

IZABELA ZIMOCH*

NIEZAWODNOŚCIOWA INTERPRETACJA AWARYJNOŚCI
PODSYSTEMU DYSTRYBUCJI WODYRELIABILITY INTERPRETATION OF WATER
DISTRIBUTION SUBSYSTEM FAILURES

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę kompleksowej oceny niezawodności podsystemu dystrybucji wody wykorzystującą statystyczną analizę wieloczynnikową wpływu różnorodnych przyczyn na intensywność uszkodzeń przewodów. Zaprezentowano również efekty zastosowania tej metody w ocenie funkcjonowania dużych podsystemów dystrybucji wody Wrocławia i Krakowa. Ocena niezawodnościowa obejmowała określenie podstawowych parametrów, takich jak: intensywność uszkodzeń i naprawy, średni czas pracy między uszkodzeniami, średni czas niesprawności oraz prawdopodobieństwo pracy w dowolnej chwili t . Ponadto poddano szerokiej analizie uszkadzalność przewodów w funkcji ich średnicy, materiału, wieku oraz roli, jaką pełnią w dostarczaniu wody do odbiorców.

Słowa kluczowe: podsystem dystrybucji wody, niezawodność, intensywność uszkodzeń

Abstract

This paper presents the method of comprehensive reliability estimation of water pipe network. This method employs multifactor statistical analysis in which the influence of different factors to pipes failure rates is studied. Moreover, results obtained by this method applied to estimate big water distribution subsystems (WDS) in Wrocław and Cracow are presented. The following factors were taken into consideration in reliability research: failure and repair rates, mean time to failure, mean recovery time and probability of failure-free operation at any time. Next, diameters, materials and exploitation times of water pipes were studied in multifactor regression analysis of unit failure intensity factor, and then sophisticated statistical analyses methods were employed to obtain simple results that describe the reliability of water supply systems (WSS).

Keywords: water distribution subsystem, reliability analysis, failure, failure intensity

* Dr inż. Izabela Zimoch, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska.

Oznaczenia

$R(t)$	–	prawdopodobieństwo pracy bezuszkodzeniowej
$R_o(t)$	–	prawdopodobieństwo odnowy
T^p	–	czas pracy bezuszkodzeniowej [h]
T_o	–	czas odnowy [h]
ω	–	parametr strumienia uszkodzeń [$a^{-1}km^{-1}$]
μ	–	intensywność odnowy [h^{-1}]
k	–	liczba okresów pracy obiektów uszkadzających się
z	–	liczba okresów pracy obiektów nieuszkadzających się
t_{pi}	–	czas trwania i -tego okresu pracy [h]
t_{oi}	–	czas trwania i -tego okresu odnowy [h]
t	–	długość okresu obserwacji [h]
n_o	–	liczba niesprawności w badanym okresie eksploatacji
$n(t, t + \Delta t)$	–	liczba uszkodzeń w przedziale czasu Δt
Δt	–	długość przedziału czasu, na jaki podzielono okres obserwacji [h]
N	–	liczba badanych obiektów
L	–	długość badanych przewodów sieci wodociągowej [km]

1. Wstęp

W myśl ustawy o stanie klęski żywiołowej awaria techniczna to „gwałtowne, nieprzewidziane uszkodzenie lub zniszczenie obiektu budowlanego, urządzenia technicznego lub systemu urządzeń technicznych, powodujące przerwę w ich używaniu lub utratę ich własności”. W tym kontekście rozróżnia się dwa typy awarii podsystemu dystrybucji wody (PsDyW): awarię nagłą spowodowaną nieoczekiwanymi, znaczącymi zmianami w strukturze materiałowej przewodów, której najczęściej towarzyszy duży wypływ wody, oraz awarię stopniową powstającą na skutek nieodwracalnych zmian w strukturze materiału spowodowanych zużyciem technicznym lub efektami starzeniowymi.

Uszkodzenia występujące w systemie dystrybucji wody nie zawsze powodują istotne zakłócenia w dostawie wody, bowiem duże systemy wodociągowe cechuje wysoki poziom rezerwy. Rezerwa ta wynika z budowy pierścieniowej sieci oraz wielokierunkowego stopnia zasilania systemu zaopatrzenia w wodę. Pojawiające się losowo awarie w głównej mierze powodują poważne zakłócenia w funkcjonowaniu układu komunikacyjnego miast oraz niejednokrotnie generują istotne koszty działalności przedsiębiorstw wodociągowych. Koszty te wynikają nie tylko z bezpośrednich opłat związanych z usunięciem awarii, to jest kosztów: zajęcia pasa drogowego, wynajęcia sprzętu budowlanego, materiałowych czy też indywidualnych odszkodowań za powstałe straty materialne. Istotnym skutkiem finansowym uszkodzeń sieci dla przedsiębiorstw jest brak wpływu do budżetu z tytułu strat niesprzedanej wody oraz stosowania bonifikat dla odbiorców w sytuacjach niedotrzymania warunków umowy zaopatrzenia w wodę. Ponadto sposób sprawnego usuwania awarii (organizacja prac, minimalizacja uciążliwości i skutków uszkodzeń) w każdym przypadku oceniany jest przez użytkowników systemu, a poprzez to wpływa na postrzeganie jakości świadczonych usług wodociągowych. Zapewnienie więc wymaganego poziomu niezawodności dostawy wody wymusza na przedsiębiorstwach z jednej strony konieczność opracowania efektyw-

nego systemu usuwania uszkodzeń, z drugiej zaś szczegółowej analizy zaistniałych awarii z uwzględnieniem ich przyczyn oraz uwarunkowań powstania, charakterystyki techniczno-organizacyjnej ich usuwania i wywołanych przez nie skutków.

