

**Rafał BRODZIAK, Jędrzej BYLKA,  
Andrzej URBANIAK, Przemysław ZAKRZEWSKI**

INSTYTUT INŻYNIERII ŚRODOWISKA  
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

INSTYTUT INFORMATYKI  
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

## **STEROWANIE PRACĄ POMP W SIECIACH WODOCIĄGOWYCH ZASILANYCH Z WIELU ŹRÓDEŁ**

PUMPS CONTROL IN MULTI-SOURCES  
WATER SUPPLY SYSTEM

*The paper presents the simulation case study of pumps control in multisources water supply system to optimize the cost. The concept of sustainable development require to define the criteria and limitations of the control in water systems. The article describes water transport systems and provides control criteria. Analysis of the cost components were described in situations when water from surface and underground sources is used. An exemplary water supply system consisting of two sources of water was analyzed. Calculations were performed in computing environment using the EPANET and MATLAB software. The studies considered various scenarios for the control for which total cost of water was calculated. It highlighted the need to use multiple computer software tools and presented the concept for their integration.*

### **1. Wprowadzenie**

Zadaniem systemu wodociągowego jest dostarczenie wody o dobrej jakości przy odpowiednim ciśnieniu, w sposób ciągły i niezawodny. Ze względu na ograniczenia techniczne związane z zasobami wody oraz możliwościami dostawczymi sieci, systemy wodociągowe często zasilane są z więcej niż jednego źródła. W celu zwiększenia niezawodności pracy systemu źródła te powinny korzystać z niezależnych zasobów wód podziemnych lub powierzchniowych.

Jednym z problemów eksploatacji związanych z wykorzystaniem wielu źródeł wody w sieci wodociągowej jest sterowanie - ustalanie ile wody będzie tłoczona z każdego ujęcia. Poszczególne źródła różnią się pod względem wielkości zasobów wody, jej jakości oraz kosztów wydobycia i uzdatniania. Optymalna praca systemu zaopatrzenia w wodę wymaga opracowania algorytmów sterowania elementami sieci wodociągowej [1]. Znaleźnienie najlepszych rozwiązań możliwe jest z wykorzystaniem modeli hydraulicznych sieci wodociągowych oraz wybranych metod optymalizacji [2].

## 2. Sterowanie układami w systemach zaopatrzenia w wodę

Głównym celem sterowania systemem zaopatrzenia w wodę jest konieczności zagwarantowania dostawy wody w odpowiedniej ilości oraz pod odpowiednim ciśnieniem dla wszystkich mieszkańców. Ograniczenia procesu sterowania mają różną naturę i mogą wynikać m.in. z:

- technicznych możliwości urządzeń wykonawczych (maksymalnych wydajności pomp, regulatorów, filtrów itp.) oraz sterujących (np. przetwornic częstotliwości, zaworów dławiących), jak i zdolności produkcyjnych stacji uzdatniania wody (maksymalnej możliwej oraz minimalnej koniecznej do zapewnienia ciągłości procesu produkcji na stacji uzdatniania wody);
- zasobów wody w danym źródle - w ramach pozwolenia wodno-prawnego przyznaje się zasoby dyspozycyjne - określa się maksymalną ilość wody jaka może być pobierana z zasobów wód podziemnych lub zbiorników powierzchniowych;
- zobowiązań wynikających z umów - jeżeli przedsiębiorstwo zakupuje wodę z źródeł zewnętrznych (od innych przedsiębiorstw) w umowie mogą być ustalone minimalne oraz maksymalne ilości wody jakie należy pobrać z danego źródła.

Aktualnie często poruszonym problemem jest uwzględnienie idei zrównoważonego rozwoju we wszystkich obszarach ludzkiej działalności, w tym również dla systemów zaopatrzenia w wodę. Wymagania wobec systemów wodociągowych można wyrazić w postaci kryteriów technicznych, ekonomicznych, środowiskowych oraz prawnych, których uwzględnienie w sterowaniu procesami powinno spowodować realizację założeń zrównoważonego zarządzania [3]. Właściwe zdefiniowanie składowych wymienionych grup kryteriów jest konieczne w celu opracowania kompleksowych algorytmów sterowania systemami wodociągowymi. Kryteria techniczne odpowiadają za bezpieczną eksploatację urządzeń i minimalizują ewentualne uszkodzenia w przypadku awarii. Ograniczenia w procesie sterowania mogą wynikać z maksymalnych możliwych wydajności urządzeń, takich jak zakres mocy w przypadku pomp, bądź mogą wiązać się z hydrogeologicznymi aspektami pracy ujęcia, np. kryterium technicznym jest poziom lustra wody w studni, który powinien być utrzymywany w ściśle określonym zakresie. Kryteria ekonomiczne wynikają z potrzeby efektywnego gospodarowania finansami i dla eksploatowanych systemów związane są ściśle z zakupem energii elektrycznej oraz opłatami środowiskowymi. Zmniejszenie kosztów eksploatacji sprowadza się do konieczności zmniejszenia zużycia energii i realizowane jest poprzez przygotowanie odpowiednich algorytmów sterowania, których zastosowanie pozwala na pracę pomp w optymalnym zakresie.

