

Izabela Zimoch

Niezawodnościowa interpretacja wyników monitoringu jakości wody w sieci wodociągowej

Przyjęcie w 2002 r. do ustawodawstwa polskiego surowych norm prawa unijnego (dyrektywa Rady 98/83/EC), dotyczącego jakości wody przeznaczonej do spożycia, było przyczyną licznych zmian legislacyjnych obejmujących m.in. obecną wersję rozporządzenia Ministra Zdrowia z 29 marca 2007 r. (DzU nr 61, poz. 417). Zmiany sięgnęły również ustawy z 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (tekst jednolity z 2006 r., DzU nr 123, poz. 858), która na przedsiębiorstwa wodociągowe nałożyła obowiązek niezawodnego dostarczenia wody do jej bezpośrednich odbiorców. W efekcie tych zmian zwiększono nadzór nad jakością wody wodociągowej w Polsce powierzając Państwowej Inspekcji Sanitarnej nadzór nad monitoringiem jakości sanitarnej wody, kierując się zasadą, że powinien to być organ na szczeblu krajowym, powołany do kontroli przestrzegania wymagań prawnych i norm oraz działający niezależnie od interesów dostawcy wody. Nadzór nad jakością wody, zarówno przez przedsiębiorstwa wodociągowe, jak i organy nadzorujące często jest jeszcze traktowany jedynie jako badanie czysto laboratoryjne pobranych próbek. Jednak zgodnie z założeniami, monitoring podsystemu dystrybucji wody to proces znacznie bardziej złożony, stanowiący zespół działań obejmujących planowanie oraz sposób pomiarów, analiz i ocen stanu działania sieci wodociągowej w zakresie hydraulicznym, jakościowym i technicznym. Jakkolwiek planowanie, pobór i badanie próbek wody można uznać za elementy systemu monitoringu w dużym stopniu zorganizowane w skali kraju, to analiza – a co za tym idzie – ocena stanu funkcjonowania sieci wodociągowej w ujęciu jakości transportowanej wody stanowi najsłabsze ogniwo procesu kontroli. Jest to konsekwencją przede wszystkim braku odpowiedniej metodyki analiz dającej szeroki zakres oceny poziomu świadczonych usług przez przedsiębiorstwa wodociągowe.

Wieloaspektowe podejście do realizacji procesu monitoringu sieci wodociągowej wynika ze ścisłych powiązań czynników kształtujących dystrybucję wody. Do prawidłowego prowadzenia monitoringu sieci niezbędne jest opracowanie zasad typowania strategicznych i reprezentatywnych punktów pomiarowych, pozwalających na uzyskanie istotnych i wiarygodnych informacji o procesach i zagrożeniach pojawiających się w czasie transportu wody w systemie wodociągowym. Opracowane reguły wyboru

punktów pomiarowych i przeprowadzenie badań zarówno w zakresie monitoringu kontrolnego, jak i przeglądowego nie zamyka zakresu zadań wynikających z realizacji celów Ramowej Dyrektywy Wodnej i polskich rozporządzeń dotyczących ochrony zdrowia odbiorców wody. Najczęściej ocena jakości wody uzyskana w monitoringu sprowadza się jedynie do stwierdzenia faktu przekroczeń wartości największych dopuszczalnych stężeń, co często jest podstawą nie zawsze w pełni uzasadnionego warunkowego dopuszczenia do eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę lub w skrajnych przypadkach wstrzymania dostawy wody.

Wiedza na temat jakości spożywanej wody, jak również odpowiedzialne proceduralne jej wykorzystanie ma istotne znaczenie w zakresie zapewnienia i zwiększania bezpieczeństwa zdrowotnego odbiorców wody. Woda budząca niepokój konsumenta może być pierwszym wskaźnikiem jej nieprzydatności do spożycia. Należy jednak pamiętać, że odbiorcy wody oceniają ją głównie w oparciu o indywidualne odczucia odniesione do jej zapachu, smaku czy barwy, które nie zawsze są oczywistą podstawą dyskwalifikacji wody. Nierzadko taka ocena stanowi kryterium roszczenia prawa do bonifikat, a w skrajnym przypadku zwrotu kosztów opłat za dostawę wody. Żądania te nie zawsze są w pełni uzasadnione, a w każdym przypadku pociągają skutki finansowe oraz są przyczyną kreowania fałszywego wizerunku przedsiębiorstwa wodociągowego.

