

# Wieloobszarowy miękoprzełączalny regulator PI w sterowaniu stężeniem tlenu w biologicznej oczyszczalni ścieków

Tomasz Zubowicz  
Robert Piotrowski  
Mieczysław. A. Brdys

Napowietrzanie jest podstawowym procesem decydującym o jakości oczyszczania ścieków. Prawidłowy przebieg procesów biologicznych wymaga dostarczenia odpowiedniej ilości tlenu. Zapewnia to optymalne warunki oczyszczania ścieków, dostateczne wymieszanie ścieków z osadem czynnym i zmniejsza główny koszt eksploatacji oczyszczalni ścieków, czyli koszt pompowania powietrza. W artykule zaproponowano sterowanie stężeniem tlenu (Dissolved Oxygen – DO) z wykorzystaniem wieloobszarowego miękoprzełączalnego regulatora PI. Jako metodę przełączania pomiędzy sygnałami sterującymi w poszczególnych obszarach pracy układu wybrano metodę przełączania Takagi-Sugeno-Kanga. Zaprojektowany system sterowania został symulacyjnie zbadany na podstawie rzeczywistych danych z oczyszczalni ścieków w Kartuzach.

**E**fektywna praca złożonego systemu sterowania, jakim jest oczyszczalnia ścieków, wymusza potrzebę stosowania nowoczesnych metod sterowania. Ich zaimplementowanie w istniejącej strukturze jest dużo tańsze niż modernizacja i przebudowa tego rodzaju obiektu.

Jednym z procesów decydujących o jakości oczyszczania ścieków jest napowietrzanie. Do biologicznego oczyszczania ścieków wykorzystuje się bakterie, które zaspokajając swoje potrzeby życiowe zużywają związki chemiczne zawarte w ściekach. Zadaniem oczyszczalni jest zapewnienie warunków dla specjalnie dobranych bakterii, które zoptymalizują procesy rozkładu materii organicznej w ściekach. Dostarczenie odpowiedniej ilości powietrza do reaktora biologicznego zapewnia optymalne warunki oczyszczania ścieków, dostateczne wymieszanie ścieków z osadem czynnym i zmniejsza główny koszt eksploatacji oczyszczalni ścieków, czyli koszt pompowania powietrza. Panuje powszechna opinia, że pożądaną jakość oczyszczania ścieków uzyskuje się zbyt dużym kosztem. Jedną z przyczyn jest nieodpowiedni system sterowania stężeniem tlenu.

Wielkością bezpośrednio oddziałującą na stężenie tlenu jest natężenie dopływu powietrza do reaktora biologicznego. Ilość tego powietrza zależy od sterowania instalacją napowietrzającą (układ dmuchaw, rurociągów, przepustnic i dyfuzorów). W [1] zaproponowano hierarchiczny dwupoziomowy układ sterowania stężeniem tlenu łączący ze sobą reaktor bio-

logiczny i instalację napowietrzającą. Wykorzystywaną technologią sterowania było sterowanie predykcyjne (*Model Predictive Controller*). Uzyskano bardzo obiecujące wyniki.

Nieliniowy charakter obiektu, różne warunki pracy oczyszczalni, silny wpływ zakłóceń (np. nierównomierny dopływ ścieków do oczyszczalni, zmieniający się ładunek zanieczyszczeń) wymuszają zmianę trajektorii referencyjnej stężenia tlenu w ciągu doby. Jest ona wyznaczana przez wyższą warstwę sterowania oczyszczalnią ścieków [2, 3, 4] lub zadawana przez technologa oczyszczalni ścieków. Nadążanie za trajektorią referencyjną tlenu za pomocą zmian natężenia dopływu powietrza jako wielkości sterującej jest już klasycznym zadaniem, które w dalszym ciągu jest przedmiotem badań [1, 5, 6, 7]. Artykuł nie obejmuje problematyki wyznaczania trajektorii referencyjnej stężenia tlenu.