W czasie normalnej eksploatacji PsDyW awarie poszczególnych jego elementów, a w szczególności sieci wodociągowej, są zjawiskiem posiadającym cechy losowości, których liczba w ciągu doby w dużych aglomeracjach miejsko-przemysłowych waha się od kilku do kilkunastu. Zatem w sytuacji, kiedy pojawia się awaria, istotne jest sporządzenie pełnej charakterystyki zaistniałego zdarzenia. Niestety w praktyce nie zawsze jest to realizowane, ponieważ eksploatacysty sieci najczęściej odnotowują jedynie rodzaj uszkodzenia oraz sposób jego naprawy, uznając pozostałe elementy towarzyszące procedurze usuwania uszkodzenia za nieistotne. Uzyskana w ten sposób szczątkowa baza danych często uniemożliwia pełną ocenę niezawodności funkcjonowania PsDyW. Ponadto podsystem ten jest zbudowany z bardzo dużej liczby elementów zarówno liniowych (sieć wodociągowa), jak i kubaturowych obiektów technicznych (pompownie strefowe, sieciowe zbiorniki wyrównawczo-zapasowe, hydroformie), co według autorów licznych prac studialnych i badawczych niezawodności i efektywności funkcjonowania PsDyW [1–8] dodatkowo wpływa na trudności podejmowanych analiz. Zatem szczegółowa archiwizacja informacji dotyczących awarii daje podstawy pełnej analizy uszkodzeń, której głównymi celami są:

- opracowanie procedur działań sprawnego usuwania uszkodzenia,
- określenie zakresu i harmonogramu prac profilaktycznych na sieci w celu eliminacji lub znacznego ograniczenia awaryjności układu,
- analiza warunków eksploatacji PsDyW oraz wykrywanie słabych jego punktów, podatnych na uszkodzenia,
- zmniejszenie strat finansowych, w efekcie ograniczenie liczby awarii,
- opracowanie procedur sprawnego Planu Bezpieczeństwa Eksploatacji PsDyW.

Najogólniej przyczyny uszkodzeń sieci wodociągowej można podzielić na cztery kategorie, w zależności od czynników, które je wywołały:

- oddziaływania środowiska zewnętrznego obejmujące: warunki gruntowo-wodne, obciążenia statyczne i dynamiczne, wpływ eksploatacji górniczej, występowanie prądów błędzących, użytkowanie sąsiadujących obiektów i urządzeń technicznych oraz agresywność transportowanej wody,
- błędy projektowe: błędna lub niepełna analiza założeń projektowych, brak doświadczenia zespołu projektującego,
- błędy wykonawcze: małe doświadczenie osób budujących PsDyW, nieprawidłowe ułożenie rurociągów i armatury, niestaranne wykonanie kompensacji, zabezpieczeń i izolacji sieci, wady materiałowe i konstrukcyjne stosowanych przewodów i armatury, wpływające na zmęczenie elementów sieci i szybkie ich zużycie techniczne,
- skutki nieprawidłowej eksploatacji: niewłaściwa strategia remontowa i modernizacyjna, brak systemu monitoringu pracy hydraulicznej układu dystrybucji wody, niski poziom techniczny personelu obsługującego i towarzyszące temu błędne decyzje eksploatacyjne operatora podsystemu.

Podatność przewodów wodociągowych na uszkodzenia od ponad 40 lat jest przedmiotem badań eksploatacyjnych, stanowiących podstawę oceny ich niezawodności. Rezultaty prowadzonych dotychczas badań [1–17] utworzyły duże zasoby bardzo zróżnicowanej bazy wartości wskaźników niezawodności, które mają istotne znaczenie dla rozwoju dyscypliny naukowej w zakresie metodyki badań i oceny niezawodności eksploatacji podsystemu

dystrybucji wody. Umożliwiają one również szacowanie kosztów zapewnienia wymaganego poziomu niezawodności systemów wodociągowych oraz stanowią wytyczne w praktyce inżynierskiej, które są podstawą organizacji skutecznych systemów usuwania awarii sieci wodociągowej i minimalizacji ich skutków.

Niezawodność SZW, a w tym sieci wodociągowej, jest cechą systemu wynikającą z jego wielofunkcyjności, odnoszącej się do ciągłego dostarczania do odbiorcy wody w wymaganej ilości, spełniającej obowiązujące normatywy jej jakości w określonych warunkach pracy i w dowolnej chwili oraz pod odpowiednim ciśnieniem i po akceptowalnej przez konsumenta cenie 1 m³. Dokonany przegląd literatury w zakresie poruszanego tematu [5–8, 12, 14–17] wykazał, iż ocena niezawodności sieci wodociągowej jest skomplikowana i trudna, co wynika nie tylko z wielofunkcyjności podsystemu dystrybucji wody (PsDyW), ale również z dużego obszaru objętego zakresem eksploatacji sieci. Ponadto, struktura PsDyW (układy zamknięte), jak i mnogość różnorodnych elementów go budujących (materiał, średnica, długość przewodów, uzbrojenie itp.) to kolejny aspekt wpływający na trudności podejmowanych badań niezawodnościowych.