Kryteria prawne związane są z konieczności spełnienia ustalonych w prawie zasad działania przedsiębiorstwa wodociągowego oraz określania wydajności ujęcia wody. Jednym z aktów prawnych obowiązujących w Polsce jest pozwolenie wodno-prawne, na podstawie którego można szacować: maksymalną ilość wody jaką można pobrać ze studni w ciągu godziny, średnią zalecaną ilość wody jaką można pobrać w ciągu dnia oraz maksymalną ilość wody jaką można pobrać ze studni w ciągu roku [4]. Kryteria środowiskowe nawiązują wprost do założeń koncepcji zrównoważonego zarządzania. Definicja idei zrównoważonego rozwoju została wprowadzona przez Światową Komisję Środowiska i Rozwoju w 1987 roku w raporcie pt. „Our Common Future” (tzw. raportcie Brundtland). Zgodnie z tym dokumentem:

„Zrównoważony rozwój to rozwój, który zaspokaja potrzeby obecne, nie zagrażając możliwościom zaspokojenia potrzeb przyszłych pokoleń. Opiera się na dwóch podstawowych pojęciach:

- pojęciu potrzeb, w szczególności podstawowych potrzeb najbiedniejszych na świecie, którym należy nadać najwyższy priorytet;
- pojęciu ograniczeń, narzuconych zdolności środowiska do zaspokojenia potrzeb obecnych i przyszłych przez stan techniki i organizacji społecznej.” [5]

Przykładowym ograniczeniem kryteriów środowiskowych będzie uwzględnienie ograniczenia związanego z eksploatacją zasobów wodnych, np. wprowadzenie limitu wielkości poboru wody w ciągu roku, czy wydajności godzinowej studni.

Problemy sterowania urządzeniami zainstalowanymi w układach transportujących wodę mogą być opisywane w postaci zadań optymalizacji. Zadanie optymalizacji powinno uwzględniać: definicję wektora zmiennych decyzyjnych  $x$ , funkcję celu  $f(x)$  oraz ograniczenia, które definiują zbiór  $D$  decyzji dopuszczalnych. Matematycznie problem można zapisać w następujący sposób [6]:

minimalizować (lub maksymalizować) funkcji celu  
 $f(x)$   
 przy ograniczeniach  
 $x \in D$ .

Przykładowo, funkcja celu może mieć charakter ekonomiczny (np. maksymalizacja ilości wody wtłoczonej do sieci ze źródeł z których końcowy koszt produkcji wody jest najtańszy) lub charakter jakościowy (np. maksymalizacja ilości wody wtłoczonej do sieci ze źródeł o najlepszej jakości wody). Ograniczenia mogą być sformułowane w postaci: równań dynamiki systemu (równanie zachowania masy oraz zachowania energii); ograniczenia zadania systemu (ograniczenia związane z koniecznością dostawy wody pod odpowiednim ciśnieniem) lub ograniczeń technicznych systemu. Zbiór decyzji możliwych do podjęcia (dopuszczalnych -  $D$ ), stanowi zbiór wszystkich możliwych nastaw sterowania urządzeniami wykonawczymi. Rozwiązaniem zadania optymalizacji jest wektor  $x^*$ , spełniający wszystkie narzucone ograniczenia i minimalizujący (lub maksymalizujący) funkcję celu  $f(x)$ .

### 3. Ekonomiczne kryterium sterowania

Kryterium ekonomiczne stanowi jedno z ważniejszych w sterowaniu urządzeniami w sieci wodociągowej. W kosztach funkcjonowania przedsiębiorstwa wodociągowego można wyróżnić następujące składniki: amortyzacja, materiały, energia, wynagrodzenia wraz z pochodnymi, usługi transportu i wynajem sprzętu, usługi remontowe i konserwacyjne, usługi obce, podatki i opłaty i inne [7]. Odpowiednie sterowanie urządzeniami w sieciach wodociągowych w sposób bezpośredni może przyczynić się przede wszystkim do obniżenia kosztów zakupu materiałów oraz energii elektrycznej oraz w przypadku, gdy steruje się układami zasilanymi z wielu źródeł, kosztów opłat ekologicznych (poprzez minimalizację poboru wody z źródeł dla których opłaty ekologiczne są wysokie) lub zakupu wody od innych przedsiębiorstw (poprzez ustalanie scenariuszy sterowania, w których maksymalizuje się ilości wody włączanej z własnego źródła [8]). Pośrednio poprzez odpowiednie sterowanie urządzeniami można również obniżyć inne koszty funkcjonowania przedsiębiorstwa np. amortyzację (np. poprzez lepsze wykorzystanie zdolności dostawczych istniejących sieci zamiast budowy nowych układów), usługi remontowe i konserwacyjne (np. przy odpowiednim sterowaniu można obniżyć awaryjność sieci wodociągowej) itd. W przykładzie zawartym w artykule uwzględniono jedynie koszty zakupu energii elektrycznej (do zasilania pomp w pompowni) oraz opłat ekologicznych (opłat za korzystanie z wody dla celów bytowo gospodarczych).