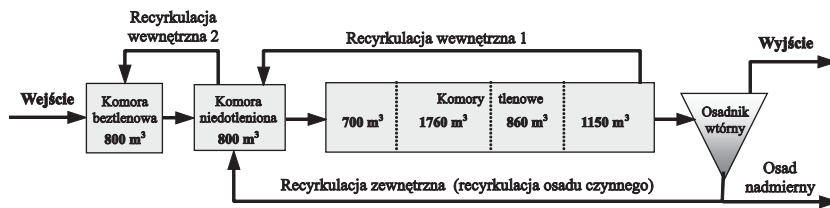
W artykule przedstawione zostanie sterowanie stężeniem tlenu z wykorzystaniem wieloobszarowego miękoprzełączalnego regulatora PI. Niewątpliwą zaletą tego rozwiązania jest możliwość bezpośredniej implementacji przy wykorzystaniu infrastruktury (sprzęt i oprogramowanie) istniejącej w oczyszczalniach ścieków.

## Oczyszczalnia ścieków w Kartuzach i jej model

### Obiekt sterowania

Oczyszczalnia ścieków w Kartuzach jest przykładem typowego obiektu z rodziny przepływowych oczyszczalni ścieków pracujących w technologii osadu czynnego. Zlewnię oczyszczalni stanowi miejska sieć kanalizacyjna. Ścieki z kanalizacji ogólnospławnej miasta są

*mgr inż. Tomasz Zubowicz, dr inż. Robert Piotrowski – Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska, prof. dr hab. inż. Mieczysław. A. Brdys – Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska, Department of Electronic, Electrical and Computer Engineering, The University of Birmingham*



Rys. 1. Schemat technologiczny biologicznej części oczyszczalni ścieków w Kartuzach

doprowadzane do części mechanicznej (krata schodowa, prasa do skratek, piaskownik ze zgarniaczem piasku i tłuszczu). Nadmiar oczyszczonych mechanicznie ścieków przy natężeniach dopływu do oczyszczalni powyżej  $300 \text{ m}^3/\text{h}$  jest kierowany przez przepompownię do zbiorników retencyjnych o łącznej pojemności  $6000 \text{ m}^3$ . Ścieki z tych zbiorników powracają do oczyszczenia w części biologicznej, gdy natężenie dopływu do oczyszczalni spadnie poniżej  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ . W zbiornikach tych zainstalowane są przelewy awaryjne, przez które, w przypadku bardzo dużych dopływów do oczyszczalni, ścieki są kierowane bezpośrednio do odbiornika.

Po oczyszczeniu mechanicznym następuje biologiczne oczyszczanie ścieków w technologii osadu czynnego z procesami nityfikacji, denityfikacji i biologicznej defosfatacji (rys. 1). Jest ono realizowane w bloku biologicznym składającym się z dwóch części. Pierwsza z nich to komora beztlenowa i niedotleniona. W komorze beztlenowej, przy recykulacji mieszaniny ścieków i osadu, następuje biologiczna defosfatacja, a w komorze niedotlenionej, przy recykulacji ścieków ze zbiorników tlenowych i osadu powrotnego z osadników wtórnych, następuje denityfikacja. Drugą część stanowi zblokiowany układ komór: czterech tlenowych oraz osadników wtórnych. W komorach tlenowych zachodzą równoległe procesy denityfikacji i nityfikacji. Biologiczne usuwanie fosforu jest wspomagane przez proces chemicznego strącania siarczanem (VI) żelaza (III) (PIX), dozowanym do piaskownika i drugiej komory tlenowej.

Napowietrzane ścieki trafiają do dwóch poziomych osadników wtórnych. Osad jest rozdzielany na osad recykulowany (kierowany do komory niedotlenionej) i osad nadmierny (poddawany określonym procesom chemicznym w celu bezpiecznego składowania i wykorzystania w rolnictwie). Oczyszczone ścieki z osad-

ników wtórnych są odprowadzane do odbiornika (rzeka Klasztorna Struga).

