

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

Application of monitoring technologies in environmental engineering

5th International Conference on *Quality, Reliability and Maintenance QRM 2004*

University of Oxford, 1st – 2nd April 2004

*Proceedings of the
5th International Conference on*
Quality, Reliability, and Maintenance

QRM 2004

Held at St Edmund Hall
University of Oxford
UK

1st–2nd April 2004

Edited by

Professor G J McNulty

hosted by



St Edmund Hall
University of Oxford, UK

Co-sponsored by



Institution of Mechanical Engineers



**Professional
Engineering
Publishing**

Professional Engineering Publishing Limited
Bury St Edmunds and London, UK

Related Titles of Interest

Title	Editor/Author	ISBN
<i>Advances in Manufacturing Technology XVII</i>	Y Quin and N Juster	1 86058 412 8
<i>Computer Based Design – Engineering Design Conference 2002</i>	T M M Shahin	1 86058 372 5
<i>Condition Monitoring – Engineering the Practice</i>	D Yardley	1 86058 361 X
<i>Design and Manufacture for Sustainable Development</i>	B Hon	1 86058 427 6
<i>Engineering Design in the Multi-discipline Era – A Systems Approach</i>	P R Wiese and P John	1 86058 347 4
<i>Guide to Presenting Technical Information</i>	C Matthews	1 86058 249 4
<i>IMechE Engineers' Data Book – Second Edition</i>	C Matthews	1 86058 248 6
<i>Managing Engineering Knowledge MOKA: Methodology for Knowledge Based Engineering Applications</i>	M Stokes	1 86058 295 8
<i>Managing by Projects for Business Success</i>	J Parnaby, S Wearne, and A Kochhar	1 86058 341 5
<i>Quality, Reliability, and Maintenance (QRM 2002)</i>	G J McNulty	1 86058 369 5

For a full range of titles published by Professional Engineering Publishing (publishers to the Institution of Mechanical Engineers) contact:

Marketing Department
Professional Engineering Publishing
Northgate Avenue
Bury St Edmunds
Suffolk IP32 6BW
UK

Tel: +44 (0) 1284 763277; Fax: +44 (0) 1284 718692
E-mail: marketing@pepublishing.com
www.pepublishing.com

First Published 2004

This publication is copyright under the Berne Convention and the International Copyright Convention. All rights reserved. Apart from any fair dealing for the purpose of private study, research, criticism or review, as permitted under the Copyright, Designs and Patents Act, 1988, no part may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, electrical, chemical, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the copyright owners. *Unlicensed multiple copying of the contents of this publication is illegal.* Inquiries should be addressed to: The Academic Director, Professional Engineering Publishing Limited, Northgate Avenue, Bury St. Edmunds, Suffolk, IP32 6BW, UK. Fax: +44 (0)1284 704006.

© 2004 with Professional Engineering Publishing Limited, publishers to the Institution of Mechanical Engineers, unless otherwise stated.

ISBN 1 86058 440 3

A CIP catalogue record for this book is available from the British Library.

Printed by Cromwell Press, Trowbridge, Wiltshire, UK

The Publishers are not responsible for any statement made in this publication. Data, discussion, and conclusions developed by authors are for information only and are not intended for use without independent substantiating investigation on the part of potential users. Opinions expressed are those of the Authors and are not necessarily those of the Institution of Mechanical Engineers or its Publishers.

Contents

<i>Foreword</i> G J McNulty	<i>xiii</i>
Quality Analysis	
Redefinition of product quality from environmental perspectives P B U Achi	3
Reliability of Moore's Law – a measure of maintained quality A A Berezin and A M Ibrahim	7
QRM issues on LISA experiment P Bosetti and I Cristofolini	11
Evaluating the cost of poor quality and tolerance-cost curves for simultaneous tolerance synthesis G Compatelli and A Del Taglia	15
Design of an inertial sensor for space application I Cristofolini and P Bosetti	19
The new ISO 9000:2000 series of standards – its contribution towards business excellence K D Gotzamani	23
The role of the United Kingdom Accreditation Service R I Graham	27
Some of the properties of particleboard made from Kenaf as quality control tool H Kalaycioglu, G Nemli, and S Hizioglu	31
Synergies of FMEA and other quantitative quality methods for an optimized quality assurance K Pickard, P Müller, and B Bertsche	35
Terminology in food quality management A-C Roudot	39
Application of monitoring technologies in environmental engineering J Studzinski	43
Exploring the quality improvement and employee involvement relationship in selected Hellenic organizations F Vouzas	47

Application of monitoring technologies in environmental engineering

J STUDZINSKI

Systems Research Institute, Polish Academy of Science, Warsaw, Poland

ABSTRACT

This paper provides an insight into the significance of monitoring as it pertains to environmental engineering. Three examples of using monitoring techniques for modelling and maintaining environmental processes are presented in this work, Firstly, computer aided decision making to maintain a wastewater treatment plant. Secondly, computer aided management of a communal water network, and thirdly modelling the forecasting of air temperature. The paper illustrates how the essential parameters of the above three disparate but related examples can be controlled through techniques illustrated in this paper.

