

Barbara Tchorzewska-Cieślak, Dawid Szpak

Propozycja metody analizy i oceny bezpieczeństwa dostawy wody

Zgodnie z ustawą z 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (Dz.U. nr 72, poz. 747), przedsiębiorstwa wodociągowe mają obowiązek zapewnić ciągłą i niezawodną dostawę wody do odbiorców, przy czym priorytet ma zapewnienie wymaganej jakości dostarczanej wody. Dodatkowo system zbiorowego zaopatrzenia w wodę należy do tzw. infrastruktury krytycznej określonej przez europejski program ochrony infrastruktury krytycznej (European Programme for Critical Infrastructure Protection – EPCIP), co nakłada obowiązek jego specjalnej ochrony [1]. Deficyty wody są bardzo uciążliwe dla mieszkańców. Generują znaczne koszty zarówno dla odbiorców wody, co związane jest z koniecznością zakupu wody butelkowanej, jak i dla przedsiębiorstw wodociągowych, co z kolei związane jest z kosztem naprawy uszkodzonych przewodów, wartością strat wody, kosztami płukania sieci czy też koniecznością wypłaty odszkodowań konsumentom wody. Długotrwały brak wody może być również powodem zagrożenia sanitarnego [2, 3]. Z tych powodów system zarządzania zaopatrzeniem w wodę powinien być ciągle udoskonalany. Właściwe zarządzanie systemem zaopatrzenia w wodę powinno obejmować takie elementy, jak wprowadzanie skutecznych technologii oczyszczania wody i stałą modernizację sieci wodociągowej, które poprawiają warunki sanitarne i techniczne oraz parametry hydrauliczne podsystemu dystrybucji wody [4].

W pracy zaproponowano model analizy i oceny bezpieczeństwa dostawy wody z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody analizy przyczyn i skutków uszkodzeń (failure mode and effects analysis – FMEA), która zakłada niezależność zdarzeń oraz uwzględnia czynnik niepewności. Opracowany model zaprezentowano na przykładzie analizy ryzyka awarii sieci wodociągowej.

Przyczyny braku dostawy wody do odbiorców

Ograniczenie lub brak dostawy wody do odbiorców mogą być spowodowane przez przyczyny [1]:

– wewnętrzne wynikające bezpośrednio z funkcjonowania systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę, np. awarie przewodów wodociągowych i armatury, awarie pompowni, stacji oczyszczania wody, wtórne zanieczyszczenie wody w sieci lub zbiornikach wodociągowych,

– zewnętrzne, np. incydentalne zanieczyszczenie źródła wody, brak zasilania energetycznego, celowe działanie osób trzecich (wandalizm, atak psychopaty, atak terrorystyczny lub cyberterrorystyczny) oraz działanie sił natury (powódź, susza, intensywne i długotrwałe opady, wichury, osuwiska).

W związku z tymi zagrożeniami system zbiorowego zaopatrzenia w wodę powinien mieć kilka źródeł zasilania, aby w przypadku wyłączenia jednego z nich utrata jego wydajności była jak najmniejsza [4–6]. Sieć wodociągowa, ze względu na jej rozległość i złożoność, jest najbardziej awaryjnym elementem całego systemu, a jej awarie często skutkują ograniczeniem lub brakiem dostawy wody do odbiorców [7, 8]. Do głównych przyczyn awarii sieci wodociągowej zalicza się [4, 7, 9–11]:

– błędy wynikające z działań człowieka: błędy projektowe, wykonawcze, brak odpowiedniej wiedzy i doświadczenia pracowników, brak należytej staranności przy wykonywaniu prac, niewłaściwe zarządzanie pracami, uszkodzenia mechaniczne przewodów,

– przyczyny materiałowe: niewłaściwy dobór lub montaż materiału, wady materiałowe, wadliwe uszczelnienie połączeń kielichowych, procesy starzeniowe, korozja,

– przyczyny środowiskowe: niekorzystne warunki gruntowe lub meteorologiczne, osuwiska,

– przyczyny wynikające z funkcjonowania sieci wodociągowej: zbyt duże ciśnienie wody, zmienne warunki hydrauliczne, uderzenia hydrauliczne, brak odpowiedniego systemu monitoringu, zdarzenia losowe.

