

Izabela Zimoch, Monika Jamer, Barbara Binda

Eksploatacja systemu dystrybucji wody we Wrocławiu w aspekcie awaryjności sieci wodociągowej

Proces badania i analizy uszkodzalności systemu dystrybucji wody, a w konsekwencji powstałych skutków i strat, jest zagadnieniem trudnym do rozwiązania, wynikającym przede wszystkim z różnorodności i zmienności parametrów eksploatacyjnych, jak również czynników wpływających na jakość wykonywanych przez system zadań. Na przedsiębiorstwie wodociągowym, w myśl obowiązujących przepisów [1,2], spoczywa obowiązek ciągłej kontroli nie tylko ilości, ale i jakości dostarczanej wody oraz stanu technicznego eksploatowanych obiektów i urządzeń wodociągowych. Właściwą kontrolę osiągnąć można jedynie przez odpowiednie działania organizacyjne, badawcze, technologiczne i informacyjne prowadzone w sposób celowy i systematyczny, w dużym horyzoncie czasu. Pomocne w tym są już dziś liczne zastosowania teorii niezawodności w branży wodociągowej, powiązane z analizami techniczno-ekonomicznymi pracy systemu dystrybucji wody. Badania niezawodnościowe uznane są już za normę, pozwalająca w sposób racjonalny zarządzać infrastrukturą techniczną systemu wodociągowego, a także mogą być niezbędnym narzędziem decyzyjnym zarówno przy planowaniu inwestycji modernizacyjnych, jak i strategii rozwoju współczesnych przedsiębiorstw wodociągowych.

Badanie i ocena niezawodności systemu dystrybucji wody jest zagadnieniem złożonym, wymagającym rozważenia szerokiego zakresu zdarzeń losowych [3–5]. Wynika to przede wszystkim z wielofunkcyjności tego systemu, tj. dostarczania wody do odbiorców w wymaganej ilości i jakości, pod odpowiednim ciśnieniem i bez przerw. Obecnie, w sytuacji zmniejszonego rozbioru wody, badania niezawodnościowe przeprowadza się w szczególności po to, aby ocenić słabe punkty systemu dystrybucji wody, w których częstość występowania awarii oraz charakter ich skutków jest największy. Badania takie dają ponadto możliwość wytypowania tych obszarów układu, w których występuje potencjalne zagrożenie skażenia wody, na skutek zmian parametrów hydraulicznych pracy sieci, wynikających między innymi z braku stabilności rozbioru wody w systemie czy też zwiększonej awaryjności sieci.

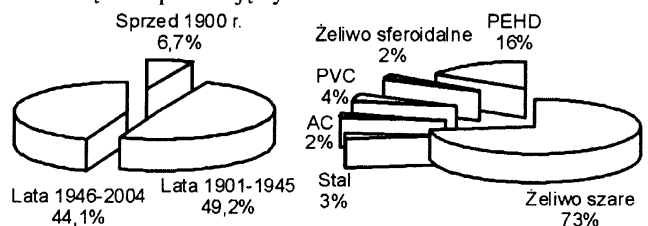
Mała niezawodność i występujące w związku z tym awarie mogą prowadzić do przerwania dostawy wody do konsumentów i innych użytkowników systemu. Jakościowa oraz liczbowo-ocena negatywnych zdarzeń pozwala na sprecyzowanie wniosków i podjęcie działań technicznych mających na celu ich eliminację, w celu polepszenia warunków eksploatacji

systemu. Stąd też stosowane oceny niezawodności pracy systemu wodociągowego, w odniesieniu nie tylko do jego struktury technicznej, ale również uwzględniające jakość wody, stanowią istotną informację niezbędną do efektywnego zarządzania systemem zaopatrzenia w wodę.

