

35/2004

**Raport Badawczy**

**RB/44/2004**

**Research Report**

**Monitoring i modelowanie  
matematyczne procesów  
meteorologicznych, oczyszczania  
ścieków i dystrybucji wody pitnej**

**L. Bogdan, W. Kozłowski,  
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) 8373578

fax: (+48) (22) 8372772

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

Warszawa 2004

**Polska Akademia Nauk  
Instytut Badań Systemowych**

Raport /2004

Lucyna Bogdan, Wojciech Kozłowski, Jan Studziński

**Monitoring i modelowanie matematyczne procesów meteorologicznych,  
oczyszczania ścieków i dystrybucji wody pitnej**

Redakcja:  
Jan Studziński

**Warszawa 2004**

Lucyna Bogdan, Wojciech Kozłowski, Jan Studziński

**Monitoring i modelowanie matematyczne procesów meteorologicznych,  
oczyszczania ścieków i dystrybucji wody pitnej**

**Spis treści**

Wstęp

1. Application of monitoring technologies in environmental engineering (*Jan Studzinski*)
2. Metody krigingu w opracowaniu danych pomiarowych z monitoringu opadów atmosferycznych (*Lucyna Bogdan, Wojciech Kozłowski*)
3. Identyfikacja, symulacja i sterowanie oczyszczalniami ścieków (*Jan Studzinski*)
4. System zarządzania miejską siecią wodociagową (*Jan Studzinski*)

## Wstęp

W raporcie informacje o czterech pracach opublikowanych w 2004 r. w ramach realizacji tematu: *Modele komputerowe w ochronie środowiska i zdrowia: Metody modelowania i optymalizacji w inżynierii środowiska w zastosowaniu do systemów wodno-ściekowych i monitorowania procesów meteorologicznych i kanalizacyjnych*. Pierwsza praca dotyczy zastosowania systemów monitoringu do pozyskiwania danych pomiarowych umożliwiających tworzenie modeli matematycznych, służących z kolei do badania i optymalizacji procesów szeroko pojętej inżynierii środowiska (J. Studzinski: *Application of monitoring technologies in environmental engineering*). Praca była prezentowana na konferencji *QRM'2004* na Uniwersytecie w Oxfordzie w marcu 2004 r.. Druga praca omawia zagadnienia aproksymacji czasowo-przestrzennej zmiennych meteorologicznych za pomocą algorytmów krigingowych (L. Bogdan, W. Kozłowski: *Metody krigingu w opracowaniu danych pomiarowych z monitoringu opadów atmosferycznych*). Praca była przedstawiona na konferencji *KSW'2004* w Ciechocinku we wrześniu 2004 r. Trzecia praca, to monografia traktująca o modelowaniu, symulacji komputerowej i sterowaniu procesami oczyszczania w mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków (J. Studzinski: *Identyfikacja, symulacja i sterowanie oczyszczalniami ścieków*). Czwarta i ostatnia praca omawia zagadnienia związane z tworzeniem systemu informatycznego do optymalizacji, projektowania i zarządzania miejską siecią wodociagową (Jan Studzinski: *System zarządzania miejską siecią wodociagową*). Była ona również prezentowana na konferencji *KSW'2004* w Ciechocinku, zorganizowanej przez Instytut Badań Systemowych PAN i Akademię Techniczno-Rolniczą w Bydgoszczy.



*Jan Studzinski*

**Identyfikacja, symulacja i sterowanie oczyszczalniami ścieków**

Monografia PAN IBS, Seria Badania Systemowe, t. 35, Warszawa 2004



**IDENTYFIKACJA, SYMULACJA  
I STEROWANIE  
OCZYSZCZALNIAMI ŚCIEKÓW**



INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH • POLSKA AKADEMIA NAUK

**Seria: BADANIA SYSTEMOWE**

**tom 35**

---

**Redaktor naukowy:**

**Prof. dr hab. inż. Jakub Gutenbaum**

**Warszawa 2004**

**Jan Studziński**

**IDENTYFIKACJA, SYMULACJA  
I STEROWANIE  
OCZYSZCZALNIAMI ŚCIEKÓW**

Publikację opiniowali do druku:

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Kuczewski

Prof. dr hab. inż. Andrzej Straszak

Copyright © by Instytut Badań Systemowych PAN  
Warszawa 2004

Komputerowa edycja tekstu: Anna Gostyńska

ISBN 83-85847-88-X

ISSN 0208-8029

Druk i oprawa: ARGRAF Sp. z o.o.  
03-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 76  
tel. (22) 811 51 11, (22) 614 53 31

## SPIS TREŚCI

1.	Wprowadzenie.....	7
2.	Oczyszczalnie ścieków.....	11
2.1.	Procesy biologicznego oczyszczanie ścieków.....	11
2.2.	Ogólny schemat oczyszczalni.....	16
2.3.	Przykłady oczyszczalni z osadem czynnym.....	25
3.	Standardowe modele oczyszczalni.....	33
3.1.	Modele obiektów oczyszczalni.....	33
3.2.	Kompleksowe modele oczyszczalni.....	44
3.3.	Zastosowania modeli standardowych.....	53
4.	Pomiary w oczyszczalniach.....	55
4.1.	Badania laboratoryjne i automatyczne systemy pomiarowe.....	55
4.2.	Plan eksperymentu czynnego.....	57
4.3.	Eksperyment czynny w oczyszczalni w Rzeszowie.....	66
4.4.	Eksperyment bierny.....	71
4.5.	Ocena warunków wykonywania pomiarów w praktyce.....	73
5.	Identyfikacja oczyszczalni.....	75
5.1.	Opis dynamiki przepływu ścieków.....	75
5.2.	Identyfikacja modeli przepływowych.....	81
5.3.	Ocena wyników identyfikacji.....	90
6.	Symulacja oczyszczalni.....	93
6.1.	Model fizyczny do symulacji oczyszczalni.....	93
6.2.	Kalibracja modelu oczyszczalni w Rzeszowie.....	110
6.3.	Ocena opracowanego modelu oczyszczalni.....	116
7.	Sterowanie oczyszczalnią.....	119
7.1.	Sterowanie na podstawie modeli.....	119
7.2.	Wyznaczanie modeli neuronowych.....	126
7.3.	System wspomagania decyzji operatora oczyszczalni.....	146
8.	Zakończenie.....	149
	Literatura.....	153
	Skorowidz.....	165

*Jan Studzinski*

**System zarządzania miejską siecią wodociągową**

**W: *Wspomaganie informatyczne rozwoju społeczno-gospodarczego i ochrony środowiska*** (J. Studziński, L. Drelichowski, O. Hryniewicz, red.)

PAN IBS, Seria Badania Systemowe, t. 36, Warszawa 2004



# SYSTEM ZARZĄDZANIA MIEJSKĄ SIECIĄ WODOCIĄGOWĄ\*

*Jan Studziński*

*Instytut Badań Systemowych, Polska Akademia Nauk  
<studzins@ibspan.waw.pl>*

*In the paper an idea of a complex computer system for decisions support for the operator of a municipal water network is presented. The system consists of four co-operating modules: the numerical map of the water network, the monitoring system, the computer program for hydraulic calculations and for optimisation, and the set of computer programs realising the non-technical tasks which are arising by the maintenance of the waterworks. The numerical map is based on a standard GIS system adapted for the needs of the water network. The modules of computer system co-operate each other using the Branch Data Base which comprise the information about the water network structure and about its elements necessary to carry out the tasks of all modules of the computer system.*

**Keywords:** Decisions Support Systems, mathematical modelling, computer simulation and optimization, water networks.

## 1. Wstęp

W Instytucie Badań Systemowych jest realizowany projekt badawczy KBN pn. 'Optymalizacja i sterowanie miejskiej sieci wodociągowej na podstawie modeli matematycznych'. Dotyczy on opracowania i przetestowania projektu komputerowego systemu wspomagającego decyzje operatora i projektanta komunalnej sieci wodociągowej dla miasta średniej wielkości. Realizacja projektu składa się z kilku etapów: opracowania modelu Branżowej Bazy Danych dla przedsiębiorstwa wodociągowego, opracowania modelu matematycznego do obliczeń hydraulicznych sieci, kalibracji modelu na podstawie pomiarów, opracowania programu optymalizacji dla celów projektowania, opracowania algorytmów sterowania siecią w warunkach standardowych i awaryjnych. Dodatkowymi elementami systemu są mapa numeryczna sieci wodociągowej i system monitoringu. Wszystkie elementy systemu są tworzone w postaci autonomicznych modułów współpracujących ze sobą za pośrednictwem Branżowej Bazy Danych oraz buforowych plików danych realizujących komunikację między modułami.

