



POLSKA AKADEMIA NAUK
Instytut Badań Systemowych

BADANIA SYSTEMOWE
Inżynieria Środowiska

**KOMPUTEROWA SYMULACJA
I OPTYMALIZACJA MODELU
OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW**

Marcin Stachura

Warszawa 2008



**KOMPUTEROWA SYMULACJA
I OPTYMALIZACJA MODELU
OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW**

**POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT BADAŃ SYSTEMOWYCH**

Seria: BADANIA SYSTEMOWE, tom 59

Redaktor naukowy: prof. Jakub Gutenbaum

Podseria: Inżynieria Środowiska

Warszawa 2008

**KOMPUTEROWA SYMULACJA
I OPTYMALIZACJA MODELU
OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW**

Marcin Stachura

Publikacja wydana ze środków projektu badawczego MINISTERSTWA NAUKI i SZKOLNICTWA WYŻSZEGO: nr R11 001 01.

W pracy omówiono sposób konstruowania modelu matematycznego dla oczyszczalni ścieków z osadem czynnym z wykorzystaniem bilansowych równań różniczkowych zwyczajnych, wynikających z zasad zachowania masy i podstawowych zależności kinetycznych i stechiometrycznych zachodzących przemian i procesów fizycznych w obiektach technicznych oczyszczalni. Równania różniczkowe opisują dynamikę procesu a występujące w równaniach współczynniki mają interpretację fizyczną. Koncepcja przedstawionego sposobu konstrukcji modelu matematycznego polega na opracowaniu modelu mogącego być pożytecznym narzędziem wspomagającym pracę operatora procesu technologicznego. Wobec tego opracowywany model opisuje konkretną i ograniczoną grupę obiektów a proces modelowania uwzględnia również kalibrację modelu na podstawie rzeczywistych pomiarów. Dzięki takiemu podejściu utworzony model matematyczny staje się przybliżeniem konkretnego obiektu i może być użyty do jego badania, co jest niewątpliwie celem nadrzędnym modelowania matematycznego. Praca ma również na celu prezentację techniki */fast--prototyping/*, czyli szybkiego prototypowania przy pomocy komputera wielowymiarowych procesów przemysłowych na przykładzie procesów zachodzących w mechaniczno--biologicznych oczyszczalniach ścieków. Pod pojęciem modelowania w pracy rozumie się zespół czynności obejmujących takie zagadnienia, jak: opracowanie modelu procesu w postaci układu równań różniczkowych (model fizyczny), implementację modelu w odpowiednim algorytmie komputerowym, kalibrację wraz z optymalizacją nieznanymi współczynników występujących w równaniach opisujących proces oraz analizę otrzymanych wyników.

Recenzenci:

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Janiszowski
Dr hab. inż. Janusz Łomotowski

Semi
Bibl. podręczna

45905

Komputerowa edycja tekstu: Anna Gostyńska

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 2008

Instytut Badań Systemowych PAN
Newelska 6, PL 01-447 Warsaw

Sekcja Informacji Naukowej i Wydawnictw IBS PAN
e-mail: biblioteka@ibspan.waw.pl

ISBN 978-83-89475-15-2

ISSN 0208-8029

Druk i oprawa: ARTPRESS, tel. 052 354 95 10

1. Wstęp

Oczyszczanie ścieków miejskich jest, szczególnie w dużych aglomeracjach, jednym z zasadniczych zagadnień dotyczących ochrony środowiska. Optymalizacja pracy oczyszczalni w celu uzyskania odpowiednich (tj. nie przekraczających dopuszczalnych norm) parametrów ścieków oczyszczonych jest zasadniczym czynnikiem wpływającym na stan czystości wód powierzchniowych.

Dzięki szybkiemu rozwojowi technik komputerowych możliwa jest optymalizacja działania rzeczywistych obiektów bazując na ich modelach matematycznych (fizykalnych, parametrycznych lub innych), oraz zaimplementowanych algorytmach komputerowych. Podejście takie daje wymierne korzyści w postaci oszczędności czasu oraz nakładów finansowych przy poprawianiu pracy zespołów technologicznych, szczególnie dla obiektów o złożonej strukturze. Kolejną zaletą korzystania z komputerowych modeli procesów technologicznych jest możliwość analizy zachowań procesu w przypadku wystąpienia różnego typu sytuacji awaryjnych.