INTRODUCTION

The rapid acceleration of the facilitation of mathematical modelling is contemporary with the advent of large storage computers as can be endorsed over the last thirty years. The models and algorithms developed here have become key tools for computer aided decisions making that are used to forecast and/or maintain various environmental processes. As a result they contribute considerably to the better protection of the environment and to satisfy better the social needs of the mankind. The base of the algorithms of modelling and optimisation of the practical use are the measurements that have to be taken fast, flawless and mostly in the real-time of the processes investigated. This can be made using computerised monitoring systems. This way they are an essential component of all computer aided decisions systems. In the following we will show the use of the monitoring data by the control of the wastewater treatment, by maintaining a water network and by forecasting the air temperature.

MONITORING IN A WASTEWATER TREATMENT PLANT

The modelled wastewater treatment plant is shown in Fig. 1. The process of the wastewater treatment is as follows: The raw wastewater enters the primary clarifiers where unsolvable solids settle down. The rest of the wastewater flows to the activated sludge basins where the organic material is decomposed biologically under aerobic conditions. The mixed liquor from the aeration tanks consisting of the activated sludge and the wastewater passes to the secondary clarifiers. Within the purification zone the sludge is separated from the wastewater by gravitational forces and the sludge particles settle down in the sedimentation zone. Part of the sludge is recirculated to the inlet of the aeration basins while the excess sludge is removed from the process as a waste. To maintain this process a computer-aided system supporting the decisions making by the process operator has been developed. This system works on the base of various mathematical models which are responsible for the realisation of the following tasks (see Fig. 2): forecasting the wastewater inflow and its waste composition, generation of the process controls which are the flow rate of the sludge recirculated and the level of the oxygen dissolved in the aeration basins, verification of the controls generated by means of the computer simulation. This latter task occurs with the help of a very detailed phenomenological model of the whole treatment process [1].

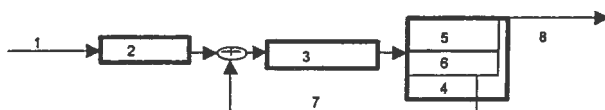


Fig. 1 Diagram of the investigated wastewater plant: 1 – wastewater inflow; 2 – primary clarifiers; 3 – aeration basins; 4 – secondary clarifiers; 5 – purification zone; 6 – sedimentation zone; 7 - extern recirculation; 8 – outlet of the purified wastewater

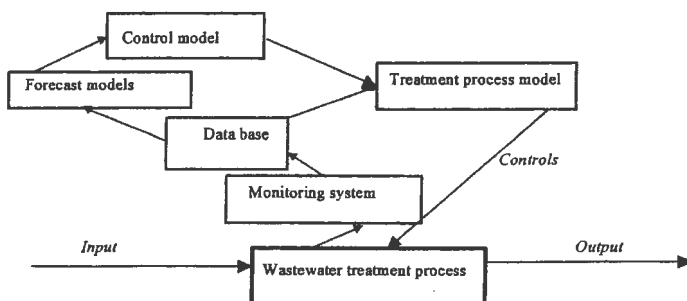


Fig. 2 Diagram of the computer system to control the wastewater plant

The development of these models and their adaptive validation is possible only with an efficient monitoring system. Such an automatic system has been installed in the wastewater plant (see Fig. 2). With this system the flows and the conductivity as well as the values of pH and REDOX of the wastewater are measured on-line. These data enable to develop and validate the forecast models of the computer system. To develop the other models some additional lab measurements had to be done and the data needed was gathered as a result of some measure experiments run on the wastewater plant.

MONITORING IN A DRINKING WATER NETWORK

An automatic monitoring system is also a key component of an integrated computer system developed for a communal water network to support the decisions making of the water net operator (see Fig. 3) [2]. The system consists of 3 modules co-operating each other with the help of the Branch Data Base (BDB). These modules are: numerical map of the water net generated by a GIS named Geomedia, programmes for mathematical modelling, optimisation and control of the water net, and the monitoring system. BDB holds technical data about the structure and all elements of the water net that is used to carry out the specific tasks of the system modules such as visualisation, simulation and optimisation of the water net. With the help of the monitoring system the results of the water net hydraulic calculation are verified, the calibration of the water net model is periodically made and also the characteristics of daily water demands for typical water net nodes are set up and verified. These characteristics are used then to forecast the temporal water demand of the whole water net. The computer system was introduced as a pilot project only on a part of the investigated water net and it consists of 9 measurement points where water pressures and flows in the water net nodes and lines are monitored. The data transmission from the measurement points to the work station of the computer system occurs by means of the GSM telephony. It is an innovative and reliable solution in relation to the monitoring systems applied for communal water networks.

