

64/2007

Raport Badawczy
Research Report

RB/45/2007

**Modelowanie, optymalizacja
i sterowanie miejskich sieci
wodociągowych**

J. Studziński

Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk

Systems Research Institute
Polish Academy of Sciences



POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 3810100

fax: (+48) (22) 3810105

Kierownik Pracowni zgłaszający pracę:
Prof. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski

Warszawa 2007

Modelowanie, optymalizacja i sterowanie miejskich sieci wodociągowych

Jan Studziński

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	3
2. Miejska sieć wodociągowa.....	4
3. Stan informatyzacji krajowych przedsiębiorstw wodociągowych.....	6
4. Koncepcja komputerowego systemu SWD dla sieci wodociągowej.....	7
5. Branżowa baza danych i mapa numeryczna.....	8
6. System monitoringu sieci wodociągowej.....	10
7. Modelowanie sieci wodociągowej.....	14
8. Kalibracja modelu hydraulicznego.....	27
9. Optymalizacja.....	32
10. Sterowanie.....	39
11. Inne zastosowania modelu hydraulicznego.....	40
12. Kompleksowy system informatyczny zarządzania siecią wodociągową.....	46
13. Literatura.....	50

1. Wprowadzenie

Rozwój technik i technologii komputerowych w ostatnich kilkunastu latach powoduje intensyfikację prac badawczo-rozwojowych związanych z informatyzacją przedsiębiorstw wodociągowych w kraju i zagranicą. Prace te polegają jednak zwykle na komputeryzacji wybranych zadań realizowanych w przedsiębiorstwie wodociągowym, takich jak wizualizacja grafu sieci kanalizacyjnej za pomocą mapy numerycznej generowanej przez system GIS, monitorowanie stanu pracy oczyszczalni ścieków za pomocą zintegrowanych systemów monitoringu czy obliczenia hydrauliczne sieci wodociągowej (Brdyś, 2004; Brdyś i in., 2002; Denczew, 2002; Konarczak, 2004; Wedel, 1998). Zaletą takich działań jest usprawnianie i przyspieszenie określonych czynności wykonywanych w przedsiębiorstwie, natomiast wadą jest traktowanie komputeryzowanych zadań w sposób autonomiczny i izolowany, chociaż w rzeczywistości tworzą one kompleks czynności mniej lub bardziej ze sobą powiązanych.

Dlatego ostatnie kilkanaście lat, to również próby modyfikacji takiego postępowania polegające na opracowywaniu kompleksowych systemów informatycznych dla przedsiębiorstw wodociągowych, integrujących realizację różnych i zależnych od siebie zadań. Takie systemy mają na ogół budowę modułową, przy czym poszczególne moduły wykonują różne zadania korzystając z centralnej branżowej bazy danych tworzonej dla sieci wodociągowej, sieci kanalizacyjnej lub oczyszczalni ścieków. Wymienione obiekty wchodziły zwykle w skład typowego krajowego przedsiębiorstwa wodociągowego, stanowiąc podsystemy złożonego miejskiego systemu wodno-ściekowego. Podstawowe moduły współcześnie tworzonych systemów informatycznych, to mapa numeryczna do wizualizacji obiektu, system monitoringu do zbierania, transmisji, wizualizacji i archiwizacji pomiarów oraz model matematyczny do symulacji badanego procesu. Branżowa baza danych jest źródłem danych obliczeniowych dla wszystkich wymienionych modułów.

Początkowo opracowywane systemy informatyczne dla przedsiębiorstw wodociągowych realizowały przede wszystkim funkcje informacyjne (*pasywne*), polegające na informowaniu operatorów danego procesu o jego stanie, na przykład operatora sieci wodociągowej o przepływach i ciśnieniach wody w sieci. Ostatnio jednak funkcje systemów informatycznych są rozbudowywane o zadania optymalizacji i sterowania powodując, że funkcjonowanie systemu wpływa *aktywnie* na zarządzanie przedsiębiorstwem. Jest to możliwe dzięki włączeniu w strukturę systemu informatycznego modeli matematycznych komputeryzowanych procesów oraz algorytmów obliczeniowych, zwykle w postaci oddzielnych modułów wykonujących zróżnicowane zadania, takie jak symulacja procesu, prognozowanie, optymalizacja i sterowanie. Jest to koncepcja komputeryzacji przedsiębiorstwa wodociągowego, której celem jest *zarządzanie przedsiębiorstwem za pomocą specjalizowanych modeli matematycznych*.

Największy postęp osiągnięto dotychczas przy informatyzacji sieci wodociągowych, które są najmniej złożonym i stosunkowo najłatwiejszym elementem miejskiego systemu wodno-ściekowego w zestawieniu z siecią kanalizacyjną i mechaniczno-biologiczną oczyszczalnią ścieków (Straubel i Holznaegel, 1998; Straubel i Studziński, 2000; Studziński i in., 2005).

2. Miejska sieć wodociągowa

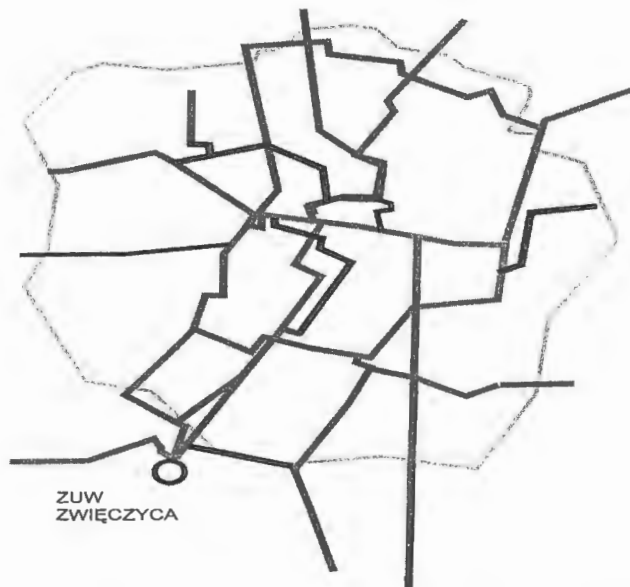
Podstawowe zadania przedsiębiorstwa wodociągowego dotyczące sieci wodociągowej są następujące:

- produkcja i dystrybucja wody pitnej
- zapewnienie żądanej jakości, ilości i ciśnienia wody w punktach jej obioru (w węzłach odbiorczych)
- energooszczędna eksploatacja sieci (sterowanie pompami)
- minimalizacja strat wody (redukcja liczby awarii)
- rewitalizacja sieci (wymiana rur i aparatury sieciowej)
- projektowanie sieci (modernizacja i rozbudowa).

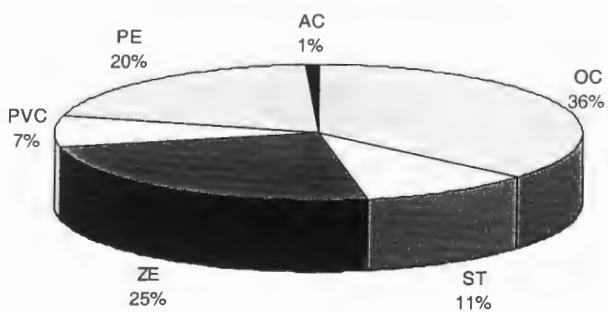
Miejska sieć wodociągowa jest złożonym obiektem, który można opisać za pomocą następujących charakterystycznych własności (w nawiasach podano przykładowe parametry sieci wodociągowej w Rzeszowie, miasta średniej wielkości o liczbie ludności ok. 160.000):

- występowanie kilku źródeł zasilania (2 ujęcia rzeczne)
- duża wydajność nominalna (84.000 m³/dobę)
- duże obciążenie średnie (46.000 m³/dobę)
- duże rozmiary (całkowita długość 682 km, w tym: magistrale – 50 km; sieć rozdzielcza – 349 km; przyłącza – 283 km)
- duża liczba obiektów sterowania (25 przepompowni; 5 zbiorników wyrównawczych o łącznej pojemności 15.600 m³)
- skomplikowana struktura geometryczna (80% sieci o strukturze pierścieniowej)
- duża liczba użytkowników (ok. 16.000 odbiorców zbiorczych)
- zróżnicowana struktura materiałowa (rury ze stali, stali ocynkowanej, zeliwa, PVC, PE, azbestocementu)
- niekorzystna struktura wiekowa sieci (wiek: 30 % poniżej 10 lat; 6 % powyżej 50 lat)
- duża awaryjność sieci (ok. 500 awarii rocznie)
- duże straty wody (ok. 20%).

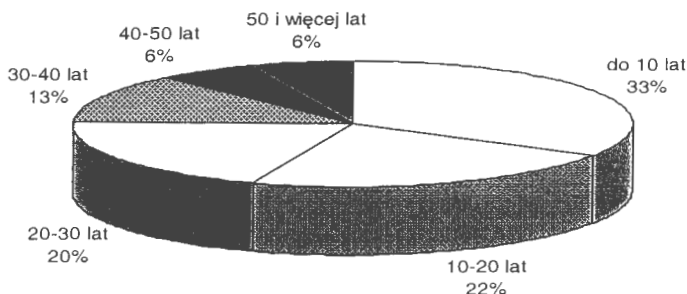
Na rys. 1 przedstawiono schematyczny wygląd sieci wodociągowej w Rzeszowie, która stanowi przykład typowej krajowej sieci miejskiej średniej wielkości. Z kolei na rysunkach 2 i 3 pokazano strukturę materiałową i strukturę wiekową sieci w Rzeszowie, tłumaczące stosunkowo dużą awaryjność tej sieci.



Rys. 1. Schemat sieci wodociągowej w Rzeszowie (ZUW: Zakład Uzdatniania Wody).



Rys. 2. Struktura materiałowa sieci w Rzeszowie.



Rys. 3. Struktura wiekowa sieci w Rzeszowie

3. Stan informatyzacji krajowych przedsiębiorstw wodociągowych

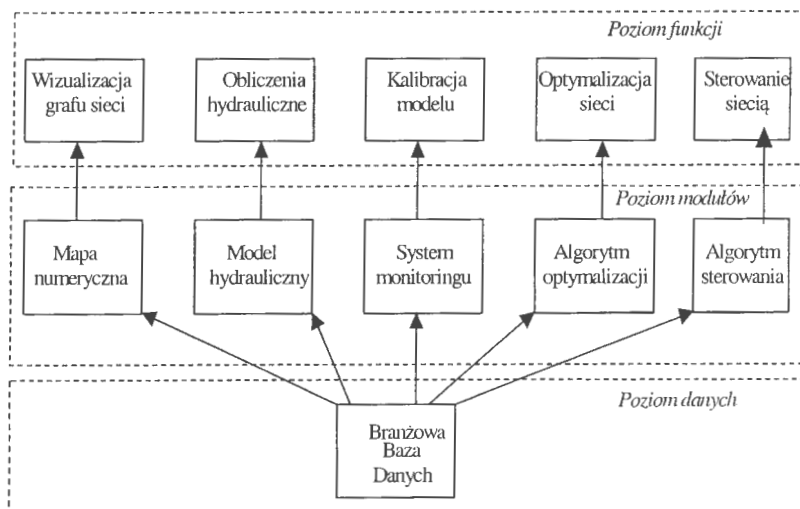
Obecny stan informatyzacji w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowych jest na ogół zły. Powodem tej oceny jest (Kaczmarska, 2004):

- brak w przedsiębiorstwach kompletnych map numerycznych sieci wodociągowych dostosowanych do współpracy z modelami hydraulicznymi sieci
- brak systemów monitoringu umożliwiających prawidłową kalibrację i weryfikację modeli hydraulicznych
- brak dokładnych modeli hydraulicznych i programów optymalizacji, w tym w szczególności optymalizacji wielokryterialnej
- brak integracji i współpracy między poszczególnymi programami
- brak współpracy i koncepcji współpracy między przedsiębiorstwami wodociągowymi i także innymi branżami sieciowymi, co umożliwiłoby wymianę doświadczeń w zakresie informatyzacji
- brak odpowiedniej wiedzy w przedsiębiorstwach o obecnych dużych możliwościach programów i systemów komputerowych.

4. Koncepcja komputerowego systemu SWD dla sieci wodociągowej

Obecne typowe działania związane z informatyzacją sieci wodociągowych polegają na samodzielnym i wybiórczym uruchamianiu niezależnie działających programów, takich jak systemy informacji przestrzennej GIS, systemy monitoringu czy modele hydrauliczne.

Jednocześnie jest już jednak możliwe i celowe uruchamianie złożonych komputerowych systemów wspomagania decyzji operatora sieci wodociągowej. (Straubel i Studziński, 2000). Przykładową koncepcję takiego systemu pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Koncepcja komputerowego systemu wspomagania decyzji

Podstawowe elementy takiego kompleksowego systemu komputerowego są następujące:

- branżowa baza danych
- mapa numeryczna sieci wodociągowej
- system monitoringu
- model hydrauliczny z algorytmami optymalizacji i sterowania.

Z kolei podstawowe funkcje systemu polegają na:

- komputerowej wizualizacji sieci wodociągowej
- symulacji pracy sieci

- optymalizacji pracy sieci
- sterowaniu pompami i napełnianiem zbiorników wyrównawczych.

5. Branżowa baza danych i mapa numeryczna

Branżowa Baza Danych (BBD) jest źródłem technicznych, technologicznych i eksploatacyjnych informacji o sieci. Opracowanie BBD polega na:

- zdefiniowaniu typów obiektów sieci wodociągowej; są one następujące:
 - przewód wodociągowy
 - węzeł sieci, przy czym wśród węzłów wyróżnia się:
 - źródło: pompownia, przepompownia, zbiornik
 - węzeł końcowy: odbiorca – przyłącze
 - węzeł montażowy (zbieganie kilku przewodów do jednego punktu)
 - węzeł pomiarowy
 - aparatura sieci, przy czym wyróżnia się: pompę, zasuwę, reduktor, zawór zwrotny
- zdefiniowaniu atrybutów obiektów; są one następujące:
 - dla przewodu: długość, średnica, materiał, wiek
 - dla węzła: ciśnienie i rozbiór wody, współrzędne
 - dla pompy: typ, charakterystyka, producent
 - dla zbiornika: wymiary geometryczne
 - dla zasuwy, reduktora, zaworu: stan pracy i charakterystyka obiektu.

Program nazywany mapą numeryczną służy do generowanie grafu sieci wodociągowej. Jego podstawowe zadania, to:

- wizualizacja sieci na monitorze komputera
- stworzenie możliwości wykonywania obliczeń hydraulicznych do symulacji i optymalizacji sieci.

Programy mapy numerycznej dla sieci wodociągowych są opracowywane na bazie systemów informacji przestrzennej (GIS). Jednak te systemy w wersji standardowej (na przykład ArcInfo firmy ESRI lub GEOMEDIA firmy Intergraph) są przeznaczone do komputerowej wizualizacji map terenowych, natomiast nie potrafią tworzyć grafów sieci wodociągowych użytecznych dla celów obliczeniowych i dokonywania tematycznych analiz ilościowych. Oznacza to, że za pomocą standardowego systemu GIS można uzyskać na monitorze komputera cyfrowy obraz sieci wodociągowej taki, jaki jest przedstawiony na mapie geodezyjnej sieci (tak zwany graf geodezyjny) i który kwalifikuje się jedynie do analiz jakościowych.

Aby umożliwić wykorzystanie mapy numerycznej sieci wodociągowej również do celów obliczeniowych, należy rozbudować standardowy system GIS o dodatkowe programy narzędziowe, które dostosują go do wymagań przedsiębiorstwa wodociągowego i uczynią z niego odpowiednią aplikację branżową.

