

# Porównanie wybranych metod oceny niezawodności operatora systemów technicznych na przykładzie systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę

Comparison of selected human reliability assessment methods on the example of a collective water supply system operator

JAKUB ŻYWIEC, BARBARA TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK

DOI 10.36119/15.2023.5.7

Literatura specjalistyczna wskazuje na duży udział czynnika ludzkiego wśród przyczyn awarii systemów technicznych na poziomie od 70 do 90 % w zależności od badanego sektora. Dla systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) szacuje się, że działanie człowieka stanowi przyczynę 75% awarii. W latach 60-tych dwudziestego wieku zrodziła się idea badań niezawodności operatora jako jednego z ważniejszych elementów systemu biotechnicznego. Na przestrzeni lat powstało ponad 50 różnych metod oceny niezawodności operatora (ang. HRA – Human Reliability Assessment), które różnią się swoimi właściwościami oraz możliwościami zastosowania dla wybranych systemów. W tym okresie metody HRA rozwijały się w kierunku lepszego dopasowania do rzeczywistych warunków pracy operatora. Różnice między poszczególnymi metodami pozwoliły na ich podział na trzy generacje. Metody pierwszej generacji (1970 – 1990) skupiają się na wyznaczeniu prawdopodobieństwa błędu operatora. Druga generacja metod (1990 – 2005) uwzględnia wpływ na poziom niezawodności operatora czynników kontekstowych opisujących sytuację oraz funkcji poznawczych człowieka. Trzecia generacja metod (2005 – obecnie) skupia się na wykorzystaniu metod symulacyjnych do oceny niezawodności operatora. W pracy przedstawiono wybrane metody służące do oceny niezawodności operatora. Każda z nich pochodzi z innej generacji metod, tak by przedstawić najważniejsze różnice pomiędzy nimi. Wybrane metody HRA porównano pod względem sposobu wyznaczenia prawdopodobieństwa błędu operatora, wpływu czynników opisujących kontekst, wpływu oceny ekspertów oraz ich wykorzystania w różnych dziedzinach. Przeprowadzono ocenę niezawodności operatora SZZW dla procesu płukania filtrów z wykorzystaniem wybranych metod, a następnie porównano między sobą otrzymane wyniki.

*Słowa kluczowe: ocena niezawodności operatora, HRA, HEART, CREAM*

Specialist literature indicates a large share of the human factor among the causes of failures of technical systems at the level of 70 to 90%, depending on the analyzed sector. For collective water supply systems (CWSS) it is estimated that human activity is the cause of 75% of failures. In the 1960s, the idea of operator reliability research as one of the most important elements of a biotechnical system was born. Over the years, over 50 different methods of assessing operator reliability (HRA – Human Reliability Assessment) have been developed, which differ in their properties and applicability for selected systems. During this period, HRA methods developed towards a better fit to the real working conditions of the operator. The differences between the individual methods allowed them to be divided into three generations. The first generation methods (1970 – 1990) focus on determining the probability of operator error. The second generation of methods (1990 – 2005) takes into account the impact of contextual factors describing the situation and human cognitive functions on the level of operator reliability. The third generation of methods (2005–present) focuses on the use of simulation methods to assess operator reliability. The paper presents selected methods for assessing operator reliability. Each of them comes from a different generation, to present the most important differences between them. The selected HRA methods were compared in terms of the method of determining the probability of operator error, the impact of factors describing the context, the impact of expert judgment and their use in various fields. An assessment of the reliability of the CWSS operator for the filter backwashing process was carried out using selected methods, and then the obtained results were compared with each other.

*Keywords: human reliability assessment, HRA, HEART, CREAM*

dr inż. Jakub Żywiec <https://orcid.org/0000-0002-0823-4229>; prof. dr hab. inż. Barbara Tchórzewska-Cieślak <https://orcid.org/0000-0002-7622-6749> – Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków, Wydział Budownictwa Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechnika Rzeszowska. Adres do korespondencji/Corresponding Author: [j.zywiec@prz.edu.pl](mailto:j.zywiec@prz.edu.pl),

## Wstęp

Pierwsze badania nad niezawodnością operatora przeprowadzone zostały po II wojnie światowej i skupiały się one w sektorze energetyki jądrowej [1,9]. Ich celem było opracowanie metody oceny działania operatora systemu oraz wyznaczenie prawdopodobieństwa popełnienia przez niego błędu. Dzięki temu narzędziu możliwe stało się podjęcie działań mających na celu redukcję lub uniknięcie ryzyka związanego z błędem czynnika ludzkiego, prowadzącego do zdarzeń o katastrofalnych skutkach. Od samego początku panowało multidyscyplinarne podejście do tematyki oceny niezawodności operatora (ang. HRA – Human Reliability Assessment), które obejmowało nauki o niezawodności, ergonomii i psychologii [1,2,6,7]. Przez termin niezawodność operatora rozumie się prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na tym, że operator poprawnie wykona zadania stawiane przez system w danej sytuacji, w określonym przedziale czasowym, nie popełniając błędu. Na przestrzeni ostatnich 50 lat przedstawiono ponad 50 różnych metod HRA [2,6,8,12,17,19]. W celu ich klasyfikacji zaproponowano podział na trzy generacje. Pierwsza generacja HRA obejmuje lata 1970 – 1990 i przynależą do niej takie metody jak: THERP (ang. Technique for Human Error Rate Prediction) [25], HCR (ang. Human Cognition Reliability) [11], HEART (ang. Human Error Assessment and Reduction Technique) [29]. Metody te skupiają się na ilościowym wyznaczeniu prawdopodobieństwa błędu operatora. Druga generacja HRA obejmuje lata 1990 – 2005. Metody tej generacji oprócz wyznaczenia prawdopodobieństwa błędu operatora mają na celu zbadanie wpływu na poziom niezawodności operatora, czynników kontekstowych opisujących sytuację oraz funkcji poznawczych człowieka, takich jak: pamięć, uwaga, myślenie i postrzeganie. Przykładami metod tej generacji są ATHEANA (ang. A Technique for Human Event Analysis) [5], SPAR-H (ang. Simplified Plant Analysis Risk Human Reliability Assessment) [27], CREAM (ang. Cognitive Reliability and Error Analysis Methods) [14]. Trzecia generacja HRA kształtująca się po 2005 roku skupia się na wykorzystaniu metod symulacyjnych do oceny niezawodności operatora oraz modyfikacji metod wcześniejszych generacji, np. metoda NARA (ang. Nuclear Action Reliability Assessment) [10], CARA (ang. Controller Action Reliability Assessment) [18], SHERPA (ang. Simulator for Human Error Probability Analysis) [7].

