

Agnieszka TRĘBICKA

# EKONOMICZNE ASPEKTY MONITOROWANIA PRACY PODSYSTEMU DYSTRYBUCJI WODY PODCZAS SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

**Agnieszka Trębicka**, dr inż. – Politechnika Białostocka

adres korespondencyjny:

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

ul. Wiejska 45 B, 15-351 Białystok

e-mail: a.trebicka@pb.edu.pl

## THE ECONOMIC ASPECTS OF MONITORING THE WORK OF WATER DISTRIBUTION SYSTEM DURING COMPUTER SIMULATION

**SUMMARY:** The article presents the process of creating a water supply network model with emphasis on the calibration stage, chosen operation parameters of water-supply system in conditions of decreasing demand for water, particularly in small settlement units. The water supply system of Białystok was chosen as an object of the research. Calibration was performed using a computer programs ISYDYW and EPANET.

**KEYWORDS:** calibration, computer simulation, distribution systems, water supply network, water works

---

## Wstęp

Podstawą przeprowadzenia symulacji komputerowych w warunkach normalnej pracy, jak również w sytuacjach awaryjnych analizowanego podsystemu dystrybucji wody, stała się potrzeba zbadania możliwości zachowania się podsystemu na zmiany parametrów hydraulicznych: natężenia przepływu oraz ciśnienia wody przy czym przyjęto założenie, iż podsystem dystrybucji wody (PDW) pracuje jako układ zmienny w czasie. Stąd też zwrócono szczególną uwagę na czasową zmienność ruchu wody. Dlatego też uwzględniono czynnik czasu i poddano analizie wybrane sytuacje, kiedy praca podsystemu odbywa się w warunkach awaryjnych, które najczęściej są przyczyną złego funkcjonowania podsystemu, a przede wszystkim powodują niedobór w dostawach wody. Czas zajścia awarii (zdarzenia), jak i czas jego trwania mają szczególne znaczenie dla określenia negatywnych skutków awarii i skuteczności ewentualnych przedsięwzięć mających na celu zmniejszenie dotkliwości tych zajęć. Możliwość odwzorowania dynamicznego charakteru pracy podsystemu dystrybucji wody to jedna z podstawowych własności, jakie uzyskać można przy wykorzystaniu czasowej i przestrzennej symulacji komputerowej. Wyniki, jakie uzyskano przez powyższy proces pozwalają z kolei na ocenę jakości funkcjonowania rozpatrywanego modelu z punktu widzenia zarówno użytkownika jaki i eksploatatora, które w głównej mierze dotyczą oceny stopnia obciążenia i rezerw poszczególnych podsystemów i obiektów<sup>12</sup>.

## Rola symulacji komputerowej w analizie systemów dystrybucji wody

Zadaniem symulacji komputerowej jest odwzorowywanie i udoskonalanie konkretnych stanów zachowawczych PDW, przy wykorzystywaniu matematycznego modelowania uwzględniającego ekonomiczne i jak najbardziej funkcjonalne aspekty zarówno z punktu widzenia użytkownika jaki i eksploatatora<sup>3</sup>. Przedmiotem zastosowania opisanej metody jest sieć wodociągowa Białegostoku. Aby jak najdokładniej i najbardziej optymalnie realizować powyższy cel, w pracy wykorzystuje się program EPANET i ISYDYW, który umożliwia odzwierciedlenie dynamicznych warunków sieci i jednocześnie oddaje z dużą precyzją dokładność wszelkich wariantów badawczych, będących rozwiązaniem jak i zastosowaniem. Symulacja komputerowa dostarcza

<sup>1</sup> K. Knapik, *Dynamiczne modele w badaniach sieci wodociągowych*, Kraków 2000.

<sup>2</sup> K. Duzinkiewicz, R. Piotrowski, *Modelowanie i monitorowanie systemów wodnych w środowisku Epanet*, Gdańsk 2010.