Takie dodatkowe programy narzędziowe realizują następujące zadania przekształcające standardowy system GIS do postaci branżowej, w tym przypadku zorientowanej na miejską sieć wodociągową (Studziński i in., 2005):

- przyrostowa aktualizacja danych opisujących sieć wodociągową (automatyczna aktualizacja grafu geodezyjnego sieci, który zmienia się w zależności od zmian dokonywanych na sieci)
- poprawianie topologii grafu geodezyjnego sieci (eliminacja nieciągłości występujących na rysunku sieci na mapie geodezyjnej i spowodowanych niedokładnością wykonania rysunku przez geodetę; w wyniku otrzymuje się tzw. graf topologiczny sieci)
- generowania węzłów sieci nie umieszczanych na mapach geodezyjnych (w wyniku otrzymuje się graf hydrauliczny sieci umożliwiający wykonywanie obliczeń hydraulicznych; na standardowych mapach geodezyjnych nie występują jako obiekty węzły sieci wodociągowej a jedynie jej przewody oraz elementy aparaturowe i przyłącza)
- eksport i import danych z i do BDD za pomocą plików buforowych (dla umożliwienia współpracy między programem mapy numerycznej i programami zewnętrznymi, na przykład modelem hydraulicznym sieci wodociągowej; standardowe systemy GIS traktuje się jako programy autonomiczne i stąd nie uwzględnia się w nich mechanizmów komunikacji z innymi programami).

Miejska sieć wodociągowa składa się z wielu tysięcy odcinków i węzłów, które generują odpowiednio wielką liczbę równań opisujących model hydrauliczny sieci. W rezultacie wykonywanie obliczeń hydraulicznych dla grafu sieci uwzględniającego wszystkie odcinki i węzły wymagałoby bardzo długich czasów obliczeniowych i jest praktycznie niewykonalne i także niepotrzebne.

Dlatego jest celowe opracowanie i włączenie do programu mapy numerycznej algorytmów umożliwiających generowanie grafów hydraulicznych sieci wodociągowej trzech rodzajów. Są one następujące;

- *graf maksymalny* – przedstawiający rzeczywistą strukturę sieci ze wszystkimi węzłami i odcinkami i służący do jej wizualizacji
- *graf uproszczony* – przedstawiający sieć bez węzłów o rozmiarach wody mniejszych od zadanej wartości, które zostały odpowiednio zagregowane; służy do poglądowych obliczeń całej sieci wodociągowej, zasadniczo na poziomie jej struktury magistralnej
- *graf mieszany* – przedstawiający wybrany fragment sieci w postaci maksymalnej a pozostałą część sieci w postaci uproszczonej; służy do dokładnych obliczeń hydraulicznych wybranego fragmentu sieci.

6. System monitoringu sieci wodociągowej

Monitoring sieci wodociągowej służy do zbierania i gromadzenia rzeczywistych i bieżących informacji o pracy i stanie sieci. Pomiarzy z monitoringu są używane do kalibracji i weryfikacji modelu hydraulicznego sieci.

Opracowując system monitoringu dla sieci wodociągowej, należy rozwiązać następujące zadania:

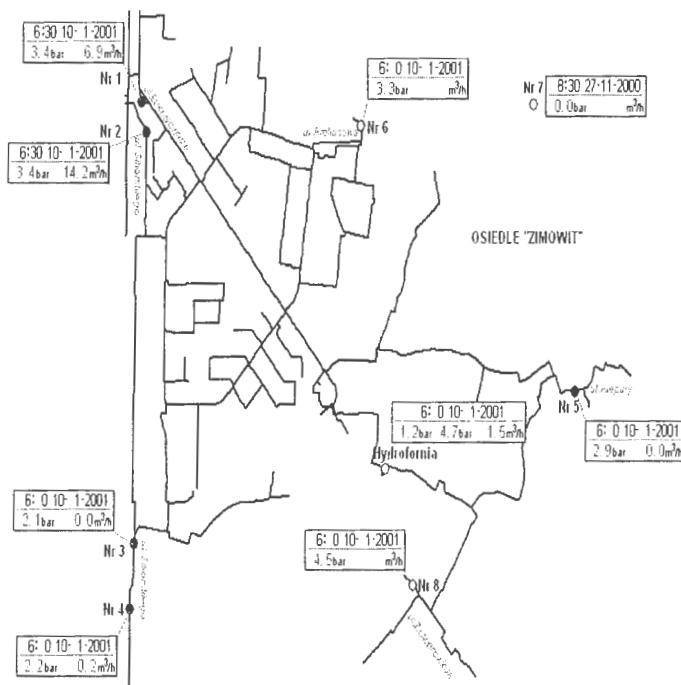
- dokonać wyboru punktów pomiarowych (ze względu na koszty liczba punktów powinna być możliwie mała a ich lokalizacja taka, aby dostarczały możliwe obszernej informacji o stanie sieci; jest to zasadniczo zadanie optymalizacji wielokryterialnej)
- dokonać wyboru urządzeń pomiarowych (są to przepływomierze i ciśnieniomierze)
- wykonać instalację urządzeń pomiarowych (wykonanie i realizacja projektów studzienek pomiarowych, szaf sterowniczych i energetycznych oraz zasilania elektrycznego)
- dokonać wyboru rodzaju transmisji danych (możliwe opcje: telemetria kablowa, telefonia komórkowa, transmisja radiowa)
- ustalić zasady transmisji danych (w sposób ciągły lub okresowo z doбором czasów transmisji)
- dokonać wyboru programu archiwizacji i wizualizacji danych spośród dostępnego na rynku standardowego oprogramowania (przy tym dostępne programy, to między innymi: iFIX, InTouch, Genesis, Lookout, Wizcon, ProTool, Procon, Wince, RSView).

Trzymając się przykładu wodociągów rzeszowskich, przedstawimy poniżej opis pilotowej realizacji systemu monitoringu wykonanego na fragmencie tamtejszej sieci wodociągowej obejmującym około 10 % całej sieci. Opracowując ten system, przyjęto następujące początkowe ustalenia:

- wybór punktów pomiarowych: przyjęto punkty minimalnych i maksymalnych ciśnień w występujących w sieci dwóch strefach zasilania; ustalono:
 - 9 węzłów pomiarowych na sieci
 - 1 węzeł zbierający informacje na stacji operatorskiej
- wybór urządzeń pomiarowych; przyjęto ustalenia:
 - w 5 węzłach wykonuje się pomiary ciśnienia i przepływów wody
 - w 4 węzłach wykonuje się pomiary ciśnienia
- wybór rodzaju transmisji danych: za pomocą telefonii komórkowej GSM
- ustalenie zasad transmisji danych; przyjęto ustalenia:
 - gromadzone dane przechowuje się w pakietach z okresów 15-minutowych
 - rutynowy przesył danych odbywa się 3 razy na dobę w godzinach: 6:00, 14:00, 22:00

- jest możliwość podawania bieżących informacji o stanie pracy na żądanie operatora
- w przypadku wystąpienia nietypowego zdarzenia (uszkodzenie szafy sterowniczej, przekroczenie zakresu pomiarowego, zmiana kierunku przepływu) jest przesyłana do operatora odpowiednia informacja alarmowa
- wybór programu archiwizacji i wizualizacji: wybrano system wizualizacji sieci wodociągowej Procon.

Schemat pilotowego systemu monitoringu zwizualizowany na ekranie monitora przez program Procon jest pokazany na rys. 5.



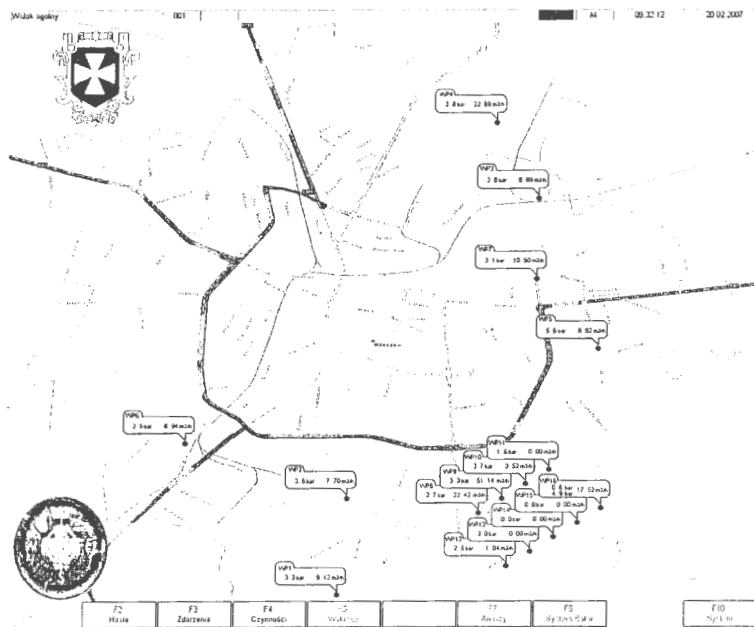
Rys. 5. Schemat pilotowego systemu monitoringu w Rzeszowie.

Pokazany system monitoringu jest bardzo ograniczony, ponieważ na początku prac związanych z zaprojektowaniem i wdrożeniem systemu nigdy dokładnie nie wiadomo, gdzie zlokalizować na sieci wodociągowej punkty pomiarowe. Istotnym zagadnieniem staje się wówczas taki wybór liczby i lokalizacji tych punktów, aby były spełnione co najmniej dwa kryteria celu:

- minimalizacja kosztów wdrażanego systemu
- maksymalizacja informacji pozyskiwanej z zainstalowanych punktów pomiarowych.

Widać, że jest to zadanie optymalizacji wielokryterialnej. Może ono jednak być realizowane jedynie metodą kolejnych przybliżeń, ponieważ wymaga dysponowania modelem hydraulicznym sieci wodociągowej do wykonywania odpowiednich obliczeń symulacyjnych. Z kolei opracowanie modelu hydraulicznego danej sieci wymaga dysponowania odpowiednio efektywnym systemem monitoringu umożliwiającym poprawną kalibrację modelu.

Dlatego prawidłowy proces postępowania przy opracowywaniu systemu monitoringu na ogół wygląda w ten sposób, że najpierw instaluje się w przedsiębiorstwie wodociągowym system ze stosunkową małą liczbą punktów pomiarowych umiejscowionych za to w najbardziej newralgicznych punktach sieci, takich jak ujęcia wody i przepompownie strefowe, następnie zaś za jego pomocą wyznacza się niezbyt dokładny model hydrauliczny sieci wodociągowej, wykorzystywany z kolei do już ukierunkowanej rozbudowy systemu. Tak modyfikowany system umożliwia następnie dokładniejszą kalibrację modelu sieci.



Rys. 6. Schemat rozbudowanego systemu monitoringu w Rzeszowie.

Rozbudowywany stopniowo system monitoringu w Rzeszowie, obejmujący już 16 punktów pomiarowych rozmieszczonych na obszarze całej miejskiej sieci wodociągowej, jest pokazany na rys. 6. System bazuje na nowej wersji programu wizualizacji ProconWin oraz

wykorzystuje ulepszoną wersję transmisji danych pomiarowych za pomocą telefonii komórkowej w systemie GPRS (pakietowy przesył danych).

Przy rozwiązywaniu problemu właściwej lokalizacji punktów pomiarowych dla systemu monitoringu za pomocą metody optymalizacji wielokryterialnej uwzględnia się wrażliwość poszczególnych punktów na lokalne awarie w sieci. Każda awaria powoduje zmianę rozkładu ciśnień i zmianę rozkładu przepływów w sieci wodociągowej w stosunku do pewnego stanu ustalonego. Problem stanowią przy tym nie duże awarie z widocznymi wyciekami wody (spowodowane na przykład pęknięciem rury o dużej średnicy), a awarie mniej spektakularne z wyciekami wody do gruntu (spowodowane na przykład nieszczelnością uszczelki łączącej dwa przewody). Są one trudne do zlokalizowania w tradycyjny optyczny sposób a jednocześnie są częstą przyczyną dużych strat wody.

Jednocześnie w sieci wodociągowej są tzw. punkty praktycznie martwe, gdzie rejestrowana zmiana ciśnienia lub przepływu oznacza zmianę wartości tych sygnałów jedynie w tych punktach, i są punkty wrażliwe, w których następują zmiany mierzonych wartości ciśnienia lub przepływów także w przypadkach, gdy źródłowe zmiany tych parametrów zdarzają się nawet w dużej odległości od punktu pomiarowego. Właśnie takie punkty wrażliwe powinny być uwzględniane w systemach monitoringu.

Proponuje się następujący algorytm postępowania przy lokalizacji punktów wrażliwych w sieci wodociągowej (Straubel i Holznagel, 1998):

- Obliczenie rozkładu ciśnień dla sieci wodociągowej za pomocą modelu hydraulicznego, przy zadanych standardowych obciążeniach węzłów odbiorczych.
- Podział obszaru sieci wodociągowej na podobszary odpowiadające różnym strefom ciśnieniowym (może to dotyczyć na przykład dzielnic miasta).
- Obliczenie ponownie za pomocą modelu hydraulicznego rozkładów ciśnień dla ustalonych podobszarów sieci, przy przyjmowaniu kolejno różnych węzłów montażowych sieci w badanym podobszarze jako węzłów pomiarowych P_m oraz wprowadzaniu kolejno w innych węzłach montażowych dodatkowego rozbioru wody odpowiadającego wyciekowi awaryjnemu.
- Obliczenie wrażliwości badanych punktów pomiarowych na zmiany ciśnienia w sieci spowodowane awarią, według wzoru

$$S_{pm} = \frac{\sum_{k \neq m} (\Delta \Delta_m / P_m) L_{km}}{\sum_{k \neq m} L_{km}}$$

gdzie: m – punkt pomiarowy, k – punkt wystąpienia awarii, p – ciśnienie wody w punkcie (węźle) pomiarowym, L – najkrótsza odległość między zadaniem punktem pomiarowym i zadaniem punktem wystąpienia awarii.

- Ustalenie punktów pomiarowych w sieci w węzłach, dla których uzyskano największą wartość wrażliwości S_{pm} , za pomocą optymalizacji dwukryterialnej, z uwzględnieniem kryteriów celu:

- kosztowego (minimalizacja kosztów instalacji urządzeń pomiarowych w monitorowanych punktach), i
- technicznego (maksymalizacja odległości między standardowym rozkładem ciśnień w sieci wyznaczonym dla pracy bezawaryjnej i rozkładami wyznaczonymi dla różnych stanów awaryjnych).

Podobny algorytm można skonstruować również ze względu na pomiary przepływów a nie ciśnień i wówczas otrzymuje się dwie różne grupy preferowanych punktów pomiarowych, z których wybiera się już arbitralnie te punkty, które znajdują się ostatecznie w systemie monitoringu.

7. Modelowanie sieci wodociągowej

- *Model hydrauliczny*

Podstawowym modelem w systemie zarządzania siecią wodociągową jest model hydrauliczny do obliczania przepływów i ciśnień wody w sieci. Model ten jest opisany liniowymi i nieliniowymi równaniami algebraicznymi, podobnymi do równań opisujących bilanse natężeń i napięć prądów w sieciach elektrycznych i wynikających z I i II *prawa Kirchhoffa* znanych z elektrotechniki. Dla sformułowania równań modelu należy zadać strukturę sieci wodociągowej oraz charakterystyki obiektów aparaturowych znajdujących się w sieci. Sieć składa się z węzłów i odcinków, czyli zadanie jej struktury polega na podaniu współrzędnych przestrzennych węzłów, ich typów oraz długości i średnic odcinków.

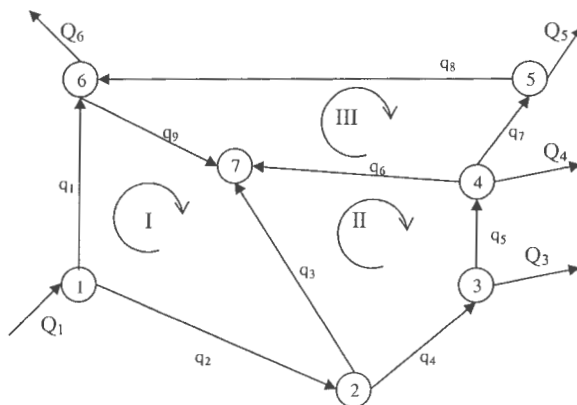
Podstawowe typy węzłów, to węzły zasilające sieć, węzły odbiorcze oraz węzły montażowe. Z kolei podstawowe obiekty aparaturowe sieci wodociągowej, to zasuwki, zawory zwrotne, reduktory ciśnienia, zbiorniki wyrównawcze, układy pompowe w węzłach zasilających na wejściu sieci i w hydroforniach umieszczonych wewnątrz sieci. Dodatkowe niezbędne dane, to wartości rozbiórów wody w węzłach odbiorczych na wyjściu sieci.

