

68/2002

Raport Badawczy

RB/68/2002

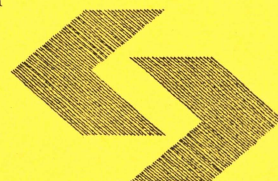
Research Report

**Modele matematyczne
elementów systemu
gospodarki wodno-ściekowej
miasta**

J. Studziński, L. Bogdan

**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 2002

Instytut Badań Systemowych PAN

Raport

**Modele matematyczne elementów systemu gospodarki wodno-
ściekowej miasta**

Pod redakcją Jana Studzińskiego i Lucyny Bogdan

Warszawa 2002

Raport składa się z dwóch części: W Części I opisano realizowane i planowane do realizacji w przyszłości zagadnienia dotyczące zarządzania miejską gospodarką wodno-ściekową na podstawie modeli matematycznych obiektów wodociagowo-kanalizacyjnych. W Części II zamieszczono 2 nieopublikowane artykuły, zawierające częściowe wyniki badań opisanych w Części I i dotyczących modelowania mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków. Artykuły te, które mają się ukazać w książce pt. *Theorie und Modellierung von Oekosystemen*, w serii *Umweltinformatik*, publokowanej przez Shaker-Verlag w Aachen pod redakcją A. Gnaucka, są następujące:

1. *Von der Modellierung dynamischer Prozesse in Klaeranlagen* (autorstwa J. Studzińskiego, L. Bogdan i Z. Nahorskiego, oraz
2. *Entwicklung eines Computersystems zur Modellierung, Simulation und Optimierung von Klaerprozessen in Klaeranlagen* (autorstwa J. Studzińskiego, J. Łomotowskiego, L. Bogdan, Z. Nahorskiego i R. Szeteli).

Spis treści

Część I:

Zarządzanie miejską gospodarką wodno-ściekową na podstawie modeli matematycznych obiektów wodociągowo-kanalizacyjnych.....	4
--	---

Część II:

Artykuły:

1. Von der Modellierung dynamischer Prozesse in Kläranlagen (<i>J. Studziński, L. Bogdan, Z. Nahorski</i>).....	15
2. Entwicklung eines Computersystems zur Modellierung, Simulation und Optimierung von Kläerprozessen in Kläranlagen (<i>J. Studziński, J. Łomotowski, L. Bogdan, Z. Nahorski, R. Szetela</i>).....	29

Zarządzanie miejską gospodarką wodno-ściekową na podstawie modeli matematycznych obiektów wodociągowo-kanalizacyjnych

Wprowadzenie

Miejska gospodarka wodno-ściekowa składa się z czterech systemów podporządkowanych zwykle jednemu przedsiębiorstwu, np. miejskiemu przedsiębiorstwu wodociągowo-kanalizacyjnemu (taka sytuacja występuje np. w Rzeszowie). Te systemy, to: stacja ujęcia i uzdatniania wody pitnej wraz ze stacją pomp pompujących wodę do sieci wodociągowej; sieć wodociągowa; sieć kanalizacyjna; oczyszczalnia ścieków miejskich. Te cztery systemy tworzą w rzeczywistości jeden system gospodarki wodno-ściekowej złożony z połączonych szeregowo czterech podsystemów, jednak nigdzie w krajowych przedsiębiorstwach wodociągowo-kanalizacyjnych nie są one w ten sposób traktowane. Powszechną praktyką jest traktowanie każdego podsystemu jako systemu autonomicznego, z niezależną organizacją i zarządzaniem. Stąd i ewentualna komputeryzacja każdego podsystemu odbywa się niezależnie. Jest to podejście nieekonomiczne i również niewłaściwe z punktu widzenia sterowania. Każdy podsystem wymaga sterowania. W stacji ujęcia wody, w sieci wodociągowej i również w sieci kanalizacyjnej (w przypadku sieci grawitacyjno-ciśnieniowej) steruje się pompami, w oczyszczalni ścieków steruje się pompami i dmuchawami powietrza. Są to urządzenia bardzo energochłonne. Na ogół stosuje się do sterowania nimi układy regulacji automatycznej, utrzymujące na stałym poziomie zadane wartości wybranych parametrów procesów (np. poziom wody w zbiornikach, stężenie tlenu w komorach napowietrzania, stopień recykulacji ścieków lub osadu czynnego w oczyszczalni ścieków). Takie sterowanie nie jest jednak efektywne i często nieskuteczne w przypadku dużych i szybkich zmian warunków, w których zachodzą poszczególne procesy (np. zmiana obciążenia sieci wodociągowej, zmiana ilości ścieków surowych dopływających do oczyszczalni). Wtedy operator danego procesu steruje nim ręcznie, zmieniając nastawy regulatorów, lub są już wdrażane dla poszczególnych podsystemów komputerowe systemy wspomagania decyzji, jednak działające wyłącznie w ramach danego podsystemu. Jednocześnie sterowanie każdym podsystemem zależy w istotny sposób od obciążenia sieci wodociągowej, które wpływa na pracę pomp w stacji poboru wody, na napełnianie zbiorników retencyjnych w samej sieci wodociągowej, na obciążenie hydrauliczne sieci kanalizacyjnej i na obciążenie hydrauliczne i ładunkiem zanieczyszczeń oczyszczalni ścieków. Stąd prognoza obciążenia sieci wodociągowej jest istotnym elementem sterowania każdym podsystemem. Ponieważ te podsystemy są połączone szeregowo, czyli wyjście jednego podsystemu jest wejściem kolejnego, więc powstała koncepcja budowy zintegrowanego systemu wspomagania decyzji dla jednoczesnego zarządzania całą miejską gospodarką wodno-ściekową.

