

УДК 621.431

Leszek Chybowski  
Robert Grzebieniak  
Akademia Morska  
Szczecin, Polska

## **APLIKACJE ANALIZY DRZEWA NIEZDATNOŚCI DO OCENY BEZPIECZEŃSTWA I NIEZAWODNOŚCI SYSTEMÓW OKRĘTOWYCH NA TLE WYKORZYSTANIA TEJ METODY W INNYCH GAŁĘZIACH PRZEMYSŁU**

### **1. Wprowadzenie**

Analiza systemów w oparciu o drzewo niezdatności (ang. *Fault Tree Analysis, FTA*) polega na szczegółowym i dedukcyjnym badaniu zasad pracy rozpatrywanego systemu technicznego.

Metodę tę wykorzystuje się w analizie bezpieczeństwa i niezawodności na etapie projektowania, jako pomoc w diagnozowaniu stanów systemów będących w eksploatacji, a także w prowadzeniu dochodzeń powypadkowych. Istotą tej metody jest graficzna prezentacja zależności logicznych pomiędzy określonymi stanami niezdatności elementów rozpatrywanego systemu technicznego, błędami w pracy sprzętu i oprogramowania, błędami człowieka (operatora) oraz zdarzeniami zewnętrznymi np. reprezentującymi wzajemne interakcje pomiędzy różnymi systemami ora środowiskiem zewnętrznym, których kombinacja może doprowadzić do rozpatrywanego określonego stanu całego systemu czyli zajścia tzw. *zdarzenia szczytowego*.

Dotychczas metoda znalazła zastosowanie w wielu różnych gałęziach przemysłu np. przemyśle chemicznym, kosmonautyce, aeronautyce, energetyce itp. Poniżej przedstawiono rozwój metody, najważniejsze kierunki zastosowań oraz miejsce metody w zastosowaniu do analizy niezawodności i bezpieczeństwa siłowni okrętowych statków transportowych i oceanotechnicznych.

### **2. Rozwój metody *FTA***

Metoda analizy drzewa niezdatności sukcesywnie rozwijana była przez ostatnie kilka dekad, w czym uczestniczyła duża grupa naukowców oraz inżynierów. W 1941 roku Heinrich [11] stworzył metodologię, która dała podwaliny analizie drzewa niezdatności, zilustrował on liniową sekwencję

wybranych czynników prowadzących do wypadku (teoria domina). Jednak jako pierwszy metodą *FTA* w 1961 roku posłużył się Watson z Bell Labs., który we współpracy z Siłami Powietrznymi USA przeprowadził analizę bezpieczeństwa struktur sterowania odpalaniem pocisków systemu raketowego *Minuteman* [18]. Firmy powiązane z przemysłem lotniczym m.in. Boeing dostrzegły walory tej metody analizy i zaadoptowały ją do własnych potrzeb. W roku 1966 Boeing opracował program *BACSIM* do analizy drzew niezdatności systemów wielostanowych (maksymalnie do 12 stanów pracy), a następnie program Calcomp służący do rysowania dużych drzew przy wykorzystaniu plotera. Oba programy opracowano na platformę IBM 370. W kolejnych latach metodę zaczęto wykorzystywać w analizie bezpieczeństwa elektrowni atomowych na etapach projektowania oraz restrukturyzacji.

Pierwsze publikacje na temat metody *FTA* pojawiły się w początkach lat sześćdziesiątych, których autorami byli m.in. Watson [18], Maerns [12] (podstawowa metodologia), Haasl [9] (rozwój metod konstrukcji drzew niezdatności). W kolejnych latach powstało wiele publikacji dotyczących rozwoju i aplikacji metody *FTA*. Zbiory informacji bibliograficznych dotyczących drzew niezdatności można znaleźć m.in. w [7, 8, 17].