System dystrybucji wody we Wrocławiu

Obecny system dystrybucji wody we Wrocławiu, budowany przez wielecia, to złożona sieć wodociągowa stanowiąca w większości układ pierścieniowy, z niewielką częścią sieci promienistej. Całkowita długość sieci wodociągowej (na koniec 2004 r.) na terenie obsługiwanym przez MPWiK we Wrocławiu wynosi 1790,4 km. Dostarcza ona wodę zarówno bezpośrednio do mieszkańców Wrocławia, jak i mieszkańcom sąsiadujących gmin (Św. Katarzyna, Oława i Długołęka). Rozległy system dystrybucji wody tworzy sieć magistralna składająca się z przewodów o średnicy 400÷1400 mm, o łącznej długości 200,99 km, stanowiąca 11,2% długości całego systemu dystrybucji. Największy udział w długości systemu rurowości przypada na przewody sieci rozdzielczej (66,4%), obejmującej 1192,19 km rurowości o średnicach 80÷300 mm. Ostatnim elementem liniowym systemu dystrybucji wody we Wrocławiu jest ponad 30 tys. przyłączy domowych, o całkowitej długości 397,23 km i średnicach 25÷250 mm (22,2% długości sieci).

Ze względu na ponad 130-letnią eksploatację sieci wodociągowej, charakteryzuje się ona istotnym zróżnicowaniem wiekowym i materiałowym (rys. 1.). Są jeszcze w mieście rurowości żeliwne z ostatniej dekady XIX w. (budowane w latach 1892–1895) o długości 93 km, dostarczające wodę do mieszkańców Starego Miasta i Śródmieścia. Zdecydowanie największy udział w systemie mają przewody z żeliwa, stanowiące 72,8% całkowitej długości sieci. Ponadto przewody z tworzyw sztucznych stanowią ponad 16% długości systemu, obejmując głównie sieć rozdzielczą oraz przyłącza domowe. Integralną częścią budującą sieć wodociągową jest wszelkiego rodzaju uzbrojenie, ułatwiające obsługę, kontrolę i eksploatację systemu.



Rys. 1. Struktura wiekowa i materiałowa przewodów sieci wodociągowej we Wrocławiu

W obrębie wrocławskiego systemu dystrybucji wody znajdują się ponadto dwie strefowe hydrofarmy, mające za zadanie lokalne podnoszenie ciśnienia w rejonie osiedla Gaj, oraz pompownia przy ul. Bystrzyckiej, w zasięgu której znajduje się wysoka zabudowa osiedli Nowy Dwór, Muchobór Mały, Gądów-Lotnisko i Kozanów. Ze względu na rozległość systemu i w celu zapewnienia wody bezpiecznej pod względem bakteriologicznym w każdych warunkach eksploatacji, na przewodach magistralnych tłoczących wodę do północno-wschodnich, północno-zachodnich oraz zachodnich dzielnic Wrocławia zainstalowano cztery stacje dawkowania podchlorynu sodu.

Analiza niezawodnościowa systemu dystrybucji wody we Wrocławiu

Większość obiektów i urządzeń tworzących system zaopatrzenia w wodę zliczana jest do tzw. elementów odnawialnych, czyli podlegających procesowi pracy i odnowy. Ustalenie warunków eksploatacyjnych, określonych jako stany niezawodnościowe, stanowi podstawę doboru i oszacowania odpowiednich wskaźników niezawodności tych obiektów. Wyróżnia się dwa podstawowe stany niezawodnościowe:

- stan pracy, czyli całkowitej zdatności,
- stan częściowej lub całkowitej niezdatności.