Pierwszy kompleksowy model procesów zachodzących w oczyszczalni ścieków został opracowany w 1987 roku. Nosi on nazwę ASM1 (ang. *Activated Sludge Model*) (Henze i in., 2000). Umożliwia on modelowanie procesów usuwania związków organicznych i azotu podczas oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego (Hartmann, 1996). Model ASM1 uwzględnia 13 frakcji ścieków i biomasy osadu czynnego (7 rozpuszczonych oraz 6 w postaci zawiesiny), które ulegają przemianom pod wpływem 8 procesów biochemicznych. W modelu tym występuje łącznie 19 współczynników kinetycznych (określających szybkość zachodzenia reakcji biochemicznych) i stechiometrycznych (określających ilościowe powiązania pomiędzy komponentami).

Rozwój technologii biologicznego oczyszczania ścieków pozwolił na efektywne wykorzystanie mikroorganizmów w celu usuwania związków fosforu. Koniecznym stało się uzupełnienie opisu przemian fosforu w modelu ASM1. W ten sposób rozwinięto model biologicznego usuwania ze ścieków związków węgla, azotu i fosforu i nadano mu nazwę ASM2d. (Henze i in., 2000).

Alternatywnym rozwinięciem modelu ASM1 jest opracowany w 1999 roku model ASM3. Usuwa on pewne niedociągnięcia, które pojawiły się w trakcie kilkunastu lat doświadczeń ze stosowaniem modelu ASM1. Jak dotąd, model ASM3 został sprawdzony w wąskim zakresie badań laboratoryjnych oraz technicznych (Henze i in., 2000). Model uwzględnia 13 frakcji ścieków i biomasy osadu czynnego, które ulegają przemianom pod wpływem 12 procesów biochemicznych. W modelu występuje 21 współczynników kinetycznych i 15 współczynników stechiometrycznych. Jak podkreślają autorzy modelu ASM3, nie jest to finalna wersja procesów z osadem

czynnym i podobnie jak model ASM1 będzie on nadal rozwijany. Należy również zaznaczyć, iż ze względu na duże zróżnicowanie charakteru pracy oczyszczalni ścieków (podyktowane różnym składem ścieków napływających) należy traktować modele typu ASM jako pewną bazę, którą należy uzupełniać o elementy charakterystyczne dla szczególnego obiektu.

Symulatory procesu oczyszczania ścieków (wraz z synoptyką) są często wykorzystane do szkolenia operatorów. Takie zastosowanie modelu procesu prowadzi do zmniejszenia ilości błędnych decyzji operatora, które prowadzą na ogół do zaburzenia przebiegu procesu technologicznego.

Głównymi celami pracy było sprawdzenie możliwości wykorzystania modelu ASM1 do badania procesu i optymalizacji jego modelu w oparciu o wyniki badań uzyskanych na czynnym obiekcie technicznym.

W pracy omówiony sposób konstruowania modelu matematycznego dla oczyszczalni z osadem czynnym z wykorzystaniem bilansowych równań różniczkowych zwyczajnych, wynikających z zasad zachowania masy i podstawowych zależności kinetycznych i stechiometrycznych zachodzących przemian i procesów fizycznych w obiektach technicznych oczyszczalni. Równania różniczkowe opisują dynamikę procesu a występujące w równaniach współczynniki mają interpretację fizyczną, dlatego model taki nazywany jest *fizycznym* lub *fenomenologicznym*.

Koncepcja przedstawionego w pracy sposobu konstrukcji modelu polega nie na tworzeniu ogólnego i uniwersalnego modelu o charakterze akademickim, a na opracowaniu modelu mogącego być pożytecznym narzędziem wspomagającym pracę operatora procesu technologicznego. Wobec tego opracowywany model powinien opisywać konkretną i ograniczoną grupę obiektów, a proces modelowania powinien uwzględniać również kalibrację modelu na podstawie rzeczywistych pomiarów. Dzięki takiemu podejściu utworzony model matematyczny może stać się przybliżeniem konkretnego obiektu i może być użyty do jego badania, co jest niewątpliwie celem nadrzędnym modelowania matematycznego.

Praca ta ma również na celu prezentację techniki *fast-prototyping*, czyli szybkiego prototypowania przy pomocy komputera wielowymiarowych procesów przemysłowych na przykładzie procesów zachodzących w mechaniczno-biologicznych oczyszczalniach ścieków. Pod pojęciem modelowania w niniejszej pracy rozumie się zespół czynności obejmujących takie zagadnienia, jak: opracowanie modelu procesu w postaci układu równań różniczkowych (model fizyczny), implementację modelu w odpowiednim algorytmie komputerowym, kalibrację wraz z optymalizacją nieznanymi współczynnikami występujących w równaniach opisujących proces oraz analizę otrzymanych wyników.

