

Izabela Zimoch, Jolanta Szymik-Gralewska

Zastosowanie zintegrowanej metody analizy niezawodnościowo-ekonomicznej w zarządzaniu przewymiarowaną infrastrukturą wodociągową

Obecne komunalne systemy zaopatrzenia w wodę mają w dużym stopniu przewymiarowaną infrastrukturę wodociągową, ponieważ zawierają układy charakteryzujące się znacznym nadmiarem przepustowości eksploatacyjnej w odniesieniu do rzeczywistego zapotrzebowania na wodę. Fakt ten jest bezpośrednim skutkiem istotnego zmniejszenia zapotrzebowania na wodę [1], przy czym największe ograniczenie zużycia wody obserwuje się przede wszystkim w przemyśle. W krajowym sektorze gospodarstw domowych istotny wpływ na zmniejszenie popytu na wodę miało powszechne wprowadzenie wodomierzy, a także zmiana konstrukcji taryf, co wpłynęło na wzrost cen wody oraz zmianę wzorców konsumpcji. W większości polskich przedsiębiorstw wodociągowych nadal nie został rozwiązany problem likwidacji nadmiaru ich przepustowości eksploatacyjnej, toteż zagadnienia związane z zarządzaniem przewymiarowaną infrastrukturą wodociągową są ciągle aktualne. Stwarza to możliwość rozwoju metod analizy niezawodności, uwzględniających zarówno kryteria techniczne, jak i koszty utrzymania infrastruktury wodociągowej [2]. Analiza niezawodności pozwala na ocenę gotowości eksploatacyjnej układu wodociągowego do spełniania stawianych mu wymagań w dowolnej chwili lub w danym czasie jego użytkowania [2,3]. Analiza ekonomiczna umożliwia natomiast poszukiwanie rozwiązań prowadzących do obniżenia kosztów utrzymania całego układu. Jedną z koncepcji rachunku kosztów cyklu życia produktu (LCC – life cycle costing) znalazła szczególne zastosowanie w zarządzaniu kosztami systemów technicznych. W literaturze przedmiotu można odnaleźć różne modele LCC, szacujące na przykład koszty ponoszone w całym cyklu życia produktu [4], określające koszty na wybranych etapach użytkowania obiektu technicznego [5], a także uwzględniające koszty ponoszone podczas całego cyklu zatrudnienia pracowników [6]. Połączenie analiz niezawodnościowych i ekonomicznych pozwala na holistyczne podejście do problemu zarządzania przewymiarowaną infrastrukturą wodociągową. Ten rodzaj analiz jest często stosowany w innych dziedzinach gospodarki, takich jak energetyka czy transport [7].

Przedmiot i zakres badań

W niniejszym artykule przedstawiono metodę analizy niezawodnościowo-ekonomicznej wraz z interpretacją uzyskanych wyników badań funkcjonowania wybranych układów eksploatacji rzeczywistego zakładu oczyszczania wody zlokalizowanego w południowej Polsce. Do badań wybrano dwa, pracujące równolegle, przewymiarowane układy filtrów pospiesznych. Podstawę analizy stanowiły rzeczywiste dane eksploatacyjne z lat 2005–2012, obejmujące informacje dotyczące napraw, awarii, przestojów technologicznych oraz wydzielonych kosztów stałych i zmiennych eksploatacji układu filtracji. W badaniach niezawodności technicznej układów technologicznych wykorzystano metodę dwuparametryczną [8–11], natomiast aspekt ekonomiczny przedstawiono w postaci rachunku kosztów cyklu życia (LCC) [12]. W ostatnim etapie procedury badawczej na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono optymalną strukturę techniczną pracy układów technologicznych oraz wskazano procedury racjonalnego planu zarządzania infrastrukturą zakładu oczyszczania wody.