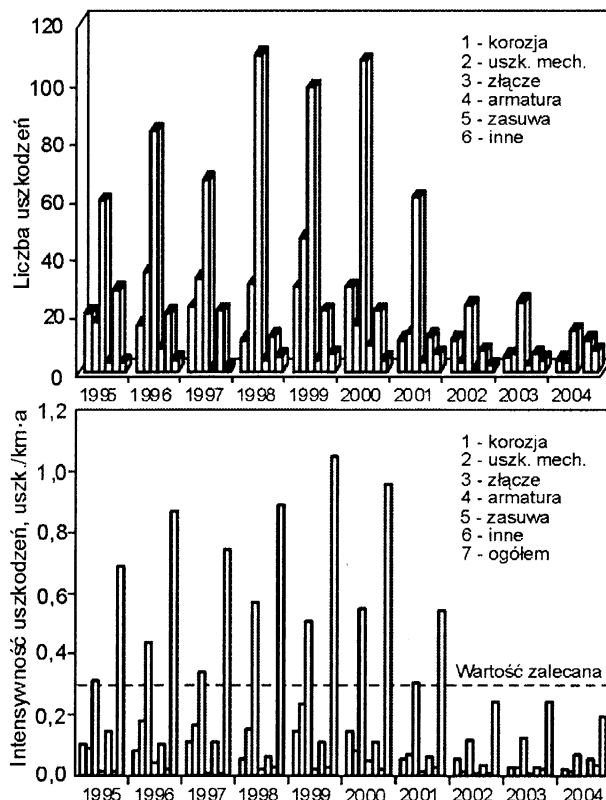
Uwzględniając stany eksploatacyjne oraz specyfikę obiektów i urządzeń wodociągowych, w analizie niezawodności funkcjonowania systemu dystrybucji wody określa się najczęściej następujące wskaźniki:

- K_g – wskaźnik gotowości, –
- ω – strumień uszkodzeń, $1/d$
- λ – intensywność uszkodzeń elementów liniowych, $uszk./km \cdot a$
- T_p – średni czas pracy między uszkodzeniami, d
- T_o – średni czas niesprawności, h
- μ – intensywność odnowy, $1/h$
- $R(t)$ – prawdopodobieństwo pracy elementu, –

Praktyczne wykorzystanie tych wskaźników w ocenie niezawodnościowej funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę opiera się na niezbędnych informacjach uzyskanych z eksploatacji wodociągu. Materiałami źródłowymi są protokoły awarii, karty awaryjne, książki eksploatacji, książki pracy maszyn, dzienniki zgłoszeń pogotowia interwencyjnego, rejestry awarii itp. Dokumentacja ta winna obejmować takie dane, jak data i godzina wystąpienia awarii, naprawy, remontu itp., czas jej trwania, opis zdarzenia obejmujący rodzaj uszkodzenia oraz skutki awarii dla podsystemu lub całego systemu. Niestety, nie zawsze informacje uzyskane z eksploatacji są wyczerpujące, co znacznie utrudnia prowadzenie pełnych analiz. Ponadto nie są one prowadzone systematycznie i czasem pozwalają jedynie na stwierdzenie faktu wystąpienia awarii, nie zawierając żadnych danych liczbowych umożliwiających wyznaczenie wartości odpowiednich wskaźników.

Wrocławski system dystrybucji wody jest układem dużym, rozległym, o skomplikowanej topologii i zróżnicowanym uzbrojeniu. Stosunkowo częste awarie sieci wodociągowej są wynikiem wieloletniej eksploatacji rurociągów oraz nierzadko niskiej jakości materiałów, z jakich wykonywane były elementy sieci w okresie powojennym, a w szczególności w latach 70. ubiegłego stulecia. Również powódź w 1997 r. spowodowała zwiększoną awaryjność sieci. W ciągu roku MPWiK we Wrocławiu odnotowuje przeciętnie 1500 awarii sieci, z czego około 10% przypada na uszkodzenia przewodów magistralnych. Awarie te dotyczą głównie uszkodzeń

korpusu rury, złączy, kompensatorów lub uzbrojenia. Objawiają się one w postaci pęknięcia podłużnego, wyrwania płata rurociągu, wypchnięcia uszczelnienia, uszkodzenia mechanicznego lub korozji. Rysunek 2 przedstawia graficzną interpretację awarii wodociągowych w funkcji rodzaju uszkodzenia w latach 1995–2004.



