

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\*

**PODSTAWY TEORETYCZNE METODY SZACOWANIA  
RYZYKA ZWIĄZANEGO Z CZASEM USUWANIA AWARII  
SIECI WODOCIĄGOWEJ**

**THEORETICAL BASIS OF THE RISK ASSESMENT  
METHOD FOR A REPAIR TIME OF A WATER SUPPLY  
SYSTEM**

**Streszczenie**

Sieć wodociągowa należy do strategicznych obiektów infrastruktury miejskiej. Niesprawność sieci wodociągowej wpływa na pogorszenie komfortu życia ludzi, może też doprowadzić do utraty bezpieczeństwa odbiorców. Ważne jest szybkie i skuteczne usuwanie awarii. Czas usuwania awarii zależy od wielu czynników, np. średnicy przewodu, materiału, rodzaju uszkodzenia, rodzaju nawierzchni, liczby brygad remontowych oraz innych awarii, które wystąpiły w tym samym czasie. W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne metody szacowania ryzyk związanych z czasem usuwania równocześnie zaistniałych awarii sieci wodociągowej.

*Słowa kluczowe: sieć wodociągowa, awaria sieci wodociągowej*

**Abstract**

Water systems are a part of a strategic municipal infrastructure. Their poor performance has a significant impact on both quality of every-day life of people and loss of security of water consumers. Quick and efficient repair actions of system failures are very important. A time of repair is a function of many factors such as: pipe diameter, pipe material, type of failure, type of road surface, number of repair teams and other failures that could occur simultaneously. The paper presents the theoretical basis of the method of the risk assessment for a repair time of failures, occurring simultaneously within the water supply system.

*Keywords: water supply system, failure of the water supply system*

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

## 1. Wstęp

Sieć wodociągowa (SW) jest ostatnim ogniwem w procesie dostarczania wody odbiorcom. Traktowana jako całość jest systemem złożonym ze względu na 1° strukturę funkcjonalną, 2° strukturę materiałową, 3° strukturę wiekową, 4° warunki hydrauliczne, 5° dogodność prowadzenia prac remontowych i konserwacyjnych. Ta wieloczynnikowa złożoność wynika ze stopniowego rozbudowywania sieci wodociągowej wraz z rozwojem każdej jednostki osadniczej.

Sieć dystrybucji wody jest strategicznym obiektem infrastruktury miejskiej, od którego wymaga się wysokiej gwarancji wypełniania zadań w każdej chwili. Tak więc zarządzanie siecią wymaga godzenia przeciwstawnych celów, tj. zapewnienia odpowiednio wysokiego poziomu niezawodności działania oraz utrzymania możliwie najniższych kosztów eksploatacji. Należy jednak pamiętać, że przedsiębiorstwa wodociągowe (PW) na ogół nie posiadają wszystkich informacji nt. sieci. Dokonywane w przeszłości zapisy o remontach, wystarczające wówczas dla służb eksploatacyjnych, teraz okazują się niewystarczające do prowadzenia analiz niezawodnościowych.

Wystąpienie awarii przewodów sieci powinno być usunięte w miarę szybko, przy czym awarie różnych odcinków sieci mogą być traktowane jako awarie z priorytetem (np. awaria przewodu magistralnego powodująca brak dostawy wody do dużej liczby odbiorców, awaria w neuralgicznym punkcie miasta ze znacznym wypływem wody na powierzchnię lub powodująca podtapianie przyległych domów i piwnic) lub bez priorytetu (np. awaria przyłącza domowego, awaria odcinka sieci rozdzielczej w strukturze pierścieniowej). Na czas usuwania awarii wpływa wiele czynników zależnych zarówno od sieci (np. od stanu sieci, liczby równoczesnych awarii, umiejscowienia i typu uszkodzenia), jak i od brygad remontowych (ich liczby, wyposażenia, fachowości i sposobu organizacji pracy).

Z awariami sieci wodociągowej można skojarzyć wiele ryzyk, np. ryzyko nieusunięcia w określonym czasie jednej awarii czy awarii równoczesnych, ryzyko wtórnego skażenia wody podczas usuwania awarii, ryzyko uszkodzenia innych obiektów infrastruktury miejskiej, ryzyko strat finansowych itp.