W pierwszym układzie technologicznym eksploatowane były 24 komory filtracyjne, każda o powierzchni 46 m^2 i objętości złoża 115 m^3 . Pod koniec badań w układzie filtracyjnym eksploatowano 18 filtrów charakteryzujących się pełną sprawnością techniczną. Złóża filtracyjne uformowane były z 55 cm warstwy piasku o granulacji $0,8\div 1,4\text{ mm}$, ułożonej na 35 cm warstwie podtrzymującej. W filtrach zastosowano drenaż płytowy z dyszami grzybkowymi. Maksymalna projektowa prędkość filtracji wynosiła $5,9\text{ m/h}$, natomiast przy obecnym zapotrzebowaniu na wodę mieściła się w przedziale $1,8\div 3,1\text{ m/h}$. Filtry płukane były średnio co 32 godziny wodą z intensywnością $20\text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$. Woda do płukania złożeń filtracyjnych dopływała grawitacyjnie ze zbiornika wieżowego, zasilanego wodą z pompowni drugiego stopnia.

Drugi układ technologiczny stanowiło 40 filtrów, z których pod koniec badań pracowało 29. Pojemność jednej komory wynosiła 216 m^3 , a jej powierzchnia $44,8\text{ m}^2$. Złóża filtracyjne składało się z 1,4 m warstwy piasku filtracyjnego o granulacji $0,8\div 2\text{ mm}$ oraz dolnej warstwy żwiru o wysokości 0,4 m, ułożonej na płytach z drenażem kulowym. Maksymalna prędkość filtracji była równa $8,3\text{ m/h}$, przy czym przy obecnym zapotrzebowaniu na wodę przeciętna prędkość wynosiła $3,5\text{ m/h}$. Filtry płukane były wodą w cyklach 32-godzinnych z intensywnością $18\div 20\text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$.

Przeprowadzona analiza awaryjnych stanów eksploatacyjnych wykazała, że niezawodność techniczna eksploatacji układu filtracji pospiesznej wynikała głównie z ubytku złoża filtracyjnego oraz uszkodzeń płyt drenażowych, które eliminowały filtr z dalszej pracy. W badaniach uwzględniono również postoje technologiczne wynikające z procesu płukania złożeń filtracyjnych.

Metody badań

Wydzielono trzy integralne etapy badawcze, pozwalające na pełną ocenę kosztów eksploatacyjnych układu technologicznego przewymiarowanej infrastruktury wodociągowej zakładu oczyszczania wody przy zdefiniowanych strukturach technicznych, zapewniających określoną wydajność oraz reżim technologiczny ich eksploatacji. Poszczególne etapy obejmowały wyznaczenie wydajności układu, ocenę jego niezawodności przy założeniu różnych wariantów eksploatacji oraz przeprowadzenie rachunku kosztu cyklu życia tych wariantów.

Etap I – wyznaczenie wydajności układu

W celu określenia relacji pomiędzy wydajnością dyspozycyjną zakładu wodociągowego i rzeczywistą ilością oczyszczonej wody przeprowadzono analizę statystyczną dobowej wydajności zakładu, wykorzystując zbiór zmiennych losowych stanowiących średnią dobową ilość oczyszczonej wody w przyjętym czasie badań. W procedurze badawczej wyznaczono wartości wydajności przeciętnej i racjonalnej zakładu. Wydajność przeciętną stanowiła mediana zbiorów dobowych wartości natężenia przepływu z prawdopodobieństwem wystąpienia równym 0,5, natomiast wydajność racjonalna została wyznaczona z funkcji dystrybuanty wydajności zakładu, określonej w zbiorze zmiennych zgromadzonych w czasie badań. Stanowiła ona dobowe natężenie przepływu występujące z prawdopodobieństwem równym 0,99.

Etap II – analiza niezawodności

Teoria niezawodności pozwala na przeprowadzenie oceny sprawności systemu technicznego w postaci wymiernych wskaźników, odnoszących się zarówno do technicznej, jak i technologicznej pracy jego poszczególnych elementów [8–11]. Zastosowanie w badaniach metody dwuparametrycznej pozwoliło wnioskować o niezawodności elementów i układów technologicznych na podstawie wartości dwóch wskaźników pochodzących ze zbioru trójelementowego, obejmującego stacjonarny wskaźnik gotowości (K), średni czas pracy (T_p) oraz średni czas odnowy (T_o) [2, 3, 8]. W badaniach wyznaczono wartości średniego czasu odnowy oraz stacjonarnego wskaźnika gotowości, których interpretację odniesiono do wymaganej wartości wskaźnika niezawodności charakteryzującego trzy stany eksploatacyjne systemów wodociągowych [10, 11]. Stany te, wynikające z relacji między dobową wydajnością układów zasilania (Q) a całkowitym dobowym zapotrzebowaniem na wodę (Q_d), obejmują:

- stan pełnej sprawności: $Q=Q_d$,
- stan awaryjny o obniżonej wydajności układów zasilania: $\alpha_{aw}Q_d \leq Q < Q_d$ ($\alpha_{aw}=0,7$ – współczynnik awaryjnego obniżenia dostawy wody),
- stan graniczny obniżonej wydajności układów zasilania: $\alpha_g Q_d \leq Q < \alpha_{aw} Q_d$ ($\alpha_g=0,2 \div 0,35$ – współczynnik granicznego obniżenia dostawy wody).

Uwarunkowania eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę, oparte na równorzędności funkcjonowania podsystemu oczyszczania i dystrybucji wody, pozwalają na wykorzystanie metody dekompozycji do wyznaczenia wymaganej wartości wskaźnika gotowości dowolnego obiektu technicznego [8, 13].

Etap III – rachunek kosztów cyklu życia

W zarządzaniu infrastrukturą techniczną często wykorzystuje się rachunek kosztów cyklu życia [12, 14–16]. Metoda ta zakłada, że w cyklu życia każdego obiektu technicznego można wydzielić cztery podstawowe fazy – projektu, budowy, eksploatacji i utylizacji [9, 12]. Zaletą rachunku LCC jest powszechność jego zastosowania w różnych sektorach gospodarki, co dowodzi łatwości jego dostosowania w analizach opłacalności ekonomicznej funkcjonowania obiektów technicznych w zmiennych warunkach użytkowania. Analiza LCC łączy zatem aspekty ekonomiczne i techniczne w ocenie rentowności obiektu technicznego w prognozowanym czasie jego funkcjonowania i może być opisana równaniem w postaci:

$$[LCC] = [CF]_p + [CF]_b + [CF]_e + [CF]_u \quad (1)$$

w którym:

- LCC – koszty cyklu życia, zł
- CF_p – przepływy pieniężne w fazie projektu, zł
- CF_b – przepływy pieniężne w fazie budowy, zł
- CF_e – przepływy pieniężne w fazie eksploatacji, zł
- CF_u – przepływy pieniężne w fazie utylizacji, zł

Opis metody analitycznej

W opracowanej metodzie badawczej, stanowiącej narzędzie wspierające procesy decyzyjne zarządzania przewymiarowaną infrastrukturą wodociągową, wykorzystano założenia teorii niezawodności oraz rachunku LCC. Podstawą prezentowanej metody było określenie wariantów technologicznych dalszego działania układów technicznych, w przypadku których wyznaczono wartości liczbowe zintegrowanych wskaźników niezawodnościowo-ekonomicznych. Wartości tych wskaźników stanowiły pełną charakterystykę funkcjonowania obiektu pod względem technicznym i ekonomicznym, będącą podstawą wyboru wariantu o najlepszych właściwościach niezawodnościowych, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów eksploatacji. Poszczególne warianty analizy wyznaczono poprzez eliminację ze struktury niezawodnościowej jednego i więcej urządzeń. Analizę niezawodności technicznej przeprowadzono przy wydajności przeciętnej i racjonalnej, natomiast koszty eksploatacyjne obejmowały koszty ponoszone zarówno w stanie pracy poszczególnych elementów, jak i w stanie rezerwowym. Podstawę proponowanej metody stanowiły następujące wskaźniki:

– ekonomiczny wskaźnik gotowości operacyjnej (R_e), będący miarą wpływu racjonalizacji struktury układu na jego koszty i niezawodność, wyznaczany ze wzoru:

$$R_e = \frac{K_n[LCC]_n}{K_o[LCC]_o} \quad (2)$$

w którym:

- K_n – wskaźnik gotowości nowopowstałej struktury technicznej o wydajności Q_n
- $[LCC]_n$ – koszt cyklu życia nowopowstałej struktury technicznej o wydajności Q_n , zł

