

A07h

120/2001

**Instytut Badań Systemowych PAN**

**Raport IBS PAN/PMKiI/03/2001**

**Modelowanie matematyczne, symulacja komputerowa i  
identyfikacja miejskiej oczyszczalni ścieków**

Pod redakcją Jana Studzińskiego i Lucyny Bogdan

**Warszawa 2001**

**Instytut Badań Systemowych PAN**

**Raport IBS PAN/PMKiI/03/2001**

**Modelowanie matematyczne, symulacja komputerowa i  
identyfikacja miejskiej oczyszczalni ścieków**

Pod redakcją Jana Studzińskiego i Lucyny Bogdan

**Warszawa 2001**



*W Raporcie przedstawiono trzy artykuły zawierające wyniki badań w zakresie modelowania, symulacji komputerowej, identyfikacji i sterowania procesów technicznych i technologicznych zachodzących w mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków. Badania były prowadzone w ramach projektu badawczego KBN pn. Optymalizacja i sterowanie procesu technologicznego w mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków na podstawie modeli matematycznych. Artykuły te, opublikowane w 2001 r., są następujące:*

1. *Modellierung oekologischer Prozesse in Kläranlagen (autorstwa J. Studzińskiego i J. Łomotowskiego), opublikowany w książce pt. Systemtheorie und Modellierung von Oekosystemen, w serii Umweltwissenschaften, wydanej przez Physica-Verlag w Heidelbergu pod redakcją A. Gnaucka*
2. *Komputerowe wspomaganie zarządzania komunalną oczyszczalnią ścieków (autorstwa J. Studzińskiego), prezentowany na konferencji pn. Komputerowe Systemy Wielodostępne KSW'2001, w Ciechocinku w br., opublikowany w książce pt. Rozwój i Zastosowania Technologii i Systemów Informatycznych, wydanej przez IBS PAN pod redakcją J. Studzińskiego, L. Drelichowskiego i O. Hryniewiczza*
3. *Mathematical and neural network modelling of a wastewater treatment plant (autorstwa L. Bogdan, J. Łomotowskiego, Z. Nahorskiego, J. Studzińskiego i R. Szeteli), opublikowany w piśmie Archives of Control Sciences.*

## Spis treści

1.	Modellierung oekologischer Prozesse in Kläranlagen ( <i>J. Studziński, J. Łomotowski</i> ).....	1
2.	Komputerowe wspomaganie zarządzania komunalną oczyszczalnią ścieków ( <i>J. Studziński</i> ).....	14
3.	Mathematical and neural network modelling of a wastewater treatment plant ( <i>L. Bogdan, J. Łomotowski, Z. Nahorski, J. Studziński, R. Szetela</i> ).....	27



# **ROZWÓJ I ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII I SYSTEMÓW INFORMATYCZNYCH**

pod redakcją

Jana Studzińskiego, Ludosława Drelichowskiego  
i Olgierda Hryniewicza

Wydano z wykorzystaniem dotacji KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH

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

Recenzenci artykułów:

Dr hab. inż. Ryszard Budziński, prof. US

Prof. dr hab. inż. Janusz Kacprzyk

Dr hab. Adam Kopiński, prof. AE we Wrocławiu

Doc dr hab. inż. Marek Libura

Prof. dr hab. inż. Andrzej Straszak

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2001

ISBN 83-85847-59-6

ISSN 0208-8028



# KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE ZARZĄDZANIA\* KOMUNALNĄ OCZYSZCZALNIĄ ŚCIEKÓW

**Jan Studziński**

*Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa*  
*studzins@ibspan.waw.pl*

*In the paper a computer aided decision support system for simulation, optimisation and control of the sewage purification process in a wastewater treatment plant is presented. An innovation in the developed system is the use of mathematical models of the sewage purification process to realise an active control of the wastewater treatment plant whereas the existing computer systems for wastewater plants work without any process models and they make only a passive control of the separated plant objects, i.e. they perform the stabilisation of the process parameters on the given values level. Some results of the mathematical modelling and computer simulation and identification of a wastewater plant under investigation are shown. The models developed describe the individual elements of the technological process occurred in the wastewater plant and also the process as a whole and they are formulated by the linear differential equations as well as by the difference equations and the neural networks. For their identification the methods of the hand made calibration and the time series and neural network algorithms are used. The aim of the paper is to indicate a new direction on the field of the computer aided control of the wastewater purification process and to bring out a discussion about the problems arising by the computerisation of modern wastewater treatment plants.*