<sup>3</sup> P.F. Boulous, L.E. Ormsbee, *Explicit network calibration for multiple loading conditoons*, "Journal of Civil Engineering Systems" 1991 t. 8, nr 3, s. 153-160.

narzędzi pozwalających inżynierom wielu specjalności, w tym inżynierom sanitarnym, integrować dane różnych typów, pochodzące z różnych źródeł, przechowywać i zarządzać danymi, wizualizować dane i informacje przy użyciu dynamicznych map, podejmować decyzje związane z zarządzaniem, a także przeprowadzać kompleksowe analizy i modelowanie<sup>4</sup>. Należy zaznaczyć potrzebę realizacji powyższej tematyki pracy, jako że problem badań nad efektywnością pracy PDW, którego podstawą jest wnikliwa analiza eksploatacji poszczególnych elementów, wchodzących w jego skład, nie został dotychczas w pełni rozwiązany. Zakres rozważań prowadzonych w ramach uzyskania jak najbardziej dynamicznego charakteru pracy PDW za pomocą modelowania komputerowego podsystemów dystrybucji wody, nad określeniem wpływu głównych parametrów hydraulicznych, jakimi są ciśnienie wody i natężenie przepływu na prawidłowość ich funkcjonowania w różnych warunkach eksploatacyjnych (normalna praca oraz sytuacja awaryjna) jest jak najbardziej ciekawym i zagadnieniem pod względem badawczym jak i użytkowym<sup>5,6</sup>.

## Metodologia tworzenia modelu w procesie symulacji komputerowej

Przy opracowywaniu modelu przyjęto następujące założenia dotyczące badanego modelu podsystemu dystrybucji wody, a mianowicie<sup>7</sup>:

- przeprowadzenie schematyzacji przestrzennego położenia węzłów i połączeń rurociągów oraz zdefiniowanie ich parametrów,
- opracowanie badawczych modeli zapotrzebowania na wodę dla wybranych miejscowości, które umożliwiły w sposób szczegółowy uwzględnienie przestrzennego rozmieszczenia i specyfikacji struktury użytkowników oraz wartości poboru wraz z obowiązującymi dla nich rozkładami godzinnymi, jak też określenie wypadkowych wartości poboru i ich rozkłady czasowe dla poszczególnych węzłów i dla całego PDW,
- zdefiniowanie celu użytkowania wody i struktury poszczególnych grup użytkowników i określenie obowiązujących rozkładów godzinnych poboru wody,

<sup>4</sup> A. Trębicka, *Zastosowanie technik informatycznych w pracach dotyczących modelowania i symulacji*, „Logistyka” 2011 nr 3.

<sup>5</sup> C.A. Bush, J.G. Uber, *Sampling Design Methods for Water Distribution Model Calibration*, „Journal of Water Resources Planning and Management” 1998 t. 124, nr 2, s. 243-252.

<sup>6</sup> I. Zimoch, *Zastosowanie modelowania komputerowego do wspomagania procesu eksploatacji systemu wodociągowego*, „Ochrona Środowiska” 2008 nr 3.

<sup>7</sup> L.A. Rossman, *EPANET 2 Users Manual*. EPA United States Environmental Protection Agency, Cincinnati 2000.

- opracowanie modelu numerycznego na podstawie danych o systemie zaopatrzenia w wodę i odwzorowanie na nim normalnych warunków eksploatacji, z jednoczesnym przeprowadzeniem przypadków awaryjnych, kiedy warunki SDW należą do szczególnie zmiennych i skomplikowanych. Powyższe założenia zapewniają szeroki dostęp do monitorowania systemów poprzez:
  - tworzenie komputerowych baz danych oraz zarządzanie informacjami i danymi GIS,
  - odwzorowywanie stanów zachowawczych PDW oraz doskonalenie metod komputerowych do kompleksowego zarządzania PDW (efektywne gospodarowanie PDW i w konsekwencji obniżenie kosztów eksploatacji usprawnianego systemu),
  - monitoring ilościowy i jakościowy systemu technicznego i operacyjnego poszczególnych elementów systemów wodociągowych,
  - opracowywanie modeli hydraulicznych PDW działających w czasie rzeczywistym z zastosowaniem modelowania komputerowego,
  - wdrożenie do praktyki eksploatacyjnej i projektowej symulacyjnych modeli przepływu (modeli hydraulicznych).