Model analizy i oceny bezpieczeństwa dostawy wody z wykorzystaniem FMEA

Metoda analizy przyczyn i uszkodzeń (FMEA) została opracowana na potrzeby programu kosmicznego „Apollo” w latach 60. XX wieku. Ze względu na jej uniwersalność jest to obecnie jedno z najbardziej popularnych narzędzi do analizy niezawodności i bezpieczeństwa produktów oraz procesów. Do głównych celów FMEA, zgodnie z zasadą ciągłego doskonalenia, należą eliminowanie wad wyrobu lub procesu produkcji dzięki rozpoznaniu przyczyn ich powstawania i podjęciu odpowiednich działań zapobiegawczych oraz unikanie powstawania rozpoznanych oraz hipotetycznych wad w nowych wyrobach lub procesach dzięki wykorzystaniu wiedzy oraz doświadczenia z wcześniej przeprowadzonych analiz [12]. Tok postępowania w FMEA opiera się na identyfikacji potencjalnych zdarzeń niepożądanych, ocenie skutków i określeniu przyczyn tych zdarzeń, ocenie częstości występowania, możliwości

wykrycia, ustaleniu ważności działań oraz przyjęciu środków zaradczych zapobiegających zdarzeniom niepożądanym, ich ponownym rozpoznaniu oraz ocenie [13].

Ocenę ryzyka braku dostawy wody do konsumentów można wykonać na podstawie wartości priorytetowej liczby ryzyka (risk priority number – RPN) zgodnie z zależnością [13–15]:

$$[RPN] = S \times O \times D \quad (1)$$

w której:

S – waga punktowa związana ze znaczeniem zdarzenia niepożądanego (severity)

O – waga punktowa związana z częstością występowania zdarzenia niepożądanego (occurrence)

D – waga punktowa związana z możliwością wykrycia zdarzenia niepożądanego (detection)

W odróżnieniu od konwencjonalnej FMEA, w proponowanym modelu zamiast opisu awarii liczbą całkowitą z przedziału 1÷10 zakłada się wykorzystanie liczb rzeczywistych z tego zakresu. Liczba priorytetowa ryzyka (RPN) może więc przyjmować wartości z zakresu 1÷1000, przy czym im wartość RPN jest większa, tym ryzyko braku dostawy wody do konsumentów jest większe [12]. Kryteria dotyczące poszczególnych parametrów przyjmuje się na podstawie informacji zawartych w tabelach 1–3.

Efektem końcowym analizy jest wartość RPN, która może być podstawą do przyjęcia właściwego planu zarządzania systemem zbiorowego zaopatrzenia w wodę, a także wytypowania jego słabych punktów. Całkowite wyeliminowanie przyczyn powstawania awarii jest niemożliwe, dlatego należy podejmować działania mające na celu zmniejszenie częstości ich występowania, zmniejszenie negatywnych skutków awarii oraz zwiększenie możliwości ich wykrywania. Ocena ryzyka polega na porównaniu otrzymanej wartości RPN z przyjętą skalą ryzyka [6, 15]:

- ryzyko tolerowane (r_T): $[RPN] \leq 40$,
- ryzyko kontrolowane (r_K): $40 < [RPN] \leq 100$,
- ryzyko nieakceptowane (r_N): $[RPN] > 100$.

Analiza FMEA jest metodą ekspercką. Przyjęcie właściwych wartości parametrów S, O oraz D często jest niejednoznaczne i wymaga szerokiej wiedzy o analizowanym obiekcie lub procesie. System zbiorowego zaopatrzenia w wodę jest bardzo złożony, co sprawia, że nawet sprawny system zarządzania może nie dawać pełnej wiedzy na temat pracy całego systemu. Decyzje operatorów systemów wodociągowych często podejmowane są więc na podstawie subiektywnej oceny i doświadczenia. W analizie bezpieczeństwa dostawy wody do konsumentów występuje głównie niepewność statystyczna spowodowana losowością danego zjawiska, nieprecyzyjnymi danymi oraz czynnikiem

Tabela 1. Kryteria i wagi punktowe parametru S [6, 11, 12, 15]

