

Wybrane metody wspomaganie pracy operatora systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę

Selected methods of supporting the work of the collective water supply system operator

KRZYSZTOF BORYCZKO

DOI 10.36119/15.2022.4.4

Rola operatorów systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę jest kluczowa w kwestii bezpieczeństwa i ciągłości dostaw wody. Wszelkie narzędzia wspomagające jego pracę i proces podejmowania decyzji powinny być proste w użyciu i interpretacji. Metody drzew logicznych do analizowania przyczyn wystąpienia danego zdarzenia awaryjnego oraz analizy możliwych scenariuszy poawaryjnych są narzędziem intuicyjnym i dającym szybkie odpowiedzi. W pracy przedstawiono przykład aplikacyjny wykorzystania drzew logicznych do wspomaganie pracy operatora dla wybranego systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę.

Słowa kluczowe: drzewo zdarzeń, drzewo niezdatności, operator, systemy zaopatrzenia w wodę

The role of the operators of collective water supply systems (CWSS) is crucial in terms of the security and continuity of water supplies. Any tool supporting his work and decision-making process should be simple and easy to use and interpret. Logical tree methods for analyzing the reasons for the occurrence of a given emergency and analyzing possible post-failure scenarios are an intuitive tool that gives quick answers. The paper presents an application example of using logical trees to support the work of an operator for a selected collective water supply system

Keywords: event tree, failure tree, operator, water supply systems

Wstęp

Wraz z rozwojem myśli technicznej, istotnego znaczenia nabrały zagadnienia i rozważania naukowe, mające na celu opracowanie procedur analitycznych oraz eksploatacyjnych, w których integralną częścią jest zwiększenie skuteczności podejmowania decyzji przez operatorów systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW), zwłaszcza w aspekcie tzw. planów bezpieczeństwa wodnego [1, 16].

Niezawodność operatora SZZW była tematem wielu publikacji [6, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 20, 22]. Zwrócono uwagę na integralną rolę operatora SZZW [22], a w pracy [11] analizowano możliwość poprawy popełnionego błędu.

Obecnie w badaniach światowych analiza metod drzew logicznych jest używana w różnych dziedzinach nauki, np. do analizy systemu kontroli położenia wysokościowego satelitów [3], do biomonitoringu [18], do różnego rodzaju analiz ryzyka [4, 5]. Za najważniejsze zagraniczne pozycje wydawnicze opisujące metody drzew logicznych należy uznać publikacje J.D. Andrews'a i T.R. Mossa [2], N.H. Robertsa

z zespołem [15] czy też W.G. Schneeweis'a [17]. Na potrzeby NASA przygotowano podręcznik zastosowania metody drzewa niezdatności [19]. Przykłady zastosowania metod drzew logicznych w analizie niezawodności SZZW lub jej poszczególnych elementów zaprezentowano w publikacjach [8, 12, 13, 23, 24, 25].

Celem pracy jest przedstawienie metod drzew zdarzeń i niezdatności, ze szczególnym uwzględnieniem metody drzew hybrydowych jako narzędzia wspomagającego operatorów systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę.

Operator systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę

Niezawodność pracy operatora oznacza zdolność do wykonywania powierzonych zadań z minimalnym ryzykiem popełnienia błędu w określonych warunkach, w określonym przedziale czasowym lub w dowolnej chwili. Pomiar niezawodności pracy operatora opiera się na danych pochodzących z obserwacji i zapisów wszelkiego rodzaju błędów, uchybień proceduralnych i usterek w podejmowanych

decyzjach [8]. Wyróżnia się następujące typy zachowań operatora [12]:

- rutyna – odruchowe wykonywanie czynności nabytych w wyniku doświadczeń praktycznych,
- reguła – wykonywanie mniej oczywistych działań według określonych reguł,
- wiedza – działanie w sytuacjach, w których wzorce praktyczne lub reguły postępowania nie mają bezpośrednio zastosowania, istotne staje się rozpoznanie odmiennej sytuacji, diagnozowanie stanu oraz podejmowanie decyzji.

