

Wielopoziomowy system sterowania stężeniem tlenu i wyznaczania trajektorii zadanej stężenia tlenu w biologicznej oczyszczalni ścieków

Robert Piotrowski

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Streszczenie: Napowietrzanie ścieków jest jednym z najważniejszych i najdroższych procesów w oczyszczalni ścieków. Stężenie tlenu jest natomiast głównym parametrem wpływającym na efektywność zachodzenia procesów biologicznych w oczyszczalni ścieków. W artykule przedstawiono wielopoziomowy nieliniowy system sterowania stężeniem tlenu i wyznaczania trajektorii zadanej tej wielkości. W testach symulacyjnych pokazano wyniki sterowania dla oczyszczalni ścieków typu SBR.

Słowa kluczowe: napowietrzanie ścieków, oczyszczalnia ścieków, SBR, stężenie tlenu, wielopoziomowy system sterowania

1. Wprowadzenie

Ścieki są jednym z wielu rodzajów zanieczyszczeń produkowanych przez człowieka. Zadanie oczyszczania ścieków realizowane jest przez złożone systemy – oczyszczalnie ścieków. Bez względu na ich rodzaj, głównym celem działania, a zatem i sterowania tym systemem jest oczyszczenie ścieków z zanieczyszczeń przed ich odprowadzeniem do odbiornika (jezioro, rzeka lub morze). Równocześnie trzeba spełnić wymagania dotyczące dopuszczalnych wartości wskaźników zanieczyszczeń, określone dla każdej oczyszczalni ścieków w pozwoleniu wodnoprawnym. Systemem zainteresowania w artykule jest komunalna, biologiczna, sekwencyjna oczyszczalnia ścieków SBR (ang. *Sequencing Batch Reactor*) z instalacją napowietrzającą (układ dmuchaw, rurociągów i dyfuzorów).

Konieczność spełnienia wysokich wymagań dotyczących oczyszczonych ścieków wymusza przebudowę istniejących oczyszczalni ścieków lub modernizację systemów sterowania. Koszty przebudowy są bardzo wysokie i niewspółmierne do tych ponoszonych w związku z wdrożeniem nowoczesnych algorytmów sterowania.

Warunkiem koniecznym zachodzenia większości procesów biologicznych jest dostarczenie bakteriom oczyszczającym ścieki, odpowiedniej ilości tlenu. Jest to najczęściej realizowane za pomocą instalacji napowietrzającej. Tlen jest wykorzystany przez bakterie oczyszczające ścieki do utleniania azotu am-

nowego NH_4 do azotynów NO_2 , azotynów do azotanów NO_3 oraz akumulowania związków fosforu zawartych w ściekach. Stężenie tlenu musi być na tyle wysokie, aby zapewnić rozwój mikroorganizmów. Zbyt małe ilości tlenu zaburzają prawidłowy przebieg procesów biologicznych. Jednocześnie za wysokie stężenie tlenu nie wpływa na wzrost efektywności zachodzenia procesów biologicznych, a tylko niepotrzebnie zwiększa koszty pompowania powietrza. Stanowią one główny składnik kosztów operacyjnych pracy oczyszczalni ścieków, wynoszący ponad 60% całkowitych kosztów operacyjnych [1].

W zakresie sterowania, w praktyce eksploatacyjnej większości oczyszczalni ścieków stosuje się w dalszym ciągu proste algorytmy sterowania stężeniem tlenu DO (ang. *Dissolved Oxygen*) oparte na regułach lub regulatorach typu PI ze stałymi wartościami nastaw. Ze względu na złożoność problemu sterowania (nieliniowość, niestacjonarność) i różne punkty pracy są one niewystarczające. Przyczyną jest zmienne w czasie zapotrzebowanie na tlen, a tym samym na ilość powietrza dostarczanego przez instalację napowietrzającą. Zmiany te zależą od różnego stopnia zanieczyszczenia ścieków, dla których należy określić pożądane wartości stężenia tlenu.

