

Izabela ZIMOCH

*Institut Inżynierii Wody i Ścieków
Politechnika Śląska*

NIEZAWODNOŚCIOWA OCENA EKSPLOATACJI SIECI WODOCIĄGOWEJ JAKO KRYTERIUM ZARZĄDZANIA RYZYKIEM

RELIABILITY ASSESSMENT OF OPERATION OF WATER-PIPE NETWORK AS A CRITERION OF RISK MANAGEMENT

This Paper presents the results of application of methods of reliability and risk analysis, which are used in studies of effectiveness and safety of operation of water distribution system. The risk assessment method was applied using quantitative and qualitative procedures of four-parameter matrix. The study was conducted for water distribution system of selected regions of Silesian agglomeration including two cities: Katowice and Ruda Śląska, which are managed by Upper Silesian Waterpipe Company. The study involved a large database providing information on the occurrence of failure over the period from January 2000 to July 2011 year. In reliability analysis estimated the main parameters such as: failure rate λ , mean lifetime T_p and mean recovery time T_o . Moreover there were presented the results of risk assessment and the interpretation of effectiveness of risk management of modernization of water pipe.

1. Wprowadzenie

Zapewnienie bezawaryjnej pracy poszczególnych obiektów technicznych budujących system zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW), kształtującej ryzyko jego eksploatacji, wynika z funkcji świadczenia usług dostaw wody do jej odbiorców - ludności i podmiotów gospodarczych - warunkujących standard życia i rozwoju danego regionu. Konieczność niezawodnej i bezpiecznej eksploatacji SZZW ma swoje międzynarodowe regulacje prawne [1-3], których odpowiednikami w legislacji polskiej są przede wszystkim ustawa o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków [4], rozporządzenie ministra zdrowia dotyczące jakości wody do spożycia [5, 6] czy też ustawa o zarządzaniu kryzysowym [7, 8].

Niezawodność funkcjonowania SZZW jest ściśle powiązana z bezpieczeństwem, które w potocznym znaczeniu oznacza stan braku zagrożenia, stan spokoju i pewności. Uogólniając, bezpieczeństwo systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę to jego cecha pozwalająca na pełną niezawodną realizację powierzonych mu zadań. Bezpieczeństwo systemu wodociągowego można, więc zdefiniować jako stan eksploatacyjny umożliwiający pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na wodę w sposób technicznie

i ekonomicznie uzasadniony. Zatem interpretacja bezpieczeństwa funkcjonowania SZZW odnosi się do grupy zdarzeń eksploatacyjnych nie narażonych na negatywne oddziaływania czynników środowiska zewnętrznego i niszczące działanie czynników wewnętrznych w efekcie błędnych decyzji operatora.

Obecnie najefektywniejszym sposobem zapewnienia bezpieczeństwa funkcjonowania SZZW jest wdrażanie w procedury jego eksploatacji i proces zarządzania technik kontroli i analiz bezpieczeństwa, w tym ocen ryzyka opartych na Planach Bezpieczeństwa Wodnego (PBW). Wdrażane w codzienną praktykę eksploatacji PBW rekomendowane jest w Wytocznych Światowej Organizacji Zdrowia w sprawie jakości wody do picia [9-10], jako innowacyjne rozwiązania zarządzania ryzykiem i bezpieczeństwem. Wdrażanie procedur PBW w praktykach zarządzania jest szczególnie istotne w sytuacjach zapewnienia bezpieczeństwa i minimalizacji ryzyka eksploatacji przewymiarowanych systemów wodociągowych. Działania powyższe obok zapewnienia bezpieczeństwa muszą opierać się na optymalizacji kosztów eksploatacji systemu. Należy, bowiem podkreślić tu fakt, iż podejmowane działania techniczne i modernizacyjne z jednej strony podnoszą niezawodność systemu, a drugiej zaś strony generują nieuniknione koszty, często nieadekwatne do pozyskanego efektu wzrostu bezpieczeństwa funkcjonowania SZZW (np. czas bezawaryjnej pracy). Wyłania się tu konieczność systemowego podejścia w analizach niezawodnościowych eksploatacji obiektów wodociągowych, uwzględniających środowiskowe warunki pracy. Jedynie szczegółowa analiza niezawodności z pełną interpretacją przyczyn i skutków wystąpienia zdarzeń niepożądanych pozwala wyłonić słabe ogniwa SZZW, a następnie podjąć skuteczne działania, podnoszące kompleksowo niezawodność całego systemu, a nie tylko poszczególnych elementów. Aplikacje metod globalnych analiz niezawodności i ryzyka są warunkiem koniecznym w osiągnięciu ciągłości bezawaryjnej eksploatacji, warunkującej bezpieczeństwo funkcjonowania SZZW z jednoczesną akceptacją efektywności działania systemu wodociągowego przez ich eksploatorów i użytkowników [11].