Istotnym elementem prezentowanego podejścia jest możliwość użycia odpowiedniego pakietu programowego pozwalającego prowadzić symulacje komputerowe wybranego procesu. W niniejszej pracy wykorzystano system zaawansowanego

monitorowania i diagnostyki *AMandD*, a w szczególności jego moduł obliczeniowy *PExSim (Process Explorer and Simulator)*, opracowany w Instytucie Automatyki i Robotyki Politechniki Warszawskiej. Ogromną zaletą wybranego środowiska jest możliwość, poza wykonaniem akademickiego modelu działającego w trybie *off-line*, zastosowania opracowanego modelu w trybie *on-line*, działającego jako element nadrzędnego systemu monitorowania procesu.

W pracy przedstawiono między innymi strukturę oraz możliwości zastosowanych pakietów programowych oraz sposób implementacji modeli procesu. Modele te opisane są układami równań różniczkowych zwyczajnych 1-szego rzędu.

Pierwsza część pracy zawiera opis procesu mechaniczno-biologicznego oczyszczania ścieków oraz skrótową prezentację równań opisujących poszczególne elementy technologiczne. Następnie zaprezentowane zostały użyte pakiety programowe wchodzące w skład systemu *AMandD (PExSim, MITforRD, InView)* oraz sposób modułowej implementacji modelu procesu w tych pakietach.

Następnie przedstawiono sposób dopasowania modelu, tj. wyznaczenia współczynników występujących w równaniach opisujących poszczególne procesy oczyszczania ścieków. Wyznaczanie to wykonane zostało dwustopniowo: w pierwszym przybliżeniu wyznaczono zgrubnie współczynniki metodą ręcznego strojenia wybranych współczynników. Następnie, znając zgrubnie estymowane współczynniki, zastosowano algorytmy *optymalizacji*, tzn. doboru wybranych współczynników w sposób automatyczny. W niniejszej pracy postanowiono, oprócz pojęcia *optymalizacji modelu* rozumianego jako zadanie dopasowania współczynników w równaniach opisujących proces, wprowadzić pojęcie *optymalizacji struktury modelu*, polegającej na modyfikacji w modelu liczby zaproponowanych komór zbiorników technologicznych.

Zastosowane algorytmy optymalizacji zostały szczegółowo opisane oraz, tam gdzie było to niezbędne, skróto przedstawiono zasadę ich działania. W opisie poszczególnych metod nie zawarto dowodów zbieżności algorytmów oraz szczegółowych wyprowadzeń zależności matematycznych, które są dostępne w literaturze.

W ostatniej części pracy przedstawiono wyniki modelowania omawianego procesu wraz z analizą zastosowanych algorytmów optymalizacji oraz uzyskanych dokładności modelu.

Należy zaznaczyć, iż w Polsce od kilkunastu lat podejmowane były badania mające na celu opracowanie symulacyjnych modeli dynamiki procesów oczyszczania ścieków. Pionierem tych prac był R. Szetela, którego prace obejmowały również opracowanie programów komputerowych pozwalających na praktyczne wykorzystanie modeli (Szetela, 1990).

Praca wykonana została z merytoryczną pomocą Instytutu Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk, gdzie badania nad modelowaniem procesów oczyszczania ścieków prowadzone są od początku lat 90. ubiegłego wieku (Studziński, 2004).

Prezentowany w pracy model opiera się na równaniach opracowanych przez Sztefę (1990) i rozwijanych następnie przez Studzińskiego (2004). Oryginalnym podejściem jest automatyzacja procesu modelowania za pomocą systemu *AMandD* oraz automatyczna identyfikacja parametrów i optymalizacja struktury modelu za pomocą metod optymalizacji statycznej.

W pracy wykorzystano wyniki badań przeprowadzonych na oczyszczalni ścieków w Rzeszowie w latach 1990-tych w ramach projektu celowego KBN nr 4 1064 93 C/1161 pn. *System komputerowego wspomagania decyzji technologicznych w miejskiej oczyszczalni mechaniczno-biologicznej w Rzeszowie*. Oczyszczalnia w Rzeszowie w tym okresie miała przepustowość 62 000 m³/d a jej uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 2.1.

IBS PAN *Sená*

45905

Bibl. podręczna

ISBN 978-83-89475-15-2

ISSN 0208-8029