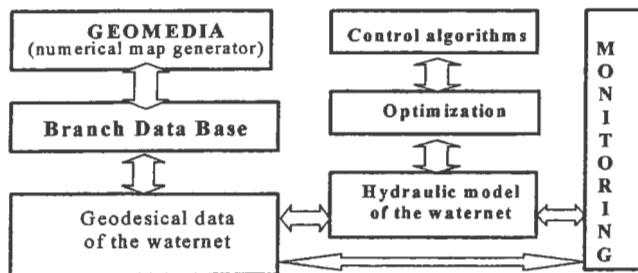


Fig. 3 Diagram of the computer system for maintaining the water network

ATMOSPHERICAL MONITORING

The efficacy in the use of automatic monitoring systems for the measurement of atmospheric parameters has been established. Expert systems using the data from such measurements can also be applied to weather forecasting and the prediction of natural disasters. Occasionally false data is produced and mathematical modelling can then be used to offset these deficiencies. An instance occurred when the power supply had failed for two hours. In this case the problem was rectified with modelling, combined with neural networking.

Modelling experiments were used to endorse the effectiveness of the exercise. Temperature measurements obtained were lost and neural networking nets used to reconstruct the loss. [3]. Figure 4 illustrates the success of the exercise, where the measurement curve and the modelling curve show close agreement.

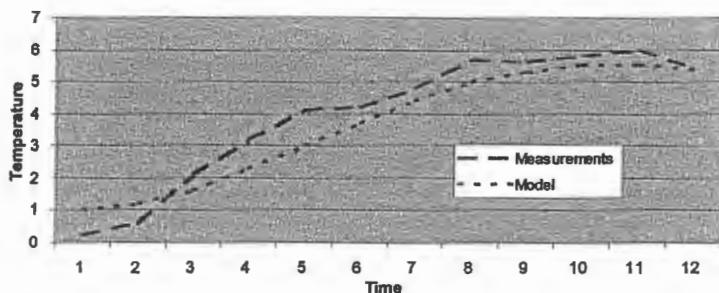


Fig. 4 Temperature values of the measurements and of the mathematical model

REFERENCES

1. L. Bogdan, J. Lomotowski, Z. Nahorski, J. Studzinski, R. Szetela, "Mathematical and neural network modelling of a wastewater treatment plant" *Archives of Control Sciences*, Vol. 10, No. 1-2, 89-118, 2000.
2. J. Studzinski, L. Bogdan, "Computer aided modelling, optimisation and control of the large municipal water net" *In: Simulation and Modelling: Enablers for better Quality of Life Proceedings of 14th European Simulation Multiconference ESM'2000* (Ed. R.v.Landeghem) Ghent, 586-588, 2000.
3. P. Licznar, J. Lomotowski, J. Studziński, „Anwendung neuronaler Netze zur statistischen Verarbeitung meteorologischer Datenfolgen aus automatischer Datenerfassung“ *In: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften: Workshop Cottbus* (Hrsg. J. Wittmann, A. Gnauck) Aachen: Shaker-Verlag, 9-17, 2002.

Lucyna Bogdan, Wojciech Kozłowski

**Metody krigingu w opracowaniu danych pomiarowych
z monitoringu opadów atmosferycznych**

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



**WSPOMAGANIE INFORMATYCZNE
ROZWOJU
SPOŁECZNO-GOSPODARCZEGO
I OCHRONY ŚRODOWISKA**

**WSPOMAGANIE INFORMATYCZNE
ROZWOJU
SPOŁECZNO-GOSPODARCZEGO
I OCHRONY ŚRODOWISKA**

Redakcja:

Jan Studziński
Ludosław Drelichowski
Olgierd Hryniewicz

Polska Akademia Nauk Instytut Badań Systemowych

Seria: BADANIA SYSTEMOWE

tom 36

Redaktor naukowy:

Prof. dr hab. Jakub Gutenbaum

Warszawa 2004

Książka wydana dzięki dotacji KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH

Książka zawiera wybór artykułów poświęconych omówieniu aktualnego stanu badań w kraju w zakresie rozwoju modeli, technik i systemów zarządzania oraz ich zastosowań w różnych dziedzinach gospodarki narodowej. Wyodrębnioną grupę stanowią artykuły omawiające aplikacyjne wyniki projektów badawczych i celowych KBN.

Recenzenci artykułów:

Dr Lucyna Bogdan
Prof. dr hab. inż. Olgierd Hryniewicz
Dr Grażyna Petriczek
Prof. dr hab. inż. Andrzej Straszak
Dr inż. Jan Studziński

Komputerowa edycja tekstu: Anna Gostyńska

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2004

Wydawca: Instytut Badań Systemowych PAN
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa

Sekcja Informacji Naukowej i Wydawnictw IBS PAN
tel. 836-68-22

Druk: Zakład Poligraficzny Urzędu Statystycznego w Bydgoszczy
Nakład 110 egz.