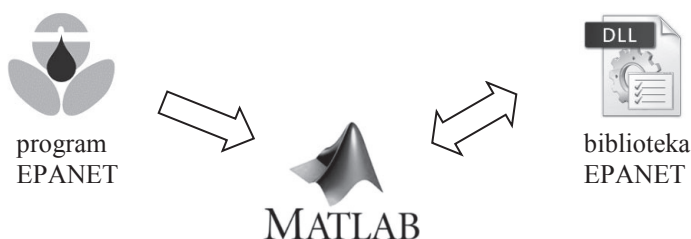
Opłaty za korzystanie z środowiska są uiszczane przez podmioty korzystające z wody podziemnej lub powierzchniowej w ilości większej niż  $5 \text{ m}^3$  na dobę [9]. Stawki opłat za korzystanie z wody zależą od: rodzaju pobieranej wody, ilości pobranej wody na określone zapotrzebowanie, sposobu wykorzystania wody, jakości pobieranej wody, koniecznej technologii uzdatniania wody, jednostkowej stawki opłat oraz współczynników różnicujących, których wartość ustalają Regionalne Zarządy Gospodarki Wodnej. W pracy przyjęto przykładowe wartości wskaźników jednostkowych opłat za korzystanie z wody dla wody podziemnej -  $0,056 \text{ PLN/m}^3$  oraz wody powierzchniowej -  $0,034 \text{ PLN/m}^3$  [10].

Koszty energii elektrycznej zużytej na zagwarantowanie prawidłowego działania systemu zaopatrzenia w wodę wynikają głównie ze zużycia energii przez pompy. Rachunki za energię elektryczną zawierają: składniki zmienne (zależne od zużycia) oraz składniki stałe rachunku (niezależne od zużycia). Całkowita cena energii zależy od wielu składników między innymi: mocy zamówionej, opłat handlowych, opłat za dystrybucję itd. Na potrzeby artykułu przyjęto średnie wskaźniki kosztu energii elektrycznej na poziomie  $0,5 \text{ PLN/kWh}$ , na podstawie danych z komunikatu Urzędu Regulacji Energetyki [11].

## 4. Ekonomiczne kryterium sterowania

### 4.1 Wykorzystane techniki i narzędzia

Model analizowanego układu transportującego wodę został zbudowany w programie EPANET. Oprogramowanie to pozwala na przeprowadzenie symulacji działania układów hydraulicznych w sieciach wodociągowych. Program EPANET został utworzony przez Agencję Ochrony Środowiska (ang. *The Environmental Protection Agency*) Stanów Zjednoczonych Ameryki i jest dostępny na zasadzie domeny publicznej do dowolnych zastosowań. Oprogramowanie działa w środowisku Windows oraz posiada intuicyjny interfejs graficzny. Udostępnione kody źródłowe programu oraz tzw. Programmer's Toolkit, pozwalają na rozbudowanie programu o własne funkcje, wykorzystanie kodów we własnych programach, bądź integrację z innymi narzędziami komputerowymi.

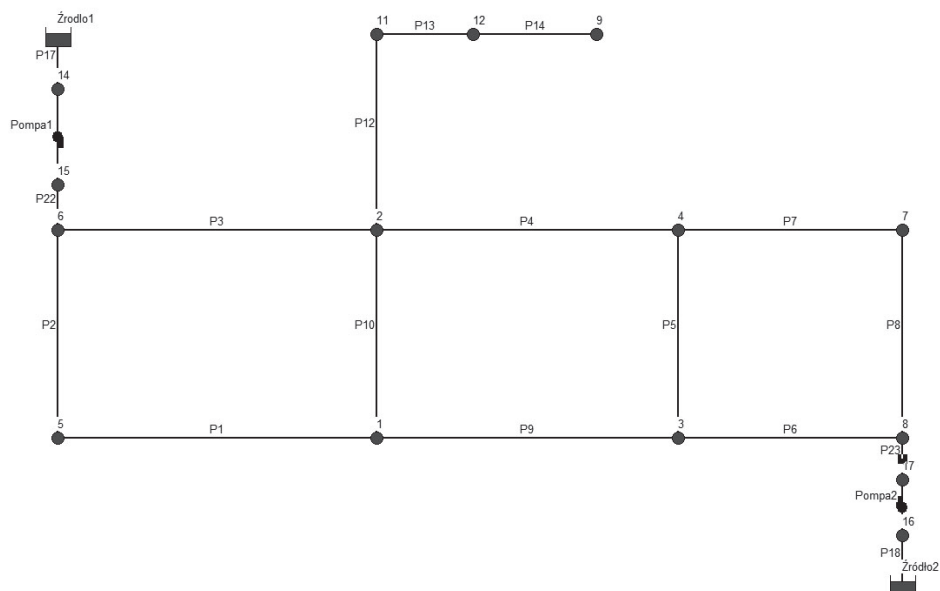


Rys. 1 Koncepcja integracji wykorzystanych narzędzi w środowisku symulacyjnym  
Pic 1. The concept of tools integration in the simulation environment