## **Wprowadzenie**

Standardowe algorytmy sterowania stosowane w oczyszczalniach ścieków służą do stabilizacji procesu technologicznego na podstawie ciągłych pomiarów i zadanych wartości wybranych parametrów procesu. Tymi stabilizowanymi parametrami są zwykle zawartość tlenu w komorach napowietrzania oraz stopień recykulacji zewnętrznej i recykulacji wewnętrznej odpowiednio osadu czynnego ścieków. Taki sposób sterowania na ogół nie jest wystarczający do właściwego prowadzenie

---

\* Na podstawie grantu KBN 8T11A01016 „Optymalizacja i sterowanie procesu technologicznego w mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków na podstawie modeli matematycznych”

procesu oczyszczania w przypadku dużej zmienności parametrów ścieków dopływających do oczyszczalni, tzn. dużych zmian natężenia dopływu i ładunku zanieczyszczeń w dopływie.

Dlatego powstała koncepcja sterowania oczyszczalnią ścieków przy użyciu modeli matematycznych i symulacji komputerowej zjawisk hydrologicznych i procesów technologicznych zachodzących w obiektach oczyszczalni. W tym celu opracowano różne rodzaje modeli matematycznych realizujących różne funkcje procesu oczyszczania i opisanych – w zależności od ich przeznaczenia – za pomocą różnych aparatów matematycznych. Model podstawowy (bazowy) wynika z klasycznych zasad zachowania i opisuje cały proces oczyszczania ścieków zachodzący w oczyszczalni, jak również procesy cząstkowe zachodzące w poszczególnych obiektach oczyszczalni. Jest on sformułowany przy użyciu równań różniczkowych zwyczajnych. Ponieważ wynika on z zasad zachowania znanych z fizyki, chemii i biologii, to jego parametry mają interpretację fizykalną. Modele tego typu są rozwijane już od wielu lat i są stosunkowo dobrze zweryfikowane w praktyce (por. M. Henze i inni, 1987 i M. Henze i inni, 1995). Służą zwykle do celów poznawczych, tzn. do badania zjawisk zachodzących w oczyszczalniach ścieków, natomiast ich użyteczność praktyczna (eksploatacyjna) jest dotychczas mała z powodu ich dużej złożoności. Powoduje ona istotne problemy obliczeniowe, w szczególności przy identyfikacji parametrów modelu. Następnie opracowano modele do prognozowania natężenia dopływu ścieków surowych do oczyszczalni. Sformułowano je przy użyciu sieci neuronowych oraz równań różnicowych będących rezultatem zastosowania algorytmów szeregów czasowych. W końcu opracowano również modele sterowania operacyjnego przy użyciu sieci neuronowych. Zadaniem tych modeli jest generowanie sygnałów sterujących przebiegiem procesu technologicznego.

Model bazowy (*model fizykalny*) procesu oczyszczania oraz modele prognostyczne i sterowania operacyjnego (*modele prognostyczne i sterowania*) tworzą łącznie komputerowy system decyzyjny wspomagający i ułatwiający pracę operatora oczyszczalni. Działanie systemu opiera się na następującej koncepcji: Model fizykalny jest bardzo złożony i ma długi czas obliczeń i dlatego nie nadaje się do rozwiązywania zadań optymalizacji, wymagających wielokrotnego obliczania modelu. Natomiast jest on dosyć dokładny i dlatego nadaje się dobrze do wykonywania obliczeń symulacyjnych, tzn. do obliczania wartości parametrów ścieków oczyszczonych po podstawieniu do niego jako danych wejściowych wyznaczonych wcześniej parametrów ścieków surowych oraz sterowań. Z drugiej strony opracowane modele prognostyczne i sterowania są stosunkowo proste i szybkie w obliczeniach, natomiast mają mniejszą dokładność. Dlatego w pierwszym kroku działania systemu wyznacza się przewidywane parametry dopływu ścieków na podstawie modeli prognostycznych oraz sterowania procesu na podstawie modeli sterowania. Następnie w drugim kroku dokonuje się weryfikacji wyznaczonych sterowań za pomocą modelu fizykalnego. Operator procesu podejmuje decyzję o akceptacji lub odrzuceniu wyznaczonych sterowań na podstawie wyników symulacji komputerowej modelu fizykalnego i własnego doświadczenia.