Istnieje wiele czynników limitujących zdolność do bezuszkodzeniowej pracy przewodów sieci wodociągowej, niemniej jednak często w badaniach niezawodnościowych sieci wodociągowych uwzględnia się wpływ pojedynczych parametrów na ich awaryjność. Brakuje w piśmiennictwie informacji dotyczących kompleksowego wpływu tych czynników na bezuszkodzeniową pracę sieci wodociągowej. W artykule przedstawiono opracowaną metodykę wieloczynnikowej analizy niezawodności sieci wodociągowej wraz z rezultatami aplikacji w ocenie rzeczywistych systemów wodociągowych.

2. Podstawy analizy niezawodności i metodyka badań

W teorii niezawodności i eksploatacji systemów technicznych większość obiektów i urządzeń budujących sieć wodociągową zaliczana jest do tak zwanych elementów odnawialnych, czyli takich, które podlegają procesowi pracy i odnowy. Parametry pracy sieci wodociągowej mają charakter losowy, a ich klasyfikacja pozwala wyznaczyć stany eksploatacyjne, które uporządkowane w czasie obrazują proces eksploatacji. Ustalenie więc warunków eksploatacyjnych, determinujących stany niezawodnościowe, stanowi podstawę doboru i oszacowania odpowiednich wskaźników niezawodności tych obiektów. Wyróżnia się dwa podstawowe stany niezawodnościowe odnoszące się do stanu pracy, czyli zdatności całkowitej, oraz stanu niezdatności (w tym częściowej lub całkowitej), opisujące model dwustanowy eksploatacji. W tak zdefiniowanym modelu niezawodnościowym wyróżniono następujące zdarzenia losowe:

- przewód może przejść ze stanu pracy do jednego ze stanów niesprawności,
- stan niezdatności jest usuwany, a wszystkie uszkodzone elementy są naprawiane,
- w wyniku naprawy przewód przechodzi z dowolnego stanu niezdatności (częściowej lub całkowitej) w stan pracy, czyli zdatności pełnej.

Tabela 1

Parametry niezawodności modelu analizy podsystemu dystrybucji wody

Parametr	Formuła matematyczna
Czas pracy bezuszkodzeniowej	$T_p = \frac{1}{k+z} \left(\sum_{i=1}^k t_{pi} + z \cdot t \right)$ (1)
Czas odnowy	$T_o = \frac{1}{n_o} \sum_{i=1}^{n_o} t_{oi}$ (2)
Parametr strumienia uszkodzeń	$\omega = \frac{1}{T_p}$ (3)
Intensywność odnowy	$\mu = \frac{1}{T_o}$ (4)
Prawdopodobieństwo pracy	$R(t) = P(T_p' \geq t) = 1 - F(t) = \exp(-\omega \cdot t)$ (5)
Prawdopodobieństwo odnowy	$R_o(t) = 1 - \exp(-\omega \cdot t)$ (6)

gdzie: k – liczba okresów pracy obiektów uszkodzających się, t_{pi} – wartość i -tego okresu pracy, t – długość okresu obserwacji, z – liczba okresów pracy obiektów nieuszkodzających się, n_o – liczba niesprawności w badanym okresie eksploatacji, t_{oi} – czas trwania i -tej odnowy, pozostałe oznaczenia zdefiniowano poniżej.

Do opisu dwustanowego modelu eksploatacji sieci wodociągowej określa się następujące parametry niezawodnościowe:

- prawdopodobieństwo pracy bezuszkodzeniowej $R(t)$ oraz prawdopodobieństwo odnowy $R_o(t)$,
- średni czas pracy bezuszkodzeniowej T_p oraz średni czas odnowy T_o ,
- parametr strumienia uszkodzeń ω oraz intensywność odnowy μ .

W modelu analizy niezawodności eksploatacji podsystemu dystrybucji wody przyjęto, że strumień uszkodzeń obiektów wodociągowych jest strumieniem bez następstw, pojedynczym i stacjonarnym, a proces odnowy jest procesem Poissona, dla którego czas pracy ma rozkład wykładniczy [4, 5, 6, 18]. Powyższe założenia pozwalają estymować podstawowe parametry według formuł 1–6, zestawionych w tabeli 1.

Ze względu na liniowość przewodów w analizie awaryjności sieci wodociągowej należy uwzględnić długość badanych przewodów. Parametrem dobrze opisującym zdolność do bezuszkodzeniowej pracy obiektów liniowych jest jednostkowy parametr strumienia uszkodzeń obliczany z zależności [4, 5, 6, 18]:

$$\omega^*(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{L \cdot \Delta t} \quad (7)$$

gdzie:

- $n(t, t + \Delta t)$ – liczba uszkodzeń w przedziale czasu Δt ,
- Δt – długość przedziału czasu, na jaki podzielono okres obserwacji,
- N – liczba badanych obiektów,
- L – długość badanych przewodów sieci wodociągowej.

Praktyczne wykorzystanie wzorów (1–7) w ocenie niezawodności funkcjonowania PsDyW opiera się na niezbędnych informacjach uzyskanych z eksploatacji wodociągu.

Przyjęta metodyka badań wpływu czynników eksploatacyjnych na niezawodność sieci wodociągowej obejmuje szereg następujących po sobie procedur, takich jak:

- wytypowanie i klasyfikacja obiektów, okresu badań oraz określenie zakresu analizy,
- ustalenie modelu niezawodnościowego badanych obiektów,
- przeprowadzenie badań eksploatacyjnych,
- weryfikacja uzyskanych wyników oraz estymacja wybranych parametrów niezawodności i ich postaci funkcyjnych,
- określenie wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych na niezawodność sieci wodociągowej.