W kolejnych latach rozwijanych było wiele komputerowych programów wspomagających jakościowe i ilościowe analizy drzew niezdatności, których twórcami byli m.in. Schroeder (*BACSIM*, *AFTD*), Vesely (*KITT*, *PREPP*), Worrel (*SETS*), Willie (*FTAP*) i inni [7, 17]. Do najistotniejszych zmian, które zaszły w wyniku procesu komputeryzacji metody *FTA* można zaliczyć:

- przejście z ręcznego tworzenia drzew do ich budowy z wykorzystaniem programów komputerowych;
- wprowadzenie do powszechnego użytku przyjaznych użytkownikowi programów do analiz *FTA* na komputery PC współpracujące z drukarkami, zamiast jak to miało miejsce wcześniej trudnych w obsłudze programów dla maszyn typu *mainframe* połączonych z dużymi ploterami;
- wykorzystanie graficznego interfejsu użytkownika w programach do analiz *FTA* w miejsce kodowania tekstowego;
- poprawa metod analitycznych w związku z wykorzystaniem dokładniejszych i szybszych algorytmów obliczeniowych.

Przez wszystkie lata swojego istnienia metoda rozwijana była w różnych wątkach, którymi były m.in. automatyczna synteza drzew niezdatności – Russell; analiza ważności zdarzeń – Lambert, Vesely, Russell; efektywne algorytmy do ilościowych i jakościowych analiz drzew niezdatności (kinetyczna teoria drzewa, algorytm *MOCUS*, algorytm *MICSUP*) – Vesely, Pande i inni. W metodzie *FTA* widoczne są pewne trendy rozwojowe, sytuujące metodę w określonych zastosowaniach, co zostało przedstawione w tabeli 1.

Tab. 1. Kierunki rozwojowe metody analizy drzewa niezdatności

Kryterium podziału	Trendy alternatywne	
Poszukiwanie rozwiązań	Analityczne	Symulacyjne
Kierunek analizy jakościowej	Od góry do dołu	Od dołu do góry
Zależności czasowe między zdarzeniami	Statyczne drzewa niezdatności	Dynamiczne drzewa niezdatności
Narzędzie do analizy drzewa niezdatności	Analiza „ręczna”	Analiza z użyciem komputera
Użyta logika zdarzeń	Logika klasyczna	Logika rozmyta
Synteza drzew niezdatności	Ręczna Algorytmiczna Automatyczna	
Różne metody analizy	Redukcja Boole’a Binarne wykresy decyzyjne Rozszerzone drzewa niezdatności Metody aproksymacji Algorytmy genetyczne	

Do dnia dzisiejszego analiza drzewa niezdatności jest szeroko stosowana jako skuteczne narzędzie w przemyśle samochodowym, kolejowym, chemicznym. Metoda ta jest wykorzystywana także w innych gałęziach przemysłu, m.in. okrętownictwie, robotyce, automatyce itp., choć nie na tak szeroką skalę. Opis różnych adaptacji metody oraz problematyka poprawy jej dokładności i poszerzenia możliwości zastosowań doczekały się wielu publikacji zarówno światowych jak i polskich. W tabeli 2. zaprezentowano najbardziej znane projekty, w realizacji których wykorzystywana była metoda *FTA*.

Tab. 2. Wybrane zastosowania analizy drzewa niezdatności

Gałąź przemysłu	Wybrane zastosowania
Konstrukcje samolotów	Samoloty pasażerskie (m.in. Boeing 737, 757 i 767), myśliwce, bombowce, tankowce, helikoptery
Energetyka	Elektrownie atomowe, słoneczne oraz konwencjonalne
Systemy transportowe	Kolejnictwo, transport samochodowy
Kosmonautyka	Stacje kosmiczne, satelity, pojazdy księżycowe, projekty: Apollo, Space Shuttle itp.
Robotyka	Systemy sterowania
Systemy raketowe	Projekty: Minuteman, Tomahawk, SRAM, ALCM
Transport morski, górnictwo morskie i oceanotechnika	Platformy wiertnicze i wydobywcze, FPSO, tankowce
Torpedy	Systemy odpalania i naprowadzania
Informatyka	Bezpieczeństwo oprogramowania oraz analiza pracy sieci komputerowych

