Seria : AUPOMATYKA E. 79

Nr kol-848

Mieczysław EEFZGER Instytut Automatyki Politechnika Śląska

CYFROWA SYMULACJA PROCESU BIOLOGICZNEGO OCZYSZCZANIA ŚCIERÓW JAKO OBIEKTU STEROWANIA

<u>Streszczenie.</u> W pracy przedstawiono i uzasadniono wybór uproszczonego, dla potrzeb sterowania, modelu matematycznego procesu biologicznego oczyszczania ścieków. Przedstawiono wyniki badań symlacyjnych procesu traktowanego jako obiekt sterowania. Analizę włas ności dynamicznych procesu zakończono wnioskami dotyczącymi możli wości oddziaływania na proces.

#### 1. WPROWADZENIE.

Proces bio logicznego oczyszczania ścieków należy do tego rodzaju procesów, które mogą funkcjonować bez automatycznego sterowania. Stąd też podstawowym zagadnieniem przed próbami wprowadzenia sterowania jest odpowiedź na pytanie,czy wprowadzenie sterowania może coś w przezy aczyszczalni polepszyć. Ze względu na trudności techniczne i duże koszty eventuel nych eksperymentów w warunkach pracy oczyszczalni, analizę możliwości wprowadzenia sterowania oparto na badaniach symulacyjnych modelu.

W artykule, będącym publikacją pewnego etapu badań prowadzonych w Instytucie Automatyki, przedstawiono wyniki badań symulacyjnych procesu biologicznego oczyszczania ścieków traktowanego jako obiekt sterowania.

## 2. WYBOR MODELU MATEMATYCZNEGO PROCESU

Celem budowy modelu matematycznego procesu biologicznego oczyszczania ścieków jest odpowiedź na pytanie, czy da się wprowadzić automatyczne sterowanie tego procesu i za pomocą jakich struktur sterowania. W pracach [1,2] zaproponowano złożony model matematyczny procesu biologicznego oczyszczania ścieków. Na rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat procesu zaznaczając uwzględnione w modelu zmienne procesowe.

Proponowany w [1,2] model matematyczny uwzględnia dwa zbiorniki napowietrzające, dwa składniki substratu i trzy składniki osadu. Kinetyka reakcji biochemicznej uwzględnia zarówno ograniczenie od stężenia substratu, jak i ograniczenie od stężenia tlemu. Istotne znaczenie dla tego modelu ma oryginelny opis matematyczny osadnika [1, 2]. W ramach pracy [3] uruchomiono programy obliczeniowe dla statyki i symulacji procesu, na pods-



## Rys. 1. Uproszczony schemat procesu

tawie modelu złożonego oraz pięciu modeli uproszczonych. Wyniki i wnioski z porównania przydatności tych modeli przedstawiono dokładniej w [3]. Dla analizy specyficznych dla procesu efektów np. możliwości występowania ekstremów na charakterystykach statycznych [3,4] lub nieminimalnofazowości [3,4] należy wykorzystać modele bardziej złożone . Jednakże dla celów analizy własności regulacyjnych procesu przyjmujemy model bardziej upro szczony .

Przyjęty dla badań symulacyjnych model matematyczny procesu uwzględnia jeden substrat S - określony przez EZT5, jeden składnik osadu X - osad czynny oraz jeden zbiornik papowietrzający. Model ten jest więc podobny do spotykanych w literaturze mp. [5,6,7]. Pozostałe składniki osadu i substratu pominięto, ponieważ ich przebiegi dynamiczne są podobne do uwzględnionych w modelu [3],a i tak trudności pomiarowe nie wymagają konieczności ich uwzględniania.

Przedstawione w pracy [3] przebiegi potwierdzają konieczność uwzględ – nienia w kinetyce reakcji biochemicznej ograniczenia od tlemu. W tym więc zakresie przyjęty tu model jest rozszerzony w stosunku do przedstawio – nych w literaturze. W pracach [5,6,7,8], będących podstawowymi pracami z dziedziny modelowania i symulacji tego procesu, ich autorzy pomijają ograniczenie od tlemu zakładając, że dostarczana jest go wystarczająca ilość, a stężenie tlemu uwzględniają tylko w bilensie zużycia tlemu.