---

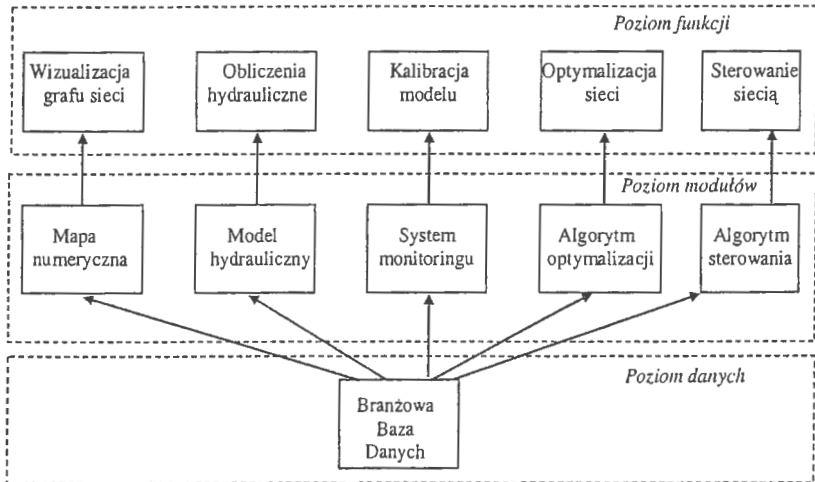
\* Praca wykonana w ramach projektu badawczego KBN nr 3 T11A 010 26.

Celem tworzenia systemu jest usprawnienie zarządzania i uzyskanie oszczędniejszej eksploatacji sieci, a więc ułatwienie pracy operatora sieci. Dane pomiarowe do obliczeń testujących system są dostarczane z Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Rzeszowie, z którym IBS PAN od kilku lat współpracuje.

## 2. Struktura i funkcje systemu komputerowego

System komputerowy składa się z modułów i poziomów funkcjonalnych pokazanych na rys. 1. Funkcje tych modułów są następujące:

- *Branżowa Baza Danych* jest źródłem technicznych, technologicznych i eksploatacyjnych informacji o sieci.
- *Mapa numeryczna* służy do wizualizacji struktury sieci.
- *Model hydrauliczny* umożliwia obliczenia aktualnego rozkładu ciśnień i przepływów wody w węzłach i odcinkach sieci.
- *System monitoringu* służy do aktualizacji Branżowej Bazy Danych oraz kalibracji i okresowej weryfikacji modelu hydraulicznego.
- *Program optymalizacji* służy do doboru optymalnych parametrów sieci, zapewniających żądany rozbiór wody i właściwe ciśnienia w węzłach sieci.



Rysunek 1. Struktura systemu wspomagania decyzji operatora sieci wodociągowej



Opracowanie modelu *Branżowej Bazy Danych* polega na zdefiniowaniu obiektów sieci wodociągowej oraz ich atrybutów. Podstawowe obiekty wodociągów, to: przewody wodociągowe, pompownie, hydrofornie, zbiorniki, przyłącza wodociągowe, zasuwy, reduktory i zawory zwrotne, natomiast ich podstawowe atrybuty, to: długości i średnice przewodów, charakterystyki pracy pomp, wymiary geometryczne zbiorników, stany pracy i charakterystyki zasuw, reduktorów i zaworów.

Dodatkowymi ważnymi obiektami *Branżowej Bazy Danych* są węzły sieci oraz ich atrybuty. Podstawowe węzły sieci wodociągowej, to: źródła, odbiorcy, węzły montażowe i pomiarowe, natomiast ich atrybuty, to ciśnienia i rozbiory wody. *Branżowa Baza Danych* jest podstawą działania wszystkich programów tworzących system komputerowy.

W przypadku *Branżowej Bazy Danych* *podstawowym zadaniem* jest opracowanie jej struktury oraz właściwy dobór obiektów sieci wodociągowej i ich atrybutów.