W pracy przedstawiono wyniki aplikacji metod analizy niezawodności i ryzyka w badaniach efektywności i bezpieczeństwa funkcjonowania systemu dystrybucji wody. W ocenie ryzyka zastosowano metodę ilościowo-jakościową wykorzystującą w procedurach szacowania ryzyka macierz czteroparametryczną. Badania przeprowadzono dla systemu dystrybucji wody wybranych regionów aglomeracji śląskiej: Katowice i Ruda Śląska, pozostającego w gestii zarządcy Górnośląskiego Przedsiębiorstwa Wodociągowego S.A. Podstawę szerokiego zakresu badań stanowiła zgromadzona baza danych dotycząca zaistniałych awarii sieci wodociągowych w okresie od stycznia 2000r. do lipca 2011r. W badaniach wyznaczono podstawowe parametry niezawodnościowe takie jak: wskaźnik intensywności uszkodzeń sieci wodociągowej, średni czas bezawaryjnej pracy oraz średni czas trwania awarii. Ponadto w pracy przedstawiono rezultaty oceny ryzyka z interpretacją efektywności podjętych działań zarządzania ryzykiem.

2. Metoda analizy niezawodności i ryzyka eksploatacji sieci wodociągowej

W myśl ustawy o stanie kłęski żywiolowej awaria techniczna to „gwałtowne, nieprzewidziane uszkodzenie lub zniszczenie obiektu budowlanego, urządzenia technicznego lub systemu urządzeń technicznych, powodujące przerwę w ich użytkowaniu lub utratę ich własności”. W tym kontekście rozróżnia się dwa typy awarii występujących w systemie dystrybucji wody: awarię nagłą i stopniową. Awaria nagła spowodowana jest nieoczekiwa-

nymi, znaczącymi zmianami w strukturze materiałowej przewodów, której najczęściej towarzyszy duży wypływ wody. Natomiast awaria stopniowa powstaje na skutek nieodwracalnych zmian w strukturze materiału w efekcie zużycia technicznego lub postępującego procesu starzeniowego. W każdym z wyróżnionych przypadków awarii – nagła i stopniowa - odnawialnych obiektów technicznych, do których zaliczane są obiekty sieci wodociągowej, analizy niezawodnościowe ich funkcjonowania oparte są na założeniach procesu eksploatacji obejmującego zarówno cykl pracy jak i odnowy. Ustalenie kryteriów eksploatacji w procedurach badawczych pozwala w sposób jednoznaczny określić dwa stany niezawodnościowe:

- stan pracy, czyli zdolności całkowitej, w którym element systemu realizuje powierzona mu funkcje z wymaganym efektem techniczno-technologicznym i ekonomicznym,
- stan niezdatności częściowej lub całkowitej, w którym z powodów losowych następują zakłócenia w eksploatacji obiektu w skutek jego uszkodzenia.

Uwzględniając powyższe stany eksploatacyjne oraz specyfikę budowy i eksploatacji sieci wodociągowej w analizie niezawodności ich funkcjonowania zwykle określa się podstawowe parametry, przedstawione w tabeli 1.

Tab. 1. Podstawowe parametry oceny niezawodności sieci wodociągowej

Tab. 1. Basic parameters of reliability assessment of water-pipe

Parametr	Jednostka	formuła
Intensywność uszkodzeń	uszk./ (km · a)	$\lambda(t) = \frac{n_u(t, t + \Delta t)}{L \cdot \Delta t}$
Średni czas pracy między uszkodzeniami	d	$T_p = \frac{1}{k + z} \left(\sum_{i=1}^k t_{pi} + z \cdot t \right)$
Średni czas odnowy	h	$T_o = \frac{1}{n_o} \sum_{i=1}^{n_o} t_{oi}$

$n_u(t, t + \Delta t)$ – liczba wszystkich uszkodzeń w przedziale czasu (t, t+Δt),

L – długość badanych przewodów wodociągowych [km],

k – liczba okresów pracy obiektów uszkadzających się,

z – liczba okresów pracy obiektów nieuszkadzających się,

t – długość okresu badań – obserwacji [d],

t_{pi} – wartość i-tego czasu pracy obiektów uszkadzających się [d],

n_o – liczba odnów w badanym okresie,

t_{oi} – czas trwania i-tej odnowy [h].