Dane dostępne w literaturze wskazują, że czynnik ludzki odgrywa dużą rolę w powstawaniu ponad 90% wypadków w przemyśle nuklearnym, ponad 80% wypadków w przemyśle chemicznym i paliwowym, ponad 75% wypadków morskich, ponad 70% wypadków lotniczych oraz ponad 75% awarii w systemach zaopatrzenia w wodę [13,16,23,24,26,28]. Dlatego tak ważne jest by uwzględnić wpływ czynnika ludzkiego na niezawodność systemów technicznych. Istniejące metody HRA posiadają szereg ograniczeń, które uniemożliwiają ich zastosowanie w każdym sektorze. Dąży się do opracowania metody uniwersalnej, uwzględniającej wpływ czynników zewnętrznych, korzystającej z modelu procesów poznawczych oraz mającej możliwość zastosowania w warunkach dynamicznych [1,2,6,7,8,12].

W pracy przedstawiono porównanie wybranych metod oceny niezawodności operatora. Przedstawione zostały metody: HEART, CREAM oraz Fuzzy-Bayes CREAM. Każda z wybranych metod reprezentuje inną generację HRA. Metody zostały porównane pod względem sposobu wyznaczenia prawdopodobieństwa błędu operatora, wpływu czynników opisujących kontekst, wpływu oceny ekspertów oraz ich wykorzystania w różnych dziedzinach. Przeprowadzono również ocenę niezawodności operatora SZZW dla procesu płukania filtrów w stacji uzdatniania wody z wykorzystaniem wybranych metod, a następnie porównano między sobą otrzymane wyniki.

## Metoda HEART

Metoda HEART (ang. Human Error Assessment and Reduction Technique) jest jedną z pierwszych metod HRA. Została zaprezentowana w 1985 r. przez Wiliama [28]. Należy do I generacji metod HRA. Znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach techniki [3,4,12,17,18]. Metoda ta pozwala na określenie wielkości wartości prawdopodobieństwa błędu ludzkiego HEP (ang. Human Error Probability). Uwzględnia wpływ czynników ergonomicznych i środowiskowych na niezawodność operatora [29]. Na potrzeby metody opracowano ogólną klasyfikację zadań wykonywanych przez operatora przedstawioną w tabeli 1 oraz określono nominalne wartości jego zawodności tzw. GEP (ang. General Error Probability) [29].

Wartości GEP opisują prawdopodobieństwo błędu operatora w warunkach idealnych, gdy żadne inne czynniki nie mają wpływu na wykonanie zadania.

Tab. 1. Klasyfikacja zadań operatora wg. metody HEART (na podstawie [29])

Tab. 1. Classification of operator's tasks according to HEART method (based on [29])

Lp.	Opis	GEP
1	Zadanie nieznanne, wykonywane pośpiesznie bez świadomości konsekwencji	0,55
2	Zmiana stanu systemu na nowy lub wyjściowy przy pojedynczej próbie bez pomocy procedur	0,26
3	Złożone zadanie wymagające wysokiego poziomu umiejętności i wiedzy	0,16
4	Proste zadanie wykonywane pośpiesznie lub nieuważnie	0,09
5	Rutynowe, wyćwiczone, szybkie zadanie wymagające niewielkich umiejętności	0,02
6	Zmiana stanu systemu na nowy lub wyjściowy przy pomocy procedur	0,003
7	Rutynowe, wyćwiczone, znajome zadanie wykonywane w idealnych warunkach przez doświadczonego operatora	0,0004
8	Prawidłowa reakcja na polecenie systemowe w systemie ze wsparciem operacyjnym	0,00002
9	Inne zadania, trudne do opisu	0,03

W celu zbliżenia tych wartości do rzeczywistych warunków podczas wykonywania zadań, wprowadzono 38 czynników sprzyjających błędom tzw. EPC (ang. Error-Producing Conditions), które wpływają

Tab. 2. Wybrane czynniki sprzyjające błędom EPC (na podstawie [29])

Tab. 2. Selected factors contributing to EPC errors (based on [29])

Lp.	EPC	W <sub>i</sub>
1	Niezajomość sytuacji potencjalnie ważnej, która pojawia się rzadko	17
2	Niewystarczająca ilość czasu na wykrycie i korektę błędu systemu	11
3	Niski poziom siły sygnału w stosunku do tła	10
4	Łatwy dostęp do funkcji kasowania/zastępowania danych	9
5	Brak funkcjonalności przestrzennej	8
6	Niezgodność między środowiskiem projektowanym, a rzeczywistym	8
7	Brak środków odwracających niezamierzoną akcję	8
8	Nadmiar informacji	6
9	Zmiana techniki wykonywania zadania	6
10	Transfer wiedzy pomiędzy zadaniami	5,5
11	Dwuznaczność procedur operacyjnych	5
12	Błąd w percepcji ryzyka	4
13	Niska jakość systemowych informacji zwrotnych	4
14	Opóźniona/niekompletna odpowiedź zwrotna systemu	4
15	Niedoświadczenie operatora	3
16	Niska jakość procedur	3
17	Brak lub niewystarczające procedury sprawdzające wyniki	3
18	Wysoki poziom stresu emocjonalnego	1,3
19	Niska motywacja pracownika	1,2

negatywnie na operatora [29]. Ich wpływ na wartość prawdopodobieństwa błędu ludzkiego uwzględniono przez zastosowanie współczynników korygujących ( $W_i$ ) oraz oceny eksperckiej. W tabeli 1 przedstawiono wybrane czynniki EPC, jako te które mają największy wpływ przy wyznaczeniu wartości HEP.