Obecne uwarunkowania działalności gospodarczej przedsiębiorstw wodociągowych wymuszają racjonalny i skuteczny proces wewnętrznej kontroli jakości wody, którego wyniki pozwalają ocenić poziom usług świadczonych przez przedsiębiorstwo. Ponieważ realizacja monitoringu to proces znacznie zwiększający koszty eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę, dlatego strategię kontroli jakości wody muszą uwzględniać zmienne warunki eksploatacji systemu wodociągowego, a przede wszystkim obejmować szeroką analizę uzyskanych wyników. Jedynie takie podejście daje możliwość osiągnięcia kompromisu pomiędzy niezbędnymi kosztami a wysokim poziomem kontroli ryzyka zmian jakości wody w sieci wodociągowej i w konsekwencji może ograniczyć ryzyko dostawcy wody wynikające z realizacji świadczonych usług, a tym samym zwiększyć bezpieczeństwo zdrowotne odbiorców wody.

Obecny poziom rozwoju teorii niezawodności w ocenie jakości pracy różnych systemów technicznych, wspomagany symulacjami i analizami komputerowymi, daje możliwość opracowania metodyki analizy działania systemów wodociągowych uwzględniającej zmienną jakość wody transportowanej do odbiorców.

Metodyka analizy niezawodności jakości wody w sieci wodociągowej

Wśród najczęściej stosowanych metod statystycznej kontroli jakości istotną rolę odgrywają tzw. karty jakości Shewharta. Karty te są powszechnym narzędziem kontrolowania zarówno procesów oczyszczania, jak i dystrybucji wody, mającym na celu wykrywanie przyczyn niestabilności lub zmienności wskaźników technologicznych oraz parametrów jakościowych. Istotą kart jakości jest analiza zmienności zdefiniowanego estymatora w czasie. Najczęściej badane są takie parametry kontrolne, jak wartość średnia z próbki (\bar{x}_{sr}), zakres zmienności (rozstęp) (R), czy odchylenie standardowe (SD). Procedury analityczne kart uwzględniają dodatkowo graniczne linie kontrolne, takie jak LK – linia kontrolna (wyznaczająca obszar, w którym mieści się 99,7% wartości badanego parametru) oraz LO – linia ostrzegawcza (obszar obejmujący 95% wartości parametru), które pozwalają na graficzną interpretację jakościową realizowanego procesu. Dokonując analizy procesu w oparciu o karty jakości należy pamiętać, że dają one jedynie statystyczną ocenę jego realizacji. Bardziej wnikliwym narzędziem badań zmian jakości dostarczanej wody jest analiza niezawodności dystrybucji wody o wymaganej jakości.

Wyniki badań [1–15] w zakresie metod oceny niezawodności eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę w funkcji jakości dostarczanej wody wskazują, że w metodach tych jakość wody jest rozważana jako funkcja losowa, określająca zespół cech chemicznych, fizycznych i bakteriologicznych. Funkcja ta przedstawia zmienność wybranych wskaźników jakości w odniesieniu do wartości stężeń dopuszczalnych określonych w obowiązujących aktach prawnych, dotyczących jakości wody przeznaczonej do spożycia. Najczęściej interpretacja matematyczna zmienności jakości wody przedstawiana jest w postaci dystrybuanty procentowego przekroczenia najwyższych dopuszczalnych stężeń [1,10,15]. Podstawą tych analiz jest przyjęcie założenia, że rozkład prawdopodobieństwa dyskretnej zmiennej losowej, będącej liczbą stanów niezgodności jakości wody z obowiązującymi normatywami, jest rozkładem Poissona opisywanym formułą matematyczną w postaci:

$$P(LNZ=k) = \frac{(INZt)^k}{k!} e^{-INZt} \quad (1)$$

w której:

$P(LNZ=k)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia dokładnie k przekroczeń wartości najwyższego dopuszczalnego stężenia w czasie t

LNZ – liczba zaistniałych stanów niezgodności jakości wody z obowiązującymi standardami

INZ – intensywność występowania nieodpowiedniej jakości wody w czasie prowadzenia monitoringu $<0,t>$, $1/d$

t – czas prowadzonej analizy, d

$k=0, 1, 2, 3, \dots, n$

Zakres prezentowanej metodyki oceny niezawodności dystrybucji wody o wymaganej jakości [7,15,16] daje szeroki obraz przebiegu procesu transportu wody poprzez wyznaczenie obszernej gamy wskaźników wyrażonych wzorami:

– intensywność występowania nieodpowiedniej jakości wody:

$$INZ = \frac{LNZ}{t} \quad (2)$$

– intensywność występowania wody o wymaganej jakości:

$$IZ = \frac{LZ}{t} \quad (3)$$

– średni czas trwania nieodpowiedniej jakości wody:

$$TNZ_{sr} = \frac{1}{LNZ} \sum_{i=1}^{LNZ} TNZ_i \quad (4)$$

– średni czas trwania wymaganej jakości wody:

$$TZ_{sr} = \frac{1}{LZ} \sum_{i=1}^{LZ} TZ_i \quad (5)$$

– prawdopodobieństwo dystrybucji wody o wymaganej jakości:

$$P_j(t) = e^{-(INZt)} \quad (6)$$

– wskaźnik gotowości dostawy wody o wymaganej jakości:

$$K_j = \frac{TZ_{sr}}{TZ_{sr} + TNZ_{sr}} \quad (7)$$

– wskaźnik skuteczności dostawy wody o wymaganej jakości:

$$P_{jv} = \frac{VZ(t)}{V_c(t)} \quad (8)$$

w których:

TNZ_i, TZ_i – i -ty czas trwania dystrybucji wody, odpowiednio niezgodnej i zgodnej z wymaganymi standardami jakości w czasie prowadzonej analizy, d

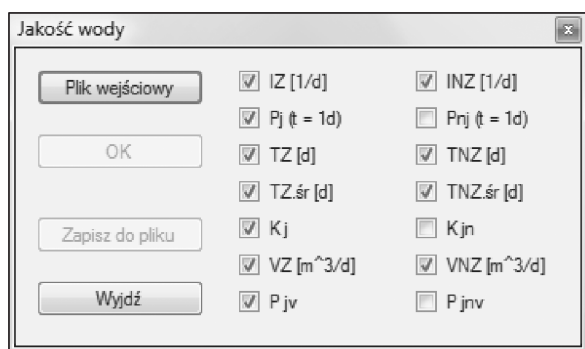
$VZ(t)$ – objętość wody w stanach zgodności w punkcie pomiarowym w czasie prowadzonych badań, m^3

$V_c(t)$ – całkowita objętość wody w czasie badań, m^3

W ramach realizacji projektu badawczego [16], w oparciu o przedstawione formuły matematyczne, został opracowany algorytm i program komputerowy Jakość Wody, stanowiący narzędzie analityczne w ocenie niezawodności dystrybucji wody o wymaganej jakości. Procedury obliczeniowe programu Jakość Wody odwołują się do danych pochodzących z jakościowego monitoringu podsystemu dystrybucji wody, stanowiących podstawę do wyznaczenia liczby stanów zgodności (LZ) oraz niezgodności (LNZ) poszczególnych parametrów jakościowych w każdym punkcie pomiarowym. Klasyfikacja stanów jakości w poszczególnych punktach monitoringu w odniesieniu do najwyższego dopuszczalnego stężenia danego wskaźnika jest podstawą do wyznaczenia poszczególnych parametrów analizy. Końcowym wynikiem badań niezawodności systemu wodociągowego, opartych na opracowanym modelu obliczeniowym Jakość Wody, jest wyznaczenie podstawowych wskaźników niezawodności zarówno całego podsystemu dystrybucji wody i wszystkich monitorowanych wskaźników łącznie, jak i wyselekcjonowanych wskaźników jakościowych, takich jak mętność, żelazo ogólne czy THM. Ponadto program umożliwił przeprowadzenie analizy w wytypowanych punktach monitoringu w pełnym zakresie badanych wskaźników, a także uwzględniając tylko wybrane wskaźniki jakościowe.

W celu wywołania procedury obliczeniowej programu Jakość Wody należy wybrać funkcję Plik Wejściowy, która pozwala na import danych pochodzących z monitoringu jakości wody. Po wybraniu bazy danych i dokonaniu obliczeń, użytkownik programu może dokonać wyboru

wskaźników niezawodności (rys. 1), które będą edytowane do pliku wynikowego, opracowanego w postaci tablicy arkusza programu Excel lub Word.



