

ŚRODOWISKO

CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

WYDAWNICTWO

POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1-Ś/2011

ZESZYT 1

ROK 108

ISSUE 1

YEAR 108

RYSZARDA IWANEJKO, JAROSŁAW BAJER*

METODA SZACOWANIA RYZYKA ZWIĄZANEGO Z CZASEM USUWANIA AWARII SIECI WODOCIĄGOWEJ W ZASTOSOWANIU

APPLICATION OF THE METHOD OF RISK ASSESMENT FOR REPAIR TIME OF WATER SUPPLY SYSTEM

Streszczenie

W artykule zamieszczono przykład aplikacji metody szacowania ryzyk związanych z czasem usuwania awarii sieci dystrybucji wody. Dla przyjętych danych wyjściowych zaprezentowano sposób przeprowadzania obliczeń. Dokonano analizy wyników, a dla wybranych wartości podano sposób ich interpretacji. Uzyskane wyniki mogą być przydatne przy podejmowaniu decyzji dotyczących modernizacji i eksploatacji sieci.

Słowa kluczowe: sieć wodociągowa, awaria sieci wodociągowej, ryzyko

Abstract

The paper presents examples of applications of the method used for risk assessment. The risk concerns a repair time of water distribution systems. Calculation examples have been presented for the assumed input data. The analysis of the results was performed including additional interpretation of the results for some specific data sets. The presented results may be useful in a decision making process concerning modernization and operation of the water system.

Keywords: reliability, water supply system, water supply system failure, risk

* Dr Ryszarda Iwanejko, dr inż. Jarosław Bajer, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Dla obiektów strategicznych należy oceniać związane z nimi ryzyko. Na ocenę ryzyka składają się dwa główne procesy: proces szacowania ryzyka oraz proces wyznaczania dopuszczalności ryzyka [4]. Na pierwszy z tych procesów składa się identyfikacja zagrożeń oraz szacowanie ryzyka. Ten etap, polegający na wyznaczeniu miary ryzyka, musi być poprzedzony przyjęciem miary ryzyka (ilościowej lub jakościowej, jedno- lub wieloczynnikowej) oraz wyborem odpowiedniej metody wyznaczania (szacowania) tej miary. Drugi z głównych procesów można przeprowadzić po przyjęciu zakresów ryzyka akceptowalnego (RA), tolerowanego (RT) i niedopuszczalnego (RN). Określenie tych zakresów jest na ogół zadaniem trudnym, gdyż zakresy te, stanowiąc podstawę późniejszego procesu podejmowania decyzji, powinny uwzględniać różne uwarunkowania (np. społeczne, ekonomiczne, zdrowotne, środowiskowe, gospodarcze itp.).

Dla sieci wodociągowej, która niewątpliwie jest strategicznym obiektem infrastruktury miejskiej, w pracy [2] zaproponowano miary ryzyka związanych z czasem usuwania awarii przewodów wodociągowych. Są to ryzyka $r_i (Sc_s, t_{ryz})$, $r (Sc_s, t_{ryz})$, $R_i (t_{ryz})$, $R(t_{ryz})$ określone także wzorami (7), (8), (9) i (10). Proponowane miary uzależniono od:

- rodzaju przewodu (i),
- scenariusza usuwania awarii (Sc_s) uwzględniającego zróżnicowanie czasów niesprawności Tn_p ,
- czasu trwania jakichkolwiek niesprawności sieci (t_{ryz}) wpływającego bezpośrednio na skutki awarii.

Wyjaśniony i uzasadniony został tam również sposób wyznaczania tych miar. Natomiast wyznaczanie zakresów RA, RT i RN powinno być przeprowadzane indywidualnie dla każdej sieci dystrybucji wody z uwzględnieniem jej specyfiki (np. struktura sieci, liczba odbiorców wody, istnienie dodatkowych źródeł wody, tj. miejskich źródeł oligoceńskich czy ujęć indywidualnych, liczby beczkownic będących własnością wodociągów itp.).

Poniżej przedstawiono praktyczne zastosowanie metody. Prezentowany model należy uznać za prosty, nieuwzględniający wszystkich realiów. Model bardziej złożony powinien uwzględniać m.in. przerwy w pracy (wynikające zarówno z konieczności dojazdu pracowników na miejsce kolejnej awarii, jak i z konieczności odpoczynku po pracy), zróżnicowanie stopnia trudności usuwania awarii z priorytetem (do usuwania awarii przewodu magistralnego mogą zostać skierowane dwie brygady) czy stopnia specjalizacji poszczególnych brygad (w zależności od wyposażenia czy fachowości, czasy usuwania awarii przez poszczególne brygady mogą się różnić).