Table 1. The criteria and point weights for the S parameter [6, 11, 12, 15]

Znaczenie awarii	Opis	Waga punktowa parametru S
Bardzo małe	lokalne obniżenie ciśnienia w sieci wodociągowej odczuwalne jedynie dla odbiorców zamieszkujących wyższe piętra budynków	1
Małe	przerwy w dostawie wody do 2h, dostrzegalne zmiany organoleptyczne wody, pojedyncze skargi konsumentów wody	2÷3
Przeciętne	lokalne przerwy w dostawie wody od 2h do 12h, znaczna uciążliwość organoleptyczna wody, skargi konsumentów wody	4÷6
Duże	przerwy w dostawie wody do niektórych osiedli od 12h do 24h, lokalne skażenie wody w sieci, liczne skargi konsumentów wody	7÷8
Bardzo duże	przerwy w dostawie wody powyżej 24h, awaria głównych przewodów wodociągowych zasilających miasto, awaria urządzeń stacji oczyszczania wody lub pompowni wodociągowych, rozległe skażenie wody w sieci, liczne skargi konsumentów wody	9÷10

Tabela 2. Kryteria i wagi punktowe parametru O [6, 12, 14, 16]

Table 2. The criteria and point weights for the O parameter [6, 12, 14, 16]

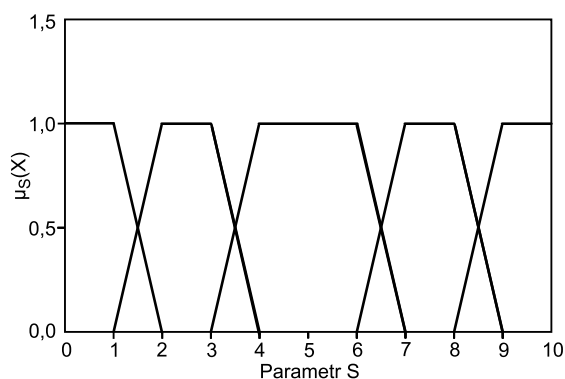
Częstość awarii	Opis	Waga punktowa parametru O
Nieprawdopodobna (<1 na 1 mln h)	awaria jest bardzo mało prawdopodobna	1
Bardzo rzadka (1 na 20 tys. h)	awaria występuje bardzo rzadko	2
Rzadka (1 na 4 tys. h)	awaria występuje rzadko	3
Przeciętna (1 na 1000h, 1 na 400h, 1 na 80h)	awaria występuje umiarkowanie często	4÷6
Częsta (1 na 40h, 1 na 20h)	awaria występuje często	7÷8
Bardzo częsta (1 na 8h, 1 na 2h)	awarii praktycznie nie da się uniknąć	9÷10

Tabela 3. Kryteria i wagi punktowe dla parametru D [6, 12, 14, 16]

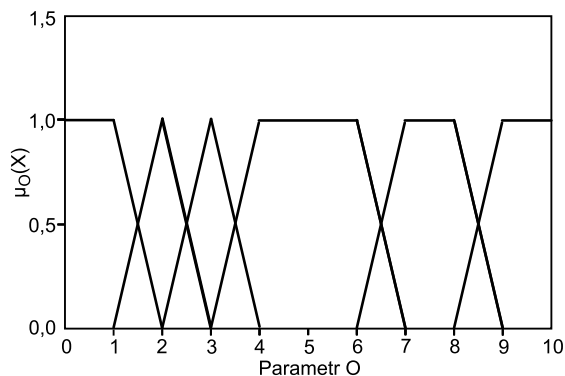
Table 3. The criteria and point weights for the D parameter [6, 12, 14, 16]

Wykrywalność awarii	Opis	Waga punktowa parametru D
Bardzo duża	pełny monitoring, potencjalna awaria prawie na pewno zostanie wykryta	1÷2
Duża	standardowy monitoring, duża szansa na wykrycie potencjalnej awarii	3÷4
Przeciętna	ograniczony monitoring, potencjalna awaria może zostać wykryta	5÷6
Mała	bardzo ograniczony monitoring, małe prawdopodobieństwo wykrycia potencjalnej awarii	7÷8
Bardzo mała	brak monitoringu sieci wodociągowej, praktycznie brak szans na wykrycie potencjalnej awarii	9÷10