Pierwszą grupą prac badawczych związanych ze sterowaniem stężeniem tlenu, są te wykorzystujące pomiar tylko tej wielkości [2–4]. Drugą grupę algorytmów sterowania stężeniem tlenu stanowią metody wykorzystujące, obok pomiarów DO , dodatkowo pomiary NH_4 , NO_3 i fosforanów PO_4 [5–6]. Trzecią grupą algorytmów sterowania związanych z DO są te, w których projektuje się dodatkowy regulator nadrzędny do wyznaczania zmiennej w czasie, zadanej trajektorii stężenia tlenu DO_{zad} [7–8].

Praca stanowi kontynuację wcześniejszych badań [9]. Całościowe wyniki przedstawiono w monografii [10]. W artykule przedstawiono opracowanie wielopoziomowego systemu sterowania do sterowania stężeniem tlenu DO i wyznaczania trajektorii zadanej tej wielkości DO_{zad} . W badaniach symulacyjnych

Autor korespondujący:

Robert Piotrowski, robert.piotrowski@pg.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 23.10.2018 r., przyjęty do druku 18.12.2018 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

przedstawiono wyniki sterowania dla biologicznej oczyszczalni ścieków typu SBR.

2. Obiekt badań

Obiektem badań jest system złożony z jednego reaktora SBR wraz z instalacją napowietrzającą z oczyszczalni ścieków w Swarzewie. SBR pracuje cyklicznie z podziałem na cztery fazy: napełnienie reaktora ściekami, oczyszczenie z procesem napowietrzania, sedymentacja i dekantacja wraz z odpływem ścieków oczyszczonych do odbiornika. Instalacja napowietrzająca składa się z dwóch dmuchaw, układu rurociągów i systemu dyfuzorów. Oczyszczone ścieki przepompowywane są do stawów stabilizacyjnych (następuje sedymentacja resztek osadu czynnego i doczyszczanie ścieków przez glony i zooplankton), a stamtąd do Morza Bałtyckiego. Nadmiar osadu czynnego po przeróbce jest składowany jako kompost.

Procesy biologiczne w reaktorze SBR zamodelowano w oparciu o nieliniowy model osadu czynnego ASM2d (ang. *Activated Sludge Model 2d*) przedstawiony szczegółowo w [11]. Składa się on z kilkunastu zmiennych stanu oraz parametrów stechiometrycznych i kinetycznych. Model uwzględnia procesy usuwania węgla organicznego i azotu, oraz przemiany z udziałem bakterii wykorzystujących zdolność magazynowania fosforu w biomase komórkowej. ASM2d zaimplementowano w komercyjnym pakiecie symulacyjnym Simba [12]. Model instalacji napowietrzającej opracowano w środowisku MATLAB. Uzyskano pozytywne wyniki identyfikacji i weryfikacji obu modeli, które szczegółowo przedstawiono w [13].

Obecnie stosowane sterowanie stężeniem tlenu w oczyszczalni ścieków w Swarzewie oparte jest na jednowymiarowym liniowym układzie regulacji z regulatorem PI ze stałymi wartościami nastaw i algorytmie regulowym. Wielkościami sterowanymi są: prędkość obrotowa obu dmuchaw oraz stany ich pracy (wyłączona/załączona). Algorytm regulowy steruje załączaniem i wyłączaniem tych urządzeń wykonawczych.

Wcześniejsze badania [14] pokazały, że wykorzystywane algorytmy nie zawsze pozwalają na efektywne oczyszczanie ścieków w zmiennych warunkach operacyjnych. Ścieki o mniejszym stężeniu zanieczyszczeń są napowietrzane zbyt długo. W wyniku tego generuje się koszty związane z niepotrzebnym zużyciem energii elektrycznej związanej z pracą dmuchaw. Ponadto zdarzają się sytuacje, w których ścieki o dużym stężeniu zanieczyszczeń nie są dostatecznie oczyszczone, a pomimo tego są odprowadzane do odbiornika. W związku z powyższym, poprawa obecnej sytuacji jest możliwa. Wymaga to zaprojektowania nowego algorytmu sterowania stężeniem tlenu DO , uwzględniającego zmienne warunki operacyjne pracy reaktora SBR.