Jeśli proces, dla którego choeny przeprowadzić badania symulacyjne składa się z dwu osobnych zbiorników napowietrzających, a wielkości na wyjściu pierwszego z nich możemy mierzyć, to w modelu należy uwzględnić oczywiście dwa zbiorniki. Niestety pewna część typowych procesów nie da się jednoznacznie pod tym względem aklasyfikować. Przykładem może być gliwicki BIOOXYRLOK [1]. Many tam do czynienia z jednym zbiornikiem po -

120

Cyfrowa symulacja procesu...



Rys. 3. Przebiegi odpowiedzi procesu na wymuszenie V = 52.5 + 10.5 4(t)

121

M. Metzger



Rys. 4. Przebiegi odpowiedzi procesu na wyzuszenie  $V_n^{\alpha} = 1 + 1(t)$ 

uwzględniający zarówno jeden zbiornik,jak i dwa zbiorniki . W praosch [1,2,3] uwzględniono alternatywnie obie te możliwości . Dla celów badań symulacyjnych przyjmujemy model uwzględniający jeden zbiornik.

Wybór modelu matematycznego dla celów symulacji potwierdzają przebiegi przedstawione na rys. 1,2,3,4. Na rysunkach tych przedstawiono porównanie przebiegów odpowiedzi na wymuszenia skokowe  $V_g, V_r^*, V_n^*$  otrzymanych na podstawie modelu najbardziej rozbudowanego [1,2] (2 substraty, 3 składniki osadu i 2 zbiorniki) oraz na podstawie modelu uproszczonego .

Można zauważyć, że pomijając niewielką różnicę w doborze punktu pracy, otrzymujemy prawie identyczne przebiegi odpowiadających sobie wielkości. Nie można oczywiście na tej podstawie twierdzić, że oba te modele są równoważne, ale można postawić tezę, że dla badań symulacyjnych model uproszczony reprezentuje podstawowe oddziaływania dynamiczne w sposób prawie identyczny jak model rozbudowany .

3. MODEL MATEMATYCZNY PROCESU

Model symulacyjny procesu ma następującą postać:

$$\frac{dS_{\overline{vyy}}}{dt} = \frac{\nabla_{g}^{\sharp} + \nabla_{r}^{\sharp}}{V_{1}} \left(S_{we} - S_{wy}\right) - \frac{1}{Y} M$$

(1)

Cyfrowa symulacja procesu...

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{X}_{wy}}{\mathrm{d}\mathbf{t}} = \frac{\mathbf{V}_{g}^{*} + \mathbf{V}_{r}^{*}}{\mathbf{V}_{1}} \left(\mathbf{X}_{we} - \mathbf{X}_{wy}\right) + \mathbf{W} - \mathbf{k}_{do} \mathbf{X}_{wy}$$
(2)

$$\frac{^{1}dO_{wy}}{dt} = \frac{\nabla_{B}^{*} + \nabla_{T}^{*}}{\nabla_{1}} \left(O_{we} - O_{wy}\right) + \frac{(k\nabla)}{\nabla_{1}} \left(O_{wy}^{*} - O_{wy}\right) - \frac{1}{\Sigma_{0}} H - 1.1 k_{do} X_{wy} (3)$$

$$\frac{\mathrm{d}G_{\mathbf{x}}}{\mathrm{d}\mathbf{t}} = (\nabla_{\mathbf{g}}^{\mathbf{*}} + \nabla_{\mathbf{r}}^{\mathbf{*}})\mathbf{X}_{\mathbf{w}\mathbf{y}} - (\nabla_{\mathbf{g}}^{\mathbf{*}} - \nabla_{\mathbf{n}}^{\mathbf{*}})\mathbf{X}_{\mathbf{k}} - (\nabla_{\mathbf{r}}^{\mathbf{*}} + \nabla_{\mathbf{n}}^{\mathbf{*}})\mathbf{X}_{\mathbf{r}}$$
(i4)