Rys. 1. Okno programu Jakość Wody [16]
Fig. 1. Window of the Water Quality Program used [16]

Podstawą ostatecznej oceny jest odniesienie uzyskanych wyników do wartości kryterialnych niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości, gwarantujących bezpieczeństwo eksploatacji systemu wodociągowego, w tym odbiorcy wody. Sformułowanie kryteriów niezawodności dostawy wody o odpowiedniej jakości wymaga uwzględnienia zarówno interesów społeczeństwa, jak i bezpieczeństwa zdrowotnego indywidualnych odbiorców wody. W literaturze przedmiotu brak jest jednoznacznych wartości kryterialnych. Za podstawę oceny niezawodności systemu wodociągowego w pracy [7] przyjęto wskaźnik gotowości (K_j) dostawy wody o wymaganej jakości, w postaci funkcyjnej odniesionej do obciążenia hydraulicznego danego punktu pomiarowego ($Q_{\text{śrdm}}$):

$$K_{j-Kr} = 0,003 \ln(Q_{\text{śrdm}}) + 0,95 \quad (9)$$

Wartość krytyczną powiązano tu jedynie z natężeniem przepływu, uniezależniając ją zupełnie od liczby badanych wskaźników jakościowych w próbce wody. W prezentowanej metodycie oszacowanie wartości krytycznej poziomu niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości proponuje się przyjąć (w oparciu o przeprowadzone badania ankietowe) na poziomie minimalnego akceptowalnego przez konsumentów wody ryzyka ($r=0,01$). Wówczas wartość kryterialną wskaźnika gotowości dostawy wody w całym analizowanym podsystemie dystrybucji wody określa formuła:

$$K_{jPDW-Kr} = 0,99^i \quad (10)$$

w której:

$K_{jPDW-Kr}$ – kryterialny poziom niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości przez podsystem dystrybucji wody

i – liczba analizowanych wskaźników jakości wody w punkcie pomiarowym

Obszar badań

– system zaopatrzenia Wrocławia w wodę

Współczesny system wodociągowy Wrocławia zaopatrza w wodę blisko 700 tys. mieszkańców miasta i okolic, zaspokajając ich obecne potrzeby wodne w ilości 120 tys. m³/d, co stanowi zaledwie 50% dyspozycyjnej wydajności tego systemu. Wrocławskie wodociągi czerpią wodę powierzchniową z zasobów Oławy zasilanej tzw. systemem przerzutowym z Nysy Kłodzkiej. Na podsystem dostawy wody składają się dwa duże zakłady oczyszczania

wody – „Na Grobli” i „Mokry Dwór” oraz niewielki zakład „Leśnica” (tab. 1), co warunkuje podział miasta na cztery strefy zaopatrzenia w wodę. Zakład „Na Grobli” dostarcza wodę do około 350 tys. mieszkańców tzw. strefy wewnętrznej, czyli gęsto zaludnionego centrum miasta. Zakład „Mokry Dwór” zaopatruje tzw. strefę zewnętrzną, okalającą strefę wewnętrzną oraz – poprzez pompownię przy ul. Bystrzyckiej – północno-zachodnie przedmieścia Wrocławia, świadcząc usługi wodociągowe dla około 265 tys. mieszkańców. Pomiędzy tymi strefami zlokalizowana jest tzw. strefa mieszana, znajdująca się w zasięgu oddziaływania zakładów „Na Grobli” i „Mokry Dwór”. Czwartą strefą zaopatrzenia w wodę obejmuje osiedla położone w zachodniej części miasta – Leśnicy, gdzie wodę podziemną dostarcza do około 5 tys. mieszkańców zakład „Leśnica”. Podstawowym zadaniem tych zakładów jest zachowanie ciągłości i niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości oraz pod wymaganym ciśnieniem. Proces oczyszczania wody odbywa się w wysokoefektywnych układach technologicznych, zapewniających jakość wody zgodną ze standardami polskimi i światowymi, niezależnie od zmienności jej składu w poszczególnych ujęciach.

Tabela 1. Wydajność układów zasilania systemu zaopatrzenia Wrocławia w wodę
Table 1. Capacities of the waterworks belonging to the water supply system for the city of Wrocław

| Zakład | Średnia wydajność m ³ /d | Wydajność dyspozycyjna m ³ /d |
|--------------|-------------------------------------|--|
| „Mokry Dwór” | 58tys. | 98tys. |
| „Na Grobli” | 61tys. | 120tys. |
| „Leśnica” | 1000 | 1100 |

Podsystem dystrybucji wody Wrocławia jest wyjątkowo rozległy, w większości stanowi układ pierścieniowy. Łączna długość sieci wodociągowej na terenie obsługiwanym przez MPWiK wynosi 1876,10 km (styczeń 2009 r.) Dostarcza ona wodę zarówno bezpośrednio do mieszkańców Wrocławia, jak i mieszkańców sąsiadujących gmin (Św. Katarzyna, Oława i Długołęka). Woda dostarczana jest do mieszkańców za pomocą układu rurociągów magistralnych o średnicach 400÷1400 mm i łącznej długości 209,97 km oraz rurociągów rozdzielczych o średnicach 80÷300 mm i długości 1235,06 km. Przyłącza wodociągowe tworzące podsystem dystrybucji wody to przewody o średnicach 25÷250 mm i długości 431,07 km. Sieć wodociągowa miasta użytkowana od ponad 130 lat, cechuje się dużym zróżnicowaniem pod względem materiałowym oraz wiekowym. Podstawowy materiał do budowy sieci, w różnych okresach eksploatacji, stanowiły żeliwo, stal, PVC oraz ołów.