## Model biologicznej oczyszczalni ścieków w Kartuzach

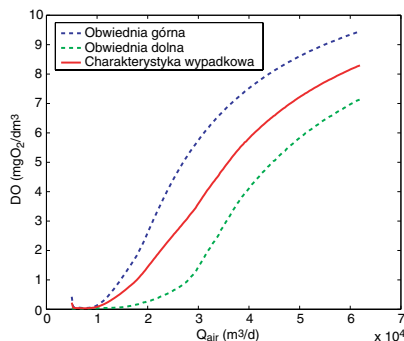
Procesy biochemiczne zachodzące podczas oczyszczania ścieków są bardzo złożone. Wraz z rozwojem prac związanych z oczyszczalniami ścieków zaczęto budować modele osadu czynnego. Do najpopularniejszych z nich należą modele typu ASM (*Activated Sludge Model*). Do dnia dzisiejszego najbardziej rozwijanymi modelami są modele ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3 i ASM3 BIO-P. W artykule wykorzystany został model ASM2d [8]. Uwzględnia on 21 procesów biochemicznych. Publikacje są dowodem na to, że model ASM2, jak i jego poprawiona i rozszerzona wersja – model ASM2d – odznaczają się dobrymi właściwościami predykcyjnymi procesów usuwania związków azotu oraz fosforu [9] w wyniku kalibracji niewielu z licznych parametrów charakteryzujących oba modele.

Model biologicznej części oczyszczalni ścieków w Kartuzach zbudowano w komercyjnym środowisku symulacyjnym Simba [10]. Następnie wykonano identyfikację ilościowych i jakościowych parametrów oraz przeprowadzono kalibrację modelu. Ostatnim krokiem była walidacja całego modelu. Została ona przeprowadzona z wykorzystaniem innych danych niż użyte wcześniej. Zarówno w procesie kalibracji, jak i walidacji modelu wykorzystano algorytmy genetyczne. Użytko wysoką dokładność modelu i jego użyteczność dla celów projektowania układu sterowania.

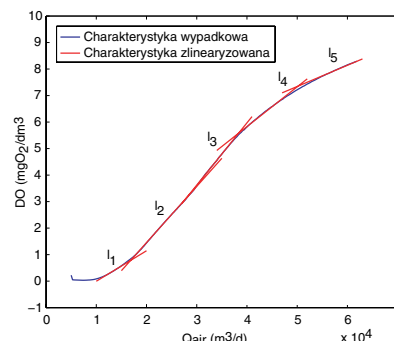
## Układ sterowania stężeniem tlenu

W pracy [3] zaproponowano zastosowanie regulatora PI w celu uwzględnienia zakłóceń oraz klasyczną adaptację parametrów ze względu na nieliniową dynamikę DO. W artykule wykorzystuje się pierwszą z wymienionych cech regulatora PI. Natomiast aby uniknąć kłopotliwej ciągłej adaptacji parametrów, stosuje się wielkoobszarowy regulator rozmyty z lokalnymi regulatorami PI o stałych parametrach. Obiekt sterowania jest jedna komora tlenowa.

Przeprowadzono badania symulacyjne związane z warunkami tlenowymi w oczyszczalni ścieków w Kartuzach. Wyznaczono charakterystykę statyczną stężenia tlenu DO w zależności od natężenia przepływu powietrza  $Q_{\text{air}}$  (rys. 2). W przypadku braku modelu analogiczną charakterystykę można uzyskać na podstawie eksperymentu przeprowadzonego na rzeczywistym obiekcie.