Szczegółowe badania przeprowadzone według procedur przedstawionych powyżej pozwalają znaleźć zależności matematyczne w postaci funkcyjnej prawdopodobieństwa pracy bezawaryjnej lub prawdopodobieństwa odnowy. Ponadto rozszerzają zakres dotychczasowych ocen o możliwości kompleksowych analiz wpływu wielu czynników na niezawodność eksploatacyjną PsDyW.

Oparcie pełnej oceny niezawodności PsDyW na zgromadzonej bazie danych wymaga jej weryfikacji. Pierwszym krokiem wstępnej analizy danych jest ich klasyfikacja według wcześniej wyznaczonych kryteriów, zgodnie z przyjętym celem badań. Próby losowe muszą zawierać następujące informacje charakteryzujące obiekt:

- średnica i materiał przewodu,
- czas wystąpienia i zakończenia awarii z podziałem na elementy składowe,
- rodzaj i przyczyny wystąpienia uszkodzenia,
- sposób usuwania awarii (na wyłączonym z eksploatacji przewodzie lub przy obniżonych hydraulicznych parametrach pracy).

Dane grupuje się najpierw w zależności od rodzaju sieci: tranzytowa, magistralna, rozdzielcza i podłączenia wodociągowe, a następnie ze względu na materiał, średnicę przewodu, jego wiek i lokalizację. Klasyfikacja przeprowadzana jest dla każdego badanego obiektu oddzielnie, zgodnie z rejestrem czasowym wszystkich zdarzeń, od momentu rozpoczęcia badań eksploatacyjnych do ich zakończenia. W tak przygotowanych zbiorach prób można dokonać analizy wybranych parametrów, np. wyznaczyć czas bezawaryjnej pracy przewodów wodociągowych o określonej średnicy. Wszystkie zmienne w próbie losowej powinny być uporządkowane w sposób rosnący oraz zweryfikowane pod względem liczebności oraz zgodności z informacjami uzyskanymi od eksploatatora. W ten sposób przygotowane zbiory danych stanowią próby wstępne, które następnie wykorzystywane są do wyznaczenia parametrów niezawodnościowych.

Kolejnym etapem postępowania w analizie danych jest stworzenie prób końcowych, które powstają przez połączenie wszystkich danych dla określonego obiektu PsDyW: przykładowo zestawienie wszystkich czasów naprawy dla przewodów rozdzielczych o określonej średnicy pochodzących z badań różnych sieci wodociągowych. Tak opracowane próby losowe poddaje się weryfikacji statystycznej, celem wykazania przynależności do tej samej zbiorowości generalnej. Do badań jednorodności danych niezależnych najczęściej wykorzystywany jest test Kruskala-Wallisa. Przyjęcie hipotezy o jednorodności danych pozwala na kontynuowanie szczegółowej analizy obejmującej estymację empirycznych charakterystyk niezawodności wraz z wyznaczeniem przedziałów ufności, jak również określenie wielokryterialnych modeli niezawodnościowych funkcjonowania PsDyW.

Badania eksploatacyjne niezawodności PsDyW Krakowa oraz Wrocławia prowadzone były w latach 2004–2006 zgodnie z planem (l, W, t) [19]. Powyższy plan odnosi się do obiektów stanowiących przewody o długości l , które uszkodzone w okresie badań podlegają naprawie W oraz badania zakończone zostały po upływie czasu t . Oprócz tego analizę oparto na danych archiwalnych (1996–2006) zawartych w kartach eksploatacyjnych rozważanych sieci wodociągowych krakowskiego i wrocławskiego SZW, pozyskanych z przedsiębiorstw wodociągowych. Badaniami objęto przewody wodociągowe z zakresu średnic od $\varnothing 25$ do $\varnothing 800$ mm. Ustalone warunki badań gwarantowały wyznaczenie miar niezawodnościowych z dokładnością $\delta = 0,1$ (błąd względny) na poziomie wiarygodności $\beta = 0,95$. Przeprowadzone badania eksploatacyjne obejmowały gromadzenie danych, takich jak: data i godzina wystąpienia awarii, naprawy, remontu itp., poszczególne czasy trwania (czas zgłoszenia uszkodzenia, rozpoczęcia naprawy i jej zakończenia), opis zdarzenia z uwzględnieniem lokalizacji i rodzaju uszkodzenia oraz sposobu naprawy, średnicę i materiał przewodu, a także skutki awarii dla podsystemu lub całego SZW. Niestety nie zawsze informacje dotyczące danych archiwalnych były wyczerpujące, co znacznie utrudniło prowadzenie pełnych analiz.