$$M = \mu_{\max} \frac{S_{wy}}{S_{wy} + K_{g}} \frac{O_{wy}}{O_{wy} + K_{g}} X_{wy}$$
(5)

$$S_{we} = \frac{\nabla_{g}^{*}}{\nabla_{g}^{*} + \nabla_{r}^{*}} S_{g} + \frac{\nabla_{r}^{*}}{\nabla_{g}^{*} + \nabla_{r}^{*}} S_{wy}$$
(6)

$$X_{we} = \frac{V_{r}}{V_{s}^{*} + V_{r}^{*}} X_{r}$$
(7)  
$$X_{r} = k G_{x}$$
(8)

$$\mathbf{X}_{\mathbf{k}} = \mathbf{k}_{1} \left( \mathbf{v}_{\mathbf{s}}^{*} - \mathbf{v}_{\mathbf{n}}^{*} \right) \mathbf{X}_{\mathbf{w}\mathbf{y}}$$
(9)

W stosunku do spotykanych w literaturze modeli dla potrzeb symulacji procesu [5,6,7,8] zaproponowany tu model (będący jedną z wersji modelu zaproponowanego w [1,2]) ma następujące oryginalne elementy:

- uwzględnia się ograniczenie od tlemu w równaniu (5). Opis matematyczny ograniczenia od tlemu przyjęto na podstawie prac dotyczących kinetyki reakcji redukcji zanieczyszczeń [9,10].
- zaproponowany w [1,2] opis matematyczny osadnika w postaci równań (4),
  (8),(9). Dokładne uzasadnienie przedstawiono w [1,2].

Dla celów identyfikacji oraz określenia punktu pracy procesu: uruchomiono program rozwiązujący równamia modelu w stanie ustalonym .

Drogą identyfikacji parametrycznej oraz na podstawie danych projektowych określono następujący punkt pracy procesu (Dane dla BIOOXYELORU): Dane w punkcie pracy :

 $\nabla_{g}^{*} = 175 , \quad \nabla_{r}^{*} = 52.5 , \quad \nabla_{n}^{*} = 1 , \quad S_{g} = 300 , \\ \mathcal{M}_{max} = 0.1 , \quad K_{g} = 150 , \\ \Upsilon = 0.5 , \quad k_{do} = 0.005 , \quad \Upsilon_{o} = 1.725 , \quad K_{o} = 0.5 , \quad (kV) = 6000 , \quad \sigma_{we} = 0.5 , \\ \sigma_{wy}^{*} = 7.5 , \quad \nabla_{1} = 3210 , \quad k_{1} = 2.5 , \quad -4 , \quad k = 0.0125 .$  (10)

# Wyjścia w punkcie pracy :

 $S_{we} = 234.799$ ,  $X_{we} = 845.764$ ,  $S_{wy} = 17.4612$ ,  $X_{wy} = 891.535$ ,  $O_{wy} = 2.4154$ ,  $X_r = 3664.98$ ,  $X_k = 38.7618$ ,  $G_x = 293198$ . (11)

W pracy [3] przedstawiono ustalone wartości zmiennych procesowych również dla innych niż (10) wartości .

Badania symulacyjne oparto na numerycznym rozwiązaniu układu równań (1) do (9) korzystając z własnego pakietu symulacyjnego. Tszystkie ekspery - menty symulacyjne przeprowadzono dla punktu pracy określonego przez (10, 11).

4. ANALIZA WLASNOSCI DYNAMICZNYCH PROCESU JAKO OBIEKTU STEROWANIA

Badania symulacyjne procesu przeprowadzono w układzie jak na rys. 5. Na rysunku tym zaznaczono obserwowane w trakcie eksperymentów wyjścia oraz wymuszenia, za pomocą których oddziaływano na proces (potencjalne sterowania oraz zakłócenia).