W metodyce badawczej parametry niezawodności eksploatacji sieci wodociągowej najczęściej odnosi się do wydzielonych jednostek osadniczych uwzględniając: wiek, materiał, średnicę przewodu, jego lokalizację, typ uszkodzenia i jego następstwa oraz rodzaj sieci wodociągowej (sieć: magistralna, rozdzielcza, przyłącza wodociągowe). W sytuacji pojawienia się uszkodzenia istotnym jest ustalenie przyczyn, uwarunkowań powstania i skutków zaistniałego zdarzenia oraz określenie pełnej charakterystyki techniczno-organizacyjnej usunięcia uszkodzenia. Zgromadzone w takim zakresie dane o uszkodzeniu, najczęściej archiwizowane w tzw. dziennikach awarii, pozwalają w pełnym zakresie przeprowadzić analizę niezawodności eksploatacji sieci wodociągowej, a na jej podstawie dokonać oceny bezpieczeństwa funkcjonowania systemu dystrybucji wody [11].

Niezawodność, bezpieczeństwo i ryzyko to pojęcia, które w teorii eksploatacji systemów technicznych, w tym sieci wodociągowej, są ze sobą ściśle powiązane. Miarą niezawodności bezpieczeństwa jest prawdopodobieństwo niewystąpienia skutków katastroficznych. Ryzyko natomiast związane jest z dwoma pojęciami, z prawdopodobieństwem (lub częstością) wystąpienia danego zdarzenia, definiowanym jako zagrożenie bezpieczeństwa eksploatacji oraz skutkami tego zdarzenia.

Literatura przedmiotu [12-15] jednoznacznie wskazuje, iż spośród wielu metod badawczych w praktyce wodociągowej powszechnie zastosowanie znalazła procedura jakościowo-ilościowa szacowania ryzyka tzw. metoda matrycowa. Procedury badań metodą matrycową wymagają identyfikacji zagrożeń eksploatacji SZZW (scenariusze awaryjne) pod względem prawdopodobieństwa ich występowania oraz potencjalnych skutków. Matryca (macierz) ryzyka przedstawia zależność prawdopodobieństwa i konsekwencji wystąpienia nieoczekiwanych zdarzeń eksploatacyjnych wyrażanych najczęściej w kategoriach wagowych. Matematyczna interpretacja funkcji prawdopodobieństwa zdarzeń niepożądanych i ich skutków, pozwala wyznaczyć liczbowy poziom ryzyka będący podstawą przypisania analizowanego zdarzenia do danej kategorii ryzyka: tolerowane, kontrolowane i nieakceptowane [16]:

W badaniach ryzyka eksploatacji sieci wodociągowej powszechnie wykonuje się analizy oparte na czteroparametrycznej matrycy ryzyka [17]:

$$r_e = \frac{S \cdot I \cdot U}{Z}, \quad (1)$$

gdzie:

S – waga punktowa związana z rodzajem sieci wodociągowej ($S=1$ – podłączenia wodociągowe; $S=2$ – sieć rozdzielcza; $S=3$ – sieć magistralna),

I – waga punktowa związana z intensywnością uszkodzeń ($I=1 - \lambda \in (0,0.5)$ [uszk./ $(\text{km} \cdot \text{a})$]; $I=2 - \lambda \in (0.5,1.0)$ [uszk./ $(\text{km} \cdot \text{a})$]; $I=3 - \lambda \in (1.0,+\infty)$ [uszk./ $(\text{km} \cdot \text{a})$]),

U – waga punktowa związana z uciążliwością napraw uszkodzeń ($U=1$ – awaria rurociągu w terenie niezurbanizowanym, właściwa organizacja i całodobowa dyspozycyjność brygad remontowych; $U=2$ – awaria rurociągu w pasie ruchu, jednozmianowa dyspozycyjność brygad remontowych; $U=3$ – awaria rurociągu w pasie ruchu pojazdów, brak zmechanizowanego sprzętu do usuwania awarii),

Z – waga punktowa związana z zabezpieczeniami funkcjonowania sieci wodociągowej ($Z=1$ – brak zarówno jakiegokolwiek zabezpieczenia jak również monitoringu pracy sieci wodociągowej i aktualnej inwentaryzacji; $Z=2$ – zabezpieczenie standardowe, uproszczony monitoring pracy sieci wodociągowej; $Z=3$ – zabezpieczenie ponadstandardowe, pełny monitoring pracy sieci wodociągowej).