W pracy operatora można wyróżnić następujące stany [12]:

- stan optymalny – operator przy poprawnej pracy systemu wykonuje czynności nadzoru bieżących sygnałów oraz dokonuje rutynowych korekt parametrów jego funkcjonowania. Procesy myślowe operatora mają charakter algorytmiczny (szkolenia i praktyka eksploatacyjna),
- stan minimalnych obciążeń – występuje w procesie sterowania wysoce zautomatyzowanymi systemami z wykorzystaniem technik komputerowych,

dr inż. Krzysztof Boryczko <https://orcid.org/0000-0001-6690-3577> – Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków, Rzeszów.
Adres do korespondencji/Corresponding author: e-mail: kb@prz.edu.pl

- stan maksymalnych obciążeń – praca wymaga twórczego myślenia, w poczuciu odpowiedzialności za błędy i odroczenia reakcji. Wymagane są specjalistyczne szkolenia oraz znajomość scenariuszy sytuacji nadzwyczajnych. Zagrożenia są wynikiem gwałtownej zmiany, w wyniku której ma się do czynienia z utratą lub uszczerbkiem wartości technicznej. Deficyt czasu, deficyt lub nadmiar informacji mogą być w odczuciu operatora przyczynami wystąpienia sytuacji awaryjnej:
- deficyt czasu – podejmowanie nieistotnych decyzji, dezautomatyzacja czynności operatorskich,
- deficyt informacji – operator nie jest w pełni przygotowany do pracy, brakuje mu wiedzy na temat systemu,
- nadmiar informacji – do operatora dociera za dużo sygnałów, nie potrafi on wybrać informacji najistotniejszych. Wyróżnia się następujące rodzaje błędów:
- błąd aktywny, o skutkach natychmiastowych, powodujący bezpośrednie wystąpienie zdarzenia niepożądanego,
- niezachowanie procedur bezpieczeństwa:
 - przecenienie możliwości,
 - niedocenienie zagrożenia,
- mylna interpretacja:
 - pominięcie faktów,
 - brak koncentracji,
 - brak zrozumienia,
- błąd o skutkach odroczonych, zazwyczaj o charakterze planistycznym.

Drzewa niezdatności

Analiza za pomocą drzew niezdatności (z ang. Fault Tree Analysis – FTA) zajmuje się identyfikacją warunków i czynników, które powodują, mogą powodować lub przyczynić się do wystąpienia danego zdarzenia szczytowego. Drzewa uszkodzeń (FT) to model opisujący związki pomiędzy uszkodzeniami elementarnych części systemu, błędami operatorów a zajściem zdarzenia związanego z niewypełnieniem przez system odpowiedniej funkcji.

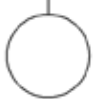
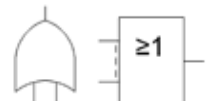

Terminy używane w FTA według obowiązującej normy [26] są następujące:

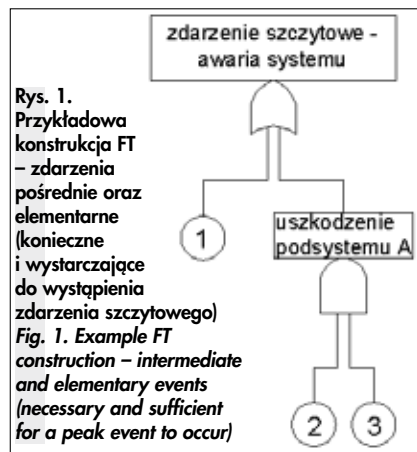
- wyjście – rezultat akcji bądź innego wejścia; konsekwencja przyczyny. Wyjściem może być zdarzenie lub stan. Wyjście z kombinacji właściwych wejściowych zdarzeń reprezentowane przez bramkę może być zarówno zdarzeniem pośrednim, jak i szczytowym. Wyjście może być również wejściem do zdarzenia pośredniego lub szczytowego,