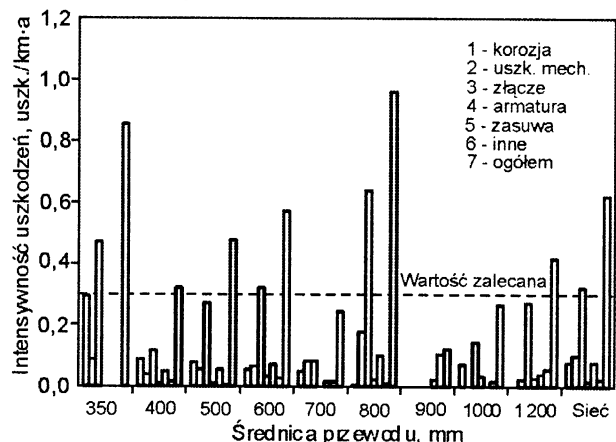
Rys. 2. Awaryjność sieci magistralnej w funkcji rodzaju uszkodzenia

Przeprowadzona analiza wykazała, że najczęściej występują uszkodzenia na złączach, które stanowią blisko 60% wszystkich interwencji brygad remontowo-naprawczych wrocławskiego MPWiK w ciągu roku. Średnia intensywność uszkodzeń sieci magistralnej w funkcji awarii złączy wynosi 0,333 uszk./km·a. Sprawnie funkcjonujące zespoły Pogotowia Wodociągowego podnoszą niezawodność działania systemu wodociągowego w wyniku minimalizacji czasu niesprawności uszkodzonych elementów. Sprawna interwencja objawia się również zmniejszeniem skutków występujących oraz ryzyka, jakie ponosi przedsiębiorstwo eksploatując tak rozległy i złożony system dystrybucji wody. Ponadto wdrożony w przedsiębiorstwie od 2001 r. nowy system usuwania i rejestracji awarii przyniósł oczekiwane efekty obniżenia awaryjności sieci magistralnej (rys. 2).

Podstawową ideą nowego systemu napraw jest nie tylko przeprowadzenie likwidacji zaistniałego losowo uszkodzenia, ale równocześnie dokonanie przeglądu i oceny stanu technicznego systemu, co pozwala na jednoczesne podejmowanie innych profilaktycznych działań remontowych. Taki system interwencji i remontów prowadzony przez służby techniczne przyczynił się już w pierwszym roku wdrożenia do obniżenia średniego poziomu intensywności uszkodzeń sieci magistralnej do wartości 0,150 uszk./km·a, stanowiącej 50% wartości zalecanej dla sieci magistralnej (0,3 uszk./km·a). Istotny udział w awaryjności sieci stanowią również te niesprawności systemu, które wynikają z mechanicznych uszkodzeń przewodów wodociągowych. Największą liczbę uszkodzeń

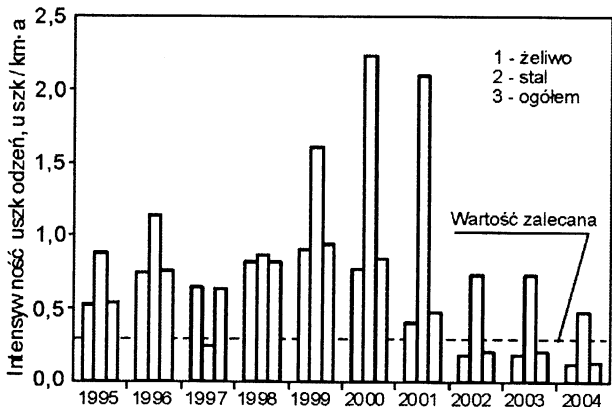
mechanicznych, obejmującą 46 zakłóceń technicznych w prawidłowym funkcjonowaniu sieci magistralnej, w czasie badań przeprowadzonych w latach 1995–2004 odnotowano w 1999 r., kiedy intensywność uszkodzeń rurociągów magistralnych w funkcji uszkodzeń mechanicznych wynosiła 0,236 uszk./km-a. Największą awaryjnością (1,047 uszk./km-a) charakteryzowała się wrocławska sieć magistralna w 1999 r. Przeprowadzone analizy wykazały ponadto, że średnia intensywność uszkodzeń sieci magistralnej wynosiła 0,639 uszk./km-a, a począwszy od 2002 r. osiągnęła poziom poniżej granicy awaryjności, tj. 0,3 uszk./km-a, zalecanej w rozwiniętych krajach europejskich.