## 1. Opis obiektu – oczyszczalni ścieków

Badane ścieki surowe mają własności typowe dla ścieków komunalnych w mieście bez dużych zakładów przemysłowych (Tab.1).

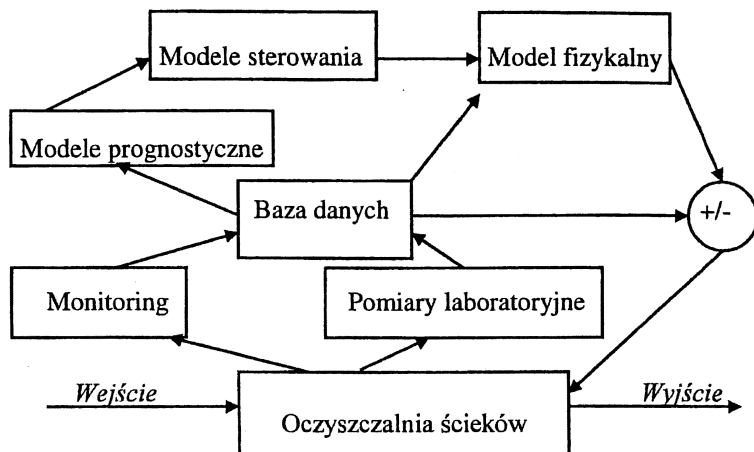
Tablica 1. Parametry ścieków surowych

Parametry ścieków	Jednostka	min	Wart. średnia	max
Natężenie dopływu	m <sup>3</sup> /d		75 000	
Zawiesina	g/m <sup>3</sup>	84.0	309.2	349.1
BZT <sub>5</sub>	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	80.0	416.8	770.0
CZT	gO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>	325.0	507.6	753.0
Azot amonowy	gN/m <sup>3</sup>	14.0	28.3	40.0
Azot	gN/m <sup>3</sup>	29.0	52.9	81.0

Schemat przykładowej oczyszczalni ścieków jest pokazany na Rys. 1. Składa się ona z następujących obiektów: (1) kanał dopływowy ścieków surowych, (2) osadniki wstępne, (3) komory defosfatacji, (4) komory z osadem czynnym do denitryfikacji i nityfikacji 1. stopnia, (5) komory z osadem czynnym do nityfikacji 2. stopnie, (6) układ napowietrzania komór (4) i (5), (7) osadniki wtórne, (8) kanał odpływowy ścieków oczyszczonych, (9) układ recyrkulacji zewnętrznej przeprowadzający osad czynny z (7) do (3), (10) układ recyrkulacji wewnętrznej przeprowadzający ścieki z (5) do (4), (11) układ odprowadzania osadu nadmiarowego.

Proces oczyszczania ścieków realizowany w oczyszczalni składa się z 6 następujących stopni: (1) sedimentacja grawitacyjna cząstek stałych i organicznych w osadnikach wstępnych, (2) dekompozycja biologiczna związków fosforowych w komorach defosfatacji w warunkach anaerobowych (beztlenowych), (3) dekompozycja biologiczna produktów końcowych z reakcji azotowych w obszarach denitryfikacji komór z osadem czynnym w warunkach anoksydacyjnych (z niskim stężeniem tlenu: azotany przechodzą w azot gazowy), (4) dekompozycja biologiczna związków węgla i amoniaku w obszarach nityfikacji komór z osadem czynnym w warunkach aerobowych (z wysokim stężeniem tlenu: amoniak przechodzi w azotyny – nityfikacja 1. stopnia), (5) dekompozycja biologiczna związków węgla i azotynów w obszarach nityfikacji komór z osadem czynnym w warunkach aerobowych (azotyny przechodzą w azotany – nityfikacja 2. stopnia), (6) klarowanie grawitacyjne ścieków w osadnikach wtórnych.