2. Przykład zastosowania

W pewnej sieci dystrybucji wody, obsługiwanej przez $B = 3$ brygady remontowe, na podstawie dostępnych danych z eksploatacji, wyróżniono $M = 3$ grupy przewodów umownie nazwanych „jednorodnymi”, dla których można przyjąć jednakowe parametry niezawodnościowe (jednostkowej intensywności uszkodzeń λ_p , średniego czasu potrzebnego na usunięcie awarii Tn_i). Są to przewody: magistralne ($i = 1$), rozdzielcze ($i = 2$) oraz podłączenia wodociągowe ($i = 3$). W dalszym ciągu do obliczeń przyjęto maksymalne wartości jednostkowej intensywności uszkodzeń (uszkodzalności, awaryjności) z kilkuletniego okresu poprzedza-

jącego niniejszą analizę. W praktyce można przyjmować wartości uśrednione, przy czym warunkiem możliwości uśredniania jest brak znaczącej modernizacji sieci (np. fakt, że nie odnotowano znacznego przyrostu długości sieci, że nie uległa zmianie struktura sieci). Na podstawie analizy jednostkowych intensywności uszkodzeń dla miast o liczbie mieszkańców 25–500 tys. [5] przyjęto wartości:

$$\lambda_{01} = 0,34 [1 / \text{km} \times \text{rok}]; \quad \lambda_{02} = 0,85 [1 / \text{km} \times \text{rok}]; \quad \lambda_{03} = 1,37 [1 / \text{km} \times \text{rok}]$$

Sumaryczne długości przewodów każdej z grup dla analizowanej sieci są równe:

$$L_1 = 80 \text{ km}, L_2 = 600 \text{ km} \quad \text{oraz} \quad L_3 = 270 \text{ km}.$$

Średnie długości odcinków przewodów między zasuwami przyjęto równe

$$l_{1e} = 0,5 \text{ km}, l_{2e} = 0,3 \text{ km} \quad \text{oraz} \quad l_{3e} = 0,1 \text{ km}.$$

Dlatego liczba elementów w każdej z grup jest odpowiednio równa:

$$n_1 = 160, n_2 = 2000 \quad \text{oraz} \quad n_3 = 2700.$$

Następnie wyznaczono:

– intensywności uszkodzeń elementów każdej z grup; są one równe:

$$\lambda_{e1} = 4,66E-4 [1 / \text{d}] \quad \lambda_{e2} = 6,99E-4 [1 / \text{d}] \quad \lambda_{e3} = 3,75E-4 [1 / \text{d}]$$

– prawdopodobieństwa uszkodzenia się dowolnego elementu w każdej z grup w ciągu doby; są one równe:

$$p_1 = 4,66 \text{ E-4}, p_2 = 6,99 \text{ E-4} \quad \text{oraz} \quad p_3 = 3,75 \text{ E-4},$$

– intensywności uszkodzeń dla każdej z grup; są one równe odpowiednio

$$\lambda_1 = 0,000466 \cdot 160 = 0,0745 [1 / \text{d}] \quad \lambda_2 = 1,3973 [1 / \text{d}] \quad \lambda_3 = 1,0134 [1 / \text{d}]$$

Jak widać, są spełnione warunki praktycznej stosowalności rozkładu Poissona.

Dla trzech grup przewodów ($M = 3$) przyjęto następujące granice zakresów uwzględnianej liczby uszkodzeń: $k_{i \min} = 0$ (dla $i = 1, 2, 3$); $k_{1 \max} = 1$; $k_{2 \max} = 5$ oraz $k_{3 \max} = 4$. Liczba kombinacji równoczesnych uszkodzeń, które należy uwzględnić w analizie, wynosi

$$A = \prod_{i=1}^M (k_{i \max} - k_{i \min} + 1) - 1 = 59, \quad \text{gdyż pomijany jest przypadek bezawaryjnej pracy sieci}$$

