} w_{C_k}(t) \quad (11)$$

gdzie:

$$\frac{\partial Q_0(t)}{\partial Q_k(t)} \approx 1 - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n \tilde{Q}_l(t) \quad (12)$$

oraz

$$w_{C_k}(t) = \sum_{i \in C_k} \frac{\tilde{Q}_k(t)}{q_i(t)} [1 - q_i(t)] \lambda_i \quad (13)$$

W powyższym wyrażeniu λ_i jest intensywnością uszkodzeń dla i -tego elementu, tak więc składniki przekroju opisane danymi typu uszkodzenie na żądanie (ang. *on demand failure*) nie podlegają sumowaniu.

Intensywność uszkodzeń systemu definiuje się jako:

$$\lambda_0(t) = \frac{w_0(t)}{1 - Q_0(t)} \quad (14)$$

Ostatecznie wyznacza się metodą całkowania: niezawodność systemu $R_0(t)$, średni czas do uszkodzenia systemu T oraz średnią liczbę uszkodzeń systemu $\bar{n}_f(t)$.

$$R_0(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda_0(\tau) d\tau\right] \quad (15)$$

$$T = \int_0^{\infty} R_0(t) dt \quad (16)$$

$$E[n_f(t)] = \bar{n}_f(t) = \int_0^t w_0(\tau) d\tau \quad (17)$$

Wymienione formuły znajdują zastosowanie tylko do bardzo niezawodnych systemów. Dla systemów zawodnych nie wykazują wystarczającej dokładności i powinna być rozważona możliwość wykorzystania symulacji.

2.5. Kalkulacja $f(ZS)$ z użyciem „ręcznej metody obliczeniowej”

Do wyznaczenia częstości występowania zdarzenia szczytowego może być wykorzystana tzw. „ręczna metoda obliczeniowa” (ang. *Hand Calculation Method*). W przypadku, gdy w każdym przekroju minimalnym C_K drzewa o zbiorze wszystkich przekrojów minimalnych $\Omega = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, jest zawarty jeden i tylko jeden element z określoną częstością uszkodzeń, a pozostałe elementy w każdym przekroju są z danymi typu uszkodzenie na żądanie, zachodzi zależność:

$$f(ZS) = \sum_{C_K \in \Omega} [f_{l_K} \cdot \prod_{\substack{i \in C_K \\ i \neq l_K}} q_i(t)] \quad (18)$$

gdzie:

- $f_{l_K}(t)$ – częstość uszkodzeń zdarzenia wejściowego o danych tego typu w przekroju C_K ,
- $q_i(t)$ – prawdopodobieństwo, że i -te zdarzenie wejściowe w przekroju C_k zachodzi w czasie t .

W ogólnym przypadku zachodzi zależność:

$$f(ZS) = \sum_{C_K \in \Omega} [\sum_{l \in C_K} \lambda_l \prod_{\substack{i \in C_K \\ i \neq l}} q_i(t)] \quad (19)$$

gdzie:

- λ_l – częstość/intensywność uszkodzeń l -tego elementu,
- $q_i(t)$ – prawdopodobieństwo, że zdarzenie wejściowe i zachodzi w czasie t .

Jeśli przekroje minimalne nie są wyłączającymi się, możliwe jest zastosowanie alternatywnych metod obliczeniowych. W programie CARA-FaultTree są oferowane dwie alternatywne metody. Metoda pierwsza polega na uzyskaniu wartości częstości występowania zdarzenia szczytowego z wykorzystaniem schematu podobnego jak przy aproksymacji górnego ograniczenia dla $Q_0(t)$. Metoda druga polega na zastosowaniu metody dokładnej kalkulacji, opartej na algorytmie ERAC.

Jednym z etapów analizy ilościowej drzewa niezdatności jest bardzo często oszacowanie, które zdarzenia lub przekroje minimalne są najistotniejsze dla rozpatrywanego systemu ze względu na zapewnienie optymalnej wartości określonego wskaźnika niezawodnościowego.