W Instytucie Badań Systemowych od kilku lat prowadzi się prace związane z tworzeniem komputerowych systemów wspomagania decyzji dla sterowania siecią wodociągowa i miejską oczyszczalnią ścieków. W dużym stopniu prace te były finansowane przez projekty badawcze Komitetu Badań Naukowych (Studziński J., 2002). Jednak w tych pracach traktowano dotychczas oba podsystemy gospodarki wodno-ściekowej niezależnie. Jednocześnie zainteresowano się ostatnio modelowaniem i optymalizacją sieci kanalizacyjnej i stacji pomp w stacji poboru i uzdatniania wody. To pozwoliło zauważyć komplementarność niezależnych do tej pory badań i sformułować koncepcję zintegrowanego systemu komputerowego. W dalszym ciągu zostanie przedstawiona idea tego systemu oraz zostaną omówione poszczególne jego moduły, dotyczące kolejno stacji pomp w źródle wody pitnej,

sieci wodociągowej, sieci kanalizacyjnej i oczyszczalni ścieków. Kluczową ideą systemu komputerowego jest stosowanie modeli matematycznych poszczególnych obiektów przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjnego do zarządzania nimi. Omówione również dalej modele sieci wodociągowej i oczyszczalni ścieków zostały opracowane na podstawie danych pomiarowych z Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w Rzeszowie, które było badanym obiektem w realizowanych projektach badawczych KBN.

Opis obiektu – stacji pomp w źródle wody pitnej

System wodno-ściekowy Rzeszowa jest zasilany z dwóch rzecznych ujęć wody o wydajnościach 37.000 m³/dobę i 47.500 m³/dobę. Oba ujęcia są wyposażone w stacje uzdatniania wody i zestawy pompowe, pompujące wodę bezpośrednio do sieci i do pięciu zbiorników wyrównawczych o objętościach 1 x 3.600 m³ oraz 4 x 3.000 m³, pełniących funkcje zbiorników buforowych. Ich łączna pojemność stanowi ok. 20 % wydajności obu stacji pomp, ale już ok. 30 % obecnego zużycia wody przez miasto, kształtującego się na poziomie 50.000 m³/dobę. Napełnianie zbiorników odbywa się obecnie na podstawie wskazań czujników poziomu, tzn. dany zbiornik jest napełniany do poziomu maksymalnego, gdy ilość zawartej w nim wody spadnie do określonego poziomu minimalnego. Nie ma to żadnego związku z przyszłym obciążeniem sieci wodociągowej, które zmienia się w zależności od pory i rodzaju dnia oraz pory roku. Jednocześnie przy napełnianiu zbiorników uruchamia się wszystkie pompy dostępne w stacji pomp, minimalizując czas napełniania zbiornika i nie biorąc pod uwagę minimalizacji kosztów energii.

Wydaje się celowa zmiana systemu napełniania zbiorników w ten sposób, aby napełniać je w zależności od przewidywanego obciążenia sieci, przy tym tak sterując pracą pomp, aby zminimalizować wydatek energii. Ponieważ pompy są urządzeniami bardzo energochłonnymi, więc zmniejszenie kosztów energii nawet o kilka procent przyniesie znaczne oszczędności w skali roku. Podobne problemy rozwiązuje się np. w Anglii, przy czym sterując pompami w przedsiębiorstwie wodociągowym minimalizuje się dodatkowo zużycie eksploatacyjne urządzeń, tzn. uwzględnia się przewidywane koszty wymiany zużytych pomp (Waterworth G., 2002). Jednak do realizacji takiego sterowania należy znać prognozy obciążenia sieci wodociągowej, a ich uzyskanie jest możliwe jedynie wówczas, gdy stacje pomp, zbiorniki oraz sieć wodociągowa zostaną potraktowane jako jeden zintegrowany system wodny.