[1]. Na podstawie wzoru $G_i = \sum_{k_i \in Z_i} P(k_i)$ [2] określającego prawdopodobieństwo wystąpienia

równoczesnej liczby uszkodzeń z przyjętego zakresu Z_i dla trzech grup otrzymano wysokie wartości G_i równe odpowiednio $G_1 = 0,99736$, $G_2 = 0,99683$, $G_3 = 0,99613$ [3]. Prawdopodobieństwo zajścia uwzględnianych przypadków równoczesnych uszkodzeń [2] wynosi

$G = \prod_{i=1}^N G_i = 0,98947$. Prawdopodobieństwo G interpretuje się jako gwarancję, że w ciągu

doły nie wystąpi nieuwzględniana w analizie kombinacja równoczesnych uszkodzeń. W tym przypadku prawie 99% mogących teoretycznie wystąpić w ciągu doby kombinacji uszkodzeń zostanie uwzględnionych w analizie. To oznacza, że do uzyskanych wyników można mieć zaufanie na poziomie $G = 0,98947$. Prawdopodobieństwo zajścia nieuwzględnianej w analizie kombinacji uszkodzeń wynosi $r_G = 1 - G = 0,01053$. To oznacza, że zaledwie 1,053% mogących teoretycznie wystąpić w ciągu doby kombinacji uszkodzeń nie zostanie uwzględnionych w analizie. Wartość r_G interpretuje się jako ryzyko wystąpienia nieanalizowanych kombinacji równoczesnych uszkodzeń.

Analizę uszkodzeń danej sieci dystrybucji wody przeprowadzono dla scenariuszy różniących się wartościami czasów usuwania uszkodzeń przewodów należących do poszczególnych grup. Zakłada się, że wartości te przyjęto na podstawie udostępnionych przez eksploatatora danych pochodzących z dłuższego okresu. Przyjmowane do obliczeń wartości Tn_i (minimalne, średnie, maksymalne) wraz z ich empirycznymi prawdopodobieństwami wystąpienia zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zestawienie czasów niesprawności przewodów sieci do obliczeń ryzyka

Wartości	Przewody					
	magistralne		rozdzielcze		podłączenia wodociągowe	
	Tn_1 [h]	P_1	Tn_2 [h]	P_2	Tn_3 [h]	P_3
Optymistyczne (min.)	8	0,05	5	0,05	2	0,05
Średnie (śr.)	12	0,75	6	0,8	3	0,85
Pesymistyczne (max.)	20	0,2	14	0,15	7	0,1

W dalszej analizie uwzględniono łącznie $s = 3^3 = 27$ scenariuszy (tab. 2). Wśród nich wyróżniono scenariusze: optymistyczny (Sc_{optym}), średni ($Sc_{\text{śr}}$) i pesymistyczny (Sc_{pesym}).

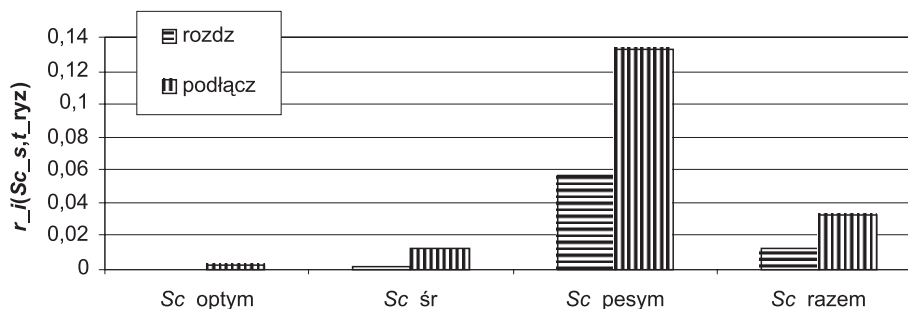
Dla danego zadania, przy istniejącej liczbie brygad remontowych $B = 3$ i przyjętym zakresie $Z_1 = \{k_{1\text{min}}, k_{1\text{max}}\} = \{0,1\}$, z wysoką gwarancją $G_1 = 0,99736$ może zajść co najwyżej $k_{1\text{max}} = 1$ uszkodzenie przewodu magistralnego w ciągu jednej doby. To oznacza, że przewody magistralne nie oczekują na usunięcie awarii ($B > k_{1\text{max}}$). Ryzyko, że czas oczekiwania na naprawę podłączeń wodociągowych r_i (Sc_s, t_{ryz}) przekroczy t_{ryz} , zostało zdefiniowane wzorem (7) w pracy [2]. Ryzyko to jest wyższe niż analogiczne ryzyko dla przewodów rozdzielczych (rys. 1), co ze względu na wyższy priorytet uszkodzeń przewodów rozdzielczych jest intuicyjnie oczywiste. Ryzyko szacowano dla arbitralnie wybranego czasu $t_{\text{ryz}} = 8$ godzin. Najwyższe ryzyko występuje dla scenariusza pesymistycznego (Sc_{27}) [3]. Wysokie ryzyko występuje również dla tych scenariuszy, dla których czasy usuwania awarii przewodów rozdzielczych są największe (rys. 2). Wynika to z istniejącej liczby brygad remontowych ($B = 3$) oraz przyjęcia zakresu $Z_1 = \{0,1\}$, dla którego poziom gwarancji jest wystarczająco wysoki, a prawdopodobieństwo zajścia $k_1 > 1$ jest małe i nie przekracza 0,003. Na wykresach (rys. 3, 4) dla porównania przed-