Analizując proces uszkodzeń sieci magistralnej w funkcji średnicy przewodów można jednoznacznie stwierdzić, że największą intensywnością uszkodzeń charakteryzują się przewody o średnicy 800 mm i 350 mm (rys. 3). W okresie prowadzonych badań średnia intensywność uszkodzeń dla magistralnych przewodów o średnicy 800 mm osiągnęła wartość 0,962 uszk./km-a, a dla rurociągów o średnicy 350 mm – 0,855 uszk./km-a. Przyczyną najczęściej występujących awarii, w odniesieniu do średnicy rurociągu, były również uszkodzenia złączy, stanowiące 67% i 55%, odpowiednio dla przewodów o średnicy 800 mm i 350 mm.



Rys. 3. Intensywność uszkodzeń sieci magistralnej w funkcji średnicy rurociągu

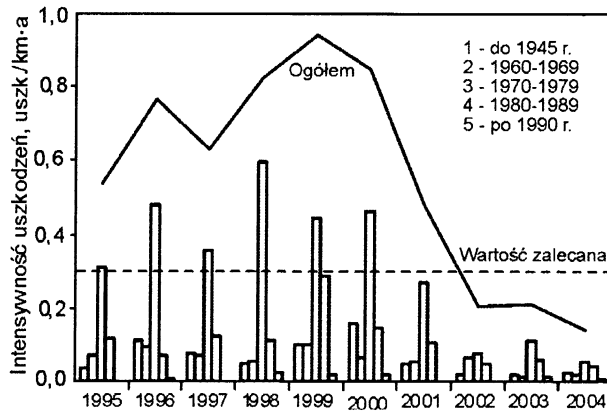
Największy udział w uszkodzalności badanych obiektów mają przewody stalowe (rys. 4), dla których średnia intensywność uszkodzeń osiągnęła wartość 1,105 uszk./kma, przekraczając blisko 2-krotnie przeciętną wartość dla sieci magistralnej. Średnia roczna liczba awarii przewodów stalowych jest niewielka, bo stanowi zaledwie 9 uszkodzeń w ciągu roku, jednak ze względu na niewielki ich udział w budowie sieci magistralnej (3%) odnotowano w 2000 r. wysoki poziom



Rys. 4. Intensywność uszkodzeń sieci magistralnej w funkcji rodzaju materiału

zawodności, charakteryzujący się intensywnością uszkodzeń równą 2,225 uszk./km-a. Przyczyną tak wysokiego poziomu uszkodzalności sieci stalowej był postępujący proces korozji, szczególnie widoczny dla przewodów wybudowanych w latach 1970–1980. Dla żeliwnych przewodów magistralnych średnia intensywność uszkodzeń wynosiła 0,530 uszk./km-a. Największą liczbę awarii (170) odnotowano incydentalnie dla żeliwnej sieci magistralnej w 1999 r., kiedy wskaźnik awaryjności osiągnął wartość 0,910 uszk./km-a. O niezawodności przewodów żeliwnych decydują głównie uszkodzenia złączy, których w okresie analizy odnotowano 633. We wrocławskim systemie dystrybucji wody przewody żeliwne są stare, z dobiegającym końca okresem trwałości technicznej (55% przewodów ma powyżej 55 lat). Większość z nich była łączona na kielichy uszczelniane tradycyjnie sznurem i folią aluminiową, których intensywność uszkodzeń jest wyższa od połączeń z zastosowaniem nowoczesnych technologii. Rurociągi żeliwne łącznie stanowią około 72% długości wrocławskiej sieci magistralnej, a tak częste awarie sprawiają, że przewody te powodują największe trudności eksploatacyjne.

