

Jolanta SZYMIK-GRALEWSKA, Izabela ZIMPOCH

*Inżynierii Wody i Ścieków
Politechnika Śląska*

ZASADY OPTIMALIZACJI NIEZAWODNOŚCI EKSPLOATACJI STACJI UZDATNIANIA WODY

THE PRINCIPLES OF RELIABILITY OPTIMIZATION OF DRINKING WATER TREATMENT PLANT'S OPERATION

Authors of this paper propose to implement the reliability theory together with the Life Cycle Costing (LCC) methodology to analyze every device / object of a Drinking Water Treatment Plant (DWTP).

The scope of research includes the evaluation of basic reliability, recognition of all operational costs and the application of a new index – “indicator of operational readiness” (R), describing the probability of economic readiness of operation.

This new approach will allow a full economic and reliability efficiency analysis which is especially important when planning future utilization or modernization of any devices at DWTP.

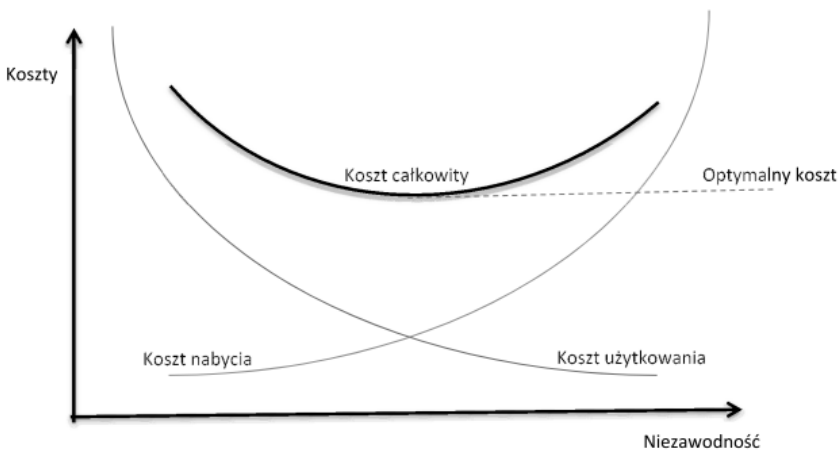
1. Wprowadzenie

1.1. Przyczyny podjęcia badań

Od początku lat 90-tych ubiegłego wieku obserwowany jest w Polsce spadek zużycia wody. Wynika to głównie z racjonalizacji zużycia wody oraz spadku zapotrzebowania zakładów przemysłowych. Co więcej, technologie wodooszczędne oraz obiegi zamknięte wody stały się powszechne. Taki stan rzeczy wymusza na przedsiębiorstwach wodociągowych konieczność produkowania znacznie mniejszej ilości wody, a co za tym idzie, do eksploatacji nadmiernie rozbudowanych / rezerwowanych układów technicznych uzdatniających wodę. Sytuacja ta stworzyła nowe możliwości aplikowania analiz niezawodności.

Zastosowanie podstaw teorii niezawodności jest intuicyjnym sposobem prognozowania funkcjonowania systemu. Wynika to przede wszystkim z faktu losowości czynników środowiskowych oraz zjawisk występujących w systemie, determinujących jego efektywność funkcjonowania. Teoria niezawodności pozwala przeprowadzić ocenę systemu w postaci wymiernych wskaźników niezawodnościowych, odnoszących się zarówno do technicznej jak i technologicznej pracy poszczególnych elementów. Pewien niedosyt pozostaje jednak przy określeniu, która metoda optymalizacji zapewni bezpieczną

eksploatację techniczną i technologiczną przy jednoczesnym ponoszeniu najniższych kosztów. Badacze układów wodociągowych określili, że dla oceny istniejących systemów wodociągowych oraz ich optymalizacji niezbędne jest wykorzystanie osiągnięć teorii niezawodności i bezpieczeństwa oraz uwzględnienie rachunku ekonomicznego [1]. Zadanie optymalizacji zostało nakreślone w literaturze przedmiotu [2,3] i najogólniej przyjmując optymalizacją nazwano postępowanie polegające na wyborze, przy przyjęciu funkcji celu jako kryterium wyboru, rozwiązania x z danego zbioru rozwiązań dopuszczalnych. W przypadku optymalizacji systemów wodociągowych określono, że należy zminimalizować funkcję celu przedstawiającą koszty pod warunkiem spełnienia określonego zbioru ograniczeń wynikających z czynników takich jak zadana wydajność, ciśnienie, jakość wody, niezawodność, czas realizacji itd. Zgodnie z zasadą racjonalnego gospodarowania O. Langego [4] należy dążyć do stworzenia systemu, który zapewni uzyskanie z góry określonego efektu możliwie najmniejszym nakładem kosztów. Poniższy wykres obrazuje zakres badań związanych z poszukiwaniem kosztów optymalnych.



Rys. 1 Zależność kosztów i niezawodności
Źródło: opracowanie własne na podstawie [5]

Fig. 1 The relationship between the cost and reliability
Source: Own study based on [5]

Podążając za tą myślą autorki niniejszego opracowania podjęły próbę analizy układu wodociągowego jednocześnie pod kątem niezawodności i rachunku kosztowego tak, by umożliwić wykorzystanie uzyskanych rezultatów w zarządzaniu systemami zaopatrzenia w wodę. Podobnie jak w studiach wykonalności nowych inwestycji, również dla istniejących układów wodociągowych można przeprowadzić analizę kosztów utrzymania operacyjnego z uwzględnieniem niezbędnych modernizacji i remontów, w przyjętym horyzoncie czasu funkcjonowania. Należy jednak za kryterium wyboru przyjąć wymagany poziom niezawodności, nie zaś jedynie kryterium opłacalności jak jest to przyjmowane w przedsięwzięciach wolnorynkowych [6,7].

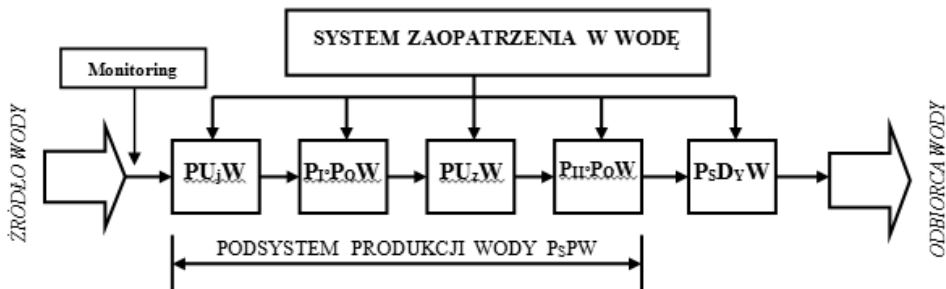
1.2. Obecny stan wiedzy w zakresie analiz niezawodności

Analiza niezawodnościowa działania urządzeń i układów technicznych jest niezodzownym narzędziem wspierającym proces podejmowania decyzji każdego inżyniera, który planuje, organizuje i wytycza kierunki eksploatacji systemów technicznych. Teoria niezawodności głosi, iż jest możliwym wnioskowanie o dalszym działaniu badanego obiektu w oparciu o zaistniałe w przeszłości zdarzenia eksploatacyjne. Działanie układu technicznego wiąże się nierozzerwalnie z występowaniem zdarzeń niepożądanych tj. awarii. Ich powstawanie ma charakter losowy co sprawia, że badania w tym zakresie oparte są przede wszystkim na analizie historycznych danych eksploatacyjnych [6,7, 8,9]. Teoria niezawodności wykorzystuje metody analizy matematycznej, teorii prawdopodobieństwa, jak i statystyki.

