

Jan **STUDZIŃSKI**, Arkadiusz **BIENIEK**, Dorota **TOMASIUKA**

INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH PAN  
WARSZAWA

## **SYSTEM ICT WSPOMAGANIA ZARZĄDZANIA W MIEJSKIM PRZEDSIĘBIORSTWIE WODOCIĄGOWYM W GŁUBCZYCACH**

### **ICT SYSTEM SUPPORTING THE MANAGEMENT IN THE WATERWORKS IN GLUBCZYCE**

*In the paper a concept of an ICT system supporting the management of communal waterworks is presented. the system consists of four modules which are the GIS and monitoring systems, the waternet hydraulic models and a couple of optimization algorithms for solving the management tasks. using this integrated software the waternet network operation can be made essentially faster, easier and exacter.*

## **1. Wprowadzenie**

Podstawowym zadaniem systemu sieci wodociągowej eksploatowanej w miejskim przedsiębiorstwie wodociągowym jest dostarczanie użytkownikom sieci wody w oczekiwanej przez nich ilości, pod odpowiednim ciśnieniem i odpowiedniej jakości. Gdy te trzy pierwszoplanowe wymagania są spełnione, to kolejne dwa dotyczą oczekiwań, że sieć będzie pracowała bezawaryjnie a jej koszty eksploatacyjne, z których wynika cena sprzedaży wody, będą niskie. Na podstawie tych wymagań można sformułować następujące podstawowe zadania związane z zarządzaniem siecią wodociągową: optymalizacja hydrauliczna sieci; sterowanie jakością wody, wykrywanie i lokalizacja stanów awaryjnych na sieci, energooszczędne sterowanie pompami, planowanie rewitalizacji sieci wodociągowej. Aby efektywnie realizować te zadania, które mają charakter operacyjny i strategiczny oraz techniczny i organizacyjny, jest celowe a nawet konieczne stosowanie zintegrowanych systemów informatycznych do komputerowego wspomaganie procesów decyzyjnych.

W krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych wprowadza się od kilkunastu lat rozwiązania informatyczne wspomagające procesy zarządzania. Standardem staje się wdrażanie systemów GIS do tworzenia map numerycznych sieci wodociągowych i kanalizacyjnych oraz systemów SCADA do monitorowania przepływów i ciśnień względnie wypełnienia kanałów w sieciach (Kaczmarek 2008, Kwietniewski 2008, Łomotowski i Siwoń 2010). Powszechną wadą tych działań jest to, że te systemy są wdrażane niezależnie i bez koncepcji ich współpracy, co uniemożliwia efektywne zarządzanie systemem wodociągowym.

Utrudnia to również późniejsze wdrażanie modeli hydraulicznych sieci wodociągowej lub kanalizacyjnej, które pełnią podstawową rolę w komputerowo wspomaganym zarządzaniu sieciami, w tym w rozwiązywaniu zadań związanych z ich optymalizacją. Aby informatyzacja przedsiębiorstwa wodociągowego była efektywna, system monitoringu musi być odpowiednio skonfigurowany i sprzężony z mapą numeryczną, która z kolei musi mieć możliwość eksportu grafu i parametrów sieci wodociągowej lub kanalizacyjnej do jej modelu hydraulicznego. Współpracujące ze sobą systemy GIS i SCADA oraz model hydrauliczny sieci stanowią podstawę do utworzenia zintegrowanego systemu informatycznego wspomagającego kompleksowe zarządzanie przedsiębiorstwem wodociągowym (Studziński 2011, Służalec i in. 2013B). W dalszym ciągu skoncentrujemy się na informatyzacji miejskiej sieci wodociągowej.

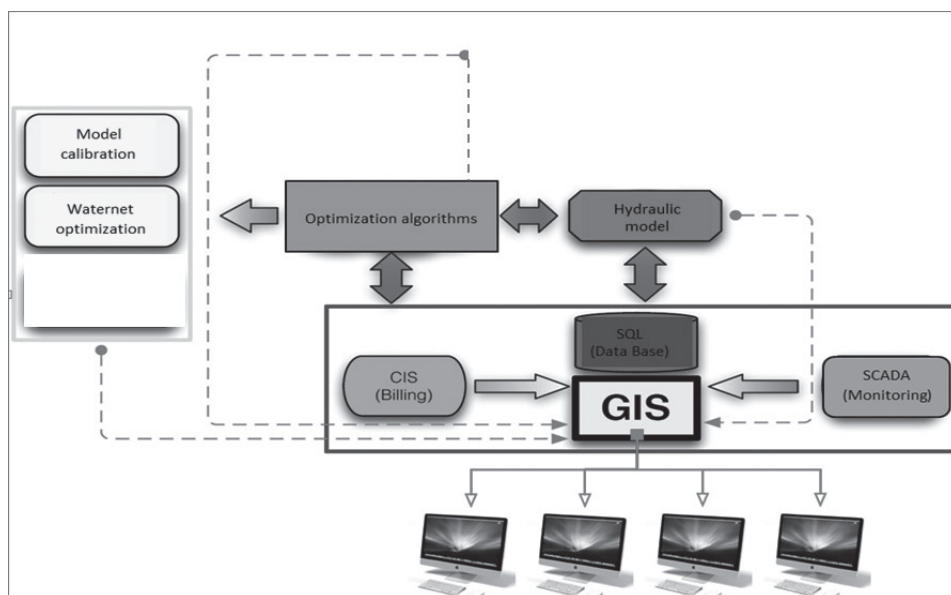
## **2. Systemy GIS, SCADA, AMR i model hydrauliczny jako podstawowe źródła danych do obliczeń optymalizacyjnych w systemie ICT**