Sieci wodociągowe są sieciami ciśnieniowymi, w odróżnieniu od sieci kanalizacyjnych, które na ogół są sieciami mieszanymi, to znaczy ciśnieniowo-grawitacyjnymi. Przepływ wody w odcinku sieci następuje pod wpływem różnicy ciśnień między dwoma sąsiednimi węzłami, zaś prędkość przepływu zależy od ilości przenoszonej wody i średnicy rury. Przepływ wody powoduje spadek ciśnienia wzdłuż rury, zależny od prędkości wody i szorstkości materiału, którego rura jest wykonana. Dla wykonania obliczeń sieci należy mieć podane średnice i długości rur, współczynniki szorstkości materiałowej w rurach oraz wymagane wartości ciśnień w węzłach odbiorczych.

Poglądowy przykład sieci wodociągowej jest pokazany na rys. 7. Składa się ona z $K = 7$ węzłów, $R = 9$ odcinków i $S = 3$ pierścieni. Przy tym węzeł 1 jest zasilający, węzły 3, 4, 5, 6 są odbiorcze i węzły 2, 7 są montażowe. Q_1 oznacza dopływ wody do sieci, natomiast Q_3 do Q_6 oznaczają zadane rozbiory wody.

Na rysunku zaznaczono także sugerowane kierunki przepływu wody w odcinkach sieci oraz szukane wartości przepływów q_i , $i = 1, \dots, 9$.

Zadaniem modelu jest obliczenie wartości przepływów w R odcinkach sieci i ciśnień wody w K węzłach.



Rys. 7. Przykładowy schemat sieci wodociągowej.

Znając liczbę węzłów, odcinków i pierścieni sieci można wyznaczyć liczbę szukanych niewiadomych modelu

$$N = K + R = 2K + S - 1 = 16$$

gdzie

$$R = K + S - 1$$

W tym celu należy ułożyć odpowiedni układ N równań modelu. Na podstawie I *prawa Kirchhoffa* formułuje się dla K węzłów K liniowych równań algebraicznych do obliczania przepływów wody z ich bilansów węzłowych. W rezultacie otrzymuje się układ równań, których liczba jest mniejsza od liczby niewiadomych. Dzieje się tak w przypadku sieci pierścieniowych, w których liczba węzłów jest zawsze mniejsza od liczby odcinków.

Część dodatkowych równań otrzymuje się na podstawie II *prawa Kirchhoffa*, formułując dla S pierścieni S nieliniowych równań algebraicznych do obliczania przepływów wody w odcinkach pierścieni z bilansów ciśnień w pierścieniach. Zgodnie z tym prawem suma wszystkich spadków ciśnienia występujących w danym pierścieniu (lub: oczku) jest równa zeru. Nowe równania sformułowane dla sieci wodociągowej są nieliniowe, co różni je od równań używanych w elektrotechnice, które są również liniowe. Ta różnica utrudnia obliczanie sieci wodnych w porównaniu z sieciami elektrycznymi.

Brakujące $(K - 1)$ równań formułuje się na podstawie znanego z mechaniki płynów *równania Bernoulliego*. Są to liniowe równania algebraiczne do obliczania ciśnień w $(K - 1)$ węzłach sieci. Ostatecznie liczba sformułowanych równań modelu wynosi

$$K + S + K - 1 = N$$

co umożliwia obliczenie N szukanych niewiadomych.

Można zauważyć, że sformułowanie modelu matematycznego dla dowolnej sieci wodociągowej nie jest sprawą trudną a istotne trudności występują dopiero przy obliczaniu sieci, co jest spowodowane wielką na ogół liczą równań w przypadku miejskiej sieci wodociągowych, i nieliniowością tych równań.

Wymienione równania modelu dla schematu sieci z rys. 1 są następujące:

- K równań z I prawa Kirchhoffa:

$$\begin{aligned}
 \text{Węzeł 1:} & \quad Q_1 - q_1 - q_2 = 0 \\
 \text{Węzeł 2:} & \quad q_1 - q_3 - q_4 = 0 \\
 \text{Węzeł 3:} & \quad q_4 - q_5 - Q_3 = 0 \\
 \text{Węzeł 4:} & \quad q_5 - q_6 - q_7 - Q_4 = 0 \\
 \text{Węzeł 5:} & \quad q_7 - q_8 - Q_5 = 0 \\
 \text{Węzeł 6:} & \quad q_1 + q_8 - q_9 - Q_6 = 0 \\
 \text{Węzeł 7:} & \quad q_3 + q_6 + q_9 = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

- S równań z II prawa Kirchhoffa:

$$\begin{aligned}
 \text{Pierścień 1:} & \quad h_{11} + h_{19} - h_{13} - h_{12} = 0 \\
 \text{Pierścień 2:} & \quad h_{13} - h_{16} - h_{15} - h_{14} = 0 \\
 \text{Pierścień 3:} & \quad h_{16} - h_{19} - h_{18} - h_{17} = 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

gdzie h_i oznacza spadek ciśnienia wody wzdłuż odcinka i w danym pierścieniu.

Przy tym istnieje w mechanice płynów następujący wzór Darcy-Weisbacha do obliczania spadku ciśnienia wody płynącej w rurze (odcinku sieci)

$$h_t = \frac{\lambda l v^2}{2 g D} \tag{3}$$

gdzie: λ - współczynnik tarcia, q - natężenie przepływu, g - przyspieszenie ziemskie, l - długość rury i D - jej średnica.

Natężenie przepływu zastępuje się zwykle prędkością wody według wzoru

$$v = \frac{4q}{\pi D^2} \quad (4)$$

Postać *równania Bernoulliego* wiążącego przepływ wody z ciśnieniem w określonym punkcie rury jest następująca

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + H = \text{const} \quad (5)$$

gdzie p oznacza ciśnienie statyczne wody i H jest wysokością punktu, w którym mierzy się przepływ i ciśnienie.

Dla dwóch połączonych rurą węzłów sieci i oraz $(i + 1)$ znajdujących się na różnych wysokościach, przy czym $v_i = v_{i+1}$, zachodzą na podstawie (5) zależności

$$p_{i+1} + H_{i+1} \gamma = p_i + H_i \gamma \quad (6)$$

$$p_{i+1} = p_i + (H_i - H_{i+1}) \gamma \quad (7)$$

Równanie (7) obowiązuje w przypadku idealnym, gdy w rurze nie występują straty (spadek) ciśnienia h_i w wyniku tarcia wody o ścianki rury. W przypadku występowania takiego spadku ciśnienia określonego wzorem (3), równanie (7) przybierze postać

$$p_{i+1} = p_i + (H_i - H_{i+1}) \gamma - h_i \quad (8)$$

Zastępując w (8) ciśnienie statyczne p_i ciśnieniem całkowitym

$$P_i = p_i + H_i \gamma \quad (9)$$

otrzymujemy ostatecznie z (8)

$$P_{i+1} = P_i - h_i \quad (10)$$

Na podstawie (10) można obecnie napisać $(K - 1)$ brakujących równań modelu sieci:

- $(K - 1)$ równań z równania Bernoulliego:

$$\text{Węzeł } i \ (i = 2, \dots, 7): \quad P_i = P_{i-1} - h_{ii} \quad (11)$$

We wzorze (4) występuje współczynnik tarcia λ , który opisuje się w obliczeniach hydraulicznych różnymi wzorami. Zależy on w ogólności od liczby *Reynoldsa* Re oraz od współczynnika szorstkości (chropowatości) materiału rury k , wprowadzonego do mechaniki płynów przez *Nikuradsego*. Liczbę *Reynoldsa* oblicza się ze wzoru

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

gdzie ν oznacza lepkość kinematyczną wody, równą $0,0131 \text{ cm}^2/\text{s}$ dla temperatury wody równej 10°C . Wynika z tego, że współczynnik tarcia λ jest funkcją parametrów ν , k , D , przy czym nie jest niestety znana ogólna postać tej funkcji. Istnieje w literaturze kilkanaście różnych zależności do obliczania λ , wyznaczonych w sposób doświadczalny i wybieranych w zależności od sytuacji i arbitralnego wyboru użytkownika. Jedną z nich zaproponował *Nikuradse* i ma ona postać

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \log \frac{D}{k} + 1,14\right)^2} \quad (12)$$

Przyjmuje się przy tym, że wzór (12) jest spełniony dla całego przedziału wartości liczby *Reynoldsa* i dlatego nie występuje w nim prędkość wody v .

Wartości współczynnika szorstkości k są tablicowane i można je znaleźć w odpowiedniej literaturze.

- **Problemy obliczeniowe modelu hydraulicznego**

Przy rozwiązywaniu równań modelu hydraulicznego napotyka się na dwa problemy obliczeniowe: pierwszy związany z *wyborem kombinacji pierścieni* w sieci do formułowania równań (2) oraz drugi związany z *wyborem algorytmu rozwiązywania układu równań* (1), (2), (11).

Podczas wykonywania wstępnych obliczeń opracowanego modelu hydraulicznego przy zastosowaniu danych testujących zauważono, że *wybór kombinacji pierścieni* do obliczeń istotnie wpływa na otrzymywane wyniki, przy czym liczba możliwych kombinacji rośnie

wykładniczo z liczbą pierścieni (*liczba kombinacji* = $f(n^n)$ dla n oznaczającego liczbę pierścieni).

Jedną z możliwości uniknięcia tych błędów obliczeniowych jest formułowanie układu równań modelu uwzględniającego wszystkie kombinacje pierścieni, jednak jest to sposób ogromnie wydłużający czas obliczeń. Jednocześnie można sądzić, że wspomniane błędy obliczeniowe są wynikiem quasi-osobliwości macierzy tworzonej w formułowanym układzie równań. Oznaczałoby to, że część kolumn tej macierzy jest bliska liniowej zależności, czyli jest źle uwarunkowana (Björck i Dahlquist, 1979).

Jednocześnie wiadomo, że dla układów równań z takimi macierzami nawet bardzo małe różnice w wartościach pojedynczych elementów macierzy mają ogromny wpływ na wyniki rozwiązania tych układów (Engeln-Müllges i Reutter, 1985), co widać na poniższym przykładzie:

Przykład:

Mamy dwa układy równań identyczne z dokładnością do jednego elementu macierzy układu, przy czym różnica w wartościach tego elementu wydaje się znikoma i jest na poziomie 0,3 %:

$$\text{Układ 1:} \quad \begin{pmatrix} 3.3 & 1.2 \\ 6.9 & 2.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.1 \\ 2.7 \end{pmatrix}$$

$$\text{Układ 2:} \quad \begin{pmatrix} 3.31 & 1.2 \\ 6.9 & 2.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.1 \\ 2.7 \end{pmatrix}$$

Mimo tego różnice w rozwiązaniach obu układów są już bardzo duże:

$$\text{Rozwiązanie układu 1:} \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16.333333333 \\ -44 \end{pmatrix}$$

$$\text{Rozwiązanie układu 2} \quad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 98 \\ -269.4 \end{pmatrix}$$

Wydaje się, że byłoby możliwe uniknięcie tej sytuacji poprzez wybór takiej kombinacji pierścieni przy formułowaniu układu równań, która minimalizuje liczbę składników w równaniach (2). Dla przykładu sieci z rys. 7 taką minimalną kombinacją tworzą pierścienie (I, II, III), natomiast nie spełniają tego warunku na przykład kombinacje (I, II, II-III), (II, III, I-II), (I, III, I-II-III) itp.

Odnośnie wyboru algorytmu rozwiązywania układu równań modelu najprostszym sposobem jest jednoczesne rozwiązywanie wszystkich równań (1), (2), (11) traktowanych jako układ algebraicznych równań nieliniowych. Można do tego celu użyć na przykład

metody *Newtona-Raphsona*. Ten sposób nie jest jednak korzystny ze względu na długie czasy obliczeń dla dużych sieci wodociągowych.

Dlatego innym sposobem może być rozdzielenie równań przepływu (1), (2) od równań ciśnień (11) i niezależne obliczanie obu niewiadomych z dwóch niezależnych układów równań. Przy tym układ (1)–(2) jest nieliniowy względem przepływów a układ (11) jest liniowy względem ciśnień. W rezultacie otrzymuje się dwa mniejsze zadania obliczeniowe zamiast jednego dużego a do rozwiązania układu (1)–(2) można ponownie użyć metody *Newtona-Raphsona*.

Modyfikacją tego sposobu postępowania jest rozbitcie układu równań (1)–(2) na dwa oddzielne układy: liniowy (1) i nieliniowy (2), i rozwiązywanie ich w sposób relaksacyjny, to znaczy naprzemiennie rozwiązywanie każdego układu przy ustalonych wartościach zmiennych z drugiego układu. Do rozwiązywania równań liniowych można stosować algorytmy *Gausa* lub *Cholesky'ego*, natomiast równania nieliniowe można ponownie rozwiązywać algorytmem *Newtona-Raphsona*. Wadą tego sposobu postępowania i również jego modyfikacji są w dalszym ciągu długie czasy obliczeń algorytmu *Newtona-Raphsona* i również wolna zbieżność algorytmu relaksacji.

Dlatego do obliczania sieci wodociągowych można stosować także algorytmy specjalizowane oparte na pomysłach rozdziału odcinków sieci (rur) na dwie grupy: należące do pierścieni oraz znajdujące się poza pierścieniami. Wtedy wszystkie przepływy w odcinkach pozapierścieniowych oblicza się z układu równań liniowych (1), natomiast przepływy pierścieniowe oblicza się z układu równań nieliniowych (2). W ten sposób obie grupy przepływów oblicza się oddzielnie mając każdorazowo do czynienia ze stosunkowo małymi i prostymi zadaniami obliczeniowymi. Po obliczeniu przepływów wyznacza się ciśnienia w węzłach sieci rozwiązując pojedynczo równania liniowe (11).

Do rozwiązywania równań liniowych (1) można stosować wspomniane algorytmy *Gausa* lub *Cholesky'ego*, natomiast do rozwiązania równań nieliniowych (2) stosuje się specjalne algorytmy iteracyjne, na przykład algorytm *Crossa*, charakteryzujący się dobrą zbieżnością i dużą szybkością. Zaletą tego sposobu postępowania jest podział dużego zadania początkowego na trzy mniejsze zadania rozwiązywane niezależnie, co znacznie upraszcza i przyspiesza obliczenia.

Reasumując, można wyróżnić następujące sposoby rozwiązywania modelu hydraulicznego sieci wodociągowej:

- Jednoczesne rozwiązywanie całego układu równań modelu traktowanego jako układ nieliniowych równań algebraicznych.
- Oddzielne obliczanie przepływów i ciśnień w sieci, przy czym wszystkie przepływy oblicza się z jednego układu nieliniowych równań algebraicznych.
- Oddzielne obliczanie przepływów i ciśnień w sieci, przy czym przepływy oblicza się relaksacyjnie z dwóch układów równań algebraicznych, liniowego i nieliniowego.
- Oddzielne obliczanie przepływów i ciśnień w sieci, przy czym przepływy oblicza się z dwóch rozwiązywanych niezależnie układów równań algebraicznych, liniowego i nieliniowego.

- *Algorytm numeryczny Crossa obliczania modelu hydraulicznego*

Algorytm *Crossa* jest elementem algorytmu obliczania modelu sieci wodociągowej, w którym wyjściowy układ równań dzieli się na trzy podukłady rozwiązywane niezależnie, przy czym w sposób specjalny rozwiązuje się układ równań nieliniowych względem przepływów (2).

Na podstawie wzorów (3), (4) można spadek ciśnienia wody wzdłuż rury zapisać w postaci

$$h_t = \frac{8\lambda l}{\pi g D^5} q^2 = s q^2 \quad (13)$$

gdzie prędkość wody v zastąpiono przepływem q natomiast pozostałe parametry zastąpiono funkcją pomocniczą s . Jeżeli przepływy wody w odcinkach pierścieniowych są określone poprawnie, to wtedy warunki (2) są spełnione, w przeciwnym przypadku należy zmienić wartości przepływów w każdym pierścieniu o pewną wartość Δq_i , gdzie $i = 1, 2, 3$ dla przykładu sieci z rys. 1. Wtedy mamy z (13)

$$h_{tij} = s_{ij}(q_{ij}^2 + 2q_{ij} \Delta q_i + \Delta q_i^2) \quad (14)$$

przy czym składnik Δq_i^2 we wzorze zwykle się pomija jako nieistotny. Równania (13) dla każdego pierścienia można obecnie zapisać w postaci:

$$\sum_{j=1}^{R_i} h_{tij} = \sum_{j=1}^{R_i} s_{ij}(q_{ij}^2 + 2q_{ij}\Delta q_i) = 0 \quad (15)$$

gdzie R_i oznacza liczbę rur w pierścieniu i .