W połowie ubiegłego wieku teorię tę zaczęto stosować w przemyśle lotniczym i samochodowym, a następnie została ona przeniesiona do wszystkich gałęzi przemysłu. Potencjał analiz niezawodnościowych szybko został zauważony przez badaczy systemów komunalnych w tym systemów wodociągowych i kanalizacyjnych [8,9]. Na potrzeby badań Systemu Zaopatrzenia w Wodę (SZW) opracowano definicję niezawodności, która przyjęła brzmienie; „*Niezawodność systemu wodociągowego jest to właściwość tego systemu polegająca na zdolności do dostarczania wody do miejsc jej użytkowania w niezbędnej ilości, o odpowiedniej jakości i wymaganym ciśnieniu, o każdej porze dogodnej dla użytkownika, w określonych warunkach istnienia i eksploatacji systemu w ciągu założonego czasu eksploatacji*” [8]. Metody analizy niezawodności zostały również znormalizowane [10].

W świetle obecnego stanu nauki SZW traktowany jest, jako system biotechniczny, co oznacza, iż na jego działanie mają wpływ zarówno czynniki techniczne, jak i czynniki związane z otoczeniem i środowiskiem (np. jakość wody w źródle).

W analizach niezawodności przyjęto, że systemem składa się z elementów (podsystemów, układów, ugrupowań), które tworzą całość pełniącą określoną funkcję i współdziałają ze sobą posiadając pewną komunikację. Element podstawowy to dostatecznie samodzielna i wyraźnie wyodrębniona część systemu, podsystemu i obiektu [1].



Rys. 2 Schemat blokowy SZW [11]

Fig. 2 Flow diagram of Water Supply System [11]

Każdy SZW (rys. 2.) zbudowany jest z Podsystemu Produkcji Wody (PsPW) i Podsystemu Dystrybucji Wody (PsDyW). Wszystkie analizy zawarte w tym opracowaniu dotyczą Podsystemu Produkcji Wody, na który składają się:

- Podsystem Ujmowania Wody (PUjW);
- Podsystem Pompowania Wody I^o (PI^oPOW);
- Podsystem Uzdatniania Wody (PUzW);
- Podsystem Pompowania Wody II^o (PII^oPOW).

Do cech specyficznych SZW można zaliczyć :

- wysoki stopień skomplikowania;
- losowy charakter zdarzeń wpływających na funkcjonowanie systemu;
- występowanie wszystkich rodzajów uszkodzeń (nagle, stopniowe, wykrywalne, trudne do zlokalizowania itp.);
- duży stopień automatyzacji i komputeryzacji systemów;
- występowanie zmiennych struktur niezawodnościowych (nadmiar lub niedobór wody, ciśnienie dzienne i nocne itp.) [12].

1.3. Stan wiedzy w zakresie rachunku kosztowego

Śledząc publikacje o tematyce rachunkowości, można zauważyć, że jedna z koncepcji rachunku kosztów – rachunek cyklu życia produktu (ang. Life Cycle Cost – LCC) znalazł szczególne zastosowanie w zarządzaniu kosztami. Norma PN-EN 60300-3-3 definiuje LCC jako „łączny koszt ponoszony w cyklu życia wyrobu”. Rachunek ten opiera się na założeniu, że każdy obiekt w czasie swojego istnienia przechodzi przez pewne fazy życia i w każdej z tych faz generowane są inne, charakterystyczne przychody i koszty [13]. Celem analizy LCC jest ustalenie przyszłych kosztów, na podstawie przyjętego modelu.

Badacze określili, że rachunek cyklu życia produktu dotyczy nie tylko produktów zakładów wytwórczych, ale można je również zastosować dla układów technicznych. Potencjał analiz LCC został zastosowany w badaniach układów technicznych wielu gałęzi przemysłowych. Przykładem może być branża transportowa [14, 15].

Zagadnienie optymalizacji kosztowej z zastosowaniem analiz LCC znalazło również zastosowanie w badaniach instalacji pompowych [16, 17]. Stowarzyszenia takie jak Hydraulic Institute i Europump stworzyły w USA i w Europie program oszczędnego gospodarowania energią w układach pompowych (ENERSAVE). W Polsce Krajowa Agencja Poszanowania Energii również zajęła się tym problemem i w ramach prowadzonych badań określiła, że optymalnie działający obiekt pompowy powinien [17]:

- w każdej chwili dostarczać wymagany strumień cieczy;
- mieć wysoką dyspozycyjność i niezawodność pracy;
- mieć niskie koszty eksploatacyjne.

Jako optymalny układ pompowy określono taki, który posiada racjonalne znamionowe parametry pracy, najbardziej ekonomiczny sposób regulacji, najmniejsze zużycie energii elektrycznej oraz najmniejsze łączne koszty inwestycyjne i eksploatacyjne w założonym czasie użytkowania.

Analizy kosztowe zostały również zastosowane w ocenie ekonomicznej efektywności oczyszczalni ścieków [3]. Podobnie jak w pozostałych dziedzinach, badania uwzględniały kalkulację nakładów inwestycyjnych i przewidywanych kosztów eksploatacji bazując na danych rzeczowych zarejestrowanych w przeszłości w przedsiębiorstwach komunalnych. Prowadzone analizy uwzględniały efekty użytkowe oczyszczalni ścieków taki jak ochronę środowiska przed zanieczyszczeniem, umożliwienie użytkowania zasobów wodnych dla różnych celów, ochronę budowli wodnych itd.

Dokonany przegląd literatury wskazuje, że w wielu dziedzinach coraz częściej poszukuje się rozwiązań optymalnych w oparciu o analizy kosztowe, głównie rachunek LCC z wykorzystaniem założeń teorii niezawodności. Jednakże takiego podejścia nie zastosowano jeszcze dla układów wodociągowych w tym Stacji Uzdatniania Wody (SUW).

2. Cel analiz

Za istotę prowadzonych badań przyjęto opracowanie nowoczesnego aparatu badawczego (modelu) pozwalającego wykorzystać aktualny poziom rozwoju teorii niezawodności i LCC. Model ten będzie precyzyjnie opisywał i optymalizował funkcjonowanie systemów wodociągowych, których działanie determinowane jest przez czynniki losowe. Będzie to nowoczesne, zintegrowane narzędzie stanowiące opis procesów eksploatacyjnych, w którym uwzględnione zostaną jednocześnie cechy techniczne, technologiczne i ekonomiczne każdej grupy urządzeń technicznych, budującej system wodociągowy w tym przypadku Stacji Uzdatnia Wody (SUW).

Celem niniejszych badań jest wykazanie, iż w bieżących działaniach operacyjnych jak i podejmowanych decyzjach, w zakresie modernizacji urządzeń SUW, wykorzystanie wyników analiz technicznych, ekonomicznych i niezawodnościowych (ATEN) pozwala racjonalnie zarządzać infrastrukturą techniczną.

3. Metodyka badań

Biorąc pod uwagę zaproponowane połączenie czynników związanych z niezawodnością oraz kosztem cyklu życia, analiza działania SUW powinna być prowadzona dwuetapowo. Pierwszy etap obejmuje analizy niezawodnościowe systemów wodociągowych. Podstawą warsztatu naukowego prowadzonych analiz jest aplikacja teorii prawdopodobieństwa, statystyki oraz metoda dekompozycji [7,8]. Zostały one omówione w dalszych punktach pracy. Drugi etap stanowi dokonanie rachunku kosztów cyklu życia.

3.1. Założenia teorii niezawodności

Eksploatatorzy układów wodociągowych często niejako intuicyjnie określali kryterium niezawodności. Niezawodność systemów wodociągowych próbowano osiągnąć poprzez zapewnienie odpowiednich rezerw poszczególnych elementów np. zapewnienie niezależnych źródeł wody surowej czy rezerwowych pomp w pompowniach. Takie działania zwiększały pewność działania układów, jednak nie gwarantowały osiągnięcia wymaganej niezawodności. Koniecznym stało się określenie wskaźników niezawodnego działania poszczególnych elementów i układów systemu wodociągowego [2].