Opis obiektu – sieci wodociągowej

Miasto Rzeszów liczy ok. 160.000 mieszkańców. Miejska sieć wodociągowa ma łączną długość 544 km, w tym długość magistrali wynosi 50 km, sieci rozdzielczej 274 km oraz przyłączy wodociągowych 221 km. W sieci znajduje się 21 przepompowni wody (hydroforni) i jest do niej przyłączonych 12.201 odbiorców zbiorowych. 80 % sieci pracuje w systemie pierścieniowym. Obecnie obciążenie sieci wodociągowej wynosi ok. 56 % jej możliwości produkcyjnych a przyczyną spadku obciążenia jest zmniejszenie zapotrzebowania na wodę przez zakłady przemysłowe, przez co sieć jest obciążana przede wszystkim przez gospodarstwa domowe. Dla wybranego fragmentu sieci, obejmującego ok. 10 % całości, opracowano system komputerowy wspomagania decyzji operatorskich (pilotowy), złożony z mapy numerycznej sieci, branżowej bazy danych, systemu monitoringu oraz modelu hydraulicznego (Studzinski J. i inni, 2001).

Dla opracowania mapy numerycznej sieci wodociągowej zakupiono specjalizowane oprogramowanie do tworzenia map numerycznych (GIS) i wykonano mapę sieci na

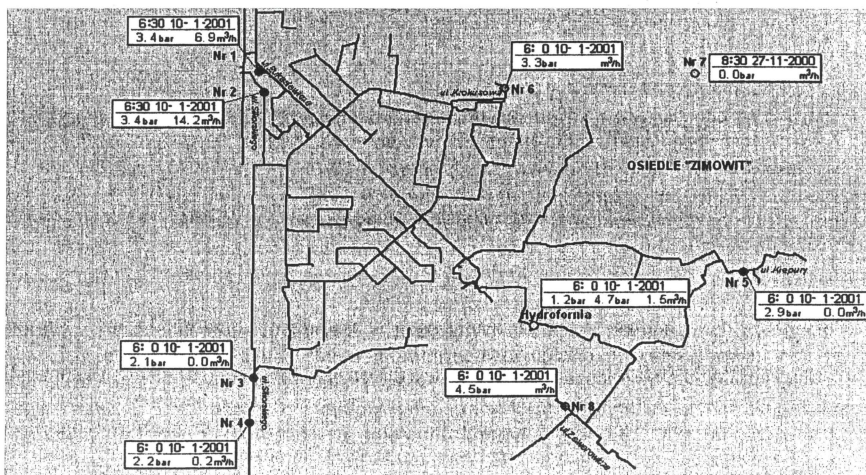
podstawie zwektoryzowanych map geodezyjnych miasta. Zakupiono standardowy system Geomedia firmy Intergraph a następnie zaadoptowano go do potrzeb wodociągów. Mapa numeryczna składa się z odpowiadającego rzeczywistości rysunku sieci wodociągowej oraz z dołączonej do rysunku opisowej bazy danych. Aby mapa odwzorowywała rzeczywistą sieć wodociągową, na rysunku muszą być wyróżnione wszystkie charakterystyczne elementy sieci a w bazie danych muszą się znaleźć wszystkie parametry tych elementów (atrybuty). Przy sporządzaniu mapy numerycznej należało zdefiniować strukturę bazy danych, czyli określić, z jakich obiektów baza ma się składać i jakie atrybuty tych obiektów mają w niej zostać uwzględnione.