stawiono miarę odpowiedniego ryzyka łącznego $R_i(t_{ryz})$ oraz $R(t_{ryz})$. Obydwa ryzyka zostały określone wzorami (9) i (10) w pracy [2].

Tabela 2

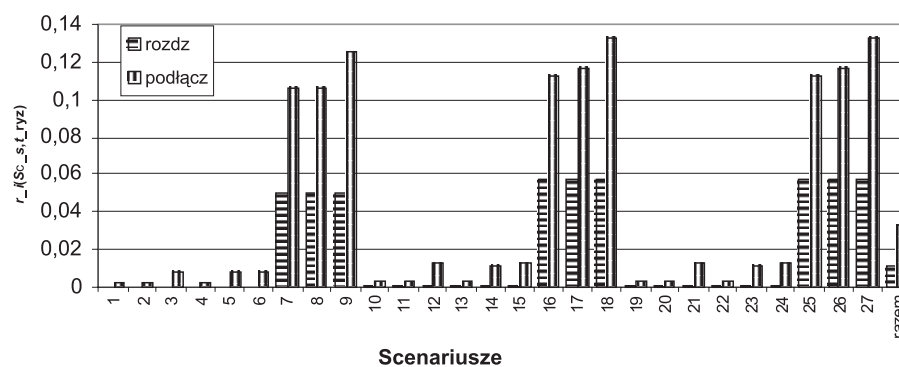
Scenariusze uwzględniające zróżnicowanie czasów niesprawności przewodów sieci

	Grupa przewodów sieci wodociągowej			Scenariusz <i>Sc</i>	
	magistralne	rozdzielcze	podł. wod.		
Czasy niesprawności T_{n_i}	minimalny	minimalny	minimalny	<i>Sc</i> 1 <i>Sc</i> _optym	
			średni	<i>Sc</i> 2	
			maksymalny	<i>Sc</i> 3	
		średni	średni	minimalny	<i>Sc</i> 4
				średni	<i>Sc</i> 5
				maksymalny	<i>Sc</i> 6
		maksymalny	maksymalny	minimalny	<i>Sc</i> 7
				średni	<i>Sc</i> 8
				maksymalny	<i>Sc</i> 9
	średni	minimalny	minimalny	<i>Sc</i> 10	
			średni	<i>Sc</i> 11	
			maksymalny	<i>Sc</i> 12	
		średni	średni	minimalny	<i>Sc</i> 13
				średni	<i>Sc</i> 14 <i>Sc</i> _śr
				maksymalny	<i>Sc</i> 15
		maksymalny	maksymalny	minimalny	<i>Sc</i> 16
				średni	<i>Sc</i> 17
				maksymalny	<i>Sc</i> 18
	maksymalny	minimalny	minimalny	<i>Sc</i> 19	
			średni	<i>Sc</i> 20	
			maksymalny	<i>Sc</i> 21	
		średni	średni	minimalny	<i>Sc</i> 22
				średni	<i>Sc</i> 23
				maksymalny	<i>Sc</i> 24
		maksymalny	maksymalny	minimalny	<i>Sc</i> 25
				średni	<i>Sc</i> 26
				maksymalny	<i>Sc</i> 27 <i>Sc</i> _pesym



Rys. 1. Ryzyko nieusunięcia awarii różnych rodzajów przewodów w czasie $t_{ryz} = 8$ godzin dla wybranych scenariuszy

Fig. 1. Risk of failure persistence for $t_{ryz} = 8$ h, for different lines and the selected scenarios