- zdarzenie szczytowe – wynik kombinacji wszystkich zdarzeń wejściowych. Jest to zdarzenie, pod którym buduje się FT. Zdarzenie szczytowe często utożsamia się ze zdarzeniem finalnym lub szczytowym wyjściem. Zdarzenie szczytowe jest definiowane na początku analizy. Ma najwyższą pozycję w hierarchii zdarzeń,
 - bramka – symbol reprezentujący powiązanie pomiędzy zdarzeniem wyjściowym a odpowiadającymi wejściami. Dany symbol bramki określa wymagany typ relacji pomiędzy zdarzeniami wejściowymi, które spowodują wystąpienie zdarzenia wyjściowego,
 - przekrój – grupa zdarzeń, która (jeśli wszystkie zdarzenia wystąpią) spowoduje pojawienie się zdarzenia szczytowego,
 - przekrój minimalny – minimalny lub najmniejszy zbiór zdarzeń, które muszą wystąpić by, spowodować zdarzenie szczytowe. Niewystąpienie choćby jednego ze zdarzeń w zbiorze spowoduje brak wystąpienia zdarzenia szczytowego,
 - zdarzenie elementarne – zdarzenie albo stan, które nie może być dalej rozwinięte w dół w konstrukcji FT.
- Sporządzając FT, wykorzystuje się tzw. funktory (bramki logiczne) określające między innymi iloczyn logiczny zdarzeń i sumę logiczną zdarzeń [19]. Symbole wykorzystywane w metodzie FTA przedstawiono w tabeli 1.

Konstrukcje FT rozpoczyna się zawsze od zdarzenia szczytowego. Następnie należy wyszukać wszystkie zdarzenia pośrednie, konieczne i wystarczające do wystąpienia zdarzenia szczytowego. Kolejne poziomy drzewa łączą się za pomocą bramek logicznych (rysunek 1). Przy tworzeniu niższych poziomów FT należy odpowiadać na pytanie: „jakie są przyczyny wystąpienia tego zdarzenia?”.

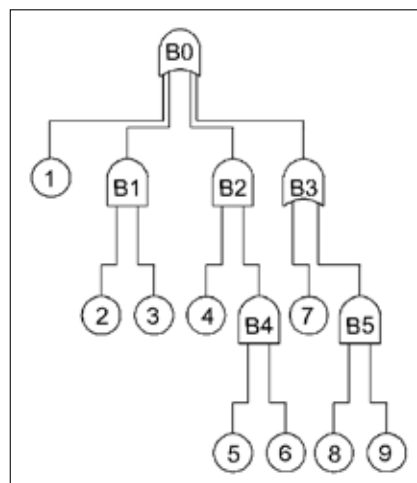
Tab. 1. Symbole używane w metodzie FTA [26]
Tab. 1. Symbols used in the FTA method [26]

Symbol(e)	Nazwa	Opis
	Zdarzenie elementarne (ang. basic event)	Zdarzenie najniższego poziomu dla którego znane jest prawdopodobieństwo wystąpienia lub informacja o niezawodności.
	Bramka LUB (ang. OR)	Zdarzenie wyjściowe występuje, jeśli wystąpi jakiegokolwiek ze zdarzeń wejściowych.
	Bramka I (ang. AND)	Zdarzenie wyjściowe występuje, jeśli wystąpią wszystkie ze zdarzeń wejściowych.



Rys. 1. Przykładowa konstrukcja FT – zdarzenia pośrednie oraz elementarne (konieczne i wystarczające do wystąpienia zdarzenia szczytowego)
Fig. 1. Example FT construction – intermediate and elementary events (necessary and sufficient for a peak event to occur)

Drzewa uszkodzeń są źródłem informacji o wszelkich kombinacjach zdarzeń, jakie muszą zajść, by wstąpiło zdarzenie szczytowe. Identyfikacja minimalnych przekrojów może się odbywać bez użycia algorytmów dla nieskomplikowanych FT. Prosta metoda odnajdywania przekrojów minimalnych przedstawiono na przykładzie. Analizowane FT ilustruje rysunek 2.



Rys. 2. Przykładowe FT prezentujące procedurę identyfikacji minimalnych przekrojów
Fig. 2. Sample FT presenting the procedure of minimum cross-section identification

Metoda polega na sukcesywnym zastępowaniu każdej z bramek przez zdarzenia wejściowe (zdarzenia elementarne, nowe bramki) do momentu, w którym przejdzie się przez całe FT i pozostaną tylko zdarzenia elementarne.

Dalej przedstawiono koncepcję metody odnajdywania minimalnych przekrojów dla FT z rysunku 2. W celu jasności postępowania poszczególnym bramkom logicznym przyporządkowano nazwy B0, B1, B2, B3, B4, B5 (rys. 3). Oznaczenie „B nr” oznacza, że w danym etapie rozpatrywana jest przyczyna wystąpienia wyjścia z danej bramki. Oznaczenia 1÷9 symbolizują zdarzenia elementarne, których wystąpienie w odpowiedniej konfiguracji może spowodować wystąpienie zdarzenia szczytowego.