Wartość  $HEP_{HEART}$  wyznacza się za pomocą zależności [29]:

$$HEP_{HEART} = GEP_i \cdot \prod_{i=1}^n [(W_i - 1) \cdot OE + 1] \quad (1)$$

gdzie:

$GEP_i$  – nominalna wartość prawdopodobieństwa błędu operatora zależna od rodzaju zadania,

$W_i$  – wartość współczynnika korygującego wartość  $GEP$ ,

$OE$  – ocena ekspercka wpływu wybranego czynnika EPC na popełnienie błędu przez operatora, przyjmuje wartości od 0 do 1.

### Metoda CREAM

Metoda CREAM (ang. Cognitive Reliability and Error Analysis Methods) zaliczana jest do II generacji metod HRA. Została zaproponowana w 1998 r. przez E. Hollnagel'a w pracy [14]. Metoda ta może zostać użyta w formie predykcyjnej pozwalającej na określenie prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora lub w formie retrospektywnej do analizy błędów operatora prowadzących do awarii systemu technicznego [14,30].

Istotą metody CREAM jest wyznaczenie wartości prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora. W tym celu ocenia się wpływ 9 czynników CPC (ang. Common Performance Conditions) na poziom niezawodności operatora, są to: organizacja pracy, warunki pracy, jakość interfejsu człowiek – maszyna, dostępność procedur/planów, liczba jednocześnie wykonywanych zadań, ilość czasu na wykonanie zadania, pora dnia, kwalifikacje i doświadczenie, współpraca zespołu

procedur/planów, liczba jednocześnie wykonywanych zadań, ilość czasu na wykonanie zadania, pora dnia, kwalifikacje i doświadczenie oraz współpraca zespołu [14]. Czynniki te są od siebie współzależne wg. modelu przedstawionego na rysunku 1. Mogą one wpływać na poziom niezawodności operatora w sposób pozytywny, nieokreślony lub negatywny.

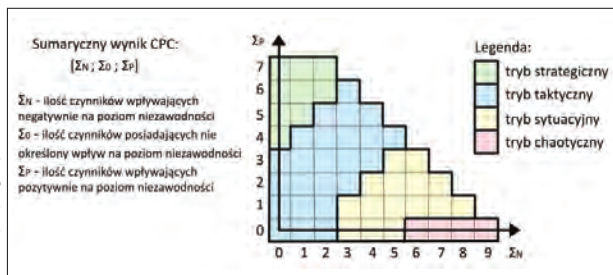
Jeżeli w pierwszym etapie oceny czynnika CPC uzyskany wynik ma „nieokreślony” wpływ na poziom niezawodności należy sprawdzić wpływ czynników współzależnych [2] i przeprowadzić korektę oceny czynników CPC zgodnie z procedurą przedstawioną na rysunku 2.

Rys. 2. Zasady korekty poziomu wpływu na niezawodność dla czynników CPC współzależnych (na podstawie [2])  
Fig. 2. Rules for adjusting the level of impact on reliability for interdependent CPC factors (based on [2])



Sumaryczny wynik oceny czynników CPC wskazuje poziom kontroli działania operatora, dla którego określona została wartość prawdopodobieństwa popełnienia przez niego błędu. Metoda ta korzysta z modelu procesów poznawczych COCOM (ang. Contextual Control Mode), który zakłada, że działania człowieka są wynikiem kontrolowanego użycia jego kompetencji w zależności od kontekstu danej sytuacji

Rys. 3. Zależność między sumarycznym wynikiem oceny czynników CPC, a trybem kontroli działania operatora (na podstawie [14])  
Fig. 3. Relationship between the summary result of the assessment of the CPC factors and the mode of operator control (based on [14])



i mają charakter reaktywny oraz intencjonalny [14]. Wyróżnione zostały cztery poziomy kontroli, zwane trybami [14]:

- tryb kontroli chaotyczny – charakteryzuje się największym prawdopodobieństwem popełnienia błędu przez operatora na poziomie  $10^{-1} < P < 1$ . Dotyczy sytuacji, w których operator traci kontrolę nad swoim działaniem.
- tryb kontroli sytuacyjny – charakteryzuje się prawdopodobieństwem popełnienia błędu przez operatora w przedziale  $1 \cdot 10^{-2} < P < 5 \cdot 10^{-1}$ . Operator ze względu na ograniczenia czasowe, wykonuje działania schematycznie, bez analizy innych potencjalnych rozwiązań.

- tryb kontroli taktyczny – charakteryzuje się prawdopodobieństwem popełnienia błędu przez operatora w przedziale  $1 \cdot 10^{-3} < P < 1 \cdot 10^{-1}$ . Operator wykonuje zadania zgodnie z procedurami, mając na uwadze aktualny stan systemu.
- tryb kontroli strategiczny – charakteryzuje się najmniejszym prawdopodobieństwem popełnienia błędu przez

Czynnik CPC	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 Organizacja pracy									
2 Warunki pracy	+		+						
3 Jakość interfejsu człowiek - maszyna	+								
4 Dostępność procedur/planów	+								
5 Liczba jednocześnie wykonywanych zadań		-	-	-					
6 Ilość czasu na wykonanie zadania		+	+	+	-				+
7 Pora dnia									
8 Kwalifikacje i doświadczenie									
9 Współpraca zespołu									+

Legenda: + współzależność proporcjonalna  
- współzależność odwrotnie proporcjonalna

Rys. 1. Współzależności czynników CPC (na podstawie [2])  
Fig. 1. Interdependencies of CPC factors (based on [2])

operatora w przedziale  $5 \cdot 10^{-5} < P < 1 \cdot 10^{-2}$ . Operator posiada dużą wiedzę i doświadczenie. Podejmuje działania w sposób przemyślany, prowadząc do wykonania zadania.