Systemy GIS i SCADA oraz ostatnio AMR instalowane obecnie w przedsiębiorstwach wodociągowych służą przede wszystkim jako źródła i archiwa ogromnej liczby danych o sieci wodociągowej, przy czym te dane nie są wykorzystywane do zadań związanych z optymalizacją sieci. Systemy GIS służą więc do komputerowej wizualizacji sieci wodociągowej w postaci mapy numerycznej odtwarzającej graf geodezyjny a nie hydrauliczny sieci, co uniemożliwia uruchomienie jej modelu hydraulicznego. Z kolei systemy SCADA i AMR służą przede wszystkim do monitorowania przepływów i ciśnień wody w stacjach źródłowych, pompowniach i zbiornikach oraz na końcówkach sieci wodociągowej, co umożliwia bieżącą kontrolę stanu pracy jej kluczowych obiektów, natomiast nie daje możliwości kalibracji jej modelu hydraulicznego. Aby móc wykorzystać w pełni możliwości oferowane przez systemy GIS, SCADA i AMR, należy traktować je jako elementy składowe zintegrowanego systemu zarządzania. W takim systemie ICT system GIS musi generować mapę numeryczną sieci wodociągowej nie tylko w postaci geodezyjnej, ale również hydraulicznej, akceptowanej przez jej model hydrauliczny i uwzględniającej oprócz odcinków sieci również jej punkty węzłowe oraz oprócz współrzędnych powierzchniowych węzłów również ich współrzędne wysokościowe. Z kolei systemy SCADA powinny być tak zaplanowane, aby wartości ciśnień i przepływów rejestrowane przez urządzenia pomiarowe informowały o stanie pracy sieci nie tylko w wybranych punktach pomiarowych, ale również w możliwie dużym otoczeniu tych punktów, dostarczając informacji o pracy dużego obszaru sieci. To umożliwia zastosowanie systemu SCADA nie tylko do bieżącego monitorowania pracy sieci wodociągowej ograniczonego do bezpośredniego otoczenia punktów pomiarowych, ale również do poprawnej kalibracji jej modelu hydraulicznego (Studziński 2012A, 2012B).

Takie planowanie systemów SCADA zwiększa liczbę punktów pomiarowych w porównaniu z systemami, w których nie uwzględnia się zastosowania modeli hydraulicznych do zarządzania przedsiębiorstwem. To powoduje istotne zwiększenie kosztów inwestycyjnych w przedsiębiorstwie, co między innymi jest przyczyną obecnego braku takich systemów w praktyce eksploatacyjnej przedsiębiorstw wodociągowych.

### 3. Koncepcja zintegrowanego systemu informatycznego zarządzania miejską siecią wodociągową

W Instytucie Badań Systemowych (IBS) PAN opracowano koncepcję zintegrowanego systemu informatycznego do kompleksowego zarządzania miejskim systemem wodociągowym (Służalec i in. 2013A, Studziński 2012C). System informatyczny składa się z trzech kluczowych modułów będących źródłami danych o sieci wodociągowej i jej funkcjonowaniu, to znaczy z systemów GIS, SCADA i AMR oraz z modelu hydraulicznego sieci. Czwartym modułem systemu, tak zwanym modułem obliczeniowym, jest moduł algorytmów optymalizacji, aproksymacji i modelowania matematycznego, umożliwiających rozwiązywanie zadań zarządzania siecią wodociągową na podstawie danych dostarczanych przez trzy kluczowe moduły systemu (rys. 1).



Rys. 1. Struktura i funkcjonalność systemu ICT opracowanego w IBS PAN.

Fig 1. Structure and functionality of ICT system

Koncepcja zintegrowanego systemu informatycznego do zarządzania siecią wodociągową opracowana w IBS PAN została dotychczas zrealizowana w miejskim przedsiębiorstwie wodociągowym w Mikołowie oraz w GPW S.A. w Katowicach. Uruchomienie systemu złożonego z kilkunastu współpracujących ze sobą programów i zaadoptowanie go do warunków danego przedsiębiorstwa wodociągowego jest kosztowne i czasochłonne.

Główne koszty dotyczą zainstalowania na sieci wodociągowej odpowiednio zaprojektowanego systemu monitoringu, który powinien składać się z co najmniej kilkunastu (w małych przedsiębiorstwach) do kilkudziesięciu (w średnich) a nawet kilkuset (w dużych przedsiębiorstwach) punktów pomiarowych, umożliwiając automatyczną kalibrację modeli hydraulicznych sieci. Z kolei najbardziej czasochłonne jest wprowadzanie danych o sieci do systemu GIS i tworzenie mapy numerycznej sieci, na podstawie której będą eksportowane topologicznie poprawne grafy obliczeniowe do jej modelu hydraulicznego.

Uruchamianie zintegrowanego systemu IT w przedsiębiorstwie wodociągowym jest przedsięwzięciem organizacyjnym wymagającym dobrej współpracy pracowników naukowych opracowujących system z kadrami inżyniersko-techniczną i zarządem przedsiębiorstwa. Jest to trudne zadanie logistyczne wymagające realizacji i koordynacji takich działań, jak planowanie prac, opracowywanie algorytmów i programów komputerowych, gromadzenie i analiza danych pomiarowych i obliczeniowych, testowanie programów i analiza wyników obliczeń, sporządzanie dokumentacji programów, sprawozdawczość merytoryczna i finansowa, bieżąca i okresowa kontrola wykonania zaplanowanych prac itp. Dlatego doprowadzenie do realizacji takiego przedsięwzięcia jest dużym wyzwaniem zarówno dla przedsiębiorstwa wodociągowego, jak i dla uczestniczącej w nim i prowadzącej prace badawcze jednostki naukowej.

#### 4. Moduł obliczeniowy modelowania i optymalizacji sieci wodociągowej w systemie ICT

Pakiet MOSUW stanowi kluczowy element modułu obliczeniowego rozwijanego systemu ICT i jest przeznaczony do modelowania i optymalizacji sieci wodociągowych. Stanowi on narzędzie umożliwiające racjonalne zarządzanie siecią wodociągową, między innymi w zakresie regulacji przepływów i ciśnień, doboru średnic rurociągów, pracy pomp, zbiorników retencyjnych, wykrywania awarii i stanów nietypowych, a także symulacji pracy sieci w sytuacjach awaryjnych i remontowych, jej rozbudowy i przebudowy. Jest to biblioteka parudziesięciu współpracujących ze sobą programów przeznaczona dla małych i średnich przedsiębiorstw wodociągowych.

