Analiza drzewa niezdatności – wprowadzenie do metody

LESZEK CHYBOWSKI

Tematem artykułu jest metoda szeroko wykorzystywana w analizie łańcuchów przyczynowo-skutkowych – analiza drzewa niezdatności. To proste, a jednocześnie bardzo przydatne narzędzie jest często stosowane przez inżynierów różnych specjalności. Do przygotowania tekstu wykorzystano fragmenty z wprowadzenia do książki pt. „Analiza drzewa niezdatności. Podstawy teoretyczne i zastosowania" (Chybowski L., Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2017) w całości poświęconej tej metodzie. Publikacja przybliża analizę drzewa niezdatności laikom, a specjalistów zachęca do jej zgłębiania.

Metody analizy systemowej można w ogólności podzielić na indukcyjne i dedukcyjne (rys. 1). Te pierwsze prowadzą do wypracowania teorii ogólnych na bazie szczególnych. W metodach indukcyjnych analizowane jest zachowanie systemu przy zaistnieniu określonych zdarzeń. Metody indukcyjne wykorzystywane są przy określeniu możliwych do zaistnienia stanów systemu, tak więc metody te wykorzystywane są w procesie wstępnej analizy działania systemu (por. [3, 5]).

Metody dedukcyjne natomiast na drodze dekompozycji prowadzą w oparciu o wiedzę ogólną do wypracowania jej przypadków szczególnych. Tak więc w przypadku dedukcji dla przyjętego postulowanego stanu systemu odnajduje się zdarzenia, których kombinacja może

przyczynić się do zaistnienia rozpatrywanej sytuacji [1].

Jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod dedukcyjnych jest FTA (ang. *Fault Tree Analysis*) [2]. Metoda ta bazuje na graficznym modelu logicznym kombinacji zdarzeń (uszkodzeń elementów, błędów oprogramowania, błędów ludzkich i oddziaływania środowiska) mogących wystąpić w czasie eksploatacji złożonego systemu technicznego (ang. *Complex Technical System* – CTS), których koincydencja powoduje wystąpienie określonej sytuacji niepożądanej zamodelowanej poprzez tzw. zdarzenie szczytowe. Zestawienie jednych z częściej stosowanych symboli w metodzie FTA przedstawiono w tabeli 1, zaś przykładowy model FTA pokazano na rysunku 2.

Metoda FTA ma zastosowanie m.in. w genezowaniu, diagnozowaniu i prognozowaniu stanu maszyn i procesów.

Metoda FTA ma szerokie zastosowanie w nauce i technice, w szczególności jest przydatna w [1]:

- schematycznej wizualizacji relacji przyczynowo-skutkowych w systemie,
- wspomaganiu projektowania systemów i ocenie zmian rozwijanych produktów,
- optymalizacji wykorzystania zasobów,
- określeniu jakościowych i ilościowych charakterystyk niezawodnościowych (niezawodność, gotowość, średni czas do uszkodzenia, częstość uszkodzeń itp.),
- identyfikacji krytycznych elementów systemu (analiza ważności),
- ocenie jakości (weryfikacja elementów, certyfikacja produktów, ocena skuteczności rozwiązań technicznych oraz procedur eksploatacyjnych),
- genezowaniu, diagnozowaniu i prognozowaniu stanu maszyn i procesów,
- analizie ryzyka, monitorowaniu i sterowaniu bezpieczeństwem systemu,

Rys. 1. Wybrane metody analizy systemowej [2]

Rys. 2. Przykładowe drzewo niezdatności instalacji chłodzenia wodą morską siłowni okrętowej kontenerowca 6500 TEU [1]

Rys. 3. Elementy rozwoju metody FTA [1]

W celu usprawnienia analizy FTA opracowano wiele programów komputerowych oferujących graficzne interfejsy użytkownika oraz zaawansowane algorytmy obliczeniowe.

- dochodzeniu powypadkowemu (procesy zużycia, czynnik ludzki, interakcje ze środowiskiem),
- identyfikacji zdarzeń o wspólnej przyczynie (ang. *common cause analysis*).

Istnieje niezwykle bogata bibliografia zagraniczna obejmująca setki publikacji poświęconych FTA wydanych w ostatnim półwieczu [3, 4]. Czytelnicy polskojęzyczni pomimo bogactwa źródeł mają głównie możliwość zapoznania się z fragmentarycznym ujęciem tematu w postaci prezentacji FTA jako jednej z wielu metod. Powoduje to, że w polskojęzycznych publikacjach brak jednoznaczności co do nomenklatury, w tym samej nazwy metody, która często jest niejednoznaczna i może prowadzić do nieporozumień. Pośród stosowanych polskich nazw metody wymienić należy analizę drzewa niezdatności, analizę drzewa błędów, analizę drzewa niesprawności, analizę drzewa uszkodzeń i drzewa zdarzeń (ta ostatnia nazwa jest błędna i może prowadzić do nieporozumień, gdyż analiza drzew zdarzeń ETA stanowi odrębną metodę – por. rys. 1). Autor artykułu zgodnie z wytycznymi Polskiego Komitetu Normalizacyjnego [4] przyjął nazwę analiza drzewa niezdatności.