Zależność między wynikiem oceny czynników CPC, a trybem kontroli działania operatora przedstawiono na rysunku 3.

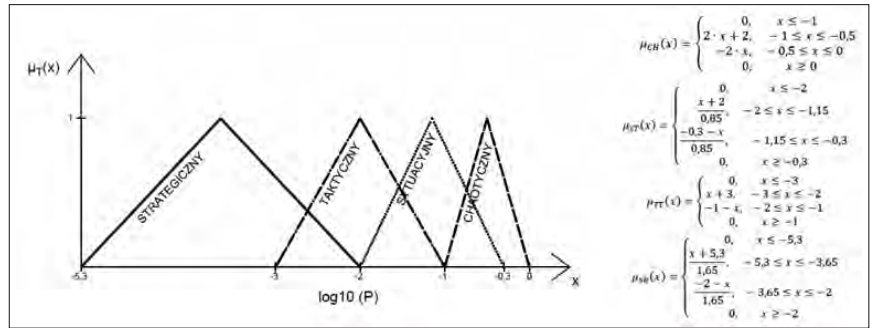
### Metoda Fuzzy – Bayes CREAM

Metoda Fuzzy – Bayes CREAM jest metodą III generacji, która wprowadza modyfikację klasycznej metody CREAM z zastosowaniem modelowania rozmytego oraz wnioskowania bayesowskiego. Konwencjonalna metoda CREAM posiada



klika ograniczeń tj. uzyskanie wyników w postaci przedziału wartości HEP, ograniczone modele współzależności czynników CPC oraz zależności między sumarycznym wynikiem oceny czynników CPC, a trybem kontroli działania operatora [14, 15, 30]. Dane wejściowe do obliczeń wg. tej metody uzyskiwane są na podstawie wywiadu z badanym operatorem i mają charakter nieprecyzyjny i niepewny [15, 30].

Zastosowanie logiki rozmytej do modelowania danych wejściowych pozwala na przezwycięzenie tego problemu. W metodzie Fuzzy-Bayes CREAM zmodelowano możliwości oceny czynników CPC, zastępując zmienne lingwistyczne wartościami liczbowymi, które następnie poddano procesowi rozmycia, zgodnie z modelami przedstawionymi na rysunku 4



Rys. 5. Funkcja przynależności dla trybów kontroli (na podstawie [15,30])  
Fig. 5. Membership function for control modes (based on [15,30])

Wartości wejściowe dla sieci stanowią opisane za pomocą liczb rozmytych wyniki oceny czynników CPC badanego operatora. Wartość wyjściową z sieci stanowi rozkład prawdopodobieństwa dla czterech trybów kontroli działania operatora.

Następnie należy poddać wyostrzeniu uzyskany wynik, tak by otrzymać ostrą wartość (OTK – ostry tryb kontroli). Jedną z najpopularniejszych metod wyostrzania jest metoda COG (ang. Center of Gravity), która polega na wyznaczeniu środka ciężkości figury stworzonej przez wykres funkcji przynależności [15]. Wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora HEPFBCREAM należy wyznaczyć z zależności [15, 30]

$$HEP_{FBCREAM} = 10^{OTK} \quad (2)$$

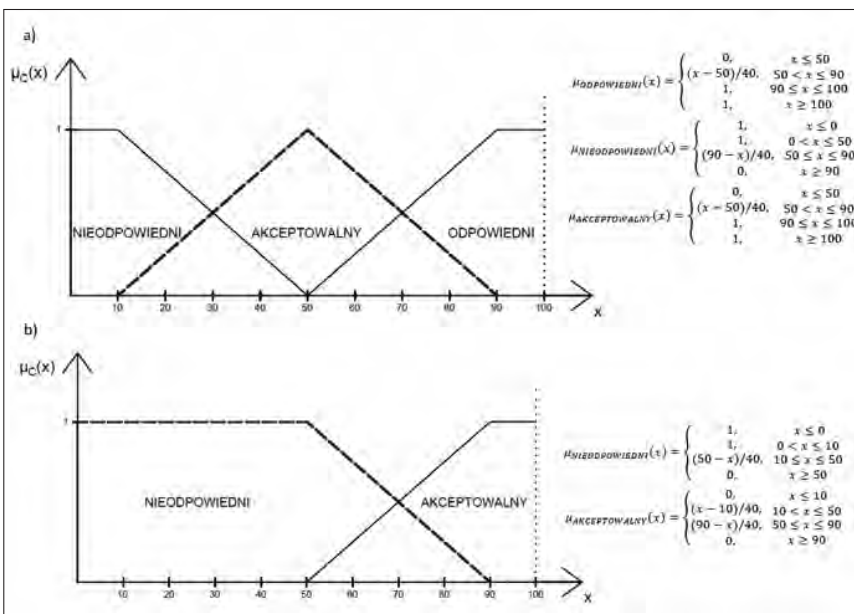
gdzie:

- OTK – wyostrzona wartość wyniku z rozkładu prawdopodobieństwa dla trybu kontroli operatora.

### Przykład aplikacyjny

W celu porównania możliwości wykorzystania przedstawionych metod oceny niezawodności operatora w SZZW, przeprowadzono ocenę niezawodności operatora dla procesu płukania filtrów pośpiesznych w stacji uzdatniania wody.