W module obliczeniowym systemu ICT funkcję sterującą wszystkimi programami modułu pełni aplikacja Zasiew (ZArządzanie SIĘcią Wodociągową). Pozwala ona uruchamiać poszczególne, współpracujące ze sobą programy modułu obliczeniowego oraz zarządzać danymi specyficznymi dla każdego z tych programów. Konkretna, użytkowa realizacja systemu ICT może zawierać tylko niektóre programy wybrane ze względu na przewidziane do realizacji zadania zarządzania. Aplikacja Zasiew analizuje zapisaną na dysku strukturę kartotek i sprawdza istnienie odpowiednich plików wykonawczych, aby dostosować interfejs zarządzania do rzeczywistego, zainstalowanego na komputerze podzbioru systemu.

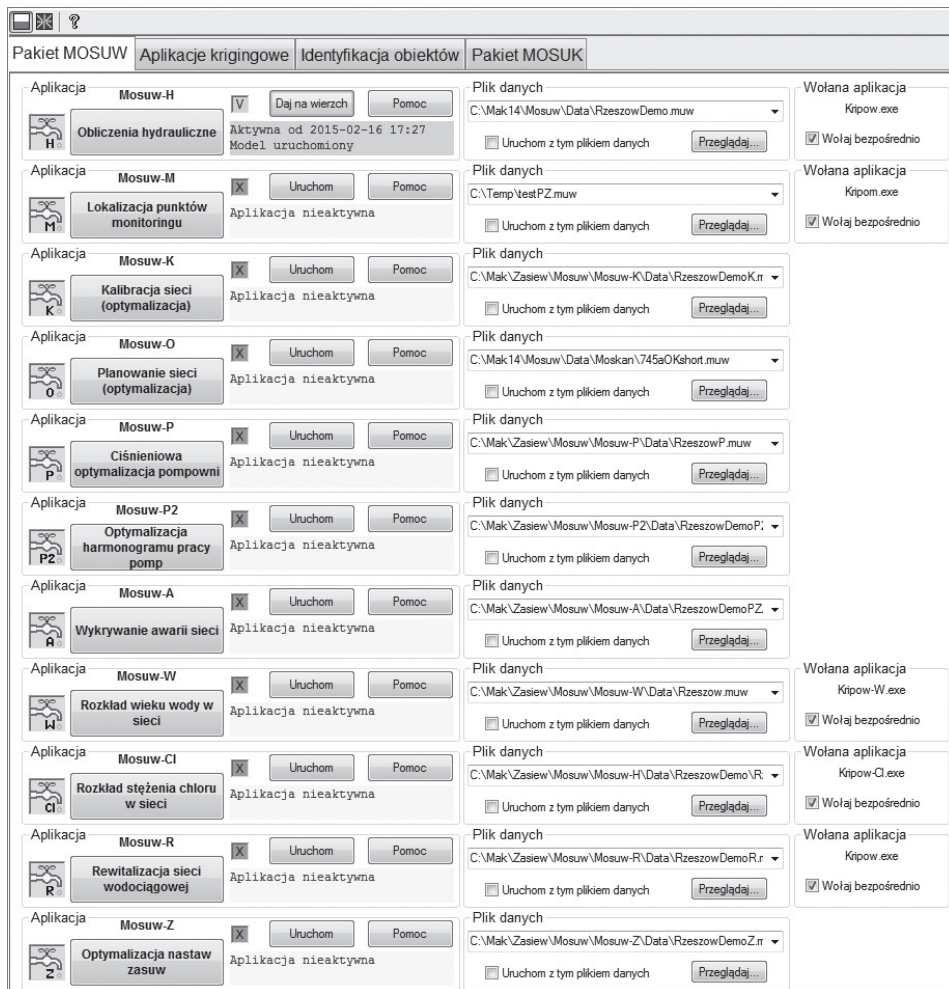
Aplikacja Zasiew wyświetla następujące zakładki funkcyjne (interfejsy):

1. Pakiet MOSUW - modelowanie, optymalizacja i sterowanie układów wodociągowych.
2. Aplikacje krigingowe - grupa programów krigingowych.
3. Identyfikacja obiektów - identyfikacja obiektów dynamicznych.

Za pomocą interfejsu 'Pakiet MOSUW' uruchamia się następujące aplikacje (rys. 2):

1. Mosuw-H, program obliczeń hydraulicznych;
2. Mosuw-M, program planowania systemu monitoringu SCADA;
3. Mosuw-K, program kalibracji sieci (optymalizacja wielokryterialna);
4. Mosuw-O, program optymalizacji hydraulicznej sieci (optymalizacja wielokryterialna);
5. Mosuw-P, program ciśnieniowej optymalizacji pompowni (optymalizacja wielokryterialna);
6. Mosuw-P2, program optymalizacji harmonogramu pracy pomp (optymalizacja wielokryterialna);