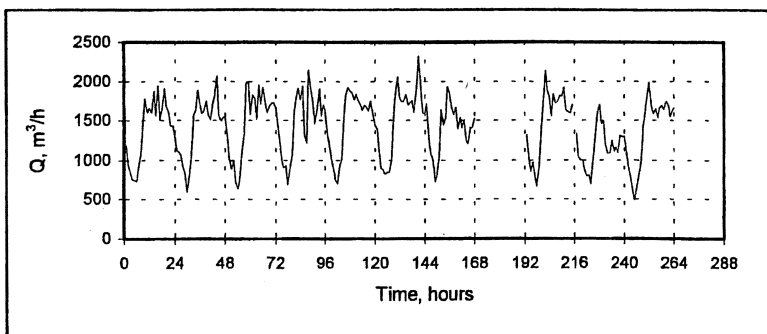


Rys. 2. Schemat systemu komputerowego

### 3. Model fizyczny

Dla stworzenia warunków umożliwiających modelowanie matematyczne oczyszczalni zainstalowano na obiekcie system monitoringu. Przeprowadzono również szarże pomiarową dla zdobycia danych nie mierzonych w sposób automatyczny. Przykładowe dane z monitoringu dotyczące dopływu ścieków surowych są pokazane na Rys. 3.

Opracowany model fizyczny oczyszczalni ma uproszczoną strukturę i opisuje jedynie proces nityfikacji. Zachodzi on w komorach (3) i (4) z Rys. 1. pracujących w warunkach aerobowych, natomiast w komorach (5) odbywa się klarowanie ścieków. Komory (5) pełnią w tym przypadku rolę osadników wtórnych, natomiast w modelu nie uwzględnia się w ogóle komór (7). Nie uwzględnia się również układu recyrkulacji wewnętrznej (10) a jedynie układ recyrkulacji zewnętrznej (10). Wyznaczenie modelu fizycznego odbywa się w 2 krokach: najpierw oblicza się objętości czynne wszystkich obiektów uczestniczących w badanym procesie a następnie dokonuje się kalibracji modelu, tzn. jego dopasowania do procesu rzeczywistego na podstawie zebranych pomiarów i obliczonych objętości czynnych. W Tab.2 pokazano wyniki obliczeń objętości czynnych dla podstawowych obiektów oczyszczalni: osadników wstępnych (2), komór napowietrzania (3 i 4) i osadników wtórnych (5).



Rys. 3. Pomiary dopływu ścieków surowych

Tablica 2. Objętości czynne obiektów oczyszczalni w [m<sup>3</sup>]

Komory/ Metoda obliczeń	Osadniki wstępne	Komory napo- wietrzania	Osadniki wtórne	
			Część górną	Część dolną
RL	5.676	11.246	4.723	6.303
RNL	6.283	12.087	4.612	6.514
Wartość średnia (A)	5.980	11.667	4.668	6.408
Objętość geometryczna (B)	7.820	13.500	11.060	
A/B [%]	76,5	86,4	~ 100	

Z Rys. 3 widać, że zmiany natężenia dopływu osiągają do 300 %/godz i również podobnie zmienia się ładunek zanieczyszczeń w ściekach surowych. W Tab.2 pokazano wyznaczone różnice między objętościami geometrycznymi i czynnymi obiektów oczyszczalni, wynoszące 25% w przypadku osadników wstępnych. Przy obliczaniu objętości czynnych potraktowano osadniki wstępne i komory napowietrzania jako zbiorniki z mieszaniem idealnym. W przypadku osadników wtórnych przyjęto, że są one zbudowane z 2 komór o strukturze warstwowej. W komorze górnej osadnika gromadzą się ścieki sklarowane, natomiast w komorze dolnej gromadzi się osad czynny. Modele wszystkich badanych zbiorników są opisane równaniami różniczkowymi zwyczajnymi. Parametry równań są szukanymi objętościami czynnymi i zostały obliczone metodami liniowej i nieliniowej regresji. Zwykle w fizycznych modelach oczyszczalni uwzględnia się objętości geometryczne zbiorników, co może prowadzić do dużych błędów obliczeniowych.