3. Charakterystyka obiektów badań

Podsystem dystrybucji wody miasta Krakowa

Współczesny krakowski podsystem dystrybucji wody buduje złożona sieć wodociągowa z licznymi zbiornikami wody czystej. Miasto Kraków podzielone jest na odrębne wodociągowe strefy zasilania z poszczególnych niezależnych źródeł, na które składają się cztery ujęcia wody powierzchniowej eksploatujące zasoby wodne rzek: Raby, Rudawy, Dłubni i Sanki oraz jedno ujęcie wód podziemnych, znajdujące się w Mistrzejowicach. Lokalizacja i rozwiązania techniczne układów zasilania w warunkach normalnej eksploatacji zapewnia przeciętnie 169 tys. m³/d wody włączanej do sieci, co gwarantuje niezawodne funkcjonowanie podsystemu dostawy wody do miasta. Woda w Krakowie dostarczana jest do odbiorców za pomocą złożonego układu rurociągów tranzytowych ($\varnothing 1400$ mm, długość 18 km), magistralnych ($\varnothing 1200$ – $\varnothing 330$, długość 247,9 km), rozdzielczych ($\varnothing 280$ – $\varnothing 80$ mm, długość 1131,1 km) i przyłączy domowych ($\varnothing 100$ – $\varnothing 25$ mm, długość 472,9 km). Łączna długość sieci wodociągowej na terenie obsługiwanym przez MPWiK S.A. wynosi 1869,9 km. Charakteryzuje się ona istotnym zróżnicowaniem wiekowym i materiałowym. Zdecydowanie największy udział w strukturze wiekowej posiadają rurociągi powstałe po roku 1975 (56% całkowitej długości). Duża część tych przewodów wykonana została w latach dziewięćdziesiątych (26% całkowitej długości) z zastosowaniem nowych technologii oraz materiałów, dzięki czemu ich wartość techniczna jest bardzo wysoka. Największy udział w budowie PsDyW mają przewody ze stali (32% długości sieci) oraz przewody z żeliwa (26%) i PCV (23%). Nieodłącznym elementem PsDyW są zbiorniki wyrównawczo-zapasowe (11 obiektów) o łącznej pojemności ponad 276,2 tys. m³.

Podsystem dystrybucji wody Wrocławia

Woda pitna dla Wrocławia produkowana jest w trzech układach zasilania: ZUW Mokry Dwór, ZUW Na Grobli oraz SUW Leśnica, których lokalizacja i ukształtowanie terenu wyodrębniły w mieście cztery strefy zaopatrzenia w wodę.

Podsystem dystrybucji Wrocławia jest wyjątkowo rozległy, w większości stanowiący układ pierścieniowy. Łączna długość sieci wodociągowej wynosi 1876,10 km (stan na styczeń 2009 roku). Woda dostarczana jest do mieszkańców za pomocą układu rurociągów magistralnych o średnicach $\varnothing 400$ – $\varnothing 1400$ mm i łącznej długości 209,97 km oraz rurociągów rozdzielczych o średnicach $\varnothing 80$ – $\varnothing 300$ mm i długości 1235,06 km. Przyłącza wodociągowe to przewody o średnicach $\varnothing 25$ – $\varnothing 250$ mm i długości 431,07 km. Sieć wodociągowa miasta, użytkowana od ponad 130 lat, cechuje się dużym zróżnicowaniem pod względem materiałowym oraz wiekowym. Dziś największy udział w strukturze materiałowej stanowią przewody wykonane z żeliwa (40,6%), PE-HD (42,2%) oraz stali (12,9%). Wrocławski PsDyW charakteryzuje się stosunkowo dużym udziałem (6,7%) w eksploatacji przewodów wybudowanych przed rokiem 1900, których długość wynosi aż 127,7 km. Blisko połowa długości wodociągu (49,2%, 697,7 km) wybudowana została w latach 1901–1945. Znaczący udział w strukturze wiekowej, bo aż 44,1%, mają przewody o okresie eksploatacji nie przekraczającym 60 lat.

Nieodłącznym elementem wrocławskiego PsDyW jest centralna pompownia „Bystrzycka”, zasilająca w wodę strefę wysokiego ciśnienia, dostarczając wodę do mieszkańców osiedli Nowy Dwór, Kozanów, Gądów, Muchobór Mały. Ponadto w podsystemie pracują dwie strefowe – hydroformie „Orzechowa” i „Krynicka”. Hydroformie te zlokalizowane są na terenie osiedla Gaj. Integralnymi elementami wspomagającymi pracę sieci wodociągowej są zbiorniki wody uzdatnionej zlokalizowane na terenie ZUW Mokry Dwór o łącznej pojemności 45 tys. m³ [20].

4. Analiza niezawodności eksploatacji PsDyW Krakowa i Wrocławia

Zebrane w ramach prowadzonych badań w PsDyW Krakowa oraz Wrocławia [20] dane o awariach pogrupowano, uwzględniając rodzaj i przyczynę wystąpienia uszkodzenia. Następnie wyodrębniono awarie w funkcji materiału, z którego jest zbudowana sieć wodociągowa. Dokonano również podziału utworzonej bazy danych ze względu na typ sieci, na której wystąpiła awaria z uwzględnieniem wielkości średnicy. Dodatkowo każda próba została scharakteryzowana przez podanie dzielnicy, w której wystąpiło uszkodzenie przewodu, rodzajem nawierzchni i gruntu, w którym analizowany przewód został posadowiony.