ISBN 83-85847-92-8
ISSN 0208-8028

SPIS TREŚCI

Przedmowa	8
RODZIAŁ 1. WSPOMAGANIE INFORMATYCZNE ROZWOJU SPOŁECZNO-GOSPODARCZEGO	11
Zarządzanie wiedzą	11
Okręgi Wiedzy – systemowo-synergetyczne rozwiązanie dla polskiej gospodarki opartej na wiedzy	
A. STRASZAK	13
Wykorzystanie internetu w tworzeniu wirtualnych parków naukowych	
I. ŁĄCKA	27
Kierunki integracji technologii informacyjnych w zarządzaniu wiedzą w przedsiębiorstwie	
L. DRELICHOWSKI, R. WOJTYNA, W. BOJAR	39
Zarządzanie organizacjami	51
Zaawansowanie sektorów gospodarki w realizację przedsięwzięć e-biznesowych	
W. WOLSKI	53
Efektywność wykorzystania bankowości wirtualnej w Polsce	
W. CHMIELARZ	65
Reinżynieria i modelowanie procesów w organizacji	
B. KUBIAK, A. KOROWICKI	75
Metody ilościowe w analizie gospodarności jednostek samorządu terytorialnego	
R. BUDZIŃSKI, A. BECKER	85
Ocena efektów wdrożeń systemów informatycznych w przedsiębiorstwie – przykład sektora nawozowego	
J. MYSZCZYSZYN	97

Zarządzanie obiegiem dokumentów	109
System dystrybucji dokumentów unijnych w Polsce z jawną reprezentacją wiedzy w postaci ontologii K. ŁAWCEWICZ, S. ZADROŻNY	111
Monitorowanie i testowanie systemu obiegu dokumentów drogą elektroniczną M. FLORCZYK	125
 ROZDZIAŁ 2. WSPOMAGANIE INFORMATYCZNE OCHRONY ŚRODOWISKA	133
Możliwości wykorzystania modeli prognostycznych do sterowania emisją w czasie rzeczywistym P. HOLNICKI	135
Zastosowanie metod „Soft Computing” do efektywnej redukcji emisji zanieczyszczeń P. HOLNICKI, A. KAŁUSZKO, J. STAŃCZAK	149
Modeling of lake’s aquatic ecosystems J. HOŁUBIEC, G. PETRICZEK	163
On the use of coupled software tools to control water quality in shallow lakes B. LUTHER, A. GNAUCK	171
 ROZDZIAŁ 3. ZASTOSOWANIE METOD MATEMATYCZNYCH W INFORMATYCE	181
Pomiar siły asocjacji skategoryzowanych cech statystycznych w przypadku nieprecyzyjnie zdefiniowanych kategorii O. HRYNIEWICZ	183
Zwiększenie prawdopodobieństwa błędnej klasyfikacji w rozpoznawaniu wieloetapowym z rozmytymi obserwacjami cech obiektu R. BURDUK	193
Generalized nets modeling concept – neural networks models M. KRAWCZAK	203
Wybrane algorytmy pozycyjne – wyznaczanie oceny grupowej H. BURY, D. WAGNER	217

Gwiazdźiste zapytania w relacyjnych bazach danych i indeksowanie bitmapowe P. KUCZYŃSKI	229
ROZDZIAŁ 4. PROJEKTY BADAWCZE MINISTERSTWA NAUKI I INFORMATYZACJI	237
Zastosowania informatyki we wspomaganii rozwoju społeczno-gospodarczego	237
System rachunku kosztów w przedsiębiorstwie – przykład sektora spożywczeo A. JANUSZEWSKI	239
System ekspertowy prognozowania bankruclw przedsiębiorstw I. REJER	247
Metoda wspomaganii decydentów w procesie sterowania działaniem systemu transportowego B. LANDOWSKI, M. WŁOPIAY, D. PERCZYŃSKI	257
Zastosowania informatyki w ochronie środowiska.....	269
System zarządzania miejską siecią wodociągową J. STUDZIŃSKI	271
Analiza zanieczyszczeń w opadach atmosferycznych E. BURSZTA-ADAMIAK, J. ŁOMOTOWSKI, R. STODOLAK	281
Metody krigingu w opracowaniu danych pomiarowych z monitoringu opadów atmosferycznych L. BOGDAN, W. KOZŁOWSKI	291
Metody wyznaczania natężeń maksymalnych deszczy do projektowania systemów odwadniania P. LICZNAR	299

METODY KRIGINGU W OPRACOWANIU DANYCH POMIAROWYCH Z MONITORINGU OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH*

Lucyna Bogdan, Wojciech Kozłowski

Instytut Badań Systemowych, Polska Akademia Nauk

<Lucyna.Bogdan@ibspan.waw.pl>

The theme of report refers possibilities of use kriging in elaboration given of proceeding from monitoring of precipitations. There are represented the Błazyk method - intensity rain enumerating, used at projection of sewers in Poland. Exactly there are talked over geostatistic kriging method, manner of the enumeration of kriging estimator and formations semivariogram. There are introduced also the spherical model, used most often in kriging method.