Po szczegółowej analizie opracowano definicję branżowej bazy danych dla wodociągów w Rzeszowie. Przyjęte podstawowe obiekty wodociągów, to: przewody wodociągowe, pompownie, hydrofornie, zbiorniki, przyłącza wodociągowe, zasuw, 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. Branżowa baza danych jest podstawą działania wszystkich programów tworzących system komputerowy dla sieci wodociągowej. Tak zdefiniowana baza umożliwiała wizualizację sieci wodociągowej w postaci mapy numerycznej, natomiast nie umożliwiała jeszcze współpracy mapy z aplikacjami zewnętrznymi, w szczególności z systemem monitoringu i z modelem hydraulicznym, ponieważ nie zawierała obiektów specyficznych dla tych aplikacji. Takimi obiektami są węzły sieci wodociągowej nie występujące na mapach geodezyjnych. Dlatego należało dodatkowo zdefiniować węzły oraz ich atrybuty. Podstawowe węzły sieci wodociągowej, to: źródła, odbiorcy, węzły montażowe i pomiarowe, natomiast ich podstawowe atrybuty, to ciśnienia i rozbiory wody. Mapa numeryczna sieci wodociągowej tworzona bezpośrednio na podstawie zwektoryzowanych obrębów map geodezyjnych, oprócz tego, że nie zawiera węzłów, jest jeszcze na ogół niepoprawna topologicznie, tzn. jest nieciągła. Dlatego nie można na jej podstawie wykonywać obliczeń hydraulicznych. Aby to było możliwe, należało do standardowego programu Geomedia, oprócz programu do generowania węzłów hydraulicznych, dopisać program do topologizacji sieci. Dopiero opracowanie tych programów uczyniło z programu Geomedia aplikację wodociągową mapy numerycznej. Ostatecznie są generowane trzy warstwy mapy numerycznej: warstwa geodezyjna, tworzona na podstawie zwektoryzowanych obrębów map geodezyjnych, warstwa topologiczna, utworzona z warstwy geodezyjnej po sprawdzeniu i poprawieniu ciągłości sieci wodociągowej, oraz warstwa hydrauliczna utworzona z warstwy topologicznej po wprowadzeniu węzłów i utworzeniu w ten sposób nowego grafu sieci, będącego podstawą obliczeń hydraulicznych.

Do obliczeń hydraulicznych sieci opracowano własny program modelowania, stosujący metodę Crossa do rozwiązywania nieliniowych równań algebraicznych tworzonych dla pierścieni sieci wodociągowej oraz uwzględniający w strukturze sieci takie obiekty, jak: przewody wodociągowe, przewody wodociągowe z rozbiorem odcinkowym, przewody wodociągowe zawierające zasuw, reduktory lub zawory, węzły zasilające w postaci pompowni lub zbiorników, węzły montażowe, węzły odbiorcze będące przyłączami na mapie geodezyjnej, węzły podnoszące ciśnienie w postaci hydroforni. Program modelowania jest napisany w języku Delphi i ma własny edytor graficzny, umożliwiający wykonywanie obliczeń i tworzenie na ekranie komputera grafu sieci wodociągowej również niezależnie od mapy numerycznej. Dane do programu dotyczące struktury sieci wodociągowej oraz jej parametrów są dostarczane z mapy numerycznej za pomocą plików buforowych. Pliki buforowe dotyczące przewodów i węzłów hydraulicznych są generowane na podstawie warstwy hydraulicznej mapy numerycznej. Opracowany program modelowania, oprócz

możliwości stosowania rozbiórów węzłowych i odcinkowych, ma również możliwość obliczeń statycznych, na podstawie zadanych średnich rozbiórów dobowych lub chwilowych, oraz obliczeń dynamicznych, na podstawie zadanych charakterystyk dobowych rozbiórów godzinowych.

Do weryfikacji obliczeń hydraulicznych wykonanych za pomocą programu modelowania służy system monitoringu. Dla uruchomienia systemu monitoringu wyznaczono na podstawie obliczeń hydraulicznych punkty pomiarowe w badanym fragmencie sieci wodociągowej. Badany obszar składa się z dwóch stref ciśnieniowych rozdzielonych hydrofornią. Wytypowano dziewięć punktów pomiarowych, w tym dwa punkty zasilania sieci i dwa punkty wyprowadzania wody z badanego obszaru; dwa punkty pomiarowe w pierwszej strefie ciśnieniowej oraz dwa punkty pomiarowe w drugiej strefie ciśnieniowej (punkty minimalnego i maksymalnego ciśnienia); jeden punkt pomiarowy w hydroforni rozdzielającej dwie strefy ciśnieniowe. W punktach dopływu i odpływu wody z sieci oraz w hydroforni mierzy się przepływy i ciśnienia wody, natomiast w pozostałych punktach pomiarowych są mierzone tylko ciśnienia. Do realizacji systemu monitoringu zakupiono program Procon oparty o oryginalny system niemiecki pracujący przy zastosowaniu sterowników firmy Siemens. System transmisji pomiarów z punktów pomiarowych do komputera z zainstalowanym programem Procon został oparty o telefonię komórkową GSM. Jest to rozwiązanie innowacyjne w zakresie systemów monitoringu dla sieci wodociągowych i jest niezawodne.