Przedstawiona czteroparametryczna matryca ryzyka odniesiona do każdego rodzaju sieci wodociągowej, ma charakter ekspercki. Opiera się ona na predefiniowanych wartościach miar opisowych parametrów występujących w podstawowej formule (1) szacowania ryzyka. Wyznaczona wartość liczbową ryzyka pozwala ocenić poziom bezpieczeństwa eksploatacji sieci wodociągowej odniesiony do zdefiniowanych kategorii ryzyka (tabela 2).

Tab. 2. Kategorie ryzyka eksploatacji sieci wodociągowej

Tab. 2. Risk category of water-pipe network operation

Kategoria ryzyka	Skala punktowa
Tolerowane	$0,33 \leq r_e \leq 3,0$
Kontrolowane	$4,0 \leq r_e \leq 8,0$
Nieakceptowane	$9,0 \leq r_e \leq 27,0$

Występujące awarie sieci magistralnej, determinującej w największym stopniu bezpieczeństwo eksploatacji systemu dystrybucji wody, a co za tym idzie ciągłości dostaw wody do jednostki osadniczej, wymagają szczegółowej analizy skutków ich wystąpienia. Szczególnie istotnym jest tu fakt zagrożenia wielkości dostaw wody mający charakter nie tylko społeczny, ale również natury zagrożeń technicznych i logistycznych. Ponadto ważnym elementem uwzględnianym w ocenie ryzyka winny być koszty usuwania awarii. Uwzględniając powyższe elementy zaproponowano w standardowej metodzie badawczej weryfikację procedur analitycznych według zmodyfikowanej formuły szacowania ryzyka wyrażonej poniższą zależnością:

$$r_e = \frac{I \cdot U \cdot K}{Z} \quad (2)$$

gdzie:

I, U – jak we wzorze 1,

K – waga punktowa zawiązana z kosztami usuwania awarii ($K=1$ – koszty usuwania awarii nie przekraczają wartości 2 000zł; $K=2$ – koszty usuwania awarii mieszczą się w przedziale od 2 000zł do 5 000zł, $K=3$ – koszty usuwania awarii przekraczają wartość 5 000zł),

Z – waga punktowa związana z zabezpieczeniami funkcjonowania sieci wodociągowej i ciągłości dostaw wody do odbiorcy wyznaczana na podstawie formularza szacowania poziomu zabezpieczenia.

W formularzu oceny stopnia ochrony sieci wodociągowej i zapewnienia ciągłości dostaw wody do konsumenta zaproponowano uwzględnienie poniższych aspektów determinujących poziom bezpieczeństwa zarówno dostawcy wody jak i konsumenta:

- Sposób realizacji monitoringu sieci wodociągowej:
 - pełny monitoring hydrauliczny i jakości transportowanej wody – 1pkt,
 - uproszczony monitoring pracy sieci wodociągowej – 5pkt,
 - niesystematyczny monitoring, w ograniczonym zakresie – 10pkt.
- Alternatywne źródła zasilania w wodę – system wodociągowy eksploatuje, co najmniej dwa niezależne układy zasilania w wodę posiadające rezerwy dyspozycyjnej mocy produkcyjnej:
 - tak – 1pk
 - nie – 5pkt.
- Objętość wody uzdatnionej zgromadzona w sieciowych zbiornikach zapasowo-wyównawczych:
 - stanowi minimum 70% Q – średnie dobowe zapotrzebowanie na wodę – 1pkt,
 - mieści się w zakresie od 50-70% Q – 3pkt,
 - brak sieciowych zbiorników wody uzdatnionej – 5pkt.

4. Struktura organizacyjna i logistyczna usuwania awarii i jej skutków:
- przedsiębiorstwo wodociągowe posiada własne wyspecjalizowane pogotowie remontowe oraz niezbędny sprzęt techniczny do sprawnego usuwania awarii i czas usuwania uszkodzenia jest mniejszy od 6 godzin – 1pkt,
 - przedsiębiorstwo wodociągowe posiada własne wyspecjalizowane pogotowie remontowe lub ma podpisaną umowę z podmiotem gospodarczym na świadczenie usług usuwania uszkodzeń i czas usuwania awarii mieści się w zakresie od 6 do 24 godzin – 3pkt,
 - przedsiębiorstwo wodociągowe ma podpisaną umowę z podmiotem gospodarczym na świadczenie usług usuwania uszkodzeń lub poszukuje wykonawcy z chwilą wystąpienia zagrożenia, a czas usuwania awarii jest większy od 24 godzin – 5pkt.

