

Barbara TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK
Janusz R. RAK
Politechnika Rzeszowska

NIEZAWODNOŚĆ OPERATORA SYSTEMU WODOCIĄGOWEGO

Sytuacje awaryjne (zagrożenia) są wynikiem gwałtownej zmiany, w wyniku której ma się do czynienia z utratą lub uszczerbkiem wartości technicznej mającej znaczenie dla człowieka. W krańcowym przypadku dla użytkowników (systemu zaopatrzenia w wodę) SZW może to być utrata zdrowia bądź życia w wyniku spożycia wody zanieczyszczonej. Rola operatora SZW pozostaje nadal daleka od zadowalających rozwiązań, szczególnie w sytuacjach ekstremalnych – występowania zagrożeń typu katastroficznego. W pracy przedstawiono podstawowe typy zachowań oraz błędy popełniane przez operatora. Głównym celem pracy jest przedstawienie metod analizy niezawodności operatora systemu wodociągowego.

1. Wstęp

System zaopatrzenia w wodę (SZW) jest rozległym przestrzenią i rozbudowanym systemem biotechnicznym, w którym człowiek występuje w dwójakiej roli [5]. Jest operatorem systemu na różnych szczeblach jego eksploatacji, a jednocześnie występuje w roli konsumenta wody do spożycia. W tym drugim przypadku może być poszkodowany w wyniku zanieczyszczenia – zatrucia wody, w wyniku nadzwyczajnych zdarzeń typu katastroficznego (katastrofy, poważne awarie, działania wojenne, akty terrorystyczne, zadziałania psychopaty lub naturalne przypadki losowe, np. powódź), lub braku jej dostawy, co ujemnie wpływa na standard sanitarno-higieniczny codziennego bytowania. Wśród podstaw aktywności operatora SZW można wyróżnić doświadczenie wykonawcze oraz treściowe, które stanowi wiedza o otoczeniu technicznym i środowiskowym. To ostatnie jest wynikiem aktywności poznawczej i ma charakter zmysłowo-obrazowy bądź nieobrazowy, a także myślowy i abstrakcyjny. Należy podkreślić, że orientacja sytuacyjna jest koniecznym elementem działań operatora. Osobną kategorią poznawczą są czynności kontrolne, które wiążą się z myśleniem obrazowo-abstrakcyjnym. W ich wyniku operator powinien zdawać sobie sprawę z zaistniałej rzeczywistości oraz ze związków i zależności pomiędzy poszczególnymi faktami [3].

Innym rodzajem aktywności operatora systemu wodociągowego są czynności związane z funkcją kierowniczą. Wyróżnia się tutaj czynności regulacyjne i twórcze. Pierwsze oznaczają, że należy dążyć do perfekcji działania, drugie zaś stwarzają możliwość wprowadzenia oryginalnych nowych koncepcji w ww. zakresie.

Ryzyka związanego z rolą operatora SZW nie da się wyeliminować, gdyż ma ono charakter wieloprzyczynowy. Można je jednak rozpoznać, monitorować oraz podejmować odpowiednie decyzje w celu jego zmniejszenia do poziomu akceptowalnego. Rola operatora w funkcjonowaniu SZW i ryzyko z tym związane zostały przedstawione w pracach [1, 3, 5, 6].

Głównym celem artykułu jest przedstawienie metod oceny niezawodności operatora SZW. Praca zawiera opis metod THERP i HEART oraz przykłady aplikacyjne.

2. Typy zachowań operatora w systemie technicznym

Klasyfikacja zachowań operatora wyróżnia trzy typy w ocenie jego niezawodności:

- wprawę – odruchowe wykonywanie działań nabytych w wyniku doświadczeń praktycznych (wytrenowania) na podstawie wzorców postępowania,
- regułę – wykonywanie mniej oczywistych działań według określonych reguł, opracowanych dla scenariuszy przewidywalnych sytuacji,
- wiedzę – działanie w sytuacjach, w których wzorce praktyczne lub reguły postępowania nie mają bezpośredniego zastosowania, istotne staje się rozpoznanie odmiennej sytuacji, diagnozowanie stanu oraz podejmowanie decyzji.