Rys. 1. Fragment sieci wodociągowej Rzeszowa objętej pilotowym systemem wspomagania decyzji i systemem monitoringu.

Zadaniem systemu monitoringu, oprócz weryfikacji a także kalibracji modelu hydraulicznego, jest także sporządzanie i weryfikowanie charakterystyk dobowych rozbiórów godzinowych, służących do prognozowania obciążenia sieci wodociągowej.

Opis obiektu – sieci kanalizacyjnej

Sieć kanalizacyjna Rzeszowa ma charakter mieszany, gdyż oprócz ścieków komunalnych przenosi również częściowo ścieki deszczowe. Całkowita długość sieci wynosi 414 km, w tym 245 km dotyczy kanalizacji sanitarnej i 169 km dotyczy kanalizacji deszczowej. Przepływ ścieków w sieci odbywa się grawitacyjnie. Skład ścieków i obciążenie sieci kanalizacyjnej zmieniają się cyklicznie i dosyć regularnie, zgodnie z obciążeniem sieci wodociągowej.

Tablica 1. Zmienność parametrów ścieków miejskich w Rzeszowie.

Parametry ścieków	Jednostka	min	Wart. średnia	max
Zawiesina	g/m ³	84,0	309,2	349,1
BZT ₅	gO ₂ /m ³	80,0	416,8	770,0
ChZT	gO ₂ /m ³	325,0	507,6	753,0
Azot amonowy	gN/m ³	14,0	28,3	40,0
Azot ogólny	gN/m ³	29,0	52,9	81,0
Tłuszcze	g/m ³	94,0	117,0	176,0
Obciążenie sieci	m ³ /h	500,0	1.500	2.200

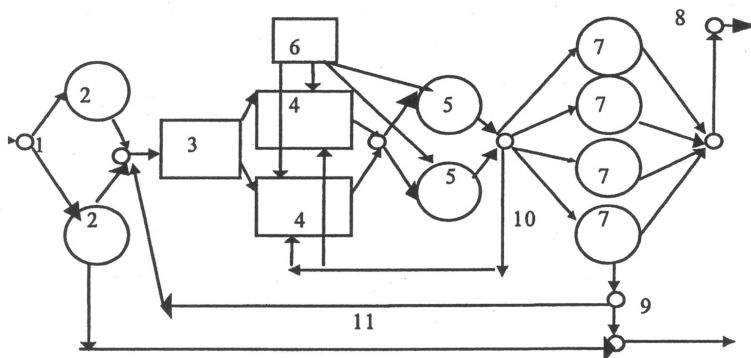
Dotychczas nie ma dużych doświadczeń z modelowania i optymalizacji sieci kanalizacyjnych, które mimo pewnego podobieństwa, jednak istotnie się różnią od sieci wodociągowych. Podstawowe różnice, to:

- W sieci kanalizacyjnej, oprócz odcinków ciśnieniowych analogicznych jak w sieci wodociągowej, występują również odcinki z przepływem grawitacyjnym, nieobecne w sieci wodociągowej;
- Dla węzłów sieci kanalizacyjnej nie zawsze jest prawdziwe, że w każdym momencie suma ścieków dopływających do węzła i odpływających z węzła jest równa zero, jak to ma miejsce dla sieci wodociągowej (analogia z pierwszym prawem Kirchhoffa w elektrotechnice). Często węzły sieci kanalizacyjnej mają postać zbiorników, gdzie ścieki są zbierane do chwili przekroczenia odpowiedniego poziomu i dopiero potem są z węzła odpompowywane.
- Sieć kanalizacyjna ma zwykle strukturę drzewa, zakończeniem którego jest oczyszczalnia ścieków (a nie strukturę pierścieniową).

Jednocześnie model hydrauliczny sieci kanalizacyjnej jest użyteczny do obliczania i prognozowania obciążenia hydraulicznego oczyszczalni ścieków, a w konsekwencji do sterowania jej pracą. Modele sieci kanalizacyjnych są opracowywane zagranicą, np. w Niemczech, gdzie są używane do obliczeń optymalizacyjnych i projektowych (Wedel K., 1998). Jest możliwe i celowe skorzystanie z tych doświadczeń przy budowie systemu sterowania miejską gospodarką wodno-ściekową.