W dalszej części rozważa się ryzyko związane z czasem usuwania awarii przewodów sieci zaistniałych w tej samej dobie.

## 2. Czas usuwania awarii przewodów sieci wodociągowej

Jednym z parametrów (wskaźników) niezawodności stanowiących podstawę do szacowania ryzyka związanego z czasem usuwania awarii przewodów sieci wodociągowej jest czas ich właściwej naprawy  $T_n$ , obejmujący okres trwania *stricte* czynności naprawczych oraz bezpośrednio związanych z nimi prac przygotowawczych i wykończeniowo-porządkowych. Łącznie z czasem oczekiwania na naprawę  $T_{on}$ , przyjmowanym jako okres od wystąpienia awarii do momentu podjęcia prac naprawczych, określa on całkowity czas odnowy  $T_o$ . W wielu przypadkach moment wystąpienia awarii na sieci wodociągowej nie powoduje natychmiastowego dotkliwego pogorszenia warunków poboru wody przez jej użytkowników (tych podłączonych do sieci w pobliżu miejsca wystąpienia awarii), ale następuje wówczas, kiedy na miejsce zdarzenia dociera brygada naprawcza i dokonuje odcięcia dopływu wody do przewodu, na którym zlokalizowano awarię. Tak więc czynnikiem determinującym okres

trwania uciążliwości związanych z brakiem wody dla grupy odbiorców w rejonie wystąpienia awarii jest najczęściej właściwy czas naprawy (usuwania awarii)  $T_n$ , a konkretnie jego odcinek od momentu wyłączenia dopływu wody do ponownego włączenia zasilania w wodę.

Jak już wspomniano, w przypadku przewodów wodociągowych i ich uzbrojenia, wartość czasu  $T_n$  zależy od wielu czynności związanych zarówno z czasem rzeczywistej naprawy tych obiektów (montaż elementów naprawczych, takich jak: cybant, doszczelniacz czy opaska, wycięcie uszkodzonego odcinka przewodu, założenie nowego odcinka, wymiana uszkodzonego uzbrojenia itp.), jak również zazwyczaj znacznie dłużej trwających, niezbędnych czynności ją poprzedzających i kończących (zabezpieczenie miejsca awarii, powiadomienie odbiorców o wyłączeniu wody, zamknięcie dopływu wody do uszkodzonego przewodu lub elementu uzbrojenia, wykonanie wykopu, ewentualne odpompowanie wody w miejscu awarii, czyszczenie przewodu, płukanie i odpowietrzanie naprawionego przewodu, przeprowadzenie jego dezynfekcji i próby szczelności, włączenie zasilania w wodę, zasypianie wykopu, zagęszczenie materiału zasypowego, prace porządkowe po usunięciu awarii).

Czas ten limitowany jest zatem:

- sposobem zagospodarowania terenu i występowaniem innej infrastruktury podziemnej, rodzajem nawierzchni, warunkami gruntowymi (rodzaj i stabilność gruntu) oraz głębokością posadowienia przewodu, decydującymi o zakresie i technologii realizacji robót ziemnych, systemie zabezpieczenia wykopu i terenu prowadzonych prac,
- funkcją, średnicą i rodzajem połączeń odcinków przewodu oraz lokalizacją i rodzajem uszkodzenia: pęknięcie poprzeczne lub podłużne, dziury w rurociągu spowodowane korozją, względnie wadami materiałowymi, niesprawność armatury, uszkodzenie złączy lub kształtek, uszkodzenie zasowy, hydrantu lub wodomierza itp.,
- porą roku – zimą niskie temperatury mogą powodować przemarzanie gruntu, co wydłuża czas realizacji robót ziemnych,
- innymi czynnikami utrudniającymi dotarcie do miejsca awarii oraz jej usunięcie, często znacznie wydłużającymi czas tej operacji, jak np.: zaparkowane na miejscu wycieku samochody, nieobecność właściciela posesji, na której zlokalizowano wyciek, postawione na trasie przewodu lub w jego pobliżu objekty budowlane (np. słupy telefoniczne, oświetleniowe lub różne budowle „tymczasowe” – blaszane garaże, kioski i inne), drzewa rosnące wzdłuż trasy przewodu itp.