Udostępniona biblioteka EPANET typu DLL (ang. *Dynamic Link Library*) pozwala na współpracę z 32-bitowymi aplikacjami napisanymi m.in. w językach C/C++, Delphi, Pascal, Visual Basic. W pracy biblioteka programu Epanet została zintegrowana z programem MATLAB. MATLAB to środowisko programistyczne tworzone przez firmę MathWorks i jest przeznaczone do rozwijania algorytmów, wizualizacji i analizy danych oraz prowadzenia obliczeń numerycznych. Program posiada swój własny język za pomocą którego możliwe jest tworzenie własnych programów działających w środowisku MATLAB, pozwala on na odczytywanie zewnętrznych plików i bibliotek, współpracę z bazami danych, przetwarzanie danych, generowanie w postaci wykresów i tabel, zapis wyników do zewnętrznych plików i systemów. Funkcjonalność ta została wykorzystana w celu utworzenia środowiska, które pozwoli na odczytanie utworzonego modelu, a następnie symulowanie jego działania dla zmieniających w kolejnych krokach nastaw przetwornicy częstotliwości pomp. Na rys. 1 został przedstawiony schemat ideowy integracji użytych narzędzi informatycznych.

## 4.2 Opis przykładu

Do celów analiz utworzono przykładowy model układu transportującego wodę, składający się z: 16 odcinków rurociągów, 15 węzłów, 2 zbiorników oraz 2 pomp.



Rys. 2 Schemat analizowanego układu transportującego wodę  
Pic 2. Scheme of analyzed water transport system

Założono, że źródło 1 stanowi ujęcie wody powierzchniowej, a źródło 2 ujęcie wody podziemnej. Sterowanie pompami zasilającymi układ odbywa się za pomocą przetwornic częstotliwości. Na rys. 2 przedstawiono schemat badanego układu transportującego wodę. W tabeli 1 zestawiono parametry przewodów oraz węzłów analizowanego systemu.

Tabela 1. Parametry przewodów oraz węzłów analizowanego układu.  
Table 1. The parameters of pipes and nodes of the analyzed system

Dane o przewodach				Dane o węzłach		
Numer rurociągu	Długość [m]	Średnica [mm]	Chropowatość [mm]	Numer węzła	Rzędna [m]	Rozbiory [m <sup>3</sup> /h]
P1	2765.00	100	0.01	1	50	5
P2	1800.00	150	0.01	2	50	6
P3	2765.00	150	0.01	3	50	5
P4	2615.00	100	0.01	4	50	6
P5	1800.00	100	0.01	5	50	5
P6	1950.00	150	0.01	6	50	5
P7	1950.00	100	0.01	7	50	4
P8	1800.00	150	0.01	8	50	2
P9	2615.00	100	0.01	9	50	2
P10	1800.00	100	100	11	50	1
P12	1700.00	100	0.1	12	50	1
P13	836.00	100	0.1	14	0	0
P14	1075.00	100	0.1	15	0	0
P17	429.36	200	0.01	16	0	0
P18	453.10	200	0.01	17	0	0
P22	391.50	200	0.01			
P23	360.94	200	0.01			

W przykładzie uwzględniano następujące składniki kosztów wody  $K$ : koszty opłat ekologicznych  $K_{op}$  oraz koszty zakupu energii elektrycznej  $K_e$ .

$$K = K_{op} + K_e \quad (1)$$

$$K_{op} = \sum_{i=1}^i Q_i(n_i) \cdot k_{op,i} \quad (2)$$

$$K_e = \sum_{i=1}^i Q_i(n_i) \cdot k_{e,i} \cdot e_i \quad (3)$$

gdzie:

$K$  - całkowity koszt zakupu wody [PLN/h],

$n_i$  - względna prędkość obrotowa wirnika i-tej pompy,

$Q_i$  - ilość wody pobranej z i-tego źródła [m<sup>3</sup>/h],

$k_{e,i}$  - jednostkowy koszt energii, dla i-tego źródła - przyjęto 0,5 [PLN/kWh],

$e_i$  - jednostkowe zapotrzebowanie na moc pompy [kWh/m<sup>3</sup>]