Rys. 5. Wejścia i wyjścia procesu jako obiektu symulacji

Zakłóceniami dla procesu biologicznego oczyszczania ścieków są zmiany dopływu ścieków  $V_s^*$  oraz ich stężenie S<sub>s</sub>. Przy badaniach symulacyjnych przyjęto zmiany skokowe ( nagły wzrost dopływu ścieków może wystąpić w wyniku ich zrzutu lub w wyniku gwałtownych opadów ) oraz typowe zmiany dobowe , w przybliżeniu simusoidalne wg 'Harrisa [11]. Dla sterowań  $V_r^*$ ,  $V_n^*$ , (kV) przyjęto zmiany skokowe .

W pracy [3] przedstawiono komplet przebiegów otrzymanych w wyniku ba dań symulacyjnych procesu. Na rys. 6 do rys. 13 przedstawiono wybrane , najistotniejsze dla ostatecznych wniosków przebiegi.

Przeprowadzoną, na podstawie badań symulacyjnych procesu, analizę własności dynamicznych procesu jako obiektu sterowania można następująco skomentować .



Rys.6. Przebiegi odpowiedzi procesu na wymuszenie V = 175 + 87.5 1(t)

Cyfrowa symulacja procesu ....



Rys. 7. Przebiegi odpowiedzi procesu na wymuszenie S<sub>g</sub> = 300 + 150 **1(t)**; a. model uwzględniający ograniczenie od stężenie tlenu K<sub>o</sub> = 0.5; b. model dla K<sub>o</sub> = 0



Rys. 8. Przebiegi odpowiedzi procesu na wymuszenia V<sup>\*</sup><sub>B</sub> = 175 + 87.5 1(t) oraz<sup>5</sup>S<sub>a</sub> = 300 + 150 1(t)

- \* Dynamikę procesu można podzielić na trzy typy oddziaływań:
  - a. Oddziaływanie bardzo szybkie. Jest to odpowiedź stężenia tlemu O<sub>wy</sub> na zmianę ilości tlenu dostarczanego do zbiornika napowietrzającego (kV). Stała czasowa jest rzędu ułamka godziny (Rys. 11).
  - b. Szybka składowa odpowiedzi procesu « występuje na większości prze biegów. Jest one decydująca dla charakteru odpowiedzi na zniany sinusoidalne. Ta akładowa dynamiki charakteryzuje się stałymi czaso -







Rys. 10. Przebiegi odpowiedzi procesu na wymuszenie  $V_n^{\#} = 1 + 1(t)$ 



Rys. 11. Przebiegi odpowiedzi procesu na wymuszenie (kV) = 6000 + 3000 1(t) wymi rzędu kilku do kilkunastu godzin i wynika z pojemności zbiornika napowietrzającego i dynamiki osadnika.

c. Bardzo wolny dalszy przebieg odpowiedzi procesu na wymuszenie skokowe wynike z dynamiki wnoszonej przez dodatnie sprzężenie zwrotne poprzez recykl osadu [1,12]. Ta składowa dynaniki, choć ma istotne znaczenie dla procesu przy długich horyzontach czasowych, w stanach przejściowych ma mniejsze znaczenie. Dla przebiegów odpowiedzi na zakłócenia sinusoidalne ta składowa dynamiki jest praktycznie niewidoozna w przebiegach. Cyfrowa symulacja procesu ...



Rys. 12. Przebiegi odpowiedzi procesu na wymuszenie : S<sub>g</sub> = 300 + 150 sin 0.2618 t ; a. model uwzględniający ograniczenie od stężenia tlenu K<sub>o</sub> = 0.5 ; b. model dla K<sub>o</sub> = 0 .