Tabela 2

Wyniki analizy niezawodnościowej awaryjności sieci wodociągowej Krakowa i Wrocławia

Parametr	Przewody żeliwne w krakowskim PsDyW		
	podłączenia wodociągowe	sieć rozdzielcza	sieć magistralna
T_p [h]	448,92	420,86	543,58
T_o [h]	25,49	38,82	52,40
T_n [h]	6,57	6,85	8,13
T_z [h]	18,92	31,97	44,27
ω [a ⁻¹ km ⁻¹]	1,699	1,053	0,422

μ [h ⁻¹]	0,039	0,026	0,019
$R(t)$	$\exp(-0,0022xt)$	$\exp(-0,0024xt)$	$\exp(-0,0018xt)$
Przewody żeliwne we wrocławskim PsDyW			
T_p [h]	412,35	384,09	1944,44
T_o [h]	59,20	77,50	7,39
T_n [h]	5,5	5,63	5,39
T_z [h]	53,70	71,87	2,20
ω [a ⁻¹ km ⁻¹]	0,365	0,898	0,363
μ [h ⁻¹]	0,017	0,013	0,135
$R(t)$	$\exp(-0,0024xt)$	$\exp(-0,0026xt)$	$\exp(-0,0005xt)$
Przewody stalowe w krakowskim PsDyW			
T_p [h]	453,13	444,19	1431,82
T_o [h]	26,05	29,05	47,41
T_n [h]	7,41	9,24	8,77
T_z [h]	18,64	19,81	38,64
ω [a ⁻¹ km ⁻¹]	0,292	0,342	0,028
μ [h ⁻¹]	0,038	0,034	0,021
$R(t)$	$\exp(-0,0022xt)$	$\exp(-0,0023xt)$	$\exp(-0,0011xt)$
Przewody stalowe we wrocławskim PsDyW			
T_p [h]	261,43	–	258,33
T_o [h]	124,25	–	5,33
T_n [h]	5,68	–	0,83
T_z [h]	118,57	–	4,50
ω [a ⁻¹ km ⁻¹]	0,362	–	0,093
μ [h ⁻¹]	0,008	–	0,188
$R(t)$	$\exp(-0,0038xt)$	–	$\exp(-0,0039xt)$

Dla każdego przewodu o określonej średnicy, wykonanego z konkretnego materiału, obliczono następujące realizacje zmiennych losowych w funkcji: czasu bezuszkodzeniowej pracy T_p [h], czasu odnowy T_o [h], czasu naprawy T_n [h] i czasu oczekiwania na naprawę T_z [h]. Dla stwierdzenia, czy uporządkowane próby dotyczą elementów jednorodnych, pochodzących z tej samej populacji, poddano je weryfikacji, wykorzystując test Kruskala-Wallisa. Weryfikacji hipotezy H_0 dokonano, przyjmując dzielnicę jako zmienną jednoznacznie identyfikującą przynależność prób do całkowitej populacji generalnej. Weryfikację postawionej

hipotezy H_0 , jak i wszelkie analizy statystyczne, przeprowadzono, wykorzystując procedury obliczeniowe pakietu programu komputerowego STATISTICA PL. Ponieważ nie wszystkie wyliczone statystyki H spełniają zależności $H < \chi^2_{(\alpha, v-1)}$, odrzucono hipotezę, iż dzielnica jest czynnikiem determinującym przynależność badanej próby do populacji generalnej. Nowe hipotezy H_0 , zakładające dla Krakowa rodzaj nawierzchni, w której posadowiony jest przewód, a dla Wrocławia wiek przewodu, jako czynniki określające przynależność badanej próby do zbiorowości generalnej poddano weryfikacji testem Kruskala-Wallisa. Tym razem wyniki testu spełniały warunki odniesione do wartości krytycznych $H < \chi^2_{(\alpha, v-1)}$. Nie było więc podstaw do odrzucenia założonej hipotezy na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$, że analizowane dane reprezentują populację generalną. Tak zweryfikowane zmienne losowe stanowiły materiał wyjściowy do wyznaczenia empirycznych charakterystyk niezawodności, których wielkości dla poszczególnych typów sieci zestawiono w tabeli 2.

Analiza uzyskanych dla PsDyW Krakowa wartości estymatorów średniego czasu bezawaryjnej pracy T_p dla przewodów stalowych wykazała, że średnia jego wartość dla przyłączy domowych wynosi 453,13 godzin. Natomiast w odniesieniu do wielkości średnic przyłączy domowych w zakresie wymiarów od Ø25 do Ø80 mm, czas pracy bezawaryjnej zawarty jest w przedziale od 239,66 do 1365,39 godzin. Dla sieci rozdzielczej średni czas pracy między kolejnymi uszkodzeniami osiągnął porównywalny poziom, jak w odniesieniu do przyłączy domowych na poziomie 444,19 godzin. Zakres zmienności czasu bezawaryjnej pracy stalowych przewodów sieci rozdzielczej dla średnic od Ø100 do Ø250 mm mieści się w przedziale 324,59–890,00 godzin. Krakowska stalowa sieć magistralna cechuje się długim czasem pracy bezawaryjnej wynoszącym aż 1431,82 godziny. Natomiast dla przewodów żeliwnych estymatory średniego czasu bezawaryjnej pracy wyniosły odpowiednio:

- dla przyłączy domowych 448,92 godzin, zakres występowania w przedziale od 191,30 godzin do 620,70 godzin dla średnic Ø25–Ø100 mm,
- dla sieci rozdzielczej 42,86 godzin, przy zmienności dla średnic Ø80–Ø300 mm w zakresie 86,27–430,56 godzin,
- dla sieci magistralnej 543,58 godzin, przyjmując wartości dla przewodów o średnicy Ø200–Ø600 mm z przedziału 492,86–669,23 godziny.