Filtracja wody jest jednym z podstawowych procesów technologicznych uzdatniania wody. W procesie tym usuwane są

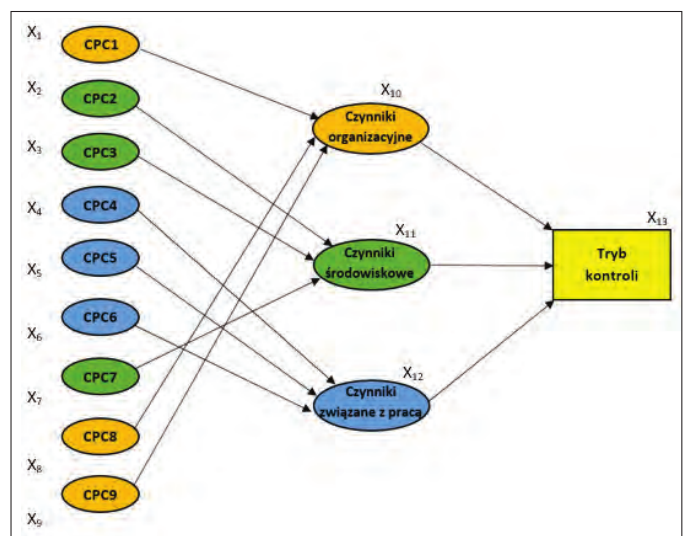


Rys. 4. Funkcja przynależności dla ocen czynników CPC w zależności od stopni oceny: a) trójstopniowa skala ocen; b) dwustopniowa skala ocen (na podstawie [15, 30])  
Fig. 4. Membership function for the assessment of CPC factors depending on the degree of assessment: a) three-point grading scale; b) two-stage grading scale (based on [15, 30])

[15,30]. Z wykorzystaniem liczb rozmytych opisano również tryby kontroli działania operatora. W tym celu zapisano interwały prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora w postaci logarytmicznej, a wyznaczone w ten sposób wartości wykorzystano do modelowania rozmytego z wykorzystaniem trójkątnych liczb rozmytych zgodnie z modelem przedstawionym na rysunku 5.

Modele przedstawione na rysunkach 1 i 2 w metodzie Fuzzy-Bayes CREAM zostały opisane za pomocą sieci Bayesa przedstawionej na rysunku 6. Wykorzystanie wnioskowania bayesowskiego pozwala na przedstawienie modelu probabilistycznego dla grupy zmiennych losowych oraz zależności między nimi [15,30].

Rys. 6. Model probabilistyczny dla zależności między czynnikami CPC, oraz trybem kontroli działania operatora  
Fig. 6. Probabilistic model for the relationship between the CPC factors and the operator control mode



z wody naturalne oraz po koagulacyjne zawiesiny w wyniku filtracji wody przez materiał porowaty np. złoża piaskowe, żwirowo – antracytowe. W czasie eksploatacji wypełnienia filtra ulega zanieczyszczeniu tzw. kolmatacji złoża, na skutek zatrzymywania się usuwanych cząstek. Jedną z ważniejszych procedur eksploatacyjnych dla filtrów jest proces płukania, mający na celu przywrócenie złoża filtracyjnego do pierwotnego stanu i ponownej eksploatacji [31]. Operator odpowiedzialny za sterowanie pracą filtra na podstawie odczytów parametrów eksploatacyjnych tj. czasu eksploatacji filtra oraz wysokości strat ciśnienia wody na filtrze podejmuje decyzję o konieczności płukania filtra [31]. Schemat blokowy procedury płukania przedstawiono na rysunku 7. Ze względu na to, że proces filtracji jest jednym z podstawowych i kluczowych etapów technologicznych uzdatniania wody, w przypadku popełnienia błędu przez operatora zagrożona jest stabilna praca filtrów co może oddziaływać na pracę całej stacji uzdatniania wody. Błędnie przeprowadzona procedura płukania może skutkować ograniczeniem wydajności produkcyjnej filtra, przedostaniem się usuwanych zanieczyszczeń do wcześniejszych lub kolejnych etapów uzdatniania czy też uszkodzeniem złoża filtracyjnego [31].



Rys. 7. Schemat blokowy procedury płukania filtrów  
Fig. 7. Block diagram of the filter backwashing procedure

Badania przeprowadzono z udziałem operatora – pracownika przedsiębiorstwa wodociągowo kanalizacyjnego, którego zadaniem jest sterowanie i zarządzanie pracą stacji uzdatniania wody, w tym m.in. przeprowadzanie procedury płukania filtrów w stacji uzdatniania wody.

**Metoda HEART**

Procedura płukania filtrów, jako ciąg zadań operatorskich, które należy wykonywać w odpowiedniej kolejności zgodnie z rysunkiem 3 została zakwalifikowana zgodnie z tabelą 1 jako zadanie polegające na: zmianie stanu systemu na nowy lub

wyjściowy przy pomocy procedur, dla którego wartość GEP wynosi 0,003. Podczas oceny prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora zidentyfikowano również wpływ wybranych czynników EPC tj. brak doświadczenia operatora (W<sub>1</sub>=3), niska jakość procedur (W<sub>2</sub>=3), wysoki poziom stresu (W<sub>3</sub> = 1,3) oraz niska motywacja personelu (W<sub>4</sub>=1,2). Na podstawie oceny eksperckiej określono wpływ wskazanych czynników EPC na popełnienie błędu przez operatora – dla czynników: brak doświadczenia operatora (OE<sub>1</sub>=0,1), niska jakość procedur (OE<sub>2</sub>=0,4), wysoki poziom stresu (OE<sub>3</sub>=0,2) oraz niska motywacja personelu (OE<sub>4</sub>=0,3). Wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu przez operatora (HEP) została wyznaczona z zależności (1).

$$HEP_{HEART} = 0,003 \cdot [(3 - 1) \cdot 0,1 + 1] \cdot [(3 - 1) \cdot 0,4 + 1] \cdot [(1,3 - 1) \cdot 0,2 + 1] \cdot [(1,2 - 1) \cdot 0,3 + 1] = 0,0073$$

**Metoda CREAM**

Na potrzeby wyznaczenia prawdopodobieństwa popełnienia błędu z wykorzystaniem metody CREAM, poddano ocenie 9 czynników CPC mogących mieć wpływ na poziom niezawodności operatora: pozytywny, neutralny lub negatywny. Wyniki

oceny czynników oraz ich wpływ na poziom niezawodności przed i po korekcie uwzględniającej zależności między współczynnikami przedstawiono w tabeli 3.