Rys. 13. Przebiegi odpowiedzi procesu na zakłócenia : V<sup>#</sup> = 175 + 87.5 sin 0.2618 t oraz S<sub>g</sub> = 300 + 150 sin 0.2618(t-1)

 \* Interesująca jest interpretacja przebicgów przedstawionych na rys. 7 i rys. 12. Są to przebiegi,dla zmian skokowych i sinusoidalnych, stężenia substratu S<sub>g</sub> dla K<sub>o</sub> = 0 (brak ograniczenia prędkości reakcji od stężenia tlenu) i dla K<sub>o</sub> ≠ 0 (z ograniczeniem). W stanie ustalonym dla K<sub>o</sub> = 0 S<sub>wy</sub> jest niezależne od wielkości S<sub>g</sub>. Jednakże w stanach nieustalonych S<sub>g</sub> wpływa na S<sub>wy</sub>. Oczywiście dla K<sub>o</sub> ≠ 0 wpływ ten jest silniejszy.

- Oddziaływanie (kV) na O<sub>vy</sub> ma korzystny z punktu widzenia sterowania charakter dynamiki mała stała czasowa i silne oddziaływanie mogące skompensować wpływ zakłóceń. Regulacja stężenia Owy z oddziaływaniem na (kV) nie powinne stenowić problemu z punktu widzenie dynemiki.

 Oddziaływanie na proces za pomocą zmian V<sup>#</sup><sub>r</sub> i V<sup>\*</sup><sub>n</sub> jest znacznie słab-sze od oddziaływania na proces od strony zakłóceń V<sup>\*</sup><sub>s</sub> i S<sub>s</sub> (przy tej samej wielkości wymuszeń). Wydaje się, że z góry można wykluczyć możliwość ustabilizowania stężenia wyjściowego Swy za pomocą sterowania z oddziaływaniem na przepływy V i V . Te trudności wynikają z nieliniovości procesu. Można jedynie przypuszczać, że sterowanie może wpływ za kłóceń w pewnym stopniu zmniejszyć .

\* Porównanie przebiegów wpływu zmian V i V na stężenie osedu X wy oraz

ilość osadu w osadniku G\_; pozwala postawić tezę, że te dwie wielkości można ustabilizować za pomocą sterowania z oddziaływaniem na V i V

## 5. KOMENTAHZ KONCOWY

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych procesu biologicznego oczyszczania ścieków jako obiektu sterowania. Eksperymenty symulacyjne przeprowadzono na modelu matematycznym procesu wykorzystując rozwiązanie mmeryczne równań różniczkowych zwyczajnych modelu.

Przeprowadzone eksperymonty symulacyjne pozwalają stwierdzić, że proces charakteryzuje się trudną, z punktu widzenia sterowanie dynamiką ( wyjątek stanowi oddziaływanie zmian dopływu powietrza do zbiornika napowietrzającego (kV) na stężenie tlemu w zbiorniku Owy ). Z przedstawionych w pracy przebiegów symulacyjnych wynika, że można przewidywać istotna kompensację wpływu zmian zakłóceń V i S na wielkości X<sub>k</sub> oraz G<sub>x</sub> pomoog jukładów sterowania z oddziaływaniem na V lub V.

Możliwość ustabilizowania stężenia substratu w oczyszczonej wodzie Swy za pomocą układów sterowania z oddziaływaniem na V rub V można z góry wykluczyć, choć można przypuszczać, że zastosowanie takiego sterowania może w pewnym stopniu wpływ zakłóceń zmniejszyć .

### 6. OZNACZENIA

Va, Vr, Vn - przepływy w [m<sup>3</sup>/h] E<sub>s</sub>, S<sub>ww</sub>, B<sub>we</sub> - stężenie substratu w [g BZT5 / m<sup>3</sup>] Xwe, Xwy, Xr, Xk - stężenie osadu aktywnego w [g s.m.o. / m<sup>3</sup>] O<sub>wo</sub>, O<sub>ww</sub> - stężenie rozpuszczonego tlenu w [g O<sub>2</sub> / m<sup>3</sup>] G\_ - masa osadu czynnego w osadniku w[g] max - maksymalna prędkość redukcji substratu w [h<sup>-1</sup>] K<sub>a</sub> - stężenie substratu przy połowie maksymalnej prędkości redukcji substratu w [g BZT5 / m<sup>3</sup>]