Analizę wpływu wymienionych czynników na długość czasu usuwania awarii sieciowych (napraw właściwych) znaleźć można w pracy [1], w której Autorzy podali również oszacowane na podstawie doświadczeń jednego z nich (pracownika jednej z brygad naprawczych obsługujących krakowską sieć wodociągową) zakresy wymaganego czasu przeprowadzania wybranych czynności związanych z usuwaniem awarii na sieci wodociągowej. Zakresy te ustalono w odniesieniu do trzech przedziałów średnic  $d$  przewodów, odpowiadających generalnie ich rodzajom (tutaj jak dla dużych systemów wodociągowych), a mianowicie: magistralnych ( $d > 350$  mm), rozdzielczych ( $300 \text{ mm} \geq d \geq 150$  mm) i przyłączy ( $100 \text{ mm} \geq d \geq 25$  mm). Kilka z tak oszacowanych zakresów wymaganego czasu, dla ważniejszych z wyszczególnionych czynności, przytoczono poniżej (tab. 1).

Czas trwania wybranych czynności usuwania awarii sieci wodociągowej

Lp.	Rodzaj czynności	Wymagany czas realizacji w [min]		
		średnica przewodu w [mm]		
		25–100	150–300	powyżej 350
1	zamknięcie zasuw (średnio jednej)	10–15	15–20	20–30
2	lokalizacja awarii, trasowanie rurociągu	20–25	55–60	50–60
3	zbijanie nawierzchni asfaltowej	70–120	120–160	160–240
4	ściągnięcie płyt chodnikowych	30–35	45–50	60–65
5	wykop do rurociągu przeprowadzany mechanicznie	80–100	100–140	150–240
6	wykop do rurociągu przeprowadzany ręcznie	150–240	w praktyce nie jest stosowany	
7	odpompowanie wody z wykopu	30–60	80–120	120–180
8	czyszczenie przewodu	30–35	40–45	50–60
9	montaż cybantu	20–25	40–50	40–90
10	montaż opaski naprawczej	25–30	40–45	zwykle występują pęknięcia wzdłużne usuwane przez wycięcie odcinka przewodu (poz. 12) i założenie nowego (poz. 13)
11	montaż doszczelniacza	40–45	50–55	60–90
12	wycięcie odcinka przewodu	30–40	50–60	90–140
13	montaż nowego przewodu	50–60	60–70	180–240
14	otwarcie wody, odpowietrzenie, płukanie przewodu	20–25	30–35	50–60

Podobne zakresy wartości czasów przeprowadzania czynności związanych z usuwaniem awarii przewodów wodociągowych, uzyskane na podstawie badań ankietowych przeprowadzonych w 8 zespołach brygad remontowych, zajmujących się eksploatacją sieci wodociągowej aglomeracji śląskiej, zawiera też praca [7], w której Autorce udało się wydzielić dodatkowo dla przewodów o dużych średnicach trzy ich przedziały: 350–500 mm, 600–1000 mm i 1100–1800 mm.

Bezpośrednie uzależnienie zakresów wartości rozważanego czasu od średnicy przewodu, na którym doszło do awarii, jest w pełni uzasadnione dla praktycznie każdego rodzaju czynności, ale najwyraźniej widoczne jest to w odniesieniu do czasu rzeczywistej naprawy – przy większej średnicy znacząco rośnie ciężar poszczególnych elementów (odcinków rurociągów, kształtek, zasuw itp.), co wydłuża czas ich demontażu i montażu, często związany także z koniecznością wykorzystania ciężkiego sprzętu (dźwig). Dobrym przykładem może być tu wymiana uszkodzonej zasuwki – na wycięcie takiego obiektu o średnicy 100 mm potrzeba ok. 50 minut, a na zamontowanie nowego – ok. 110 minut, natomiast niezbędny czas na wykonanie tych samych czynności dla średnicy 600 mm (przy udziale 2–3 trzech pracowników i wykorzystaniu dźwigu), to odpowiednio – ok. 150 minut i ok. 250 minut.