Sumaryczny wynik oceny czynników CPC dla badanego operatora wynosi: przed korektą [ΣN = 0; Σ0 = 6; ΣP = 3]; po korekcie [ΣN = 0; Σ0 = 4; ΣP = 5]. Na podstawie wyników określono, że operator zgodnie z rysunkiem 1 przed korektą działa w taktycznym trybie kontroli, dla którego wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu wynosi od 0,001 do 0,1. Po uwzględnieniu zależności pomiędzy czynnikami i dokonaniu korekty oceny wpływu stwierdzono, że operator działa w strategicznym trybie kontroli, dla którego wartość prawdopodobieństwa popełnienia błędu wynosi HEP<sub>CREAM</sub> od 0,00005 do 0,01.

**Metoda Fuzzy-Bayes CREAM**

W metodzie tej oceny czynników CPC, wskazane przez badanego operatora przyjmują wartości liczbowe od 0 do 10, co przedstawiono w tabeli 4. Następnie wyniki przekształcono do postaci rozmytej według przyjętego modelu oraz wprowadzono do oprogramowania, w którym przeprowadzono obliczenia dla sieci Bayesa. Uzyskany rozkład prawdopodobieństwa dla trybów kontroli działania operatora przedstawiono na rysunku 8.

Tab. 4. Rozmyte wartości oceny czynników CPC dla badanego operatora

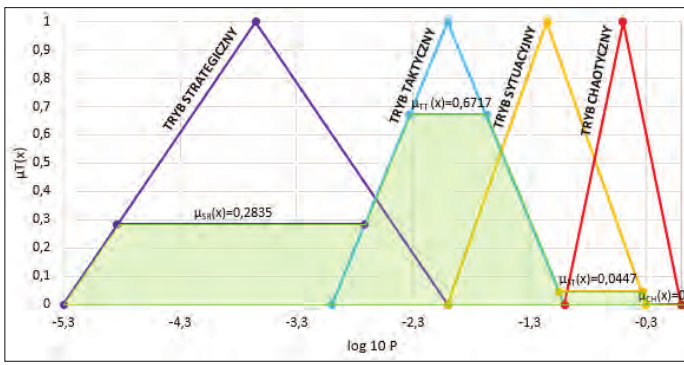
Tab. 4. Fuzzy values of CPC factor evaluation for the tested operator

Czynnik CPC	Ocena czynnika CPC	Rozmyte wartości oceny
CPC1	7	0,5 ; 0,5 ; 0
CPC2	8	0,75 ; 0,25 ; 0
CPC3	9	1 ; 0 ; 0
CPC4	8	0,75 ; 0,25 ; 0
CPC5	7	0,5 ; 0,5 ; 0
CPC6	6	0,25 ; 0,75 ; 0
CPC7	9	1 ; 0 ; 0
CPC8	7	0,5 ; 0,5 ; 0
CPC9	7	0,5 ; 0,5 ; 0

Tab. 3. Wyniki i wpływ oceny czynników CPC na poziom niezawodności badanego operatora

Tab. 3. Results and impact of the assessment of CPC factors on the reliability level of the surveyed operator

Lp.	Czynnik CPC	Ocena	Wpływ na poziom niezawodności	Skorygowany wpływ na poziom niezawodności
1	Organizacja pracy	efektywna	nieokreślony	
2	Warunki pracy	korzystne	pozytywny	
3	Jakość interfejsu człowiek – komputer	efektywna	pozytywny	
4	Dostępność procedur/planów	odpowiednia	pozytywny	
5	Liczba jednocześnie wykonywanych zadań	odpowiadająca możliwościom pracownika	nieokreślony	pozytywny
6	Ilość czasu na wykonanie zadania	czasami nieodpowiednia	nieokreślony	pozytywny
7	Pora dnia	pora dzienna	nieokreślony	
8	Kwalifikacje i doświadczenie	odpowiednie, ograniczone doświadczenie	nieokreślony	
9	Współpraca zespołu	wydajna	nieokreślony	nieokreślony



Rys. 8. Wykres funkcji przynależności  $\mu_T(x)$  dla poszczególnych trybów kontroli badanego operatora  
Fig. 8. Graph of the membership function  $\mu_T(x)$  for individual control modes of the tested operator

Następnie otrzymane wyniki poddano wyostrzeniu (OTK = -2,76278) i wyznaczono wartość prawdopodobieństwa błędu operatora  $HEP_{FBCREAM}$  z zależności 2.

$$HEP_{FBCREAM} = 10^{-2,76278} = 0,0017$$

### Porównanie metod i wnioski końcowe

W pracy przedstawiono porównanie wybranych metod oceny niezawodności operatora, należących do trzech różnych generacji metod HRA tj. HEART, CREAM oraz Fuzzy-Bayes CREAM wraz z przykładem ich aplikacji dla operatora procesu płukania filtrów w stacji uzdatniania wody. Zestawienie uzyskanych wyników przedstawiono w tabeli 5.