K_o – wskaźnik gotowości dotychczasowej struktury technicznej o wydajności Q_n
 $[LCC]_o$ – koszt cyklu życia dotychczasowej struktury technicznej o wydajności Q_n , zł
 Q_n – uwzględniana w analizie wydajność układu (przeciętna lub racjonalna), m^3/d
 – wskaźnik konsekwencji decyzji operacyjnych (I_c , zł) wyrażony równaniem:

$$I_c = \frac{([LCC]_o - [LCC]_n)K_n}{P_n} \quad (3)$$

w którym zachodzi zależność (P_n – prawdopodobieństwo wystąpienia wydajności Q_n):

$$\frac{K_n}{P_n} = \frac{P(S_n \cap Q_n)}{P(Q_n)} = P(S_n | Q_n) \quad (4)$$

opisująca prawdopodobieństwo warunkowe ($P(S_n | Q_n)$) zajścia zdarzenia S_n (praca nowoprojektowanej struktury układu o n elementach) pod warunkiem zapewnienia wydajności układu Q_n ; innymi słowy, wskaźnik gotowości (K_n) opisuje prawdopodobieństwo sprawności określonej struktury pracy układu technicznego o wydajności Q_n z prawdopodobieństwem wystąpienia wydajności przeciętnej lub racjonalnej $P_n = P(Q_n)$,

– jednostkowy wskaźnik konsekwencji decyzji operacyjnych (I_{uc} , zł/ m^3) opisany równaniem:

$$I_{uc} = \frac{([LCC]_o - [LCC]_n)K_n}{P_{0,99}Q_{0,99}T_{LCC}} \quad (5)$$

w którym:

$Q_{0,99}$ – wydajność racjonalna układu, m^3/d

T_{LCC} – czas analizy LCC, d

pozwalający na porównywanie różnych wariantów pracy układów i badanie zmian kosztów eksploatacji odniesionych do $1 m^3$ oczyszczonej wody w zakładzie wodociągowym pracującym z racjonalną wydajnością.

W celu ostatecznego wyłonienia wariantu rozwiązania technicznego przewymiarowanego układu technicznego, o uzasadnionej ograniczonej liczbie elementów, określono kryteria wyboru. Pierwszym kryterium akceptacji wariantu dalszego funkcjonowania układu było zapewnienie wymaganej wartości wskaźnika (K) gotowości pracy z wydajnością przeciętną i racjonalną. Kryterium to wynikało z podstawowego założenia uwzględniającego konieczność zapewnienia bezpiecznego działania układu, w zmiennych warunkach jego pracy. Drugim kryterium była wartość ekonomicznego wskaźnika gotowości operacyjnej (R_e), którego minimum pozwala wyłonić wariant o potencjalnie największych korzyściach z jego wdrożenia. Trzecim kryterium akceptacji była wartość wskaźnika konsekwencji decyzji operacyjnych (I_c). Spośród wariantów o najmniejszej wartości wskaźnika R_e poszukuje się wariantu o największej wartości wskaźnika I_c , czyli wariantu, który zapewni najwyższe profity kosztowe i niezawodnościowe zarówno przy wydajności przeciętnej, jak i racjonalnej.

Określone kryteria pozwalają na jednoznaczne wskazanie najkorzystniejszego, pod względem niezawodności i kosztów, wariantu dalszego funkcjonowania układu infrastruktury wodociągowej. Kolejność planowanych wdrożeń redukcji elementów przewymiarowanej struktury technicznej powinna być ustalana na podstawie wartości jednostkowego wskaźnika konsekwencji decyzji operacyjnych (I_{uc}). Wartość tego wskaźnika utożsamia się z oszczędnościami, jakie będą płynęły z wdrożenia wybranego wariantu. Wobec tego w pierwszej kolejności należy zracjonalizować

funkcjonowanie układu technologicznego o najwyższej wartości wskaźnika I_{uc} , co w największym stopniu wpłynie na obniżenie kosztów oczyszczania $1 m^3$ wody.

Dyskusja wyników

Zgodnie z opracowaną metodą określono minimalne struktury pracy przy wydajności przeciętnej i racjonalnej każdego z dwóch układów filtracji pospiesznej. Wartości wydajności (tab. 1) wyznaczono z dystrybucji zbioru zmiennych losowych stanowiących średnią dobową ilość wody oczyszczonej w latach 2009–2014.