$k_{op,i}$  - jednostkowy koszt opłat ekologicznych dla i-tego źródła - przyjęto na podstawie przykładowych wartości z punktu 3:

kop,1 - koszt zakupu z źródła powierzchniowego - 0,056 PLN/m<sup>3</sup>

kop,2 - koszt zakupu z źródła podziemnego - 0,034 PLN/m<sup>3</sup>

Sieć zasilana jest dwoma pompami o charakterystykach hydraulicznych oraz sprawności przedstawionych na rys. 3. W przykładzie sterowano względną prędkością obrotową wirników w pompie 1 ( $n_1$ ) oraz pompie 2 poszukując takich ich wartości, dla których łączny koszt wody jest najmniejszy. Przy przyjętych założeniach zadanie sterowania sformułowano w następujący sposób.

$$\min K(n_i) = \sum_{i=1}^2 Q_i(n_i) \cdot (k_{e,i} + e_i \cdot k_{op,i}) \quad (4)$$

przy ograniczeniach:  $H_j \geq H_{min}$

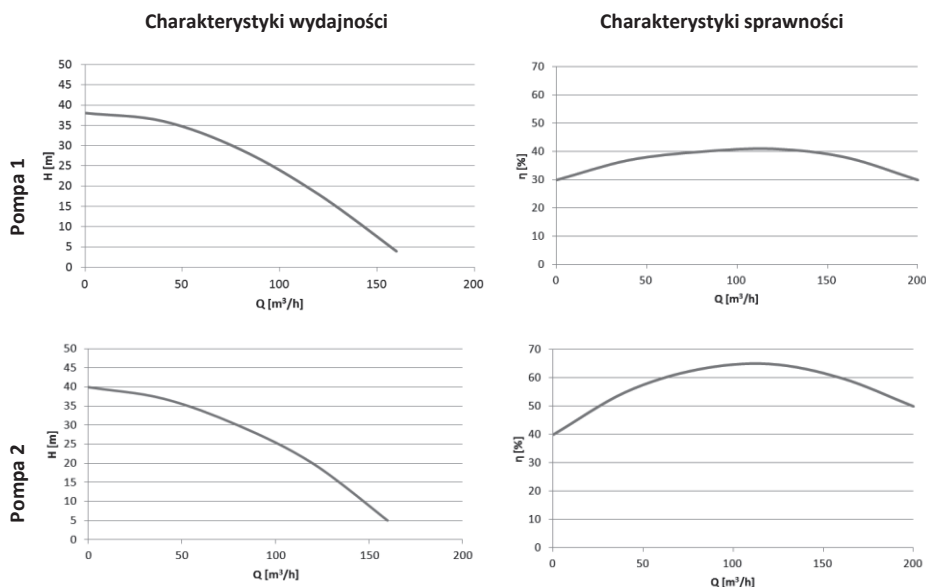
gdzie:

$n_i$  - względna prędkość obrotowa wirników w pompie i-tej

$H_j$  - wysokość ciśnienia w j-tym punkcie poboru wody - obliczona na podstawie modelu hydraulicznego dla zadanych, jako warunki brzegowe poborów wody w węzłach,

$H_{min}$  - wymagane ciśnienie w punkcie poboru wody - przyjęto 30 m H<sub>2</sub>O





Rys. 3 Charakterystyki wydajności oraz sprawności pompy 1 oraz pompy 2 - dla względnej prędkości obrotowej  $n=1$

Pic 3. Characteristics of performance and efficiency of the pump 1 and pump 2

### 4.3 Opis zaproponowanego rozwiązania oraz uzyskanych wyników

Celem przeprowadzanych symulacji było znalezienie najefektywniejszego ekonomicznie scenariusza sterowania - spełniającego warunki opisane równaniem 4 wraz z przyjętym ograniczeniem. Obliczenia realizowano w programie MATLAB w następujących krokach:

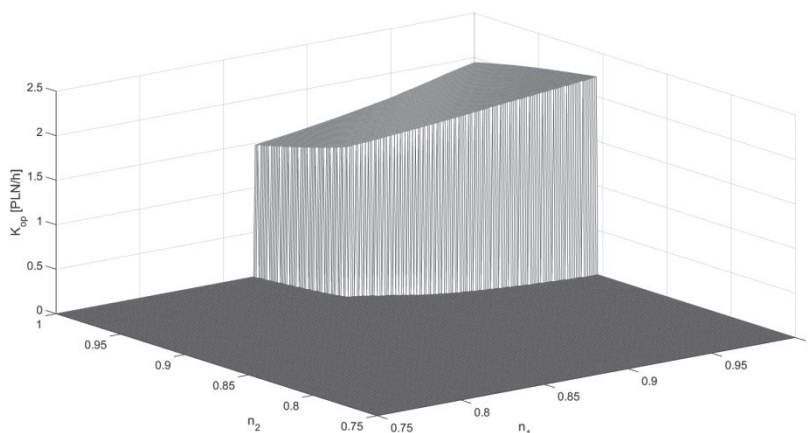
1. Wczytanie struktury sieci, rozbiórów w węzłach oraz ciśnienia w węzłach zasilania w wodę - stałe dane z modelu,
2. Rozwiązanie układu i zapis wyników obliczeń:
  - [a] Nastawa względnych prędkości obrotowych pomp  $n_i$ .
  - [b] Obliczenie ciśnienia w węzłach  $H_j$  oraz kosztów, oraz  $k_{op}$  dla zadanych nastaw  $n_i$ .
  - [c] Sprawdzenie, czy obliczone rozwiązanie należy do zbioru rozwiązań dopuszczalnych - odrzucenie rozwiązań, które nie spełniają ograniczenia zadania  $H_j \geq H_{\min}$
  - [d] Przejście do kroku [a] oraz zmiana nastawy o zadany krok  $\Delta n_i$
3. Znalezienie wartości  $\min K(n_i)$  ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych.