*Mapa numeryczna* generuje na monitorze graf sieci wodociągowej, który jest podstawą wykonywania obliczeń za pomocą modelu hydraulicznego. System umożliwia tworzenie grafów sieci o różnym stopniu złożoności. Sieć miejska, nawet dla miasta średniej wielkości, składa się z wielu tysięcy odcinków i węzłów. To powoduje, że obliczenia hydrauliczne, mające charakter przybliżony, mogą trwać bardzo długo uniemożliwiając sterowanie siecią w trybie ciągłym. Dlatego opracowano koncepcję generowania grafów trzech rodzajów: złożonych, uproszczonych i mieszanych. *Graf złożony* odzwierciedla rzeczywistą strukturę sieci, w praktyce zbyt skomplikowaną, aby wykonać obliczenia hydrauliczne. *Graf uproszczony* pokazuje sieć bez uwzględnienia węzłów o małych rozmiarach i w rezultacie wszystkich przyłączy sieci. *Graf uproszczony* umożliwia wykonywanie obliczeń dla przepływów wody w centralnych magistralach sieci i w rurach o średnicach powyżej pewnej wartości. Takie informacje dają przybliżone pojęcie o ogólnym stanie sieci, jednak nie umożliwiają szczegółowego śledzenia ciśnień i przepływów u każdego odbiorcy wody. Stąd powstała koncepcja generowania *grafów mieszanych*, to znaczy takich, że całość sieci jest przedstawiona w postaci uproszczonej, natomiast wybrany fragment sieci, na przykład określona dzielnica miasta, jest przedstawiony w postaci złożonej.

W przypadku mapy numerycznej *podstawowym zadaniem* jest opracowanie algorytmów generujących odpowiednie grafy sieci wodociągowej, umożliwiające obliczenia hydrauliczne o różnym stopniu ogólności.

*Model hydrauliczny* służy do symulacji komputerowej sieci wodociągowej, to znaczy wykonania obliczeń dotyczących wyznaczenia przepływów i ciśnień wody w przewodach i węzłach sieci o zadanej strukturze przy zadanych rozmiarach w węzłach odbiorczych. Zadanie struktury oznacza zadanie grafu sieci, czyli podanie współrzędnych węzłów, długości i średnic przewodów oraz elementów

aparatury wodociągowej i ich charakterystyk. Na podstawie zadanego grafu program tworzy model sieci, to znaczy układ równań opisujących sieć, przy czym jest to układ liniowych i nieliniowych równań algebraicznych wynikających z *I* i *II* prawa Kirchhoffa oraz z równania Bernoulliego. Przy tym z *I* prawa Kirchhoffa otrzymujemy liniowe równania przepływu w węzłach sieci, z *II* prawa Kirchhoffa otrzymujemy nieliniowe równania przepływu w pierścieniach sieci oraz z równania Bernoulliego otrzymujemy liniowe równania ciśnień w węzłach sieci. Rozwiązanie tego układu dla zadanych rozbiórów węzłowych jest rozwiązaniem zadania symulacji komputerowej.

Przy formułowaniu i obliczeniach modelu hydraulicznego napotyka się dwa istotne problemy związane z wyborem odpowiedniej kombinacji pierścieni uwzględnianej w obliczeniach oraz z wyborem metody obliczeniowej do rozwiązywania układu równań algebraicznych. Ponieważ obliczenia modelu są przybliżone, więc wybór kombinacji pierścieni do obliczeń może mieć istotny wpływ na wynik tych obliczeń. Dla przykładu: jeżeli w grafie sieci mamy na przykład dwa graniczące ze sobą i rozdzielne pierścienie I i II, które nazwiemy *pierścieniami elementarnymi*, to dają one już trzy możliwe kombinacje obliczeniowe: pierścień I i pierścień II, pierścień I i pierścień utworzony z pierścieni I i II oraz pierścień II i pierścień utworzony z pierścieni I i II. Liczba możliwych kombinacji obliczeniowych rośnie z siłą liczb pierścieni elementarnych. Jedną z metod rozwiązania tego zagadnienia jest wykonanie obliczeń dla wszystkich możliwych kombinacji pierścieni, co istotnie wydłuży czas obliczeń, jednak pozwoli wyeliminować błędy złego wyboru kombinacji.