Keywords: Kriging, geostatistic method, semivariogram, spherical model, Błazyk method

1. Wprowadzenie

Tak zwany *kriging* jest metodą geostatystyczną, która pozwala na szacowanie jakości i wielkości złóż minerałów oraz ilustrowanie rozmieszczenia wartości parametrów złożowych za pomocą map izarytm (np. warstwic). Pierwotnie metoda krigingu była wykorzystywana do oszacowania położenia i wielkości złóż złota. Mając kilka próbek minerału wydobytych w tak zwanych *punktach bazowych* można wygenerować mapę całego złoża.

Metodę krigingową coraz częściej stosuje się w USA i w Europie do uzupełniania przerw pomiarowych wartości temperatury mierzonej za pomocą satelitów. Równie dobrze można metodę krigingu zastosować do oszacowania wartości opadów deszczowych, tak zwanych *deszczy miarodajnych*, które są wykorzystywane przy projektowaniu sieci kanalizacyjnych. Mając kilkanaście stacji pomiarowych, które znajdują się w dzielnicach większych miast, można dokładnie wyliczyć wartość deszczy miarodajnych dla poszczególnych osiedli, których liczba jest zwykle dwu- lub trzykrotnie większa niż liczba dzielnic. W Niemczech w ostatnich latach wykonano taki projekt i nazwano go Atlasem Kostra. Zwiera on między innymi szczegółową mapę deszczy miarodajnych dla całych Niemiec. Jest on wykorzystywany, oczywiście odpłatnie, do projektowania sieci kanalizacji. Natomiast w Polsce do projektowania sieci kanalizacyjnych jest wykorzystywana przestarzała przybliżona metoda Błazyka z lat 1960-tych (Błazyk i in., 1983).

* Praca wykonana w ramach projektu badawczego KBN nr 3 P04G 084 25.

2. Istota metody Błaszyka

Metoda Błaszyka, jako najczęściej stosowana w Polsce również obecnie, jest wykorzystywana przy projektowaniu kanalizacji od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Jest to prosta przybliżona metoda obliczeniowa a jej cecha charakterystyczną jest zwykle przewymiarowanie projektowanych sieci kanalizacyjnych. Oznacza to, że projektuje się sieci większe, niż wynika to z rzeczywistych wymagań, oraz kanały ściekowe mają większe średnice, niż jest to potrzebne.

Podstawowy wzór metody jest związkiem między natężeniem, czasem trwania i częstotliwością występowaniu deszczu uśrednionego dla całego obszaru Polski, z wyjątkiem miejscowości podgórskich i górskich. Wzór został wyprowadzony przez Władysława Błaszyka na podstawie 67-letniego zbioru obserwacji deszczu w Warszawie z lat 1837–1959, przy zastosowaniu tak zwanej *metody średnich natężeń*. Wzór wyznacza natężenie spływu wody deszczowej do sieci kanalizacyjnej, przy założeniu zlewni całkowicie szczelnej, to znaczy bez uwzględnienia możliwej i występującej w praktyce redukcji ilości spływającej wody deszczowej (Błaszyk i in., 1983). Jest to wzór eksperymentalny i ma postać

$$q = \frac{470\sqrt[3]{c}}{t^{0,67}} \left[\frac{dm^3}{s} ha \right] \quad (1)$$

gdzie:

q – natężenie deszczu, dm^3/s ha,

c – okres jednorazowego przekroczenia danego natężenia, liczony w latach,

t – czas trwania deszczu, min.

Metoda średnich natężeń jest określona wzorem

$$J = \frac{h}{t} \left[\frac{mm}{min} \right] \quad (2)$$

gdzie:

J – natężenie opadu, mm/min,

h – wysokość opadu, mm,

t – czas trwania opadu, min.

3. Istota metody krigingowej

W ujęciu geostatystycznym parametr złożowy jest traktowany jako tak zwana *zmienna zregionalizowana*, zwana również *zmienną przestrzenną* lub *zmienną zlokalizowaną*, którą definiuje się jako funkcję ciągłą współrzędnych przestrzeni. Wartości zmiennej zregionalizowanej są znane tylko w odniesieniu

do pobranych próbek geologicznych lub zbadanych pól pomiarowych o znikomo małych rozmiarach w porównaniu z całą badaną przestrzenią złożową. Noszą one nazwę *bazy geometrycznej pomiarów* (Cressie, 1991; Isaaks i Srivastava, 1989).