Opis obiektu – oczyszczalni ścieków

Schemat mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków w Rzeszowie jest pokazany na rys. 2. 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 I stopnia; (5) komory z osadem czynnym do nityfikacji II stopnia; (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 nadmiernego. Proces oczyszczania ścieków realizowany w oczyszczalni składa się z sześciu 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 anoksycznych (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 I stopnia); (5) dekompozycja biologiczna związków węgla i azotynów w obszarach nityfikacji komór z osadem czynnym w warunkach aerobowych (azotyny przechodzą w azotany – nityfikacja II stopnia), (6) klarowanie grawitacyjne ścieków w osadnikach wtórnych.

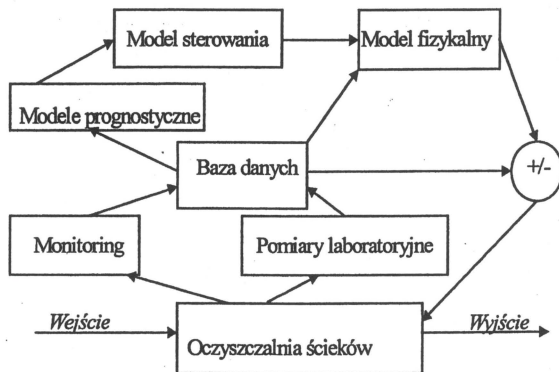


Rys. 2. Schemat oczyszczalni ścieków.

Dla oczyszczalni w Rzeszowie opracowano system komputerowy wspomagania decyzji operatorskich, pokazany schematycznie na rys. 3. Działanie systemu jest następujące: (1) parametry procesu oczyszczania są mierzone na bieżąco, w części automatycznie za pomocą systemu monitoringu, a w części laboratoryjnie; (2) dane pomiarowe są zapamiętywane w branżowej bazie danych; (3) przewidywane natężenie dopływu ścieków surowych oraz przewidywane ładunki zanieczyszczeń są wyznaczane za pomocą modeli prognostycznych i danych pomiarowych; (4) parametry sterujące procesem są obliczane za pomocą modelu sterowania oraz wyznaczonych wartości dopływu i ładunków zanieczyszczeń; (5) obliczone sterowania są następnie weryfikowane za pomocą obliczeń symulacyjnych modelu

fizykalnego procesu; (6) w przypadku pozytywnej weryfikacji obliczone sterowania są uwzględniane w oczyszczalni; jeżeli weryfikacja jest negatywna, operator nie akceptuje obliczonych sterowań i sam podejmuje decyzje o kierowaniu procesem.

Opracowany model fizykalny oczyszczalni ma uproszczoną strukturę i należy do klasy modeli Activated Sludge Model No. 1 (Henze M. i inni, 1995). Opisuje on jedynie proces nityfikacji zachodzący w komorach (3) i (4) z rys. 2, pracujących w warunkach aerobowych. W komorach (5) odbywa się klarowanie ścieków i pełnią one 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 (9). Oszacowanie parametrów w modelu fizykalnym odbywa się metodą kalibracji, tzn. ręcznego dopasowania jego wyjścia do wyjścia procesu na podstawie zebranych pomiarów (Wanner O. I inni, 1991). Model fizykalny oczyszczalni 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 wtórnych oraz procesy biologiczne w komorach napowietrzania w warunkach aerobowych. Wyniki kalibracji modelu są pokazane w tab. 2 (Bogdan L. i inni, 2000).



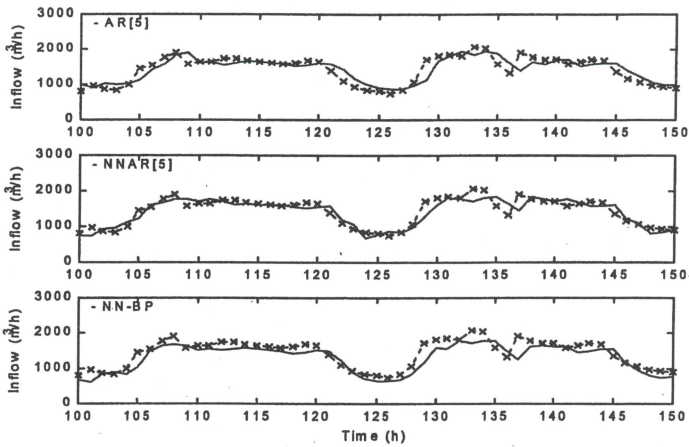
Rys. 3. Schemat systemu komputerowego dla oczyszczalni ścieków.