Przeprowadzone badania objęły również analizy wpływu czasu eksploatacji sieci na jej awaryjność (rys. 5). Stwierdzono, że największą awaryjność miały przewody oddane do eksploatacji w latach 70. ubiegłego stulecia, dla których średnia intensywność uszkodzeń osiągnęła 0,316 uszk./km-a, podczas gdy maksymalna wartość tego parametru wystąpiła w 1998 r. i wynosiła 0,597 uszk./km-a. Najmniejszą podatność na uszkodzenia mają przewody o najdłuższym czasie eksploatacji, tj. wybudowane przed 1945 r., dla których średnia intensywność uszkodzeń wynosi 0,064 uszk./km-a. Średnia liczba awarii dla tych rurociągów w ciągu roku wynosi 12, co stanowi zaledwie 20% liczby odnotowanych awarii dla przewodów eksploatowanych 35+25 lat.



Rys. 5. Intensywność uszkodzeń sieci magistralnej w funkcji wieku przewodu

Przeprowadzając analizę dynamiki i charakteru zmian niesprawności sieci (rys. 2 i 5, tab. 1) jednoznacznie można stwierdzić, że średnią wartość intensywności uszkodzeń, w okresie prowadzenia badań, kształtowała w dużej mierze awaryjność systemu w latach 1996–2000. Po wdrożeniu w 2001 r. systemu zarządzania siecią intensywność uszkodzeń stalowej magistralnej sieci zmalała aż o 63% w ciągu zaledwie 4 lat. Efekt wdrożonego systemu (wraz z bazą danych „Awarie”) osiągnął zamierzony cel, tj. zmniejszenie uszkodzalności sieci wodociągowej, gdyż w 2004 r. intensywność uszkodzeń sieci magistralnej osiągnęła wartość 0,194 uszk./km-a, spełniając tym samym standardy europejskie. Należy podkreślić, że tak duży stopień ograniczenia liczby awarii jest efektem wprowadzonej przez MPWiK we Wrocławiu definicji odnotowanych

Tabela 1. Wartości wskaźników niezawodności sieci magistralnej we Wrocławiu

Wskaźnik niezawodności, jednostka	Sieć zbudowana przed 1969 r.	Sieć zbudowana w latach 1970–1989	Sieć zbudowana po 1990 r.
Średnia intensywność uszkodzeń, uszk./km·a	0,123046	0,424739	0,007199
Średni czas pracy, d	14,76	4,28	251,94
Średni czas niesprawności*, h	12,44	12,44	12,44
Średnia intensywność naprawy, 1/h	0,08	0,08	0,08
Wskaźnik gotowości,–	0,96607396	0,89197638	0,99794686
Prawdopodobieństwo pracy,–	exp(0,06776t)	exp(0,23389t)	exp(0,00396t)

* wg [5]

awarii, obejmującej jedynie zdarzenia wymagające podjęcia prac naprawczych na wyłączonym z eksploatacji fragmencie sieci magistralnej. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry sieci magistralnej, w odniesieniu do okresu eksploatacji poszczególnych przewodów.

Wnioski

♦ Uszkodzalność stalowej sieci magistralnej była ponaddwukrotnie wyższa (1,105 uszk./km·a) od intensywności uszkodzeń żeliwnej sieci magistralnej (0,530 uszk./km·a), której średnia wartość dla całego okresu analizy przekraczała zalecany poziom około 1,5-krotnie, szczególnie w okresie po powodzi w 1997 r. Od 2001 r., w efekcie wprowadzenia zasad racjonalnego zarządzania systemem dystrybucji wody, nastąpiło zmniejszenie liczby awarii przewodów magistralnych, w rezultacie czego intensywność uszkodzeń sieci osiągnęła standardy europejskie na średnim poziomie 0,255 uszk./km·a.

♦ Za najbardziej odpowiednie pod względem niezawodności we wrocławskim systemie dystrybucji wody należy uznać przewody o czasie eksploatacji poniżej 15 lat. Wynika to przede wszystkim z faktu stosowania lepszych materiałów do budowy sieci, takich jak żeliwo sferoidalne, charakteryzujące się większą odpornością na procesy korozyjne (liczba awarii zmalała o 62% w odniesieniu do uszkodzeń odnotowywanych w latach 1995–2000) oraz mniejszą podatnością na uszkodzenia mechaniczne. Ponadto stosowanie nowych technologii połączeń przyniosło blisko 3-krotne obniżenie awaryjności sieci. Średnia liczba niesprawności w funkcji uszkodzeń złączy w latach 2001–2004 wynosiła 30 w ciągu roku, powodując

średnią intensywność uszkodzeń sieci magistralnej na poziomie 0,150 uszk./km·a.