Zaczęto od etapu 1. tj. zdarzenia szczytowego i połączonej z nim bramki B0. Wskazano możliwe przyczyny wyjścia z tej bramki i w konsekwencji wystąpienia zdarzenia szczytowego. Bramka B0 ma 4 wejścia od dołu i jest bramką OR, co oznacza, że wyjście z bramki nastąpi pod warunkiem wystąpienia:

- zdarzenia 1 lub
- wyjścia z bramki B1 lub
- wyjścia z bramki B2 lub
- wyjścia z bramki B3.

W kolejnym etapie 2. rozważono bramkę B1 – AND, z której wyjście następuje tylko wtedy gdy łącznie wystąpią zdarzenia elementarne 2 i 3. Cały ciąg poszukiwania przekrojów drzewa niezdatności w poszczególnych etapach przedstawiono na rys. 3 (w etapach 2÷6 podkreślono zdarzenia związane z interpretacją bramki z nazwy etapu).

<p>Etap 1. B0</p> <p>1 lub</p> <p>B1 lub</p> <p>B2 lub</p> <p>B3</p>	<p>Etap 2. B1</p> <p>1 lub</p> <p>(2 i 3) lub</p> <p>B2 lub</p> <p>B3</p>
<p>Etap 3. B2</p> <p>1 lub</p> <p>(2 i 3) lub</p> <p>(4 i B4) lub</p> <p>B3</p>	<p>Etap 4. B3</p> <p>1 lub</p> <p>(2 i 3) lub</p> <p>(4 i B4) lub</p> <p>7 lub</p> <p>B5</p>
<p>Etap 5. B4</p> <p>1 lub</p> <p>(2 i 3) lub</p> <p>(4 i 5 i 6) lub</p> <p>7 lub</p> <p>B5</p>	<p>Etap 6. B5</p> <p>1 lub</p> <p>(2 i 3) lub</p> <p>(4 i 5 i 6) lub</p> <p>7 lub</p> <p>8 i 9</p>

Rys. 3. Tok postępowania przy poszukiwaniu przekrojów minimalnych
Fig. 3. The course of action when searching for minimum sections

Otrzymano 5 przekrojów:

- 1,
- 7,

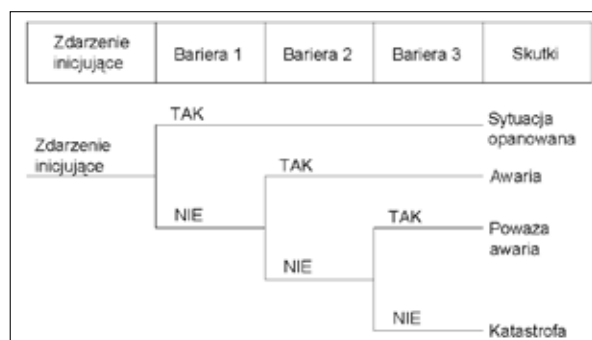
- 8 i 9,
- 2 i 3,
- 4 i 5 i 6,

Dwa z przekrojów są jednoelementowe (1 oraz 7), co oznacza, że wystąpienie tylko zdarzenia 1 lub tylko zdarzenia 7 powoduje wystąpienie zdarzenia szczytowego. Dwa przekroje są dwuelementowe, co oznacza, że do wystąpienia zdarzenia szczytowego niezbędne jest jednoczesne wystąpienie pary zdarzeń elementarnych (8 i 9) lub (2 i 3). Przekrój (4 i 5 i 6) wymaga wystąpienia łącznie aż trzech zdarzeń, by wystąpić mogło zdarzenie szczytowe.