Aby względem zmiennej zregionalizowanej można było przeprowadzić interpretację statystyczną, nakłada się na nią pewne ograniczenia. W szczególności przyjmuje się hipotezę o *słabej stacjonarności* zmiennej, co oznacza, że wartość oczekiwana zmiennej nie zależy od miejsca pomiaru, zaś jej kowariancja jest jedynie funkcją odległości pomiędzy znanymi punktami pomiarów.

W praktyce ze względu na to, że hipoteza słabej stacjonarności w odniesieniu do realnych parametrów złożowych jest zbyt rygorystyczna, stosuje się znacznie łagodniejsze ograniczenie, które zakłada słabą stacjonarność nie tyle samej zmiennej zregionalizowanej, lecz również jej przyrostów. Istotne znaczenie ma tu wariancja przyrostów, która definiuje podstawową funkcję charakterystyczną geostatystyki, zwaną *wariogramem*. Wzór wariogramu jest postaci

$$D^2 [Z(x+h) - Z(x)] = E[Z(x+h) - Z(x)]^2 = 2\gamma(h) \quad (3)$$

gdzie:

D , E – operatory wariancji i wartości oczekiwanej,

$2\gamma(h)$ – wariogram,

$\gamma(h)$ – semiwariogram (półwariogram),

$Z(x+h)$, $Z(x)$ – wartości zmiennej zregionalizowanej w punkcie początkowym i w punkcie odległym o h .

W zastosowaniach metod geostatystycznych wykorzystuje się najczęściej połowę wartości wariogramu, tak zwany *semiwariogram*. Podstawę geostatystycznego opisu zmienności badanego parametru stanowi funkcja ujmująca zależność pomiędzy średnim zróżnicowaniem wartości parametrów złożowych a odległością pomiędzy miejscami ich pomiarów. W warunkach rutynowych pomiarów badanych wartości parametrów złożowych określa się postać semiwariogramu dla przyjętej dyskretnej i regularnej sieci pomiarów za pomocą klasycznej formuły Matherona postaci (Wackernagel, 1998; Kitanidis, 1997; Maidment, 1993)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (z_{h+1} - z_i)^2 \quad (4)$$

gdzie z_i , z_{i+h} są wartościami parametru złożowego w punktach oddalonych o odległość h , natomiast n_h jest liczbą par punktów pomiarowych odległych o h .

Semiwariogram, którego postać została określona na podstawie wyników pomiarów w złożu, nosi nazwę *semiwariogramu empirycznego* lub *semiwariogramu eksperymentalnego* i przedstawia on w syntetycznej formie strukturę zróżnicowania parametrów złożowych.

Wyznaczanie semiwariogramu w istocie polega na obliczaniu średniego kwadratu różnic dla wszystkich par utworzonych z wartości parametru złożowego, określonych w punkcie wyróżnionym (bazowym) i w każdym z punktów, który znalazł się w obszarze grupowania danych, to znaczy odległych o h od punktu bazowego, a następnie na przypisaniu średniego kwadratu różnic średniej odległości pomiędzy punktem bazowym a punktami z rozpatrywanego sektora zliczania. Następnie całą procedurę powtarza się dla kolejnego przedziału odległości, czyli nowej wartości h , i dalej, dla kolejnych obliczanych punktów pomiarowych, które przejmują rolę punktów bazowych.

Semiwariogram empiryczny w formie wykresu punktowego nie może być wykorzystany do rozwiązywania zadań oceny parametrów geologicznych. By można to było zrobić, przybliża się go różnymi funkcjami analitycznymi, które w dalszym postępowaniu są traktowane jako geostatystyczne modele zmienności. Do najczęściej używanych zalicza się *modele sferyczne Matherona* opisane równaniami (Furst, 1998; Deutsch, 1998; Pannatier, 1996)

$$\gamma(h) = C \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{h^3}{2a^3} \right] + C_0 \quad \text{dla } h \leq a \quad (5)$$

oraz

$$\gamma(h) = C_0 + C = \delta^2 \quad \text{dla } h \geq a \quad (6)$$

Z definicji semiwariogramu powinno wynikać, że jego wartość dla $h=0$ wynosi również zero. Jednak dla malejących do zera wartości h realne semiwariogramy empiryczne rzadko dążą do zera, na ogół dążą do pewnej wartości określonej w literaturze geostatystycznej jako stała *efektu samorodków* C_0 (*nugget effect*). Charakteryzuje ona zmienność lokalną badanego parametru złożowego i odpowiada składnikowi losowemu zmienności dla $h \rightarrow 0$.