Wartości nastaw prędkości obrotowych pomp zmieniano w przedziałach  $0,75 \leq n_1 \leq 1$  oraz  $0,75 \leq n_2 \leq 1$ , przyjęto krok zmiany  $\Delta n_i = 0,001$ , tj. w pierwszej iteracji kroku [2] założono pracę z pełną prędkością nominalną  $n_1=1, n_2=1$ , w drugiej  $n_1=1, n_2=0,999$  itd. Fragment uzyskiwanych wyników przedstawia tabela 2. Wiersz wypełniony szarym tłem prezentuje wyniki dla których uzyskano najmniejszy koszt całkowity  $K(n_i)$ .

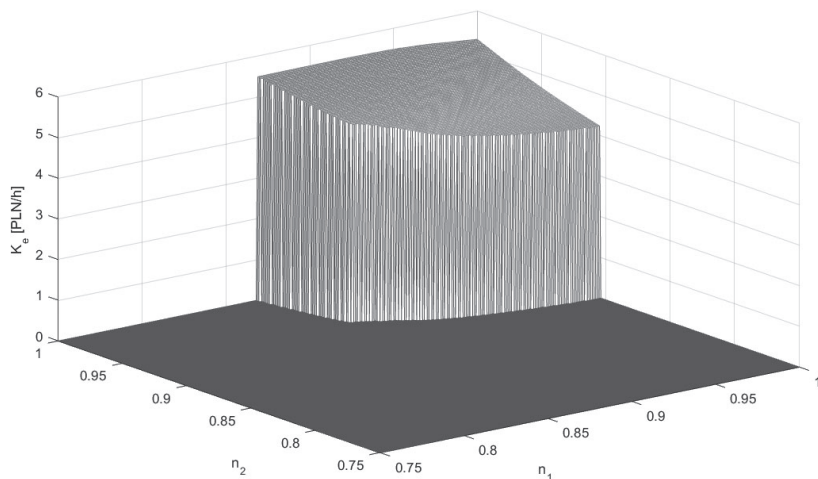
Tabela 2. Wybrane wyniki obliczeń dla analizowanego przykładu.  
Table 2. Selected results of calculations for the analyzed example.

Wariant		Pompa 1			Pompa 2			SUMA
$n_1$	$n_2$	$Q_1$ [m <sup>3</sup> /h]	$k_{e,1}$ [PLN/h]	$k_{op,1}$ [PLN/h]	$Q_2$ [m <sup>3</sup> /h]	$k_{e,2}$ [PLN/h]	$k_{op,2}$ [PLN/h]	$k$ [PLN/h]
1,000	1,000	18,49	2,77	0,62	23,51	2,46	1,31	7,16
1,000	0,999	20,35	3,05	0,69	21,65	2,27	1,21	7,22
.	.	.	.	.	.	.	.	.
0,911	0,953	12,55	1,63	0,43	29,45	2,65	1,65	6,36
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.

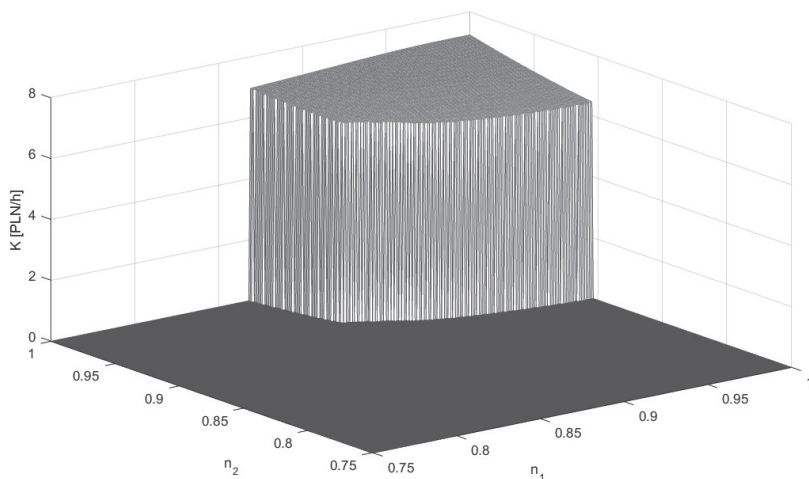
Dla analizowanego przykładu w celu znalezienia najmniejszego kosztu całkowitego wykonano obliczenia dla wszystkich możliwych kombinacji nastaw prędkości obrotowej pomp dla zadanego zakresu zmienności, otrzymując w ten sposób płaszczyzny rozwiązań dopuszczalnych, które przedstawiono na wykresach. Dla zmiennych nastaw prędkości obrotowej oraz utworzono wykres funkcji kosztów opłat środowiskowych (rys. 4), kosztów za energię elektryczną zasilającą pompy (rys. 5) oraz kosztów całkowitych (rys. 6).