Wartość oczekiwanej średniego czasu właściwej naprawy elementów sieci wodociągowych można teoretycznie wyznaczać na drodze statystycznego opracowania szczegółowych danych eksploatacyjnych, jednak w praktyce uniemożliwia to ich brak, spowodowany ogromną różnorodnością zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych czynników wpływających na wielkość tej składowej czasu odnowy. W tej sytuacji pewnego oszacowania tego czasu można próbować dokonać, wykorzystując wymienione przykładowo w tabeli 1 zakresy wartości czasu trwania poszczególnych czynności związanych z usuwaniem awarii przewodów i uzbrojenia sieci wodociągowych [1, 7], przyjmowanych dla określonego rodzaju przewodu wodociągowego (magistralny, rozdzielczy, przyłącze) i wybranej sekwencji czynności realizowanych w danych warunkach przez brygadę naprawczą.

### 3. Model matematyczny

Utworzenie modelu matematycznego dokładnie odzwierciedlającego strukturę i cechy danej sieci wodociągowej jest praktycznie niemożliwe. Jednakże, przy uzasadnionej możliwości przyjęcia pewnych założeń upraszczających, praktykowane jest tworzenie modelu jak najbardziej uproszczonego, lecz równocześnie wystarczająco dokładnego z inżynierskiego punktu widzenia i umożliwiającego przeprowadzenie analiz niezawodnościowych oraz przydatnego w procesie podejmowania decyzji.

Przy prawidłowej eksploatacji sieci przewody będące w złym stanie technicznym są poddawane rehabilitacji. To oznacza możliwość przyjęcia warunku o normalnym okresie eksploatacji, w którym przewody podlegają uszkodzeniom losowym ze względnie stałą intensywnością  $\lambda(t) = \lambda$ . Taką możliwość przyjęcia warunku stałości intensywności uszkodzeń wykazywali m.in. J.A. Ilin, N.N. Abramow, A. Wiczysty, M. Roman, M. Kwietniewski, J. Rak i inni. Powyższy warunek oznacza, że czas oczekiwania na kolejne uszkodzenie ma rozkład wykładniczy z parametrem [3, 8]. Rejestrowane czasy niesprawności są pomijalnie krótkie w porównaniu z czasami pracy między uszkodzeniami. Wówczas zmienną losową  $K$  opisującą liczbę awarii sieci w przyjętej jednostce czasu można opisać rozkładem Poissona z tym samym parametrem.

$$P(\mathbf{K} = k) = P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (1)$$

Rozkład Poissona stosuje się przy dużej liczbie elementów  $n$  ( $n \geq 50$ ), niskim prawdopodobieństwie  $p$  zajścia zdarzenia, umownie nazywanego sukcesem (tu: awarii elementu) oraz przy zajściu warunku  $\lambda \approx n \cdot p \approx \text{const}$ . Do analizy niezawodnościowej sieci przyjmuje się, że składa się ona z elementów, którymi są odcinki przewodów między zasuwaniami sieciowymi, natomiast same zasuwy można pominąć ze względu na ich wysoką niezawodność. Prawdopodobieństwo zajścia awarii elementu w okresie  $t$  jest równe  $p = \lambda \cdot t$  i w rzeczywistości spełnia wymagany warunek  $p < 0,1$ . Intensywność uszkodzeń elementów przyjmuje się równą  $\lambda = \lambda_0 \cdot l$ , gdzie  $\lambda_0$  – jednostkowa intensywność uszkodzeń (awaryjność, uszkaźalność przewodów) [1/km×rok],  $l$  – średnia długość odcinka między zasuwaniami.

Całą sieć, ze względu na jej złożoność, można podzielić na  $M$  rozłącznych, jednorodnych grup elementów, przy czym w każdej  $i$ -tej grupie jest  $n_i$  elementów. Natomiast liczba wszystkich elementów sieci wynosi  $N = n_1 + n_2 + \dots + n_M$ . Liczbę uszkodzeń w  $i$ -tej grupie można opisać rozkładem Poissona z parametrem  $\lambda_i$ , a uszkodzenia poszczególnych przewodów (w grupie  $i$  w całej sieci) są niezależne. Ponadto czasy niesprawności przewodów  $i$ -tej grupy można opisać tą samą zmienną losową  $\mathbf{T}n_i$ . Wówczas prawdopodobieństwo wystąpienia dowolnej kombinacji uszkodzeń całej sieci można opisać za pomocą wielowymiarowego rozkładu Poissona [5]:

$$P(\mathbf{k}) = P(k_1, k_2, \dots, k_M) = \prod_{i=1}^M P(k_i) \quad (2)$$

gdzie:

$\mathbf{k} = (k_1, k_2, \dots, k_M)$  – wielowskaźnik oznaczający równoczesne zajście  $k_i$  uszkodzeń w  $i$ -tej grupie przewodów,

$P(k_i)$  – prawdopodobieństwo zajścia  $k_i$  uszkodzeń w  $i$ -tej grupie przewodów sieci określone wzorem (1). Przez uszkodzenia równoczesne rozumie się tutaj uszkodzenia zaistniałe w tej samej dobie.

W dalszej części dla każdej grupy analizuje się jedynie najbardziej prawdopodobną liczbę awarii  $k_i$  w przyjętej jednostce czasu (tu: w 1 dobie) z zakresu  $Z_i = \{k_{i \min}, \dots, k_{i \max}\}$ , gdzie  $k_{i \max} \ll n_i$ . Prawdopodobieństwo  $G_i$  wystąpienia równoczesnej liczby uszkodzeń z przyjętego zakresu  $Z_i$  jest równe:

$$G_i = \sum_{k_i \in Z_i} P(k_i) \quad (3)$$

Dla całej sieci analizuje się najbardziej prawdopodobne kombinacje uszkodzeń różnych grup przewodów o łącznym prawdopodobieństwie zajścia [3]:

$$G = \sum_{k_1 \in Z_1} \dots \sum_{k_M \in Z_M} P(k_1, k_2, \dots, k_M) = \prod_{i=1}^M G_i \quad (4)$$

Wartość  $G$  powinna być wysoka, gdyż jest interpretowana jako gwarancja, że równocześnie (tj. w ciągu doby) nie wystąpi nieuwzględniana w analizie kombinacja uszkodzeń. Natomiast wartość  $r_G = 1 - G$  stanowi ryzyko wystąpienia takiej nieuwzględnianej, mało prawdopodobnej kombinacji uszkodzeń.

Po ustaleniu zakresów  $Z_i$  dla wszystkich uwzględnianych kombinacji uszkodzeń  $\mathbf{k}$  należy dokonać przydziału zadań poszczególnym brygadam remontowym. Zakłada się, że system obsługi zgłoszeń jest systemem z oczekiwaniem, czyli że liczba brygad remontowych ( $B$ ) spełnia warunek:  $1 < B < N$ , gdzie  $N$  jest liczbą wszystkich elementów sieci. W tej pracy przyjęto najprostszy model, w którym 1° każda brygada może być skierowana do usunięcia awarii dowolnego typu, 2° o kolejności obsługi zgłoszenia decyduje jedynie priorytet uszkodzenia i obciążenia pracą poszczególnych brygad, co oznacza, że do usunięcia awarii jest kierowana brygada aktualnie wolna lub ta, która najszybciej ukończy przydzielone wcześniej zadanie (w ten sposób dąży się do równomiernego obciążenia pracą wszystkich brygad), 3° zakłada się ciągłą pracę brygad remontowych (równoważnie: pomija się przerwy w pracy brygad). Przykładową realizację procesu przydziału zadań usuwania awarii przedstawiono na rys. 1.

Efektywny czas pracy  $j$ -tej brygady wynosi [3]

$$Tn_{ef}(\text{Bryg } j; \mathbf{k}) = \sum_{i=1, \dots, M} a_{ij} \cdot Tn_i \quad (5)$$

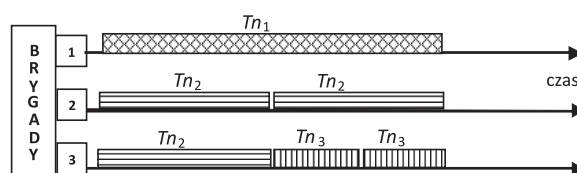
gdzie:

$a_{ij}$  – liczba awarii z  $i$ -tej grupy przewodów zleconych do usunięcia  $j$ -tej brygadzie,  
 $Tn_i$  – przyjęty do analiz czas usuwania awarii w  $i$ -tej grupie przewodów.