Rys. 2. Charakterystyka procesu napowietrzania



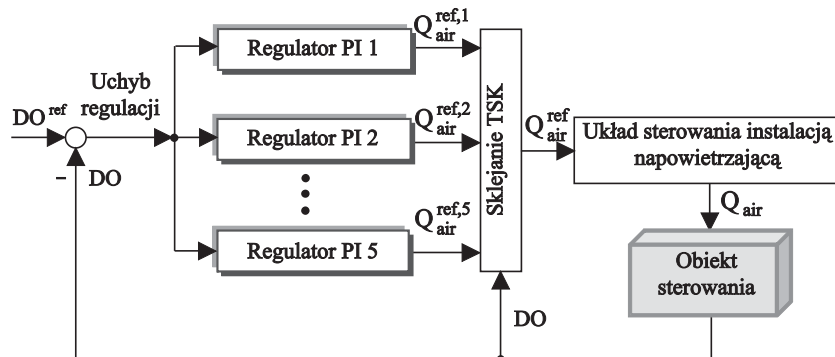
Rys. 3. Wypadkowa i zlinearyzowana charakterystyka procesu napowietrzania

Rozważany proces ma charakter nieliniowy. Dodatkowo zaobserwowano, że kształt krzywej zależy od zakłóceń działających na proces. Silny wpływ wywierają zmiany natężenia dopływu ścieków do oczyszczalni  $Q$ , chemicznego zapotrzebowania na tlen  $ChZT$  i azotu ogólnego  $N$ , natomiast słabo oddziałuje zmiana fosforu ogólnego  $P$ . W wyniku badań zdecydowano się wyznaczyć wypadkową postać charakterystyki. Dodatkowo przedstawiono dolną i górną obwiednię w celu zobrazowania zakresu zmian charakterystyki ze względu na zakłócenia (rys. 2).

Następnie przeprowadzono wieloodcinkową linearyzację. Wypadkową i zlinearyzowaną charakterystykę statyczną  $DO(Q_{air})$  przedstawiono na rys. 3. Charakterystykę nieliniową aproksymowano pięcioma odcinkami liniowymi. Wybór takiej liczby odcinków wynikał z zachowania dokładnego kształtu krzywej w szerokim obszarze pracy, w tym w szczególności dla stężenia tlenu około  $2 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$ .

Nieliniowy proces sterowania stężeniem tlenu został podzielony na pięć lokalnych procesów liniowych. Jako metodę rozwiązania problemu sterowania tymi procesami zdecydowano się na implementację regulatora wieloobszarowego PI (jeden regulator typu PI dla każdego obszaru). Analiza układu pod kątem twardego przełączania pomiędzy poszczególnymi regulatorami pokazała wady tego rozwiązania. Gwałtowne zmiany wartości sygnału sterującego powodowały znaczne pogorszenie jakości sterowania. W związku z tym zdecydowano się na miękkie przełączanie z użyciem technologii rozmytych. Jako metodę przełączania pomiędzy sygnałami sterującymi w poszczególnych obszarach pracy układu wybrano metodę przełączania Takagi – Sugeno – Kanga (TSK) [11].

Schemat rozważanego układu sterowania został przedstawiony na rys. 4. Wielkości  $DO^{ref}(t)$  i  $Q_{air}^{ref}(t)$  są



Rys. 4. Schemat układu sterowania stężeniem tlenu

Tab. 1. Dostrojone nastawy regulatorów strefowych

Wielkość	Regulator I	Regulator II	Regulator III	Regulator IV	Regulator V
Region	Odcinek I1	Odcinek I2	Odcinek I3	Odcinek I4	Odcinek I5
$T_s$ [s]	30				
$Kt_i$ [1/s]	0,04	0,02	0,01	0,03	0,02
$Kp_i$	16,83	10,54	6,44	14,98	11,29
$aw_i$	9,67	9,6	9,79	15,88	16,22

trajektoriami zadanymi dla  $DO(t)$  i  $Q_{air}(t)$ . Zakłada się idealny układ sterowania instalacją napowietrzającą, zatem zachodzi  $Q_{air}^{ref}(t) = Q_{air}(t)$ . Szczegółowa synteza sterowania z uwzględnieniem instalacji napowietrzającej została przedstawiona w [1].