### Zastosowanie monitoringu w usprawnieniu podsystemu dystrybucji wody miasta Białegostoku

Stworzony model symulacyjny sieci wodociągowej Białegostoku umożliwił odwzorowanie normalnych warunków eksploatacji, ale również pozwolił na przeprowadzenie symulacji różnego rodzaju przypadków awaryjnych, kiedy warunki PDW należą do szczególnie zmiennych i skomplikowanych. Poprzez wprowadzenie powiązania niedoboru ciśnienia i wielkości poboru przez użytkowników, przeprowadzono również symulację sytuacji awaryjnych i deficytu dostawy wody, zwrócono szczególną uwagę, na czasową zmienność ruchu wody. Możliwość odwzorowania dynamicznego charakteru pracy podsystemu dystrybucji wody to jedna z podstawowych własności jakie uzyskać można przy wykorzystaniu czasowej i przestrzennej symulacji komputerowej<sup>8</sup>.

Przeprowadzona symulacja za pomocą programu ISYDYW umożliwiła utworzenie rozbudowanej bazy danych, dzięki której przeprowadzono schematyzację zawartych w bazie informacji i na podstawie obu części wygenerowanie pakietów obliczeniowych oraz wykonanie odpowiednich obliczeń systemów wodociągowych<sup>7</sup>. Pozwoliło to na uzyskanie praktycznie nieogra-

---

<sup>8</sup> K. Knapik, op. cit.

niczonoj liczby modeli obliczeniowych o różnym zakresie dokładności i szczegółowości.

Obliczenia przeprowadzono dla dowolnego fragmentu jak i dla całej doby przy jej podziale na etapy. Wielkość poboru wody dla każdego kroku czasowego obliczana jest indywidualnie dla każdego węzła, na podstawie zadanej wielkości dobowego zapotrzebowania godzinnego rozkładu poboru wody i czynnika redukcyjnego uwzględniającego wpływ niedoboru ciśnienia w stosunku do wymaganej jego wartości. Sieć wodociągowa Białegostoku zasilana jest przez zespół pompowni P1 i P2 o różnych wartościach ciśnienia. Przeprowadzona schematyzacja PDW wskazała na konieczność zbudowania modelu o 108 węzłach i 158 odcinkach. Dla modelu zapotrzebowania uwzględniono jednostki strukturalne o zabudowie mieszkalnej i jednostki o funkcji przemysłowej. Dla każdej z nich ustalono strukturę użytkowników tzn. rodzaj zabudowy, standard wyposażenia sanitarnego, rodzaj i zmianowość przemysłu i odpowiednio do tego zdefiniowano katalogowe rozkłady godzinne.

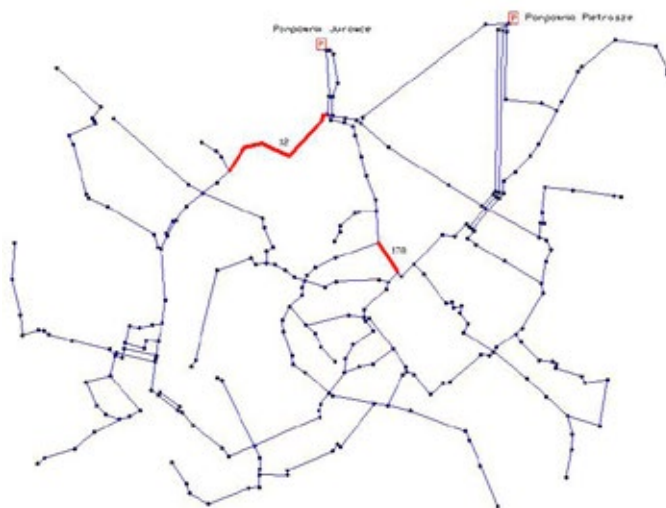
Stworzony model hydrauliczny i jakościowy sieci wodociągowej Białegostoku, stanowi obecnie ważne źródło informacji o eksploatowanym systemie, a jego dynamiczny model systemu dystrybucji wody, okazał się szczególnie przydatny w diagnozowaniu stanu eksploatowanego systemu i opracowywaniu koncepcji rozbudowy bądź modernizacji wodociągów (rysunek 1.B).