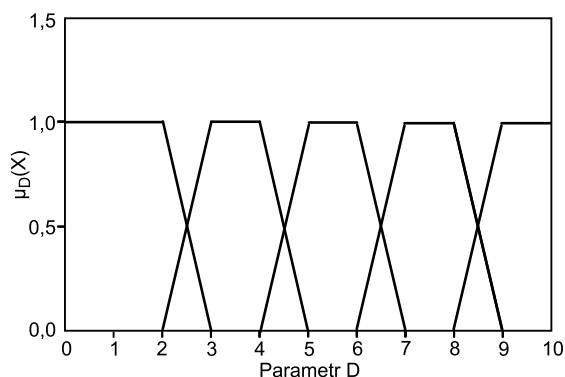
czasu [17]. Z tego względu zaproponowano zmodyfikowanie klasycznej analizy FMEA o modelowanie rozmyte, które pozwala na zakwalifikowanie danych wejściowych częściowo do dwóch zbiorów. Ekspert w przypadku braku kompletnych danych może np. zaliczyć znaczenie awarii S częściowo do zbioru „małe” oraz częściowo do zbioru „przeciętne”. Granica zbioru rozmytego nie jest jednoznacznie określona. Następuje stopniowe przejście od braku przynależności aż do pełnej przynależności danego elementu do zbioru, co jest określone za pomocą funkcji przynależności (μ_A) [18, 19]. Podejście to może mieć szczególne znaczenie w zarządzaniu małymi systemami zaopatrzenia wodę o często ograniczonym monitoringu, a tym samym niewystarczającej bazie danych eksploatacyjnych. W modelu wykorzystano funkcje przynależności typu trójkątnego, trapezowego, γ oraz L szczegółowo opisane w pracach [17, 18]. Na rysunkach 1–3 zobrazowano funkcje przynależności parametrów wejściowych S, O oraz D.



Rys. 1. Funkcja przynależności parametru S
Fig. 1. The membership function for the S parameter

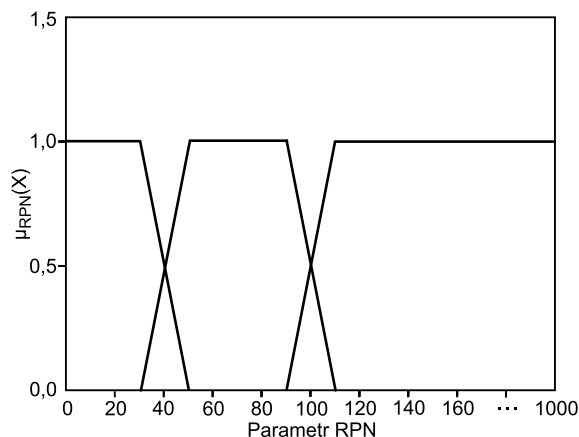


Rys. 2. Funkcja przynależności parametru O
Fig. 2. The membership function for the O parameter



Rys. 3. Funkcja przynależności parametru D
Fig. 3. The membership function for the D parameter

Na rysunku 4 przedstawiono natomiast funkcję przynależności konkluzji RPN [14].



Rys. 4. Funkcja przynależności konkluzji RPN
Fig. 4. The membership function for the RPN conclusion

Opracowany model został wprowadzony do programu Matlab Release 2012a (Mathworks). W pracy wykorzystano modelowanie Mamdaniego. Model składa się z trzech wejść (S, O, D), przy czym każda zmienna opisana jest za pomocą odpowiedniej funkcji przynależności zgodnie z rysunkami 1, 2 oraz 3. Wyjściem z modelu jest wartość ryzyka braku dostawy wody do konsumentów (RPN), które może być opisane w skali od r_T do r_N . Proces rozmycia przekształca ostre wartości parametrów wejściowych na wartości funkcji przynależności. Na potrzeby zaproponowanej metody opracowano bazę reguł składającą się ze 150 reguł, które określają relacje pomiędzy parametrami wejściowymi oraz wyjściowymi w oparciu o zestaw reguł IF–THEN. Ogólna postać reguł jest następująca [14, 19–22]:

$$\text{Jeśli } x_1 \text{ jest } S_i \text{ i } x_2 \text{ jest } O_j \text{ i } x_3 \text{ jest } D_k \text{ to ryzyko jest } r_l \tag{2}$$