Jak wspomniano w punkcie 1.2, warunki eksploatacji systemu wodociągowego są determinowane przez zdarzenia losowe. Aby móc określać liczbowo zdarzenia przypadkowe (losowe) występujące masowo, należy zastosować teorię prawdopodobieństwa i statystyki liczb. Taka metodyka badawcza pozwala na wnioskowanie o populacji generalnej na podstawie próby losowej. W teorii tej wykorzystuje się również pojęcie zmiennej losowej oznaczającej

wielkość zmienną, której liczbowe rzeczywiste wartości zależą od przypadku. Innymi słowy jest to efekt zdarzenia, którego nie jesteśmy w stanie przewidzieć.

W niezawodności określono również funkcję losową, czyli zbiór zdarzeń elementarnych związanych z danym doświadczeniem. Zmienna losowa ciągła występuje, gdy każdemu elementowi ze zbioru zdarzeń elementarnych (zbiór nieprzeliczalny X) przyporządkuje się wartość ze zbioru liczb rzeczywistych, zaś wartości tego przyporządkowania wypełniają prostą, półprostą lub odcinek, co można zapisać formułą:

$$P_k = P \{ X(u) < x \} = F(x) \quad (1)$$

Rozkład zmiennej ciągłej będzie określony poprzez funkcję gęstości rozkładu $f(x)$ lub poprzez podanie dystrybuanty – funkcji całkowitej rozkładu $F(x)$. Dystrybuantę można opisać zależnością:

$$F(x) = P(X < x) \quad (2)$$

Charakteryzuje się ona następującymi własnościami:

- Dla $x_1 > x_2$ $F(x_2) > F(x_1)$,
- Jeśli $x \rightarrow -\infty$ to $F(x) = 0$,
- Jeśli $x \rightarrow +\infty$ to $F(x) = 1$,
- $P(x_1 < X < x_2) = F(x_2) - F(x_1)$.

Identyfikacja rozkładu zmiennych losowych jest przeprowadzona z zastosowaniem standardowych testów statystycznych takich jak Chi-kwadrat czy testu Kołmogorowa-Smirnowa.

W oparciu o dane eksploatacyjne wyznacza się podstawowe parametry niezawodnościowe zgodnie z poniższymi wzorami [6,7,8,9]:

- średni czas pracy pomiędzy uszkodzeniami T_p

$$T_p = \frac{1}{n_p} \left(T - \sum_{i=1}^{n_o} t_{ni} \right) \quad (3)$$

- średni czas odnowy T_o

$$T_o = \frac{1}{n_o} \sum_{i=1}^{n_o} t_{ni} \quad (4)$$

- intensywność uszkodzeń λ

$$\lambda = \frac{1}{T_p} \quad (5)$$

- intensywność odnowy μ

$$\mu = \frac{1}{T_o} \quad (6)$$

- wskaźnik gotowości K

$$K = \frac{T_p}{T_p + T_o} \quad (7)$$

objaśnienia:

T – analizowany okres eksploatacji obiektu technicznego [h];

n_o – liczba odnów w analizowanym okresie;

n_p – liczba odcinków czasów pracy w analizowanym okresie;

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

W ujęciu niezawodnościowym, ciąg technologiczny uzdatniania SUW zbudowany jest zarówno ze struktur szeregowych jak i równoległych oraz progowych. W wyznaczaniu wartości stacjonarnych wskaźników gotowości zastosowano poniższe zależności:

- dla struktury szeregowej „M z M”

$$K_s = \prod_{i=1}^M K_i \quad (8)$$

- dla struktury równoległej „1 z M”

$$K_s = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - K_i) \quad (9)$$

- dla struktury progowej „n z M”

$$K_s = \sum_{j=0}^m \sum_{\substack{e_1+e_2+\dots+e_M=M-j \\ e_i \in \{0,1\} \\ (i=1,2,\dots,M)}} \prod_{i=1}^M K_i^{e_i} (1 - K_i)^{1-e_i} \quad (10)$$

gdzie:

e_i - zmienna zerojedynkowa określająca stan pracy elementu w j -tym stanie eksploatacyjnym systemu ($e_i=0$, gdy element jest niesprawny lub $e_i=1$, gdy element jest sprawny), K_s - wskaźnik gotowości struktury niezawodnościowej, K_i - wskaźnik gotowości elementu, M - liczba elementów budujących strukturę ($M=m+n$), m - liczba elementów rezerwowych, n - liczba elementów podstawowych.

Przyjęto, że niezawodność systemu wodociągowego, a tym samym niezawodność SUW, będzie zdefiniowana jako możliwość dostarczenia wody w ilości co najmniej równej potrzebom mieszkańców, o wymaganych parametrach jakościowych przy koszcie produkcji akceptowalnym zarówno dla producenta jak i konsumenta. Dla pełniej analizy niezawodnościowej zaaplikowano metodę określania stanów elementów, opisującą za pomocą wskaźników niezawodności poniższe stany eksploatacyjne, definiowane jako [7]:

- stan postoju eksploatacyjnego tj. czas, w którym element pełni funkcję rezerwową, jest w pełni sprawny i w każdym momencie może, w ciągu minimalnego czasu, zostać włączony w cykl pracy;
- stan odnowy tj. czas, w którym element nie pełni swojej funkcji na skutek różnych czynników wynikających z jego niesprawności;
- stan naprawy tj. okres, w którym obiekt podlega naprawie;
- stan postoju technologicznego tj. okres wyłączenia urządzenia z pracy, w celu przeprowadzania procesów technologicznych, wynikających z zasad funkcjonowania lub dla planowanych operacji technicznych.
- stan oczekiwania na naprawę tj. okres, w którym element jest technicznie niezdolny do pracy i pozostaje w stanie postoju do momentu podjęcia naprawy.

W przyjętej metodyce badane elementy są grupowane w układy funkcyjne by w końcowym etapie budować niezawodnościową strukturę eksploatacji całego SUW.

Stacja Uzdatniania Wody jest odnawialnym obiektem technicznym charakteryzującym się długim okresem funkcjonowania, w którym średni czas pracy pomiędzy uszkodzeniami jest znacznie mniejszy od jego trwałości. Stany eksploatacyjne urządzeń pracujących w SUW to procesy stacjonarne z brakiem pamięci, zaś rozkłady czasów pracy tych urządzeń są funkcjami wykładniczymi. W prowadzonych badaniach, w ocenie niezawodności funkcjonowania poszczególnych układów technologicznych SUW, zastosowano metodę dwuparametryczną. W metodzie tej miarą niezawodności jest dowolna para kombinacji dwóch wskaźników, pochodzących ze zbioru trójelementowego (stacjonarny wskaźnik gotowości K , średni czas pracy T_p , średni czas odnowy T_0).

W prowadzonych analizach przyjęto wskaźnik K i czas pracy T_p jako miary niezawodności eksploatacji w pełni charakteryzujące gotowość systemu, układu, struktury czy elementu do realizacji powierzonych mu zadań.

Dokonany przegląd literatury odnośnie aplikacji podstaw teorii niezawodności w ocenie eksploatacji systemów wodociągowych [8,18] wskazuje, iż w oparciu o liczne badania prowadzone w Polsce od ponad 30 lat, wypracowano obowiązujące standardy, które pozwalają na interpretację uzyskanych wielkości parametrów niezawodności [19].

W zależności od wielkości jednostki osadniczej zdefiniowano odpowiednie zalecane wartości parametrów.