3. Projektowanie sterowania

Systemem sterowania jest SBR z instalacją napowietrzającą. Algorytmy sterowania oparto na strukturze wielopoziomowej (rys. 1) i pomiarach: natężenia przepływu powietrza Q_{air} , stężenia tlenu DO i azotu amonowego NH_4 . Na system działają

następujące sygnały zakłócające: azot ogólny N_{tot} , fosfor ogólny P_{tot} i chemiczne zapotrzebowanie na tlen $ChZT$.

System sterowania składa się z trzech podsystemów. Pierwszy z nich służy do sterowania przepływem powietrza Q_{air} . Wykorzystując własności instalacji napowietrzającej, opracowano go z wykorzystaniem inwersji modelu instalacji napowietrzającej. Zapewnienie określonej ilości DO w reaktorze sekwencyjnym, wymusza dostarczenie do niego, przez instalację napowietrzającą, wymaganej ilości Q_{air} . Dwie dmuchawy sterowane są za pomocą sygnałów prędkości obrotowej n_b i binarnych sygnałów załącz/wyłącz x_b . Zmienną wiążącą pracę instalacji napowietrzającej, ze stężeniem tlenu DO , jest Q_{air} [15].

W drugim podsystemie, służącym do sterowania DO , zaprojektowano regulator adaptacyjny z modelem referencyjnym DMRAC (ang. *Direct Model Reference Adaptive Control*) z filtrem przeciwnasyceniowym. Dzięki temu uwzględniono cechy systemu sterowania (nieliniowość, niestacjonarność) i skompensowano wpływ zmiennych zakłóceń [10].

Różne warunki operacyjne pracy reaktora SBR powodują, że zapotrzebowanie bakterii na tlen może się zmieniać. W związku z tym opracowano trzeci podsystem służący do obliczania trajektorii zadanej DO_{zad} z użyciem pomiaru NH_4 (patrz nadrzędny regulator regulowy – rys. 1). Wykorzystując wiedzę technologiczną związaną z pracą reaktora SBR w Swarzewie, opracowano bazę reguł postaci:

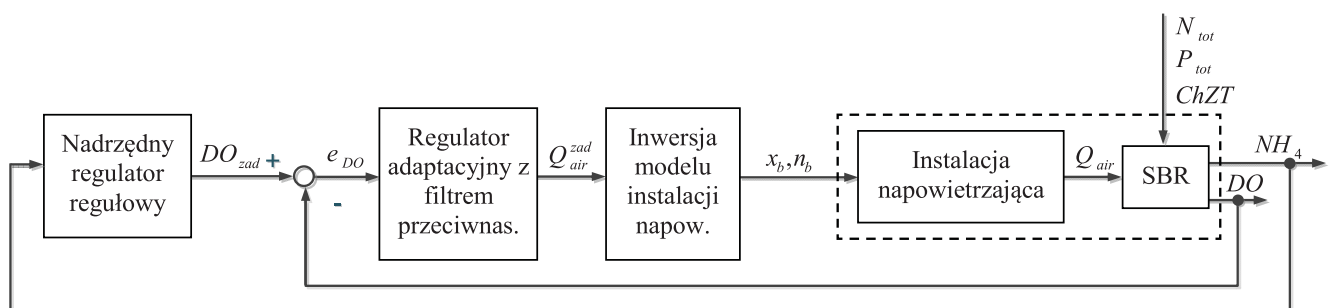
$$\begin{aligned} \text{Jeśli } NH_4 \geq 30 \frac{mg}{l} \text{ to } DO_{zad} &= 3 \frac{mg}{l} \\ \text{Jeśli } \left(NH_4 < 30 \frac{mg}{l} \text{ i } NH_4 \geq 20 \frac{mg}{l} \right) \text{ to } DO_{zad} &= 2,5 \frac{mg}{l} \\ \text{Jeśli } \left(NH_4 < 20 \frac{mg}{l} \text{ i } NH_4 \geq 10 \frac{mg}{l} \right) \text{ to } DO_{zad} &= 2 \frac{mg}{l} \\ \text{Jeśli } NH_4 < 10 \frac{mg}{l} \text{ to } DO_{zad} &= 1,5 \frac{mg}{l} \end{aligned} \quad (1)$$

Wraz ze zmniejszaniem wartości NH_4 następuje spadek wartości DO_{zad} . Tym samym wpływa się na obniżenie kosztów pompowania powietrza przez dmuchawy.

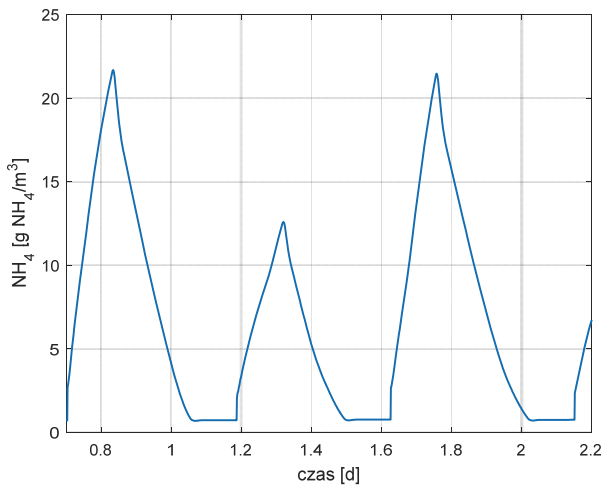
4. Wyniki sterowania

Model reaktora SBR zaimplementowano w komercyjnym środowisku Simba [13] stanowiącym bibliotekę programu MATLAB. Model instalacji napowietrzającej i wszystkie podsystemy sterowania opracowano w środowisku MATLAB.

Badania symulacyjne przeprowadzono dla dwóch scenariuszy zanieczyszczenia ścieków: niskiego ($ChZT = 535 \text{ gO}_2/\text{m}^3$, $N_{tot} = 55 \text{ gN}/\text{m}^3$, $P_{tot} = 7,38 \text{ gP}/\text{m}^3$) i średniego ($ChZT = 1070 \text{ gO}_2/\text{m}^3$, $N_{tot} = 110 \text{ gN}/\text{m}^3$, $P_{tot} = 14,75 \text{ gP}/\text{m}^3$) oraz natężenia dopływu ścieków równego $5000 \text{ m}^3/\text{d}$.

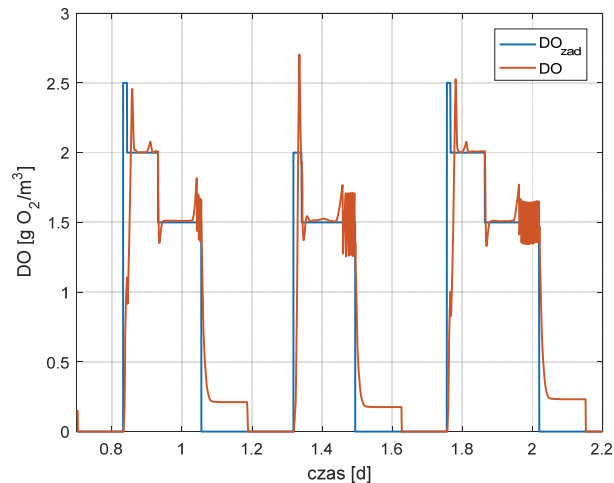


Rys.1. Struktura wielopoziomowego systemu sterowania
Fig.1. Structure of multilevel control system



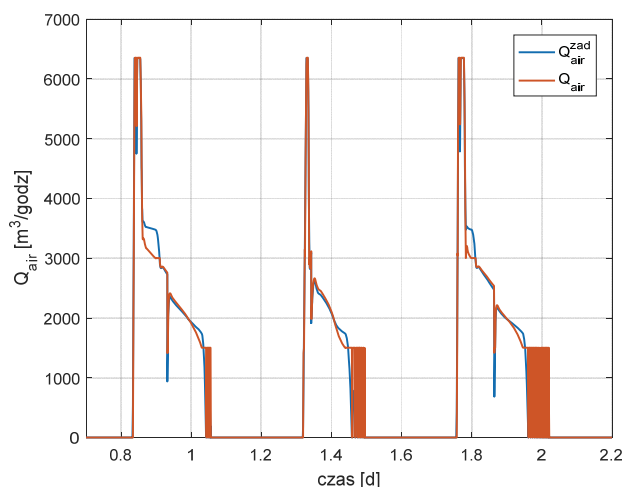
Rys. 2. Wyniki sterowania – azot amonowy (scenariusz I)

Fig. 2. Control results – ammonium nitrogen (scenario I)



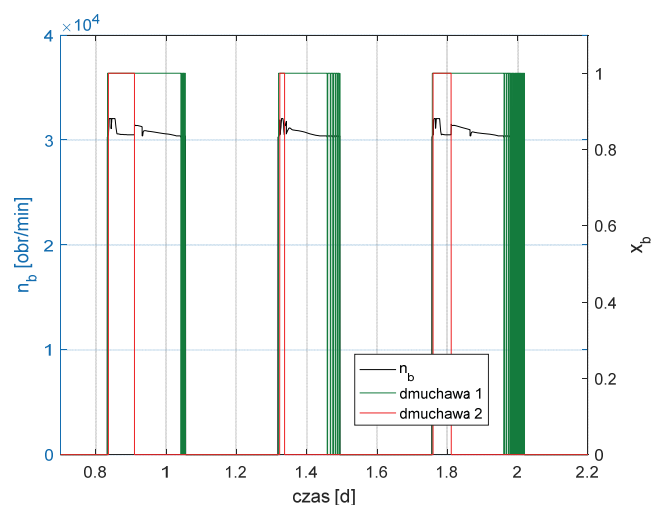
Rys. 3. Wyniki sterowania – stężenie tlenu (scenariusz I)

Fig. 3. Control results – dissolved oxygen (scenario I)



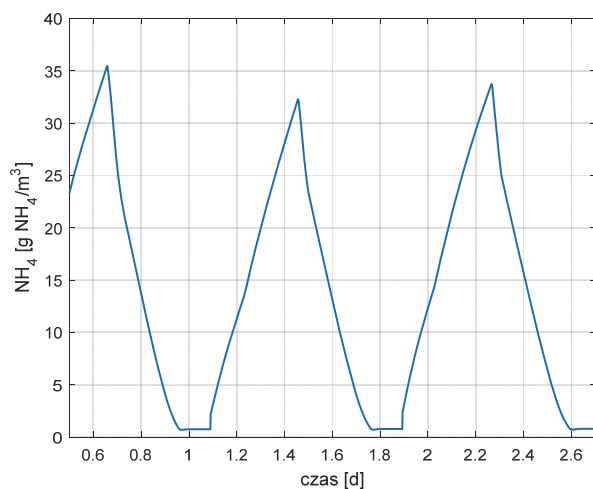
Rys. 4. Wyniki sterowania – natężenie przepływu powietrza (scenariusz I)

Fig. 4. Control results – air flow (scenario I)



Rys. 5. Wyniki sterowania – praca dmuchaw (scenariusz I)

Fig. 5. Control results – blowers work (scenario I)



Rys. 6. Wyniki sterowania – azot amonowy (scenariusz II)

Fig. 6. Control results – ammonium nitrogen (scenario II)

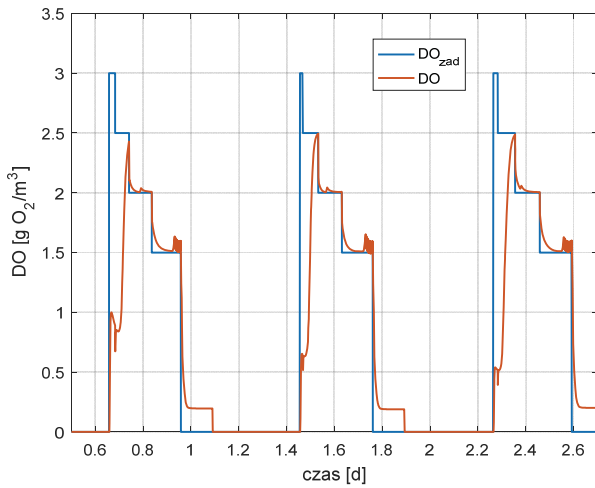
Wyniki sterowania dla pierwszego – niskiego scenariusza zanieczyszczenia ścieków, dla różnych wartości NH_4 , pokazano na rys. 2–5.

Zgodnie w bazą reguł nadrzędnego regulatora regulowego (zależność (1)), ustaloną z technologiem procesu, wraz ze zmianą wartości NH_4 (rys. 2) zmianie ulega trajektoria DO_{zad} (rys. 3). Spadek wartości NH_4 powoduje obniżenie wartości DO_{zad} ,

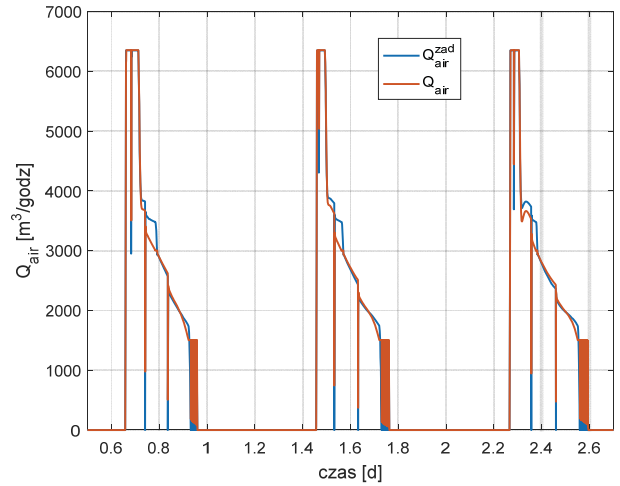
a zatem również zmniejszenie przepływu powietrza Q_{air} (rys. 4). Wpływa to oczywiście na obniżenie kosztów pracy całego układu. Przeręgowanie w sterowaniu DO (rys. 3), a w związku z tym również różnica między Q_{air} i Q_{air}^{zad} (rys. 4) występuje w trakcie zmiany wartości DO_{zad} oraz w chwilach wyłączenia dmuchaw (rys. 5). Pod koniec fazy tlenowej, następuje częste wyłączenie i włączenie dmuchaw (rys. 5), żeby zmniejszyć błąd sterowania DO . Jest to dowód przewymiarowania stacji dmuchaw. Skutkuje to szybszym zużyciem urządzeń wykonawczych oraz gorszymi wynikami sterowania dla wartości $DO_{zad} = 1,5 \text{ gO}_2/\text{m}^3$, w porównaniu z $DO_{zad} = 2 \text{ gO}_2/\text{m}^3$.

Kolejne wyniki sterowania dla drugiego – średniego scenariusza zanieczyszczenia ścieków przedstawiono na rys. 6–9.

Wyniki sterowania DO (rys. 7) dla średniego stopnia zanieczyszczenia ścieków są dużo lepsze. Większy stopień zanieczyszczenia ścieków wymusza wyższe wartości DO_{zad} (rys. 7), a to z kolei powoduje dłuższy czas pracy dmuchaw (rys. 9) ponad minimalną wartość przepływu powietrza Q_{air} (rys. 8). Wartość $DO_{zad} = 3 \text{ gO}_2/\text{m}^3$ (rys. 7) występuje na tyle krótko, że instalacja napowietrzająca, mimo pracy obu dmuchaw (rys. 9), nie zdąży dostarczyć wymaganej ilości powietrza. Ponownie, na końcu poszczególnych faz tlenowych następuje częste przełączanie stanu dmuchaw. Prowadzić to będzie do częstszych wymian dmuchaw, w wyniku ich zużycia. Analogicznie jak poprzednio, różnica między Q_{air} i Q_{air}^{zad} (rys. 8) występuje w trakcie zmiany wartości DO_{zad} i w chwili wyłączenia dmuchaw.



Rys. 7. Wyniki sterowania – stężenie tlenu (scenariusz II)
Fig. 7. Control results – dissolved oxygen (scenario II)



Rys. 8. Wyniki sterowania – natężenie przepływu powietrza (scenariusz II)
Fig. 8. Control results – air flow (scenario II)

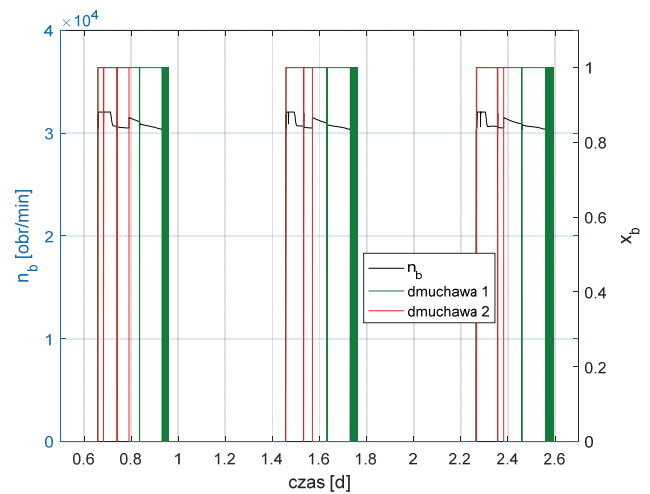
Reasumując, przedstawione wyniki sterowania potwierdzają prawidłową pracę wielopoziomego systemu sterowania. W zależności od aktualnej wartości NH_4 następuje zmiana wartości zadanej DO_{zad} . Oddzielną kwestią jest dokładność realizacji DO_{zad} przez pozostałe układy sterowania. Czynnikiem decydującym o jakości sterowania są ograniczenia technologiczne dmuchaw zainstalowanych w oczyszczalni ścieków w Swarzewie. W możliwym zakresie zmian przepływu powietrza regulacja stężeniem tlenu jest zadowalająca. W różnych chwilach faz tlenowych występuje różne zapotrzebowanie na tlen. Od momentu osiągnięcia dolnej wydajności przez dmuchawy jakość regulacji się pogarsza i stężenie DO rośnie. Rozwiązaniem tego problemu może być instalacja większej liczby nowych dmuchaw o mniejszych wydajnościach.

5. Podsumowanie

Napowietrzanie ścieków jest jednym z najdroższych procesów związanych z eksploatacją oczyszczalni ścieków. W artykule przedstawiono wielopoziomą strukturę sterowania służącą do sterowania stężeniem tlenu i wyznaczania trajektorii zadanej tej wielkości. Badania symulacyjne pokazały dobrą jakość sterowania. Dzięki temu możliwa jest redukcja zużycia energii elektrycznej związanej z pompowaniem powietrza przez instalację napowietrzającą. Testy pokazały również, że jakość sterowania można by jeszcze poprawić, zmieniając dmuchawy na urządzenia o mniejszych wydajnościach.

Bibliografia

- Jenkins T.E., *Aeration Control System Design. A Practical Guide to Energy and Process Optimization*. John Wiley & Sons. New Jersey, 2013.
- Piotrowski R., *Two-Level Multivariable Control System of Dissolved Oxygen Tracking and Aeration System for Activated Sludge Processes*. "Water Environment Research". Vol. 87, No. 1, 2015, 3–13.
- Ozturk M.C., Serrat F.M., Teymour F., *Optimization of Aeration Profiles in the Activated Sludge Process*. "Chemical Engineering Science", Vol. 139, 2016, 11–14, DOI: 10.1016/j.ces.2015.09.007.
- Jujun R., Chao Z., Ya L., Peiyi L., Zaizhi Y., Xiaohong Ch., Mingzhi H., Tao Z., *Improving the efficiency of dissolved oxygen control using an on-line control system based on a genetic algorithm evolving FWNN software sensor*. "Journal of Environmental Management", Vol. 187, 2017, 550–559, DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.10.056.



Rys. 9. Wyniki sterowania – praca dmuchaw (scenariusz II)
Fig. 9. Control results – blowers work (scenario II)

- Santín I., Pedret C., Vilanova R., *Applying variable dissolved oxygen set point in a two level hierarchical control structure to a wastewater treatment process*. "Journal of Process Control", Vol. 28, 2015, 40–55, DOI: 10.1016/j.jprocont.2015.02.005.
- Harja G., Vlad G., Nascu I., *MPC advanced control of dissolved oxygen in an activated sludge wastewater treatment plant*. Proc. of the 2016 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), May 19–21 2016, Cluj-Napoca, Romania, DOI: 10.1109/AQTR.2016.7501329.
- Houzhao D., Mingjian H., Cong L., Yaning Z., *Research of the Dissolved Oxygen Intelligent Control System in the Aeration System of Wastewater Treatment*. "Applied Mechanics and Materials", Vols. 433–435, 2013, 1136–1140, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.433-435.1136.
- Grochowski M., Rutkowski T.A., *Supervised model predictive control of wastewater treatment plant*. Proc. of the 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics – MMAR 2016, August 29–September 1 2016, Międzyzdroje, Poland, DOI: 10.1109/MMAR.2016.7575206.
- Błaszkiwicz K., Piotrowski R., Duzinkiewicz K., *A Model-Based Improved Control of Dissolved Oxygen Concentra-*

- tion in Sequencing Wastewater Batch Reactor. "Studies in Informatics and Control", Vol. 23, No. 4, 2014, 323–332.
10. Piotrowski R., *Zaawansowane algorytmy sterowania i optymalizacji w biologicznej oczyszczalni ścieków typu wsadowego*. Monografie 169, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2018.
 11. 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, 1999, 165–182, DOI: 10.1016/S0273-1223(98)00829-4.
 12. Simba 2018. <http://www.ifak-system.com/en/environmental-simulation/simba/> [dostęp 1.10.2018].
 13. Piotrowski R., Skiba A., *Nonlinear Fuzzy Control System for Dissolved Oxygen with Aeration System in Sequencing Batch Reactor*. "Information Technology and Control". Vol. 44, No. 2, 2015, 182–195, DOI: 10.5755/j01.itc.44.2.7784.
 14. Cytawa S., Dereszewska A., *Zastosowanie sondy do pomiaru zawartości azotu amonowego i azotanowego jako elementu sterowania procesem oczyszczania ścieków*. „Ekonomia i Zarządzanie”, Vol. 4, Nr 1, 2012, 127–136.

Multilevel control system for dissolved oxygen control and determining the set point trajectory of dissolved oxygen in a biological wastewater treatment plant

Abstract: Aeration of wastewater is one of the most important and expensive process in a wastewater treatment plant. Dissolved oxygen concentration is the main parameter influencing the effectiveness of biological processes in wastewater treatment plant. In the paper, a multilevel nonlinear control system for dissolved oxygen control and determining the set point trajectory of dissolved oxygen was designed. The control results for the SBR wastewater treatment plant were presented in simulation tests.

Keywords: aeration, wastewater treatment plant, SBR, dissolved oxygen, multilevel control system

dr hab. inż. Robert Piotrowski

robert.piotrowski@pg.edu.pl

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