Rys. 4. Wykresy opłat środowiskowych  $k_{op}$  w funkcji zmiennych  $n_1$  oraz  $n_2$   
Pic 4. Charts of environmental cost  $k_{op}$  as a function of  $n_1$  and  $n_2$  settings

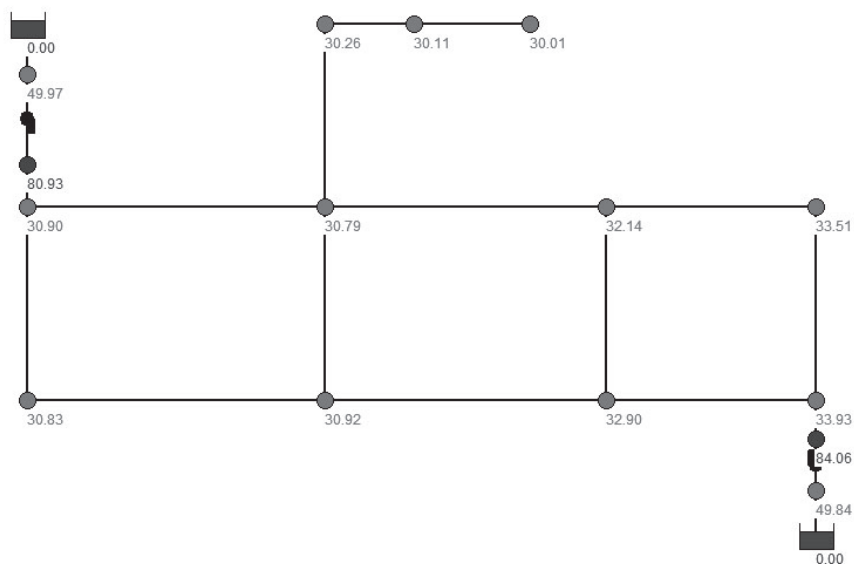


Rys. 5 Wykresy kosztów energii elektrycznej  $k_e$  w funkcji zmiennych  $n_1$  oraz  $n_2$   
Pic 5. Charts of energy cost  $k_e$  as a function of  $n_1$  and  $n_2$  settings



Rys. 6 Wykresy sumarycznych kosztów  $K$  w funkcji zmiennych  $n_1$  oraz  $n_2$   
Pic 6. Charts of total cost  $K$  as a function of  $n_1$  and  $n_2$  settings

Znalezione nastawy prędkości obrotowej pompy 1  $n_1=0,911$  oraz pompy 2  $n_2=0,953$  zostały wprowadzone do modelu EPANET, celem weryfikacji warunku zapewnienia minimalnej wartości ciśnienia we wszystkich węzłach sieci  $H_{min}$ . Uzyskane w symulacji wartości ciśnień zostały umieszczone na schemacie układu transportującego wodę (rys.7).



Rys. 7 Wartości ciśnień w punktach poboru wody znalezionej rozwiązania naniesione na schemat analizowanego przykładu.

Pic 7. Pressures values in the junctions for the found solution on the scheme of analyzed example.

## 5. Uwagi końcowe

W artykule przedstawiono przykład, w którym wyznaczano nastawy sterowania pompami w sieci wodociągowej zasilanej z dwóch źródeł. Jako kryterium optymalizacji przyjęto minimalizację kosztów zasilania sieci wodociągowej określonych jako suma kosztów zakupu energii elektrycznej oraz opłat środowiskowych. Koszt całkowity obliczano dla wszystkich kombinacji nastaw regulatorów pomp (przetwornicy częstotliwości), zmieniających się z dyskretnym krokiem w kolejnych iteracjach obliczeń. Wybierając optymalne rozwiązanie, uwzględniano ograniczenie konieczności dostawy wody pod odpowiednim ciśnieniem i w odpowiedniej ilości dla wszystkich odbiorców. Do celów rozwiązywania zadania utworzono przykład prostej sieci wodociągowej modelowanej w programie EPANET. Rozwiązując zadanie tego typu dla rzeczywistej sieci wodociągowej należało by dodatkowo uwzględnić kilka istotnych czynników.