Nieodłącznym elementem wrocławskiego podsystemu dystrybucji wody jest centralna pompownia przy ul. Bystrzyckiej, zasilająca w wodę strefę wysokiego ciśnienia, dostarczając wodę do mieszkańców osiedli Nowy Dwór, Kozanów, Gądów, Muchobór Mały. Ponadto w podsystemie tym (na terenie osiedla Gaj) pracują dwie strefowe hydrofarmie (przy ul. Orzechowej i ul. Krynickiej), których celem jest lokalne podnoszenie ciśnienia wody. Integralnymi elementami wspomagającymi pracę sieci wodociągowej są dwa zbiorniki centralne oraz dwa zbiorniki magazynujące wodę, których łączna pojemność wynosi 45 tys. m³ [16]. Nad jakością wody dostarczanej do odbiorców stale czuwa Centralne Laboratorium Kontroli Jakości Wody. Służby

laboratoryjne kontrolują codziennie jakość wody surowej i dostarczanej mieszkańcom Wrocławia z trzech zakładów oczyszczania wody. Wykonywane są również badania jakości wody w podsystemie dystrybucji.

Przeprowadzona analiza niezawodnościowa zmian jakości wody transportowanej do odbiorców została oparta na wynikach monitoringu, znajdującego się w gestii MPWiK sp. z o.o. we Wrocławiu. Oceną objęto zmienność składu wody w 122 charakterystycznych punktach pomiarowych na sieci, będących reprezentatywnymi punktami badań laboratoryjnych. W przyjętym obszarze analizy występują zarówno rejon o stabilnych parametrach zasilania w wodę, jak i tzw. rejon krytyczne, w których źródło i kierunek zasilania uzależniony jest od parametrów hydraulicznych pracy podsystemu dystrybucji wody. Do oceny zmian jakości wody w sieci wykorzystano wyniki monitoringu kontrolnego i przeglądowego z ponad 5-letniego okresu eksploatacji systemu wodociągowego (od 1 I 2002 r. do 30 IV 2007 r.). W analizie wykorzystano 44 wskaźniki (5 mikrobiologicznych, 6 fizycznych i 33 chemiczne). Analizowane dane objęły zestawienie wskaźników jakościowych oraz identyfikację miejsca poboru próbek i czasu, w którym wykonano badania. Uporządkowane i zweryfikowane bazy stanowiły zbiór danych wejściowych do pełnego zakresu analizy niezawodnościowej przeprowadzonej programem Jakość wody. W ocenie tej, zgodnie z proponowaną procedurą, przyjęto wartość krytyczną wskaźnika w funkcji liczby monitorowanych wskaźników jakości wody jako $K_{jPDW-Kr}=0,642611602$.

Ocenę niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości przeprowadzono w dwóch seriach. Pierwsza objęła ocenę 44 monitorowanych wskaźników jakości wody w sieci wodociągowej Wrocławia i wykazała, że w odniesieniu do wartości kryterialnej, w systemie wodociągowym mają miejsce incydentalne przekroczenia najwyższych dopuszczalnych stężeń. Istotne zmniejszenie wskaźnika gotowości dostawy wody wywołane było głównie przekroczeniami dopuszczalnego stężenia chloru w transportowanej wodzie, w konsekwencji czego w wodzie sporadycznie zanotowano przekroczenia zawartości ubocznych produktów dezynfekcji, głównie bromodichlorometanu (przy jednoczesnym zachowaniu dopuszczalnej zawartości sumy THM). Z tego względu w drugiej serii analizy niezawodności przeprowadzono symulacje komputerowe programem Jakość wody wg czterech scenariuszy obliczeniowych (tab. 2):

– scenariusz 1 prezentował ocenę niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości z uwzględnieniem dolnej granicy stężenia chloru wolnego $0 \text{ gCl}_2/\text{m}^3$,

– scenariusz 2 uwzględniał wszystkie rozpatrywane wskaźniki jakościowe z wyjątkiem chloru wolnego,

– scenariusz 3 dotyczył oceny zbioru rozważanych wskaźników jakościowych z wyjątkiem zarówno chloru wolnego, jak i bromodichlorometanu,

– scenariusz 4 umożliwiał ocenę niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości jedynie w funkcji ubocznych produktów dezynfekcji wody chlorem (chloroform, bromodichlorometan, dibromochlorometan, bromoform oraz suma THM).