## Analiza i ocena zmian zachodzących, na elemencie podsystemu i obszarze PDW ujęciu czasowym na podstawie przeprowadzonych symulacji

Spośród całego układu PDW przeprowadzono obliczenia symulacyjne i ujęto je w postaci serii wariantów. Wykorzystano wyniki obliczeń otrzymanych za pomocą skonstruowanego modelu zapotrzebowania na wodę i obliczeniowego modelu matematycznego analizowanego PDW miasta Białegostoku. Dotyczyły one funkcjonowania PDW<sup>9</sup>. Analizowano zmiany zachodzące, nie tylko w samym elemencie podsystemu, ale również na obszarze całego PDW. Każdy odcinek modelu poddany został dokładnej obserwacji. Każda z rozpatrywanych serii badań została przeprowadzona dla dobowych cykli pracy (od godz. 6 do godz. 6) PDW odpowiadających dobie o średnim zapotrzebowaniu, z podziałem na 15-minutowe kroki czasowe, w ramach oceny funkcjonowania PDW dla różnych zakładanych przypadków oraz w celu oceny skutków hydraulicznych powstałych zdarzeń, w wyniku zaobserwowanych zmian. Wariant odwzorowujący układ hydrauliczny sieci wodociągo-

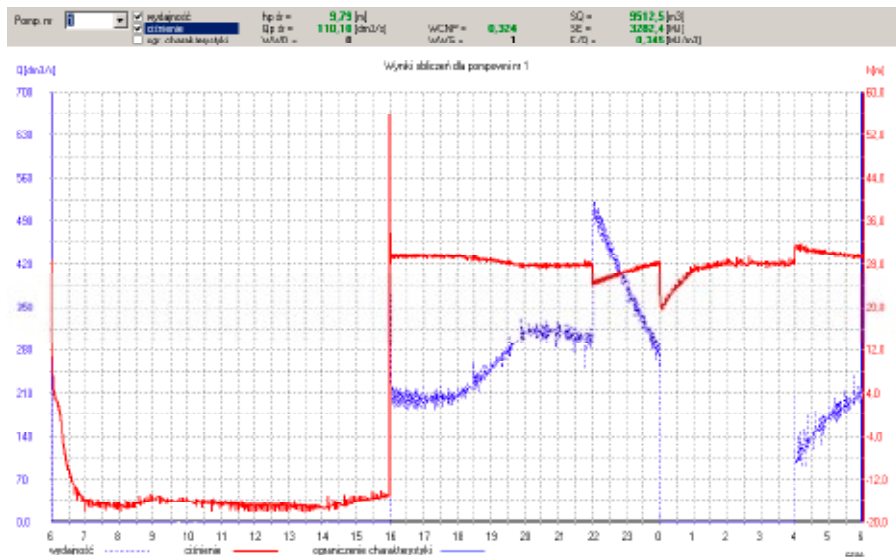
<sup>9</sup> A. Trębicka, op. cit.

wej dla stanu istniejącego, posłużył jako baza do dalszych badań i porównań. Wyniki dla tego układu wykazały odpowiedni poziom układu symulującego normalne warunki eksploatacji PDW, stanowiące poziom odniesienia i porównania dla kolejnych rozpatrywanych serii.