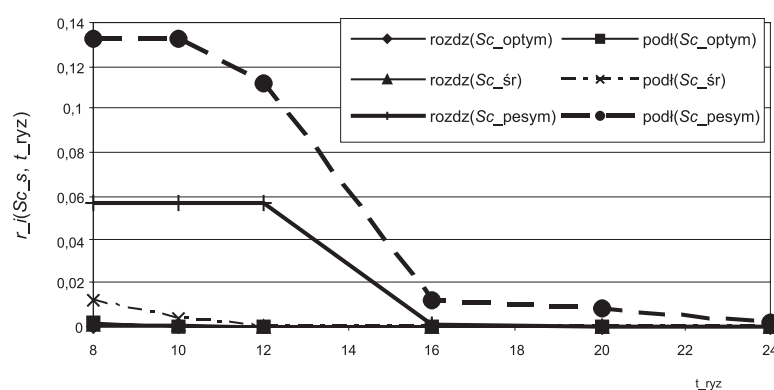
Rys. 2. Ryzyko nieusunięcia awarii różnych rodzajów przewodów w czasie $t_{ryz} = 8$ godzin dla kolejnych 27 scenariuszy oraz dla wszystkich scenariuszy razem

Fig. 2. Risk of failure persistence for $t_{ryz} = 8$ h, for different lines and for the following 27 scenarios and for all combined scenarios

Wraz ze wzrostem wartości czasu t_{ryz} poszczególne ryzyka $r_i(Sc_s, t_{ryz})$ maleją (rys. 3). Dla scenariusza pesymistycznego ryzyko nieusunięcia awarii przewodów rozdzielczych nawet dla czasu $t_{ryz} = 12$ godzin jest wysokie i wynosi prawie 0,06, a podłączeń wodociągowych ok. 0,113.

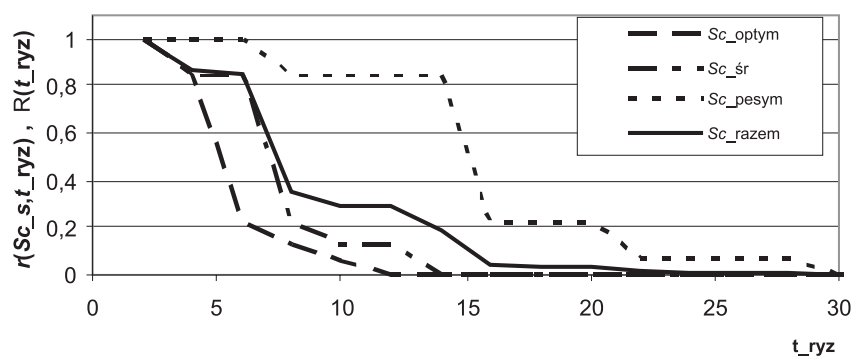
Na rysunku 4 przedstawiono graficznie funkcje ryzyka $r(Sc_{optym}, t_{ryz})$, $r(Sc_{sr}, t_{ryz})$ i $r(Sc_{pesym}, t_{ryz})$ nieusunięcia awarii wszystkich przewodów dla trzech wybranych scenariuszy oraz ryzyka $R(t_{ryz})$ dla scenariusza łącznego Sc_{razem} , uwzględniającego wszystkie uwzględniane scenariusze oraz prawdopodobieństwa ich zajścia) w zależności od czasu t_{ryz} . Ryzyka $r(Sc_s, t_{ryz})$ zostały zdefiniowane w pracy [2] wzorem (8), a ryzyko $R(t_{ryz})$ wzorem (10). Jak można się było spodziewać, wartości ryzyka dla scenariusza pesymistycznego dla wszystkich wartości t_{ryz} znacznie przekraczają wartości ryzyka dla pozostałych scenariuszy. Przykładowo dla czasu $t_{ryz} = 10$ godzin mamy $R(Sc_{pesym}, t_{ryz}) = 0,844$, podczas gdy $R(Sc_{sr}, t_{ryz}) = 0,128$, $R(Sc_{optym}, t_{ryz}) = 0,063$ oraz $R(Sc_{razem}, t_{ryz}) = 0,295$. Widać również, że dla scenariusza pesymistycznego ryzyko nieusunięcia awarii w czasie 16 godzin