Wybór scenariuszy do analizy w pełni uzasadniał brak bakteriologicznego zagrożenia zdrowotnego, ponieważ wskaźniki gotowości w przypadku poszczególnych wskaźników bakteriologicznych wody wynosiły odpowiednio:

– ogólna liczba bakterii w temperaturze 37°C po 24 h: $K_j=0,953992597$,

– ogólna liczba bakterii w temperaturze 22°C po 72 h: $K_j=0,929158317$,

– bakterie grupy coli: $K_j=0,988977956$,

– klostridia: $K_j=0,996492986$

– enterokoki: $K_j=0,993987976$.

Zakres analizy wytypowanych scenariuszy obliczeniowych uzasadnia również rozporządzenie Ministra Zdrowia, które dopuszcza brak chloru w transportowanej wodzie pod warunkiem, że nie występuje zagrożenie bakteriologiczne skażenia wody w sieci wodociągowej.

Wyniki przeprowadzonej analizy wykazały (tab. 2), że uwzględnienie w analizie dolnej granicy stężenia chloru w transportowanej wodzie, tj. $0 \text{ gCl}_2/\text{m}^3$, przy jednoczesnym zachowaniu standardów bakteriologicznych wody, spowodowało zwiększenie niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości aż o 190%. Jednak uzyskany wskaźnik gotowości dostawy wody zgodnej z rozporządzeniem Ministra Zdrowia z 2007 r. nadal był mniejszy od wartości kryterialnej zaledwie o 6%:

$$K_j = 0,601703407 < K_{jPDW-Kr} = 0,642611602 \quad (11)$$

W pozostałych scenariuszach obliczeniowych wzrost ten wahał się w przedziale od 289,6% (scenariusz 2) do 381,6% (scenariusz 4), przy czym w scenariuszach 2÷4 wskaźnik gotowości dostawy wody o wymaganej jakości przewyższał wymaganą wartość. Ponadto synteza uzyskanych wyników analizy (scenariusze 1÷3) wykazała w całym systemie zwiększenie czasu transportu wody zgodnej z obowiązującymi standardami jakości odpowiednio od 2,39 d do 8,56 d. Tak więc opracowanie racjonalnego programu monitoringu jakości wody odniesionego do kontroli stężenia środka dezynfekcyjnego w wodzie pozwala na

Tabela 2. Wskaźniki niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości w podsystemie dystrybucji wody we Wrocławiu
Table 2. Reliability parameters of the supply of water of up-to-standard quality in the distribution subsystem of the city of Wrocław

| Wskaźnik niezawodności | Analiza pełna (44 wskaźniki) | Scenariusz 1 | Scenariusz 2 | Scenariusz 3 | Scenariusz 4 |
|------------------------|------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|
| IZ, 1/d | 0,285571142 | 0,866232465 | 1,058116232 | 1,150300601 | 1,276052104 |
| INZ, 1/d | 1,001002004 | 0,420340681 | 0,228456914 | 0,136272545 | 0,010521042 |
| P_j ($t=1d$) | 0,367511009 | 0,656823014 | 0,795760583 | 0,872604776 | 0,98953411 |
| TZ_{sr} , d | 1,01 | 2,39 | 5,00 | 8,56 | 132,62 |
| TNZ_{sr} , d | 3,88 | 1,59 | 1,18 | 0,51 | $2 \cdot 10^{-4}$ |
| VZ, m^3 | 65049571,72 | 208033096,3 | 241134459,2 | 255462443,7 | 284886390,6 |
| VNZ, m^3 | 223330190,5 | 80346665,89 | 47245302,99 | 32917318,5 | 3493371,65 |
| K_j | 0,206913828 | 0,601703407 | 0,806112224 | 0,906813627 | 0,996492986 |
| P_j | 0,225569129 | 0,721385907 | 0,836169839 | 0,88585427 | 0,987886211 |

podjęcie działań eksploatacyjnych gwarantujących utrzymanie najwyższych stężeń dopuszczalnych w odniesieniu do zawartości chloru w wodzie, a co za tym idzie mniejszy ryzyko wtórnego skażenia bakteriologicznego wody w sieci i mniejszy poziom powstawania THM w sieci (punkty dochlorowania wody w systemie dystrybucji).