Do aproksymacji semiwariogramów empirycznych modelami teoretycznymi, czyli odpowiednimi funkcjami, są stosowane najczęściej algorytmy aproksymacji oparte o metodę najmniejszych kwadratów. Jest ona szczególnie przydatna przy obliczeniach z wielką liczbą pomiarów. Wykonana poprawnie procedura obliczeniowa wymaga zastosowania aproksymacji ważonej ze względu na różną dokładność oceny poszczególnych wartości semiwariogramu empirycznego. Różna dokładność oceny wynika z różnej liczebności par danych, na podstawie których są wyznaczone wartości semiwariogramu.

Dlatego zazwyczaj pomija się wartości semiwariogramu określone dla zbyt ubogiej liczby danych, na przykład dla kilku par danych.

Reasumując, metoda krigingu jest geostatystyczną metodą szacowania średnich wartości parametrów złożowych i ich wartości w punktach złoża, opartą na zmienności wyrażonej semiwariogramem. Estymator wartości średniej parametru ma postać średniej ważonej i jest określony wzorem (Wackernagel, 1998; Kitanidis, 1997; Maidment, 1993; Pannatier, 1996)

$$z_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z_i \quad (7)$$

gdzie λ_i jest współczynnikiem wagowym krigingu a z_i jest wartością parametru złożowego w i -tym punkcie pomiarowym.

Specyfika procedury krigingu polega na ustalaniu wartości współczynników wagowych. Winny być one tak dobrane, by spełniły dwa postulaty: nieobciążoności i maksymalnej efektywności estymatorów.

Pierwszy postulat jest spełniony, gdy

$$E(z_i - m) = 0 \quad (8)$$

skąd wynika wymóg, aby

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (9)$$

Drugi postulat oznacza, iż wariancja różnicy pomiędzy rzeczywistą średnią wartością parametru m i jej oceną z_i winna być możliwie najmniejsza, co można zapisać następująco

$$\sigma^2 = E[(z_i - m)^2] = \min \quad (10)$$

Warunkiem koniecznym do spełnienia postulatu minimalizacji błędu jest zerowanie się pierwszych pochodnych wariancji z uwagi na wszystkie współczynniki wagowe, to znaczy

$$\frac{\partial \left[\sigma^2 - 2\nu \sum_{i=1}^n \lambda_i \right]}{\partial z_i} = 0, \quad \text{dla } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

gdzie ν jest mnożnikiem Lagrange'a.

W wyniku różniczkowania otrzymuje się układ n równań algebraicznych z n niewiadomymi współczynnikami wagowymi w_{ik} , który w uproszczonej postaci można zapisać następująco

$$\gamma(x_i, x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + v \quad \text{dla } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (12)$$

lub w postaci macierzowej (Kitanidis, 1997; Maidment, 1993; Wackernagel, 1998)

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_i, x_j) & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_i \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_i, x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

gdzie $\gamma(x_i, x_j)$ jest średnią wartością semiwariogramu dla odcinków łączących punkty pomiarów $z(x_i)$ oraz $z(x_j)$, (x_i, x_j) oznacza odległość między punktami x_i i x_j , natomiast x_i i x_j są określonymi punktami pomiaru przy wykorzystaniu przyjętego modelu zmienności badanego parametru.

Rozwiązanie przedstawionego układu równań prowadzi do ustalenia liczbowych wartości współczynników wagowych, które są niezbędne do szacowania średniej wartości parametru z minimalnym błędem. Są one również konieczne do wyznaczenia przeciętnej wielkości błędu, zwanego *błędem krigingu*, którego wariancję określa wzór

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \gamma(x_i, x_j) + v - \gamma(x_i, x_0) \quad (14)$$

Metoda krigingu, ze względu na powyższe wymienione własności, stanowi dogodną metodę interpolacyjną, wysoce przydatną przy sporządzaniu map izarytm (izolinii) parametrów złożowych. Z uwagi na minimalizację błędów oceny parametru procedura krigingu zapewnia większą dokładność niż inne procedury interpolacyjne, na przykład oparte na ważeniu odwrotności odległości lub kwadratu odległości węzła interpolacyjnego od punktów pomiaru. Zasady zastosowania tej metody polegają na nałożeniu na mapę rozmieszczenia punktów pomiarowych (otworów, próbek) na ogół kwadratowej sieci punktów interpolacyjnych, w których będzie wykonana interpolacja wartości badanego parametru. Przy ocenie wartości parametru złożowego w tych punktach bierze się pod uwagę wszystkie obserwacje w złożu, które znajdują się w obrębie koła o założonej z góry wielkości promienia, którego środek stanowi punkt interpolacyjny. Promień tego koła dobiera się uwzględniając zasięg semiwariogramu oraz charakter rozmieszczenia obserwacji w złożu. Wagi poszczególnych obserwacji określa się rozwiązując wspomniany wcześniej układ równań krigingu.

Ze względu na ogromną liczbę punktów interpolacji realizacja zadania aproksymacji jest możliwa wyłącznie przy zastosowaniu komputerów. Mając określone wagi obserwacji dla poszczególnych punktów interpolacji komputer określa dla każdego z nich - zgodnie z algorytmem krigingu - wartości badanego parametru jako średnią ważoną wartości zmierzonych oraz błąd krigingu.