Z (15) wynikają następujące zależności do obliczania korekty przepływu Δq_i w każdym pierścieniu sieci

$$\Delta q_i = - \frac{\sum_j s_{ij} q_{ij}^2}{2 \sum_j s_{ij} q_{ij}} = - \frac{\sum_j h_{tij}}{2 \sum_j h_{tij} / q_{ij}} \quad (16)$$

Korekty przepływów według wzoru (16) oblicza się w algorytmie *Crossa* do momentu, aż zmiany przepływów w rurach staną się mniejsze od założonej dokładności obliczeń, przy czym algorytm zbiega zwykle do rozwiązania przy małej liczbie (kilku) iteracji.

- **Programy modeli hydraulicznych sieci wodociągowych**

Istnieją w kraju autorskie programy obliczeń hydraulicznych sieci wodociągowych, które są mało przyjazne dla użytkowników innych niż ich autorzy i jednocześnie nie zawierają algorytmów optymalizacyjnych. Istnieją również programy tzw. shareware'owe, dostępne w Internecie, na przykład dosyć popularny program EPANET, który jednak również jest dosyć uciążliwy w obliczeniach. Ponadto wadą takich gotowych programów jest konieczność dostosowywania się użytkownika do programu i brak możliwości dostosowywania programu do wymagań użytkownika.

Dlatego już od kilkunastu lat przyjęto w Instytucie Badań Systemowych PAN zasadę opracowywania własnych programów komputerowych, co umożliwia ich stopniową rozbudowę i także implementowanie i testowanie własnych algorytmów i metod obliczeniowych, innych niż używane w dostępnych programach (Hryniewicz i Studziński, 2006).

Zgodnie z tą zasadą opracowano także własny program obliczeń hydraulicznych OHIO (Obliczenia Hydrauliczne I Optymalizacja), napisany w języku DELPHI dla systemu operacyjnego Windows, charakteryzujący się następującymi własnościami (rys. 8):

- program posiada rozbudowany edytor graficzny, umożliwiający wprowadzanie danych dotyczących sieci wodociągowej (rysowanie grafu sieci i wprowadzanie danych o parametrach sieci) za pomocą myszki i klawiatury
- struktura i parametry sieci mogą być także wprowadzane za pomocą plików danych
- rozbiory węzłowe w sieci (w węzłach odbiorczych sieci) mogą być zadawane w postaci miesięcznych rozbiorów średnich lub w postaci rozkładów godzinowych (dobowe charakterystyki rozbioru dla czterech sezonów rocznych)
- rozbiory wody mogą być zadawane jako rozbiory węzłowe (w węzłach odbiorczych) lub rozbiory odcinkowe (zagregowane rozbiory węzłowe przypisane do danego odcinka sieci)
- program posiada wbudowany algorytm optymalizacji jednokryterialnej do poprawy ciśnień w węzłach końcowych sieci (opisany w dalszym ciągu raportu).
- program posiada wbudowany algorytm obliczania wieku wody w przewodach wodociągowych (opisany w dalszym ciągu raportu)
- program ma możliwość zadawania charakterystyk dobowych chlorowania wody w węzłach źródłowych typu zbiornik wyrównawczy lub stacja ujęcia wody (wieża ciśnień)
- uwzględniane w programie obiekty sieci wodociągowej, to węzły, odcinki oraz tzw. elementy aparaturowe sieci, czyli:
 - pompy (względnie pompownie, przy czym mogą to być pompownie źródłowe w stacjach ujęcia wody lub pompownie strefowe, inaczej przepompownie)
 - zbiorniki

- zasuw
- zawory zwrotne
- reduktory ciśnienia

– w przypadku pomp podaje się ich charakterystykę pracy.

Poniżej podano struktury dwóch plików danych stosowanych w programie obliczeń hydraulicznych:

1. Plik **WEZLY.DAT** (plik opisuje węzły sieci)

Jest to tablica o 11 kolumnach i liczbie wierszy równej liczbie węzłów, przy czym kolejne kolumny oznaczają:

- 1) numer bieżący węzła (**Numer**): INTEGER
- 2) nazwa węzła (**Nazwa**): CHARACTER*16
- 3) wysokość węzła nad poziomem morza (**Z**): REAL [m n.p.m.]
- 4) ciśnienie statyczne w węźle (**P-stat**): REAL [m słupa wody]
 - jeżeli brak danej, należy wstawić **0**
 - dla węzła **Wieża ciśnień (Typ = 1)** oraz **Zbiornik (Typ = 3)** należy podać ciśnienie statyczne **P-stat > 0**
- 5) ciśnienie zadane w węźle (**P-zad**): REAL [m słupa wody]
 - ciśnienie zadane podaje się tylko dla węzła **Odbiorca (Typ = 4)** (**P-zad > 0**)
 - dla innych węzłów należy wstawić **0**
- 6) przepływ wody węźle (**Q**): REAL [l/s]
 - dla węzła **Pompownia (Typ = 2)** **Q > 0** i dla węzła **Odbiorca (Typ = 4)** **Q < 0**
 - jeżeli nie podaje się przepływu, należy wstawić **Q = 0**
 - dla danego węzła można zadać albo niezerowe ciśnienie statyczne **P-stat** albo niezerowy przepływ **Q**; jeżeli obie wartości są jednocześnie niezerowe, pojawia się sygnalizacja błędu
 - dla węzła **Wieża ciśnień (Typ = 1)** oraz **Zbiornik (Typ = 3)** należy podać **Q = 0** i wtedy **P-stat > 0**

- dla węzła **Inny (Montażowy, Pomiarowy)** (**Typ = 0**) zadaje się zerowe **P-stat** i **Q**
- 7) liczba (**L-odc**) odcinków odchodzących z węzła: INTEGER
 - parametr nie jest obecnie używany, należy wstawić **0**
 - 8) współrzędna x (**X**) węzła: REAL
 - jednostki dowolne, współrzędne są automatycznie skalowane do wymiarów ekranu
 - 9) współrzędna y (**Y**) węzła: REAL
 - jednostki dowolne, współrzędne są automatycznie skalowane do wymiarów ekranu
 - 10) oznaczenie (**Typ**) typu węzła: INTEGER
 - **Wieża ciśnień = 1, Pompownia (Ujęcie) = 2, Zbiornik = 3, Odbiorca = 4**
 - **Inny (Montażowy, Pomiarowy) = 0**
 - 11) liczba godzin pracy pomp (**h-Pompy**) REAL [h/d]
 - w węzle **Pompownia (Typ = 1)** i **Przepompownia (Typ = 2)**

Przykład pliku dla 4 węzłów:

```
1, 'KKK1', 21, 00.00, 00, +00.0000, 0, 42, 42, 0, 00.0
2, 'KKK2', 22, 00.00, 30, -12.0000, 0, 58, 42, 3, 00.0
3, 'KKK3', 55, 00.01, 00, +00.0000, 0, 64, 36, 0, 00.0
4, 'KKK4', 27, 60.00, 00, +00.0000, 0, 26, 30, 1, 22.5
```

2. Plik **RURY.DAT** (*plik opisuje odcinki sieci*)

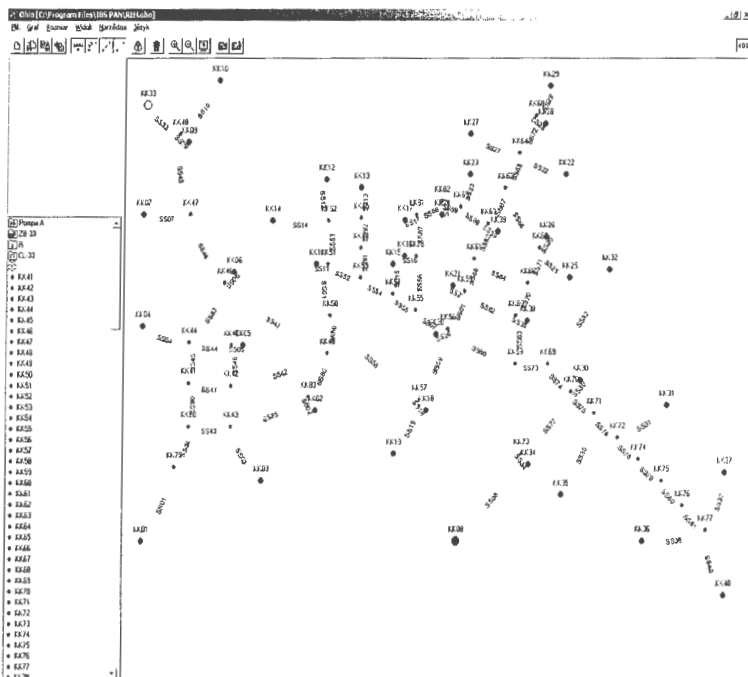
Jest to tablica o 15 kolumnach i liczbie wierszy równej liczbie odcinków, przy czym kolejne kolumny oznaczają:

- 1) numer (**Numer**) bieżący odcinka: INTEGER
- 2) oznaczenie (**Nazwa**) odcinka: CHARACTER*16
- 3) oznaczenie (**Nazwa WP**) węzła początkowego odcinka: CHARACTER*4

- 4) oznaczenie (**Nazwa WK**) węzła końcowego odcinka: CHARACTER*4
- węzeł początkowy i końcowy odcinka wyznaczają kierunek odcinka; jest on istotny przy definiowaniu kierunku przepływu w przypadku zaworu zwrotnego i pompy
- 5) długość (**L**) odcinka: REAL [m]
- 6) efektywna średnica (**D**) odcinka: REAL [mm]
- 7) suma wszystkich dodatkowych oporów odcinka (**Opory**): REAL [mm]
- 8) instalacja zaworu zwrotnego na odcinku (**Zaw**): INTEGER
- **Zaw = 0** jeżeli brak zaworu
 - **Zaw = +1** zawór otwiera się w kierunku zgodnym ze zdefiniowanym kierunkiem odcinka
 - **Zaw = -1** zawór otwiera się w kierunku przeciwnym do zdefiniowanego kierunku odcinka
- 9) chropowatość odcinka (**Chrop**): REAL [mm]
- 10) dodatkowe przyrosty/spadki ciśnienia (ΔD) na odcinku (hydrofornia: pompa odcinkowa): REAL [m słupa wody]
- $\Delta D = 0$ brak zmiany ciśnienia
 - $\Delta D < 0$ wzrost ciśnienia w kierunku przeciwnym do kierunku odcinka (względnie spadek ciśnienia w kierunku zgodnym z kierunkiem odcinka)
 - $\Delta D > 0$ wzrost ciśnienia w kierunku zgodnym z kierunkiem odcinka
- 11) liczba godzin pracy pompy odcinkowej dziennie (**h-Pompy**): REAL [h/d]
- 12) zasuwa (**Zas**): INTEGER
- **Zas = 0** brak zasuwy
 - **Zas > 0** zasuwa zainstalowana
 - **Zas = 1** zasuwa otwarta
 - **Zas = 2** zasuwa zamknięta
- 13) rok produkcji odcinka (rury): INTEGER
- 14) koszty układania odcinka (rury): REAL [PLN/m]
- 15) okres żywotności odcinka (rury): INTEGER [lata]

Przykład pliku dla 3 odcinków:

- 1, 'SSS1', 'KKK2', 'KKK3', 7500, 150, 0, 00, 0.30, 000.0, 0, 1, 1951, 201, 71
- 2, 'SSS2', 'KKK1', 'KKK3', 7500, 200, 0, 00, 0.30, 000.0, 0, 0, 1952, 202, 72
- 3, 'SSS3', 'KKK2', 'KKK1', 7500, 200, 0, 00, 0.30, 000.0, 0, 1, 1953, 203, 73



Rys. 8. Ekran programu OHIO obliczeń hydraulicznych.

W opracowanym programie obliczeń hydraulicznych układ równań algebraicznych opisujący model sieci wodociągowej rozwiązuje się za pomocą specjalizowanego algorytmu *Crossa*. Jednocześnie w ramach współpracy nawiązanej z berlińską firmą usług komputerowych REUS pozyskano do wykorzystania program z modelem hydraulicznym sieci wodociągowej obliczanym za pomocą klasycznej metody *Newtona-Raphsona*. Obecnie trwają badania, których celem jest porównanie obu sposobów obliczania modelu sieci pod względem szybkości, dokładności i niezawodności obliczeń.

8. Kalibracja modelu hydraulicznego

- *Kalibracja modelu na podstawie danych z monitoringu*

Systemy monitoringu służą do usprawniania zarządzania siecią wodociągową, jednak takie zarządzanie również obecnie może zachodzić i często zachodzi bez stosowania takich systemów. W tym celu są niezbędne długoletnia praktyka i doświadczenie kadry inżynierskiej przedsiębiorstwa wodociągowego. Natomiast systemy monitoringu są konieczne w przypadkach, gdy w przedsiębiorstwie wodociągowym planuje się wdrożenie modelu hydraulicznego sieci wodociągowej do symulacji stanów pracy sieci, do prac projektowych lub sterowania siecią. Monitoring sieci służy wówczas do kalibracji modelu, czyli jego dopasowania do badanego obiektu, oraz do okresowej weryfikacji modelu koniecznej ze względu na zmiany zachodzące na sieci i spowodowane jej starzeniem się względnie modernizacją lub rozbudową.

Kalibracja oznacza dobór współczynników w równaniach modelu dokonywany w sposób ręczny, w odróżnieniu od klasycznej identyfikacji, gdy takie zadanie odbywa się automatycznie za pomocą metod optymalizacji i z zastosowaniem odpowiednio skonstruowanych funkcji celu. Wykonywanie kalibracji a nie identyfikacji jest spowodowane faktem, że modele hydrauliczne sieci wodociągowych są zbudowane z ogromnej liczby równań, zależnej proporcjonalnie od liczby węzłów i odcinków sieci, a w przypadku miejskich sieci wodociągowych liczby tę sięgają kilku, kilkunastu lub nawet kilkudziesięciu tysięcy węzłów i odcinków. To powoduje, że ogromna jest również liczba współczynników, dla których szuka się wartości, a klasyczne metody optymalizacji na ogół zawodzą w przypadku identyfikacji złożonych modeli o dużej liczbie parametrów. Problemy obliczeniowe zaczynają się pojawiać już wówczas, gdy mamy do czynienia z modelami o kilkudziesięciu czy nawet kilkunastu parametrach. Z takimi problemami zmierzono się na przykład przy identyfikacji modelu wanny szklarskiej, opisanego równaniami różniczkowymi zwyczajnymi dziewiątego i jedenastego rzędu, czyli posiadającego w drugim przypadku 11 szukanych parametrów (Studziński, 2002).

Dodatkowy problem pojawiający się w przypadku identyfikacji modeli matematycznych jest związany z postacią funkcji celu. Na ogół przyjmuje się w obliczeniach klasyczną kwadratową funkcję celu opartą na sumach resztowych, to znaczy na sumie kwadratów różnic między zmierzonym wyjściem badanego obiektu a obliczonym wyjściem liczonego modelu. Jednak w przypadku złożonych nieliniowych modeli, a z takim zagadnieniem mamy do czynienia w przypadku modeli hydraulicznych sieci wodociągowych, kwadrat sumy różnic między obydwoma sygnałami wyjściowymi daje w rezultacie funkcję silnie nieliniową i multimodalną, z wieloma optimumi lokalnymi, co powoduje, że stosowane metody optymalizacji na ogół zbiegają do tych minimów i nie są w stanie znaleźć minimum globalnego.

Wymienione problemy powodują, że zamiast identyfikacji stosuje się powszechnie kalibrację modeli hydraulicznych sieci wodociągowych. Dokładniej polega ona na tym, że w równaniach modelu ręcznie ustala się wartości nieznanych współczynników i następnie wykonując symulację modelu porównuje się obliczone wyjścia modelu z wartościami

zmierzonymi na obiekcie. Te wyjścia, to zwykle ciśnienia i przepływy wody w monitorowanych węzłach i odcinkach sieci. Jeżeli nie ma zadowalającej zgodności między porównywanymi wartościami ciśnień i przepływów, to zmienia się szukane wartości współczynników i powtarza obliczenia symulacyjne do momentu, gdy uzyska się żadaną zgodność.