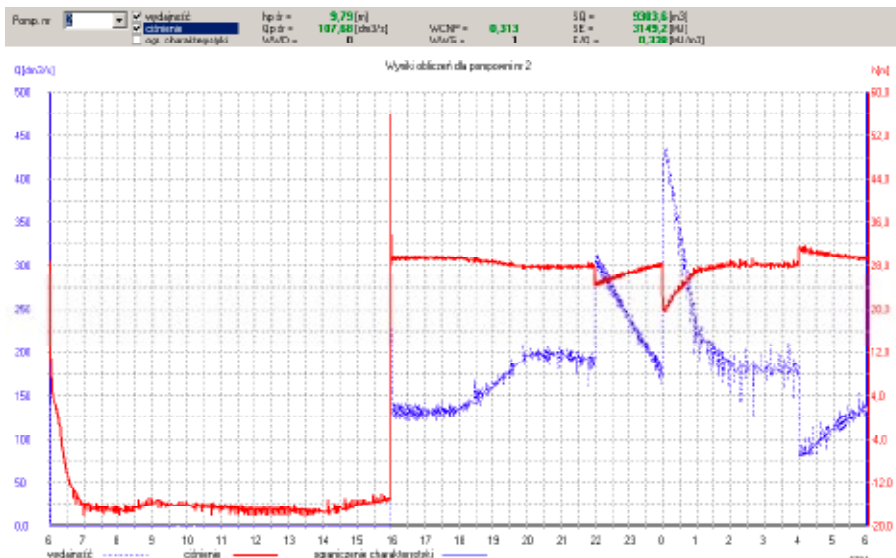


Rysunek 1.B. Schemat PDW Białegostoku z wyróżnionymi badanymi elementami wariantu B

W pracy przedstawia się badania wariantu, które dotyczyły sytuacji ekstremalnych w pompowniach II<sup>0</sup>, zlokalizowanych w węźle nr 1 (stacja wodociągowa Pietrasze) i w węźle nr 23 (stacja wodociągowa Jurówce), jak też i problemów z odcinkami przynależnymi do nich węzłowo. W wariacie oznaczonym jako B5 przyjęto iż zespół pomp P1, P2 i P3 w węźle nr 1 nie pracują w godzinach 6-16, a więc wówczas kiedy układ zaczyna wykazywać swą intensywność (ranne godziny zwiększonego rozbioru H<sub>2</sub>O oraz początek zwiększonego rozbioru po południowego) natomiast pompa P4 jest wyłączona, zaś P5 reprezentuje pełny cykl pracy. Zasilanie PDW realizowane jest w tym czasie przez dwie jednostki pompowe zlokalizowane na stacji Jurówce (węzeł 23). Zauważa się w czasie tej pracy, obniżenie ciśnienia tłoczenia i wzrost wydajności pompowni, różnicę tę bardzo wyraźnie wskazują WCNP (wskaźnik cieniowania nominalnego pompowni). Dla pompowni Pietrasze, poszczególne pompy P1, P2 i P3 wykazują zarówno spadek ciśnienia tłoczenia jak i wydajności ich pracy. Obniżony wskaźnik WWPW (wskaźnik warunków poboru wody) (81,45%) i PWCW (potencjalny wskaźnik ciśnienia wody), (71,1m) oraz PWCP (potencjalny wskaźnik ciśnienia pompowni), (53,8m) są wynikiem niedopuszczalnych warunków poboru wody. Na rysunku 1.B5-5.B5 przedstawiono czasowe przebiegi parametrów awaryjnej pracy pompowni oraz WWPW dla całego układu i czasu symulacji.

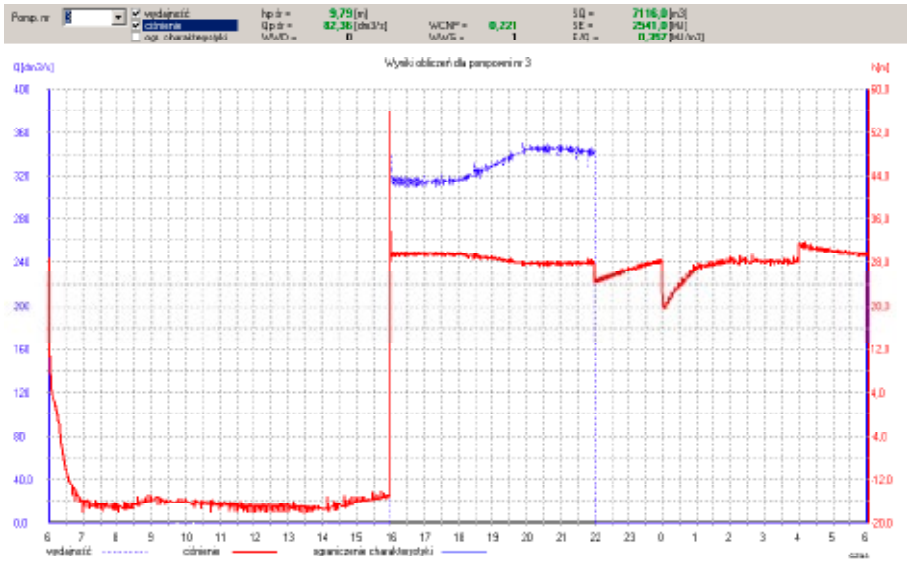


Rysunek 1.B5. Wykres czasowego przebiegu parametrów pracy pompy P1 w pompowni Pietrasze (węzeł nr\_1) dla wariantu B5