Tab. 1 Wymagany poziom niezawodności SZW [19]

Tab. 1 Required reliability level of Water Supply System [19]

Użytkownicy SZW		Poziom dostawy wody Q	f [1/a]	T _o [d]	K _w (SZW)	
Kategoria niezawodności	I	Zakłady przemysłowe, w których przerwa w dostawie wody prowadzi do katastrofy	$Q = Q_n$	Analiza oparta na indywidualnym określeniu wartości wymaganych parametrów niezawodności		
		$\alpha_g Q_n < Q \leq \alpha_{aw} Q_n$				
	II	Aglomeracje miejsko-przemysłowe i miasta Mk > 500 000	$Q = Q_n$	-	-	0,9827329
			$\alpha_{aw} Q_n \leq Q < Q_n$	3	2	0,9991713
			$\alpha_g Q_n < Q \leq \alpha_{aw} Q_n$	0,4	0,75	0,9999932
	III	Miasta 50 000 < Mk ≤ 500 000	$Q = Q_n$	-	-	0,9740959
			$\alpha_{aw} Q_n \leq Q < Q_n$	3	3	0,9987534
			$\alpha_g Q_n < Q \leq \alpha_{aw} Q_n$	0,6	0,75	0,9999863
	IV	Miasta i osiedla 1 000 < Mk ≤ 50 000	$Q = Q_n$	-	-	0,9150137
			$\alpha_{aw} Q_n \leq Q < Q_n$	3	10	0,9972055
			$\alpha_g Q_n < Q \leq \alpha_{aw} Q_n$	1	1	0,9999452
	V	Osiedla Mk ≤ 1 000	$Q = Q_n$	-	-	0,8706849
			$\alpha_{aw} Q_n \leq Q < Q_n$	3	15	0,9939726
			$\alpha_g Q_n < Q \leq \alpha_{aw} Q_n$	2	1	0,9994521

gdzie:

M_k - liczba mieszkańców jednostki osadniczej, obsługiwanych przez dany wodociąg

Q_n - całkowite dobowe zapotrzebowanie na wodę

$\alpha_{aw} = 0,7$ - współczynnik awaryjnego obniżenia dostawy wody

$\alpha_g = 0,2 \div 0,35$ - współczynnik granicznego obniżenia dostawy wody

W celu ustalenia wymaganej wartości wskaźnika K dla wybranego podsystemu, ugrupowania czy struktury należy dokonać niezawodnościowej dekompozycji systemu, a następnie korzystając z wartości przedstawionych w tabeli 1 oraz zależności (8), (9) oraz (10) wyznaczyć wymagane wartości.

Przykładem może być analizowana przez autorki Stacja Uzdatniania Wody. Zaopatruje ona jednostkę osadniczą większą niż 500 000 ludzi, stąd wymagany wskaźnik gotowości K (tabela 1) dla Systemu Zaopatrzenia w Wodę wynosi $K_{SZW} = 0,9827329$. Jako, że dostawa wody do konsumenta jest równie istotna jak jej produkcja, w badaniach założono, że podsystem produkcji wody PsPW (którego głównym elementem jest stacja uzdatniania) jest równoważny niezawodnościowo podsystemowi dystrybucji.

W dekompozycji PsPW wzięto pod uwagę następujące właściwości techniczne SUW (rys. 3):

- uzdatnianie wody odbywa się w dwóch ciągach technologicznych (rys. 4);
- I stopień uzdatniania obejmuje wstępne ozonowanie, koagulację oraz filtrację - układ szeregowy zaś II stopień uzdatniania obejmuje pompownię pośrednią, ozonowanie pośrednie, sorpcję na węglu aktywnym i dezynfekcję - ugrupowania szeregowe (rys. 5);
- I stopień uzdatniania odbywa się w dwóch równoległych układach (rys. 6);
- każdy układ zbudowany jest z ugrupowań technologicznych (rys. 7);
- ugrupowanie Koagulacji i Sedymentacji składa się z grup technologicznych takich jak szybkie mieszanie, flokulacja, sedymentacja (rys. 8).

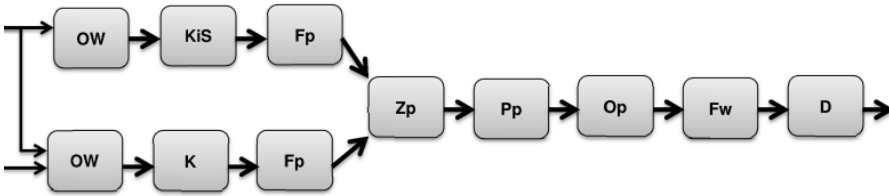
Na tej podstawie wyliczono wymagane wartości wskaźnika gotowości dla każdego z układów i ugrupowań (tabela 2).

Tab. 2 Wartości wymaganego wskaźnika K dla poszczególnych ugrupowań

Tab. 2. Summary of required values of indictor K for each group

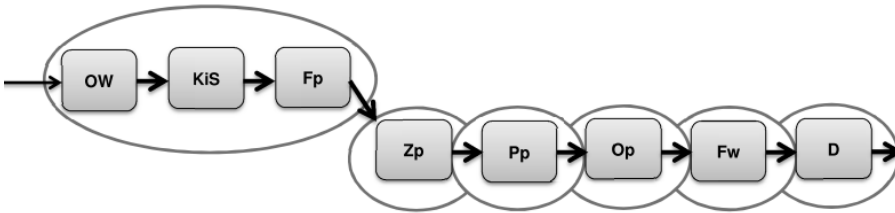
Symbol	Rodzaj	Ilość elementów	Postać funkcyjna	Wartość wymagana K
K_w	Struktura szeregowa podsystemu produkcji i podsystemu dystrybucji wody	2	$\sqrt[2]{K_{SZW}}$ (11)	0,9827329
K_{w1}	Struktura szeregowa układów uzdatniania wody; I st. uzdatniania , II st. uzdatniania	5	$\sqrt[5]{K_w}$ (12)	0,9965225
K_{w2}	Struktura równoległa ciągów technologicznych I st. uzdatniania	2	$1 - \sqrt{1 - K_{w1}}$ (13)	0,9410295
K_{w3}	Struktura szeregowa układów technologicznych budujących jeden z ciągów I st. uzdatniania	3	$\sqrt[3]{K_{w2}}$ (14)	0,9799436
K_{w4}	Struktura szeregowa grup technologicznych budujących ugrupowanie technologiczne w I st. uzdatniania	2	$\sqrt[2]{K_{w3}}$ (15)	0,9966290

Poniżej przedstawiono graficzny zapis dekompozycji systemu.



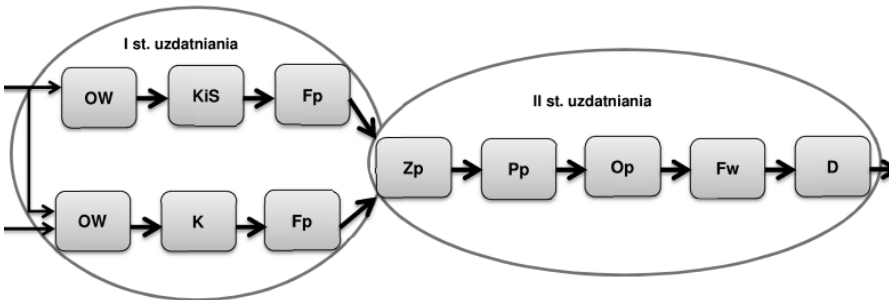
Rys. 3 Schemat technologiczny SUW

Fig. 3 Flow diagram of Drinking Water Treatment Plant



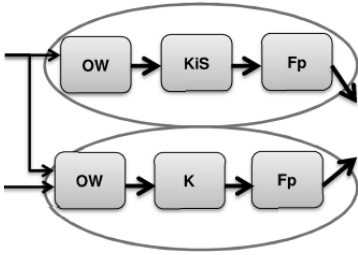
Rys. 4 Ugrupowania i układy budujące jeden ciąg technologiczny