Analiza 4. scenariusza obliczeniowego, obejmująca ocenę wpływu na jakość wody jedynie THM powstających w sieci wodociągowej wykazała, iż średni czas transportu wody w całym systemie wodociagowym zgodnej ze standardami wynosił aż 132,62 d. Ponadto procedury algorytmu analitycznego niezawodności dostawy wody w aspekcie jakościowym pozwoliły na wyznaczenie objętości wody w systemie o jakości niezgodnej ze standardami, w odniesieniu do rozpatrywanego przypadku obliczeniowego. Badania wykazały, że zaledwie 1,8% ilości transportowanej wody w okresie 5,5-letnich badań (w 122 punktach pomiarowych) charakteryzowało się przekroczeniem dopuszczalnego stężenia THM. Woda ta cechowała się maksymalnym 2,2-krotnym przekroczeniem zawartości dopuszczalnej chloroformu, 2,6-krotnym przekroczeniem stężenia bromodichlorometanu oraz maksymalnym stężeniem sumy THM w czasie badań równym $109,6 \text{ mg/m}^3$.

Podsumowanie

Woda jest dla konsumenta z jednej strony niezbędnym środkiem do życia, z drugiej zaś jest towarem o wymiernej, niejednokrotnie zbyt wysokiej, cenie, co wymusza konieczność jej oszczędzania. Nadmierna oszczędność wody, daleka od gospodarności, powoduje zmniejszanie jej poboru w systemie wodociagowym, co skutkuje nadmiernym wzrostem ryzyka wtórnego zanieczyszczenia wody. Zasady zarządzania systemami wodociagowymi opierają się na założeniu stałej ceny zbytu wody, bowiem społeczeństwa lokalne, pomimo pełnej świadomości konieczności ponoszenia wysokich kosztów zarówno eksploatacji, jak i planowanych modernizacji systemu, coraz trudniej akceptują wzrost opłat za dostawę wody. W takich uwarunkowaniach przedsiębiorstwa wodociagowe stają dziś przed koniecznością ograniczania kosztów i jednocześnie podnoszenia niezawodności i bezpieczeństwa ich działania. W tej sytuacji proces zarządzania eksploatacją systemu zaopatrzenia w wodę powinien wykorzystywać dostępne programy komputerowe, umożliwiające nie tylko dogłębną analizę bazy danych, ale również symulację różnych scenariuszy funkcjonowania systemu wodociagowego. Pozyskana w ten sposób wiedza umożliwia opracowanie racjonalnych zasad eksploatacji, w tym monitoringu, w zmiennych (losowych) warunkach funkcjonowania całego systemu.

Zaprezentowany program komputerowy Jakość Wody stanowi użyteczne narzędzie analityczne do niezawodnościowej interpretacji wyników monitoringu sieci wodociągowej. Model ten pozwala w szybki sposób wyznaczyć parametry niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości zarówno w dowolnym punkcie monitoringu, jak i w całym podsystemie dystrybucji wody w funkcji wybranego lub wszystkich monitorowanych wskaźników jakościowych. Wielofunkcyjność modelu Jakości Wody pozwala nie tylko dokonać oceny parametrów niezawodnościowych całego podsystemu dystrybucji wody, ale daje również możliwość wytypowania obszarów krytycznych wpływających na pogorszenie jakości wody w całym systemie. Wieloaspektowość modelu daje możliwość przeprowadzenia analizy różnych scenariuszy obliczeniowych, na podstawie których

można wskazać i opracować niezbędne działania mające na celu poprawę jakości wody transportowanej do odbiorców.

Procedury algorytmu analitycznego niezawodności dostawy wody w aspekcie jakościowym pozwalają ponadto wyznaczyć objętości wody w systemie o jakości niezgodnej ze standardami. Co więcej, oszacowanie wartości wskaźnika dostawy wody o wymaganej jakości (P_{jv}), jak i transportu wody o złej jakości (P_{jnv}) umożliwia oszacowanie ryzyka dostawcy wody wynikającego z potencjalnej możliwości niesprzedania wody lub zastosowania odpowiednich bonifikat z tytułu dostarczania wody o jakości niezgodnej z obowiązującymi standardami jakości.

Przeprowadzona pełna ocena niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości wraz z zaprezentowanymi scenariuszami obliczeniowymi wykazała, że wrocławski system wodociagowy ma wymaganą niezawodność, a pojawiające się przekroczenia standardów jakości mają jedynie charakter incydentalny. Najczęściej przyczyną niezachowania wymogów jakościowych było stężenie chloru w transportowanej wodzie. Wynikało to między innymi ze zmiany rozporządzenia Ministra Zdrowia dotyczącego jakości wody przeznaczonej do spożycia w czasie prowadzenia badań.