W przypadku wyboru metody do rozwiązywania równań modelu hydraulicznego istnieją dwa podstawowe podejścia: matematyczne i inżynierskie, przy czym oba polegają na wykonaniu obliczeń przybliżonych. W pierwszym podejściu wszystkie równania traktuje się jak zwykły układ nieliniowych równań algebraicznych i rozwiązuje się go jedną z klasycznych metod numerycznych, na przykład *metodą Newtona*. Podejście to nie uwzględnia specyficznej postaci równań opisujących sieć wodociagową. W drugim podejściu są stosowane metody specjalizowane, na przykład *metoda Crossa*. Wspólną cechą metod specjalizowanych jest to, że w opisie sieci rozdziela się odcinki tworzące pierścienie oraz odcinki pozostałe. W rezultacie otrzymuje się trzy układy równań o stosunkowo małych wymiarach: układ nieliniowy opisujący przepływy w odcinkach pierścieniowych, układ liniowy opisujący przepływy w odcinkach niepierścieniowych oraz układ liniowy opisujący ciśnienia we wszystkich węzłach. Układy te rozwiązuje się niezależnie jeden od drugiego, co znacznie upraszcza obliczenia. Wydaje się, że właściwym rozwiązaniem zagadnienia wyboru metody obliczeniowej byłoby wykonanie obliczeń dla obu podejść i porównanie wyników ze względu na dokładność i szybkość liczenia.

Rozbiory węzłowe w sieci można zadawać w postaci sumarycznych rozbiórów średnich, na przykład godzinowych lub dobowych, oraz w postaci

rozkładów czasowych, na przykład dobowych rozkładów godzinowych. W rezultacie obliczenia hydrauliczne mają charakter statyczny w pierwszym przypadku lub dynamiczny w drugim przypadku. Nie jest łatwo wyznaczyć czasowe rozkłady rozbiorów dla wszystkich węzłów odbiorczych i dlatego na ogół przeprowadza się obliczenia hydrauliczne dla sumarycznych rozbiorów średnich. Właściwym rozwiązaniem wydaje się stosowanie obu typów danych dotyczących rozbiorów węzłowych i wybór jednego z nich w zależności od żądanej dokładności obliczeń.

Podstawowy problem przy uruchamianiu modelu hydraulicznego sieci dotyczy jego *kalibracji*, czyli dopasowania modelu do obiektu na podstawie danych pomiarowych z obiektu. Poprawność kalibracji zależy od jakości danych dostarczonych do modelu i opisujących sieć wodociągową. Ponieważ archiwalna dokumentacja gromadzona w przedsiębiorstwach wodociągowych jest na ogół niekompletna, w szczególności dotycząca starych odcinków sieci, więc pierwsze obliczenia symulacyjne modelu dają zwykle bardzo niedokładne wyniki. Wymaga to w konsekwencji żmudnej weryfikacji posiadanych danych oraz również wykonania *czynnych eksperymentów pomiarowych* dla zmierzenia przepływów i ciśnień w wybranych charakterystycznych punktach sieci.

W przypadku modelu hydraulicznego *podstawowych zadań* jest kilka i są one następujące: sformułowanie modelu matematycznego sieci wodociągowej, wybór metody obliczeniowej do symulacji modelu, opracowanie odpowiedniego programu komputerowego, opracowanie planu eksperymentu czynnego do kalibracji modelu i wykonanie obliczeń kalibracji, opracowanie czasowych charakterystyk rozbiorów węzłowych do prognozowania obciążenia sieci.

Do zbierania pomiarów potrzebnych do kalibracji modelu służy *system monitoringu*. Po kalibracji modelu monitoring służy do jego okresowej weryfikacji, ponieważ sieć wodociągowa jest systemem niestacjonarnym i jej parametry zmieniają się w czasie. Przy opracowywaniu koncepcji systemu monitoringu istotnym zagadnieniem jest wyznaczenie punktów pomiarowych, w których będą zbierane pomiary. Jest to w rzeczywistości zadanie *optymalizacji dwukryterialnej*, polegające na minimalizacji liczby punktów pomiarowych ze względu na koszty instalowanego systemu monitoringu i takim doborze lokalizacji tych punktów, aby zmaksymalizować uzyskiwane za ich pomocą informacje o sieci. Maksymalizacja informacji zwiększa oczywiście liczbę pożądaných punktów pomiarowych a minimalizacja kosztów zmniejsza tę liczbę.

W przypadku systemu monitoringu *podstawowym zadaniem* jest opracowanie algorytmu optymalnego doboru punktów pomiarowych.