Fig. 4 Groupings and systems which build one of the technological subsystems



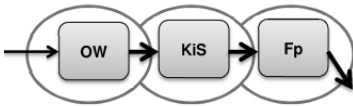
Rys. 5 Podział na stopnie uzdatniania

Fig. 5 The division into treatment steps



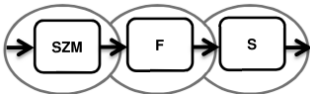
Rys. 6 Podział I stopnia uzdatniania

Fig. 6 The division of 1st treatment step



Rys. 7 Podział jednego z układów I stopnia uzdatniania

Fig. 7 The division of the one of the 1st treatment step subsystems



Rys. 8 Podział ugrupowania Koagulacji Sedymentacji (KiS)

Fig. 8 The division of the Coagulation & Sedimentation grouping

3.2. Założenia teorii rachunku kosztów

W literaturze można odnaleźć definicję M. Parkina [20] brzmiącą: „System ekonomiczny jest organizacją produkującą dobra lub usługi”. System Zaopatrzenia w Wodę jest systemem technicznym, stworzonym na potrzeby produkcji wody dla mieszkańców danej jednostki osadniczej, W związku z powyższym można uznać, że SZW jest systemem ekonomicznym i podlega prawom rządzącym w ekonomii.

Czerpiąc z dokonań badaczy innych dziedzin technicznych [13,14,15] autorki niniejszej pracy określiły, że w analizach niezawodnościowo-kosztowych systemów wodociągowych największe zastosowanie mają; rachunek kosztów życia (LCC) oraz model rachunku kosztów działań (ang. Activity Based Costing – ABC) R. Coopera i R. Kaplana [21].

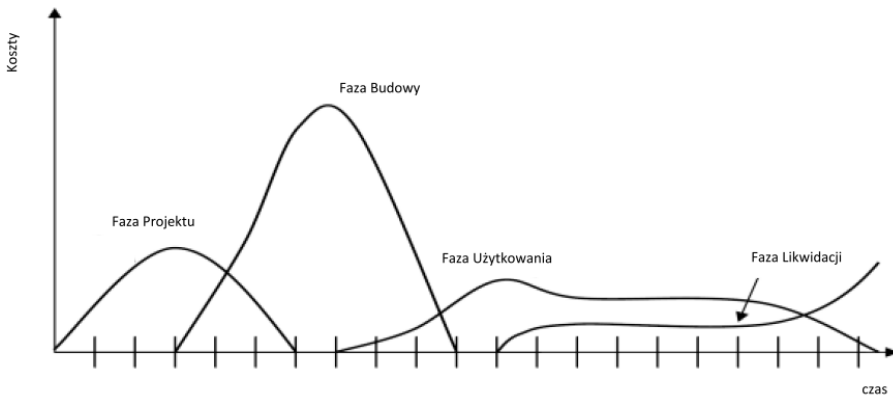
3.2.1. Teoria rachunku kosztów cyklu życia (LCC)

Koncepcja wyznaczania LCC opiera się na założeniu, że każdy produkt czy obiekt przechodzi przez kilka faz życia. W każdej z tych faz występują charakterystyczne przepływy pieniężne w tym koszty [5,14,15,21]. Celem analizy LCC jest określenie przyszłych kosztów w oparciu o przyjęty model.

Teoria LCC opiera się na założeniach, że kolejne etapy istnienia obiektu czy produktu to:

- Faza Projektu,
- Faza Budowy,
- Faza Użytkowania,
- Faza Likwidacji.

W poszczególnych fazach koszty ponoszą: Inwestor (koszt projektu, budowy), Użytkownik (koszty utrzymania i użytkowania układu) i Społeczeństwo (zakup produktu, utylizacja odpadów, wpływ na zdrowie społeczeństwa). Największa część kosztów LCC zwykle związana jest z końcową fazą życia, jednak największa możliwość optymalizacji kosztów całkowitych LCC występuje w fazie projektu i eksploatacji.



Rys. 9 Rozkład kosztów w poszczególnych fazach cyklu życia, Źródło [14]

Fig. 9 Costs' distribution in each life cycle phase, Source: [14]

Na podstawie dokonanego przeglądu literatury ustalono, że optymalnym będzie zastosowanie modelu analitycznego LCCA (ang. - Life Cycle Cost Analysis) D.G. Woodwarda [5]. Określił on, że koncepcja LCC oparta jest o: określenie elementów, których koszty będą nas interesować, określenie struktury kosztów, oszacowanie połączeń kosztów

i określenie opisu/wzoru LCC. W swoich publikacjach określił on wymagane ośmioetapowe podejście do analiz kosztów cyklu życia:

- I. Ustalenie profilu działania w tym rozważenie alternatywnych rozwiązań, jeśli analiza dotyczy projektowanych obiektów;
- II. Ustalenie czynników wykorzystania wpływających na sposób użytkowania, jeśli analiza dotyczy projektowanych obiektów?

- III. Określenie wszystkich czynników kosztotwórczych;
- IV. Zidentyfikowanie kluczowych parametrów kosztowych;
- V. Wyliczenie wszystkich kosztów przy obecnie obowiązujących cenach;
- VI. Uwzględnienie zakładanych stóp inflacji;
- VII. Zdyskontowanie wartości kosztów;
- VIII. Sumowanie zdyskontowanych kosztów w celu określenia wartości bieżącej netto.

Model ten może być zastosowany dla określenia kosztów nowoprojektowanych obiektów/ układów, jak również dla ustalenia kosztów użytkowanych już obiektów.

Analiza LCC jest zatem połączeniem aspektów ekonomicznych i technicznych oceny obiektu technicznego w prognozowanym czasie jego funkcjonowania.

Biorąc powyższe pod uwagę ustalono, że na potrzeby prowadzonych badań równanie określające koszt cyklu życia obiektu przyjmuje postać (16):

$$LCC = CF_p + CF_b + CF_{uz} + CF_{ut} \quad (16)$$

gdzie:

CF_p – przepływy pieniężne w fazie projektu;

CF_b – przepływy pieniężne w fazie budowy;

CF_u – przepływy pieniężne w fazie użytkowania;

CF_{di} – przepływy pieniężne w fazie utylizacji.

Wymienione koszty fazy projektu, budowy i utylizacji są relatywnie łatwe do zidentyfikowania, jednakże określenie kosztów związanych z fazą użytkowania jest znacznie bardziej skomplikowane. By móc je wyznaczyć zastosowano rachunek kosztów działań (ABC).

3.2.2. Teoria rachunku kosztów działań (ABC)

Dla możliwości porównywania i oceny użytkowanych i projektowanych obiektów i układów uzasadnionym jest zaaplikowanie modelu rachunku kosztów działań (ABC). Model ten zakłada przypisanie kosztów ogólnych i wykonania działań do zasobów (np. obiektów, układów, urządzeń) [21]. Wykorzystuje on przyczynowo - skutkową relację pomiędzy czynnikami generującymi koszty, a działaniami. Koncepcja ABC pozwala na rzeczywiste rozliczenie kosztów pośrednich, gdyż grupowane są one według działań operacyjnych, czyli przyczyny ponoszenia kosztów.

W przypadku układów SUW działania rodzące koszty to: prace konserwacyjne, prace związane z naprawą i wymianą uszkodzonego sprzętu, czynności technologiczne np. płukanie filtrów, mycie komór. Aby ustalić całkowity koszt fazy użytkowania należy wziąć pod uwagę koszt materiałów (części zamienne, woda technologiczna), koszty pracy i energii z nią powiązane.