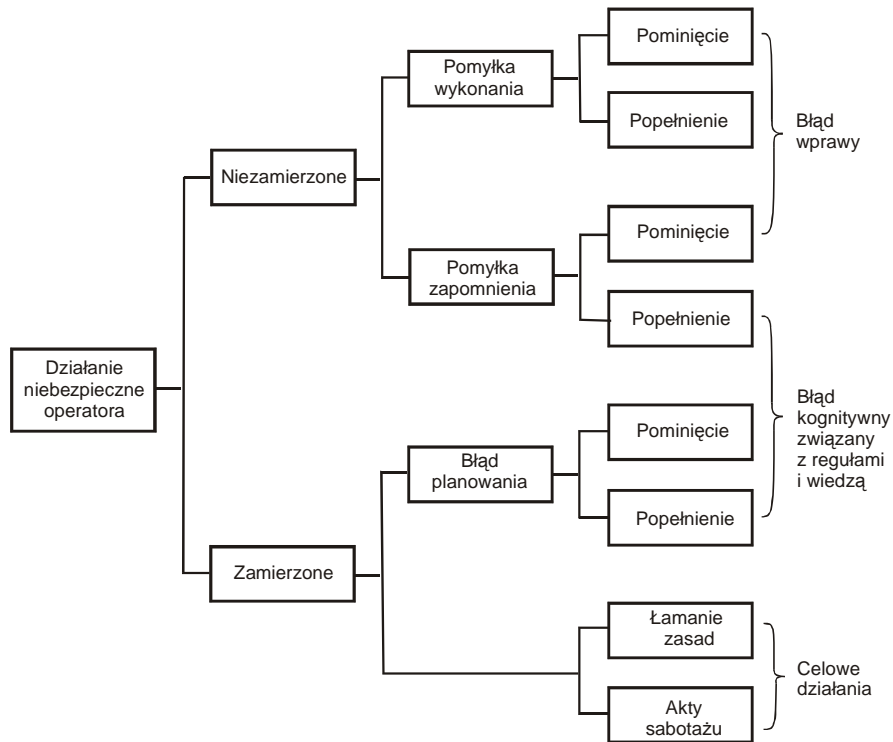
Klasyfikacja niewłaściwych zachowań operatora obejmuje:

- pomyłkę – niezamierzone działanie lub mylne zrealizowanie decyzji, np. przez nieuwagę, brak koncentracji,
- zapomnienie – odstępstwo od kolejnego kroku w algorytmie postępowania, wynikające z chwilowego zaniku pamięci, zapomnienia, intencji lub zaplanowanych procedur działania.

Pewne działania operatora mają charakter niebezpieczny i są związane z różnymi mechanizmami błędów. Na rysunku 1. pokazano klasyfikację niebezpiecznych działań operatora.

Błąd pominięcia to pominięcie całego zadania lub kroku w zadaniu. Możliwe są następujące błędy pominięcia:

- sekwencji – działanie w niewłaściwej kolejności,
- czasowy – działanie zbyt wczesne lub zbyt późne,
- jakościowy – zbyt mało lub zbyt dużo,
- selekcja – wydanie błędnej decyzji.



Rys. 1. Klasyfikacja niebezpiecznych działań operatora

Ciekawą formułę na popelnienie błędu przez operatora działającego w stre-sie czasowym podaje Amerykański Ośrodek Badań nad Bezpieczeństwem Instalacji Nuklearnych [3]. Prawdopodobieństwo popelnienia błędu przez operatora systemu wynosi:

$$PBO = 2^{(n-1)} \cdot P_0 \quad (1)$$

gdzie: PBO – prawdopodobieństwo błędu operatora,

P_0 – prawdopodobieństwo początkowe popelnienia błędu przez operatora,

N – liczba błędnych prób poprawy niewłaściwej decyzji operatora.