Jest to proces bardzo żmudny i czasochłonny, jednak kalibrację tego rodzaju ułatwia fakt, że szukane współczynniki mają na ogół interpretację fizyczną, na przykład szorstkość k (chropowatość) przewodu wodociągowego, a więc ich wartości są dobierane z odpowiednich znanych przedziałów wartości. Dodatkowy parametr, który również może być szacowany, to średnica D przewodu wodociągowego. Na ogół zadaje się w obliczeniach wartości średnic nominalnych, które są stabilizowane, jednak w przypadku starych przewodów w wyniku zarastania glonami średnica rzeczywista jest na ogół mniejsza od nominalnej i dlatego może być ona dodatkowym szukanym parametrem modelu.

Zwykle istotnym problemem przy kalibracji modelu hydraulicznego jest ograniczona liczba punktów pomiarowych w systemie monitoringu, które służą jako punkty odniesienia dla obliczanych wartości wyjścia modelu. Przypadek idealny to taki, gdy można porównywać wszystkie wartości obliczone z odpowiednimi wartościami zmierzonymi, co oznacza posiadanie urządzeń pomiarowych we wszystkich węzłach i odcinkach sieci wodociągowej. Jest to możliwe w przypadku bardzo małych sieci i nie jest możliwe do zrealizowania ze względów kosztowych w przypadku dużych miejskich sieci wodociągowych.

Dlatego w takich przypadkach można stosować przy kalibracji modelu hydraulicznego przenośne urządzenia pomiarowe do czasowych a nie stacjonarnych pomiarów w wybranych punktach sieci wodociągowej, co wymaga jednak opracowywania specjalnych planów eksperymentów pomiarowych dla celów kalibracji.

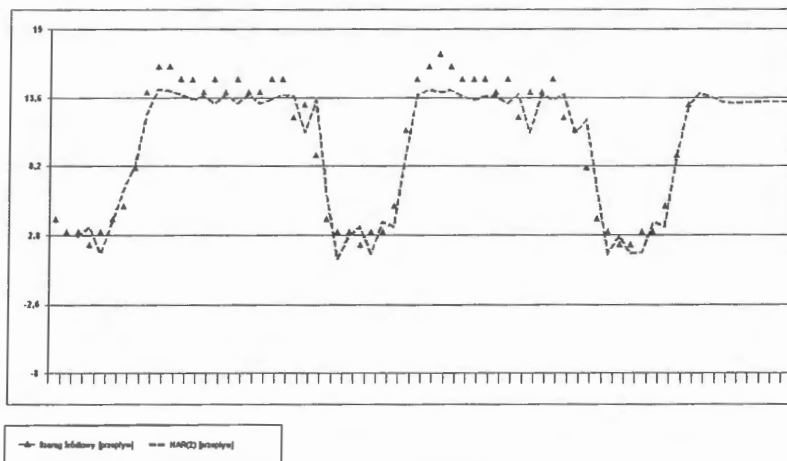
• *Modele prognozowania rozbiorów wody*

Przy kalibracji modelu hydraulicznego sprawą zasadniczą jest prawidłowe zadanie rozbiorów wody, które na równi z geometrycznymi parametrami sieci wodociągowej decydują o poprawności obliczeń symulacyjnych. Dysponując systemem monitoringu mamy do dyspozycji zmierzone wartości rozbiorów w wybranych punktach sieci, jednak liczba punktów pomiarowych jest nieznaczna w stosunku do wszystkich węzłów odbiorczych miejskiej sieci wodociągowej. Dlatego jest bardzo istotne, jakie wartości rozbiorów zostaną zadane w pozostałych niezmiierzonych węzłach.

Na ogół prowadzi się obliczenia dla uśrednionych dobowych wartości rozbiorów, które wyznacza się w sposób przybliżony na podstawie informacji o sprzedaży wody dla konkretnych odbiorców, uzyskanych z Działu Zbytu przedsiębiorstwa wodociągowego. Ponieważ uzyskanie takich danych dla każdego węzła jest bardzo uciążliwe, więc często zadaje się w programie obliczeniowym nie rozbiory węzłowe a rozbiory odcinkowe, co oznacza, że podaje się obciążenie sieci nie w pojedynczym punkcie a w pewnym obszarze. Zarówno program OHIO jak i ten pozyskany z firmy REUS umożliwiają prowadzenie obliczeń hydraulicznych z zadanymi rozbiorami odcinkowymi.

Wydaje się jednak, że dokładniejsze wyniki można otrzymać próbując wyznaczyć charakterystyki godzinowe dla typowych węzłów odbiorczych sieci. Obciążenie sieci zmienia się w czasie i to zarówno w cyklu dobowym, jak również tygodniowym i nawet sezonowym.

Jednocześnie w sieci wodociągowej można wyróżnić kilka typów odbiorców, jak na przykład domek jednorodzinny, budynek mieszkalny kilku i wielopiętrowy, zakład rzemieślniczy (piekarnia), przedszkole lub żłobek, szpital, zakład produkcyjny itp. Dla tych odbiorców można wyznaczyć charakterystyki obciążenia (rozbioru) nawet nie korzystając z automatycznych systemów monitoringu a prowadząc eksperymenty z wykorzystaniem przenośnych urządzeń pomiarowych. Posiadając odpowiednie pomiary można następnie wyznaczyć modele obciążenia typowych węzłów odbiorczych służące tak do celów kalibracji (modele symulacyjne), jak i do sterowania siecią (modele prognostyczne).

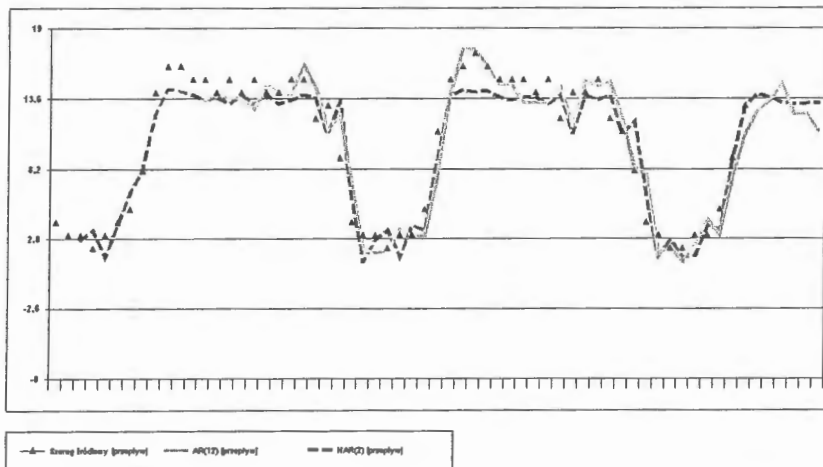


Rys. 9. Prognoza rozbioru węzłowego przy użyciu sieci neuronowej.

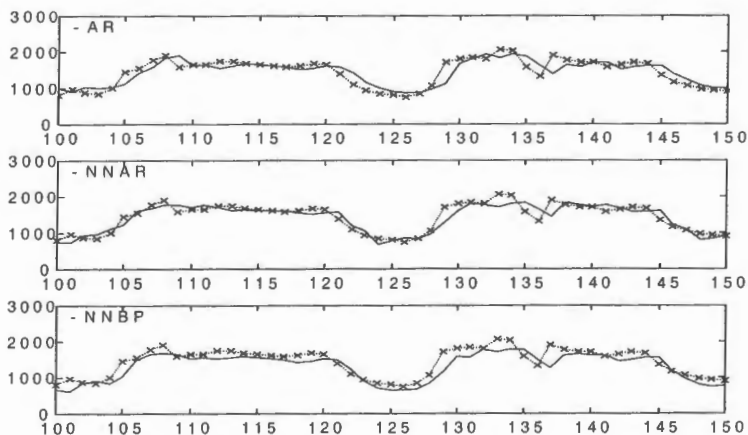
Przeprowadzono odpowiednie obliczenia numeryczne korzystając z rzeczywistych danych dostarczonych przez wodociągi rzeszowskie dla wybranych węzłów sieci (Rojek, 2007). Do wyznaczania modeli obciążenia tych węzłów użyto opisu w postaci sieci neuronowych i również w postaci klasycznych szeregów czasowych. Wyniki obliczeń potwierdziły możliwość i celowość wyznaczania takich modeli (rys. 9).

Jednocześnie ciekawym wynikiem tych badań była obserwacja, że sieci neuronowe niekoniecznie są lepszym opisem modeli niż klasyczne i proste równania różnicowe w postaci szeregów czasowych (rys. 10).

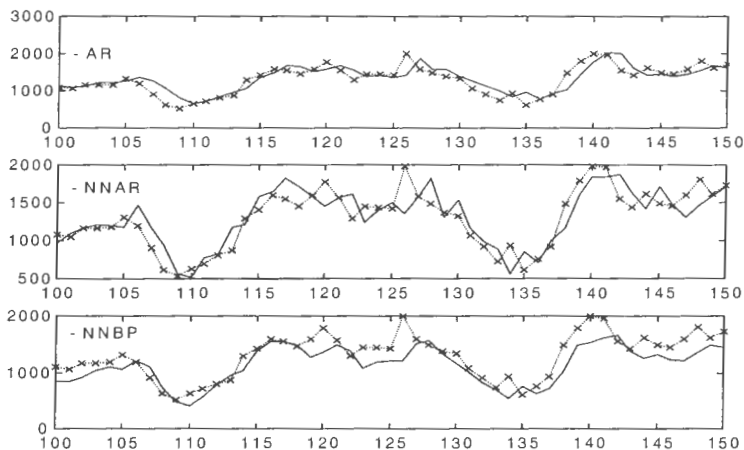
Podobne wnioski wyciągnięto z badań prowadzonych kilka lat temu w IBS PAN i dotyczących wyznaczenia modeli do prognozowania dopływu ścieków do oczyszczalni (Studziński, 2004). Zastosowano wówczas, podobnie jak i w obecnym przypadku, sieci neuronowe trójwarstwowe z jedną warstwą ukrytą i dla porównania równania różnicowe autoregresji niewysokiego rzędu. Obliczenia modeli różnicowych były wówczas i teraz prowadzone za pomocą metod najmniejszej sumy kwadratów Kalmana i uogólnionej metody najmniejszych kwadratów Clarke'a.



Rys. 10. Porównanie prognozy rozbioru węzłowego metodą autoregresji i metodą sieci neuronowej.



Rys. 11. Modele prognostyczne dopływu ścieków: autoregresji (wykres górny) i dwa modele neuronowe (obliczenia uczące).



Rys. 12. Modele prognostyczne dopływu ścieków: autoregresji 5 rzędu (wykres górny) i dwa modele neuronowe (obliczenia testujące).

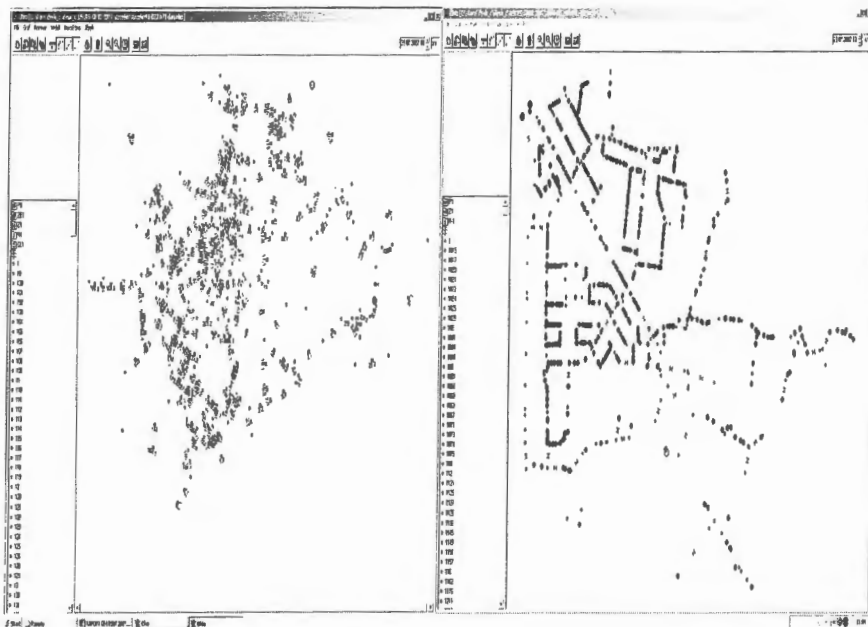
Wyniki obliczeń wykonane dla węzłowych rozbiórów wody w sieci wodociągowej i dla dopływu ścieków do oczyszczalni (rys. 11, 12) wskazują, że zasadniczo wystarczająco dokładnym narzędziem dla wyznaczania modeli tych procesów są szeregi czasowe, znacznie łatwiejsze w obliczeniach i szybsze niż sieci neuronowe. Podobieństwo wyników dla obu rodzajów danych wynika z faktu, że ciągi pomiarów dla rozbiórów wody i dla dopływu ścieków są bardzo podobne pod względem kształtu.

- **Przykładowe wyniki kalibracji**

Opracowany program obliczeń hydraulicznych został użyty do modelowania trzech różnych sieci wodociągowych: w Rzeszowie, w Strzelinie pod Wrocławiem i w niewielkiej miejscowości w Niemczech. We wszystkich przypadkach praca polegała przede wszystkim na zgromadzeniu odpowiednich danych dotyczących danej sieci, następnie ich żmudnej weryfikacji polegającej na konsultacjach z pracownikami przedsiębiorstw wodociągowych odnośnie praktycznie każdego przewodu i elementu aparatury sieciowej, wreszcie na obliczeniach symulacyjnych i bardzo czasochłonnym kalibrowaniu modeli z wykorzystaniem, jako punktów odniesienia, pomiarów przepływów i ciśnień pochodzących z zainstalowanych na sieciach systemów monitoringu.

Kalibracja polegała na próbach zmieniania średnic przewodów oraz na dobieraniu dla praktycznie każdej rury źródnicowanych współczynników szorstkości, występujących we wzorze (12) na współczynnik tarcia wody w przewodzie wodociągowym λ .

Badane sieci wodociągowe są pokazane na rys. 8 (sieć niemiecka) oraz na rys. 13 (sieci w Strzelinie i w Rzeszowie; przy tym sieć w Rzeszowie dotyczy ograniczonego fragmentu sieci obejmującego jedną dzielnicę miasta).



Rys. 13. Ekran programu OHIO dla sieci wodociągowych w Strzelinie (z lewej strony) i w Rzeszowie.

9. Optymalizacja

Do prac projektowych związanych z rekonstrukcją i rozbudową sieci wodociągowych oraz do sterowania pracą sieci stosuje się metody optymalizacji statycznej. Istnieją zatem dwa podstawowe zadania optymalizacji, to znaczy *projektowanie* i *sterowanie* siecią, oraz dwa podstawowe zadania projektowania, to znaczy *rekonstrukcja* i *rozbudowa* sieci wodociągowej.

Projektowanie sieci wodociągowej oznacza taki dobór jej parametrów technicznych względnie także struktury, aby były spełnione określone wymagania techniczne, technologiczne i ekonomiczne związane z eksploatacją sieci.

Istnieją dwie metody projektowania automatycznego sieci wodociągowej, z wykorzystaniem *symulacji* i *optymalizacji* sieci, przy czym w przypadku optymalizacji można stosować metody *optymalizacji jednokryterialnej* i *optymalizacji wielokryterialnej*.

Projektowanie sieci za pomocą *symulacji komputerowej* charakteryzuje się następującymi własnościami:

- dobór zmienianych parametrów sieci jest dokonywany arbitralnie
- obliczenia symulacyjne sieci są wykonywane za pomocą modelu hydraulicznego
- ocena wyników symulacji odbywa się również arbitralnie
- obliczenia symulacyjne sieci powtarza się dla różnych wybieranych arbitralnie wariantów zmian parametrów
- projektant dokonuje wyboru najlepszego rozwiązania spośród wielu wyników symulacji komputerowej.

Oceniając metodę projektowania za pomocą symulacji komputerowej należy stwierdzić, że jest ona *pracochłonna*, *czasochłonna* i *niepewna*, ponieważ w bardzo dużym stopniu zależy od arbitralnych decyzji projektanta.