Drzewa zdarzeń

Metoda drzewa zdarzeń (ang. Event Tree Analysis) jest używana do analizy konsekwencji i barier ochronnych systemu. Jest metodą ilościową i jakościową. Przedstawia bariery ochronne systemu i możliwe ścieżki zadziałania lub niezadziałania elementów ochrony systemu. Metoda drzewa zdarzeń jest także używana do analizy niezawodności człowieka. Drzewo zdarzeń (ET) przedstawia graficznie chronologiczny rozwój awarii. Diagram ET konstruuje się od strony lewej do prawej, rozpoczynając od zdarzenia inicjującego. Scenariusze buduje się, rozpatrując to, czy dana bariera ochronna zadziałała bądź nie, rozbudowując drzewo w prawą stronę. W każdym węźle gałąź drzewa rozgałęzia się na dwie – górna gałąź „prawda” (tak); dolna gałąź „fałsz” (nie). Rozgałęzienie to identyfikuje się z zadziałaniem/niezadziałaniem bariery. Drzewo rysuje się do rozważenia zadziałania wszystkich barier (rysunek 4). Przy takim

Rys. 4. Przykładowa konstrukcja drzewa zdarzeń
Fig. 4. Example structure of the event tree



założeniu w efekcie końcowym otrzymuje się skutki zdarzenia inicjującego uszeregowane od konsekwencji najmniejszych do największych.

W przedstawionym przykładzie (rysunek 4) otrzymano 4 możliwe skutki zdarzenia inicjującego:

- sytuacja opanowana – gdy pierwsza w kolejności Bariera 1 zadziała prawidłowo,

- awaria – gdy nie zadziała Bariera 1, lecz następnie zadziała Bariera 2,
- poważna awaria – gdy nie zadziałają Bariera 1 i 2, lecz zadziała Bariera 3,
- katastrofa – gdy nie zadziała żadna z b 1÷3.

W powyższym przykładzie, przyjęto założenie, że zadziałanie jednej z barier wyklucza konieczność zadziałania kolejnej/kolejnych. W innym wypadku, górne gałęzie drzewa (oznaczone TAK) ponownie by się rozgałęziały przy kolejnej/kolejnych barierach. W takim przypadku liczba możliwych skutków zdarzenia inicjującego byłaby większa.

Metodyka tworzenia hybrydowych drzew uszkodzeń i drzew zdarzeń

Konstrukcję drzewa hybrydowego wykonuje się w zgodzie z następującymi zasadami:

- konstrukcja drzewa zdarzeń dla założonego zdarzenia inicjującego zgodna z procedurą z wcześniejszego rozdziału,
- wykonanie dla każdej bariery ochronnej drzewa niezdatności, wskazującego przyczyny niezadziałania danej bariery (zdarzeniami szczytowymi drzew niezdatności są zdarzenia związane z niezadziałaniem kolejnych barier),
- liczba drzew niezdatności powinna odpowiadać liczbie barier ochronnych,
- skonstruowane drzewa niezdatności łączy się z gałęziami NIE drzewa zdarzeń.

Scenariusz awaryjny może być analizowany równocześnie za pomocą metody ETA, jak i FTA. Po wystąpieniu zdarzenia

inicjującego uwzględnia się kolejne bariery ochronne. Prawdopodobieństwa niezadziałania i zadziałania tych barier określa się FTA. W ten sposób powstaje hybryda – połączone dwie metody analizy niezawodności z wykorzystaniem metody drzew logicznych. Metodę tę dla SZZW zaprezentowano w pracach [15]. Przykład drzewa hybrydowego przedstawiono na rysunku 5. Zaprezentowany przykład modelu

= 61,0 m³/h), S-II (Q = 53,3 m³/h).

- ujęcie nr 2 składa się z dwóch studni: S-1 (Q = 20,6 m³/h – rezerwowa), S-2 (Q = 23,0 m³/h – podstawowa).

Na rysunku 6 przedstawiono drzewo hybrydowe dla SZZW dla zdarzenia inicjującego w postaci pojawiania się skażenia wody w źródle wody podziemnej. W ramach dyskusji z operatorami i kierownictwem przedsiębiorstwa wodociągowego wyselekcjonowano 11 barier ochronnych, kluczowych dla zmniejszenia skutków założonego zdarzenia inicjującego związanego ze skażeniem wody w źródle:

- monitoring jakości wody ujęcia nr 1 wykrył skażenie,
- poprawna interpretacja danych o jakości wody podziemnej,
- zamknięcie ujęcia wody nr 1,

- uruchomienie studni rezerwowej na ujęciu nr 2,
- zamknięcie ujęcia wody nr 2,
- wystarczająca ilość wody w zbiornikach,
- monitoring jakości wody w podsystemie dystrybucji wody (PsDyW) wykrył skażenie,
- poprawna interpretacja danych o jakości wody w PsDyW,
- zamknięcie ujęć wody,
- poinformowanie społeczeństwa o złej jakości wody do spożycia,
- uruchomienie przez przedsiębiorstwo wodociągowe alternatywnego sposobu dystrybucji wody do spożycia.