*Algorytm optymalizacji* jest stosowany do projektowania sieci wodociągowej. *Projektowanie* polega na takim doborze parametrów technicznych sieci, najczęściej średnic przewodów, aby spełnić określone wymagania technologiczne, głównie dotyczące ciśnień w węzłach odbiorczych. W obliczeniach optymalizacji wykonuje

się wielokrotnie obliczenia symulacyjne modelu hydraulicznego. W praktyce wodociągowej optymalizację przeprowadza się zwykle ręcznie lub za pomocą programów optymalizacji jednokryterialnej. W pierwszym przypadku użytkownik samodzielnie zmienia parametry sieci i po wykonaniu obliczeń symulacyjnych ocenia rezultat dokonanych zmian. Jest to sposób prymitywny i jednocześnie bardzo czasochłonny i nieoptymalny, ponieważ w przypadku większych sieci występuje tak dużo możliwości zmieniania parametrów, że człowiek nie jest w stanie wszystkiego uwzględnić, wykonać i ocenić. W przypadku stosowania programów optymalizacji dobór parametrów i ocena wyników odbywają się automatycznie, co znacznie przyspiesza i ułatwia obliczenia.

W *optymalizacji jednokryterialnej* uwzględnia się tylko jedno kryterium celu, przy czym jest to na ogół *kryterium kosztowe*, które należy zminimalizować. Przy takiej optymalizacji, aby uniknąć otrzymywania rozwiązań nieprawidłowych, należy wprowadzić arbitralne ograniczenia na parametry technologiczne, co ogranicza obszar poszukiwań. Przykładem nieprawidłowego rozwiązania jest, na przykład, nie dokonywanie żadnych zmian w sieci i wynikające stąd zerowe, czyli minimalne, koszty inwestycyjne. Można również stosować *kryterium techniczne*, minimalizujące odchylenia ciśnień w węzłach odbiorczych od wartości zadanych. Wtedy z kolei nie uwzględnia się kosztów optymalizacji, co również prowadzi do uzyskiwania rozwiązań mało przydatnych praktycznie.

Jednocześnie są znane metody *optymalizacji wielokryterialnej*, umożliwiające formułowanie kilku różnych kryteriów celu, technicznych i ekonomicznych, i znajdowanie rozwiązań kompromisowych, czyli quasi-optymalnych. Przykładowe kryteria celu do optymalizacji sieci wodociągowej mogą być postaci:

- Funkcja określona na różnicach między obliczonym i zadaniem ciśnieniem w węzłach odbiorczych. Jest to kryterium techniczne i podlega minimalizacji.
- Funkcja określona na sumie strat ciśnienia w sieci spowodowanych tarciem. Jest to także kryterium techniczne podlegające minimalizacji.
- Maksymalne ciśnienie podnoszenia zlokalizowane w zbiorze pomp pracujących w sieci. Jest to kryterium techniczne podlegające minimalizacji.
- Minimalna prędkość przepływu wody zlokalizowana w zbiorze przewodów sieci. Jest to kryterium techniczne podlegające maksymalizacji.
- Funkcja określona na sumie kosztów inwestycyjnych niezbędnych do rekonstrukcji sieci w wyniku uwzględnienia poprzednich kryteriów. Jest to kryterium ekonomiczne podlegające minimalizacji.

- Koszty eksploatacyjne sieci wynikające z kosztów energii zużywanej przez pompy. Jest to kryterium ekonomiczne podlegające minimalizacji.

Parametry sieci, względem których dokonuje się optymalizacji kryteriów celu, są zwykle następujące:

- Średnice rur z uwzględnieniem całego grafu sieci lub jedynie wybranych ścieżek grafu.
- Instalacja nowych względnie zmiana charakterystyk istniejących przepompowni względnie wieży ciśnień.
- Instalacja nowych względnie zmiana parametrów istniejących zbiorników retencyjnych.
- Instalacja zaworów względnie reduktorów w wybranych odcinkach sieci.

Optymalizacja wielokryterialna lepiej odzwierciedla rzeczywiste sytuacje a znajduwane rozwiązania kompromisowe są na ogół lepsze niż te z optymalizacji jednokryterialnej. Jednak optymalizacja wielokryterialna nie generuje użytkownikowi jednego rozwiązania optymalnego a tylko zbiór rozwiązań dobrych, z których użytkownik w sposób subiektywny wybiera rozwiązanie najbardziej go satysfakcjonujące. W ten sposób optymalizacja wielokryterialna jest narzędziem do wspomaganie procesu podejmowania decyzji.