W programie przeprowadzono proces łączenia reguł o takiej samej konkluzji. W tym celu wykorzystano dwa operatory logiczne – sumę (OR) oraz iloczyn (AND). Wykorzystując opracowaną bazę danych zaproponowano wykorzystanie operatorów min (T-normy) oraz max (S-normy). Rozmytą wartość ryzyka wyznaczono ze wzoru [21, 22]:

$$\mu_r(r_T, r_K, r_N) = \max[\min\mu_S^m(S_i), \min\mu_O^m(O_j), \min\mu_D^m(D_k), \min\mu_r^m(r_l)] \tag{3}$$

- w którym:
- m – liczba reguł
- i – liczba zbiorów rozmytych parametru S
- j – liczba zbiorów rozmytych parametru O
- k – liczba zbiorów rozmytych parametru D
- l – liczba zbiorów rozmytych wartości RPN

W celu otrzymania konkretnej wartości ryzyka przeprowadzono proces wyostrażania wykorzystując metodę singletonów w postaci [14, 19, 20, 21]:

$$r = \frac{\sum_1^3 r_{sr} \mu(r)}{\sum_1^3 \mu(r)} \tag{4}$$

- w której:
- r_{sr} – wartość środkowa ryzyka przyjęta jako wartość środkowa z przedziału (rys. 4)
- $\mu(r)$ – wartość funkcji przynależności do poszczególnych poziomów ryzyka

Przykład

Przeanalizowano system zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta powiatowego znajdującego się w południowo-wschodniej Polsce. W 2014 r. system ten zaopatrywał w wodę około 35 tys. mieszkańców. Miasto korzysta z brzegowo-przewodowego ujęcia wody, lokalnie wspomaganego ujęciem wody podziemnej. Układ sieci wodociągowej jest mieszany. Ze względu na zróżnicowanie wysokości terenu zainstalowano pięć hydroforni strefowych. W celu poprawy jakości działania sieci wodociągowej oraz zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych przedsiębiorstwo wodociągowe wdrożyło system monitoringu obejmujący zbieranie informacji o parametrach pracy ujęcia wody, stacji oczyszczania, lokalnych hydroforni oraz zbiorników wodociągowych. Na podstawie tych informacji przyjęto następujące wartości parametru D:

– przewody rozdzielcze i armatura: $D=3,5$ (sieć wodociągowa wyposażona w monitoring typowy w polskich miastach),

– przyłącza: $D=4$ (awaria przyłączy domowych, ze względu na niewielki zasięg, jest trudniejsza do wykrycia).

Częstość występowania awarii (O) oszacowano na podstawie liczby zdarzeń odnotowanych w książce awarii analizowanego systemu wodociągowego. Analizie poddano wszystkie awarie sieci wodociągowej w latach 2009–2014 skutkujące wstrzymaniem dostawy wody. Nie odnotowano zdarzeń powodujących pogorszenie jakości wody w sieci wodociągowej. Na podstawie książki awarii przyjęto także następujące wartości parametru S:

– przewody rozdzielcze i armatura: $S=4$ (średni czas lokalnych przerw w dostawie wody $T=4,1$ h; lokalny spadek ciśnienia w sieci),

– przyłącza: $S=3,5$ (średni czas przerw w dostawie wody $T=4,5$ h; brak dostawy wody do pojedynczych odbiorców).

W tabeli 4 przedstawiono wyniki obliczeń przeprowadzonych w programie Matlab na podstawie przyjętych wartości parametrów S, O oraz D. Otrzymane wartości RPN stanowiły podstawę oceny bezpieczeństwa dostawy wody do

konsumentów. W tabeli tej zaproponowano także podjęcie działań naprawczych w celu poprawy bezpieczeństwa dostawy wody oraz oszacowano wartość RPN po realizacji tych działań.