Modele prognostyczne dla dopływu ścieków do oczyszczalni były tworzone w postaci modeli różnicowych typu ARMA (autoregressive moving average) oraz przy użyciu sieci neuronowych. Czas prognozowania dopływu za pomocą modeli wynosi 1 h. Na rys. 4 i 5 pokazano wyniki modelowania i prognozowania dla modelu ARMA piątego rzędu i dla dwóch rodzajów sieci neuronowej typu BP (back propagation). Sieci neuronowe są zbudowane z trzech warstw z pięcioma neuronami na warstwie wejściowej i jednym neuronem na warstwie wyjściowej. Różnica między nimi dotyczy liczby neuronów na warstwie ukrytej: model NNAR (neural net autoregressive model) ma siedem neuronów a model NNBP (neural netback propagation model) ma sześć neuronów (Studzinski J. i inni, 1998).

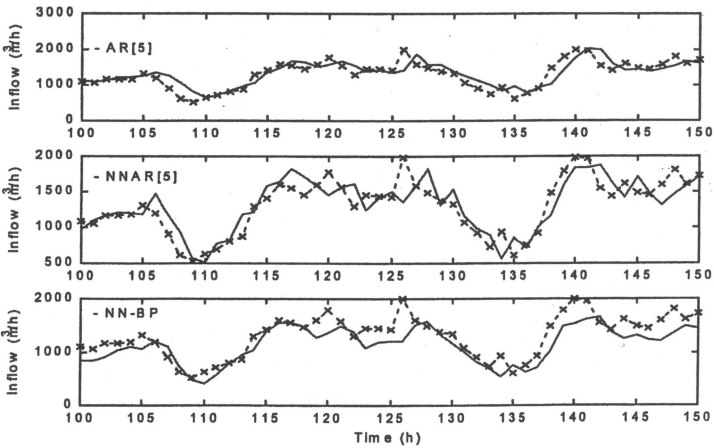
Tablica 2. Wyniki kalibracji dla osadników wstępnych, komór napowietrzania i osadników wtórnych.

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

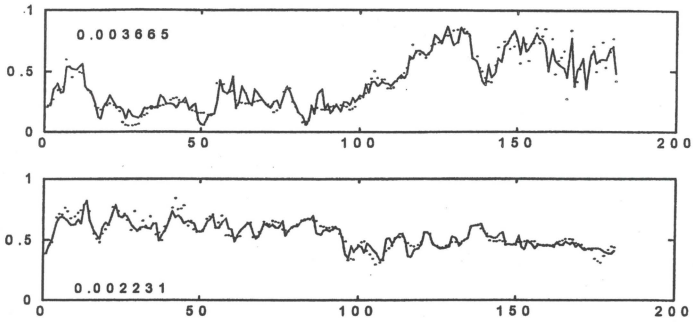
Opracowany model sterowania jest także w postaci sieci neuronowej. Do jego wyznaczenia użyto danych mierzonych w czterech następujących punktach oczyszczalni: dopływ ścieków surowych, komory napowietrzania, układ recyrkulacji zewnętrznej i odpływ ścieków oczyszczonych. Mierzono następujące wielkości: BZT (biologiczne zapotrzebowanie tlenu), stężenie azotu i zawiesiny w dopływie ścieków do oczyszczalni oraz natężenie dopływu (4 parametry wejściowe); stężenie tlenu (parametr sterujący) i osadu czynnego oraz opadalność osadu w komorach napowietrzania (dwa parametry wyjściowe); stopień recyrkulacji (parametr sterujący) i stężenie osadu recyrkulowanego w układzie recyrkulacji zewnętrznej (parametr wyjściowy); BZT, stężenie azotu i zawiesiny w odpływie z oczyszczalni (trzy parametry wyjściowe).



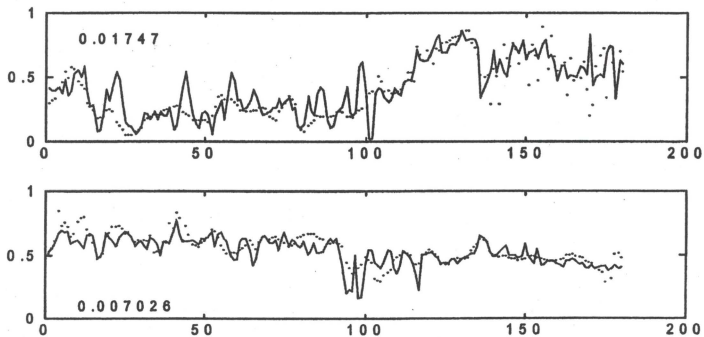
Rys. 4. Wyniki modelowania dla modelu ARMA (wykres górny) i dla dwóch modeli neuronowych (linia przerywana oznacza pomiary).



Rys. 5. Wyniki prognozowania dla modelu ARMA (wykres górny) i dla dwóch modeli neuronowych.