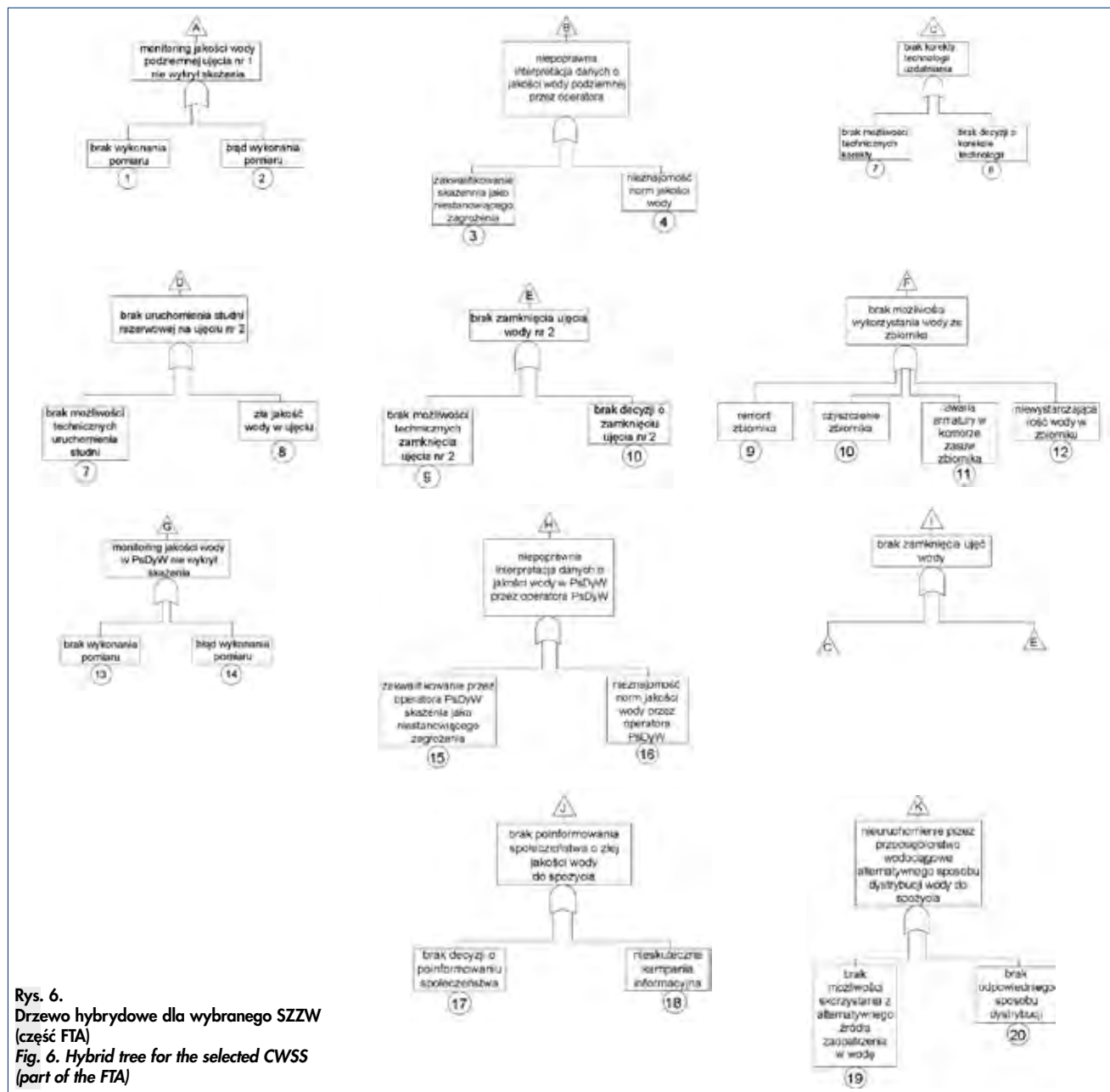
Selekcja powyższych barier ochronnych powinna przewidywać tylko te bariery, na których zadziałanie wpływ mają

pracownicy lub sprzęt przedsiębiorstwa wodociągowego.