### 3. Zastosowanie metody *FTA* dla systemów okrętowych

Morza i oceany świata zajmują powierzchnię około 361 mln. km<sup>2</sup>, co stanowi w przybliżeniu 71% powierzchni naszej planety. Stanowią one środowisko pracy statków transportowych i rybackich, a także instalacji oceanotechnicznych oraz jednostek bezpośrednio lub pośrednio związanych z górnictwem morskim, takich jak platformy wiertnicze, wydobywcze, jednostki wydobywczo-przetwórcze, składujące, statki pomocnicze, badawcze statki sejsmiczne i inne wspierające operacje wydobywania kopalin, w tym głównie ropy naftowej oraz gazu ziemnego, które to surowce stanowią podstawowe źródło energii dla cywilizacji ludzkiej. Bezpieczeństwo żeglugi oraz eksploatacji wszystkich tych obiektów jest kwestią bardzo istotną z uwagi na potencjalną możliwość spowodowania katastrofy ekologicznej, np. wywołanej wyciekami produktów ropopochodnych do środowiska morskiego. Inną ważną kwestią jest ryzyko utraty zdrowia i życia załóg i pasażerów statków, a także utratę dużej wartości mienia materialnego. Wszystkie te czynniki koncentrują się zwłaszcza wokół statków oceanotechnicznych, które z uwagi na dużą liczebność załóg (często kilkaset osób), a także specyfikę wykonywanych prac przy dążeniu do maksymalizacji efektywności produkcji, wymagają bardzo obojętnej kontroli pod względem bezpieczeństwa i niezawodności ich pracy

Jednym z czynników mających na celu zapewnienie efektywnej i bezpiecznej pracy obiektów pływających jest prawidłowe spełnienie zadań do jakich przewidziana jest siłownia okrętowa. Może to zostać spełnione tylko przy zachowaniu odpowiednich standardów w zakresie bezpieczeństwa, procedur eksploatacyjnych, wyszkolenia operatorów niezawodności, bezpieczeństwa i efektywności podsystemów siłowni okrętowej w tym maszyn i urządzeń okrętowych, itp. Wymaganie to dotyczy wszystkich etapów „życia” siłowni okrętowej, tj. począwszy od zamysłu, poprzez konstrukcję, etap eksploatacji aż do wyłączenia obiektu z użycia.

Pośród wielu pozycji literaturowych prezentujących problematykę szacowania miar niezawodnościowych systemów okrętowych, w tym podejmujących próby aplikacji, adaptacji oraz ewolucji metody *FTA* dla systemów okrętowych należy wymienić:

- publikacje dotyczące szacowania miar niezawodnościowych systemów siłowni statków transportowych, gdzie na uwagę zasługują prace profesorów Z. Matuszaka, Z. Smalko, A. Brandowskiego, B. M. Ayyuba, J. Girtlera, J. Z. Czajguckiego i innych;
- publikacje dotyczące szacowania miar niezawodnościowych systemów okrętowych statków wspierających operacje wydobywania ropy naftowej i gazu ziemnego (ilość publikacji jest mniejsza od dotyczącej statków transportowych, a metody analizy są często prezentowane w sposób bardzo ogólny), gdzie na uwagę zasługują prace profesorów T. Avena, Z. Matuszaka, M. Hanna i innych.

Należy zwrócić uwagę, iż pośród publikacji dotyczących szacowania niezawodności systemów siłowni okrętowych bardzo rzadko i zwykle w sposób ogólny podejmowana jest tematyka zastosowania metod zarówno analitycznych, jak i symulacyjnych w odniesieniu do systemów siłowni

okrętowych obiektów oceanotechnicznych, dlatego mając na uwadze konsekwencje zawodności bezpieczeństwa tych systemów istotne jest prowadzenie prac rozwojowych w tym zakresie.

Głównymi celami w zastosowaniu metody drzewa niezdatności w szerokokorozumianej analizie pracy instalacji okrętowych są:

- oszacowanie częstości występowania niepożądanych zdarzeń oraz ich wybranych kombinacji, a także estymacja parametrów niezawodnościowych elementów i podsystemów danego systemu technicznego (instalacji) – co zostało przedstawione m.in. w pracach [4, 5, 6];
- wyznaczenie kombinacji takich zdarzeń elementarnych, które przyczyniają się do zaistnienia określonych stanów niezdatności rozpatrywanej instalacji (analiza wpływu uszkodzeń elementów instalacji, błędów oprogramowania, błędów obsługi, środowiska pracy, zasad i procedur eksploatacyjnych, lokalizacji systemu, zjawisk przyrodniczych itp.) – przykłady zostały pokazane w pracach [1, 3, 10];
- identyfikacja oraz ocena skuteczności rozwiązań technicznych oraz procedur eksploatacyjnych wdrożonych w celu zwiększenia niezawodności, bezpieczeństwa i efektywności pracy instalacji siłowni – co zostało przedstawione m.in. w pracach [1, 2, 16];
- analiza interakcji przyczynowo-skutkowych pomiędzy elementami instalacji, w czasie różnych stanów pracy systemu (normalna eksploatacja, stany awaryjne, prace naprawcze i konserwacyjne, rozruch i odstawienie instalacji, podróż morska, postój w porcie, praca z systemem dynamicznego pozycjonowania, itp.) – co zostało zaprezentowane w pracach [2, 13];
- analiza czynnika ludzkiego w procesie eksploatacji (interfejs człowiek maszyna, zagadnienia bezpieczeństwa operatora) i jego udziału w powstawaniu stanów awaryjnych (błędy operatorskie, konserwacyjne, zaniechania itp.) – co zostało przedstawione m.in. w pracach [1, 2, 10];
- szerokopojęta analiza środowiska pracy i wzajemnych interakcji pomiędzy środowiskiem, instalacją oraz operatorem – co pokazano m.in. w pracach [2, 6, 14, 16].

#### **4. Uwagi końcowe**

Jak pokazano w tabeli metoda *FTA* doczekała się również adaptacji w transporcie i górnictwie morskim. Analiza drzewa niezdatności jest obecnie jedną z zalecanych przez normy metod szacowania ryzyka dla statków morskich i obiektów oceanotechnicznych [15, 16]. Również problematyka bezpieczeństwa pracy podsystemów siłowni okrętowej i instalacji ogólnokrętowych została podjęta w pracach zarówno polskich jak i zagranicznych w odniesieniu do statków transportowych [1, 2, 4, 13, 14] oraz stacjonarnych i pływających obiektów wspierających eksplorację dna morskiego [3, 5, 6, 10]. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, iż o ile *FTA* jest powszechnie używana w innych dziedzinach przemysłu, o tyle w zastosowaniu dla przemysłu morskiego stanowi niejako uzupełnienie dla metody

analizy rodzajów i skutków niezdatności *FMEA*. Metoda *FTA* pomimo swojej siły jako skutecznego narzędzia pozostaje w cieniu innych metod w zastosowaniach dla systemów okrętowych. Przyczyn takiego stanu należy upatrywać w złożoności niezawodnościowej analizy ilościowej obiektów morskich. Natomiast w sytuacji dostępu do informacji o uszkodzeniach elementów tych systemów korzystnym jest zastosowanie metody *FTA*, która stanowi doskonale uzupełnienie dla analizy *FMEA* dając wyniki w postaci oszacowań ilościowych. Analiza drzewa niezdatności dla instalacji siłowni okrętowych podobnie jak dla innych obiektów technicznych może być prowadzone na różnych poziomach, a w szczególności na:

- *poziomie 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.);
- *poziomie systemowym*, określającym jakie podsystemy morskiego układu transportowego (statek, personel obsługujący, wpływ otoczenia) mogły być przyczyną uszkodzenia;
- *poziomie przyczynowym*, określającym, jakie zdarzenia mogły być przyczyną uszkodzenia systemu.