Suma punktów uzyskanych w formularzu określa poziom zabezpieczenia eksploatacji sieci wodociągowej i ciągłości dostaw wody od jej odbiorców w skali trójstopniowej:

- suma od 4 do 8 – wysoki stopień zabezpieczenia – 3pkt,
- suma od 12 do 18 – średni stopień zabezpieczenia – 3pkt,
- suma od 20 do 25 – niski stopień zabezpieczenia – 1pkt.

Ostatnią procedurą postępowania w metodzie oceny bezpieczeństwa eksploatacji sieci magistralnej jest wyznaczenie ze wzoru 2 wartość liczbowej ryzyka, która pozwala w sposób jednoznaczny określić zdefiniowane kategorie ryzyka (tabela 2).

3. System dystrybucji wody aglomeracji śląskiej

Współczesny system zbiorowego zaopatrzenia w wodę na terenie Śląska swoim zasięgiem obejmuje obszar GOP-u i ROW-u oraz rejonu Jaworzna, którego łączna powierzchnia stanowi blisko 4,3 tys. km². System ten dostarcza wodę do 66 gmin województwa śląskiego, stanowiąc źródło zasilania w wodę dla blisko 3 miliony mieszkańców regionu. Niektóre gminy częściowo zaopatrują się w wodę z własnych ujęć, na poziomie zaledwie kilkunastu procent ilości wody dostarczanej przez Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów S.A. Gminy te traktują niejednokrotnie system wodociągowy Górnośląskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów S.A. jako uzupełniające źródło lub jako system rezerwowy, gwarantujący im dostarczenie wody do odbiorców w każdej zaistniałej sytuacji eksploatacyjnej. Powyższy fakt wymusza na przedsiębiorstwie konieczność utrzymania w pełnej gotowości maksymalnej mocy produkcyjnej, na wypadek wystąpienia w systemie zdarzeń nadzwyczajnych.

Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów S.A. każdego dnia produkuje i dostarcza do odbiorców aglomeracji śląskiej średnio 400 000 m³ wody pitnej. Obecnie system ujmuje i uzdatnia wodę w 11 zakładach produkcji, których dyspozycyjna zdolność produkcyjna wynosi 943 784 m³. Woda z podsystemu produkcji kierowana jest do silnie rozbudowanego podsystemu jej dystrybucji. Podstawowymi odbiorcami wody są rejonowe przedsiębiorstwa wodociągów i kanalizacji (86% ilości sprzedawanej wody), które z kolei swoimi lokalnymi sieciami wodociągowymi dostarczają ją bezpośrednio do konsumentów.

Do transportu wyprodukowanej wody wykorzystywana jest sieć magistralna, głównie w zakresie dużych średnic 1800 – 500 mm o łącznej długości 886,4km (stan na 31.12.2011r). Przewodów o średnicy poniżej Ø500 jest zaledwie 12,8% całkowitej długości sieci wodociągowej. Zasadniczy trzon w budowie systemu tranzytowo-magistralnego odgrywają przewody o średnicy Ø1000 i wyższej, które tworzą blisko 50% łącznej długości omawianej sieci.

Wieloletni okres budowy i rozbudowy sieci wodociągowej skutkuje również istotną różnorodnością wiekową. Eksploatowane są w systemie zarówno rurociągi o ponad 100 letniej eksploatacji (10%) jak i przewody eksploatowane zaledwie 15 lat (23,3%). Intensywny rozwój aglomeracji śląskiej w latach 50-80-tych ubiegłego stulecia powodował gwałtowną budowę sieci wodociągowej, stąd też udział przewodów o 30-60-cio letnim czasie eksploatacji stanowi aktualnie aż 48% całkowitej długości wodociągu grupowego.