Uwagi końcowe

Analiza ilościowa polega na znalezieniu najbardziej czułych elementów (*miary ważności elementów*), których niezawodność należy poprawić w celu podniesienia niezawodności całego systemu. Analogicznie rozważa się ważność przekrojów minimalnych (*lokalne miary ważności*). Problematyka ta jest powiązana z poszukiwaniem tzw. *słabych ogniw w systemie*, czyli najbardziej zawodnych elementów i grup elementów w systemie.

Generalnie, ważność elementu w rozważanym systemie (z punktu widzenia niezawodności) jest uzależniona od jego niezawodności i struktury niezawodnościowej, w jakiej on pracuje.

Wpływ pierwszego z wymienionych czynników jest oczywisty. Odnośnie umiejscowienia elementu w strukturze niezawodnościowej należy zwrócić uwagę, iż element jest tym ważniejszy, im bardziej przypomina on samodzielny element włączony szeregowo w strukturę systemu. Jego znaczenie (wpływ na zmianę niezawodności systemu) maleje wraz ze wzrostem poziomu jego rezerwowania.

W celu ilościowej analizy porównawczej ważności elementów wprowadzono tzw. *miary ważności*. Istnieje wiele różnych miar, których praktyczne zastosowanie jest uwarunkowane głównie tym, jaki aspekt ważności jest w danym przypadku najistotniejszy. Należy podkreślić fakt, iż różne miary niezawodnościowe prowadzą do różnych rankingów ważności, co wynika z różnych definicji miar.

Możliwe jest zastosowanie miar ważności zarówno dla analizy elementów naprawialnych, jak i nienaprawialnych, jednak interpretacja ważności gdy elementy są naprawialne jest znacznie trudniejsza. Najczęściej używane miary ważności w analizie ilościowej drzewa niezdatności to:

- niezawodnościowa miara Vesely-Fussell'a,
- niezawodnościowa miara Birnbauma,
- potencjał poprawy niezawodności,
- miara krytyczności,
- strukturalna miara Birnbauma.

Literatura

1. Błachnio J., *Metody badań bezpieczeństwa lotów w zakresie techniki lotniczej*, Problemy Eksploatacji 4(27)/97, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1997, s. 393 – 406.
2. Vesely W. E., Goldberg F. F., Roberts N. H., Haasl D. F., *Fault Tree Handbook*, NUREG-0492. U. S. Nuclear Regulatory Commission, Government Printing Office, Washington, January 1981.