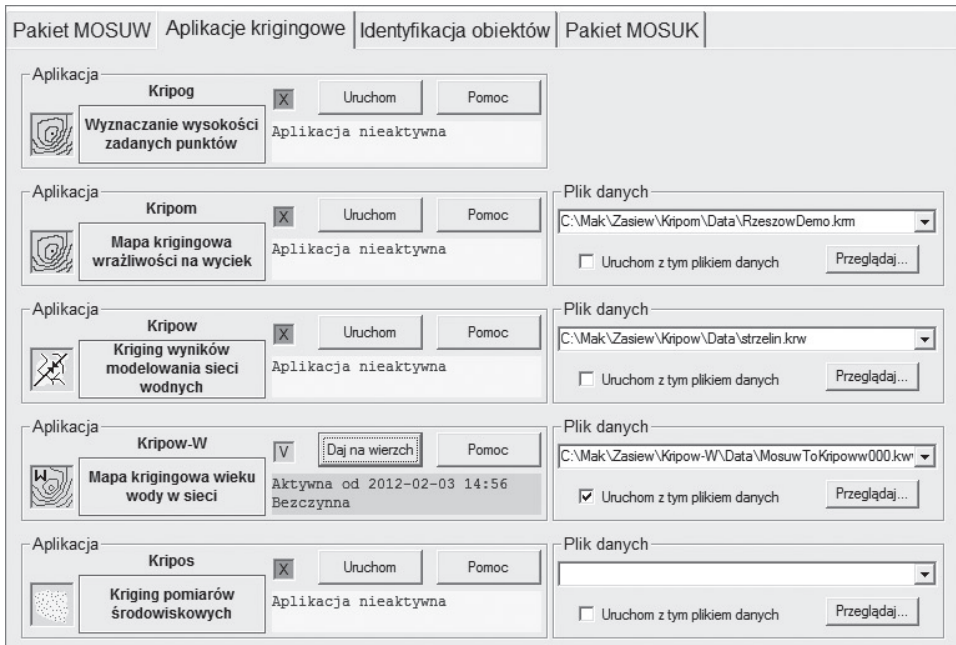
7. Mosuw-A, program wykrywania awarii na sieci wodociągowej;
8. Mosuw-W, program obliczania wieku wody i jego rozkładu w sieci;
9. Mosuw-CI, program obliczania stężenia chloru i jego rozkładu w sieci;
10. Mosuw-R, program planowania prac rewitalizacyjnych na sieci;
11. Mosuw-Z, program optymalizacji nastaw zasuw sieciowych.



Rys. 2. Wygląd zakładki 'Pakiet MOSUW'.  
Fig. 2. Scheme of MOSUW

W zakładce funkcyjnej ‘Aplikacje krigingowe’ znajdują się programy wykorzystujące do obliczeń algorytmy krigingowe aproksymacji. Kriging, to grupa geostatystycznych metod estymacji, za pomocą których oblicza się najlepsze, nieobciążone, liniowe oszacowania wartości analizowanej zmiennej. Danym pomiarowym z punktów znajdujących się wewnątrz obszaru estymacji przydziela się odpowiednie wagi zwane współczynnikami krigin-gu w taki sposób, aby zminimalizować średniokwadratowy błąd estymacji (wariancję krigin-gu). Metoda ta przypisuje większe wagi punktom pomiarowym położonym bliżej punktu badanego. W grupie aplikacji krigingowych znajdują się programy (rys. 3):

1. Kripog, krigingowe wyznaczanie wysokości zadanych punktów na podstawie danych geodezyjnych;
2. Kripom, mapa krigingowa (warstwice) wrażliwości na wyciek dla projektowanego systemu monitoringu;
3. Kripow, kriging wyników obliczeń hydraulicznych sieci wodociągowych;
4. Kripow-W, mapa krigingowa (warstwice) wieku wody w sieci wodociągowej;
5. Kripow-Cl, mapa krigingowa (warstwice) stężenia chloru w sieci wodociągowej;
6. Kripow, kriging pomiarów środowiskowych.



Rys. 3. Wygląd zakładki 'Aplikacje krigingowe'.  
Fig 3. Scheme of kriging applications

W zakładce funkcyjnej 'Identyfikacja obiektów' występuje tylko jedna aplikacja:

1. Idol05, identyfikacja obiektów dynamicznych.

Aplikacja IDOL05 pozwala dokonywać w trybie konwersacyjnym identyfikacji obiektów dynamicznych oraz opracowywać (wyglądać, wykreślać itp.) dane pomiarowe i wyniki. Jest ona w zasadzie pakietem programowym i zawiera programy identyfikacji oraz programy pomocnicze napisane w języku Fortran77 z interfejsem przyjaznym dla użytkownika. Wykorzystywane modele identyfikacji dzielą się na dwie grupy:

- Modele identyfikacji dynamicznej:
  1. Metoda najmniejszej sumy kwadratów;
  2. Metoda uogólnionej sumy kwadratów;
  3. Metoda największej wiarygodności;
  4. Metoda sieci neuronowych;
  5. Metoda zbiorów rozmytych.
- Modele regresji:
  4. Regresja liniowa;
  5. Regresja nieliniowa z algorytmem Marquardta;
  6. Regresja nieliniowa z algorytmem Powella.

Model: **Metoda największej wiarygodności**

Przetw. **Metoda najmniejszej sumy kwadratów**  
**Metoda uogólnionej sumy kwadratów**  
**Metoda największej wiarygodności**

Uwzględ. **Metoda regresji liniowej**  
**Metoda regresji nieliniowej Marquardta**  
**Metoda regresji nieliniowej Powella**

| Woj. pomiaru | wolny | oper. | param. (oddziel przecinkiem) |   | A         | B | C       |     |         |
|--------------|-------|-------|------------------------------|---|-----------|---|---------|-----|---------|
| Wejście 1    | A     | Tak   | 10                           | 4 | 2,4,6,10. | 3 | 0.22917 | 5.0 | 1.87344 |
| Wejście 2    | B     | Nie   | 10                           | 2 | 1,10.     | 4 | 0.24740 | 5.2 | 1.87448 |
| Wejście 3    |       |       |                              |   |           | 5 | 0.26823 | 5.3 | 1.87552 |
|              |       |       |                              |   |           | 6 | 0.29167 | 5.2 | 1.87656 |
|              |       |       |                              |   |           | 7 | 0.32031 | 5.2 | 1.8776  |
|              |       |       |                              |   |           |   | 0.35365 | 5.3 | 1.87865 |
|              |       |       |                              |   |           |   | 0.39531 | 5.4 | 1.87969 |

Rys. 4. Wygląd zakładki 'Identyfikacja obiektów'.

Fig 4. Scheme of object identification

Wykaz wszystkich programów składających się na system ICT, ich funkcji oraz przewidywanych efektów wdrożeniowych, jest następujący:

1. System GIS G/Water firmy Intergraph: jest platformą obliczeniową systemu ICT, to znaczy integruje wszystkie programy systemu informatycznego poprzez branżową bazę danych gromadzącą wszystkie dane techniczne i pomiarowe dotyczące sieci wodociągowej i jej stanu pracy.