Natomiast czas usunięcia wszystkich awarii, czyli tzw. efektywny czas pracy brygad  $Tn_{ef}(\mathbf{k})$  wynosi:

$$Tn_{ef}(\mathbf{k}) = \max(Tn_{ef}(\text{Bryg } 1; \mathbf{k}), Tn_{ef}(\text{Bryg } 2; \mathbf{k}), \dots, Tn_{ef}(\text{Bryg } B; \mathbf{k})) \quad (6)$$

Jak widać, efektywny czas pracy brygad przy stałej ich liczbie  $B$ , zależy od liczby równoczesnych awarii w poszczególnych grupach ( $k_1, k_2, \dots, k_M$ ) oraz od czasów usuwania awarii przewodów każdej grupy, tj. od  $Tn_1, Tn_2, \dots, Tn_M$ . Przyjmując do obliczeń wynikające z rozkładów odpowiednich zmiennych losowych różne wartości czasów  $Tn_i$ , można prowadzić analizy dla różnych scenariuszy ( $Sc$ ) usuwania awarii.



Rys. 1. Przydział zadań dla przypadku:  $B = 3; \mathbf{k} = (1, 3, 2), Tn_1 = 2Tn_2 = 4Tn_3$

Fig. 1. Tasks assignment for the case:  $B = 3; \mathbf{k} = (1, 3, 2), Tn_1 = 2Tn_2 = 4Tn_3$

Przy sformułowaniu problemu jak powyżej, można wyznaczać następujące jednoczynnikowe miary ryzyka charakteryzujące pojedyncze scenariusze ( $Sc_s, s = 1, \dots, S$ ) określone jako prawdopodobieństwa zajścia odpowiednich zdarzeń:

- ryzyko, że minimalny czas oczekiwania przewodów  $i$ -tej grupy na podjęcie prac usuwania awarii przekroczy  $t_{ryz}$  równe:

$$r_i(Sc_s, t_{ryz}) = \sum_{\mathbf{k}} P\left(\mathbf{k} \mid \min_{j=1, \dots, B} \left( \sum_{l < i} a_{lj} \cdot Tn_l \right) > t_{ryz}\right) \quad (7)$$

- ryzyko nieusunięcia w czasie  $t_{ryz}$  awarii we wszystkich grupach przewodów równe

$$r(Sc_s, t_{ryz}) = P(Tn_{ef}(\mathbf{k}) > t_{ryz}) \quad (8)$$

gdzie:

- $Sc_s$  –  $s$ -ty scenariusz uwzględniający zróżnicowanie wartości czasów usuwania awarii przewodów  $i$ -tej grupy  $Tn_i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ),
- $j$  – numer brygady remontowej ( $j = 1, 2, \dots, B$ ),
- $t_{ryz}$  – czas przyjęty do szacowania ryzyka.

Czas  $t_{ryz}$  można przyjmować w zależności od potrzeb, np.  $t_{ryz} = 6; 8$  czy  $12$  godzin. Szczególnym czasem jest  $t_{ryz} = 8$  godzin, gdyż w przypadkach awarii trwających dłużej niż  $8$  godzin przedsiębiorstwa wodociągowe są zobowiązane do dostarczania wody mieszkańcom beczkowozami.

Aby uzyskać wyniki przydatne do analiz dla każdej  $i$ -tej grupy przewodów, należy uwzględnić rozkłady zmiennych losowych  $Tn_i$  opisujących czasy niesprawności. W najprostszym przypadku dla każdej  $i$ -tej grupy ( $i = 1, \dots, M$ ) można przyjmować 3 charakterystyczne wartości, nazwane dalej jako minimalna ( $Tn_{i, \min}$ ), średnia ( $Tn_{i, \text{sr}}$ ) i maksymalna ( $Tn_{i, \max}$ ). Zakłada się, że znane są prawdopodobieństwa wystąpienia każdej z tych wartości ( $P_{i, \min}, P_{i, \text{sr}}, P_{i, \max}$ ). Przyjęcie zróżnicowanych wartości usuwania awarii w każdej grupie przewodów wynika z przyczyn omówionych w punkcie 2 (np. różne nawierzchnie, różna dostępność przewodów, odmienne warunki usuwania awarii w lecie i zimie itp.). Stąd pełna, choć najprostsza analiza dla np. trzech grup przewodów ( $M = 3$ ) obejmowałaby  $S = M^3 = 27$  scenariuszy. Wśród nich można wyróżnić scenariusze:

- optymistyczny ( $Sc_{\text{optym}}$ ), dla którego jako czasy  $Tn_i$  przyjmuje się wartości minimalne lub bliskie wartościom minimalnym uzyskanym z eksploatacji,
- średni ( $Sc_{\text{sr}}$ ), dla którego jako czasy  $Tn_i$  przyjmuje się wartości średnie z wartości uzyskanych z eksploatacji,
- pesymistyczny ( $Sc_{\text{pesym}}$ ), dla którego jako czasy  $Tn_i$  przyjmuje się wartości maksymalne lub bliskie wartościom maksymalnym uzyskanym z eksploatacji.

Po uwzględnieniu wszystkich możliwych scenariuszy można wyznaczyć miary ryzyka analogiczne do (7) i (8), lecz charakteryzujące wszystkie scenariusze łącznie, a więc:

$$R_i(t_{ryz}) = \sum_{s=1, \dots, S} P(Sc_s) \cdot r_i(Sc_s, t_{ryz}) \quad (9)$$

$$R(t_{ryz}) = \sum_{s=1, \dots, S} P(Sc_s) \cdot r(Sc_s, t_{ryz}) \quad (10)$$

przy czym prawdopodobieństwo zajścia scenariusza  $P(Sc_s)$  wyznacza się jako iloczyn wartości  $P_{i, \min}, P_{i, \text{sr}}, P_{i, \max}$  odpowiednich dla danego scenariusza. Pierwsza miara  $R_i(t_{ryz})$  odnosi się do ryzyka dla przewodów  $i$ -tej grupy, natomiast druga miara  $R(t_{ryz})$  odnosi się do ryzyka dla całej sieci.



#### 4. Wnioski

W artykule przedstawiono podstawy teoretyczne metody szacowania różnych ryzyk związanych z czasem usuwania niesprawności przewodów sieci wodociągowej. Poszczególne miary ryzyka charakteryzują usuwanie awarii sieci wodociągowej z różnych punktów widzenia i dopiero ich łączna ocena pozwala na pełną analizę problemu. Ocena tych ryzyk pozwoli m.in. na podjęcie ewentualnej decyzji o konieczności zwiększenia aktualnej liczby brygad remontowych, czy decyzji o innych sposobach podniesienia niezawodności sieci wodociągowej. Metoda może być przydatna przy różnych analizach i procesach podejmowania decyzji.

*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] Bajer J., Przebinda A., *Czynniki wpływające na czas usuwania awarii przewodów wodociągowych i ich uzbrojenia*, Gaz Woda i Technika Sanitarna, 11, 2005, 20-22.
- [2] Bobrowski D., *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności w przykładach i zadaniach*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.
- [3] Iwanejko R., Bajer J., *Determination of the optimum number of repair units for water distribution systems*, Archives Of Civil Engineering, LV, 2009/1, 87-101.
- [4] Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczewicz H., *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*, Arkady, Warszawa 1993.
- [5] Pacut A., *Prawdopodobieństwo. Teoria, modelowanie probabilistyczne w technice. Seria: Podręczniki akademickie: Elektronika, informatyka, telekomunikacja*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
- [6] Wiczysty A., *Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych*, Skrypt. Wydawnictwo PK, Kraków 1990.
- [7] Zimoch I., *Czynniki kształtujące czas usuwania awarii sieci wodociągowej*, Materiały konferencyjne – Aktualne Zagadnienia w Uzdatnianiu i Dystrybucji Wody, Rozdział II, *Uwarunkowania eksploatacji technicznej i jakościowej współczesnych systemów dystrybucji wody*, 2009, vol. 1, 299-307.
- [8] Zitek F., *Stracony czas. Elementy teorii obsługi masowej*, Drukarnia Uniwersytetu im. A. Mickiewicza w Poznaniu, PWN, 1974.