Tab. 5. Zestawienie wyników z wykorzystaniem metod HEART, CREAM oraz Fuzzy-Bayes CREAM  
Tab. 5. Summary of results using the HEART, CREAM and Fuzzy-Bayes CREAM methods

Prawdopodobieństwo popełnienia błędu przez operatora	Metoda oceny niezawodności operatora		
	HEART	CREAM	Fuzzy-Bayes CREAM
HEP	0,0073	0,00005 ÷ 0,01	0,0017

W zależności od zastosowanej metody otrzymano dla badanego procesu różne wartości HEP. Główną różnicą między metodami I generacji HRA, a metodami II generacji HRA jest uwzględnienie wpływu czynników opisujących kontekst sytuacji. W metodzie HEART skupiono się na negatywnym wpływie czynników ergonomicznych i środowiskowych na operatora. Czynniki opisane w metodzie CREAM, tworzą model współzależności i mogą wpływać na działanie operatora w sposób pozytywny lub negatywny. Wynik uzyskany w oparciu o metodę HEART, jest również obciążony subiektywizmem oceny eksperta, który określa wpływ poszczególnych czynników EPC na kształtowanie się końcowego wyniku. Z kolei metoda CREAM pozwala tylko na oszacowanie wartości HEP, na podstawie przedziału

wartości opisujących poszczególne tryby kontroli działania operatora. Modyfikacja konwencjonalnej metody CREAM przez zastosowanie logiki rozmytej oraz wnioskowania bayesowskiego pozwoliła na matematyczny opis prostych, graficznych modeli oraz uzyskanie ostrego wyniku, a nie jak w przypadku klasycznej wersji metody CREAM wyniku w postaci zakresu wartości HEP. Porównując wyniki uzyskane za pomocą metody HEART oraz Fuzzy-Bayes CREAM dla tego samego operatora jednakowego procesu otrzymano około 4-krotnie wyższą wartość w przypadku metody HEART.

W tabeli 6 przedstawiono porównanie wybranych cech poszczególnych metod w tym m. in. sposobu wyznaczenia wartości HEP, wpływu oceny ekspertów, wpływu czynników kontekstowych oraz wykorzystania w różnych dziedzinach.

Tab. 6. Porównanie metod HEART, CREAM oraz Fuzzy-Bayes CREAM  
Tab. 6. Comparison of the HEART, CREAM and Fuzzy-Bayes CREAM methods

Metoda	HEART (1985r.)	CREAM (1998r.)	Fuzzy-Bayes CREAM (2018r.)
Generacja HRA	I (1970-1990)	II (1990-2005)	III (2005 – obecnie)
Kwantyfikacja wyniku	Wartość liczbowa HEP na podstawie zależności (1)	Wynik w postaci przedziału wartości HEP, na podstawie modelu (rysunek 2)	Wartość liczbowa HEP na podstawie zależności (2)
Wpływ oceny ekspertów	Ocena wagi wpływu czynników EPC	Brak	Brak
Wpływ kontekstu sytuacji	Brak	9 czynników CPC	9 czynników CPC
Wykorzystanie metody	przemysł nuklearny, przemysł chemiczny, lotnictwo, transport kolejowy, transport morski, medycyna, systemy wodociągowe [2,3,6,12,20-22]	przemysł nuklearny, przemysł kosmiczny, transport morski, medycyna, linie produkcyjne, systemy wodociągowe [6,12,30,31]	transport morski, transport lotniczy, systemy wodociągowe [15,30]

Porównanie metody HEART, CREAM oraz Fuzzy – Bayes CREAM pozwoliło na sformułowanie następujących wniosków:

- Ze względu na ograniczenia metod I generacji, które skupiały się na ilościowym wyznaczeniu wartości HEP przy niewielkim stopniu uwzględnienia czynników kontekstowych, wyniki uzyskane za pomocą metody HEART mogą być zawyżone.
- Wyniki uzyskane za pomocą klasycznej metody CREAM cechują się małą dokładnością, zatem trudno jest wyko-

rzystać je do bardziej szczegółowych analiz. Właściwe zatem wydaje się rozwijanie nowych metod HRA, wykorzystujących metody symulacyjne lub modyfikujące metody I i II generacji (np. metoda Fuzzy – Bayes CREAM) oraz aplikacja znanych już metod w różnych sektorach, co pozwoli na poszerzenie wiedzy w zakresie oceny niezawodności operatora.

- Obecnie badacze wyróżnili cztery główne ograniczenia dotyczące istniejących metod HRA: brak danych empirycznych do stworzenia modelu działania operatora i jego walidacji; zależność od oceny ekspertów; mała uniwersalność metod; trudności w modelowaniu funkcji poznawczych człowieka [6,7], co wskazuje potencjalne kierunki dalszych badań.

### LITERATURA

- [1] Belčík M., Tureková I., Szabová Z.: Comparison of selected methods for human reliability assessment, *Problemy Profesjologii* 2/2013
- [2] Adhikari S, Bayley C, Bedford T, Busby JS, Cliffe A, Devgun G, Eid M, French S, Keshvala R, Pollard S, Soane E, Tracy D, Wu S (2008) Human reliability analysis: a review and critique. Manchester Business School, Manchester
- [3] Akyuz E., Celik E.: A modified human reliability analysis for cargo operation in singlepoint mooring (SPM) off-shore units, *As.lied Ocean Research* 58 (2016) 11–20 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.03.012>)
- [4] Akyuz E., Celik E.: A methodological extension to human reliability analysis for cargo tank cleaning operation on board chemical tanker ships, *Safety Science* 75 (2015) 146–155 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.02.008>)
- [5] Barriere M, Bley D, Cooper S, Forester J, Kolaczowski A, Luckas W, Parry G, Ramey-Smith A, Thompson C, Whitehead D, Wreathall J (2000) NUREG-1624: technical basis and implementation guidelines for a technique for human event analysis (ATHEANA). US Nuclear Regulatory Commission
- [6] De Felice F., Petrillo A.: An Overview on Human Error Analysis and Reliability Assessment, *Human Factors and Reliability Engineering for*