Jeżeli PBO osiąga wartości bliskie jedności, wskazuje to na kompletną dez-orientację operatora i całkowitą utratę kontroli nad systemem. W tabeli 1. poda-no wartości PBO dla $P_0 = 0,1$, $P_0 = 0,05$, $P_0 = 0,01$, $P_0 = 0,005$.

Po czwartej (dla $P_0 = 0,1$), po piątej (dla $P_0 = 0,05$), po siódmej (dla $P_0 = 0,01$) i po ósmej (dla $P_0 = 0,005$) nieudanej próbie naprawy błędu operator traci całkowitą kontrolę nad funkcjonowaniem systemu ($PBO = 1$).

Tabela 1. Wartości PBO przy n kolejnych błędnych próbach poprawy decyzji

n	PBO			
	$P_0 = 0,1$	$P_0 = 0,05$	$P_0 = 0,01$	$P_0 = 0,005$
1	0,10	0,05	0,01	0,005
2	0,20	0,10	0,02	0,010
3	0,40	0,20	0,04	0,020
4	0,80	0,40	0,08	0,040
5	1,00	0,80	0,16	0,080
6	1,00	1,00	0,32	0,160
7	1,00	1,00	0,64	0,320
8	1,00	1,00	1,00	0,640
9	1,00	1,00	1,00	1,00

3. Metody analizy niezawodności operatora

3.1. Metoda przewidywania procesu błędu operatora THERP

Metoda THERP (ang. *Technique for Human Error Rate Prediction*) polega na szacowaniu prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora PBO. Prawdopodobieństwo wyznacza się na podstawie drzewa zdarzeń niezawodności operatora. Odbywa się to na zasadach analizy drzewa zdarzeń stosowanych przy analizie ryzyka [1, 2]. Analiza ta pozwala również ustalić wpływ błędu operatora na miary ryzyka związanego z funkcjonowaniem SZW. W metodzie THERP wyróżnia się pięć etapów związanych z niezawodnością operatora:

- 1) określenie potencjalnych zdarzeń niepożądanych w SZW,
- 2) analizę procedur do wykonania przez operatora i możliwych błędów,
- 3) oszacowanie prawdopodobieństwa błędu operatora,
- 4) ocenę wpływu błędu operatora na niezawodność SZW,
- 5) propozycje modyfikacji sprzyjające redukcji możliwości popełnienia błędu.

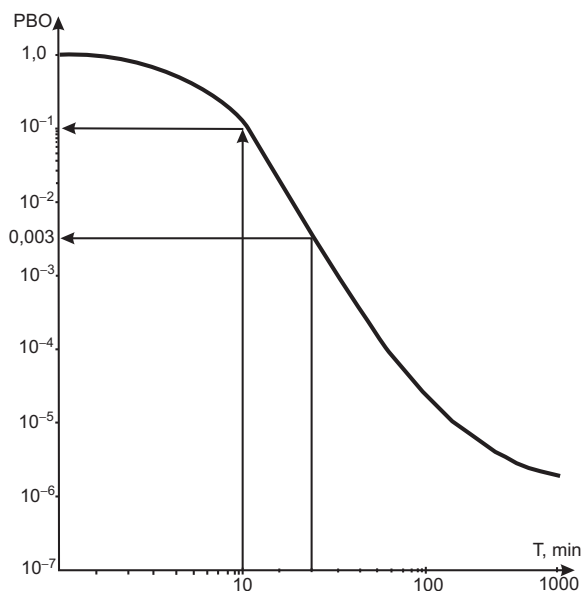
Przykład aplikacji metody

Należy wyznaczyć prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez operatora dla opisanej dalej sytuacji awaryjnej. Stacja osłonowo-ostrzegawcza powyżej ujęcia wody powierzchniowej wykryła zanieczyszczenie chemiczne, którego konwencjonalny proces uzdatniania wody nie jest w stanie usunąć. Operator musi dokonać korekt w technologii uzdatniania wody. Dopuszczalny czas diagnozowania zdarzenia nadzwyczajnego i wykonania stosownych działań t_s wynosi 30 min (czas dopływu fali zanieczyszczenia od stacji osłonowo-ostrzegawczej do przekroju ujęcia). Oceniono, że faktyczny czas na działanie operatora wynosi $T_d = 20$ min.