Z kolei projektowanie sieci wodociągowej za pomocą *metod optymalizacji* charakteryzuje się następującymi własnościami:

- dobór zmienianych parametrów sieci odbywa się w sposób automatyczny
- w sposób arbitralny dokonuje się doboru ograniczeń dla zmienianych parametrów sieci
- ocena i wybór najlepszego rozwiązania są dokonywane automatycznie.

Oceniając sposób projektowania za pomocą metod optymalizacji można stwierdzić, że jest on *wygodny*, *szybki* i *pewny*, ponieważ w małym stopniu zależy od decyzji projektanta a jedynie od obiektywnych wcześniej ustalonych kryteriów jakości.

Jednak istnieją istotne różnice w jakości otrzymywanych rozwiązań w zależności od tego, czy stosuje się w obliczeniach metody optymalizacji jednokryterialnej czy wielokryterialnej.

Optymalizacja jednokryterialna ma następujące własności:

- ocena wyników obliczeń odbywa się na podstawie jednego kryterium jakości (celu)
- pojedyncze kryterium jakości ma charakter kosztowy lub techniczny
- w sposób arbitralny ustala się ograniczenia dla obszaru poszukiwań rozwiązania zadania optymalizacji.

W wyniku obliczeń otrzymuje się pojedyncze optymalne rozwiązanie zadania w bardzo jednak ograniczonym obszarze poszukiwań.

Zupełnie inna sytuacja zachodzi w przypadku *optymalizacji wielokryterialnej*, która ma następujące własności:

- ocena wyników obliczeń odbywa się na podstawie kilku kryteriów celu
- kryteria celu mogą mieć charakter kosztowe, techniczny i technologiczny.

W wyniku obliczeń otrzymuje się zbiór wielu quasi-optymalnych rozwiązań, z których już w sposób arbitralny dokonuje się wyboru najlepszego rozwiązania.

Poniżej pokazano poglądowy przykład zadania optymalizacji wielokryterialnej i dla porównania to samo zadanie rozwiązane za pomocą optymalizacji jednokryterialnej (Straubel i Holznagel, 1998).

Założenia do zadania:

- dokonuje się rekonstrukcji sieci wodociągowej
- przyjmuje się dwa kryteria jakości: kryterium opisujące koszty inwestycji rekonstrukcji sieci (Z_1) oraz kryterium opisujące koszty późniejszej eksploatacji sieci (Z_2)
- przyjęte kryteria jakości są przeciwstawne, to znaczy gdy koszty inwestycji Z_1 są odpowiednio wysokie, to późniejsze koszty eksploatacji sieci Z_2 maleją.

W wyniku obliczeń (rys. 14) otrzymuje się rozwiązania oznaczone symbolami x, O, przy czym rozwiązania oznaczone symbolami x są zdominowane przez rozwiązania lepsze O: na przykład rozwiązanie P_2 jest zdominowane przez rozwiązanie P_1 , które dla mniejszych kosztów inwestycyjnych oferuje identyczne koszty eksploatacyjne.

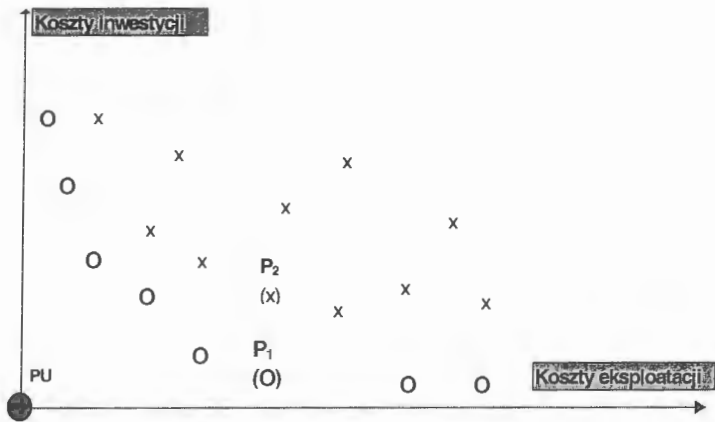
Rozwiązania zdominowane x są automatycznie eliminowane przez algorytm optymalizacji, w wyniku czego otrzymuje się ostatecznie zbiór *Pareto-optymalnych* rozwiązań O. Z tego zbioru projektant wybiera najlepsze rozwiązania już według własnego uznania.

PU na rys. 14 oznacza tak zwany punkt utopijny, czyli rozwiązanie nierealizowalne w praktyce przy tak sformułowanych przeciwstawnych kryteriach jakości.

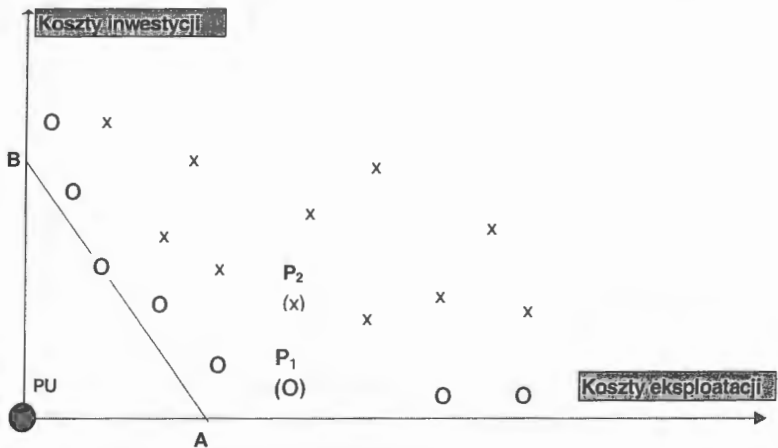
Jeżeli do sformułowanego powyżej zadania zastosuje się metodę optymalizacji jednokryterialnej, to dla dwóch przyjętych wcześniej kryteriów jakości formułuje się nową pojedynczą funkcję kryterialną postaci

$$Z = w_1 Z_1 + w_2 Z_2$$

gdzie w_1, w_2 oznaczają współczynniki wagowe. Ta funkcja jest opisana prostą AB na rys. 15. Wynik obliczeń będzie obecnie punktem na tej prostej.



Rys. 14. Obszar znalezionych rozwiązań w optymalizacji wielokryterialnej.



Rys. 15. Obszary znalezionych rozwiązań w optymalizacji jednokryterialnej i wielokryterialnej.

Porównanie obu metod optymalizacji pokazuje, że w przypadku optymalizacji jednokryterialnej uzyskuje się bardzo ograniczony zakres podejmowanych decyzji a także pojawiają się trudności z doborem wartości dla współczynników wagowych.

Poniżej pokazano rzeczywisty przykład optymalizacji wielokryterialnej, dotyczący optymalizacji sieci wodociągowej w Königs-Wusterhausen w Niemczech za pomocą programu REH opracowanego przez Straubela (Straubel i Holznagel, 1998).

Zadanie dotyczy projektowania sieci i aby je rozwiązać, należy dysponować następującymi danymi niezbędnymi w obliczeniach optymalizacji:

- struktura sieci wodociągowej (lokalizacja węzłów i odcinków)
- ceny przewodów wodociągowych w zależności od ich typu i średnicy
- ceny wykopów ziemnych w zależności od średnicy instalowanego przewodu
- ceny instalacji zbiorników i pompowni
- charakterystyki pracy pomp w zależności od typu pompy
- dopuszczalny dzienny czas pracy pompy w zależności od jej typu
- cena energii elektrycznej
- liczba pracowników zatrudnionych do obsługi sieci wodociągowej
- roczne koszty pracownika
- liczba użytkowników sieci
- roczne zużycie wody przez 1 użytkownika
- zadane ciśnienia w węzłach końcowych.

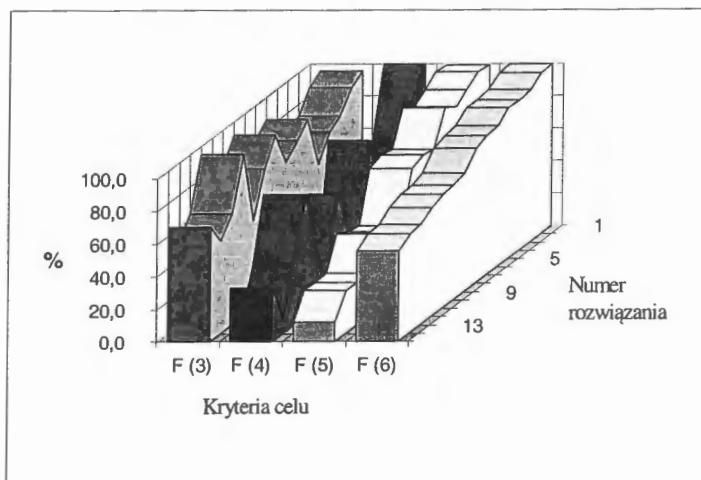
Projektując sieć wodociągową uwzględnia się w omawianym przykładzie następujące możliwe działania:

- instalacja przewodów wodociągowych o różnych średnicach
- instalacja nowych lub zmiana parametrów starych pompowni
- instalacja nowych lub zmiana parametrów starych zbiorników.

Ostatnia czynność przed wykonaniem obliczeń, to sformułowanie kryteriów jakości zapewniających optymalne funkcjonowanie badanej sieci. Ustalono następujące kryteria:

- F(1) (min): maksymalna różnica między zadaniem i obliczonym ciśnieniem w węzłach końcowych
- F(2) (min): suma strat ciśnienia we wszystkich przewodach sieci
- F(3) (min): maksymalne ciśnienie pompowania ustalone dla pompy
- F(4) (max): minimalna szybkość przepływu wody w przewodach
- F(5) (min): łączne koszty inwestycyjne
- F(6) (min): cena 1 m³ wody

Wyniki optymalizacji są pokazane na rys. 16.



Rys. 16. Wyniki obliczeń optymalizacji wielokryterialnej.

Zbiór otrzymanych rozwiązań *Pareto-optimalnych* zawiera 15 punktów, przy czym na wykresie pominięto zmiany kryteriów F(1) i F(2), ponieważ we wszystkich punktach $F(1) = 0$ a zmiany F(2) są pomijalnie małe. W zależności od stosowanych preferencji projektant z otrzymanego zbioru powinien obecnie wybrać najbardziej satysfakcjonujące rozwiązanie.

- **Algorytmy optymalizacji jednokryterialnej w programie OHIO**

Jak wynika z powyższych rozważań, najbardziej wskazane w optymalizacji sieci wodociągowych jest użycie algorytmów *optymalizacji wielokryterialnej*. W wyniku otrzymuje się zbiór rozwiązań *Pareto-optimalnych*, z których każde jest wektorem o liczbie elementów równej liczbie uwzględnianych w obliczeniach funkcji celu. Wybór najbardziej korzystnego rozwiązania należy do projektanta sieci wodociągowej.

Wadą *optymalizacji wielokryterialnej* jest duża czasochłonność obliczeń. Dlatego środkiem zaradczym jest tworzenie pojedynczego kryterium jakości w postaci sumy kilku funkcji celu z dołączonymi współczynnikami wagowymi. W ten sposób zadanie *optymalizacji wielokryterialnej* zostaje sprowadzone do *optymalizacji jednokryterialnej*. Zaletą tego sposobu jest znaczne przyspieszenie obliczeń i otrzymywanie jednego rozwiązania zamiast

zbioru rozwiązań, natomiast wadą jest zależność znajdowanego rozwiązania od przyjętych wartości współczynników wagowych, ustalanych zwykle w sposób arbitralny. Jak pokazano powyżej, znalezione rozwiązanie jest jedynie jednym punktem ze zbioru rozwiązań *Pareto- optymalnych* otrzymywanych z *optymalizacji wielokryterialnej*, co istotnie ogranicza wcześniejszą możliwość dokonania najbardziej korzystnego wyboru spośród wielu propozycji.

Z powyższej dyskusji wynika, że najbardziej wskazana metoda *optymalizacji wielokryterialnej* generuje duże problemy obliczeniowe, natomiast stosowanie metody *optymalizacji jednokryterialnej* z pojedynczą funkcją celu względnie kilkoma zsumowanymi funkcjami celu i arbitralnie dobieieranymi współczynnikami wagowymi bardzo ogranicza praktyczną użyteczność optymalizacji.

Aby obejść te niedogodności można próbować stosować metodę *optymalizacji jednokryterialnej* w kilku kolejnych krokach uwzględniających różne kryteria jakości, przybliżając w taki pośredni sposób zastosowanie *optymalizacji wielokryterialnej*.

Propozycję takiego specjalizowanego algorytmu optymalizacji zastosowanego w programie OHIO przedstawiono poniżej. Składa on się z następujących kroków:

- Krok 1:* Lokalizacja węzłów odbiorczych z nieprawidłowym ciśnieniem wody na podstawie obliczeń symulacyjnych modelu hydraulicznego sieci wodociągowej.
- Krok 2:* Wyznaczenie ścieżek z największymi spadkami ciśnień (największej oporności) między zlokalizowanym węzłami i węzłami zasilającymi (źródłami).
- Krok 3:* Zmniejszanie wartości współczynników tarcia λ do wartości nominalnej w rurach znajdujących się na wyznaczonych ścieżkach.

Powtórzenie kroków 1 i 2

- Krok 4:* Wymiana rur znajdujących się na wyznaczonych ścieżkach na rury o większej średnicy.

Koncepcja tego algorytmu jest następująca: Redukcja współczynnika tarcia w rurach w kroku 3 odpowiada stosowanemu w praktyce czyszczeniu przewodów wodociągowych. Z kolei wymiana rur realizowana w kroku 4 oznacza modernizację sieci wodociągowej. Obie te czynności są związane z różnymi kosztami, przy czym wymiana rur na większe kosztuje znacznie więcej, niż ich czyszczenie.

W ten sposób w algorytmie uwzględnia się pośrednio także koszty optymalizacji i w rezultacie stosowana tutaj dwuetapowa *optymalizacja jednokryterialna* (etap 1 z krokami 1, 2, 3 oraz etap 2 z krokami 1, 2, 4) odpowiada *optymalizacji wielokryterialnej* z dwoma funkcjami celu.

10. Sterowanie

Zadanie *sterowania* siecią wodociągową polega na opracowaniu takiego scenariusza pracy pomp oraz napełniania i opróżniania zbiorników wyrównawczych, aby zapewnić zadane zmienne rozbiory wody w węzłach końcowych przy minimalnych kosztach eksploatacyjnych i prawidłowych parametrach pracy sieci.

Zadanie to można rozwiązać również przy użyciu metody optymalizacji wielokryterialnej. Jego rozwiązanie wymaga znajomości rozkładów godzinowych rozbiorów wody w węzłach końcowych sieci w okresie 1 doby oraz sformułowania odpowiednich kryteriów jakości do optymalizacji. Kryteria te mogą być na przykład następujące:

- Kryterium 1 (min): maksymalna różnica między zadaniem i obliczonym ciśnieniem w węzłach końcowych
- Kryterium 2 (min): suma dobowego zużycia energii przez pompy
- Kryterium 3 (min): maksymalna liczba włączeń/wyłączeń pompy
- Kryterium 4 (min): maksymalne ciśnienie pompowania ustalone dla pompy
- Kryterium 5 (max): minimalna szybkość przepływu wody w przewodach
- Kryterium 6 (max) łączna wymiana wody w zbiornikach sieci.

W wyniku obliczeń otrzymuje się zbiór scenariuszy pracy pomp i napełniania oraz opróżniania zbiorników, z których operator sieci wybierze najlepszy do realizacji, kierując się przy tym własnymi już arbitralnymi preferencjami.

Takie badania prowadzi się obecnie w Instytucie Badań Systemowych PAN korzystając z możliwości wspomnianej wcześniej współpracy z niemiecką firmą REUS oraz z udostępnionego przez tą firmę programu optymalizacji wielokryterialnej REH (Rechnergestuetzte Entscheidungshilfe).

Jednocześnie jednak można generować scenariusze sterowania siecią wodociągową korzystając z algorytmu optymalizacji jednokryterialnej zaimplementowanego w programie OHIO.

Algorytm ten korzysta jedynie z następującego pojedynczego kryterium technicznego:

- Kryterium (min): maksymalna różnica między zadaniem i obliczonym ciśnieniem w węzłach końcowych

i tak dobiera ciśnienia w przepompowniach oraz zasilanie sieci przez pompownie źródłowe, aby uzyskać zadane ciśnienia i rozbiory w węzłach odbiorczych sieci.