Metody optymalizacji wielokryterialnej są jednak bardzo złożone. Dlatego często omija się problem złożoności przeformułowując zadanie optymalizacji wielokryterialnej do zadania lub ustalonego ciągu zadań optymalizacji jednokryterialnej. Stosuje się przy tym zwykle trzy sposoby transformacji zadania optymalizacji wielokryterialnej: *skalaryzację*, czyli tworzenie z kilku kryteriów jednego sumarycznego kryterium z arbitralnie dołączonymi wagami, *leksykografię*, czyli arbitralne ustalenie hierarchii ważności kryteriów i tworzenie uporządkowanego ciągu kryteriów, oraz *wybór dominanta*, czyli wybór kryterium wiodącego i zamianę pozostałych kryteriów na ograniczenia. Dzięki temu uzyskuje się możliwość wyznaczenia jednego optymalnego rozwiązania, jednak obciążonego wadami optymalizacji jednokryterialnej.

Na ogół przy optymalizacji sieci, tak przy korzystaniu z metod optymalizacji jednokryterialnej, jak i optymalizacji wielokryterialnej, stosuje się przeszukiwanie całego grafu sieci dla ewentualnej zmiany jej parametrów. Jest to oczywiście sposób bardzo czasochłonny i nieekonomiczny, ponieważ na ogół większość parametrów nie ulega zmianie w wyniku dokonanej optymalizacji. Dlatego opracowuje się w praktyce algorytmy specjalizowane optymalizacji, w których wykorzystuje się specyfikę sieci wodociagowej.

Jednym z przykładów takiego postępowania może być następujący trójstopniowy algorytm optymalizacji jednokryterialnej, w którym przyjmuje się techniczne kryterium celu dotyczące minimalizacji różnicy między ciśnieniem

zadaniem i obliczonym w węzłach odbiorczych. Kolejne kroki tego algorytmu są następujące:

- wyznaczenie ścieżek największej oporności między zlokalizowanymi węzłami odbiorczymi z nieprawidłowym ciśnieniem i źródłem zasilania sieci
- próba poprawienia ciśnienia w węzłach odbiorczych z nieprawidłowym ciśnieniem poprzez stopniową eliminację zadanej chropowatości w rurach tworzących ścieżki największej oporności, co można interpretować jako czyszczenie przewodów sieci
- poprawianie ciśnienia w węzłach odbiorczych z ciśnieniem w dalszym ciągu nieprawidłowym poprzez zmianę średnicy rur na ścieżkach największej oporności.

Przedstawiony algorytm znacznie ogranicza obszar przeszukiwania grafu sieci i tym samym istotnie zmniejsza czas obliczeń, przy czym można go również stosować w metodach optymalizacji wielokryterialnej.

W przypadku algorytmu optymalizacji *podstawowymi zadaniami* są wybór metody optymalizacji i opracowanie odpowiednich kryteriów celu.

*Algorytmy sterowania* są dwóch rodzajów: dla standardowych warunków eksploatacyjnych sieci i dla stanów awaryjnych. Pierwszy przypadek dotyczy sterowania pracą pomp oraz napełnianiem i opróżnianiem zbiorników retencyjnych tak, aby zaspokoić potrzeby odbiorców zgodnie z przewidywanym obciążeniem sieci i jednocześnie zminimalizować koszty eksploatacji, przy czym są to przede wszystkim koszty energii elektrycznej zużywanej na pracę pomp. Sterowanie siecią wodociągową polega w tym przypadku na wygenerowaniu gotowych scenariuszy pracy pomp i zbiorników na podstawie opracowanych wcześniej czasowo-przestrzennych modeli obciążenia sieci, czyli wspomnianych wcześniej dobowych rozbiorów godzinowych w węzłach odbiorczych. Przy tym opracowane modele obciążenia sieci są zwykle zróżnicowane według zadanego typu odbiorcy i pory roku.

W drugim przypadku zadanie algorytmu polega na odcięciu uszkodzonego fragmentu sieci po wystąpieniu w nim awarii i zaspokajaniu potrzeb odbiorców w pozostałym obszarze sieci według ustalonej wcześniej listy ważności odbiorców.

W przypadku algorytmów sterowania *podstawowe zadania* są zasadniczo podobne, jak w przypadku algorytmu sterowania i polegają na wyborze metody optymalizacji i opracowaniu odpowiednich kryteriów celu. Różne są jedynie parametry względem których dokonuje się optymalizacji. Obecnie przyjmuje się, że sieć jest optymalna, więc nie zmienia się jej parametrów strukturalnych, jak poprzednio, natomiast zmienia się parametry operacyjne, czyli prace pomp w pompowniach i przepompowniach.