Na rysunku 7 przedstawiono rozwinięcie drzewa hybrydowego z rysunku 6 w części modelowania metodą FTA.

W analizowanym przykładzie otrzymano 46 możliwych scenariuszy rozwojowych sytuacji na skutek wystąpienia zdarzenia inicjującego. Dla 11 barier ochronnych, przy założonym stopniu dokładności wyselekcjonowano 20 zdarzeń elementarnych, powodujących niezadziałanie barier ochronnych.

Opracowane drzewo hybrydowe dla założonego zdarzenia elementarnego jest elementem systemu bezpieczeństwa SZZW ograniczającym w znaczącym stopniu czas reakcji operatora na zaistniałe zdarzenie inicjujące. Operator może na części



Rys. 6. Drzewo hybrydowe dla wybranego SZZW (część FTA)
Fig. 6. Hybrid tree for the selected CWSS (part of the FTA)

ETA drzewa hybrydowego wskazać moment (punkt na drzewie zdarzeń), w którym aktualnie znajduje się SZZW, analizując które bariery ochronne nie zadziałały lub już nie zdążą zadziałać (na lewo od punktu na drzewie zdarzeń). Jednocześnie ma wiedzę na temat kolejnych barier (na prawo od punktu na drzewie zdarzeń), które w znaczący sposób mogą zredukować dotkliwość skutków zdarzenia inicjującego. Bariery te, z których operator może jeszcze skorzystać powinny zostać w tym momencie poddane szczególnej uwadze. Do tego celu operator powinien skorzystać z części FTA drzewa hybrydowego. W wyznaczonych drzewach niezdatności barier ochronnych operator znajduje informacje, które zdarzenia elementarne mogą spowodować niezadziałania kolejnych barier, możliwych jeszcze do wykorzystania. W niektórych przypadkach będzie możliwe przywrócenie działania danej bariery poprzez eliminację wybranego lub wybranych zdarzeń elementarnych.

Podsumowanie

Opracowano metodologię stosowania hybrydowych drzew logicznych jako narzędzie wspomagające operatorów SZZW. Połączenie metod FTA i ETA następuje na etapie określenia przyczyn (metodą FTA) niezadziałania barier ochronnych SZZW (z metody ETA).

Opracowany przykład aplikacyjny drzewa hybrydowego dla SZZW pozwala operatorowi na szczegółową analizę możliwych scenariuszy po wystąpieniu zdarzenia inicjującego. W przypadku wystąpienia danego zdarzenia operator SZZW analizując drzewo hybrydowe, może w szybki sposób określić przyczyny niezadziałania barier ochronnych i co ważniejsze skupić się na kolejnych barierach, których zadziałanie może ograniczyć negatywne skutki zdarzenia inicjują-

cego. Hybrydowe drzewa logiczne mogą stanowić fundament tworzenia nowoczesnych modeli zarządzania pracą operatorów SZZW. Metoda drzew hybrydowych jako jedyna pozwala operatorowi analizować w formie graficznej całą SZZW od ujęcia aż do odbiorcy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Almeida M.C., Vieira P., Smeets P.: Water cycle safety plan framework proposal. Bruksela 2010.
- [2] Andrews J. D., Moss T. R.: Reliability and Risk Assessment. Longman Scientific & Technical, London 1993. DOI: 10.1002/qre.4680100317
- [3] Barua A., Sinha P., Khorasani K.: On the Fault Diagnosis and Failure Analysis in the Satellite Attitude Control Subsystem. Eight International Conference on Space Operations, Montreal, Canada, 17-21 May 2004. DOI: 10.2514/6.2004-455-266
- [4] Ferdous R., Khan F., Veitch B., Amyotte P. R.: Methodology for computer aided fuzzy fault tree analysis. Process Safety and Environmental Protection. 2009, 87, 217-226. DOI:10.1016/j.psep.2009.04.004
- [5] Khan F., Ferdous R., Sadiq R., Amyotte P., and Veitch B.: Fault and Event Tree Analyses for Process Systems Risk Analysis: Uncertainty Handling Formulations. Risk Analysis. 2009, 31, 86-107, DOI: 10.1111/j.1539-6924.2010.01475.x
- [6] Kosmowski, K., Piesik, E.: Analiza niezawodności człowieka-operatora w kontekście bezpieczeństwa funkcjonalnego. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. 2016, 51, 147-150.
- [7] Piesik E., Śliwiński M.: Analiza niezawodności człowieka z uwzględnieniem aspektów zarządzania alarmami. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 2015, 47, 143-146
- [8] Rak J.: Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemu zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2004.
- [9] Rak J.: Model oceny ryzyka w funkcjonowaniu SZW. Konferencja: VII Ogólnopolska Konferencja Naukowa nt. "Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska". Politechnika Koszalińska, Koszalin – Ustronie Morskie 2005.
- [10] Rak J.: Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. Komitet Inżynierii Środowiska PAN. Lublin 2005.
- [11] Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: Matrycowe metody analizy ryzyka awarii infrastruktury komunalnej. Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury, JCEEA. 2014, 61, 233-244. DOI:10.7862/rb.2014.16
- [12] Rak J., Żywiec J.: Relacje podatność – odporność w aspekcie bezpieczeństwa systemów wodociąg-