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



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

Badany proces jest nieliniowy i dlatego model neuronowy musi uwzględniać nieliniowości procesu. Jest to możliwe w przypadku sieci neuronowej typu BP z nieliniowymi funkcjami przejścia. Jako strukturę modelu przyjęto sieć z trzema warstwami, przy czym funkcje przejścia między warstwą pierwszą i drugą są nieliniowymi funkcjami logistycznymi, natomiast funkcje przejścia do warstwy trzeciej są funkcjami liniowymi tożsamościowymi. Model sterowania jest pomyślany jako narzędzie wspomagania procesu podejmowania decyzji przez operatora oczyszczalni. Jako parametry wejściowe sieci neuronowej stosuje się parametry wejścia obiektu w chwili t , parametry wyjścia obiektu w chwili t oraz parametry wyjścia obiektu w chwili $t+T$. Parametry sterujące obiektu w chwili t są traktowane jako wyjścia sieci neuronowej. W strukturze sieci uwzględniono więc 16 neuronów na warstwie

wejściowej i 2 neurony na warstwie wyjściowej. Wyniki obliczeń otrzymane dla modelu sterowania są pokazane na rys. 6 i 7.

Uwagi końcowe

Przedstawiono obiekty miejskiej gospodarki wodno-ściekowej, stanowiące elementy planowanego systemu wspomaganie decyzji. W systemie tym kluczową rolę mają modele prognozujące obciążenie sieci wodociągowej, ponieważ to obciążenie wpływa na pracę pomp w stacjach poboru wody, wpływa na obciążenie sieci kanalizacyjnej i w konsekwencji na pracę oczyszczalni ścieków. Właściwe przewidywanie obciążenia sieci wodociągowej pozwoli zminimalizować zużycie energii elektrycznej w całym systemie gospodarki wodno-ściekowej, przy czym do wyznaczenia odpowiednich algorytmów sterowania są niezbędne modele matematyczne każdego z obiektów. W przypadku sieci wodociągowej i oczyszczalni ścieków modele takie zostały już opracowane i skalibrowane dla danych pomiarowych z MPWiK w Rzeszowie, natomiast modelowanie stacji poboru wody oraz sieci kanalizacyjnej wymaga dopiero badań. Jednak są znane prace na ten temat prowadzone w innych ośrodkach i jest możliwa współpraca z tymi ośrodkami. Koncepcja zintegrowanego systemu komputerowego do zarządzania miejską gospodarką wodno-ściekową wydaje się użyteczna i ciekawa ze względów badawczych, dlatego planuje się prowadzenie takich prac w Instytucie Badań Systemowych.

Literatura

- Wanner O., Kapler J., Gujer W. (1991): Calibration of an activated sludge model based on human expertise and on a mathematical optimisation technique. A comparison. *Water Science Technology*, vol. 25, p.141.
- 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.
- Studzinski J., Tesche T., Bogdan L. (1998): Sewage treatment process modelling with neural networks for forecasting and control. *Proceedings of ESS'98*, Eds. A. Bargiela and E. Kerckhoffs, SCS Publication, Nottingham, pp. 633-637.
- Wedel K. (1998) Zur mehrkriterialen Optimierung fuer die Planung von Abwassernetzen. *Materiały Sympozjum nt. Monitoringu i Automatyzacji Oczyszczalni Ścieków*. Red. J. F. Lemański, J. Łomotowski, S. Zabawa, AR Wrocław, str. 15.
- Bogdan L., Lomotowski J., Nahorski Z., Studzinski J., Szetela R. (2000): Mathematical and neural modelling and its calibration of a wastewater treatment plant. *Archives of Control Sciences*, Vol. 10, No. 1-2, pp. 89-118.
- Studzinski J., Bogdan L., Kaczmarska D. (2001) System komputerowy wspomaganie decyzji operatora sieci wodociągowej w wodociągach rzeszowskich. W: *Rozwój i Zastosowania Technologii i Systemów Informatycznych*. Red. J. Studzinski, L. Drelichowski, O. Hryniewicz, PAN IBS Warszawa, Seria Badania Systemowe, t. 28, str. 328-335.
- Studzinski J. (2002) Raport końcowy z realizacji projektu badawczego pn. Optymalizacja i sterowanie procesu technologicznego w mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków na podstawie modeli matematycznych. IBS PAN, Warszawa.
- Waterworth G. (2002) Efficiency modelling in the cost reduction of water pump maintenance. *Proceedings of QRM'2002*, Ed. G. J. McNulty, PEP London, pp. 141-144.