3.2.3. Rachunek przepływów pieniężnych i wartości pieniądza w czasie

Jednym z aspektów analiz LCC jest fakt, iż muszą one uwzględniać zmianę wartości pieniądza w czasie. Koszty występują w różnych okresach i muszą zostać sprowadzone do tego samego punktu w czasie. Proces dyskontowania umożliwia przeliczenie przyszłych przepływów pieniężnych na wartości obecne. Poniższe równanie przedstawia zależność pomiędzy dzisiejszą a przyszłą wartością pieniędzy [21]:

$$PV = \frac{FV}{(1+r)^t} \text{ [zł]} \quad (17)$$

gdzie:

PV (Present Value) – wartość obecna przepływu pieniężnego [zł];

FV (Future Value) – wartość przyszła [zł];

r – stopa dyskonta [bezwymiarowa];

t – okres czasu [lata].

Zgodnie z wytycznymi Unii Europejskiej (UE) dla dużych projektów [22] stopa dyskontowa dla Polski wynosi 0,05.

W określeniu horyzontu czasowego użytkowania układów wodociągowych, również posłużono się wytycznymi UE [23]. Dla projektów wodociągowych horyzont ten wynosi 30 lat zaś dla stacji pompowych i obiektów żelbetowych jest to 50 lat. Dla wyposażenia technicznego czas ten określono na 15 lat.

W rachunkowości funkcjonuje pojęcie przepływów pieniężnych (CF ang. Cash Flow), które ma również zastosowanie w prowadzonych dla SZW analizach kosztowych. Mianem przepływów pieniężnych określa się wpływy i wydatki środków pieniężnych i ich ekwiwalentów w jednostce, jakie nastąpiły w okresie objętym rachunkiem [24]. W przypadku systemów wodociągowych przepływy pieniężne to wpływy i wypływy środków w przedsiębiorstwie wodociągowym. CF dzieli się na nakłady pieniężne (wydatki) np.

w fazie projektowania, budowy, modernizacji, koszty generowane w czasie użytkowania obiektu i wpływy np. oszczędności z niższego zużycia energii czy dochód ze sprzedaży złomu z demontażu urządzeń.

Całkowita wartość każdej fazy życia jest bilansem wszystkich przepływów pieniężnych, które w niej wystąpiły, przy czym wydatki zapisywane są ze znakiem minus, zaś dochody ze znakiem plus.

Biorąc powyższe pod uwagę, zdyskontowany bilans wszystkich przepływów pieniężnych (PVCF ang. Present Value of Cash Flow) jest opisany wzorem:

$$PVCF = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^n} \text{ [zł]} \quad (18)$$

gdzie:

PVCF - wartość obecna przepływów pieniężnych [zł];

CF_t – przepływy pieniężne netto w okresie t [zł];

r – stopa dyskonta [bezwymiarowa];

n – liczba okresów eksploatacji [bezwymiarowa].

Jak już wcześniej stwierdzono większość przepływów pieniężnych związanych z LCC obiektów SUW związana jest z ponoszeniem kosztów (wydatków) przez przedsiębiorstwo wodociągowe (m. in. koszt projektu, budowy, utrzymania). Zyskiem zaś może być oszczędność wynikająca ze zmian, które pociągną za sobą np. mniejsze zużycie energii, mniejszą uszkodzalność, a co za tym idzie niższe koszty utrzymania, zastosowanie bardziej wytrzymałych materiałów, co wydłuży okres użytkowania itp.

Owe oszczędności można rozpatrywać na dwa sposoby. Niewątpliwym jest, iż największe koszty ponoszone są w Fazie Budowy i Użytkowania, jednakże większość kosztów cyklu życia jest konsekwencją decyzji podjętych w Fazie Projektu. Faza koncepcji daje największe możliwości rozważenia różnych wariantów projektu, tak by móc wybrać

wariant charakteryzujący się najmniejszym LCC przy założonym poziomie niezawodności. Stanowi to jeden ze sposobów uzyskania oszczędności.

Druga możliwość to dokonanie analizy LCC dla pracujących układów i rozważenie ich modernizacji, zastąpienia czy likwidacji.

Jak wspomniano we wprowadzeniu niniejszej pracy, w Polsce od ponad 20 lat obserwuje się malejący trend zapotrzebowania na wodę. Przedsiębiorstwa wodociągowe zmuszone są do poszukiwania optymalnego rozwiązania, które zapewniłoby poziom niezawodności SUW na żądanym poziomie i pozwoliło zredukować koszty produkcji tak by cena wody była akceptowalna zarówno dla konsumenta jaki i samego przedsiębiorstwa. Eksploatatorzy SUW stają przed problemem czy podjąć decyzję o remoncie istniejących obiektów czy też dokonać likwidacji części majątku tak, by nie ponosić kosztów utrzymania przewymiarowanego systemu. Dodatkowo w przypadku podjęcia decyzji o remoncie należy zdecydować czy poddać remontowi wszystkie obiekty czy dokonać modernizacji urządzeń poprzez zredukowanie ich liczby i zastąpienie wydajniejszymi odpowiednikami.

W wolnorynkowych firmach proces modernizacji linii produkcyjnej niesie za sobą zmiany obejmujące np. redukcję kosztów zużycia energii, konieczność zwiększenia wydajności produkcji, czy też zwiększenie poziomu atrakcyjności produktu itp. Wszystko to wpływa na cenę produktu końcowego. W ekonomicznym ujęciu po procesie modernizacji oczekuje się wzrostu rentowności przedsiębiorstwa, a co za tym idzie zwiększa się zysk firmy (występują dodatnie CF).

Cechą charakterystyczną układów wodociągowych jest fakt, iż nie każdy proces modernizacji skutkuje zyskami pieniężnymi (dodatnimi przepływami), gdyż cena produktu finalnego po modernizacji nie ulega gwałtownej zmianie, a koszty utrzymania mogą pozostawać na podobnym poziomie. Przykładem może być modernizacja filtra piaskowego (naprawa żelbetowych ścian, zamontowanie nowoczesnego drenażu, wymiana złoża, zamontowanie nowoczesnych przepustnic z automatycznym sterowaniem), która niewątpliwie wpłynie na zmniejszenie awaryjności filtra (modernizacja poprawia sprawność techniczną obiektu), jednak zysk z tego tytułu jest pomijalnie mały. Wynika to z następujących czynników:

- zdarzenia eksploatacyjne związane z nieprzewidzianymi awariami występują rzadko więc zysk z ich mniejszej częstotliwości jest skrajnie niski;
- sam proces modernizacji skutkuje ujemnym CF, gdyż wiąże się on z kosztem robót, które musi ponieść przedsiębiorstwo;
- największy koszt Fazy Użytkowania generowany jest w czasie procesu płukania
- a po modernizacji nie ulega on zmniejszeniu gdyż płukanie jest niezbędną czynnością technologiczną.

Co więcej, wspomniane płukanie filtra odbywa się średnio co 24 h i związane jest z kosztem; płac pracowników bezpośrednio zaangażowanych w proces płukania, kosztem energii zużywanej przez pompy płuczące, kosztem zużytej wody płuczacej. Stąd wniosek, że aby zoptymalizować koszt Fazy Użytkowania należy przeanalizować ilość obiektów, mając na uwadze konieczność zapewnienia wymaganej niezawodności i wydajności układu.

Można, więc stwierdzić, że w przypadku części układów wodociągowych zyskiem można określić obniżenie kosztów i nakładów poprzez redukcję uzasadnionej ilości obiektów optymalizując ich użytkowania (wykorzystanie obiektów w zakresie maksymalnych parametrów projektowych), pamiętając że każde działanie eksploatatora generuje koszty.

Tak, więc w analizie korzyści wynikających z rozważanych zmian należy zawsze uwzględnić specyfikę działania przedsiębiorstwa wodociągowego, gdyż dla różnych ugrupowań zysk może być interpretowany odmiennie.