LITERATURA

1. D.ANDRAKA: Zastosowanie analizy niezawodnościowej i metod statystycznej kontroli jakości do oceny pracy oczyszczalni ścieków. Mat. II Kongresu Inżynierii Środowiska, *Monografie PAN* 2005, vol. 32, ss. 621–630.
2. M.KWIETNIEWSKI: Metodyka badań eksploatacyjnych sieci wodociagowych pod kątem niezawodności dostawy wody do odbiorców. Prace Naukowe Inżynierii Środowiska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Z. 28, Warszawa 1999.
3. M.J.LAINE, S.DEMOTIER, K.ODEH, W.SCHON, P.CHARLES: Risk assessment for drinking water production assessing the potential risk due to the presence of *Cryptosporidium* oocysts in water. Conf. proc. "IWA 2nd World Water Congress", Berlin 2001.
4. J.H.M.VANLIEVERLOO, E.J.M.BLOKKER, G.MEDEMA: Quantitative microbial risk assessment of distributed drinking water using faecal indicator incidence and concentration. *Journal of Water and Health* 2007, Vol. 5, No. 1, pp. 131–149.
5. S.J.T.POLLARD: Risk Management for Water and Wastewater Utilities. IWA Publishing, London 2008.
6. J.RAK: Introduction in the method of graphic risk distribution. *Polish Journal of Environmental Studies* 2007, vol. 16, No. 2A, pp. 781–783.
7. M.SUDOŁ: Monitoring sieci wodociagowej dla potrzeb oceny niezawodności dostawy wody o wymaganej jakości. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2005.
8. M.T.TODINOV: Reliability and Risk Models: Setting Reliability Requirements. John Wiley & Sons, Chichester 2005.
9. A.WIECZYSTY: Niezawodność systemów wodociagowych i kanalizacyjnych – teoria niezawodności i jej zastosowania. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1990.
10. A.WIECZYSTY, R.IWANEJKO, J.RAK: Nowa metoda określania technologicznej niezawodności stacji uzdatniania wody. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS Oddział Wielkopolski, Kraków 2000, ss. 973–980.
11. I.ZIMOCH: Analiza zmian jakości wody jako element zarządzania procesem monitoringu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2006, nr 11, ss. 78–81.
12. I.ZIMOCH: Ocena niezawodności technologicznej funkcjonowania zakładu uzdatniania wody w Dobczycach. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS Oddział Wielkopolski, Gdańsk 2002, ss. 545–556.

13. S. DENCZEW: Koncepcja zrównoważonego systemu eksploatacji wodociągów. *Ochrona Środowiska* 2007, vol. 29, nr 4, ss. 69–71.
14. I. ZIMOCH: Zastosowanie modelowania komputerowego do wspomaganego procesu eksploatacji systemu wodociągowego. *Ochrona Środowiska* 2008, vol. 30, nr 3, ss. 31–35.
15. I. ZIMOCH, A. WIECZYSTY: Analiza porównawcza metod określania niezawodności stacji uzdatniania wody na przykładzie Dobczyc. *Monografie PAN* 2001, vol. 2, ss. 259–282.
16. I. ZIMOCH: 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, Gliwice 2007 (praca niepublikowana).

Zimoch, I. Monitoring of the Quality of the Water in Water-Pipe Networks: Reliability Interpretation of the Results. *Ochrona Środowiska* 2009, Vol. 31, No. 4, pp. 51–56.

Abstract: The available state-of-the-art computer techniques offer the possibility of monitoring how the water supply system functions, as well as analyzing the critical elements of the system, such as the quality of the water being supplied. This paper contains a reliability analysis of the functioning of the water quality monitoring process in a large water supply system (using the municipal water supply system of the city of Wrocław as an example). Assessments were carried out for the following parameters: rate of occurrence of water quality below standard; average duration of the occurrence of up-to-standard and below-standard

water quality in the water-pipe network; probability of supplying water of required quality; availability index and efficiency index of supplying water of required quality. The paper also includes the relevant algorithm and computer program ('Jakość Wody' – Water Quality), the basic analytical tools for examining the reliability of the functioning of water quality monitoring in the water distribution system. It has been demonstrated that the information obtained from monitoring enables a complex assessment of the quality of the services provided by the waterworks, as it incorporates the risk that the admissible values of the water quality parameters can be exceeded.

Keywords: Water quality, monitoring, water distribution system, reliability, risk, availability index, efficiency index.