Wnioski

◆ Omówiona metoda umożliwi ocenę bezpieczeństwa dostawy wody z punktu widzenia jej konsumentów. Jest ona szczególnie przydatna w małych systemach zaopatrzenia w wodę, w przypadku których wiedza na temat pracy całego systemu jest niepełna lub niepewna. Metoda ta stanowi rozszerzenie powszechnie stosowanej konwencjonalnej analizy FMEA.

◆ Ocenę bezpieczeństwa dostawy wody przeprowadzono na podstawie rozmytej liczby priorytetowej ryzyka (RPN). Stwierdzono, że ryzyko braku dostawy wody z punktu widzenia jej konsumentów w analizowanym systemie wodociągowym utrzymuje się na poziomie kontrolowanym. W takim przypadku stan systemu ocenia się jako zadowalający, należy jednak rozważyć podjęcie działań naprawczych mających na celu zmniejszenie ryzyka do poziomu tolerowanego. W analizowanym systemie można to uzyskać głównie przez rozbudowę systemu monitoringu.

◆ Opracowana metoda może być z powodzeniem wykorzystana w innych systemach wodociągowych, w których nie ma pełnych danych eksploatacyjnych. Teoria zbiorów rozmytych umożliwia analizę ryzyka w języku naturalnym, co pozwala na oszacowanie wartości parametrów, co do których nie ma pewności.

◆ W zarządzaniu dużymi miejskimi systemami zbiorowego zaopatrzenia w wodę często wykorzystane są nowoczesne programy informatyczne typu SCADA czy GIS, co umożliwia efektywne sterowanie systemem oraz właściwe reagowanie w przypadku wystąpienia awarii. Do analizy ryzyka braku dostawy wody w takich systemach, ze względu na odpowiednią liczbę oraz jakość danych, należy wykorzystywać konwencjonalne metody analizy ryzyka.

Tabela 4. Ryzyko braku dostawy wody do odbiorców

Table 4. The risk of water supply failure

Obiekt	Przyczyna awarii*	Liczba awarii***	Przed działaniami naprawczymi**				Po działaniach naprawczych				
			S	O	D	RPN	S	O	D	RPN	
Przewód rozdzielczy	przeciek na połączeniu przewodów	62	4,0	4,3	3,5	70,0	4	2,3	2	17,8	
	przeciek na opasce	17		3,2						3,1	18,0
	mechaniczne uszkodzenie przewodu	5		2,4						3,8	18,8
	pęknięcie przewodu/kształtki	43		3,9						3,0	18,4
	korozja przewodu	11		3,0						3,0	17,8
Armatura	uszkodzenie hydrantu/zasuwy/trójnika	47	4,0	4,0	3,5	70,0	4	3,9	2	18,0	
Przyłącze	przeciek na połączeniu przewodów	7	3,5	2,6	4	50,0	3,5	2,0	2	20,0	
	mechaniczne uszkodzenie przewodu	2		2,0							3,6
	pęknięcie przewodu/kształtki	26		3,7							4,1
	korozja przewodu	56		4,2							70,0