3. Vatn, J., *Finding minimal cut sets in a fault tree*, Reliability Engineering and System Safety 36, 1992, s. 59 – 62.
4. Allan R. N., Rondiris I. L., Fryer D. M., *An efficient computational technique for evaluating cut/tie sets and common-cause failure of complex systems*, IEEE Transactions on Reliability. Vol. R-30, No. 2, 1981, s.101 – 109.
5. Aven, T., *Reliability/Availability Evaluations of Coherent Systems Based on Minimal Cut Sets*, Reliability Engineering Vol. 13, 1985, s. 93 – 104.
6. Bengiamin N. N., Bowen B. A., Schen K. F., *An efficient algorithm for reducing the complexity of computation in fault tree analysis*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-23, No. 10, 1976, s. 1442 – 1446.
7. Brown K. S., *Evaluating fault trees (AND & OR gate only) with repeated events*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-39, No. 2, 1990, s. 226 – 235.
8. Camarinopoulos L., Yllera J., *An improved top-down algorithm combined with modularization as a highly efficient method for fault tree analysis*, Reliability Engineering, Vol. 11, 1985, s. 93 – 108.
9. Chybowski L., *Zastosowanie drzewa uszkodzeń do wybranego systemu siłowni okrętowej*, Voprosy Povyšeniâ Èffektivnosti Sudovyh i Stacionarnyh Ènergetičeskikh Ustanovok. Meždunarodnyj Sbornik Naučnyh Trudov. KGTU, Kaliningrad 2001, s. 178 – 183.
10. Chybowski L., *Auxiliary installations' fault tree model for operation analysis of vessel's power plant unit*, Balttehmaš – 2002, KGTU, Kaliningrad, Czerwiec 2002, s. 299 – 301.
11. Doulliez, P., Jamouille, J., *Transportation Networks with Random Arc Capacities*, RAIRO, 3, 1972, s. 45 – 60.
12. Fussell J.B., Vesely W. E., *A New Methodology for Obtaining Cut Sets for Fault Trees*, Transactions American Nuclear Society, Vol. 14, No. 1, 1972, s. 262 – 263.
13. Fussell J. B., Henry E. B., Marshall N. H., *MOCUS – A Computer to Obtain Minimal Sets from Fault Trees*, Aerojet Nuclear Corp., ANCR-1156, 1974.
14. Garriba S., Mussio P., Reina G., Volta G., *Efficient construction of minimal cut sets from fault trees*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-26, No. 2, 1977, s. 88 – 94.
15. Kumoto H., Henley E. J., *Top-down algorithm for obtaining prime implicant sets of non-coherent fault-trees*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-27, No. 4, 1978, s. 242 – 249.
16. Limnios N., Ziami R., *An algorithm for reducing cut sets in fault tree analysis*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-35, No. 5, 1986, s. 559 – 562.
17. Matuszak Z., Surma T., *Drzewo uszkodzeń i elementy algebry Boole'a jako sposób oceny niezawodności i diagnozowania instalacji siłowni okrętowej*,

- Materiały XVI Sesji Naukowej Okrętowców, Szczecin – Dziwnówek 1994. Wyd. Stoczni Szczecińskiej S.A., Szczecin 1994, cz. II, s. 69 – 76.
18. Nagel P. M., *A Monte Carlo Method to Compute Fault Tree Probabilities*, System Safety Symposium, Boeing/UW, 1965.
 19. Page L. B., Perry J. E., *A simple approach to fault-tree probabilities*, Computers and Chemical Engineering, Vol. 10, 1986, s. 249 – 257.
 20. Page L. B., Perry J. E., *An algorithm for exact fault-tree probabilities without cut sets*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-35, No. 5, 1986, s. 544 – 558.
 21. Page L. B., Perry J. E., *An algorithm for fault-tree probabilities using the factoring theorem*, Microelectronics and Reliability, Vol. 28, No. 2, 1988, s. 273 – 286.
 22. Pande P. K., Spector M. E., Chatterjee P., *Computerised Fault Tree Analysis: TREEL and MICSUP*, ORC-75-3, University of California, 1975.
 23. Patterson-Hine F. A., Koen B. V., *Direct evaluation of fault trees using object-oriented programming techniques*, IEEE Transactions on Reliability, Vol R-38, No. 2, 1989, s. 186 – 192.
 24. Rasmuson D. M., N. H. Marshall, *A Core Efficient Cut Set Algorithm*, IEEE Transactions on Reliability (R-27, No 4), 1978, s. 250 – 253.
 25. Stecher K., *Evaluation of large fault-trees with repeated events using efficient bottom-up algorithm*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. R-35, No.1, 1986, s. 51 – 58.
 26. Vesely W. E., *Analysis of Fault Trees by Kinetic Tree Theory*, Idaho Nuclear Corp., IN-1330, 1969.
 27. Vesely W. E., *A Time-Dependent Methodology for Fault Tree Evaluation*, Nuclear Engineering and Design, Vol. 13, No 2, 1970, s. 337 – 360.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler
dr hab. inż. Jerzy Listewnik, prof. AM

Adresy Autorów

mgr inż. Leszek Chybowski
Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny
al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

dr hab. inż. Zbigniew Matuszak, prof. AM
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Technicznej Eksploatacji Siłowni Okrętowych
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin