

**Robert PIOTROWSKI, Adam ZAWADZKI**

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

## Nieliniowy kaskadowy algorytm sterowania stężeniem tlenu w biologicznej oczyszczalni ścieków

Dr inż. Robert PIOTROWSKI

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek: Automatyka i Robotyka) (2001r.). W roku 2005 uzyskał stopień doktora (Automatyka i Robotyka). Obecnie adiunkt w Katedrze Inżynierii Systemów Sterowania. Zainteresowania naukowe dotyczą modelowania i zaawansowanych metod sterowania procesami przemysłowymi.



e-mail: r.piotrowski@eia.pg.gda.pl

Mgr inż. Adam ZAWADZKI

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek: Automatyka i Robotyka) (2012r.). Obecnie pracownik działu konstrukcyjnego. Zainteresowania naukowe dotyczą projektowania, funkcjonowania i utrzymania linii produkcyjnych oraz instalacji elektrycznych.



e-mail: zawadzki\_adam@o2.pl

### Streszczenie

Biologiczna oczyszczalnia ścieków jest złożonym nieliniowym systemem sterowania. Jednym z istotnych i kosztownych procesów tam zachodzących jest napowietrzanie ścieków. Prawidłowy jego przebieg ma decydujący wpływ na stopień oczyszczenia ścieków i koszty operacyjne pracy oczyszczalni. W związku z tym prowadzone są prace badawcze nad nowymi strukturami i algorytmami sterowania. Powinny się one odznaczać wysoką efektywnością i niewielkim zapotrzebowaniem na energię elektryczną. W artykule zaprojektowano kaskadowy układ sterowania stężeniem tlenu uwzględniający instalację napowietrzającą jako system dostarczający powietrze do oczyszczalni ścieków. W badaniach symulacyjnych przedstawiono wyniki sterowania dla biologicznej oczyszczalni ścieków w Nowym Dworze Gdańskim.

**Słowa kluczowe:** modelowanie matematyczne, systemy dynamiczne, systemy nieliniowe, sterowanie kaskadowe, stężenie tlenu, napowietrzanie, biologiczna oczyszczalnia ścieków.

### A nonlinear cascade control algorithm for dissolved oxygen control at a biological wastewater plant

#### Abstract

A biological wastewater treatment plant is a complex, nonlinear control system. Aeration is one of the most important and expensive processes conducted in it. Its valid flow has a deciding impact on the level of wastewater purification. Therefore a number of research are carried out to develop new control structures and algorithms. They should be characterized by high efficiency and low energy consumption. In the paper a novel cascade control strategy of dissolved oxygen is employed. It considers the aeration system as a source of the oxygen to the plant. Simulation tests present control results for the case study of the wastewater treatment plant located at Nowy Dwór Gdański. The paper is divided into 4 sections. Section 1 contains a short introduction to the main issues of research. The structure and models of the wastewater treatment plant at Nowy Dwór Gdanski and the aeration system are described in Section 2. Section 3 presents a nonlinear cascade control algorithm. The simulation results and analysis are described in Section 4. Section 5 concludes the paper.

**Keywords:** mathematical modeling, dynamic systems, nonlinear systems, cascade control, dissolved oxygen, aeration, biological wastewater treatment.

## 1. Wprowadzenie

Oczyszczanie ścieków opiera się na złożonych procesach fizycznych, biologicznych i chemicznych. Dodatkowo, zmienność w dopływie ścieków i ładunku zanieczyszczeń, niedostateczna liczba urządzeń pomiarowych i różna dynamika procesów znacząco wpływa na trudności w uzyskaniu wysokiej jakości sterowania tym nieliniowym systemem.

Biologiczne oczyszczanie ścieków służy do usuwania związków azotu i fosforu. Podstawową technologią tego procesu jest metoda osadu czynnego [1, 2].

Bakterie, tzw. osad czynny, przetwarzają związki organiczne w gazy, inne związki organiczne i nowe bakterie. Odbywa się to przeważnie w układzie połączonych komór, gdzie uwalniany jest fosfor dzięki tzw. bakteriom fosforowym typu bio-P (komora bez-tlenowa), zachodzą procesy denitryfikacji (komora niedotleniona), nityfikacji i poboru fosforu przez bakterie bio-P (komora tlenowa).

Prawidłowy przebieg procesów biologicznych wymaga sztucznego dostarczenia powietrza. Tym samym drobnoustroje otrzymują odpowiednią ilość tlenu potrzebną do życia, ścieki są utrzymywane w stałym ruchu (mieszanie), co zapobiega opadaniu osadu czynnego na dno, gdzie brak tlenu spowodowałby jego obumarcie. Stężenie tlenu musi być na tyle wysokie, aby zapewnić rozwój mikroorganizmów. Zbyt małe ilości tlenu zaburzają prawidłowy przebieg procesów biologicznych. Zbyt wysokie stężenie tlenu nie wpływa na wzrost efektywności zachodzenia procesów, ale niepotrzebnie zwiększa koszty pompowania powietrza. Stanowią one główny składnik kosztów operacyjnych (około 60% kosztów całkowitych).

Tlen, potrzebny bakteriom oczyszczającym ścieki, może być dostarczony różnymi technologiami [3]. Jedną z nich jest wykorzystanie sprężonego powietrza tłoczonego przez instalację napowietrzającą (układ dmuchaw, przepustnic, dyfuzorów i rurociągów).

W ostatnich latach trwają intensywne prace badawcze związane ze sterowaniem stężeniem tlenu, np. [4, 5, 6, 7]. W większości przypadków pomija się instalację napowietrzającą oraz jej specyficzne własności i zakłada, że dostarcza ona wymaganą ilość powietrza. W artykule uwzględnia się ten złożony nieliniowy system i rozważa się go wspólnie z biologiczną oczyszczalnią ścieków. Praca stanowi kontynuację badań [8, 9] dotyczących oczyszczalni ścieków w Nowym Dworze Gdańskim (NDG). Należy dodać, że istniejąca w oczyszczalni ścieków infrastruktura sprzętowo-programowa w znacznym stopniu ogranicza możliwości bezpośredniej implementacji złożonych algorytmów sterowania, np. predykcyjnego. W związku z tym opracowano nową, efektywną i dużo prostszą w implementacji metodę sterowania.

W pierwszej części opisano i zamodelowano biologiczną oczyszczalnię ścieków z instalacją napowietrzającą w NDG. Następnie zaprojektowano nieliniowy kaskadowy układ sterowania stężeniem tlenu uwzględniając specyficzne cechy rozważanego systemu. Na koniec przeprowadzono badania symulacyjne tego układu i dokonano analizy uzyskanych wyników.

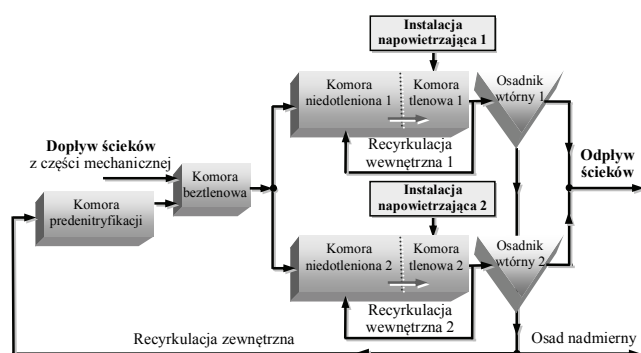
## 2. Obiekt sterowania – opis i modelowanie

### 2.1. Biologiczna oczyszczalnia ścieków

Oczyszczalnia ścieków w NDG jest oczyszczalnią przepływową wykorzystującą wstępne-mechaniczne (np. rozdrabnianie, cedzenie, sedimentacja, flotacja) i biologiczne procesy oczyszczania ścieków.

W artykule rozważana jest część biologiczna. Stosowaną technologią oczyszczania ścieków jest metoda osadu czynnego [1, 2]. Specjalnie dobrane bakterie wykorzystują związki organiczne i nieorganiczne zawarte w ściekach do zaspokojenia swoich potrzeb życiowych. Należy zatem zapewnić im takie warunki pracy, aby zoptymalizować procesy rozkładu materii organicznej w ściekach.

Do podstawowych wielkości (zakłóceń) związanych ze ściekami surowymi należą: natężenie dopływu ścieków  $Q_{in}$ , chemiczne zapotrzebowanie na tlen  $ChZT$ , azot całkowity  $N_{tot}$  i fosfor całkowity  $P_{tot}$ . Średnie ich wartości w NDG są równe odpowiednio: 2250 m<sup>3</sup>/dzień, 1160 mg/dm<sup>3</sup>, 49 mg/dm<sup>3</sup> i 4,2 mg/dm<sup>3</sup>. Część biologiczną stanowi połączony układ komór (rysunek 1).



Rys. 1. Schemat technologiczny biologicznej oczyszczalni ścieków w NDG  
Fig. 1. Technological scheme of the biological wastewater treatment plant at NDG

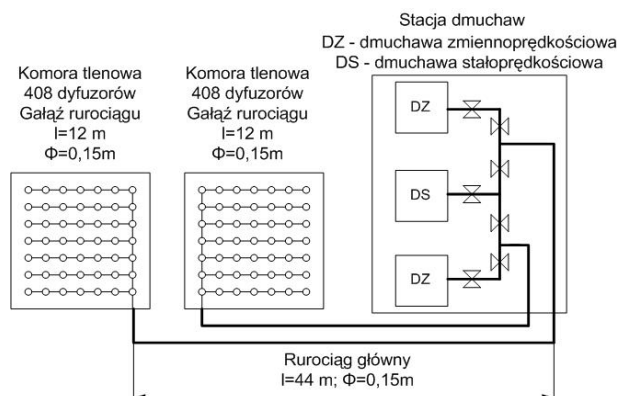
Pierwszym elementem jest komora predenitryfikacji osadu recykulowanego (152 m<sup>3</sup>), w której następuje mieszanie osadu czynnego ze ściekami. W komorze beztlenowej (455 m<sup>3</sup>) zachodzą procesy usuwania fosforu. W dalszej części następuje zacho- dź na dwa identyczne ciągi technologiczne. W każdym z nich znajdują się następujące komory: niedotleniona (1485 m<sup>3</sup>), w której przebiegają procesy denitryfikacji; tlenowa (1622 m<sup>3</sup>), w której zachodzą procesy nityfikacji i wiązania fosforu; osadnik wtórny (401 m<sup>3</sup>), służący oddzieleniu osadu czynnego od oczyszczonych ścieków. Osad czynny jest zawracany z komory tlenowej do niedotlenionej. Średnia wartość recykulacji wewnętrznej wynosi 3387 m<sup>3</sup>/dzień. Ponadto osad czynny jest zawracany z osadnika wtórnego do komory predenitryfikacji (średnio 1913,7 m<sup>3</sup>/dzień). Średnia wartość osadu nadmiernego usuwanego z oczyszczalni ścieków wynosi 258 m<sup>3</sup>/dzień.

Tlen niezbędny bakteriom do oczyszczania ścieków dostarcza- ny jest w sposób ciągły do obu komór tlenowych przez dwie niezależne, identyczne instalacje napowietrzające. W dalszej części artykułu rozważana będzie instalacja napowietrzająca 1 (patrz rysunek 1) opisana w następnej podsekcji.

Modelując procesy biologiczne wykorzystano powszechnie stosowany nieliniowy model osadu czynnego – ASM2d (ang. Activated Sludge Model 2d) zaproponowany po raz pierwszy w [10]. Zawiera on kilkanaście zmiennych stanu oraz parametrów stechiometrycznych i kinetycznych. Model uwzględnia procesy usuwania węgla organicznego i azotu, a także przemiany z udziałem bakterii wykorzystujących zdolność magazynowania fosforu w biomase komórkowej. Model ten dostosowano do rozważanej oczyszczalni ścieków i zaimplementowano w komercyjnym pakiecie symulacyjnym Simba [11]. Następnie dokonano kalibracji parametrów modelu i jego weryfikacji w oparciu o dane pomiarowe. Wyznaczono również średnie wartości wszystkich recykulacji i wejść zakłócających ( $Q_{in}$ ,  $ChZT$ ,  $N_{tot}$ ,  $P_{tot}$ ). Uzyskane wyniki umożliwiły wykorzystanie modelu tej części oczyszczalni ścieków dla celów projektowania algorytmu sterowania (patrz sekcja 3).

## 2.2. Instalacja napowietrzająca

Metodą napowietrzania ścieków w oczyszczalni w NDG jest drobnopęcherzykowe napowietrzanie sprężonym powietrzem z wykorzystaniem instalacji napowietrzającej [3]. Składa się ona z trzech dmuchaw wyporowych i dwóch niezależnych od siebie rurociągów dostarczających powietrze do dwóch komór tlenowych (rysunek 2). Każdy rurociąg kończy się rozgałęzieniami, w których zamontowano dyfuzory membranowe (po 408 sztuk zanurzonych na głębokości 3,9 m). Stężenie tlenu jest mierzone przez sondy tlenowe, po jednej w każdej komorze.



Rys. 2. Schemat instalacji napowietrzającej [9]  
Fig. 2. Configuration of the aeration system [9]

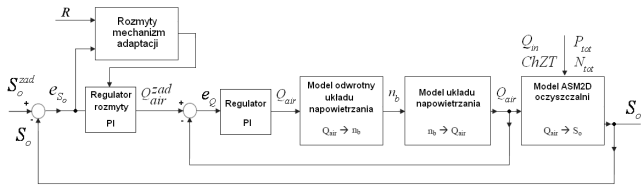
Każda komora tlenowa zasilana jest z pojedynczej dmuchawy zmiennoprędkościowej sterowanej falownikiem (w zakresie 1500 – 4800 obr/min). Dmuchawa dwubiegowa jest włączana tylko w przypadku awarii/konserwacji jednej z dwóch dmuchaw zmiennoprędkościowych. W związku z tym w dalszej części artykułu zostanie przyjęta następująca konfiguracja: dmuchawa zmiennoprędkościowa i jedna gałąź rurociągu.

Ogólną metodologię modelowania instalacji napowietrzającej szczegółowo przedstawiono w [5] i wykorzystano do budowy modelu rozważanej w artykule instalacji napowietrzającej. Inne prace z tej tematyki [12, 13] są dowodem poprawności przyjętej metodologii. Budowę modelu oparto na wiedzy teoretycznej, danych rzeczywistych z obiektu i danych katalogowych urządzeń. Instalację napowietrzającą (rysunek 2) zamodelowano zakładając, że poszczególne urządzenia są równoważne elementom elektrycznym. Dmuchawę potraktowano jak źródło prądowe z nieliniową charakterystyką przepływu powietrza w funkcji spadku ciśnienia, którą zlinearyzowano metodą najmniejszych kwadratów. Główny rurociąg zamodelowano jako nieliniową pojemność przepływającego powietrza z pomijalnie małą wartością rezystancji. Poszczególne gałęzie składają się z dyfuzorów i rurociągu łączącego główny rurociąg z dyfuzorami. Ze względu na wymiary, rezystancja rurociągu może zostać pominięta, zatem model gałęzi składa się z pojemności przepływającego powietrza (od głównego rurociągu do dyfuzorów) z nieliniową rezystancją dyfuzorów i hydrostatycznym źródłem ciśnienia. Szczegółowe badania symulacyjne modelu instalacji napowietrzającej przedstawiono w [9].

## 3. Projektowanie systemu sterowania

Biologiczna oczyszczalnia ścieków jest obiektem silnie nieliniowym. Złożoność dynamiki procesów zachodzących w reaktorze biologicznym wymusza zastosowanie zaawansowanych metod regulacji. Struktura obiektu w Nowym Dworze Gdańskim pozwala wyróżnić dwie podstawowe zmienne wpływające na sterowanie procesem napowietrzania. Pierwszą z nich jest natężenie przepływu powietrza  $Q_{air}$ , którego dynamika jest dużo większa niż dynamika stężenia tlenu w komorze tlenowej  $S_o$ , drugiej wielkości

sterującą. Schemat kaskadowego układu regulacji w strukturze IMC (ang. Inverse Model Control) przedstawiono na rysunku 3.



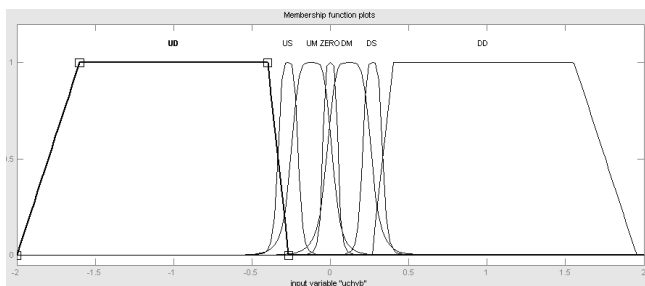
Rys. 3. Struktura układu sterowania  
Fig. 3. Structure of the control system

gdzie:  $R$ ,  $e_{S_o}$ ,  $Q_{air}^{zad}$ ,  $Q_{air}$ ,  $e_{Q_{air}}$ ,  $n_b$  – respiracja, błąd nadążania za trajekcją zadaną  $S_o$ , zadany poziom przepływu powietrza, natężenie przepływu powietrza, błąd nadążania za trajekcją zadaną  $Q_{air}$ , prędkość obrotowa dmuchawy.

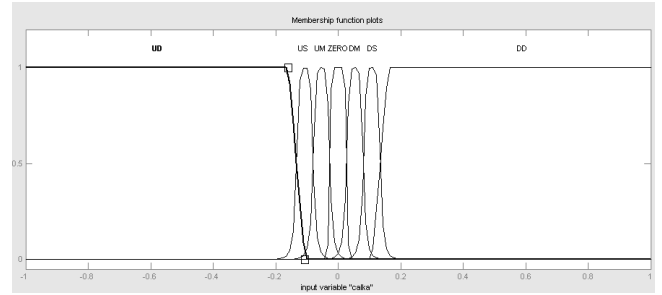
Regulator PI w pętli wewnętrznej działa w oparciu o aktualną wartość uchybu zmiennej pomocniczej  $Q_{air}$ . Tym samym kontrolowany jest proces w stanach przejściowych. Szczególnie istotne staje się więc zagadnienie doboru nastaw regulatora. W tym celu wykorzystano algorytm ewolucyjny, oparty na procesach reprodukcji, krzyżowania i mutacji, opracowany w [14]. Liczbę osobników rodzicielskich oraz potomnych określono odpowiednio jako  $M=80$  i  $N=74$ . Jako kryterium stopu przyjęto kryterium stagnacji – osiągnięta maksymalna liczba iteracji lub brak zmian przez kolejnych 20 iteracji. Genotyp przyjęto w postaci  $x=[K_p \ K_i]$ . Wartości graniczne zostały przyjęte jako  $[0 \ 25]$  dla  $K_p$  oraz  $[0,5 \ 300]$  dla  $K_i$ . Czas symulacji określono eksperymentalnie na podstawie odpowiedzi skokowej układu napowietrzania (0.001 doby). Jako kryterium jakości sterowania zastosowano kryterium IAE (ang. Integral Absolute Error) postaci (1). Uzyskano:  $K_p=8,7047$  i  $K_i=33,742$ .

$$IAE = \int_0^{\infty} |e_Q(t)| dt \quad (1)$$

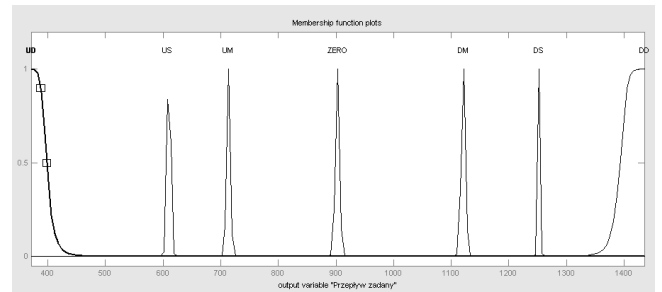
Rozmyty regulator PI w zewnętrznej pętli sterowania (patrz rysunek 3) nadąża za trajekcją zadaną  $S_o^{zad}$  wypracowując zadany przepływ powietrza  $Q_{air}^{zad}$ . Sygnałami wejściowymi są uchyb stężenia tlenu oraz jego całka. Zostały one podzielone w procesie fuzyfikacji (rozmywania) na 7 wartości lingwistycznych. Dziedzina numeryczna przestrzeni rozważań została określona dla uchybu jako  $-1 \div 1$  i całki jako  $2 \div -2$ . Po analizie, dla wejść i wyjść zastosowano gaussowskie funkcje przynależności. Przedział zmienności natężenia przepływu powietrza został określony doświadczalnie jako  $371 - 1435$  [m<sup>3</sup>/godz]. Kształt funkcji przynależności ma odzworowywać singeltony. Ich położenie określone zostało przez punkty 0%, 25%, 35%, 50%, 75%, 87% i 100% zakresu. Poszczególne przestrzenie rozważań przedstawiono na rysunkach 4 – 6 gdzie: UD, US, UM, ZERO, DM, DS, DD – ujemny duży, ujemny średni, ujemny mały, zerowy, dodatni mały, dodatni średni, dodatni duży, odpowiednio.



Rys. 4. Funkcje przynależności dla wejścia 1 – uchyb regulacji  $e_{S_o}$   
Fig. 4. Membership functions for input 1 – control error  $e_{S_o}$



Rys. 5. Funkcje przynależności dla wejścia 2 – całka uchybu regulacji  
Fig. 5. Membership functions for input 2 – integral control error



Rys. 6. Funkcje przynależności dla wyjścia – natężenie przepływu powietrza  $Q_{air}$   
Fig. 6. Membership functions for output – airflow  $Q_{air}$

Relacje między zbiorami wejściowymi a wyjściowymi określa baza reguł (patrz tabela 1).

Tab. 1. Baza reguł regulatora  
Tab. 1. Rule base of the controller

Zmienne lingwistyczne	Wartość lingwistyczna	całka uchybu regulacji						
		UD	US	UM	ZERO	DM	DS	DD
uchyb regulacji	UD	UD	UD	UD	US	US	UM	ZERO
	US	UD	UD	US	UM	UM	ZERO	DM
	UM	UD	US	UM	UM	ZERO	DM	DS
	ZERO	US	UM	UM	ZERO	DM	DM	DS
	DM	US	UM	ZERO	DM	DM	DS	DD
	DS	UM	ZERO	DM	DM	DS	DD	DD
	DD	ZERO	DM	DS	DS	DD	DD	DD

Przyjęty został model wnioskowania Mamdaniego oraz metoda wyostrzania środka maksimum.

Do układu, w celu kompensacji nieliniowości obiektu i wpływu zakłóceń, wprowadzono dodatkowo dwa mechanizmy (patrz rysunek 3). Pierwszym z nich jest implementacja regulacji w strukturze IMC, która gwarantuje stabilność i dobrą jakość sterowania, uzależnioną od dokładności zastosowanego modelu odwrotnego. Jej wprowadzenie jest możliwe, gdyż istnieje jednoznaczne odwzorowanie zależności między  $Q_{air}$  a  $n_b$ , tzn. między wyjściem, a wejściem obiektu (zależność (2)).

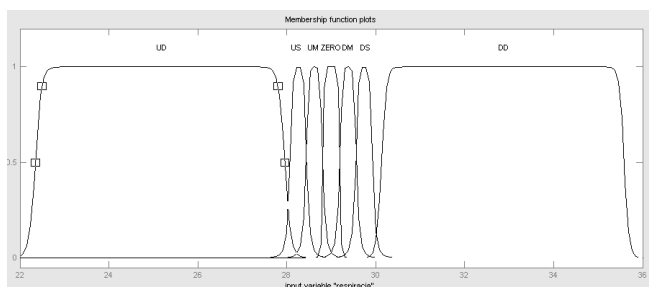
$$Q_{air}(t) = a \cdot \Delta p_b(t) + b \cdot n_b(t) \quad (2)$$

gdzie:  $\Delta p_b$  – spadek ciśnienia na dmuchawie;  $a = -1,291$ ,  $b = 0,323$ ,  $c = -60,966$  – zidentyfikowane parametry modelu.

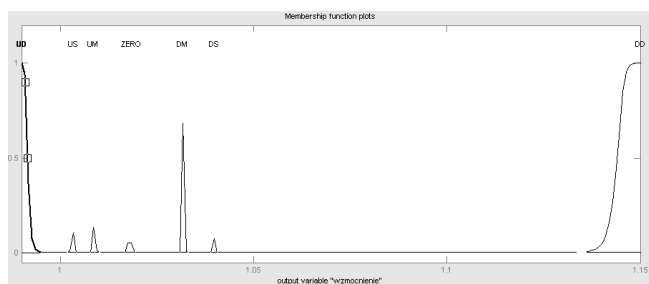
Wprowadzono również rozmyty mechanizm adaptacji parametrów regulatora w pętli zewnętrznej (patrz rysunek 3), ze względu na konieczność zmiany nastaw regulatora rozmytego wraz ze zmianą wartości respiracji  $R$ . Jest to parametr charakteryzujący proces natleniania ścieków i związany z zapotrzebowaniem bakte-

rii na tlen. Wraz z jego wzrostem rośnie ilość tlenu zużywanego przez mikroorganizmy. Jest to wielkość zmienna w czasie i zależy głównie od składu ścieków dopływających oraz ich objętości. Wykorzystano metodę programowej zmiany wzmocnienia sygnału wyjściowego (ang. gain scheduling) [15].

Zauważono, że problemy w sterowaniu obiektem pojawiają się, gdy respiracja przekroczy wartość  $30 \text{ [g/m}^3 \text{ godz]}$ , a uchyb regulacji jest na poziomie  $0,2 \text{ [g O}_2\text{/m}^3]$ . Ponadto dynamika respiracji jest wielokrotnie wolniejsza niż uchybu regulacji związanego ze stężeniem tlenu. W związku z tym problem można zakwalifikować jako zagadnienie regulacji typu PI, w którym w torze  $P$  występuje sygnał uchybu, a w torze  $I$  respiracja. Wielkość wyjściowa określona została jako  $K_Q$ , czyli wartość wzmocnienia sygnału rozmytego regulatora PI w pętli zewnętrznej. Zbiór wzmocnienia zawiera się w zakresie  $0,99 - 1,15$ . Po analizie określono dziennej numerycznej respiracji, w zakresie możliwych zmian, tj.  $22 - 36 \text{ [g/m}^3 \text{ godz]}$ . Do zaprojektowania przestrzeni rozważań wykorzystano zbiór zmiennej wyjściowej regulatora rozmytego. Rysunki 7 – 8 przedstawiają zbiory respiracji  $R$  oraz wzmocnienia  $K_Q$ . Baza reguł jest zgodna z tabelą 1.



Rys. 7. Funkcje przynależności dla wejścia – respiracja  $R$   
Fig. 7. Membership functions for input – respiration  $R$



Rys. 8. Funkcje przynależności dla wyjścia – wzmocnienie  $K_Q$   
Fig. 8. Membership functions for output – gain  $K_Q$

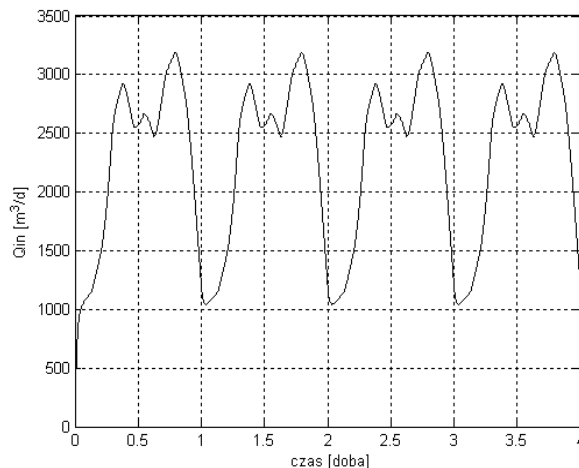
#### 4. Badania symulacyjne

Układ regulacji został zaimplementowany w komercyjnym środowisku Simba stanowiącym bibliotekę programu Matlab. Dane wejściowe uzyskano w oparciu o pomiary obiektowe. Wartości wielkości zakłócających  $Q_{in}$ ,  $ChZT$ ,  $N_{tot}$ ,  $P_{tot}$  przedstawione zostały na rysunkach 9 – 12.

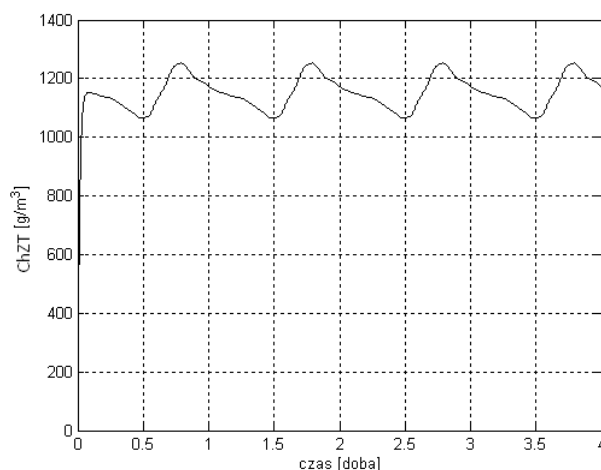
Respiracja (rysunek 13) jest wielkością opisującą szybkość zużycia tlenu przez bakterie w skutek zachodzenia reakcji biochemicznych. Jest to istotne zakłócenie wpływające na przebieg procesu napowietrzania ścieków.

Układ sterowania stężeniem tlenu został zbadany dla dwóch różnych trajektorii zadanych  $S_o^{zad}$  (rysunki 14 – 15). Na rysunkach 16 – 17 pokazano zmiany prędkości obrotowej dmuchaw.

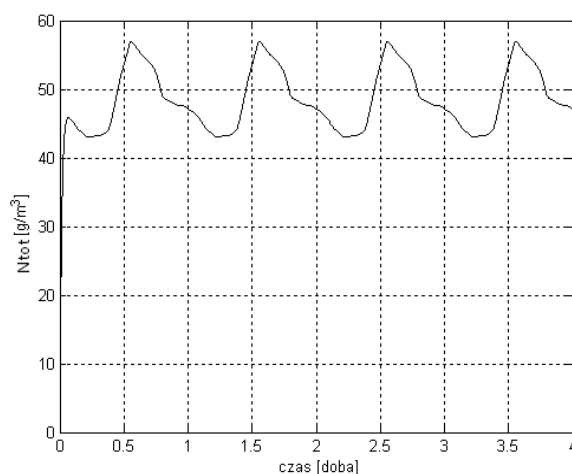
Jakość nadążania za zmienną trajektorią stężenia tlenu jest satysfakcjonująca. Błąd w stanie ustalonym nie przekracza 5%. Po ustaleniu się warunków biochemicznych, po około 1,5 doby, błąd ten jest pomijalnie mały.



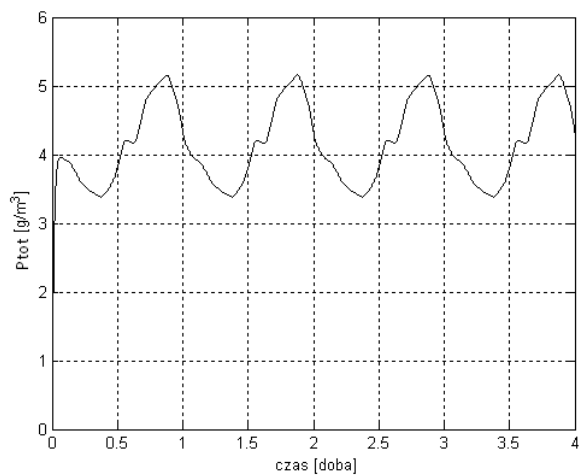
Rys. 9. Natężenie dopływu ścieków do oczyszczalni ścieków  
Fig. 9. Inflow into the wastewater treatment plant



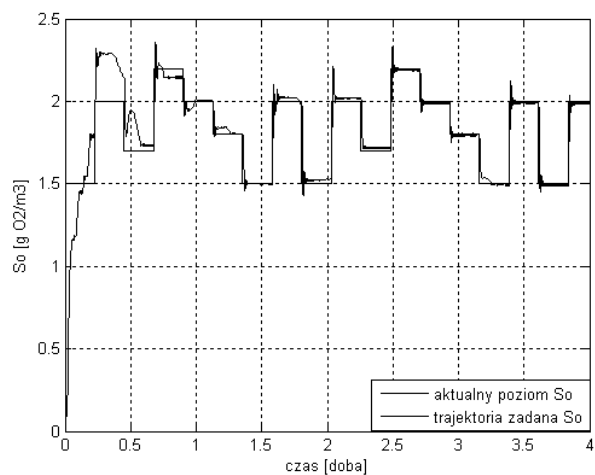
Rys. 10. Chemiczne zapotrzebowanie na tlen w ściekach dopływających  
Fig. 10. Influent chemical oxygen demand



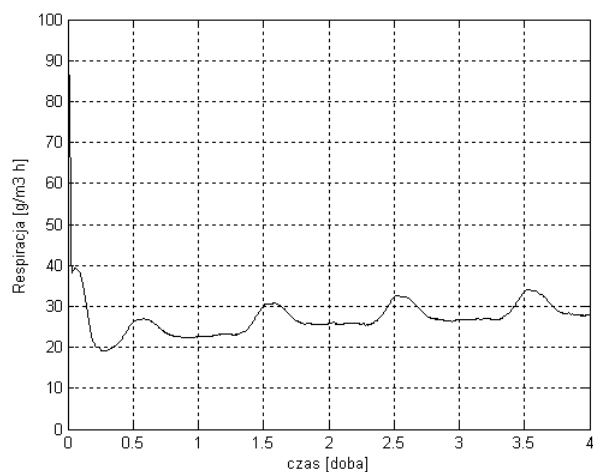
Rys. 11. Azot całkowity w ściekach dopływających  
Fig. 11. Influent total nitrogen



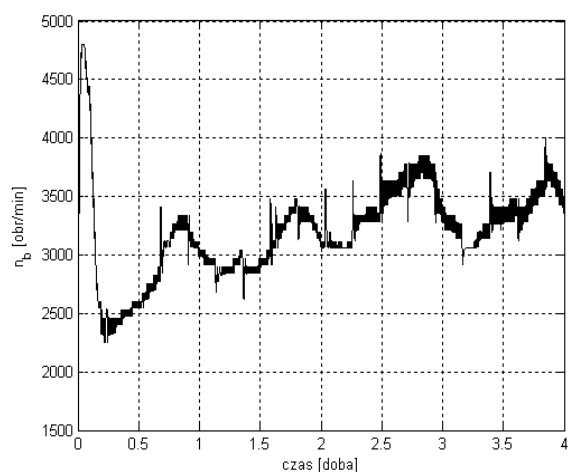
Rys. 12. Fosfor całkowity w ściekach dopływających  
Fig. 12. Influent total phosphorus



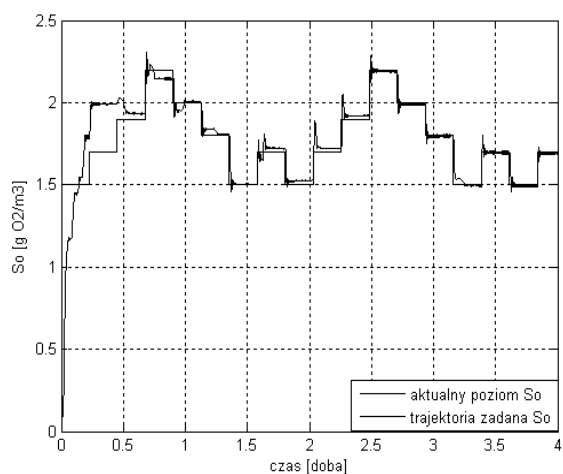
Rys. 15. Stężenie tlenu – trajektoria zadana 2  
Fig. 15. Dissolved oxygen – reference trajectory 2



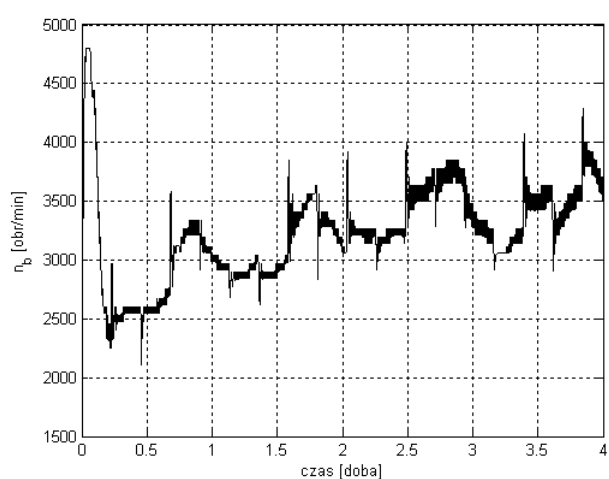
Rys. 13. Respiracja w komorze tlenowej 1  
Fig. 13. Respiration at aerobic tank 1



Rys. 16. Prędkość obrotowa dmuchawy – trajektoria zadana 1  
Fig. 16. Rotational speed of the blower – reference trajectory 1



Rys. 14. Stężenie tlenu – trajektoria zadana 1  
Fig. 14. Dissolved oxygen – reference trajectory 1



Rys. 17. Prędkość obrotowa dmuchawy – trajektoria zadana 2  
Fig. 17. Rotational speed of the blower – reference trajectory 2



Błąd średni kwadratowy (ang. Root Mean Square) dla trajektorii 1 oraz 2 wynosi odpowiednio 0,1302 i 0,1381. Uchyb w stanie ustalonym był przez cały czas symulacji na stałym, niskim poziomie. Ponadto występujące przeregulowania w stanie przejściowym były krótkotrwałe i miały małe wartości, co korzystnie wpływa na stabilność warunków biologicznych związanych z oczyszczaniem ścieków.

Zastosowanie w układzie dmuchaw o szerokim zakresie regulacji prędkości obrotowej (1500-4800 obr/min) pozytywnie wpływa na jakość sterowania. Prędkość obrotowa nie zmienia się gwałtownie, a fluktuacje nie są duże. Wpływa to na wzrost niezawodności pracy i żywotności dmuchaw.

Dodatkową zaletą zaproponowanego rozwiązania jest możliwość łatwej implementacji opracowanego algorytmu sterowania w oczyszczalni ścieków w istniejącej strukturze sprzętowo – programowej, dostępnej na obiekcie.

## 5. Zakończenie

W artykule zaprojektowano kaskadowy układ regulacji stężeniem tlenu z uwzględnieniem instalacji napowietrzającej, głównego systemu w procesie napowietrzania. Jest to jeden z najważniejszych i najdroższych procesów zachodzących w biologicznej oczyszczalni ścieków. Na podstawie dokumentacji technicznej i danych obiektowych zamodelowano biologiczną oczyszczalnię ścieków z instalacją napowietrzającą, pracującą w Nowym Dworze Gdańskim. Wyniki testów symulacyjnych potwierdzają zasadność przyjętej metodologii związanej z wyborem struktury i algorytmu sterowania.

## 6. Literatura

- [1] Dymaczewski Z., Oleszkiewicz J.A., Sozański M.M.: Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków. PZITS, Poznań 1997.
- [2] Miksch K., Sikora J.: Biotechnologia ścieków. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [3] Mueller J.A., Boyle W.C., Pöpel H.J.: Aeration: Principles and Practice. CRC Press, Boca Raton 2002.
- [4] Holenda B., Domokos E., Rédey A., Fazakas J.: Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control. Computers & Chemical Engineering 32 (6), 1270-1278, 2008.
- [5] Piotrowski R., Brdyś M.A., Konarczak K., Duzinkiewicz K., Chotkowski W.: Hierarchical dissolved oxygen control for activated sludge processes. Control Engineering Practice, Vol. 16, No. 1, pp. 114-131, 2008.
- [6] Duzinkiewicz K., Brdyś M.A., Kurek W., Piotrowski R.: Genetic hybrid predictive controller for optimised dissolved oxygen tracking at lower control level. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 17, No. 5, pp. 1183-1192, 2009.
- [7] Mingzhi H., Jinqun W., Yongwen M., Yan W., Weijiang L., Xiaofei S.: Control rules of aeration in a submerged biofilm wastewater treatment process using fuzzy neural networks. Expert System with Applications 36 (7), 10428-10437, 2009.
- [8] Piotrowski R., Brdyś M.A., Miotke D.: Centralized dissolved oxygen tracking at wastewater treatment plant: Nowy Dwor Gdański case study. The 12th IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications, Villeneuve D'Ascq, July 12-14, 2010, IFAC Publisher, Elsevier, Vol. 9, Part 1, 2010.
- [9] Piotrowski R., Mojsiewicz A.: Nieliniowy regulator predykcyjny w sterowaniu instalacją napowietrzającą. Pomiar Automatyka Kontrola, Vol. 57, Nr 3, 253-256, 2011.
- [10] Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M.C., Marais G.v.R., van Loosdrecht M.C.M.: Activated Sludge Model No. 2d, ASM2d. Water Science and Technology, Vol. 39, No. 1, pp. 165-182, 1999.
- [11] Simba, User's guide, <http://simba.ifak.eu/simba/>, otwarto 10.09.12.
- [12] Krawczyk W., Piotrowski R., Brdyś M.A., Chotkowski W.: Modelling and identification of aeration systems for model predictive control of dissolved oxygen – Swarzewo wastewater treatment plant case study. Proc. of the 10th IFAC Symposium on Computer Applications in Biotechnology, Cancun, June 04-06, 2007.
- [13] Skiba A., Piotrowski R.: Model instalacji napowietrzającej dla celów sterowania – studium przypadku. Modelowanie Inżynierskie, Tom 11, Zeszyt 42, 395-406, 2011.
- [14] Muszarski J.: Analiza porównawcza metod optymalizacyjnych z rodziny sztucznej inteligencji na wybranych przykładach. Praca dyplomowa. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 2012.
- [15] Niederliński A., Mościński J., Ogonowski Z.: Regulacja adaptacyjna. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1995.

otrzymano / received: 28.01.2013

przyjęto do druku / accepted: 02.12.2013

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

### Wersja elektroniczna miesięcznika PAK

Artykuły opublikowane w PAK po roku 1989 są dostępne w wersji elektronicznej m.in. w bazie artykułów PAK ([www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl)), w folderze „Archiwum numerów miesięcznika PAK”:

- pełne teksty artykułów z poprzednich lat i streszczenia artykułów najnowszych można pobrać bezpłatnie,
- pełne teksty artykułów z bieżącego roku można otrzymać za opłatą (5 PLN +1,15 PLN VAT).