Natomiast w badaniach wrocławskiej sieci wodociągowej średnie wielkości czasu pracy bezawaryjnej oraz zakres zmienności wynosił odpowiednio:

- dla stalowych przyłączy domowych 216,43 godziny, zakres występowania w przedziale od 187,24 godziny do 50,00 godzin dla średnic Ø25–Ø50 mm,
- dla stalowej sieci magistralnej 258,33 godziny,
- dla żeliwnych przyłączy domowych 412,35 godziny, przyjmując wartości dla przewodów o średnicy Ø80–Ø100 mm z przedziału 321,05–419,44 godzin,
- dla żeliwnej sieci rozdzielczej 384,09 godzin, przy zmienności dla średnic Ø80–Ø300 mm w zakresie 87,00–1071,43 godzin,
- dla żeliwnej sieci magistralnej 1944,44,58 godzin, przyjmując wartości dla przewodów o średnicy Ø400–Ø800 mm z przedziału 1375,00–2833,33 godziny.

W wieloczynnikowej ocenie przyczyn awaryjności przewodu wodociągowego uwzględniono zarówno jego średnicę, jak również wiek oraz czas pracy bezuszkodzeniowej. Jednostkowy parametr strumienia uszkodzeń odniesiony do długości sieci wodociągowej jest wskaźnikiem, który najlepiej ilustruje zdolność sieci do niezawodnej pracy PsDyW, dlatego analizę regresji przeprowadzono dla tego parametru. Wykładnicza postać gęstości prawdopodobieństwa czasu pracy bezuszkodzeniowej przewodów pozwoliła wyznaczyć z formu-

ły 3 jednostkowy parametr strumienia uszkodzeń dla wszystkich analizowanych odcinków w odniesieniu do ich długości. Uzyskano w ten sposób nową zmienną losową ω' , dla której wynik testu Kołmogorowa-Smirnowa (K-S) na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ nie pozwolił na przyjęcie hipotezy zerowej H_0 o normalności rozkładu. W dalszych badaniach poddano weryfikacji nową hipotezę H_0 o normalności rozkładu dla transformowanej zmiennej losowej w postaci $\lg\left(\frac{\omega'}{\bar{\omega}'}\right)$, w której średnia jednostkowego parametru strumienia uszkodzeń $\bar{\omega}'$ dla krakowskiej i wrocławskiej sieci wodociągowej wynoszą odpowiednio: 0,037702 [uszk./rok·km] oraz 0,052007 [uszk./rok·km]. W tym przypadku wyniki testu K-S nie dały podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 , bowiem statystyka $\lambda(d)$ przyjęła wartość mniejszą od krytycznej: $\lambda(d) < \lambda_{kr}(d)$. Tak więc badania wykazały, iż rozkłady nowych zmiennych losowych dla rozważanych systemów nie odbiegają od normalnego, co pozwoliło na podstawie procedury regresji wielokrotnej wyznaczyć postać funkcyjną oceny niezawodności sieci wodociągowej. Analiza wyników regresji wykazała, że istotny wpływ na jednostkowy parametr strumienia uszkodzeń mają: średnica DN , czas eksploatacji przewodu, czyli jego wiek W oraz czas jego pracy bezuszkodzeniowej T_p . Statystyczna weryfikacja założeń metody regresji, co do normalności rozkładu reszt zarówno surowych, jak i standaryzowanych, potwierdza przyjęte założenia. Pozwoliło to wnioskować o poprawności uzyskanego modelu w postaci funkcyjnej:

– dla krakowskiej sieci wodociągowej

$$\log\left(\frac{\omega'}{\bar{\omega}'}\right) = -0,0211501 \cdot W - 0,002205 \cdot DN - 0,000607 \cdot T_p \quad (8)$$

– dla wrocławskiej sieci wodociągowej

$$\log\left(\frac{\omega'}{\bar{\omega}'}\right) = -0,002224 \cdot W - 0,007507 \cdot DN - 0,000469 \cdot T_p \quad (9)$$

Powyższe modele cechują się wysokimi współczynnikami korelacji dla modelu krakowskiego $R = 0,886636$ oraz współczynnik determinacji wynosi $R^2 = 0,76123$, natomiast nieznacznie gorszym dopasowaniem charakteryzuje się model wrocławski, dla którego współczynnik korelacji osiągnął wartość $R = 0,683619$ oraz $R^2 = 0,467336$.

5. Wnioski

Uzyskane pozytywne wyniki analizy awaryjności podsystemu dystrybucji wody dla wodociągu Krakowa i Wrocławia, opartej na kompleksowej metodzie oceny niezawodności sieci wodociągowej, pozwalają założyć, iż przedstawiona metodyka może być również szeroko stosowana do oceny innych układów dystrybucji wody.

Zalecane wielkości jednostkowego parametru strumienia uszkodzeń, akceptowane przez eksploatatora oraz użytkownika wodociągu, w odniesieniu do funkcji pełnionej przez przewód powinny spełniać poniższe kryteria:

- dla sieci magistralnej 0,3 uszk./km·a,
- dla sieci rozdzielczej 0,5 uszk./km·a,
- dla przyłączy wodociągowych 1,0 uszk./km·a.

W odniesieniu do powyższych kryteriów dla podsystemu dystrybucji wody Krakowa jedynie sieć rozdzielcza i przyłącza wykonane z żeliwa nieznacznie przekracza wartość zalecanego poziomu niezawodności. Natomiast w podsystemie dystrybucji wody Wrocławia jedynie sieć rozdzielcza wykonana z żeliwa nie spełnia zalecanego poziomu niezawodności.