Poszczególne funkcje systemu GIS są następujące:

- Przechowywanie danych dotyczących struktury i parametrów sieci wodociągowej i jej obiektów.
- Przetwarzanie danych pomiarowych pozyskiwanych z baz danych systemów SCADA i AMR.
- Generowanie mapy numerycznej sieci wodociągowej.
- Topologizacja grafu hydraulicznego sieci wodociągowej.
- Integracja grafu sieci z danymi pomiarowymi dotyczącymi rozbiórów wody (system AMR względnie billingowy) i stanu pracy sieci (system SCADA).
- Eksport grafu sieci do modelu hydraulicznego w postaci pełnej do obliczeń hydraulicznych i w postaci uproszczonej do obliczeń optymalizacyjnych.
- Wykonywanie analiz przestrzennych i tematycznych sieci wodociągowej na podstawie jej mapy numerycznej.

Efekty implementacji systemu GIS w przedsiębiorstwie wodociągowym są następujące:

- Dokładna inwentaryzacja sieci wodociągowej i jej obiektów aparaturowych.
  - Szybki i łatwy dostęp do wiarygodnych danych dotyczących struktury i parametrów sieci i jej obiektów.
  - Możliwość wykonywania szczegółowych i szybkich analiz tematyczno-przestrzennych dotyczących sieci wodociągowej
  - Skrócenie czasu pracy wymagającej dostępu do informacji o strukturze i parametrach sieci i jej obiektów o około 60%.
2. System SCADA na sieci wodociągowej; składa się z:

- Szeregu punktów pomiarowych zlokalizowanych na sieci i służących do pomiaru ciśnienia i przepływu wody.
- Systemu transmisji danych do serwera z programem ich archiwizacji i wizualizacji.
- Programu archiwizacji i wizualizacji danych pomiarowych.

Efekty implementacji systemu SCADA w przedsiębiorstwie wodociągowym:

- Dokładna bieżąca informacja o stanie pracy sieci wodociągowej na podstawie rejestrowanych pomiarów.
- Możliwość wykonywania automatycznej kalibracji i okresowej rekalkibracji modelu hydraulicznego sieci wodociągowej z wykorzystaniem danych pomiarowych.
- Możliwość wczesnego wykrywania stanów awaryjnych na sieci jedynie na podstawie obserwacji bieżących pomiarów i stwierdzenia ich zgodności lub niezgodności z opracowanymi wcześniej krzywymi ciśnień i przepływów standardowych dla poszczególnych punktów pomiarowych.
- Redukcja strat wody w sieci wodociągowej spowodowanych awariami o 25% jedynie w wyniku korzystania z odpowiednio zaplanowanego systemu SCADA.



3. System AMR na sieci wodociągowej; składa się z:
  - Wodomierzy zlokalizowanych u użytkowników sieci i służących do pomiaru ilości sprzedawanej wody.
  - Systemu radiowej transmisji danych pomiarowych do programu ich archiwizacji.
  - Programu archiwizacji i wizualizacji danych pomiarowych.Efekty implementacji systemu AMR w przedsiębiorstwie wodociągowym:
  - Dokładna bieżąca informacja o rozmiarach wody w sieci wodociągowej na podstawie rejestrowanych pomiarów.
  - Możliwość wykonywania automatycznej kalibracji i okresowej rekalkibracji modelu hydraulicznego sieci wodociągowej z wykorzystaniem bieżących danych pomiarowych.
  - Możliwość wyznaczania modeli obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej względnie jej charakterystycznych węzłów końcowych, używanych następnie w algorytmach kalibracji, modelowania i optymalizacji sieci.
  - Możliwość realizacji zadań związanych z kompleksowym zarządzaniem siecią wodociągową przy użyciu poprawnie skalibrowanego modelu hydraulicznego sieci.
4. Program MOSUW-H obliczeń hydraulicznych sieci wodociągowej; zawiera:
  - Model sieci wodociągowej w postaci układu równań algebraicznych liniowych i nieliniowych opisujących przepływy w węzłach i spadki ciśnień w odcinkach sieci.
  - Algorytm rozwiązywania nieliniowych układów równań algebraicznych.Efekty implementacji programu MOSUW-H:
  - Możliwość obliczania wartości ciśnień i przepływów we wszystkich węzłach i odcinkach sieci wodociągowej, co pozwala operatorowi sieci ocenić aktualny stan jej pracy.
  - Możliwość wykonywania analiz tematycznych sieci wodociągowej jedynie na podstawie obliczeń symulacyjnych dla celów projektowania modernizacji, rewitalizacji lub rozbudowy sieci.
  - Możliwość realizacji zadań związanych z kompleksowym zarządzaniem siecią wodociągową przy użyciu poprawnie skalibrowanego modelu hydraulicznego sieci.
5. Program MOSUW-K automatycznej kalibracji modelu hydraulicznego sieci wodociągowej; zawiera:
  - Model hydrauliczny sieci wodociągowej.
  - Algorytmy optymalizacji wielokryterialnej heurystyczny i genetyczny z dwoma kryteriami celu zdefiniowanymi dla ciśnień i przepływów mierzonych i obliczanych dla punktów pomiarowych systemu SCADA.Efekty implementacji programu MOSUW-K:
  - Możliwość wykonywania szybkiej i dokładnej kalibracji i okresowej rekalkibracji modelu hydraulicznego sieci wodociągowej na podstawie bieżących lub okresowych pomiarów z systemów SCADA i AMR; dotychczasowa kalibracja modeli sieci wodociągowej polega na wykonywaniu szarż pomiarowych i ręcznym doborze wartości wybranych parametrów sieci, co jest metodą żmudną, mało dokładną i rzadko powtarzaną, co oznacza, że w ten sposób kalibrowane modele bardzo szybko się dezaktualizują.
  - Możliwość realizacji zadań związanych z kompleksowym zarządzaniem siecią wodociągową przy użyciu poprawnie skalibrowanego modelu hydraulicznego sieci.