Dopuszczalny czas diagnozowania sytuacji nadzwyczajnej wynosi:

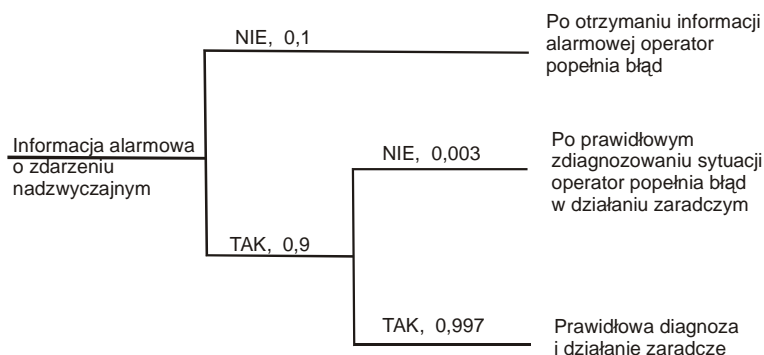
$$T_a = T_s - T_d = 30 - 20 = 10 \text{ min.}$$

Po oszacowaniu T_a przystępuje się do wyznaczenia prawdopodobieństwa błędu operatora (PBO). Wykorzystuje się do tego wykresy przedstawiające PBO w funkcji dostępnego czasu związanego z sytuacją nadzwyczajną T_a i T_d . Przykład takiego wykresu pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Zależność $PBO = f(T)$

Na rysunku 3. przedstawiono drzewo zdarzeń analizy popełnienia błędu przez operatora [4].



Rys. 3. Drzewo zdarzeń analizy popełnienia błędu przez operatora

Z wykresu na rys. 2. odczytano:

- PBO dla T_a (20 min) = 0,1,
- PBO dla T_d (20 min) = 0,003.

Dla drzewa zdarzeń (rys. 3.) można obliczyć prawdopodobieństwo niepowodzenia $P(N)$ i sukcesu $P(S)$ w postępowaniu operatora:

- $P(N) = 0,1 + 0,9 \cdot 0,003 = 0,1027$,
- $P(S) = 0,9 \cdot 0,997 = 0,8973$.

3.2 Metoda szacowania i redukcji błędu operatora HEART

Metoda HEART (ang. *Human Error Assessment and Reduction Technique*) analizuje niezawodność operatora na tle czynników ergonomicznych i środowiskowych, które wpływają negatywnie na wykonanie zadania. W tabeli 2. zestawiono typy zadań i odpowiadające im wskaźniki zawodności operatora.

Tabela 2. Typy zadań i wartości wskaźnika zawodności operatora

Nr	Typ zadania	Wskaźnik zawodności operatora U_i
I	Zadanie nieznane operatorowi, wykonywane pośpiesznie, bez świadomości możliwych konsekwencji	0,55
II	Spowodowanie nowego stanu systemu bez zachowania procedur	0,26
III	Złożone zadanie wymagające wysokiego poziomu wnioskowania i wprawy	0,16
IV	Proste zadanie wykonywane pośpiesznie lub z niewystarczającą uwagą	0,09
V	Szybkie rutynowe zadanie wymagające niskiego poziomu wprawy	0,02
VI	Spowodowanie nowego stanu systemu według procedur	0,003
VII	Rutynowe zadanie wykonane przez wyszkolonego operatora	0,0004
VIII	Interpretacja stanu jako reakcja na symptom w systemie zautomatyzowanym	0,00002
IX	Inne zadania bez znajomości ich opisu	0,03

Metoda wprowadza czynniki wpływające niekorzystnie na działanie operatora oraz współczynniki korygujące wartości prawdopodobieństw nominalnych. W tabeli 3. zestawiono czynniki i współczynniki korygujące.