*Skutek awarii: wyciek wody na powierzchnię

**Zalecane działania naprawcze: rozbudowa systemu monitoringu, remont lub wymiana najbardziej awaryjnych przewodów

***Łączna liczba awarii w latach 2009–2014

LITERATURA

1. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK, I. PIEGDOŃ, D. SZPAK: Water supply of urban agglomeration in crisis situation. *Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars 2014*, Vol. 5, No. 1, pp. 143–154.
2. K. BORYCZKO, I. PIEGDOŃ, M. EID: Collective water supply systems risk analysis model by means of RENO software. *Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon – STEENBERGEN et al.* [Eds.], Taylor & Francis Group, London 2014, pp. 1987–1992.
3. A. STUDZIŃSKI, K. PIETRUCHA-URBANIK: Risk indicators of water network operation. *Chemical Engineering Transactions* 2012, Vol. 26, pp. 189–194.
4. I. ZIMOCZ, E. ŁOBOS: Application of the Theil statistics to the calibration of a dynamic water supply model. *Environment Protection Engineering* 2010, Vol. 36, No. 4, pp. 105–115.
5. B. KAŻMIERCZAK, A. KOTOWSKI: The influence of precipitation intensity growth on the urban drainage systems designing. *Theoretical and Applied Climatology* 2014, Vol. 118, No. 1–2, pp. 285–296.
6. J.R. RAK: Bezpieczeństwo systemów zaopatrzenia w wodę. Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2009.
7. R. IWANEJKO, J. BAJER: Determination of the optimum number of repair units for water distribution systems. *Archives of Civil Engineering* 2009, Vol. 55, No. 1, pp. 87–101.
8. J.R. RAK: Selected problems of water supply safety. *Environment Protection Engineering* 2009, Vol. 35, No. 2, pp. 23–28.
9. H. HOTŁOŚ: Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacyjne sieci wodociągowych. Prace Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej nr 84, seria: Monografie nr 49, Wrocław 2007.
10. H. HOTŁOŚ: Quantitative assessment of the influence of water pressure on the reliability of water-pipe networks in service. *Environment Protection Engineering* 2010, Vol. 36, No. 3, pp. 103–112.
11. M. KWIETNIEWSKI, J. RAK: Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce. *Monografie Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Studia z Zakresu Inżynierii* nr 67, Warszawa 2010.
12. A. HAMROL, W. MANTURA: Zarządzanie jakością – teoria i praktyka. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Poznań 1999.
13. A. ŚWIDERSKI: Ocena skuteczności procesu projektowania technicznych środków transportu z wykorzystaniem metody FMEA. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport* 2008, z. 64, ss. 167–176.
14. J.B. BOWLES, C.E. PELAEZ: Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering and System Safety* 1995, Vol. 50, pp. 203–213.
15. J. RAK, B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: The possible use of the FMEA method to ensure health safety of municipal water. *Journal of KONBiN* 2010, No. 2, 3 (14, 15), pp. 143–154.
16. Y.-M. WANG, K.-S. CHIN, G.K.K. POON, J.-B. YANG: Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert Systems with Applications* 2009, Vol. 36, No. 2, Part 1, pp. 1195–1207.
17. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.
18. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Matrix method for estimating the risk of failure in the collective water supply system using fuzzy logic. *Environment Protection Engineering* 2011, Vol. 37, No. 3, pp. 111–118.
19. Z. YANG, S. BONSALE, J. WANG: Fuzzy rule-based Bayesian reasoning approach for prioritization of failures in FMEA. *IEEE Transactions on Reliability* 2008, Vol. 57, No. 3, pp. 517–528.
20. A. MARKOWSKI, S. MANNAN: Fuzzy risk matrix. *Journal of Hazardous Materials* 2008, Vol. 59, No. 1, pp. 152–156.
21. Y. KLEINER, B.B. RAJANI, R. SADIQ: Failure risk management of buried infrastructure using fuzzy-based techniques. *Journal of Water Supply Research and Technology – Aqua* 2006, Vol. 55, No. 2, pp. 81–94.
22. D. VALIS, K. PIETRUCHA-URBANIK: Utilization of diffusion processes and fuzzy logic for vulnerability assessment. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014, Vol. 16, No 1, pp. 48–55.

Tchorzewska-Cieslak, B., Szpak, D. A Proposal of a Method for Water Supply Safety Analysis and Assessment. *Ochrona Środowiska* 2015, Vol. 37, No. 3, pp. 43–47.

Abstract: In accordance with The European Programme for Critical Infrastructure Protection (EPCIP), infrastructure such as collective water supply system is required to be covered by a conservation plan including important resources identification, risk analysis based on the main threat scenarios as well as identification, selection and prioritization of procedures and security measures. The paper proposes a comprehensive method of analysis and assessment of water supply safety from the water consumer perspective. An innovative application of Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) is

presented, taking into account an uncertainty factor. The method is based on Total Quality Management (TQM). It adheres to the World Health Organization (WHO) recommendations in regard to water safety plan development based on a risk analysis. The method developed involves determination of a water supply safety measure taking account of a priority risk. It allows for a cause-and-effect analysis of all the event scenarios that might lead to the loss of water supply security. Additionally, its novelty comes from using the uncertain or incomplete databases. As an example, the paper presents the methodology application for the real water supply system.

Keywords: Collective water supply system, critical infrastructure, failure analysis, risk analysis.