6. Program MOSUW-M planowania systemu monitoringu dla sieci wodociągowej; zawiera:
  - Model hydrauliczny sieci wodociągowej.
  - Algebraiczne wzory obliczania wrażliwości sieci na zmiany ciśnień i przepływów w jej węzłach i odcinkach.
 Efekty implementacji programu MOSUW-M:
  - Możliwość wyznaczania lokalizacji punktów pomiarowych systemu SCADA na sieci wodociągowej, optymalnej z punktu widzenia automatycznej kalibracji modelu hydraulicznego sieci; systemy monitoringu wdrażane na sieciach bez uwzględnienia jej miejsc wrażliwych nie zapewniają poprawnej kalibracji ich modeli hydraulicznych, co powoduje, że są one praktycznie mało użyteczne pod względem eksploatacyjnym.
7. Program MOSUW-O optymalizacji hydraulicznej dla sieci wodociągowej; zawiera:
  - Model hydrauliczny sieci wodociągowej.
  - Algorytmy optymalizacji wielokryterialnej heurystyczny i genetyczny z kryteriami celu zdefiniowanymi dla ciśnień i przepływów mierzonych i obliczanych dla węzłów końcowych sieci.
 Efekty implementacji programu MOSUW-M:
  - Optymalizacja sieci wodociągowej pod kątem zapewnienia w jej węzłach końcowych ciśnień zgodnych z wartościami zadanymi poprzez wymianę wybranych przewodów sieci na przewody o innych średnicach; optymalizacja zapewnia minimalizację uchybów między ciśnieniami zadanymi i obliczonymi w węzłach końcowych sieci przy jednoczesnej minimalizacji kosztów wymiany przewodów.
8. Program MOSUW-P optymalizacji ciśnieniowej pompowni na sieci wodociągowej; zawiera:
  - Model hydrauliczny sieci wodociągowej.
  - Algorytmy optymalizacji wielokryterialnej heurystyczny i genetyczny z kryteriami celu zdefiniowanymi dla ciśnień i przepływów mierzonych i obliczanych dla węzłów końcowych sieci.
 Efekty implementacji programu MOSUW-P:
  - Optymalizacja sieci wodociągowej pod kątem zapewnienia w jej węzłach końcowych ciśnień zgodnych z wartościami zadanymi, poprzez sterowanie pracą pompowni traktowanych jako pojedyncze pompy uogólnione; optymalizacja zapewnia minimalizację uchybów między ciśnieniami zadanymi i obliczonymi w węzłach końcowych sieci przy jednoczesnej minimalizacji kosztów energetycznych pracy pompowni.
9. Program MOSUW-P2 optymalizacji ciśnieniowej pompowni na sieci wodociągowej z uwzględnieniem harmonogramu pracy pomp; zawiera:
  - Model hydrauliczny sieci wodociągowej.
  - Algorytmy optymalizacji wielokryterialnej heurystyczny i genetyczny z kryteriami celu zdefiniowanymi dla ciśnień i przepływów mierzonych i obliczanych dla węzłów końcowych sieci.

Efekty implementacji programu MOSUW-P2:

- Optymalizacja sieci wodociągowej pod kątem zapewnienia w jej węzłach końcowych ciśnień zgodnych z wartościami zadanymi, poprzez sterowanie pracą pompowni z wyznaczaniem harmonogramów pracy poszczególnych pomp w pompowniach: optymalizacja zapewnia minimalizację uchybów między ciśnieniami zadanymi i obliczonymi w węzłach końcowych sieci przy jednoczesnej minimalizacji kosztów energetycznych pracy poszczególnych pomp.

10. Program MOSUW-A wykrywania i lokalizacji awarii na sieci wodociągowej; zawiera:

- Model hydrauliczny sieci wodociągowej.

Efekty implementacji programu MOSUW-A:

- Szybkie i dokładne wykrywanie awarii, w tym wycieków ukrytych na sieci wodociągowej za pomocą obliczeń symulacyjnych modelu hydraulicznego sieci; program redukuje straty wody spowodowane awariami.

11. Program MOSUW-A2 wykrywania i lokalizacji awarii na sieci wodociągowej; zawiera:

- Model hydrauliczny sieci wodociągowej.
- Algorytm modelowania za pomocą sieci neuronowych

Efekty implementacji programu MOSUW-A2:

- Szybkie i dokładne wykrywanie awarii, w tym wycieków ukrytych na sieci wodociągowej za pomocą obliczeń symulacyjnych modelu hydraulicznego sieci i obliczeń modelowania wykonanych z użyciem sieci neuronowych; program redukuje straty wody spowodowane awariami.

12. Program MOSUW-W obliczania wieku wody w przewodach sieci wodociągowej; zawiera:

- Model hydrauliczny sieci wodociągowej.

Efekty implementacji programu MOSUW-W:

- Szybkie i dokładne obliczanie czasu przebywania wody w przewodach sieci wodociągowej; wyniki programu pozwalają ocenić pośrednio stan pracy sieci i jakość przenoszona przez nią wody.

13. Program MOSUW-CI obliczania rozkładu stężenia chloru w przewodach sieci wodociągowej; zawiera:

- Model hydrauliczny sieci wodociągowej.
- Wzór algebraiczny zanikania chloru w wodzie w funkcji czasu

Efekty implementacji programu MOSUW-CI:

- Szybkie i dokładne obliczanie rozkładu stężenia chloru w sieci wodociągowej; wyniki programu pozwalają ocenić pośrednio stan pracy sieci i jakość przenoszona przez nią wody.

14. Program MOSUW-R planowania prac rewitalizacyjnych na sieci wodociągowej; zawiera:

- Model hydrauliczny sieci wodociągowej.
- Wzór algebraiczny do wyznaczania listy rankingowej przewodów sieci typowych do wymiany.