gowych. INSTAL. 2019, 7-8, 59-63. DOI: 10.36119/15.2020.8.6

- [13] Rak J.R., Oprychal L.: Koncepcje analizy bezpieczeństwa systemu zaopatrzenia w wodę. Gaz, Woda i Technika Sanitarna. 2009, 11, 17-21.
- [14] Rak J.R., Tchórzewska – Cieślak B.: Pojęcie niezawodności i bezpieczeństwa pracy operatora w systemie wodociagowym. INSTAL. 2019, 2, 44-48
- [15] Roberts N. H., Vesely W. E., Haas D. F., Goldberg F. F.: Fault Tree Handbook. States Nuclear Regulatory Commission United. Waszyngton 1981.
- [16] Rosen L., Lindhe A., Hokstad P., Sklet S., Rostum J., Pettersson T. J. R.: Generic Framework for Integrated Risk Management in Water Safety Plans. 6th Nordic Drinking Water Conference. Oslo 2008.
- [17] Schneeweiss W. G.: The Fault Tree Method. Lilole – Verlag GmbH (Publ. Co. Ltd), Hagen 1999.
- [18] Siontorou C. G., Batzias F. A.: Error identification/propagation/remediation in biomonitoring surveys-A knowledge-based approach towards standardization via fault tree analysis. Ecological Indicators. 2011, 11, 564-581.
- [19] Stamatelatos M., Vesely W., Dugan J., Fragola J., Minarick J., Railsback J.: Fault Tree Handbook with Aerospace Applications – Version 1.1.. NASA. Waszyngton 2002.
- [20] Szymura E., Zimoch I.: Niezawodności operatora w szacowaniu ryzyka eksploatacji systemów przemysłowych. Przemysł Chemiczny 2014,1, 111-116 DOI: 10.12916/przemchem.2014.111
- [21] Tchórzewska-Cieślak B., Boryczko K., Piegdoń I.: Possibilistic risk analysis of failure in water supply network. In Proceedings of the The European Safety And Reliability Conference (ESREL). Wrocław 2015; 1473-1480.
- [22] Tchórzewska-Cieślak B., Szpak D.: A Proposal of a Method for Water Supply Safety Analysis and Assessment. Ochrona Środowiska. 2015, 37, 43-47.
- [23] Zimoch I., Kuśnierski A.: Wykorzystanie drzewa niezdatności w ocenie zagrożeń pochodzenia rolniczego na jakość zasobów wód podziemnych. Gaz, Woda i Technika Sanitarna. 2017, 4, 201-204.
- [24] Zimoch I., Szymura E., Moraczewska-Majkut K., Yeh I-Yen. R.: The event tree using in identification of THMS' formation in water supply system. Proceedings Water supply and water quality. Ed. Zbysław Dymaczewski, Joanna Jeż-Walkowiak, Mariusz Nowak, Publisher Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych. Oddział Wielkopolski. Poznań 2014, s. 545-558.
- [25] Zimoch I., Szymura E., Moraczewska-Majkut K.: Zastosowanie techniki drzewa zdarzeń w analizie bezpieczeństwa eksploatacji obiektów przemysłowych. Przemysł Chemiczny. 2015, 2 s. 196 – 200.
- [26] PN-IEC 1025: Analiza drzewa niezdatności (FTA).