**Tablica 3.** Wyniki kalibracji dla osadników wstępnych, komór napowietrzania i osadników wtórnych

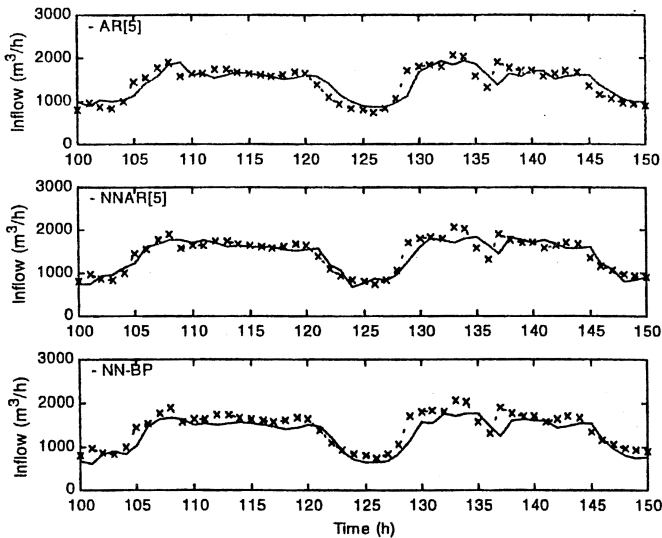
Parametr	Jednostka	Pomiary	Model	Błąd [%]
Osadniki wstępne				
Osad	g/m <sup>3</sup>	163	162	0.6
BZT <sub>5</sub>	g O <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	186	188	1
Amoniak	g N/ m <sup>3</sup>	29.3	26.3	10
Całkowity N	g N/ m <sup>3</sup>	39.3	32.0	19
Zasadowość	Val/ m <sup>3</sup>	8.3	7.9	5
Komory napowietrzania				
Biomasa	g/ m <sup>3</sup>	3815	3890	2
BZT <sub>5</sub>	g O <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	18	18.3	2
Amoniak	g N/ m <sup>3</sup>	26.3	24.2	8
Całkowity N	g N/ m <sup>3</sup>	32.1	26.1	12
Zasadowość	Val/m <sup>3</sup>	7.9	7.7	3
Osadniki wtórne				
Osad	g /m <sup>3</sup>	19	19	0%
BZT <sub>5</sub>	g O <sub>2</sub> / m <sup>3</sup>	19	23	21%
Amoniak	g N/ m <sup>3</sup>	24.9	24.2	3%
Całkowity N	g N/ m <sup>3</sup>	28.1	26.9	4%
Zasadowość	Val/m <sup>3</sup>	8.1	7.7	5%

Model fizyczny oczyszczalni ścieków składa się z samodzielnych modeli osadników wstępnych, komór napowietrzania i osadników wtórnych oraz łączącego je układu recyrkulacji zewnętrznej. Modele te opisują idealne mieszanie cieczy zachodzące w osadnikach wstępnych i komorach napowietrzania, procesy sedymentacji zachodzące w osadnikach wstępnych i wtórnych oraz procesy biologiczne w komorach napowietrzania w warunkach aerobowych. Model fizyczny był kalibrowany ręcznie. Częściowe wyniki kalibracji są pokazane w Tab. 3. Dopasowanie modelu do pomiarów jest zadowalające i jedynie w przypadku kilku parametrów błędy dopasowania są większe od kilku procent.

#### 4. Modele prognostyczne

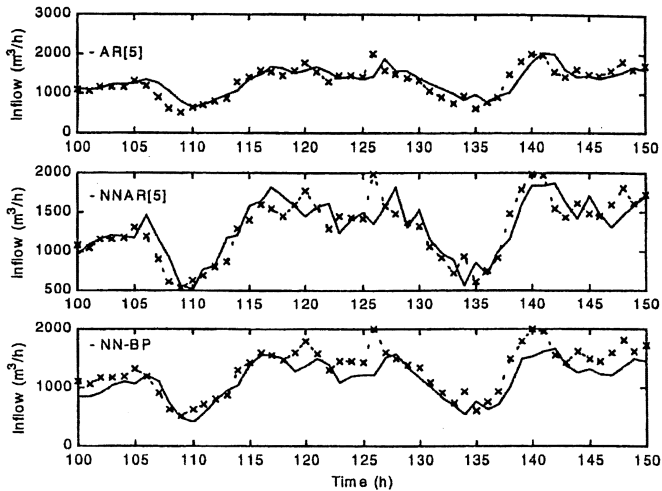
Modele prognostyczne dla dopływu ścieków surowych były tworzone 2 sposobami: w postaci modeli różnicowych typu ARMA (*autoregressive moving average*) oraz przy użyciu sieci neuronowych. Czas prognozowania dopływu wynosi 1 h. Na Rys. 4 i 5 pokazano wyniki modelowania i prognozowania dla modelu ARMA i dla 2 rodzajów sieci neuronowej.