#### Cyfrowa symulacja procesu ...

Y - stała wzrostu masy osadu czynnego w [g s.m.o. / g B2T5] k<sub>do</sub> - stała endogennej respiracji osadu czynnego w [h<sup>-1</sup>] Y<sub>o</sub> - współczynnik zużycia tlenu w [g s.m.o. / g O<sub>2</sub>] K<sub>o</sub> - stężenie tlenu rozpuszczonego w ściekach przy połowie maksymalnej prędkości redukcji substratu w [g O<sub>2</sub> / m<sup>3</sup>] (kV) - rzeczywista zdolność napowietrzania w [g O<sub>2</sub> / h] O<sup>#</sup><sub>wy</sub> - stężenie nasycenia tlenu w [g O<sub>2</sub> / m<sup>3</sup>] V<sub>1</sub> - objętość reaktora napowietrzającego w [m<sup>3</sup>] k<sub>1</sub>, k - współczynniki w modelu matematycznym t - czas w [h]

- LITERATURA

- Kuźnik J., Metzger M., Moszczyński M.: Modele i algorytmy sterowania procesami oczyszczania ścieków. Etap II, Inst. Aut., 1983, niepubl.
- [2] Kuźnik J.: Model matematyczny biologicznej oczyszczalni ścieków . Zesz. Nauk. Pol. Śl., seria Automatyka, 1985 .
- [3] Kuźnik J., Metzger M.: Modele i algorytmy sterowania procesami oczyszczania ścieków, Etap III, Inst. Aut., 1984, niepublikowane.
- Kuźnik J.: O możliwości wystąpienia ekstremów i nieminimalnofazowości w charakterystykach biologicznej oczyszczalni ścieków. Zesz. Nauk. Pol. Śl., seria Automatyka, 1985.
- [5] Angelbeck D.I, Shah Alam A.B.: Simulation studies on optimization of the activated sludge process. JWPCF, 1978/1.
- [6] Attir U., Denn M.M.: Dynamic and control of the activated sludge wasterwater process. AICHE Journal, 1978/4.
- [7] Ko K., McInnis B.C., Goodwin G.C.: Adeptive control and Identifica tion of the dissolved oxygen process. Automatica, 1982/6.
- [8] Busby J.B., Andrews J.F: Dynamic modeling and control strategies for the activated sludge process. JWPCF, 1975/5.
- [9] Ryder, Sinclair: Model for the growth of the aerobic microorganisme under oxygen limiting conditions. Biotechn. Bioeng., 1972, s.787,793.
- [10] Moser A.: Fehlerquellen der Parameterabschätzung von mathematischen Modellen der Prozesskinetik. GWF - Wasser - Abwasser, 1978/5.
- [11] Harris C.J.: Modeling, simulation and control of stochastic system with application in wasterwater treatment. UMIST Control System Centre Rept. No 329, 1976.
- [12] Metzger M.: Wpływ recyklu w procesie biologicznego oczyszczania ścieków na jego własności dynamiczne - w przygotowaniu .

DIGITAL SIMULATION OF THE ACTIVATED WASTERWATER SLUDGE PROCESS

Summary

In the paper the special simplified, for the simulation use, mathematical model of the activated wasterwater sludge process has been chosen. The results of the simulation experiments for this process, treated as a control plant, have been presented. The dynamical properties analysis has been finished with conclusions.

# ИМИТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СБРОСОВ КАК ОБЪЕЖТА УПРАВЛЕНИЯ

### Резрме

В работе представлен способ выбора и обоснована управляющая модель. для нужд имитирования модели процесса биологической очистки сбросов. Показаны результаты машинных исследований процесса, принимаемого в качестве объекта управления. Анализ динамических свойств процесса окончен выводами, касающимися возможности воздействия на процесс.

there and you transfer the start and a rated