Efekty implementacji programu MOSUW-R:

- Wyznaczenie wykazu przewodów sieci wodociągowej przeznaczonych do wymiany ze względu na ich wiek, materiał i awaryjność; rewitalizacja sieci zmniejsza jej awaryjność i w rezultacie redukuje straty wody powodowane awariami.

15. Program MOSUW-Z optymalizacji nastaw zasuw na sieci wodociągowej; zawiera:
  - Model hydrauliczny sieci wodociągowej.
  - Algorytmy optymalizacji wielokryterialnej heurystyczny i genetyczny z kryteriami celu zdefiniowanymi dla prędkości przepływu wody w przewodach sieci i ciśnień mierzonych i obliczanych dla węzłów końcowych sieci.Efekty implementacji programu MOSUW-Z:
  - Wyznaczenie nastaw dla wybranych zasuw sieci wodociągowej w celu maksymalizacji prędkości przepływu wody w przewodach się; w rezultacie w sposób pośredni poprawia się jakość wody.
16. Program Kripog wyznaczania współrzędnej wysokościowej węzłów sieci wodociągowej; zawiera:
  - Algorytm aproksymacji krigingowej.Efekty implementacji programu Kripog:
  - Wyznaczenie współrzędnych wysokościowych węzłów sieci wodociągowej na podstawie danych dotyczących punktów geodezyjnych terenu lokalizacji sieci; program umożliwia wygenerowanie grafu hydraulicznego sieci wodociągowej w systemie GIS i jego eksport do modelu hydraulicznego.
17. Program Kripom wyznaczania mapy wrażliwości sieci wodociągowej ze względu na zmiany ciśnienia i przepływów w węzłach i przewodach sieci; zawiera:
  - Algorytm aproksymacji krigingowej.Efekty implementacji programu Kripom:
  - Wyznaczenie punktów charakterystycznych na sieci wodociągowej z największą wrażliwością na zmiany ciśnienia i przepływu, jako potencjalnych punktów pomiarowych przy planowaniu systemu SCADA dla sieci.
18. Program Kripow wyznaczania map rozkładów ciśnienia i przepływów w sieci wodociągowej; zawiera:
  - Algorytm aproksymacji krigingowej.Efekty implementacji programu Kripow:
  - Wyznaczenie map rozkładów ciśnienia i przepływów w węzłach i przewodach sieci wodociągowej; program umożliwia jakościową ocenę stanu pracy sieci jako uzupełnienie do oceny ilościowej wykonywanej na podstawie obliczonych wartości ciśnień i przepływów w wyniku symulacji modelu hydraulicznego sieci.
19. Program Kripow-W wyznaczania mapy wieku wody w sieci wodociągowej; zawiera:
  - Algorytm aproksymacji krigingowej.Efekty implementacji programu Kripow-W:
  - Wyznaczenie mapy rozkładu wieku wody w przewodach sieci wodociągowej; program umożliwia jakościową ocenę stanu pracy sieci i jakości przenoszonej przez nią wody na podstawie obliczonych czasów przebywania wody w sieci.
20. Program Kripow-Cl wyznaczania mapy rozkładu stężenia chloru w sieci wodociągowej; zawiera:
  - Algorytm aproksymacji krigingowej.Efekty implementacji programu Kripow-Cl:
  - Wyznaczenie mapy rozkładu stężenia chloru w przewodach sieci wodociągowej; program umożliwia jakościową ocenę stanu pracy sieci i jakości przenoszonej przez nią wody na podstawie obliczonych stężeń chloru w przewodach sieci.

21. Program wyznaczania modeli matematycznych systemów za pomocą metody najmniejszej sumy kwadratów; zawiera:

- Algorytm modelowania matematycznego systemów metodą szeregów czasowych z algorytmem Kalmana najmniejszej sumy kwadratów.

Efekty implementacji programu:

- Wyznaczenie modeli obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej i jej charakterystycznych węzłów końcowych; modele te są wykorzystywane w programach modelowania i optymalizacji sieci wodociągowej, w tym przede wszystkim w programie kalibracji i symulacji jej modelu hydraulicznego sieci.

22. Program wyznaczania modeli matematycznych systemów za pomocą metody uogólnionej sumy kwadratów; zawiera:

- Algorytm modelowania matematycznego systemów metodą szeregów czasowych z algorytmem Clarke'a uogólnionej sumy kwadratów.

Efekty implementacji programu:

- Wyznaczenie modeli obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej i jej charakterystycznych węzłów końcowych; modele te są wykorzystywane w programach modelowania i optymalizacji sieci wodociągowej, w tym przede wszystkim w programie kalibracji i symulacji jej modelu hydraulicznego sieci.

23. Program wyznaczania modeli matematycznych systemów za pomocą sieci neuronowych; zawiera:

- Algorytm modelowania matematycznego systemów z wykorzystaniem algorytmu MLP sieci neuronowych.

Efekty implementacji programu:

- Wyznaczenie modeli obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej i jej charakterystycznych węzłów końcowych; modele te są wykorzystywane w programach modelowania i optymalizacji sieci wodociągowej, w tym przede wszystkim w programie kalibracji i symulacji jej modelu hydraulicznego sieci.

24. Program wyznaczania modeli matematycznych systemów za pomocą zbiorów rozmytych; zawiera:

- Algorytm modelowania matematycznego systemów metodą z wykorzystaniem algorytmu TSK zbiorów rozmytych.

Efekty implementacji programu:

- Wyznaczenie modeli obciążenia hydraulicznego sieci wodociągowej i jej charakterystycznych węzłów końcowych; modele te są wykorzystywane w programach modelowania i optymalizacji sieci wodociągowej, w tym przede wszystkim w programie kalibracji i symulacji jej modelu hydraulicznego sieci.

W powyższym wykazie programów z zakładki funkcyjnej 'Identyfikacja obiektów' nie uwzględniono programu z metodą identyfikacji największej wiarygodności oraz programów z metodami regresji liniowej i nieliniowej, ponieważ nie przewiduje się ich użycia przy rozwiązywaniu zadań zarządzania siecią wodociągową.