Tabela 3. Zestawienie niekorzystnych czynników i współczynników korygujących

Niekorzystny czynnik	Współczynnik korygujący
Brak odpowiedniego czasu na wykrycie stanu awaryjnego i jego korektę	11,0
Niezgodność rzeczywistości z modelem projektowym pracy operatora	8,0
Dwuznaczność w procedurach działania	5,0
Zła percepcja ryzyka	4,0
Niedoświadczenie operatora	3,0
Konflikt celów	2,5
Warunki sprzyjające wyborowi niewłaściwej procedury	2,0
Wysoki poziom stresu emocjonalnego	1,3
Brak zgodności między wskazaniem wskaźników a procedurami	1,2

Przykład aplikacji metody

Oszacować prawdopodobieństwo błędu związanego z wprowadzeniem alternatywnej technologii uzdatniania wody z powodu nadzwyczajnego zdarzenia, polegające na zanieczyszczeniu, które wystąpiło w źródle (w rzece, w przekroju ujęcia). Wprowadzenie alternatywnej technologii powinno się odbywać według wcześniej opracowanych procedur. Niedoświadczony operator stosuje niewłaściwe zmiany w technologii uzdatniania wody, przez co nieświadomie naraża użytkowników wodociągu na duże ryzyko związane ze złą jakością wody.

Z tabeli 2. wybiera się nominalną zawodność operatora odpowiadającą danemu typowi zadania. Wybrano typ VI, któremu odpowiada wskaźnik zawodności identyfikowany z prawdopodobieństwem popełnienia błędu, równy 0,003. Następnie należy uwzględnić czynniki wpływające na popełnienie błędu, którym przyporządkowane są odpowiednie współczynniki korygujące (według tab. 3.). Dla każdego czynnika należy określić współczynnik względnej ważności według wiedzy eksperta. Szczegółowy tok obliczeń przedstawiono w tab. 4.

Tabela 4. Obliczenia pomocnicze do wyznaczania PBO metodą HEART

Czynnik	Współczynnik korygujący	Względna ważność	Wartość współczynników wpływu W_i
Niedoświadczenie operatora	3	0,5	$(3 - 1) \cdot 0,5 + 1 = 2,0$
Dwuznaczność w procedurach działania	5	0,8	$(5 - 1) \cdot 0,8 + 1 = 4,2$
Zła percepcja ryzyka	4	0,9	$(4 - 1) \cdot 0,9 + 1 = 3,7$
Warunki nadzwyczajne sprzyjające wyborowi niewłaściwej procedury	2	0,6	$(2 - 1) \cdot 0,6 + 1 = 1,6$
			Suma 11,5

Prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez operatora wylicza się ze wzoru:

$$PBO = U_i \cdot \prod_{i=1}^n W_i \quad (2)$$

gdzie: U_i – wskaźnik zawodności operatora według tab. 2.,

W_i – współczynnik wpływu obliczany jak w tab. 4.,

$$PBO = 0,003 \cdot 2,0 \cdot 4,2 \cdot 3,7 \cdot 1,6 = 0,15.$$

Wartości współczynników wpływu mogą posłużyć do wyznaczania względnego wpływu poszczególnych czynników na zawodność operatora, i tak:

- niedoświadczenie operatora – $(2,0/11,5) \cdot 100 = 17,4\%$,
- dwuznaczność w procedurach działania – $(4,2/11,5) \cdot 100 = 36,5\%$,
- zła percepcja ryzyka – $(3,7/11,5) \cdot 100 = 32,2\%$,
- warunki nadzwyczajne – $(1,6/11,5) \cdot 100 = 13,9\%$.