Tabela 1. Wydajność układów filtracji
 Table 1. The filtration system capacity

Układ filtracji	Wydajność* dyspozycyjna, m^3/d	Wydajność przeciętna, m^3/d	Wydajność racjonalna, m^3/d
Pierwszy	150000	56950	62530
Drugi	350000	110500	154190

*gdy wszystkie filtry są sprawne

W pierwszym układzie filtracji pospiesznej, bez względu na jego wydajność, w czasie badań pracowały zawsze wszystkie sprawne filtry, z których na koniec 2012 r. sprawnych było 18. Ponadto w czasie funkcjonowania zakładu zmieniły się parametry technologiczne procesu koagulacji, co pozwoliło na uzyskanie lepszej jakości wody dopływającej do układu filtracji (mętność $<1 NTU$), niż zakładano na etapie projektowania. Fakt ten pozwolił założyć, że filtry pospieszne mogą pracować z projektową wydajnością, przy wymaganym reżimie technologicznym ich eksploatacji oraz zapewnienia jakości wody zarówno w zakresie wymaganym przepisami, jak i jej stabilności w systemie dystrybucji. Zatem przy projektowanej wydajności jednego filtru wynoszącej $6521,74 m^3/d$, pracującego z projektowaną prędkością filtracji $5,91 m/h$, wyznaczono w przypadku wydajności przeciętnej ciągu ($56950 m^3/d$) techniczną strukturę niezawodności 9 z 18 filtrów pracujących z prędkością $5,73 m/h$, zaś przy racjonalnej wydajności ($62530 m^3/d$) struktura ta stanowiła eksploatację 10 z 18 filtrów pracujących z prędkością $5,66 m/h$. W przypadku drugiego układu filtrów pospiesznych, z uwagi na wysoką jakość wody po procesie koagulacji, przyjęto również założenie bezpiecznej eksploatacji z projektowaną wydajnością $8974,36 m^3/d$, osiąganą przy prędkości filtracji równej $8,35 m/h$. W warunkach przeciętnej wydajności układu równej $110500 m^3/d$ oraz wydajności racjonalnej równej $154190 m^3/d$ wyznaczono minimalne struktury niezawodnościowe stanowiące odpowiednio ugrupowanie eksploatacyjne 13 z 29 filtrów (wydajność przeciętna) oraz 18 z 29 filtrów (wydajność racjonalna).

Wykorzystując metodę dekompozycji, w drugim etapie analizy wyznaczono wymagane wartości wskaźnika gotowości pierwszego i drugiego układu filtracji pospiesznej, które wyniosły odpowiednio $0,9571155$ i $0,9964654$. Następnie, na podstawie rzeczywistych danych zgromadzonych w dziennikach eksploatacji obiektów technicznych w latach 2005–2012, oszacowano wartości wskaźnika K przy zdefiniowanych strukturach pracy. Z uwagi na dużą liczbę elementów rezerwowych w badanych układach filtracyjnych, wartości wskaźnika K w warunkach pracy z przeciętną i racjonalną wydajnością osiągnęły ten sam poziom, wynoszący $0,9991199$ w pierwszym układzie oraz $0,9999999$ w drugim układzie filtracji. W przypadku

obu układów badane struktury niezawodnościowe pracy osiągnęły wartości wskaźnika gotowości wyższe od wartości wymaganej, co świadczyło o ich przewymiarowaniu. W badaniach odnoszących się do analizy efektywności ekonomicznej eksploatacji układu filtracyjnego wszystkie zidentyfikowane w równaniu (1) nakłady i koszty wyrażono w zdyskontowanych wartościach netto. W analizie uwzględniono ponadto koszt pracy pracowników zakładu, cenę energii oraz wszystkie inne elementy finansowe wpływające na koszty cyklu życia układu.

Wyznaczając przedstawione w tabeli 2 wartości wskaźnika LCC uwzględniono wszystkie przepływy pieniężne, jakie wystąpiły i wystąpią w ciągu 30 lat eksploatacji obu układów filtracji.