jest dość wysokie i wynosi ok. 0,22. Można to interpretować następująco: prawie 22% wszystkich awarii nie zostanie usuniętych w czasie 16 godzin, a tylko 78% wszystkich awarii zostanie usuniętych w ciągu 16 godzin. Dla scenariusza łącznego ryzyko nieusunięcia wszystkich awarii w czasie nieprzekraczającym 16 godzin wynosi 0,046, co równoważnie oznacza, że w czasie nieprzekraczającym 16 godzin zostanie usuniętych conajmniej 95,4% wszystkich awarii. Ponadto widać, że dla dowolnej chwili czasu t zachodzi $R(Sc_{[r, t_{ryz}}) < R(Sc_{razem}, t_{ryz})$. Ta nierówność może być wskazówką, by w analizach praktycznych nie ograniczać się jedynie do tzw. scenariuszy średnich, lecz uwzględniać możliwie najpełniejszy zakres wszystkich możliwych scenariuszy.



Rys. 3. Ryzyko przewyższenia czasu usuwania awarii różnych rodzajów przewodów dla wybranych scenariuszy (optymistycznego, średniego i pesymistycznego)

Fig. 3. Risk of predominance of a repair time of different lines for some selected scenarios (optimistic, average and pessimistic ones)



Rys. 4. Ryzyko przewyższenia czasu usuwania awarii wszystkich przewodów dla wybranych scenariuszy (Sc_{optym} , Sc_{sr} , Sc_{pesym}) i dla wszystkich scenariuszy łącznie (Sc_{razem})

Fig. 4. Risk of predominance of a repair time of all lines for the selected scenarios (Sc_{optym} , Sc_{av} , Sc_{pesym}) and for all combined scenarios (Sc_{razem})

3. Wnioski

W artykule na przykładzie zaprezentowano sposób szacowania różnych ryzyk związanych z czasem usuwania niesprawności przewodów sieci wodociągowej. Zastosowano model określany jako prosty. Aby uzyskać dokładniejsze wyniki, należałoby zastosować model rozbudowany uwzględniający m.in. przerwy w pracy brygad remontowych (konieczność odpoczynku, dojazdu z bazy do miejsca usuwania awarii) i inne warunki wynikające z organizacji pracy brygad. Ponadto należałoby uwzględnić:

- szersze zakresy Z_i (czyli uwzględnić dodatkowo mniej prawdopodobne liczby awarii, co oznacza zwiększenie gwarancji G_i dla uwzględnianych liczby awarii lub równoważnie zmniejszenie ryzyka wystąpienia nieuwzględnianej liczby uszkodzeń),

- bardziej szczegółowe rozkłady zmiennych losowych opisujących czasy niesprawności wydzielonych grup przewodów, co w praktyce oznacza dodatkowy nakład pracy wynikający z konieczności uwzględnienia większej liczby scenariuszy; przykładowo: przy uwzględnieniu dla każdej i -tej grupy przewodów 4 wartości charakterystycznych (zamiast 3), należałoby uwzględnić $S = 4^3 = 64$ scenariusze (zamiast 27); lecz jeśli obliczenia prowadzi się z wykorzystaniem komputera, nie jest to zbyt dużym utrudnieniem.

Wyniki, uzyskane nawet za pomocą modelu prostego, są wystarczające do przeprowadzenia analiz. Wraz z interpretacją mogą być przydatne w procesie podejmowania decyzji dotyczących m.in. konieczności modernizacji sieci, zmiany liczby czy organizacji pracy brygad remontowych.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu rozwojowego Nr N R14 0006 10 nt. „Opracowanie kompleksowej metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa dostawy wody do odbiorców” w latach 2010–2013.

Literatura

- [1] I w a n e j k o R., B a j e r J., *Determination of the optimum number of repair units for water distribution systems*, Archives Of Civil Engineering, 55, 2009/1, 87-101.
- [2] I w a n e j k o R., B a j e r J., *Ryzyko związane z czasem usuwania awarii sieci wodociągowej – podstawy teoretyczne*, Czasopismo Techniczne, 1-Ś/2010, Kraków 2010.
- [3] I w a n e j k o R., *Brygady_ryzyko* – program obliczeniowy realizujący metodę szacowania ryzyka liczby brygad remontowych, Materiały niepublikowane, Kraków 2010.
- [4] Polska Norma PN-EN 1050:1999. *Maszyny. Bezpieczeństwo. Zasady oceny ryzyka*.
- [5] R a k J., *Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, nr 28, Lublin 2005, 113-119.