Wyznaczając modele neuronowe użyto tych samych danych pomiarowych, co w przypadku modelu ARMA. Oba modele neuronowe są typu BP (*back propagation*). Są one zbudowane z 3 warstw z 5 neuronami na warstwie wejściowej i 1 neuronem na warstwie wyjściowej. Różnica między nimi dotyczy liczby neuronów na warstwie ukrytej: model NNAR (*neuronal net autoregressive model*) ma 7 neuronów a model NNBP (*neuronal netback propagation model*) ma 6 neuronów. W modelu NNAR zastosowano dodatkowo algorytm badania istotności połączeń między neuronami i automatycznej eliminacji połączeń nieistotnych. W modelach neuronowych dane pomiarowe były użyte w identyczny sposób, jak w modelu ARMA, tzn. w ruchomym oknie obejmującym sześć pomiarów zawsze pięć pierwszych pomiarów było traktowanych jako wejścia modelu, natomiast szósty pomiar był traktowany jako wyjście modelu (aktualna wartość wyjścia modelu jest funkcją pięciu poprzednich pomiarów).



Rys. 4. Wyniki modelowania dla modelu ARMA 5. rzędu (wykres górny) i dla 2 modeli neuronowych (linia przerywana oznacza pomiary)





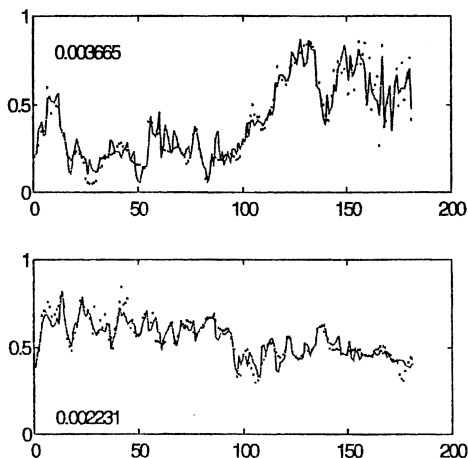
Rys. 5. Wyniki prognozowania dla modelu ARMA 5. rzędu (wykres górny) i dla 2 modeli neuronowych (linia przerywana oznacza pomiary)

## 5. Model sterowania

Model sterowania jest w postaci sieci neuronowej i opisuje cały proces oczyszczania ścieków. Do wyznaczenia modelu użyto danych mierzonych w 4 następujących punktach oczyszczalni: dopływ ścieków surowych, komory napowietrzania, układ recyrkulacji zewnętrznej i odpływ ścieków oczyszczonych. W ten sposób mierzono parametry ścieków surowych i oczyszczonych oraz parametry sterujące procesem. Mierzono następujące wielkości: BZT (*biologiczne zapotrzebowanie tlenu*), stężenie azotu, amoniaku i zawiesiny w dopływie ścieków do oczyszczalni; stężenie tlenu i osadu czynnego oraz opadalność osadu w komorach napowietrzania; stopień recyrkulacji i stężenie osadu recyrkulowanego w układzie recyrkulacji zewnętrznej; BZT, stężenie azotu, amoniaku i zawiesiny w odpływie z oczyszczalni. Dla celów modelowania wszystkie pomiary podzielono na 3 grupy: danych wejściowych, wyjściowych i sterowań modelu. Przy tym parametry ścieków surowych są danymi wejściowymi, stężenie tlenu i stopień recyrkulacji są danymi sterującym a parametry pozostałe są danymi wyjściowymi modelu neuronowego.

Naszym zadaniem jest wyznaczenie przewidywanego wyjścia procesu technologicznego z wyprzedzeniem równym 1 krokowi czasowemu. Proces jest nieliniowy i dlatego model neuronowy musi uwzględnić nieliniowości procesu. Jest to możliwe w przypadku sieci neuronowej typu BP z nieliniowymi funkcjami przejścia. Wybrano do badań sieć z 3 warstwami. Każdy neuron danej warstwy jest połączony z każdym neuronem warstwy sąsiedniej. Funkcje przejścia na warstwie pierwszej i drugiej są nieliniowymi funkcjami logistycznymi, natomiast funkcje przejścia na warstwie trzeciej są funkcjami liniowymi tożsamościowymi.