Tabela 2. Koszt cyklu życia (LCC) elementów systemu filtracji
Table 2. The LCC of filtration system elements

Element układu filtracji		LCC	
		stan pracy**, zł	stan rezerwy**, zł
Pierwszy układ	budynek	90765109	90765109
	filtry	3970602	2086789
	pompa* nr 6	246225	188503
Drugi układ	budynek	136138023	136138023
	filtry	3199290	2032533
	pompy* nr 4, 5, 8, 9 i 12	561201	509646

*pompy do płukania złoża

**wartości zdyskontowane

Koszty fazy budowy i fazy likwidacji określono na podstawie kosztorysów powykonawczych opracowanych na podstawie archiwalnej dokumentacji powykonawczej oraz wykorzystując Katalogi Nakładów Rzeczowych (KNR), Normy Nakładów Rzeczowych na Konstrukcje Budowlane (NRRNKB), Kosztorysowe Normy Nakładów Rzeczowych (KNNR) oraz opierając na danych zawartych w „Informacji o cenach materiałów oraz stawkach robocizny obowiązujące w III kwartale 2014 r.” [16]. Nakłady fazy projektu, czyli koszty projektu architektoniczno-budowlanego wraz z wszelkimi pozwoleniami, ekspertyzami i pracami geodezyjnymi obliczono zgodnie z rozporządzeniem [17]. W przypadku budynków wartość ta wynosiła 5% wartości kosztów budowy, a urządzeń – 5% kosztów jego zakupu. W ramach badań określono, że koszty fazy eksploatacji związane były przede wszystkim z wykonywaniem planowych czyszczeń, napraw i przeglądów oraz

z ich uszkodzalnością. Koszt tych czynności oszacowano na podstawie dostępnych wartości wskaźnika częstości uszkodzeń (f) [2, 8, 9] oraz danych ekonomicznych uzyskanych z zakładzie oczyszczania wody.

Ponieważ na koniec badań w pierwszym układzie filtracji sprawnych było jedynie 18 filtrów z 24 istniejących, dlatego rozważono wyłączenie kolejnych obiektów spośród 18 działających. Przeanalizowano następujące warianty eksploatacji układu filtracji:

- wariant I: wyłączenie z eksploatacji 5 filtrów,
- wariant II: wyłączenie z eksploatacji 6 filtrów,
- wariant III: wyłączenie z eksploatacji 7 filtrów.

Analogicznie w drugim układzie filtracji w grudniu 2012 r. sprawnych było jedynie 29 filtrów z 40 istniejących, dlatego też rozważono wyłączenie kolejnych obiektów spośród 29 działających:

- wariant I: wyłączenie z eksploatacji 8 filtrów,
- wariant II: wyłączenie z eksploatacji 9 filtrów,
- wariant III: wyłączenie z eksploatacji 10 filtrów.

Zgodnie z przedstawioną metodą badań obliczono wartości wskaźników niezawodności i wskaźników niezawodnościowo-ekonomicznych, które zabrano w tabelach 3 i 4. Uwzględniając przyjęte kryteria, warianty II i III pierwszego układu filtrów w przypadku racjonalnej wydajności charakteryzowały się wskaźnikami gotowości niższymi niż wymagany $K=0,9571155$. Zgodnie z drugim przyjętym kryterium, wartość wskaźnika R_e w wariantach I i przepływach przeciętnym oraz racjonalnym przyjęły tę samą wartość (0,93). Wartość wskaźnika konsekwencji decyzji operacyjnych (I_c) przy przepływie przeciętnym wynosiła 5211853,51 zł, a racjonalnym – 10288110,28 zł. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie wariantu I jako najkorzystniejszego w przypadku dalszego działania pierwszego układu filtracji pospiesznej. W przypadku drugiego układu filtracji jedynie wariant III nie spełnił warunku bezpiecznej wydajności podczas racjonalnej wydajności układu, natomiast wskaźnik R_e przyjmował mniejszą wartość w wariantach II. W przypadku wydajności przeciętnej wskaźniki te wynosiły $R_e=0,91$ oraz $I_c=9146398,19$ zł, natomiast racjonalnej odpowiednio 0,92 oraz 18102327,03 zł. Według przyjętych kryteriów jedynie wariant II spełnił wszystkie stawiane wymagania, co upoważnia do określenia go mianem wariantu najkorzystniejszego. Analiza wartości wskaźnika konsekwencji decyzji operacyjnych (I_{uc}) wykazała, że korzystniejszą będzie najpierw zoptymalizować działanie pierwszego układu, gdyż większa wartość wskaźnika $I_{uc} - 0,015$ zł/m³ – w większym stopniu wpływała na obniżenie kosztów oczyszczania 1 m³ wody.