## Literatura

1. Ayyub B. M., *Guidelines for Probabilistic Risk Analysis of Marine Systems*. Report CBST-97-101. University of Maryland, College Park, May 1997.
2. Brandowski A., Liberacki R., Nowak P., *Badania bezpieczeństwa napędowego statku serii B-488*. Praca badawcza nr 48 / 2000 / PB. WOiO Politechnika Gdańska, Gdańsk 2000.
3. Chybowski L., *Analiza pracy systemu energetyczno-napędowego statku typu offshore z wykorzystaniem metody drzew uszkodzeń*. Materiały XXII Sympozjum Siłowni Okrętowych SymSO 2001. WTM Politechnika Szczecińska, Szczecin 2001, s. 83-88.
4. Chybowski L., *Szacowanie niegotowości systemu siłowni okrętowej metodą drzewa uszkodzeń*. Балттехмаш – 2004, KGTU, Kaliningrad, Czerwiec 2004, s. 124-127.
5. Chybowski L., Grzebieniak R., *Oszacowanie niegotowości systemu chłodzenia wodą morską elektrowni głównych statku pozycjonowanego dynamicznie z wykorzystaniem szczególnych algorytmów*. Materiały XXVI Sympozjum Siłowni Okrętowych, AMW Gdynia 2005, s. 38-48.
6. Chybowski L., Matuszak Z., *Symulacja niegotowości systemu siłowni okrętowej oparta na drzewie niezdatności*. Zeszyty Naukowe nr 1 (73) Akademii Morskiej w Szczecinie, Explo-Ship 2004, Akademia Morska, Szczecin 2004, s. 145-159.
7. Ericsson C. II. *Fault Tree Analysis – A History*. 01.01.2006. <http://www.fault-tree.net/papers/ericson-fta-history.pdf>
8. *Fault Tree Analysis. A Special Bibliography from the NASA Scientific and Technical Information (STI) Program*. Publikacja NASA, 02.2000.

9. Haasl D. F., *Advanced Concepts in Fault Tree Analysis*. System Safety Symposium, Boeing/UW, 1965.
10. Hann M., Siemionow J. N., Rosochaci W., *Wybrane zagadnienia bezpieczeństwa i niezawodności obiektów górnictwa morskiego*. IOiO, Politechnika Szczecińska. Szczecin 1998
11. Heinrich H. W., *Industrial Accident Prevention*. 2-nd Edition. McGraw Hill, New York 1941, s. 448.
12. Maerns A. B., *The Study of Unlikely Events in Complex Systems*. System Safety Symposium, Boeing/UW, 1965.
13. 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. Część II, Wyd. Stoczni Szczecińskiej, Szczecin, 1994, pp. 69-76.
14. Matuszak Z., Surma T., *Application of the damage tree and elements of the Boole algebra in estimating of reliability of power plant engine room installations*. Scientific Conference "Transport Systems Engineering", Section 3 - Operation, Maintenance and Reliability of Transport Systems, Warszawa, 1995, pp. 107-112.
15. *Risk assessment applications for marine and offshore oil and gas industries*. American Bureau of Shipping, Houston, June 2000.
16. *Risk-based Decision-making Guidelines. Vol. 3 Procedures for Assessing Risks – 11. Fault Tree Analysis*. United States Coast Guard, 2002.
17. 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.
18. Watson H. A., *Launch Control Safety Study*. Section VII Vol. 1, Bell Labs., Murray Hill, NJ, 1961.

**FAULT TREE ANALYSIS APPLICATIONS FOR MARINE SYSTEMS SAFETY AND RELIABILITY ESTIMATION AGAINST A BACKGROUND OF APPLICATION OF THIS METHOD IN OTHER INDUSTRIAL BRANCHES**

General outline of Fault Tree Analysis (*FTA*) method development has been presented in the paper. The most important development tendencies and applications of *FTA* have been shown. Possible application areas of *FTA* method for reliability and safety estimation of marine power plant systems and general purpose systems installed onboard transport ships and offshore technical objects have been pointed out.

**APLIKACJE ANALIZY DRZEWA NIEZDATNOŚCI DO OCENY  
BEZPIECZEŃSTWA I NIEZAWODNOŚCI SIŁOWNI OKRĘTOWYCH NA TLE  
WYKORZYSTANIA TEJ METODY W INNYCH GAŁĘZIACH PRZEMYSŁU**

W materiale przedstawiono w ujęciu ogólnym rozwój metody analizy drzewa niezdatności *FTA*. Zestawiono najważniejsze trendy rozwojowe i zastosowania metody *FTA*. Przedstawiono możliwe zastosowania metody *FTA* dla oceny niezawodności i bezpieczeństwa systemów siłowni okrętowych i ogólnego przeznaczenia zainstalowanych na statkach transportowych i obiektach oceanotechnicznych.