Praktyka postępowania jest taka, że po skalibrowaniu modelu danej sieci wodociągowej najpierw dokonuje się jej optymalizacji a dopiero potem wykonuje się obliczenia sterowania,

generując różne scenariusze pracy pomp w zależności od przyjętych charakterystyk obciążenia sieci.

Istnieje również możliwość zastosowania algorytmów sterowania hierarchicznego siecią wodociągową, zaproponowanych przez Duzinkiewicza w jego rozprawie habilitacyjnej (Duzinkiewicz, 2005). Idea tego sterowania polega na tym, że na jednym poziomie wyznacza się nastawy regulatorów w pompowniach ustalające ciśnienie pompowania zespołów pompowych a na drugim poziomie tak steruje się pracą pomp, aby stabilizować ciśnienie tłoczenia na zadanym poziomie.

Jest to skomplikowanie opisanego wyżej zadania sterowania siecią wodociągową, w którym zespoły pompowe na sieci traktowano jako pojedyncze pompy i w związku z tym nie uwzględniano drugiego niższego poziomu sterowania stabilizującego pojedynczymi pompami w ramach zespołu pompowego. Jednak pomysł wydaje się na tyle ciekawy, że badania w tym kierunku będą w IBS PAN prowadzone.

W dodatku idea sterowania dwupoziomowego siecią wodociągową przypomina podobną koncepcję sterowania oczyszczalnią ścieków, sformułowaną w pracy Studzińskiego (Studziński, 2004), co jest kolejnym argumentem na rzecz prowadzenia takich badań również w odniesieniu do systemów wodociągowych a być może również i kanalizacyjnych.

11. Inne zastosowania modelu hydraulicznego

Model hydrauliczny sieci wodociągowej może być, jak pokazano powyżej, stosowany do symulacji pracy sieci, do jej optymalizacji i sterowania a także, wykorzystując obliczenia symulacyjne, do projektowania sieci przy jej modernizacji lub rozbudowie. Jednak zakres zastosowań modelu hydraulicznego jest znacznie szerszy. Takie inne zastosowania, do na przykład:

- obliczanie wieku wody
- obliczanie rozkładów rozchodzenia się różnych mediów w wodzie, np. chloru lub wybranych zanieczyszczeń
- lokalizacja awarii w sieci
- wyznaczanie lokalizacji punktów pomiarowych dla systemu monitoringu
- obliczanie i wizualizacja rozkładów ciśnień i przepływów w sieci.

W opracowanym programie OHIO znajduje się *algorytm obliczania wieku wody*, przy czym przyjęto następujące założenia:

- woda wprowadzana porcjami do pojedynczej rury nie miesza się z poprzednimi porcjami i jej wiek zmienia się zgodnie z upływem czasu
- woda wprowadzana do węzła sieci z różnych rur, w których znajduje się woda o różnym wieku, miesza się i jej wiek jest ważoną średnią arytmetyczną wieków wody ze wszystkich rur.

Algorytm ten jest prosty teoretycznie i jednocześnie bardzo uciążliwy obliczeniowo. W dodatku jest on kwestionowany przez niektórych technologów, którzy z jednej strony uważają, że nie można wieku wody wyznaczać za pomocą średniej arytmetycznej a drugiej strony nie potrafią zaproponować innej zależności. Podobny problem próbowano rozwiązać przy modelowaniu sieci wodociągowej w Koenigs-Wusterhausen w Niemczech i zrezygnowano z jego rozwiązywania z braku koncepcji wzoru dla obliczania wieku wody dwóch mieszających się porcji o różnym wieku.

Ponieważ nie miano możliwości wykonania odpowiednich pomiarów i badań laboratoryjnych, więc trudno ocenić obecnie poprawność wzoru zaproponowanego w programie OHIO. Jednak obliczanie wieku wody jest o tyle istotne, że ma on duży wpływ na jakość wody i należy tak sterować pracą sieci wodociągowej, aby woda nie przebywała w niej zbyt długo (Łomotowski, 2007).

W Koenigs-Wusterhausen ominięto ten problem i zamiast tak eksploatować sieć, aby woda przebywała w niej stosunkowo krótko, tak steruje się jej obiegiem, aby szybkość wody w rurach nie schodziła poniżej pewnego poziomu, tzn. wymusza się w sposób sztuczny obieg wody bez względu na aktualne obciążenie sieci. Do takiego sterowania wykorzystuje się wymieniony już program REH optymalizacji wielokryterialnej z wprowadzonym odpowiednim kryterium celu dotyczącym szybkości wody. Również takie obliczenia będą prowadzone w IBS PAN korzystając z faktu, że program REH jest Instytutowi udostępniony do badań.

Jednak liczenie wieku wody jest o tyle istotne, że znając wiek wody można obliczać również rozchodzenie się różnych substancji w sieci wodociągowej. Ma to duże znaczenie na przykład w przypadku badania rozkładu stężenia chloru w wodzie, który służy do uzdatniania wody pitnej. Ponieważ program OHIO umożliwia zadawanie charakterystyk wprowadzania chloru do sieci w jej różnych wybranych punktach, więc znając funkcje czasowe rozkładania się chloru w wodzie można, korzystając z opracowanego algorytmu liczenia wieku wody, wyznaczać również *rozkłady stężeń chloru* w całej sieci. Odpowiednie wzory rozkładania się chloru są znane w literaturze i podane na przykład w pracy Łomotowskiego (Łomotowski, 2007). Dlatego, mimo niedoskonałości opracowanego algorytmu, jest on stosowany niezależnie od koncepcji sterowania siecią wodociągową z odpowiednio szybkim przepływem wody.

Algorytm lokalizacji punktów pomiarowych dla systemu monitoringu sieci wodociągowej został już omówiony wcześniej. Ustalone za jego pomocą punkty umożliwiają jednocześnie lokalizację awarii poprzez porównywanie standardowych powierzchniowych rozkładów ciśnień względnie przepływów w sieci wodociągowej z aktualnymi rozkładami wyznaczanymi na podstawie bieżących pomiarów.

Tego typu *algorytm lokalizacji awarii* jest dosyć skomplikowany i dlatego zaproponowano i sprawdzono w wodociągach rzeszowskich algorytm prostszy, oparty o charakterystyki ciśnień i przepływów wyznaczone nie globalnie dla całej sieci a lokalnie dla pojedynczych punktów pomiarowych.

Na podstawie pomiarów z tych punktów wyznacza się modele do prognozowania ciśnień i przepływów, podobnie jak to miało miejsce w przypadku modeli do prognozowania rozbiórów węzłowych, i stosując odpowiedni zadany przedział tolerancji porównuje się przebiegi prognozowane z aktualnie mierzonymi. W przypadku gdy pomiary przekraczają

zadane granice tolerancji, jest sygnalizowany operatorowi sieci wodociągowej możliwy stan awarii w danym punkcie pomiarowym lub w jego otoczeniu.

Ponieważ dane pomiarowe do modelowania ciśnień i przepływów są bardzo podobne pod względem kształtu do tych używanych do wyznaczania modeli rozbioru, więc również w tym przypadku można do opisu modeli wykorzystać sieci neuronowe lub szeregi czasowe w postaci równań różnicowych autoregresji.

Podczas eksploatacji sieci wodociągowej ważną informacją dla operatora sieci jest znajomość bieżącego stanu obiektu, tzn. znajomość przepływów i ciśnień w przewodach i węzłach sieci. Informacje te może on uzyskać z wyników symulacji modelu hydraulicznego, jednak ogromna liczba danych, jaka jest uzyskiwana w wyniku symulacji, praktycznie uniemożliwia szybką orientację odnośnie ciśnienia i przepływu w konkretnym węźle i odcinku sieci. Konkretnie chodzi o to, aby szybko zorientować się, czy w jakimś obszarze sieci ciśnienia i prędkości nie są za małe lub za duże. Te pierwsze grożą skargami użytkowników sieci, te drugie grożą wystąpieniem awarii.

Dlatego wydaje się pożytecznym, aby operator miał możliwość szybkiej i raczej jakościowej orientacji o stanie sieci. W przypadku stwierdzenia jakichś nieprawidłowości w jej funkcjonowaniu, może on w dalszej kolejności zająć się bardziej szczegółową i już ilościową analizą danych dostarczonych przez model hydrauliczny.

Aby stworzyć operatorowi sieci wodociągowej narzędzie szybkiej oceny poprawności rozkładów ciśnień i przepływów opracowano program ich obliczania i wizualizacji za pomocą algorytmów krigingowych. Poniżej opisano w skrócie taki algorytm (Bogdan, 2007).

- *Algorytm aproksymacji krigingowej*

Aproksymacja krigingowa oznacza aproksymację nieznanymi wartościami badanej zmiennej w wybranych punktach badanego obszaru (punkty obliczeniowe) na podstawie znanych wartości tej zmiennej zmierzonych w innych punktach tego obszaru (punkty pomiarowe).

Nieznana wartość zmiennej w punkcie obliczeniowym x_0 jest szacowana na podstawie wzoru

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i)$$

gdzie $z(x_i)$ oznacza wartości zmierzone w N punktach pomiarowych a λ_i oznacza odpowiednie współczynniki wagowe.

Funkcją służącą do obliczania współczynników wagowych jest tzw. wariogram

$$D^2[Z(x+h) - Z(x)] = E[Z(x+h) - Z(x)]^2 = 2 \gamma(h)$$

gdzie: $Z(x)$ – badana zmienna, D, E – wariancja i wartość średnia zmiennej $Z(x)$, $2\gamma(h)$ – wariogram, $\gamma(h)$ – semiwariogram, $Z(x), Z(x+h)$ – wartości zmiennej w punktach obszaru $[x, x+h]$ dla $h \in [0, +\infty]$.

Algorytm obliczeniowy aproksymacji krigingowej składa się z następujących czterech kroków:

Krok 1: Obliczenie semiwariogramu doświadczalnego na podstawie pomiarów zebranych w punktach pomiarowych:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (z_{h+1} - z_i)^2$$

gdzie z_i, z_{i+h} są wartościami zmiennej zmierzonymi w punktach oddalonych od siebie o odległość od 0 do h , n_h jest liczbą par takich punktów.

Krok 2: Modelowanie semiwariogramu doświadczalnego przy użyciu różnych funkcji analitycznych i za pomocą metod optymalizacji statycznej.

Krok 3: Obliczanie współczynników wagowych na podstawie warunków nieobciążoności i maksymalnej efektywności estymatora zmiennej:

$$E(z_i - m) = 0$$

$$\sigma^2 = E[(z_i - m)^2] = \min$$

W rezultacie otrzymuje się następujący układ równań

$$\gamma(x_j, x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \mu$$

dla $j=1, 2, \dots, N$. Ma on następującą postać macierzową

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \dots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

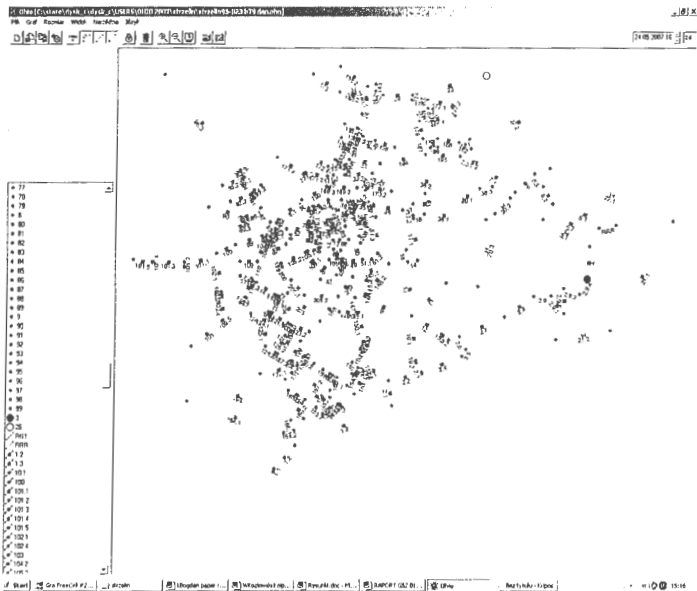
z której wyznacza się szukane współczynniki wagowe.

Krok 4: Obliczanie wartości badanej zmiennej w zadanym niemierzonym punkcie obszaru Z_0 :

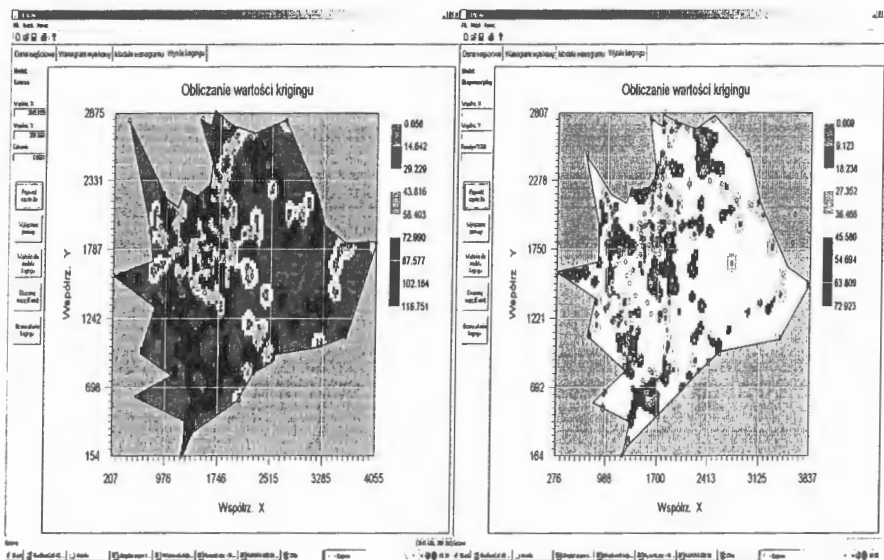
$$z_0 = \sum_{i=1}^N \lambda_i z_i$$

gdzie z_i są znanymi wartościami zmiennej zmierzonymi w punktach pomiarowych.

Na podstawie opisanego algorytmu opracowano w języku C++ program aproksymacji krigingowej KRIPOW, w którym zaimplementowano osiem różnych funkcji analitycznych do modelowania semiwariogramu doświadczalnego, w tym funkcję wykładniczą, potęgową, Gaussa, kwadratową, falową, sferyczną i także liniową. Współczynniki w tych funkcjach wyznacza się za pomocą metody regresji nieliniowej z algorytmem optymalizacji gradientowej Marquardta. Program obliczeniowy pochodzi z biblioteki programów IDOL (Identyfikacja Dynamicznych Obiektów Liniowych), opracowanej w Instytucie Badań Systemowych PAN.



Rys. 17. Przykład badanej sieci wodociągowej.



Rys. 18. Rozkłady ciśnienia (z lewej strony) i przepływów w badanej sieci.

Na rys. 17 pokazano przykład modelowanej sieci wodociągowej a na rys. 18 wyznaczone mapy warstwiczne rozkładów ciśnień i przepływów. Na podstawie tych map operator może bardzo szybko ocenić w sposób jakościowy stan pracy eksploatowanej sieci.

W naszym przykładzie sieć pracuje generalnie poprawnie i tylko w niewielkich jej obszarach ciśnienie jest zbyt duże (obszary zaznaczone kolorem bordowym na mapie) lub zbyt małe (obszary zaznaczone kolorem niebieskim na mapie) i również przepływy są zbyt duże (obszary zaznaczone także kolorem bordowym na mapie) lub zbyt małe (obszary zaznaczone kolorem niebieskim na mapie).

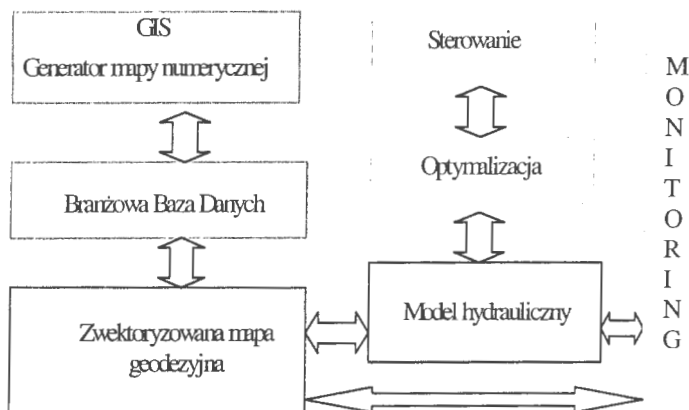
W takich przypadkach operator powinien podjąć działania usprawniające pracę sieci poprzez redukcję względnie zwiększenie ciśnień względnie szybkości przepływów w nieprawidłowo działających obszarach sieci.