Tabela 3. Wartości wskaźników w przypadku pierwszego układu filtracji
Table 3. Values of indicators of the first filtration system

Wariant	Struktura filtrów	Wskaźnik, jednostka				
		T_o , h	K_n	R_e	I_c , zł	I_{uc} , zł/m ³
wydajność przeciętna						
I	9 z 13	0,89	0,9990186	0,93	5211853,51	–
II	9 z 12	0,25	0,9963474	0,91	6237501,72	–
III	9 z 11	0,54	0,9516301	0,86	6950481,15	–
wydajność racjonalna						
I	10 z 13	0,23	0,9959827	0,93	10288110,28	0,015
II	10 z 12	0,49	0,9498256	0,87	11773591,69	0,017
III	10 z 11	0,94	0,7214660	0,65	10433445,62	0,015

Tabela 4. Wartości wskaźników w przypadku drugiego układu filtracji
Table 4. Values of indicators of the second filtration system

Wariant	Struktura filtrów	Wskaźnik, jednostka				
		T_0 , h	K_n	R_e	I_c , zł	I_{uc} , zł/m ³
wydajność przeciętna						
I	13 z 21	0,03	1,0000000	0,92	8130131,72	–
II	13 z 20	0,02		0,91	9146398,19	–
III	13 z 19			0,90	10162664,65	–
wydajność racjonalna						
I	18 z 21	0,04	0,9999939	0,93	16097561,93	0,009
II	18 z 20	0,06	0,9995836	0,92	18102327,03	0,011
III	18 z 19	0,12	0,9800658	0,89	19720957,63	0,012

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza w sposób jednoznaczny wskazała, że badane układy filtracji pospiesznej były eksploatowane w niewłaściwy sposób, co oznacza, że wysoka niezawodność ich działania była większa niż wymagana, co powodowało dodatkowe koszty związane z obsługą większej liczby filtrów niż było to konieczne. Zaprezentowane podejście niezawodnościowo-ekonomiczne pozwoliło na wskazanie nie tylko w jakim kierunku powinny iść zmiany związane z zarządzaniem tą infrastrukturą, ale również jakie korzyści finansowe mogą płynąć z wdrożenia tych zmian. Zaproponowana metoda badawcza, obejmująca połączenie założeń teorii niezawodności oraz rachunku kosztów, umożliwiła opracowanie nowych parametrów służących do oceny jakości działania systemów wodociągowych, takich jak ekonomiczny wskaźnik gotowości operacyjnej (R_e) – równanie (2), wskaźnik konsekwencji decyzji operacyjnych (I_c) – równanie (3) oraz jednostkowy wskaźnik konsekwencji decyzji operacyjnych (I_{uc}) – równanie (5).

W doniesieniach literaturowych występuje coraz więcej przykładów wykorzystania analiz LCC i niezawodności do oceny działania różnych systemów technicznych. Przedstawione w pracy wyniki zastosowania spójnej metody do oceny funkcjonowania infrastruktury wodociągowej wskazują na jej walory poznawcze oraz przydatność w opracowywaniu racjonalnego planu zarządzania przewymiarowaną infrastrukturą techniczną.

Niniejszy artykuł został przygotowany w ramach projektu pt. „System informatyczny wspomagający optymalizację i planowanie produkcją i dystrybucją wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi subregionu centralnego i zachodniego województwa śląskiego”, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego – Poddziałanie 1.3.1. „Projekty rozwojowe” POIG.01.03.01-14-034/12.