Wybrane trendy rozwoju metody przedstawiono na rysunku 3. Pośród najważniejszych kierunków rozwoju metody FTA należy wymienić automatyczną syntezę drzew niezdatności, analizę rosnącej liczby wskaźników eksploatacyjnych (gotowość, koszty eksploatacji, liczbę części zamiennych, ważność zdarzeń), doskonalenie algorytmów ilościowej i jakościowej analizy systemów, zaawansowaną analizę interakcji w systemie (zależności funkcjonalne, uszkodzenia o wspólnej przyczynie) itd.

Podwaliny metody FTA stanowi teoria domina, którą stworzył w 1941 r. Heinrich. Wykorzystał on do zamodelowania sytuacji niepożądanej liniową sekwencję

Tab. 1. Podstawowe symbole wykorzystywane w modelowaniu systemów metodą FTA [4, 5]

Lp.	Symbol graficzny	Oznaczenie	Nazwa	Opis
			Zdarzenia	
1.		ZS	Zdarzenie szczytowe	Zdarzenie będące głównym celem analizy (wierzchołek drzewa).
2.		ZP	Zdarzenie pośrednie	Zdarzenie będące wynikiem pośrednich relacji pomiędzy innymi zdarzeniami.
			Zdarzenia pierwotne	Zdarzenia będące na najniższym poziomie analizy, niepodlegające dalszej dekompozycji.
3.		E	Zdarzenie elementarne	Bazowe zdarzenie niepodlegające dalszej dekompozycji opisujące zwykle uszkodzenie określonego elementu.
4.		C	Zdarzenie warunkowe	Zdarzenie opisujące specyficzne warunki dla wygenerowania wyjścia z bramek PAND (kolejność wejść) oraz bramki ZAKAZ (zwykle dla zamodelowania czynnika ludzkiego).
5.		U	Zdarzenie nierozwinięte	Zdarzenie, które mogłoby zostać dalej rozwijane, a nie jest z uwagi na jego małe znaczenie lub brak pełnych informacji.
6.		H	Zdarzenie zewnętrzne	Zdarzenie przełączające, które przyjmuje się jako zwykle zachodzące w określonym stanie eksploatacyjnym.
			Bramki logiczne	
7.		OR	Suma logiczna (LUB)	Bramka generuje wyjście, gdy zachodzi przynajmniej jedno ze zdarzeń na wejściu.
8.		XOR	Alternatywa wykluczająca (ALBO)	Bramka generuje wyjście, gdy zachodzi dowolne jedno z dwóch wykluczających się zdarzeń wejściowych.
9.		AND	Iloczyn logiczny (I)	Bramka generuje wyjście, gdy zachodzą wszystkie zdarzenia na wejściu.
10.		PAND	Iloczyn logiczny z priorytetem wejść	Bramka generuje wyjście, gdy wszystkie zdarzenia wejściowe zajdą w określonej kolejności zdefiniowanej poprzez zdarzenie warunkowe przyłączone po prawej stronie bramki.
11.	k_z/n	k-z-n	Bramka struktury progowej	Bramka generuje wyjście, gdy na wejściu zachodzi przynajmniej *k* spośród wszystkich *n* wejść.
12.		INHIBIT	Bramka zdarzenia warunkowego (ZAKAZ)	Bramka generuje wyjście, gdy zachodzi pojedyncze zdarzenie na wejściu oraz gdy spełniony jest dodatkowy warunek zamodelowany zdarzeniem warunkowym przyłączonym po prawej stronie bramki.
			Symbole przeniesień	
13.		DO	Transfer do poddrzewa	Wskazuje, że dana część drzewa jest rozwijana dalej na planszy oznaczonej nazwą przy symbolu przeniesienia.
14.		Z	Transfer z poddrzewa	Wskazuje, że część drzewa przyłączona niniejszym symbolem powiązana jest z określonym przeniesieniem do innej planszy.