4. Podsumowanie

- System wodociągowy należy zawsze rozpatrywać jako integralną całość układu człowiek–technika–środowisko, w którym człowiek jako operator systemu odgrywa bardzo istotną rolę.
- Analiza i ocena wpływu błędów ludzkich na efektywność eksploatacji SZW są skomplikowane, ze względu na losowość zjawiska oraz istnienie różnych relacji między elementami (podsystemami) systemu.
- Współczesny trend w badaniach naukowych systemów komunalnych, do których należy SZW, to traktowanie ich jako systemów biotechnicznych, w których analizy niezawodności są podstawową jakością związaną z bezpieczeństwem tych systemów.
- Statystyka awarii w SZW, jak i w innych systemach komunalnych dobitnie dowodzi o konieczności uwzględniania roli operatora w modelach niezawodności funkcjonowania i niezawodności bezpieczeństwa systemów.
- Operator SZW musi często podejmować decyzję w warunkach niepewności. Im wcześniej operator podsystemu otrzyma informację o zagrożeniu, tym większa jest możliwość podjęcia właściwych decyzji. Duże znaczenie ma także wiarygodność przekazywanych informacji.
- Ważnym elementem analizy funkcjonowania systemów wodociągowych staje się ryzyko związane z wiarygodnością i pewnością przekazywania informacji w sytuacjach ekstremalnych, a także ryzyko związane z prawidłową interpretacją otrzymanych informacji i reakcją na nie przez operatora systemu.
- Przedstawione metody THERP i HEART mają charakter opracowań autorskich i są adaptacją do wykorzystania w analizach niezawodnościowych SZW z uwzględnieniem roli operatora systemu i ukierunkowane na wyznaczanie wskaźników i prawdopodobieństw popełnienia błędu.
- W dalszych rozważaniach analizy operatora SZW należy wziąć pod uwagę możliwość zastosowania innych metod, np. HCR (*Human Cognitive Reliability*), SLIM (*Success Likelihood Index Method*), HEPI (*Human Error Probability Index*).

Literatura

1. Iwanek R., Lubowiecka T.: *Ryzyko w podejmowaniu decyzji w systemach zaopatrzenia w wodę*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę i jakość wód”, Wydawn. PZITS O/Poznań, Gdańsk–Poznań, Woda 2002, s. 1043-1054.
2. Jodejko-Pietruszczuk i in.: *Analiza możliwości oceny wpływu zachowań człowieka w eksploatacji maszyn*. Materiały Szkoły Niezawodności PAN. Niezawodność systemów antropotechnicznych. Wdział Transportu Politechniki Warszawskiej. Szczyrk 2009, s. 145-156.

3. Rak J.: *Ryzyko w funkcjonowaniu operatora SZW – analiza ergonomiczna*. Wydawn. Sigma NOT, Gaz, Woda, Technika Sanitarna, nr 6, Warszawa 2003, s. 211-214.
4. Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: *Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.
5. Wieczysty A., Lubowiecka T., Iwanejko R.: *Człowiek – dyspozytor systemu jako element wpływający na jego bezpieczeństwo. Bezpieczeństwo i niezawodność działania systemów gazowych, wodociągowych, kanalizacyjnych i centralnego ogrzewania*. Konferencja Naukowo-Techniczna, PZITS O/Kraków, Zakopane 1997.
6. Wieczysty A., Lubowiecka T., Iwanejko R.: *Niezawodność człowieka w biotechnicznym systemie zaopatrzenia w wodę*. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę miast i wsi”, PZITS O/Poznań, Poznań 1998.

RELIABILITY OF WATER SUPPLY SYSTEM OPERATOR

Abstract

Failures (threats) result from a violent change which causes loss or damage of a significant for a man technological value. In an extreme case for water supply system (WSS) users, it can be a loss of health or lives, as a result of consuming polluted water. A role of WSS operator is still far from satisfying solutions, especially in the extreme situations – the occurrence of catastrophic events. In the work the basic types of behaviour and mistakes made by an operator, have been presented. The main purpose of the work is to present a method of analysis of water supply system operator reliability.

Złożono w Oficynie Wydawniczej we wrześniu 2009 r.