LITERATURA

- B. BATÓG, J. BATÓG: Analiza tendencji zużycia wody w polskich miastach w sektorze gospodarstw domowych. *Zarządzanie i Finanse* 2013, vol. 11, ss. 89–100.
- I. ZIMOCZ: Zintegrowana metoda analizy niezawodności funkcjonowania i bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. Rozprawa habilitacyjna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia 323, Gliwice 2011.
- J. SZYMIK-GRALEWSKA, I. ZIMOCZ: Optimization of the drinking water coagulation and filtration system as a result of reliability analysis and Life Cycle Costing. In: *Safety and Reliability Methodology and Applications*, Taylor & Francis Group, London 2015.
- A. KLEYNER, P. SANDBORN, J. BOYLE.: Minimization of Life Cycle Costs through Optimization of the Validation Program – A Test Sample Size and Warranty Cost Approach. *Reliability and Maintainability, Annual Symposium RAMS*, 2004, pp. 553–558.
- C. PARRA, A. CRESPO, P. CORTES, S. FYQUEROA: On the consideration of reliability in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). A review of basic models. In: C. G. SOARES, E. ZIO [Eds.]: *Safety and Reliability for Managing Risk*, Taylor & Francis Group, London 2006, pp. 2203–2214.
- L. Y. WAGHMODE, A. D. SAHASRABUDHE: Product life cycle cost modelling – a suggested framework. *Proc. of 'First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology'*, Nagpur 2008, pp. 745–748.
- I. DZIADUCH: Analiza kosztów okresu istnienia (LCC) obiektu technicznego w aspekcie jego niezawodności. *Logistyka* 2011, nr 2, ss. 139–150.
- B. BUDZIŁO, E. WYPART: Ocena niezawodności systemu zaopatrzenia w wodę miasta Andrychów i jego okolic. *Instal* 2010, nr 1, ss. 46–49.
- I. ZIMOCZ, J. SZYMIK-GRALEWSKA: Zarządzanie eksploatacją technologiczną układów oczyszczania wód poprodukcyjnych z wykorzystaniem analiz niezawodnościowo-ekonomicznych. *Przemysł chemiczny* 2015, vol. 94, nr 8, ss. 1000–1003.
- B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Niezawodność i bezpieczeństwo systemów komunalnych na przykładzie systemu zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2008.
- J. RAK: Wybrane zagadnienia niezawodności i bezpieczeństwa w zaopatrzeniu w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2008.
- J. EMBLEMSVÁG: Life-cycle costing using activity-based costing and Monte Carlo methods to manage future costs and risks. John Wiley & Sons, New Jersey 2003.
- A. WIECZYSTY [red.]: Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN* 2001.
- E. KORPI, T. ALA-RISKU: Life cycle costing: A review of published case studies. *Managerial Auditing Journal* 2008, Vol. 23, No. 3, pp. 240–261.
- G. BARONE, D. M. FRANGOPOL: Reliability, risk and lifetime distributions as performance indicators for life-cycle maintenance of deteriorating structures. *Reliability Engineering and System Safety* 2014, Vol. 123, No. 3, pp. 21–37.
- System Sekocenbud. Ośrodek Wdrożeń Ekonomiczno-Organizacyjnych Budownictwa PROMOCJA sp. z o.o. (praca niepublikowana).
- Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 18 maja 2004 r. w sprawie określenia metod i podstaw sporządzania kosztorysu inwestorskiego, obliczania planowanych kosztów prac projektowych oraz planowanych kosztów robót budowlanych określonych w programie funkcjonalno-użytkowym. Dz. U. nr 130, poz. 1389 (wraz z późniejszymi zmianami).

Zimoch, I., Szymik-Gralewska, J. Application of Integrated Reliability-Economic Analysis in Management of Oversized Water Supply Infrastructure. *Ochrona Srodowiska* 2015, Vol. 37, No. 4, pp. 25–30.

Abstract: The existing municipal water supply systems are composed mainly of excessively reserved water supply infrastructure *i.e.* systems with significant excess capacity in relation to the actual demand. Considering management challenges regarding the oversized water supply infrastructure, the authors propose reliability-economic methodology in the example of the existing water treatment plant. Two-parameter analytical method was used for reliability analysis while the economic aspect was presented using the Life Cycle Costing (LCC). The basis for the proposed methodology was an analysis of the proprietary indicators, *i.e.* economical operational readiness rate

(R_e), indicator of consequences of operational decisions (I_c) as well as the unit indicator of consequences of operational decisions (I_{uc}) in selected operational variants of the water supply system. Due to the structural complexity of the water treatment plant, a new approach to the management of excessively reserved water supply infrastructure in the example of the two parallel rapid filtration systems was proposed. The presented reliability-economic approach to the oversized infrastructure management allows for characterization of further operational scenarios and selection of the most favorable one. Presented analysis results led to development of a rational management plan for technical infrastructure of water filtration arrangements in the water supply system.

Keywords: Water supply system, reliability, Life Cycle Costing (LCC), excessively reserved (oversized) system.