Metoda krigingu pozwala zatem na oszacowanie wartości zmiennej dla określonych punktów interpolacyjnych na podstawie danych uzyskanych z otaczających punktów pomiarowych, przy czym z nieregularnej siatki pomiarowej uzyskuje się regularny rozkład przestrzenny badanej zmiennej w układzie geograficznym.

4. Podsumowanie

Metodę krigingową zaczyna się stosować w różnych dziedzinach życia w krajach na całym świecie. Według Matherona (Cressie, 1991; Isaaks i Srivastava, 1989) jest ona obecnie najlepszą metodą geostatystyczną do szacowania zmiennych przestrzennych i tworzenia map, mając do dyspozycji tylko niewielką liczbę próbek. Wcześniej była metodą uciążliwą z powodu dużej liczby obliczeń. Obecny rozwój komputerów pozwala na wykorzystywanie jej w różnych dziedzinach życia, również do opracowywania danych pochodzących z monitoringu opadów atmosferycznych.

Dodatkowo można ją wykorzystać do stworzenia dokładnej mapy deszczy miarodajnych dla Polski, która posłużyłaby do projektowania sieci kanalizacji, oraz wykonać projekt podobny do Atlasu Kostra dla Polski, który zastąpiłby przestarzałą metodę Błaszyka. Takie prace są obecnie prowadzone w Instytucie Badań Systemowych PAN w Warszawie w ramach projektu badawczego KBN.

Literatura

- Błaszyk W, Stamatello P., Błaszyk P. (1983) *Kanalizacja. Sieci i pompownie*. Arkady, Warszawa.
- Cressie N.A.C. (1991) *Statistics for Spatial Data*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Deutsch C.V., Journel A.G. (1998) *GSLIB – Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York.
- Furst J. (1998) *Anwendung von Geographischen Informationssystemen in Hydrologie und Wasserwirtschaft – Studienblätter und Materialien zur Vorlesung im SS 1998*. WUM – Universitätsverlag der Hochschulgemeinschaft an der Universität Wien GmbH.
- Isaaks E. H., Srivastava R. M. (1989) *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Kitanidis P.K. (1997) *Introduction to Geostatistics*. Cambridge University Press, Melbourne, Australia.
- Maidment D.R. (1993) *Handbook of Hydrology*. McGraw – Hill, Inc. U.S.A.

Pannatier Y. (1996) *VARIOWIN Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Surfre 7 – User's Guide. Golden Software, Inc. 1999 Colorado U.S.A.

Wackernagel H. (1998) *Multivariate geostatistics – An Introduction with Applications*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

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 Studziński

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.

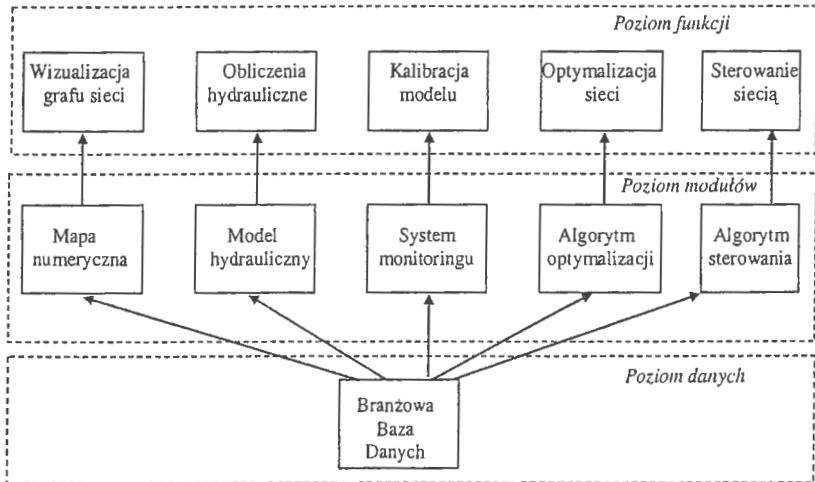
* Praca wykonana w ramach projektu badawczego KBN nr 3 T11A 010 26.

Celem tworzenia systemu jest usprawnienie zarządzania i uzyskanie oszczędniejszej eksploatacji sieci, a więc ułatwienie pracy operatora sieci. Dane pomiarowe do obliczeń testujących systemu 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 przeformułując 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 wodociagową 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 14th 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 4th International Conference in Water Supply and Quality, Ed. M.M. Sozański, Kraków, 43-54.

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 main reasons is the increasing demand for public services, such as health care, education, and social security.

Another reason is the increasing size of the public sector, which has led to a corresponding increase in the number of public employees.

Finally, the increasing demand for public services has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

The increase in public sector employment has led to a corresponding increase in the number of public employees.