Ciągła rozbudowa oraz modernizacja, jak i eksploatacja systemu w obszarze objętym skutkami działalności górniczej, wpłynęły w istotny sposób na różnorodność struktury materiałowej. Zdecydowanie największy udział w budowie sieci odgrywa stal, 75,4% całkowitej długości sieci wodociągowej. Pozostała część sieci wodociągowej wykonana jest głównie z żeliwa sferoidalnego (80,5, km), PE (57,7 km), żeliwa szarego (18,7 km) i żelbetu (4,4 km). Nieznaczny udział w budowie przewodów odgrywa sieć z GFK (0,3 km). W odniesieniu do sieci z przewodów stalowych, dobrym stanem technicznym charakteryzuje się 162,0 km tej sieci, która posiada wykładziny cementowe (22,7% długości przewodów stalowych) i poliuretanowe (0,2% długości przewodów stalowych) oraz rękawy PE-LD (1,4% długości przewodów stalowych).

W obszarze eksploatacji wodociągu grupowego aglomeracji śląskiej zlokalizowanych jest 9 zbiorników wyrównawczych o łącznej pojemności 374 000 m³ oraz 5 pompowni sieciowych. Ilość magazynowanej w nich wody stanowi około 95% ilości wody wtłaczanej przez przedsiębiorstwo do systemu dystrybucji w ciągu doby.

Eksploatacją i konserwacją sieci wodociągowej zajmuje się osiem oddziałów sieci magistralnej (OSM), wydzielonych terytorialnie w zależności od zasięgu działania (tabela 3).

Tab. 3. Charakterystyka sieci wodociągowej – stan na 31.12.2011 r.

Tab. 3. Characteristic of water-pipe network – as of 31.12.2011.

Oddział OSM	Długość sieci [km]	Intensywność uszkodzeń [uszk./(km·a).	Średni wiek [lata]
Bytków	125,4	0,24	41
Chropaczów	85,6	0,48	61
Czarny Las	99,6	0,21	40
Mikołów	173,8	0,22	35
Murcki	82,0	0,34	28
Pszów	69,3	0,17	27
Zagórze	107,8	0,26	36
Żory	142,9	0,14	32
Razem	886,4	0,26	37

4. Zakres oceny ryzyka eksploatacji wybranych odcinków sieci magistralnej

Badania prowadzono dla horyzontu czasowego od 1 stycznia 2000r. do 30 czerwca 2011r. Stanowiły one łączny okres 11,5 lat obserwacji awarii występujących na sieci magistralnej, które zostały odnotowane w tzw. Dziennikach Awarii. W okresie badań odnotowano na sieci magistralnej znajdującej się w gestii zarządzania GPW S.A. łącznie 1127 awarii przyczyną, których najczęściej była korozja, pęknięcia podłużne, uszkodzenia na złączach i armaturze.

Szczegółową analizą niezawodności i ryzyka eksploatacji sieci wodociągowej objęto trzy wybrane odcinki sieci magistralnej (tabela 4) dostarczającej wodę do centralnej części aglomeracji śląskiej stanowiącej SZZW miast Ruda Śląska i Katowice. Zaopatrzenie w wodę tych obszarów odbywa się z dwóch niezależnych kierunków zasilania. Od południa woda transportowana jest ze zbiorników sieciowych w Mikołowie i Murckach, zasilanych wodami pochodzącymi z ZUW Goczałkowice, ZUW Dzieńkowice i SUW Czaniec, ujmowanymi z zasobów powierzchniowych. Od północy natomiast wodami z ujęć wód podziemnych z SUW Bibiela. Eksploatacja sieci wodociągowej objętej badaniami znajduje się w gestii 4 Oddziałów Sieci Magistralnej: Mikołów, Czarny Las, Chropaczów i Bytków. Sieć magistralna zbudowana jest z przewodów stalowych eksploatowanych od ponad 40 lat. Badaniami objęto zarówno sieć po modernizacji, którą stanowi odcinek nr1 posiadający wewnętrzną wykładzinę cementową, jak i odcinki bez wykładziny tj. nr2 i 3.

Tab. 4. Charakterystyka sieci wodociągowej objętej badaniami

Tab. 4. Water-pipe network characteristic - the object of study

Odcinek	Trasa	OSM	Średnica [mm]	Rok budowy	Długość [km]
nr 1	Mikołów – Czarny Las	Mikołów/ Czarny Las	1400	1972l	17,15
nr 2	Czarny Las – Bytom	Chropaczów	1000	1971	9,65
nr 3	Murcki – Katowice Dąb	Bytków	1400	1979	13,8

Odcinek nr 1 o średnicy $\varnothing 1400$ transportuje wodę ze zbiornika w Mikołowie do Rudy Śląskiej Czarnego Lasu. W około 70% rurociąg ten biegnie przez tereny zielone co usprawnia jego ewentualne remonty czy prace konserwacyjne. Odcinek magistrali Mikołów – Czarny Las obsługiwany jest przez dwa oddziały sieci magistralnej: OSM Czarny Las oraz OSM Mikołów. OSM Mikołów obsługuje rurociąg do rzeki Kłodnicy w Rudzie Śląskiej, a OSM Czarny Las od Kłodnicy do Czarnego Lasu. Łączna liczba odnotowanych awarii w okresie prowadzonych badań wynosiła 240, z czego 74% wystąpiło w obszarze eksploatacji OSM Czarny las pozostałe 26% (62 awarie) w obszarze działalności OSM Mikołów.