### 3. Zakończenie

Przedstawiona i realizowana koncepcja systemu komputerowego uwzględnia pięć podstawowych modułów wykonujących funkcje o charakterze technicznym: Branżową Bazę Danych, mapę numeryczną, system monitoringu, model hydrauliczny i program optymalizacji z wbudowanymi algorytmami sterowania. Komunikacja między modułami systemu następuje za pomocą plików buforowych, dostarczających dane obliczeniowe do wybranych modułów i zwracających wyniki obliczeń do modułów źródłowych.

Analiza przedstawionej koncepcji oraz analiza potrzeb przedsiębiorstw wodociagowych doprowadziła do wniosku, że jest możliwe i celowe rozszerzenie zakresu funkcji systemu o dodatkowe zadania techniczne a także o zadania związane bezpośrednio z zarządzaniem przedsiębiorstwem.

Dodatkowe ważne i możliwe do uwzględnienia zadania techniczne dotyczą obliczania wieku wody w węzłach odbiorczych sieci oraz obliczania stężenia określonych związków rozpuszczonych w wodzie i dostarczanych z wodą do odbiorców, na przykład chloru lub pewnych zanieczyszczeń.

Rozbudowanie systemu o dodatkowe moduły realizujące funkcje zarządzania mogą dotyczyć następujących aplikacji:

- program obsługi wydawanych warunków technicznych przy remontach i rozbudowie sieci wodociagowej
- program obsługi odbiorów technicznych współpracujący z programem obsługi wydawanych warunków technicznych
- program obsługi awarii i rutynowych przeglądów sieci wodociagowej
- program obsługi gospodarki wodno-ściekowej w przedsiębiorstwie w zakresie produkcji i sprzedaży wody.

Szczególnie istotnym było zauważenie, że możliwe do uwzględnienia moduły związane z zarządzaniem korzystają z tych samych informacji, które są potrzebne do realizacji zadań technicznych i są zawarte w Branżowej Bazie Danych. Umożliwia to rozbudowę systemu bez zasadniczej zmiany jego struktury, w której Branżowa Baza Danych jest centralnym modułem komunikującym się ze wszystkimi pozostałymi modułami.

### Literatura

- Studziński J.; Straubel R. (1994) *Modelling & simulation of water networks*. Proceedings of the MOSIS'94 Conference, Ed. J. Stefan, Ostrava, 256-261.
- Studziński J.; Bogdan L.; Straubel R. (1995) *Simulation & optimisation of water networks as decision support for design & forecasting*. Proceedings of the ESM'95 Conference, Eds. M. Snorek & M. Sujansky & A. Verbraeck, Prague, 54-58.

- Studziński J.; Chudzik B.; Straubel R. (1996) *Computer aided design & optimisation of water & sewage networks*. Proceedings of the MOSIS'96 Conference, Ed. J. Stefan, Ostrava, 111-116.
- Chudzik B.; Studziński J.; Karambinov S. (1997) *Optimisation of rural water systems*. Proceedings of the MMSABI'97 Conference, Ed. I. Farkas, Budapest, 149-154.
- Studziński J.; Bogdan L.; Chudzik B. (1999) *Development of a computer system to support the management of a municipal water network*. Proceedings of the ASIS'99 Conference, Ed. J. Stefan, Krnov, 275-279.
- Studziński J.; Chudzik B.; Kaczmarska D. (1999) *Komputerowy system wspomagania decyzji operatorskich w miejskiej sieci wodociągowejw.*: Materiały konferencji nt. Systemów Informacji Zarządczej KSW'1999, Ciechocinek.
- Studziński J., Bogdan L. (2000) *Computer aided modelling, optimisation and control of the large municipal water net*. In: *Simulation and Modelling: Enablers for better Quality of Life*. Proceedings of 14<sup>th</sup> European Simulation Multiconference ESM'2000, Ed. R. v. Landeghem, Ghent, 586-588.
- Straubel R., Studziński J. (2000) *Computer aided planing and operating of the water networks in Koenigs-Wusterhausen and Rzeszów*. Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference in Water Supply and Quality, Ed. M.M. Sozański, Kraków, 43-54.