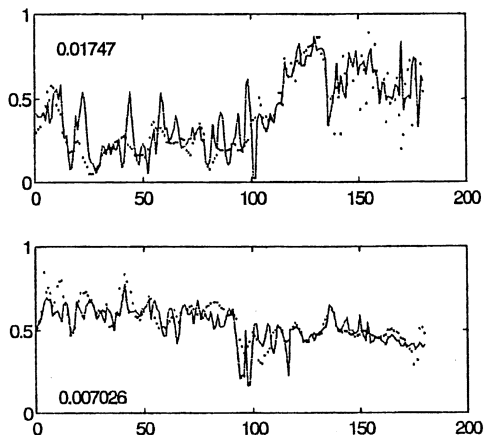
Po utworzeniu struktury sieci neuronowej następuje etap trenowania sieci. Oznacza to wyznaczenie wartości parametrów w funkcjach przejścia w taki sposób, aby wyjście modelu dopasowało się do pomiarów z obiektu. Jako funkcję celu stosuje się tutaj zwykle sumę kwadratów reszt, natomiast do minimalizacji tej funkcji stosuje się metodę gradientową optymalizacji statycznej. W takim przypadku pojawiają się jednak problemy ze zbieżnością procesu optymalizacji, który staje się niestabilny. Dlatego lepsze rezultaty osiąga się stosując metodę bezgradientową Gaussa-Newtona. Wprowadzie wymaga ona dużej pamięci komputera, jednak jest stosunkowo szybka w pobliżu optimum i znacznie dokładniejsza od metody gradientowej. Nie występują wtedy również problemy ze stabilnością metody.



**Rys. 6.** Wyniki trenowania sieci neuronowej dla 2 parametrów sterujących  
(*punkty - pomiary, linia ciągła - model*)

Model sterowania jest stosowany jako narzędzie wspomagania procesu podejmowania decyzji przez operatora oczyszczalni. Stosujemy tutaj parametry wejścia obiektu w chwili  $t$ , parametry wyjścia obiektu w chwili  $t$  oraz parametry wyjścia obiektu w chwili  $t+T$  jako parametry wejściowe sieci neuronowej. Parametry sterujące obiektu w chwili  $t$  są traktowane jako wyjścia sieci neuronowej. W strukturze sieci uwzględniono 16 neuronów na warstwie wejściowej i 2 neurony na warstwie wyjściowej.

Wyniki obliczeń otrzymane dla modelu sterowania są pokazane na Rys. 6 i 7. Dopasowanie wyjść sieci do pomiarów z obiektu jest w pełni satysfakcjonujące.



Rys. 7. Wyniki testowania sieci neuronowej dla 2 parametrów sterujących  
(punkty - pomiary, linia ciągła - model)

## Literatura

- Henze M., Grady C. P. L. Jr., Marais G. R., Matsuo T. (1987): Activated sludge model No. 1, IAWPRC Scientific and Technical Reports No. 1, IAWPRC, London.
- Wanner O., Kapler J., Gujer W. (1991): Calibration of an activated sludge model based on human expertise and on a mathematical optimization technique - A comparison. Water Science Technology, vol. 25, p.141.
- Wentzel M. C., Ekama G. A., Marais G. R. (1992): Processes and modelling of nitrification-denitrification biological excess phosphorus removal systems - a review. Water Science Technology, vol. 25, p. 59.
- Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M. C., Marais G. R. (1995): Activated sludge model No. 1, IAWQ Scientific and Technical Reports No. 3, IAWQ, London.
- Bogdan L., Nahorski Z., Studzinski J. (1997): Estimation of the active volume of the water tanks in a wastewater treatment plant. Proceedings of MOSIS97, ed. J.Stefan, Acta MOSIS No.65 Ostrava.
- Szetela R., Studzinski J., Lomotowski J. (1997): Computer simulation of sewage purification plants for control and design. Proceedings of ESS97, eds. W. Hahn and A.Lehman, SCS Passau.
- Studzinski J., Tesche T., Bogdan L. (1998): Sewage treatment process modelling with neural networks for forecasting and control. Proceedings of ESS98, eds. A.Bargiela and E.Kerckhoffs, SCS Nottingham.
- Bogdan J., Lomotowski J., Nahorski Z., Studzinski J., Szetela R. (1998): Mathematical model and its calibration for Rzeszow wastewater treatment plant. Environment Protection Engineering, vol.24, pp.95-112.