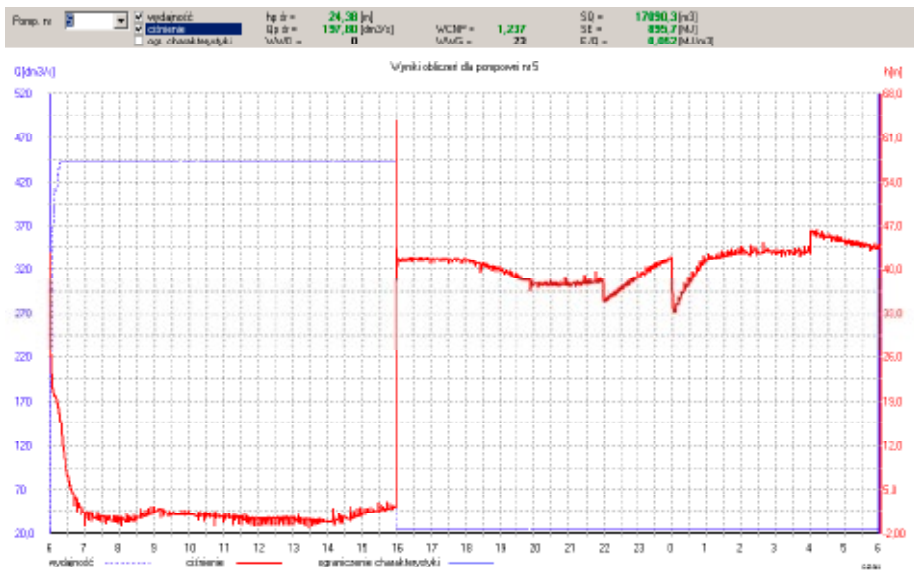


Rysunek 2.B5. Wykres czasowego przebiegu parametrów pracy pompy P2 w pompowni Pietrasze (węzeł nr\_1) dla wariantu B5



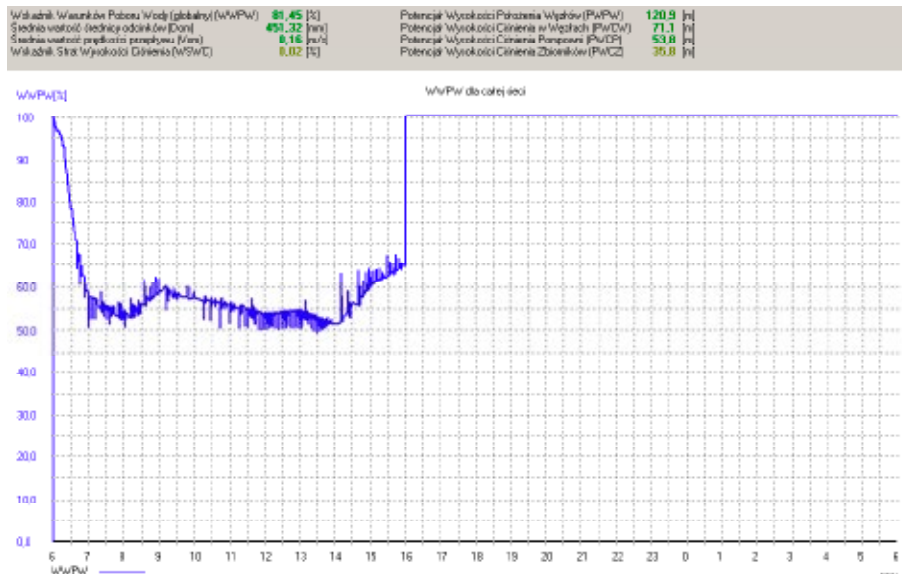


Rysunek 3.B5. Wykres czasowego przebiegu parametrów pracy pompy P3 w pompowni Pietrasze (węzeł nr\_1) dla wariantu B5



Rysunek 4.B5. Wykres czasowego przebiegu parametrów pracy pompy P5 w pompowni Jurowce (węzeł nr\_23) dla wariantu B5