12. Kompleksowy system informatyczny zarządzania siecią wodociągową

Na rys. 19 pokazano strukturę systemu informatycznego do zarządzania siecią wodociągową, opracowanego według koncepcji pokazanej na rys. 4. System ten jest testowany w wodociągach rzeszowskich.

Funkcje tego systemu są następujące:

- wizualizacja komputerowa sieci wodociągowej
- wykonywanie analiz przestrzennych i tematycznych na podstawie danych graficznych i opisowych
- monitoring sieci
- generowanie grafów sieci dla programu obliczeń hydraulicznych
- symulacja pracy sieci
- optymalizacja (*jednokryterialna*) sieci (z kryterium technicznym jakości minimalizującym uchyby ciśnienia od wartości zadanych w węzłach końcowych)
- generowanie scenariuszy sterowania siecią.



Rys. 19. Praktyczna realizacja komputerowego systemu wspomaganie decyzji.

Opracowany system nie uwzględnia jednak realizacji funkcji administracyjno-finansowych. Celowość ich uwzględniania wynika po stwierdzeniu faktu, że w przedsiębiorstwie wodociągowym użytkuje się szereg programów o takim charakterze, które korzystają z danych stosowanych w obliczeniach technicznych względnie generują dane wykorzystywane w tych obliczeniach.

Są to następujące programy:

- Aplikacja FK – obsługa Finansowo-Księgowa przedsiębiorstwa (rejestracja odbiorców wody)
- Aplikacja MEDIA – rejestracja rozbiórów wody
- Aplikacja WT – wydawanie Warunków Technicznych (projekty techniczne związane z remontami i rozbudową sieci wodociągowej)
- Aplikacja OT – obsługa Odbiorów Technicznych (protokoły powykonawcze związane z remontami i rozbudową sieci wodociągowej)
- Aplikacja GWS – obsługa Gospodarki Wodno-Ściekowej (rejestracja produkcji wody)
- Aplikacja AW/PE – obsługa AWarii i Przeglądów Eksploatacyjnych sieci wodociągowej.

Uwzględniając rozbudowę opracowanego systemu o wymienione aplikacje, można stworzyć koncepcję systemu informatycznego do kompleksowego zarządzania siecią wodociągową. Schemat takiego systemu przedstawiono na rys. 20. Można w nim wydzielić pewne podsystemy realizujące zadania względnie wspomagające działania wykonywane obecnie przez wydzielone działy przedsiębiorstwa wodociągowego.

Te podsystemy (nazywane również systemami) funkcjonujące w strukturze zarządzania siecią wodociągową są następujące:

1. System Zarządzania Technicznego (ZT):

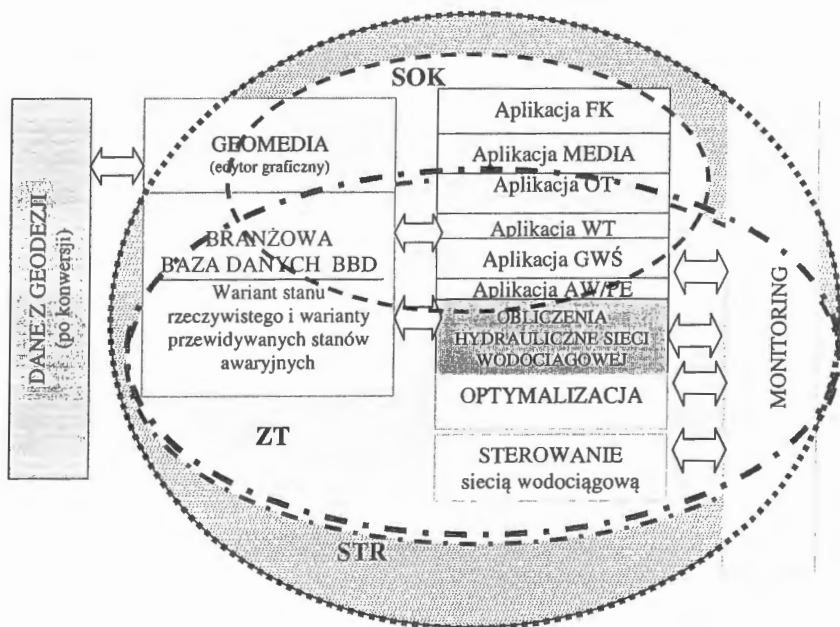
- w skład systemu ZT wchodzi: aplikacja AW/PE, system monitoringu, program obliczeń hydraulicznych, programy optymalizacji i sterowania
- w wyniku działania systemu ZT uzyskuje się:
 - sprawną eksploatację sieci
 - profesjonalne planowanie zadań remontowych i rozbudowy sieci

2. System Obsługi Klienta (SOK):

- w skład systemu SOK wchodzi: aplikacje WT, OT, MEDIA
- w wyniku działania systemu SOK uzyskuje się:
 - sprawną etapową obsługę klienta (dostęp do informacji o warunkach technicznych, odbiorach technicznych i sprzedaży wody)

3. System eliminowania STRat (STR):

- w skład systemu STR wchodzi: analiza danych z Systemu Obsługi Klienta i Systemu Zarządzania Technicznego
- w wyniku działania systemu STR uzyskuje się:
- pomoc w typowaniu i eliminowaniu krytycznych obszarów sieci generujących straty wody.



Rys. 20. Koncepcja rozbudowy systemu wspomaganie decyzji.

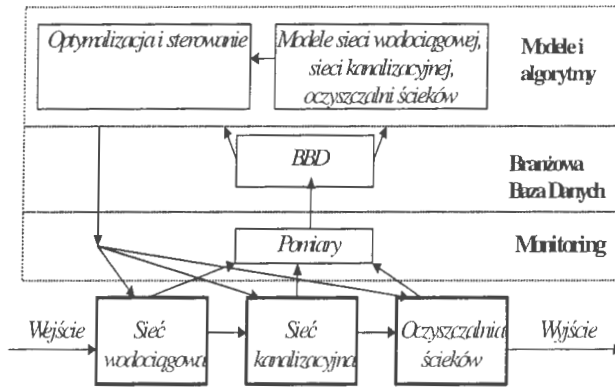
Zostało już wspomniane, że obecnie opracowywane systemy informatyczne dotyczą jedynie wybranych podsystemów miejskiego systemu wodno-ściekowego, a więc sieci wodociągowej, oczyszczalni ścieków i rzadziej sieci kanalizacyjnej.

Wydaje się, że przyszły rozwój systemów informatycznych dla potrzeb przedsiębiorstw wodociągowych powinien iść w kierunku tworzenia systemów kompleksowych, obejmujących swym działaniem cały złożony system wodno-ściekowy w mieście. W takim systemie informatycznym poszczególne podsystemy miejskiego systemu wodno-ściekowego stanowiłyby szeregowo połączone elementy całego ciągu technologicznego poboru, uzdatniania i dystrybucji wody pitnej oraz transportu i oczyszczania ścieków a także związanej z tym utylizacji i gospodarki osadów pościekowych.

Koncepcja takiego złożonego systemu jest pokazana na rys. 21. Jej realizacja umożliwi kompleksową komputeryzację całego miejskiego systemu wodno-ściekowego.

Poszczególne podsystemy złożonego systemu informatycznego zajmują się obsługą:

- poboru i uzdatniania wody pitnej
- dystrybucji wody
- transportu ścieków
- oczyszczania ścieków.



Rys. 21. Koncepcja złożonego systemu wspomagania decyzji dla miejskiego systemu wodno-ściekowego.

Realizacja takich systemów jest już obecnie możliwa, biorąc pod uwagę poziom rozwoju technik komputerowych oraz istniejące i sprawdzone modele sieci wodociągowych, sieci kanalizacyjnych i oczyszczalni ścieków.

13. Literatura

- Bajer A., Dietce G., Mueller W., Soine K.J., Weideling D. ((2005) *Poradnik eksploatatora systemów zaopatrzenia w wodę*. Seidel-Przywecki, Warszawa 2005.
- Björck A., Dahlquist G. (1979) *Numerische Methoden*. Oldenburg.
- Bogdan L. (2007) *Some properties of kriging calculations for environmental measurements data*. Proceedings of vthe ASIS2007 Conference. Brno.
- Brdyś M. (2004) *Sterowanie systemami ściekowymi*. Wodociągi-Kanalizacja: Teoria-Praktyka-Zarządzanie, 6(9), 9-11.
- Brdyś M., Duzinkiewicz K., Chang T., Polycarpou M., Wang Z., Ubek J., Propato (2002) *Hierarchical control of integrated quality and quantity in drinking water distribution systems*. In: Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems (TiASWiK'02), Gdańsk-Sobieszewo, 41-60.
- Denczew S. (2002) *Realization of the monitoring of water distribution systems – an important condition for a correct supervision of its functioning*. In: Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems (TiASWiK'02), Gdańsk-Sobieszewo, 99-103.
- Duzinkiewicz K. (2005) *Zintegrowane systemy sterowania systemami zaopatrzenia w wodę pitną*. Monografie AGH, Kraków.
- Engeln-Müllges G., Reutter F. (1985) *Numerische Mathematik für Ingenieure*. Frankfurt am Main.
- Hryniewicz O., Studzinski J. (2006) *Development of computer science tools for solving the environmental engineering problems*. Proceedings of the Enviroinfo2006 Conference, Graz.
- Kaczmarek D. (2004) *Stan komputeryzacji wybranych wodociągów krajowych w zakresie systemów monitoringu, mapy numerycznej i obliczeń hydraulicznych do celów eksploatacji i prac projektowych sieci wodociągowych*. Raport Badawczy PC 01/2004, IBS PAN, Warszawa.
- Konarczak K. (2004) *Modelowanie i estymacja dla celów predykcyjnego optymalizującego sterowania biologiczną oczyszczalnią ścieków*. Rozprawa doktorska. Katedra Automatyki PG.
- Lomotowski J. (2007) *Jakość wody w miejskich systemach wodociągowych*. Raport G54/04/2007, IBS PAN, Warszawa.
- Rak J.R. (2005) *Podstawy bezpieczeństwa zaopatrzenia w wodę*. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, vol. 28, Lublin.

- Rojek I. (2007) *Opracowanie modeli neuronowych do prognozowania rozbioru wody w węzłach odbiorczych miejskiej sieci wodociągowej*. Raport G54/05/2007, IBS PAN, Warszawa.
- Straubel R., Holznagel B. (1998) *Mehrkriteriale Optimierungen für Planung und Steuerung von Trink- und Abwasser-Verbundsystemen*. W: Problemy monitoringu i automatyzacji oczyszczalni ścieków bytowo-gospodarczych. PZLiTS, Oddział w Poznaniu, Ustronie Morskie, 30-42.
- Straubel R., Studziński J. (2000): *Computer aided planing and operating of the water networks in Koenigs-Wusterhausen and Rzeszow*. Proceedings of 4th International Conference in Water Supply and Quality, Ed. M.M. Sozański, Kraków, 43-54.
- Studziński J. (2002) *Identification of the glass mass flow dynamics in glass tank furnaces*. Proceedings of the APM2002 Conference, St. Petersburg.
- Studziński J. (2004) *Entwicklung von Modellen und Algorithmen zur Simulation und Optimierung von komplexen Wassernetzen*. In: (A. Gnauck Hrsg.) *Theorie von Modellierung von Oekosystemen*. Berichte aus der Umweltinformatik. Shaker Verlag, Aachen (w druku).
- Studziński J. (2004) *Identyfikacja, symulacja i sterowanie oczyszczalniami ścieków*. PAN IBS, Warszawa.
- Studziński J., Karczmarzka D., Popek J. (2005) *Uwagi o wdrożeniu, eksploatacji i propozycjach rozbudowy GIS-Geomedia w wodociągach rzeszowskich*. W: Eksploatacja wodociągów i kanalizacji: GIS, modelowanie i monitoring w zarządzaniu systemami wodociągowymi i kanalizacyjnymi. PZLiTS, Warszawa, 117-128.
- Wedel K. (1998) *Zur mehrkriterialen Optimierung für die Planung von Abwassernetzen*. W: Problemy monitoringu i automatyzacji oczyszczalni ścieków bytowo-gospodarczych. PZLiTS, Oddział w Poznaniu, Ustronie Morskie, 43-58.

the 1990s, the number of people who have been employed in the public sector has increased in all countries. The increase has been particularly rapid in the United Kingdom, where the public sector has grown from 10.5% of the total workforce in 1970 to 20.5% in 1995 (see Figure 1).

There are a number of reasons for the increase in public sector employment. One reason is that the public sector has become a more important part of the economy. In many countries, the public sector has become a major employer of labour, and its growth has been a major factor in the overall growth of the economy. Another reason is that the public sector has become a more attractive place to work. This is due to a number of factors, including the fact that the public sector is often seen as a more secure and stable place to work, and that it offers a range of benefits and perks that are not available in the private sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the growth of the public sector itself. In many countries, the public sector has become a major employer of labour, and its growth has been a major factor in the overall growth of the economy. Another factor is the fact that the public sector is often seen as a more secure and stable place to work, and that it offers a range of benefits and perks that are not available in the private sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the growth of the public sector itself. In many countries, the public sector has become a major employer of labour, and its growth has been a major factor in the overall growth of the economy. Another factor is the fact that the public sector is often seen as a more secure and stable place to work, and that it offers a range of benefits and perks that are not available in the private sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the growth of the public sector itself. In many countries, the public sector has become a major employer of labour, and its growth has been a major factor in the overall growth of the economy. Another factor is the fact that the public sector is often seen as a more secure and stable place to work, and that it offers a range of benefits and perks that are not available in the private sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the growth of the public sector itself. In many countries, the public sector has become a major employer of labour, and its growth has been a major factor in the overall growth of the economy. Another factor is the fact that the public sector is often seen as a more secure and stable place to work, and that it offers a range of benefits and perks that are not available in the private sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the growth of the public sector itself. In many countries, the public sector has become a major employer of labour, and its growth has been a major factor in the overall growth of the economy. Another factor is the fact that the public sector is often seen as a more secure and stable place to work, and that it offers a range of benefits and perks that are not available in the private sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the growth of the public sector itself. In many countries, the public sector has become a major employer of labour, and its growth has been a major factor in the overall growth of the economy. Another factor is the fact that the public sector is often seen as a more secure and stable place to work, and that it offers a range of benefits and perks that are not available in the private sector.

There are a number of factors that have contributed to the increase in public sector employment. One factor is the growth of the public sector itself. In many countries, the public sector has become a major employer of labour, and its growth has been a major factor in the overall growth of the economy. Another factor is the fact that the public sector is often seen as a more secure and stable place to work, and that it offers a range of benefits and perks that are not available in the private sector.

the 1990s, the number of people who have been employed in the public sector has increased in all countries.

There are a number of reasons for the increase in public sector employment. One of the reasons is the increase in the size of the public sector. The public sector has become a major employer in all countries. Another reason is the increase in the number of people who are employed in the public sector. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

The increase in public sector employment has led to a number of problems. One of the problems is the increase in the cost of public sector employment. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

Another problem is the increase in the number of people who are employed in the public sector. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

The increase in public sector employment has led to a number of problems. One of the problems is the increase in the cost of public sector employment. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

Another problem is the increase in the number of people who are employed in the public sector. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

The increase in public sector employment has led to a number of problems. One of the problems is the increase in the cost of public sector employment. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

Another problem is the increase in the number of people who are employed in the public sector. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

The increase in public sector employment has led to a number of problems. One of the problems is the increase in the cost of public sector employment. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

Another problem is the increase in the number of people who are employed in the public sector. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

The increase in public sector employment has led to a number of problems. One of the problems is the increase in the cost of public sector employment. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

Another problem is the increase in the number of people who are employed in the public sector. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

The increase in public sector employment has led to a number of problems. One of the problems is the increase in the cost of public sector employment. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.

Another problem is the increase in the number of people who are employed in the public sector. This is due to the fact that the public sector has become a major employer in all countries.