Odcinek nr2 o średnicy $\varnothing 1000$ stanowi sieć magistralną pomiędzy Bytomiem a Rudą Śląską. W dużej części około 60÷70% rurociąg biegnie przez tereny niezabudowane oraz zielone jak np. parki czy ogródki działkowe. W Rudzie Śląskiej rurociąg biegnie wzdłuż takich ul. Jak Królowej Jadwigi, Norwida, Wincentego czy 1 Maja w kierunku Czarnego Lasu. Obsługą wodociągu zajmuje się Oddział Górnośląskiego Przedsiębiorstwa Wodociągowego w Chropaczowie – OSM Chropaczów. W okresie prowadzonych badań odnotowano na tym odcinku sieci magistralnej 235 awarii.

Ostatnim z badanych odcinków magistrali nr 3 jest wodociąg o średnicy Ø1400 biegnący z Katowic Murcki do Katowic Dąb. Rurociąg w około 40% biegnie przez tereny zielone, dlatego jego eksploatacja może być utrudniona przez umieszczenie go pod terenami zabudowanymi miasta Katowice. Jego obsługą zajmuje się OSM Bytków. W latach 2000-czerwiec 2011 odnotowano tu 167 awarii.

W ocenie bezpieczeństwa eksploatacji sieci magistralnej wyznaczono podstawowe parametry niezawodnościowe (tabela 1). W przeprowadzonych badaniach ryzyka wykorzystano czteroparametryczną matrycę szacowania ryzyka według formuły 2. W celu oceny wpływu efektywności podjętych prac remontowych na odcinku nr 1 na jego niezawodność i bezpieczeństwo eksploatacji, analizy przeprowadzono dla 3 okresów badawczych, obejmujących lata:

- okres 1- styczeń 2000r - czerwiec 2011 r.,
- okres 2 - styczeń 2000r – grudzień 2006 r.,
- okres 3 - styczeń 2007r - czerwiec 2011 r.,

Uzyskane wyniki analizy przedstawiono zbiorczo w poniższej tabeli nr 5.

Tab. 5. Zestawienie wyników analizy niezawodności i ryzyka

Tab. 5. Results of reliability and risk analysis

Parametr	Odcinek nr 1 całość	Odcinek nr 1 OSM Czarny Las	Odcinek nr 1 OSM Mikołów	Odcinek nr 2 OSM Chropaczów	Odcinek nr 3 OSM Bytków
$\lambda_{2000-2011}$ [uszk./km·a)	1,21	1,81	0,63	2,12	1,05
$\lambda_{2000-2006}$ [uszk./km·a)	1,79	2,33	0,63	2,01	1,12
$\lambda_{2007-2011}$ [uszk./km·a)	0,32	0,98	0,62	2,35	0,95
$T_{p-2000-2011}$ [d]	40,04	26,04	90,95	25,08	28,51
$T_{o-2000-2011}$ [h]	10,20	8,06	17,99	14,12	10,98
$T_{n-2000-2011}$ [h]	5,94	5,96	5,88	6,63	5,86
$T_{p-2000-2006}$ [d]	31,79	20,66	74,56	27,01	25,75
$T_{o-2000-2006}$ [h]	8,74	8,57	9,39	15,17	10,76
$T_{n-2000-2006}$ [h]	6,05	6,04	6,09	6,69	6,25
$T_{p-2007-2011}$ [d]	66,14	43,92	134,63	22,60	33,21
$T_{o-2007-2011}$ [h]	14,83	6,36	40,92	12,77	11,35
$T_{n-2007-2011}$ [h]	5,59	5,68	5,32	6,55	5,19
$r_{e-2000-2011}$	2	2	1,33	4	3
$r_{e-2000-206}$	2	2	1,33	4	3
$r_{e-2007-2011}$	1,33	1,33	1,33	4	2

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, iż najmniejszą intensywnością uszkodzeń w okresie badań 2007r.-2011r. charakteryzował się odcinek nr 1 (0,32 uszk./(km·a)). Zatem podjęte działania remontowe (cementowanie) przyniosły wymierne korzyści zarówno w postaci zmniejszenia aż o 74% intensywności uszkodzeń jak i w postaci ponad dwukrotnego zwiększenia czasu pracy bezawaryjnej przewodu do poziomu 66,14 dób (tabela 5). Przeprowadzone badania wykazały, iż największą intensywnością uszkodzeń przekraczającą poziom 2 uszk./(km·a) charakteryzują się odcinek nr 2.