3.3. Zastosowane narzędzia analityczne

Materiały eksploatacyjne zebrane w czasie badań stanowią duży zbiór danych o zdarzeniach eksploatacyjnych odnośnie każdego z urządzeń pracujących na analizowanym SUW. W celu wyznaczenia parametrów niezawodnościowych poszczególnych elementów jak również struktur, grup, ugrupowań i podsystemów, wykorzystano program komputerowy *Plusk* [7]. Stworzono go na potrzeby badań niezawodnościowych układów technicznych. Jego wykorzystanie zapewnia możliwość wykonywania obliczeń z dużą dokładnością, co jest istotne w określaniu wartości wskaźników niezawodności. Program *Plusk* pozwala również na analizę niezawodnościową dowolnego scenariusza działania badanego układu, tzn. na symulowanie działania struktury „n z M” gdzie „M” to liczba istniejących elementów, a „n” liczba elementów, które przewiduje się, że będą działać.

4. Aplikacja przedstawionej metodyki dla SUW

Jednym z głównych celów prowadzonych badań jest zidentyfikowanie i określenie wszystkich przepływów pieniężnych związanych z każdym elementem SUW. Bazując na dokumentacji przedsiębiorstwa wodociągowego, normatywnych wyliczeniach kosztorysowych, na doświadczeniu autorów, oraz analizując dokumentację analogicznych stacji, określono wpływy i wypływy pieniężne związane z działaniem SUW. Przedstawiona poniżej analiza struktury kosztów odnosi się do pracujących obiektów. Analogicznie można rozpatrywać warianty budowy nowych lub modernizacji istniejących elementów.

4.1. Przepływy pieniężne fazy projektu

Określenie kosztu fazy projektu można dokonać na dwa sposoby:

1. W oparciu o obowiązujące Rozporządzenie [25] gdzie określono, iż dla zakładów uzdatniania wody wartość prac projektowych stanowi 4,5 – 6,0 % W_k , gdzie:

$$W_k = \sum L \cdot C_j \quad (19)$$

W_k – wartość kosztorysowa robót;

L – liczba jednostek sprzedmiarowanych robót;

C_j – cena jednostkowa roboty podstawowej.

Przy ustalaniu cen jednostkowych robót stosuje się ceny jednostkowe robót określone na podstawie danych rynkowych, w tym danych z zawartych wcześniej umów lub powszechnie stosowanych, aktualnych publikacji.

2. W oparciu o rzeczywiste ceny podane w ofertach wykonawców, które w obecnych realiach są znacznie niższe niż założone w kosztorysie inwestorskim. Koszt fazy projektowania to głównie koszt projektu architektoniczno-budowlanego wraz z ekspertyzami i pracami geodezyjnymi oraz uzyskanie pozwolenia na budowę. W tej fazie należy zwrócić szczególną uwagę na przeprowadzenie analiz niezawodnościowo-kosztowych, gdyż błędne założenie ilości obiektów, ich uszkodzalności, trwałości i zasad eksploatacji będzie bardzo trudne do naprawienia w pozostałych fazach życia obiektu.

4.2. Przepływy pieniężne fazy budowy

Na koszty tej fazy składają się przede wszystkim:

1. Koszty związane bezpośrednio z zakupem i montażem materiałów i urządzeń;
2. Wartość robót budowlano-montażowych;
3. Wartość zamontowanych maszyn i urządzeń;
4. Wartość zużytych bezpośrednio materiałów, robocizny bezpośredniej;
5. Opłaty związane z realizacją budowy (koszty pozwoleń);
6. Koszty przygotowania terenu pod budowę;
7. Wynagrodzenie na pełnienie nadzoru autorskiego i inwestorskiego;
8. Koszty prób montażowych i rozruchu technologicznego;
9. Koszty ubezpieczeń budowy.

W przypadku istniejących obiektów koszt tej fazy można określić bazując na dokumentacji powykonawczej i normatywnych wyliczeniach kosztorysowych.

4.3. Przepływy pieniężne fazy użytkowania

Przepływy związane z tą fazą są ściśle związane z rodzajem analizowanego obiektu.

Dla obiektów żelbetowych (osadniki grawitacyjne, zbiorniki, komory, złoża filtracyjne) i żelbetowych z wyposażeniem mechanicznym (komory z mieszałkami, osadniki ze zgarniaczami) głównymi czynnikami kosztotwórczymi będą czynności eksploatacyjne takie jak płukanie w przypadku filtrów lub mycie i czyszczenie w przypadku komór i zbiorników).

W tym czasie, zgodnie z koncepcją rachunku kosztów działań (ABC), generowane są koszty. W przypadku tych obiektów optymalizacja najczęściej dotyczy ich ilości.

Dla urządzeń mechanicznych takich jak: pompy dawkujące, chloratory itp. koszty będą związane przede wszystkim z wykonywaniem planowych napraw i przeglądów oraz z uszkodzalnością tych urządzeń. Czynniki te opisuje niezawodnościowy wskaźnik – czas odnowy (T_o). Istotnym jest, aby zdarzenia eksploatacyjne wpływające na wartość ww. wskaźnika były właściwie skategoryzowane tak, by opisywały wskazane w punkcie 3.2 niniejszej pracy, stany eksploatacyjne (stan postoju eksploatacyjnego, odnowy, naprawy, postoju technologicznego, oczekiwania na naprawę). Takie zgrupowanie pozwoli zoptymalizować czas np. przeglądów i/lub umożliwi porównanie różnych typów tego samego urządzenia, tak by móc rozważyć ewentualną wymianę na typ tańszy w eksploatacji.

Dla zespołów pompowych, osuszaczy powietrza czy ozonatorów CF czynnikami kosztotwórczymi są koszty zużywanej energii elektrycznej, koszty obsługi profilaktycznego i koszty wywołane awariami. Należy przy tym podkreślić, iż koszty energii stanowią główny koszt utrzymania tych urządzeń. Optymalizacja układu zbudowanego

z urządzeń tego typu będzie przede wszystkim oparta o rozważenie możliwości np. współpracy silnika z przemiennikiem częstotliwości (dla układów pompowych), zastąpienia urządzeniami mniej energochłonnymi czy optymalizacja parametrów pracy istniejących maszyn.

W czasie określania CF dla Fazy Użytkowania należy również ująć należne podatki i koszty ogólne przedsiębiorstwa, wyznaczone zgodnie z rachunkiem ABC.

Faza użytkowania często obejmuje również remonty i modernizacje. W trakcie ich planowania korzystnym jest przeanalizowanie różnych scenariuszy dalszego działania systemu uwzględniając wymaganą niezawodność i optymalizację kosztową jego dalszego działania.

4.4. Przepływy pieniężne fazy utylizacji

CF tej fazy to głównie koszt robót demontażowych wraz z utylizacją. W przypadku urządzeń występuje zysk w postaci przychodu ze sprzedaży złomu.

Dla obiektów kubaturowych takich jak galerie filtrów, osadniki itp. można rozważyć również przebudowę / likwidację budynków, co mogłoby skutkować kolejną oszczędnością - obniżeniem podatku od nieruchomości. Są to jednakże decyzje strategiczne, które muszą być podjęte w oparciu o szerokie badania prognozujące planowaną moc produkcyjną całego SZW.

5. Połączona analiza techniczna, ekonomiczna i niezawodnościowa (ATEN)

Głównym celem prowadzonych badań jest ocena scenariuszy dalszej eksploatacji przewymiarowanych układów uzdatniania wody. W dostępnej literaturze nie zdefiniowano dotychczas wskaźnika opisującego łącznie czynniki niezawodnościowe i kosztowe. W ramach prowadzonych badań, zaproponowano by takim parametrem był wskaźnik opisujący prawdopodobieństwo ekonomicznej gotowości eksploatacji (R).