Rysunek 5.B5. Wykres czasowych zmian WWPW (Wskaźnik Warunków Poboru Wody) dla wariantu B5

## Podsumowanie i wnioski

Praca z poprawnie wykonanym i skalibrowanym modelem pozwala na planowanie oszczędności, wynikające z wyeliminowania niewłaściwych inwestycji czy nieprzewidywalnych sytuacji. Dzięki przeprowadzeniu komputerowych symulacji, możliwe staje się przetestowanie różnych rozwiązań, a także porównanie skutków każdego z nich. Wybór rozwiązania zależy od spełnienia kryteriów technicznych oraz ekonomicznych. Rozwój technik komputerowych w ostatnich latach doprowadził do powstania potężnych narzędzi inżynierskich, jakimi niewątpliwie są niektóre oferowane programy. Ich wykorzystanie w praktyce zależy w dużej mierze od świadomości i kwalifikacji kadr, a płynące korzyści są w rzeczywistości niewymierne.

W wyniku przeprowadzonych badań modelowania funkcjonowania PDW miasta Białystok określono następujące wnioski:

1. Dynamiczność modelu pozwoliła na uzyskanie szeregu danych dotyczących funkcjonowania PDW, a w szczególności przypadków zmian wartości natężenia przepływu i ciśnienia wody oraz reakcji PDW wody na wprowadzane modyfikacje.
2. Zaobserwowano, iż prędkości przepływu odbiegają od zalecanych w zależności od wartości średnicy. Jest to wynik systematycznego spadku zużycia wody w systemach dystrybucji miasta.

3. Niepokojąca stała się oscylacja układów pompowych, pojawiająca się w niektórych sytuacjach, co z kolei pomoże w wyeliminowaniu i zwróceniu szczególnej uwagi na zaistniałe skutki.
4. Dominującą cechą uzyskanych wyników pomiarów ciśnienia jest wyraźna jego zmienność w czasie. Poprzez czynnik czasu uzyskano zbilansowanie zasilania i poboru. Określono skutki wybranych stanów PDW poprzez ocenę skuteczności przedsięwzięć zmniejszających ich negatywne oddziaływanie.
5. Przeprowadzone modelowanie dało możliwości bardziej efektywnego sterowania pracą układów pompowych w podsystemach dystrybucji wody. To pozwoli na uzyskanie obniżki kosztów eksploatacji tych systemów.

Przeprowadzona symulacja komputerowa stała się pomocnym narzędziem umożliwiającym rozwinięcie metody wnioskowania o zachowaniu się poszczególnych obiektów rzeczywistych, opracowanego modelu PDW na podstawie obserwacji, działania programu komputerowego ISYDYW, symulującego ich zachowanie. Opierając się na wynikach obliczeń symulacyjnych, dokonano przede wszystkim opracowania warunków pracy, przy różnych stanach awaryjnych.

## Literatura

- Boulos P.F., Ormsbee L.E.: *Explicit network calibration for multiple loading conditoons*, "Journal of Civil Engineering Systems" 1991 t. 8, nr 3
- Bush C.A., Uber J.G.: *Sampling Design Methods for Water Distribution Model Calibration*, "Journal of Water Resources Planning and Menagement" 1998 t. 124, nr 2
- Duzinkiewicz K. i Piotrowski R., *Modelowanie i monitorowanie systemów wodnych w środowisku Epanet*, Gdańsk 2010
- Knapik K., *Dynamiczne modele w badaniach sieci wodociągowych*, Kraków 2000
- Rossman L.A., *EPANET 2 Users Manual*. EPA United States Environmental Protection Agency, Cincinnati 2000
- Trębicka A., *Zastosowanie technik informatycznych w pracach dotyczących modelowania i symulacji*, „Logistyka” 2011 nr 3
- Zimoch I., *Zastosowanie modelowania komputerowego do wspomagania procesu eksploatacji systemu wodociągowego*, „Ochrona Środowiska” 2008 nr 3

Artykuł powstał w ramach realizacji pracy statutowej S/WBiŚ/2/2014 prowadzonej w Katedrze Systemów w Inżynierii Środowiska Politechniki Białostockiej.