Ocena ryzyka wykazała, iż jedynie na odcinku nr 2 odnotowano kategorię ryzyka kontrolowanego, a na pozostałych odcinkach nr 1 i nr 3 występuje ryzyko tolerowane.

Szczegółowa analiza niezawodności i ryzyka eksploatacji sieci wodociągowej dowiodła, iż podjęte racjonalne celowe modernizacje na odcinku sieci magistralnej nr1 znajdującej się w gestii zarządzania OSM Czarny Las przyniosły nie tylko znaczący wzrost parametrów niezawodności, ale również obniżenie wielkości wartości wskaźnika ryzyka tolerowanego eksploatacji, co zwiększa bezpieczeństwo funkcjonowania sieci wodociągowej (tabela 5).

Powyższe badania potwierdziły w sposób wymierny fakt, iż pierścieniowa budowa systemu dystrybucji pozwala między innymi na elastyczną współpracę z podsystemem produkcji wody, co zapewnia wysoką gwarancję dostawy wody do odbiorców przy jednoczesnej minimalizacji skutków awarii i losowych postojów. W sytuacjach tych system wodociągu grupowego jest w stanie dokonać przerzutów wody z innych układów zasilania w dowolne rejonu aglomeracji, zachowując ciągłość dostawy wody.

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.

Bibliografia

- [1] Dyrektywa Rady Unii Europejskiej z 03.11.1998 r. o jakości wody przeznaczonej do spożycia, 98/83/EC. Official Journal of the EC, 1998, L 330.5.12.98, 32-54
- [2] Dyrektywa Rady Unii Europejskiej. Seveso II, 96/82/EC, Council Directive of December 1996
- [3] IEC 60812:1985: Analysis techniques for system reliability. Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)
- [4] Ustawa z dnia 07.06.2001r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków. Dz. U. nr 72, poz.747 z 13.07.2001r. (Dz. U. nr 123 poz.858 z 11.07.2006r. – tekst jednolity z późn. zm.)
- [5] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 29.03.2007r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz. U. nr 61, poz. 417 z 06.04.2007r.

- [6] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 20.04.2010r. zmieniające rozporządzenie w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz. U. nr 72, poz. 466 z 29.04.2010r.
- [7] Ustawa z dnia 27.04.2007r. o zarządzaniu kryzysowym, Dz. U. nr 89, poz. 590
- [8] Ustawa z dnia 17.07.2009r. o zmianie ustawy o zarządzaniu kryzysowym, Dz. U. nr 131, poz. 1076
- [9] WHO, Guidelines for Drinking-water Quality, 3-rd Edition, no 1, Geneva, 2004
- [10] WHO, Water safety plan manual: step-by-step risk management for drinking-water suppliers, Geneva, 2009
- [11] Zimoch, I. Zintegrowana metoda analizy niezawodności funkcjonowania i bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. Wyd. Politechniki Śląskiej, Monografia nr323, Gliwice, 2011
- [12] Rak, J. Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. Monografie KIS PAN vol.28, Lublin 2005
- [13] Zimoch, I. Reliability and risk analysis usage for water supply system management. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2008, 17, (3A), 622-626
- [14] Gale, P. Using risk assessment to identify future research requirements. *Journal AWWA*, 2002, 94, (9), 30-38
- [15] Rak, J., Tchórzewska-Cieślak, B. Metody analizy i oceny ryzyka w systemach zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005
- [16] Zimoch, I. Bezpieczeństwo działania systemu zaopatrzenia w wodę w warunkach zmian jakości wody w sieci wodociągowej. *Ochrona Środowiska*, 2009, 31, (3), 51-55
- [17] Rak, J., Tchórzewska-Cieślak, B. Metoda zintegrowanej oceny ryzyka awarii w podsystemie dystrybucji wody. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2006, (1), 11-15