## 5. Uwagi końcowe

W artykule przedstawiono koncepcję zintegrowanego systemu informatycznego przeznaczonego do kompleksowego zarządzania miejskim systemem wodociągowym, omówiono jego strukturę i podstawowe funkcje. System jest oparty o trzy kluczowe moduły będące źródłem podstawowych danych dla wszystkich pozostałych programów systemu, wykonujących złożone zadania zarządzania siecią wodociągową. Te moduły, to system GIS, systemy SCADA i AMR oraz model hydrauliczny sieci wodociągowej. Modułem systemu ICT decydującym o efektywnym rozwiązywaniu zadań zarządzania siecią jest moduł obliczeniowy. Wymieniono wszystkie programy systemu ICT, ich funkcje oraz planowane efekty implementacji w przedsiębiorstwie wodociągowym.

Implementacja systemu ICT w przedsiębiorstwie wodociągowym ma w ogólności na celu:

- redukcję kosztów eksploatacyjnych sieci wodociągowej poprzez energooszczędne sterowanie pompami i redukcję strat wody w wyniku awarii;
- zwiększenie niezawodności i bezpieczeństwa pracy sieci;
- zapewnienie dobrej jakości produkowanej wody;
- zapewnienie zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstwa;
- ochronę środowiska poprzez eliminację wycieków wody z sieci wodociągowej.

Końcowe wnioski, jakie wynikają z prezentowanych opisów, są następujące:

- Opracowanie i realizacja koncepcji systemu zintegrowanego systemu informatycznego wspomagającego zarządzanie miejską siecią wodociągową jest złożonym problemem organizacyjnym i logistycznym.
- Rozwiązanie tego problemu jest czasochłonne i związane z poważnymi kosztami.
- Zorganizowanie odpowiedniego zespołu wykonującego taki system informatyczny w ramach jedynie przedsiębiorstwa wodociągowego jest praktycznie niemożliwe ze względu na brak doświadczenia i odpowiedniej wiedzy.
- Dlatego właściwym postępowaniem w przypadku informatyzacji przedsiębiorstwa wodociągowego jest tworzenie zintegrowanego systemu ICT i jego wdrażanie w ramach ścisłej współpracy przedsiębiorstwa wodociągowego z jednostką naukową odpowiedzialną za rozwój algorytmów obliczeniowych i oprogramowania.
- Jednocześnie takie prace powinny być prowadzone przy wsparciu finansowym pozyskanym z projektów B+R realizowanych w ramach programu PO IR.

## Bibliografia

- 1) Kaczmarska D. (2008) *Stan komputeryzacji wodociągów krajowych w zakresie systemów monitoringu, mapy numerycznej i obliczeń hydraulicznych*. Raport IBS PAN, RB 11/2008, Warszawa.
- 2) Fajdek B., Stachura M., Studzinski J. (2015) *Water distribution network optimization using genetic algorithms*. ISC 2015 Conference, Valencia, June 1-3, 2015.
- 3) Kwietniewski M. (2008) *GIS w wodociągach i kanalizacji*. PWN. Warszawa.
- 4) Łomotowski J., Siwoń Z. (2010) *Metodyka analizy danych pochodzących z monitoringu systemów wodocięgowych i kanalizacyjnych*. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 3'2010, 16-20.
- 5) Stachura M., Studzinski J., Fajdek B. (2015) *Model based leakage isolation in water distribution system: a neural classifier approach*. EnviroInfo 2015 Conference, Copenhagen, September 7-9, 2015.
- 6) Studziński J. (2011) *Kompleksowe zarządzanie miejską siecią wodociągową w oparciu o systemy GIS, SCADA i modele matematyczne*. Wodociągi i Kanalizacja, 12(94)/2011, 36-39.
- 7) Studziński J. (2012A) *SCADA do zarządzania miejskim systemem zaopatrzenia w wodę*. Ochrona Środowiska, 1/2012 (506) 26-30.
- 8) Studziński J. (2012B) *Planowanie systemu monitoringu wspomagającego zarządzanie miejską siecią wodociągową*. PAR 2/2012, 95-100.
- 9) Studziński J. (2012C) *Systemy GIS i SCADA oraz model hydrauliczny jako podstawowe elementy zintegrowanej informatyzacji miejskiego systemu zaopatrzenia w wodę*. W: *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód – zagadnienia współczesne*. Praca zbiorowa pod red. M.M. Sozańskiego, Tom II, PZITS, Poznań, 399-410.
- 10) Studzinski J. (2015A) *Informatyzacja Krajowych Przedsiębiorstw Wodocięgowych: Stan Faktyczny, Potrzeby, Możliwości*. Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą.
- 11) Studzinski J. (2015B) *Informatyka w zarządzaniu miejskimi sieciami wodociągowo-kanalizacyjnymi*. Przegląd Komunalny, 1/2015, 12-14.
- 12) Studzinski J. (2015C) *Zarządzanie z komputerowym wspomaganie*. Kierunek Wod-Kan, 1/2015, 26-31.
- 13) Studzinski J. (2015D) *ICT systems supporting sustainable operation and development of municipal waterworks*. ICT4S 2015 Conference, Copenhagen, September 7-9, 2015.
- 14) Studzinski J., Rojek I.: *Detection and localization of water leaks in water nets by means of a monitoring system, hydraulic model and neuronal nets*. ESM'2013 Conference, Lancaster, UK, October 23-25, 2013.
- 15) Studziński J., Tomasiuk D.: *Zarządzanie przedsiębiorstwem wodociągowym z wykorzystaniem nowoczesnych technik i technologii informatycznych*. Zeszytu naukowe Uni Szczecin, Szczecin 2015.
- 16) Studzinski J., Wojtowicz P., Ziolkowski A.: *Ein integriertes ICT System für das Management eines mittelgroßen Wasserwerkes*. In: *Modelierung und Simulation von Ökosystemen, Reihe: Umweltinformatik, Workshop Kölpinsee 2014* (Nguyen Xuan Thinh, Hrsg.), Rhombos-Verlag Berlin, 2015.