Rys. 4. Przybliżone lata opracowania wybranych komputerowych programów wspomagających analizę FTA [1]

Tab. 2. Wybrane zastosowania analizy drzewa niezdatności

Gałąź przemysłu	Wybrane zastosowania
Aeronautyka	Samoloty pasażerskie (m.in. Boeing 737, 757 i 767), myśliwce, bombowce, tankowce, helikoptery, stacje kosmiczne, satelity, pojazdy księżycowe (projekty Apollo), wahadłowce, systemy rakietowe (Minuteman, Tomahawk, SRAM, ALCM) itp.
Energetyka	Elektrownie atomowe, słoneczne oraz konwencjonalne, awaryjne systemy zasilania, transmisja i dystrybucja energii
Systemy transportowe	Kolejnictwo, transport wodny i samochodowy
Technologia i inżynieria chemiczna	Produkcja węglowodorów, nawozów, półproduktów dla branży spożywczej
Automatyka i robotyka	Systemy sterowania liniami produkcyjnymi, systemy odpalania i naprowadzania torped
Górnictwo morskie i oceanotechnika	Platformy wiertnicze i wydobywcze, FPSO, tankowce
Informatyka	Bezpieczeństwo oprogramowania oraz analiza pracy sieci komputerowych

czynników elementarnych. Natomiast właściwą FTA po raz pierwszy zastosowali Watson i Maerns ok. 1961 r., którzy pracując w firmie Bell Telephone Labs., na zlecenie Sił Powietrznych USA wykonali analizę niezawodności systemu zapłonu rakiet Minuteman. W kolejnych latach Haasl w firmie Boeing Company rozwinął metodę jako narzędzie analizy bezpieczeństwa (por. [1, 5]).

Firmy powiązane z przemysłem lotniczym dostrzegły walory tej metody analizy i zaadaptowały ją do własnych potrzeb. W kolejnych latach metoda była rozwijana i znajdowała nowe zastosowania, w tym w analizie bezpieczeństwa reaktorów atomowych. W celu usprawnienia analizy FTA opracowano wiele programów komputerowych oferujących graficzne interfejsy użytkownika oraz zaawansowane algorytmy obliczeniowe. Zestawienie wybranych programów do komputerowego wspomagania metody FTA wraz z czasem wprowadzenia ich na rynek zaprezentowano na rysunku 4.

Do dziś FTA jest powszechnie stosowanym narzędziem w górnictwie, energetyce, aeronautyce, przemyśle samochodowym, transporcie, technologii chemicznej, okrętownictwie, automatyce i robotyce, informatyce itd. W tabeli 2 zaprezentowano najbardziej znane projekty, w realizacji których wykorzystywana była metoda FTA (por. [1]).

Jak wynika z tabeli 2, metoda FTA ma szeroki zakres zastosowań. Warto więc zgłębiać wiedzę w zakresie tej metody. Przytoczona bibliografia w przywołanej na początku książce pt. „Analiza drzewa niezdatności. Podstawy teoretyczne i zastosowania" będzie pomocna dla wszystkich zainteresowanych szczegółowymi aspektami wykorzystania metody.

Literatura uzupełniająca

1. Chybowski L. *Analiza drzewa niezdatności. Podstawy teoretyczne i zastosowania.* Akademia Morska w Szczecinie, Szczecin 2017.
2. Chybowski L. *Ważność elementów w strukturze złożonych systemów technicznych.* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom – Szczecin 2014.
3. *Leksykon utrzymania ruchu 2014.* Publikacja specjalistyczna. Industrial Monitor 2014.
4. PN-EN 61025:2007. Fault Tree Analysis (FTA). Polska Norma.
5. Veseley W.E., Goldberg F.F., Roberts N.H., Haasl D.F. *Fault Tree Handbook.* U.S. NUREG-0492. Nuclear Regulatory Commision. Washington 1981.

***Analiza drzewa niezdatności. Podstawy teoretyczne i zastosowania*, Leszek Chybowski**

Książka ta powinna się znaleźć w bibliotece każdego projektanta i każdego eksploatatora zarządzającego złożonymi systemami technicznymi. Wspólnym ich celem jest eliminacja awarii zależnych od systemu i skrócenie czasów niezdatności wynikających ze zużycia i „zmęczenia" materii.
mgr inż. Jan Boratyński
Fundacja TRIZ Polska

… na polskim rynku wydawniczym brakuje obecnie aktualnego polskojęzycznego podręcznika poświęconego metodzie analizy drzew niezdatności. […] Najbardziej wartościową częścią pracy jest synteza wiedzy teoretycznej o metodzie analizy drzew niezdatności.
prof. dr hab. inż. Tomasz Nowakowski
Politechnika Wrocławska

… praca jest wartościowa poprzez istotny wkład naukowy […] w dziedzinie identyfikacji oraz analizy zagrożeń w układach techniki […], stanowi spójne tematycznie dzieło, przedstawiające w sposób oryginalny i twórczy aplikację analizy drzewa niezdatności.
dr hab. inż. Sławomir Żółkiewski
Politechnika Śląska

Więcej informacji o publikacji:
Fundacja Rozwoju Akademii Morskiej w Szczecinie
ul. Wały Chrobrego 1-2
70-500 Szczecin
tel. 91 4809328
ksiegarnia@am.szczecin.pl