Szerokie badania niezawodności pozwoliły określić postać funkcyjną prawdopodobieństwa pracy bezuszkodzeniowej w postaci $R(t) = \exp(-\omega \cdot t)$ oraz prawdopodobieństwa odnowy $R_o(t) = 1 - \exp(-\omega \cdot t)$, w których parametry strumienia uszkodzeń wynoszą odpowiednio:

dla Krakowa:

- przyłącza wodociągowe ze stali $\omega = 0,002207$ 1/h oraz żeliwa $\omega = 0,002228$ 1/h,
- sieć rozdzielcza ze stali $\omega = 0,002251$ 1/h oraz żeliwa $\omega = 0,023333$ 1/h,
- sieć magistralna ze stali $\omega = 0,000698$ 1/h oraz żeliwa $\omega = 0,00184$ 1/h,

dla Wrocławia:

- przyłącza wodociągowe ze stali $\omega = 0,003825$ 1/h oraz żeliwa $\omega = 0,002425$ 1/h,
- sieć rozdzielcza z żeliwa $\omega = 0,002604$ 1/h,
- sieć magistralna ze stali $\omega = 0,003871$ 1/h oraz żeliwa $\omega = 0,000514$ 1/h.

Jakościowa oraz ilościowa ocena negatywnych zdarzeń eksploatacji sieci wodociągowej pozwala na sprecyzowanie racjonalnych kierunków działań dla skutecznego i ekonomicznie uzasadnionego procesu zarządzania systemem zaopatrzenia w wodę. Dlatego też stosowanie zaprezentowanej analizy niezawodności pracy sieci wodociągowej, w odniesieniu do ich struktury technicznej, stanowi nie tylko wartość poznawczą aplikacji teorii niezawodności w branży wodociągowej, ale również istotną informację praktyczną dla racjonalnego zarządzania systemem zaopatrzenia w wodę.

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] Denczew S., Królikowski A., *Podstawy nowoczesnej eksploatacji układów wodociągowych i kanalizacyjnych*, Arkady, Warszawa 2003, 12-19.
- [2] Hotłoś H., *Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacji sieci wodociągowej*, rozprawa habilitacyjna, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2007.
- [3] Kirchsteiger CH., *Nonparametric estimation of time-dependent failure rates probabilistic risk assessment*, Reliability Engineering and System Safety, 44, 1994, 1-9.
- [4] Kwietniewski M., *Metody badań eksploatacyjnych sieci wodociągowych pod kątem niezawodności dostawy wody do odbiorców*, Prace Naukowe Inżynierii Środowiska z. 28, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [5] Kwietniewski M., Rak J., *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*, Studia z zakresu inżynierii, nr 67, PAN KILiW, Instytut Podstaw Problemów Techniki, Warszawa 2010.
- [6] Wiczysty A. et al., *Metody podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę*, Monografie KiS PAN, vol. 2, Kraków 2001.

- [7] Zimoch I., *Reliability analysis of water pipe-networks in Cracow, Poland*, Environmental Engineering III, Taylor&Francis Group, London UK 2010, 561-568.
- [8] Zimoch I., *The Cracow's water supply system operation in the aspect of water distribution subsystems failures*, Mat. Konf. „On Water observation and information system for decision support – Balwois”, Ohrid 2006, 160.
- [9] Bajer J., Przybinda A., *Czynniki wpływające na czas usuwania awarii przewodów wodociągowych i ich uzbrojenia*, GWiTS, 2005, 11, 20-22.
- [10] Budziło B., Kaczmarczyk S., *Analiza produkcji, sprzedaży i awarii podsystemu dystrybucji wody wodociągu w Rabce Zdroju*, Instal, 2008, 288(10), 88-92.
- [11] Hoffman Z., *Pipeline damage – service repair cost*, Water and Sewage Works, 1970, 2, 60-67.
- [12] Hotłoś H., *Wpływ wysokości ciśnienia na uszkodzalność i koszty napraw sieci wodociągowej*, Ochrona Środowiska 2001, 81 (2), 31-34.
- [13] O' Day D.K., *Organizing and analyzing break data for making water main replacement decisions*, Journal of AWWA 1982, 74 (11), 89-96.
- [14] Rak J., *Awaryjność sieci wodociągowej w miastach polskich*, Wodociągi Polskie, Biuletyn Informacyjny Izby Gospodarczej Wodociągi Polskie 2003, 3, 11-14.
- [15] Zimoch I., *The water distribution subsystem failures affects on Krakow's water supply system*, 9th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, Ottenstein 2005, 351-358.
- [16] Zimoch I., *Reliability analysis o water distribution subsystem*, Journal of KONBIN 2008, 7 (4), 307-316.
- [17] Pietrucha K., *Analiza czasu odnowy i naprawy podsystemu dystrybucji wody dla miasta Rzeszowa*, Instal, 2008, 288 (10), 113-115.
- [18] Pollard S.J.T., *Risk Management for Water and Wastewater Utilities*, IWA Publishing 2008, 11-19, 59-72.
- [19] PN-84/N-04041.05. *Niezawodność w technice. Zapewnienie niezawodności obiektów technicznych. Ogólne zasady badań*.
- [20] Zimoch I., *Opracowanie modelu niezawodności funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę (SZW) w aspekcie wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci wodociągowej*, Sprawozdanie końcowe z realizacji projektu badawczego: PB nr 5 T07E 044 25, materiały niepublikowane, Gliwice 2007.