♦ Pomimo wysokiej intensywności uszkodzeń, wrocławska sieć wodociągowa charakteryzowała się dużą gotowością do pracy. Stacjonarny wskaźnik gotowości dla przewodów sieci magistralnej wybudowanych do 1969 r. wynosi 0,96607396, natomiast dla sieci eksploatowanej poniżej 15 lat – 0,99794686. Jedynie dla przewodów magistralnych oddanych do eksploatacji w latach 1970–1989 parametr ten osiągnął wartość 0,89197638, co wynikało z niewłaściwej jakości materiałów stosowanych w tym czasie do budowy sieci wodociągowych (mała odporność na korozję, niewłaściwa technologia wykonawstwa itp.) w skali całego kraju.

♦ Niezawodność działania systemu dystrybucji wody podnoszą sprawnie działające zespoły Pogotowia Wodociągowego, na skutek minimalizacji czasu niesprawności jego uszkodzonych elementów. Sprawna interwencja objawia się również zmniejszeniem skutków występujących awarii, jak i ryzyka, jakie ponosi przedsiębiorstwo eksploatując tak rozległy i złożony system wodociągowy. Prowadzone systematycznie z roku na rok remonty powodują istotną poprawę parametrów niezawodności całego systemu, pozwalając przedsiębiorstwu wodociągowemu na sukcesywne osiąganie standardów europejskich w zarządzaniu systemem dystrybucji wody we Wrocławiu.

Niniejszą pracę wykonano w ramach projektu badawczego KBN 5T07E 044 25 pt. Opracowanie modelu niezawodności funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę (SZW) w aspekcie wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci wodociągowej.

LITERATURA

1. Ustawa z 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków. Dz. U. nr 72, poz. 747, wraz z późniejszymi zmianami.
2. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 19 listopada 2002 r. w sprawie wymagań dotyczących jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz. U. nr 203, poz. 1718.
3. I. ZIMOCH, B. BINDA: Eksploatacja wodociągu wrocławskiego w aspekcie niezawodności zakładów uzdatniania wody. *Ochrona Środowiska*, 2003, nr 3, ss. 35–39.
4. H. HOTŁOŚ: Analiza kosztów naprawy uszkodzeń przewodów wodociągowych we Wrocławiu. *Ochrona Środowiska*, 2005, nr 2, ss. 37–43.
5. A. WIECZYSTY i in.: Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę. Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Kraków 2001.

Zimoch, I., Jamer, M., Binda, B. Analysis of the Water Distribution System for the City of Wrocław in Terms of the Rate of Pipe Failure. *Ochrona Środowiska* 2005, Vol. 27, No. 3, pp. 65–68.

Abstract: The structure and service conditions of Wrocław's water distribution system were analyzed for the purpose of reliability assessment. The study involved a large database providing information on the occurrence of failure over the service period of 1995 to 2004. The reliability assessing procedure included the determination of the following basic parameters: rate of damage, average time of failure-free service and average time of damage repair. The failure rate of the water distribution system was related to the pipe diameter and to the material of which the pipe was made. The causes and effects of

water-pipe network damage were analyzed. Reliability analysis also included assessments of how the repair work carried out by specialized companies influenced the rise in the reliability level concerning a failure-free service of, and a reliable water supply by, the investigated water distribution system. It was found that the damageability of the steel-made main conduit was more than twice as high as that of the cast-iron main conduit whose average value exceeded about 1.5-fold the recommended level over the entire period of analysis. Since 2001 (following the implementation of a rational management of the water distribution system), the rate of main conduit failure has been decreasing and has almost reached relevant European standards.

Keywords: Reliability, water distribution system, failure rate.