- Safety and Security in Critical Infrastructures Decision Making, Theory, and Practice, Springer, 2018, s. 19-41 (DOI: 10.1007/978-3-319-62319-1\_2)
- [7] Di Pasquale V., Miranda S., Iannone R., Riemma S.: A simulator for human error probability analysis (SHERPA), 2015, Reliab Eng Syst Saf 139, s. 17-32 (DOI: 10.1016/j.res.2015.02.003)
- [8] Dsouza N., Lu L.: A Literature Review on Human Reliability Analysis Techniques Applied for Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Industry, Advances in Human Factors in Energy: Oil, Gas, Nuclear and Electric Power Industries, Advances in Intelligent Systems and Computing 495, s. 41-56 (DOI: 10.1007/978-3-319-41950-3\_4)
- [9] French S., Bedford T., Pollard S. J. T., Soane E.: Human reliability analysis: A critique and review for managers, Safety Science 49 (2011) 753-763 (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.02.008>)
- [10] Gibson, W.H., Kirwan, B., Kennedy, R., Edmunds, J., Umbers, I.: Nuclear Action Reliability Assessment (NARA), further development of a data-based HRA tool 2008 Contemporary Ergonomics 2008 s. 164-169
- [11] Hannaman GW, Spurgin AJ, Lukic YD (1984) Human cognitive reliability model for PRA analysis. Draft Report NUS-4531, EPRI Project RP2170-3. Electric Power and Research Institute, Palo Alto, CA
- [12] Havlikova, M., Jirgl, M., Bradac, Z.: Human reliability in Man-Machine Systems, Procedia Engineering Volume 100, Issue January, 2015, s. 1207-1214 (DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.485)
- [13] Helmreich, R.L., 2000. On error management: lessons from aviation. British Medical Journal 320 (7237), 781-785. (DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.320.7237.781>)
- [14] Hollnagel E.: Cognitive Reliability and Error Analysis Method – CREAM, Elsevier, 1998.
- [15] Jin, J., Li, K., Yuan, L. A Fuzzy and Bayesian Network CREAM Model for Human Error Probability Quantification of the ATO System, w Proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT) 2020, Springer: Singapore. s. 567-576.
- [16] Kariuki, S.G., Lowe, K., 2007. Integrating human factors into process analysis. Reliability Engineering and System Safety 92, 1764-1773. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2007.01.002>)
- [17] Kirwan B (1996) The validation of three human reliability quantification techniques—THERP, HEART, JHEDI: Part I—technique descriptions and validation issues. As.I Ergon 27 (6): 359-373 (DOI: [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(96\)00044-0](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(96)00044-0))
- [18] Kirwan, B., Gibson, H.: CARA: A human reliability assessment tool for air traffic safety management – Technical basis and preliminary architecture (2007) The Safety of Systems – Proceedings of the 15th Safety-Critical Systems Symposium, SSS 2007, s. 197-214.
- [19] Rak, J., Tchórzewska – Cieślak B.: Rzyko w eksploatacji systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę, Wydawnictwo Seidel – Przywecki, 2013
- [20] Rak, J., Tchórzewska-Cieślak, B.: Pojęcie niezawodności i bezpieczeństwa pracy operatora w systemie wodociągowym, Instal, 2019, nr 2, 44-48
- [21] Rak, J., Tchórzewska-Cieślak, B., Żywiec, J.: Czynniki niezawodności człowieka w systemach zaopatrzenia w wodę, Instal, 2019, nr 3, 40-43
- [22] Rak, J., Tchórzewska-Cieślak, B., Żywiec, J.: Nowy segment estymatorów wskaźników niezawodności operatora systemu wodociągowego, Instal, 2019, nr 4, 40-43
- [23] Reason, J., 1990b. Human error: models and management. British Medical Journal 320 (7237), 768-770. (DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139062367>)
- [24] Ren, J., Jenkinson, I., Wang, J., Xu, D.L., Yang, J.B., 2008. A methodology to model causal relationships in offshore safety assessment focusing on human and organisational factors. Journal of Safety Research 39, 87-100. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2007.09.009>)
- [25] Swain, Alan D., Guttman, Henry E.: Human Reliability Analysis Applied To Nuclear Power. Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium 1975 s. 116-119
- [26] Tanga Y., Wu S., Miao X., Pollard S.J.T., Hrudehy S.: Resilience to evolving drinking water contamination risks: a human error prevention perspective, Journal of Cleaner Production, Volume 57, 2013. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.018>)
- [27] The SPAR-H human reliability analysis method (2005) NUREG/CR-6883, INL/EXT-05-00509. Idaho National Laboratory, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC
- [28] Wu S., Hrudehy S., French S., Bedford T., Soane E., Pollard S.: A role for human reliability analysis (HRA) in preventing drinking water incidents and securing safe drinking water, Water Research 43(13), June 2009. (DOI: 10.1016/j.watres.2009.04.040)
- [29] Williams, J. C.: A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance. Knutsford: IEEE, 1988, s. 436-450 (DOI: 10.1109/HFPP.1988.27540)
- [30] Zhou Q., Wong Y.D., Loh H. S., Yuen K.F.: A fuzzy and Bayesian network CREAM model for human reliability analysis – The case of tanker shipping, Safety Science 105 (2018) 149-157 (DOI: 10.1016/j.ssci.2018.02.011)
- [31] Żywiec J., Tchórzewska – Cieślak B.: Use of the cream method for the assessment of operator reliability in the process of backwashing filters at a water treatment station, Journal of KONBIN 2020, Volume 50, Issue 3 (DOI: <https://doi.org/10.2478/jok-2020-0053>)