- Sterując pompą za pomocą przetwornicy częstotliwości, na ogół zadaje się wartość wysokości ciśnienia w punkcie za pompą, przepływu lub częstotliwości prądu w wartości bezwzględnej. Model utworzony w EPANET pozwala jedynie na ustalenie względnej (odniesionej do nominalnej) prędkości obrotowej wirnika pompy.
- W programie EPANET nie ma możliwości wpisania charakterystyk pompy dla różnych prędkości obrotowych wirnika - przyjmuje się jedną krzywą zależności sprawności od przepływu. Założenie to może wpływać na dokładność obliczonych wyników.

- Rozwiązując zadanie obliczono koszty wody, dla różnych wartości względnej prędkości obrotowej pomp. W praktyce, ze względu na ograniczenia silników (ograniczenia termiczne) pompy mogą być regulowane tylko w pewnym określonym przez producenta zakresie częstotliwości. W zadaniu przyjęto, iż wartość względnej prędkości obrotowej pompy może wynosić minimalnie  $n=0,75$  (75% wartości nominalnej) - tylko dla takich wartości szukano rozwiązania. W praktyce wartość ta będzie różna w zależności od typu pompy.
- Należy zwrócić uwagę na to iż, w zadaniu przyjęty krok zmiany częstotliwości wynosił  $= 0,001$  (0,1%). W praktyce może okazać się, iż nie ma możliwości regulacji pompy z tak dużą dokładnością.
- Przedstawiona w artykule metoda rozwiązywania zadania może być użyta dla różnych dowolnych kryteriów oraz ograniczeń. Kryteria te mogą uwzględniać nie tylko koszty opłat ekologicznych oraz zakupu energii, ale również koszty uzdatniania wody.
- W zadaniu rozwiązywano przykład prostej sieci zasilanej z dwóch źródeł. W analogiczny sposób można rozwiązywać zadania optymalizacji, dla dużych rzeczywistych układów wodociągowych. W przypadku obliczania zadania dla dużych układów, przeglądanie wszystkich wariantów może okazać się nieefektywne, dlatego dla takich wariantów można rozważyć zastosowanie wybranej metody optymalizacji, pozwalającej na poszukiwaniu najlepszego rozwiązania.

## Bibliografia

- 1) A. Urbaniak, "Sterowanie złożonych obiektów systemu zaopatrzenia w wodę," *Instal*, no. nr 9, 2014, 56–60
- 2) A. Bałut, R. Brodziak, J. Bylka, and A. Urbaniak, "Technologie IT w realizacji idei zrównoważonego rozwoju w systemach zaopatrzenia w wodę," *Instal*, no. 10, 2015, 76–80
- 3) R. Brodziak and J. Bylka, "The use of computer tools in sustainable management of water intake," in *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften*, Shaker Verlag, 2014, 133–142
- 4) J. Bylka and R. Brodziak, "Kryteria zrównoważonego rozwoju w eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę," *Innowacyjność, kreatywność i rozwój: budownictwo a środowisko*, Z. Bromberek, Ed. Wydawnictwo Zarządu Oddziału PZITB w Poznaniu.
- 5) UN Documents, *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*, 1987
- 6) P. F. Boulous, K. E. Lansey, and B. W. Karney, *Comprehensive Water Distribution Systems Analysis Handbook for Engineers and Planners*. Pasadena, Calif.: American Water Works Assn, 2006
- 7) J. Bylka and H. Bylka, "Wpływ kosztów odmątkowych na poziom cen i stawek w taryfach za wodę i ścieki," presented at the Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód - WODA 2014, Wielkopolski Oddział PZITS Toruń, 2014, 21–38
- 8) R. Brodziak, J. Bylka, P. Zakrzewski, and A. Urbaniak, "A simulation study of minimizing water cost in multisource water distribution system," presented at the The European Simulation and Modelling Conference - ESM'2015, Leicester, UK, 2015, 225–228
- 9) [9] Dz.U. 2001 nr 115 poz. 1229. Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. Prawo wodne.
- 10) *Ewidencja Oplat za Korzystanie ze Środowiska*. [Online] <http://www.oplatzasrodowisko.pl/?mode=za-pobor-wody>. [Dostęp: 06.03.2016].
- 11) *Informacje Prezesa URE w sprawie wskaźnika referencyjnego oraz średnich cen energii elektrycznej i ciepła, Urząd Regulacji Energetyki*. [Online] <http://www.ure.gov.pl/pl/urząd/informacje-ogolne/aktualnosci/6481,Informacje-Prezesa-URE-w-sprawie-wskaznika-referencyjnego-oraz-srednich-cen-ener.html>. [Dostęp: 06.03.2016].