Autorki proponują zastosowanie następujących wskaźników:

- **ekonomiczny wskaźnik gotowości operacyjnej (R_e)** dla przeciętnej produkcji analizowanego systemu opisany wzorem:

$$R_e = \frac{K_o \cdot CF_o}{K_n \cdot CF_w} \quad (20)$$

gdzie:

K_o – prawdopodobieństwo działania struktury „x z y”, gdzie „x” to liczba działających obiektów niezbędna dla przeciętnej produkcji wody, zaś „y” to liczba obiektów zdolna do pracy;

CF_o – suma przepływów pieniężnych związana z obiektami zdolnymi do pracy;

K_n – prawdopodobieństwo działania struktury „x z y”, gdzie „x” to działających obiektów niezbędna dla przeciętnej produkcji wody zaś „y” to liczba wszystkich istniejących obiektów;

CF_w – suma przepływów pieniężnych, które wystąpią kiedy cały układ zostanie doprowadzony do stanu użyteczności;

- **celowy wskaźnik gotowości operacyjnej (R_c)** dla maksymalnej produkcji przy jednoczesnym najniższym wskaźnikiem gotowości operacyjnej K , wyższym od wymaganego (zgodnie z tabelą 2)

$$R_t = \frac{K_s \cdot CF_s}{K_m \cdot CF_w} \quad (21)$$

gdzie:

K_s – prawdopodobieństwo działania struktury, która charakteryzuje się najniższym wskaźnikiem K , który jest wyższy od wymaganego;

CF_s – suma przepływów pieniężnych związana ze strukturą, która charakteryzuje się najniższym wskaźnikiem K , który jest wyższy od wymaganego;

K_m – prawdopodobieństwo działania struktury „x z y”, gdzie „x” to działających obiektów niezbędna dla maksymalnej produkcji wody zaś „y” to liczba wszystkich istniejących obiektów;

- Bazując na powyższych założeniach i symbolach określono **krytyczny wskaźnik gotowości operacyjnej (R_c)**

$$R_c = \frac{K_o \cdot CF_o}{K_n \cdot CF_w} \quad (22)$$

6. Podsumowanie

1. W niniejszym artykule zaprezentowano nowatorskie połączenie analizy technicznej, ekonomicznej i niezawodnościowej (ATEN) w odniesieniu do pracy stacji uzdatniania wody. Autorki zaproponowały zastosowanie nowego wskaźnika gotowości operacyjnej (R). W silnie rezerwowanych układach z nadmiarem mocy, celowy wskaźnik gotowości operacyjnej (R_t) opisuje w jakim stopniu rozpatrywany układ jest optymalny. Im wartość wskaźnika bliższa wartości 1,00 tym układ jest lepiej wykorzystywany.
2. Większość polskich przedsiębiorstw wodociągowych mierzy się z problemem koniecznych optymalizacji eksploatowanych SUW. Niniejsza praca jest kontynuacją badań, które mają na celu opracowanie modelu niezawodnościowo-kosztowego dla układów wodociągowych. Model ten może zostać wykorzystany jako narzędzie wspierające w procesie decyzyjnym eksploatatora SUW.
3. Niewątpliwym jest, iż poszukiwania nowych naukowych rozwiązań bieżących problemów eksploatatorów systemów wodociągowych prowadzi do rozwoju teorii niezawodności i ekonomii, które wspierane przez zaawansowane oprogramowanie komputerowe umożliwia zastosowanie teorii w praktyce.

Niniejszy artykuł został przygotowany w ramach Projektu pt. „System informatyczny wspomagający optymalizację i planowanie produkcją i dystrybucją wody przeznaczoną 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.

Bibliografia

- [1] Tchórzewska – Cieślak B. *Niezawodność i bezpieczeństwo systemów komunalnych na przykładzie systemu zaopatrzenia w wodę*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2008
- [2] Biegunis S. , Miłaszewski R. *Metody optymalizacyjne w wodociągach i kanalizacji*, Wydawnictwo naukowe PWN Warszawa 1993
- [3] Fundacja Ekonomistów Środowiska i Zasobów Naturalnych pod redakcją Cyglera M i R. Miłaszewskiego, *Materiały do studiowania ekonomiki zaopatrzenia w wodę i ochrony wód*, Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko Białystok 2008
- [4] Lange O. *Optymalne decyzje; zasady programowania*, Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1967.
- [5] Woodward D. Life cycle costing- theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management, Vol. 15, No. 6, pp. 335-344, 1997*
- [6] Zimoch I., Szymik-Gralewska J. Risk assessment methods of water supply system in terms of reliability and operation cost, Conference Urban Water 2014, 27th to 29th May 2014, Algarve, Portugal
- [7] Zimoch I. *Zintegrowana metoda analizy niezawodności funkcjonowania i bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę: Monografia habilitacyjna*, Wydawnictwo Politechnika
- [8] Kwietniewski M., M. Roman, H. Kłoss-Trąbaczkiewicz *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*; Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1993
- [9] Rak J.: *Wybrane zagadnienia niezawodności i bezpieczeństwa w zaopatrzeniu w wodę*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2008.
- [10] Polski Komitet Normalizacyjny (PKN): PN-EN 60300-3-3: Zarządzanie niezawodnością. Część 3-3: Przewodnik zastosowań. Szacowanie kosztu cyklu życia. 2005.
- [11] Denczew S. *Niezawodność funkcjonowania i niezawodność bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę na przykładzie m. st. Warszawy*, Warszawa 2002, files.pwi.edu.pl/files/denczew.doc
- [12] Lubowiecka T. Wiczysty A. Bednarczyk T.: O potrzebie wprowadzenia probabilistycznych metod badania i projektowania systemów zaopatrzenia w wodę. Konferencja Naukowo-Techniczna pt. Aktualne problemy badawcze, projektowe i eksploatacyjne wodociągów i kanalizacji. Wydawca Przedsiębiorstwo INSTAL-compakt Sp. z o.o. Kraków 1995.
- [13] Niziński S., Żółtowski B. *Zarządzanie eksploatacją obiektów technicznych za pomocą rachunku kosztów*, Wydawnictwo Makar, Olsztyn - Bydgoszcz 2002
- [14] Dziaduch I., Analiza kosztów okresu istnienia (LCC) obiektu technicznego w aspekcie jego niezawodności, *Logistyka*, 2/2011
- [15] Ulatowski W. Analiza kosztów urządzeń infrastruktury tramwajowej w pełnym cyklu życia, *Eksploatacja* 9/2007

- [16] Zimoch I. Analiza niezawodności jako narzędzie optymalizacji warunków techniczno-technologicznego funkcjonowania stacji uzdatniania wody: *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2006, nr 11, s. 78-81.
- [17] Jędral W. *Efektywność energetyczna pomp i instalacji pompowych*, Krajowa Agencja poszanowania Energii S.A, Warszawa 2007.
- [18] Guikema S. Pate-Cornell Component choice for managing risk in engineered systems with generalized risk/cost functions, *Reliability Engineering and System Safety* pp. 227-238, 2002
- [19] Wieczysty A. i inni *Metody oceny i podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę*, Komitet Inżynierii Środowiska PAN, Kraków 2001
- [20] Parkin M. *Foundations of Macroeconomics*, wydawnictwo Addison Wesley Publishing Company
- [21] Sierpiska M., Niedbala B. *Controlling operacyjny w przedsiębiorstwie, centra odpowiedzialności w teorii i praktyce*, PWN, Warszawa 2003
- [22] Komisja Europejska Przewodnik do analizy kosztów i korzyści projektów inwestycyjnych
- [23] Komisja Europejska, Guide to Cost-Benefit Analysis of Major Projects in the context of EC Regional Policy.
- [24] Uchwała nr 5/11 Komitetu Standardów Rachunkowości z dnia 10.05.2011 r. w sprawie przyjęcia poprawionego krajowego standardu rachunkowości nr 1 „Rachunek przepływów pieniężnych”
- [25] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 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.