Pięć lokalnych regulatorów PI o transmitancji operatorowej  $G_{pi}^i(z) = K_p \cdot (1 + K_i \cdot \frac{1}{1-z^{-1}})$ ,  $i \in \overline{1,5}$  wypracowuje sygnały sterujące  $Q_{air}^{ref,i}(t)$ ,  $i=1, \dots, 5$ . Następnie budowany jest sygnał  $Q_{air}^{ref}(t)$  na podstawie sygnały sterujące pięciu pracujących równolegle regulatorów strefowych mnożone są przez wagi (zależne od  $DO$ )  $w_i(DO)$ ,  $i=1, \dots, 5$ , związane z wartościami przypisanej każdemu z nich funkcji przynależności zgodnie z zależnością:

$$Q_{air}^{ref}(t) = \frac{\sum_{i=1}^5 w_i(DO) \cdot Q_{air,i}^{ref}(t)}{\sum_{i=1}^5 w_i(DO)} \quad (1)$$

Każdy z lokalnych regulatorów to regulator dyskretny z ograniczoną szybkością narastania i amplitudą sygnału wyjściowego, wyposażony dodatkowo w pętlę przeciwdziałającą zjawisku nasycenia urządzeń wykonawczych (*anti-windup*).

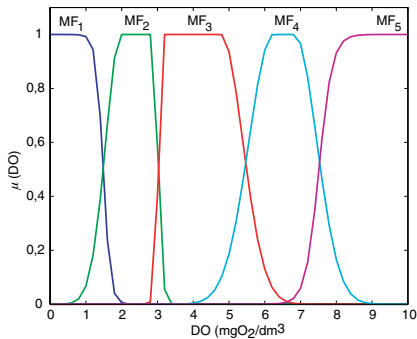
W wyniku szczegółowych badań eksperymentalnych wstępnie dobrano wartości nastaw (współczynnik wzmocnienia proporcjonalnego  $K_p$ , współczynnik wzmocnienia całkowania  $K_i$  i wzmocnienie pętli kompensacyjnej  $aw$ ) poszczególnych regulatorów strefowych. Wyniki działania układu regulacji, dla tak dobranych nastaw regulatorów strefowych spowodowały, że zdecydowano się na dostrojenie tych parametrów znanymi powszechnie metodami inżynierskimi. Końcowe wyniki są pokazane w tab. 1. Proces dostrojenia parametrów regulatorów strefowych znacznie poprawił jakość ich działania.

Następnie wybrano funkcje przynależności (funkcje sigmoidalne i Gaussa) do reprezentacji poszczególnych podzbiorów rozmytych dla regulatorów strefowych i wstępnie dobrano ich parametry. Na rys. 5. przedstawiono podział przestrzeni rozważań na strefy należące do poszczególnych funkcji przynależności.

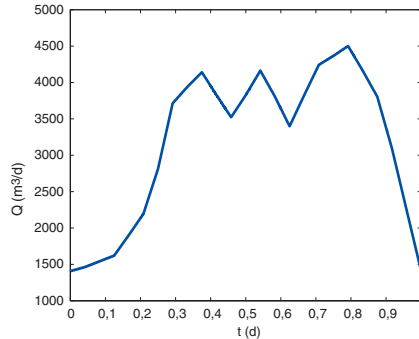
Wykorzystując algorytmy genetyczne dostrojono parametry funkcji przynależności. Jako kryterium przyjęto podstawowe wskaźniki jakości działania układu regulacji. Również i w tym przypadku używano poprawę jakości sterowania.

## Badania symulacyjne

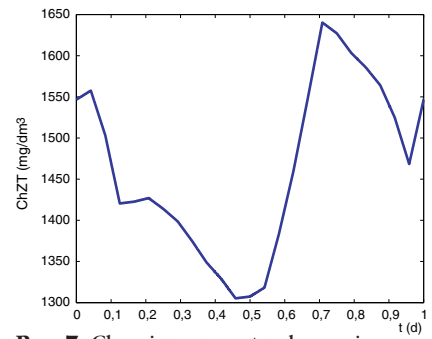
Do przedstawienia wyników działania układu sterowania stężeniem tlenu wykorzystano model części biologicznej oczyszczalni ścieków w Kartuzach zbudowany w komercyjnym środowisku symulacyjnym



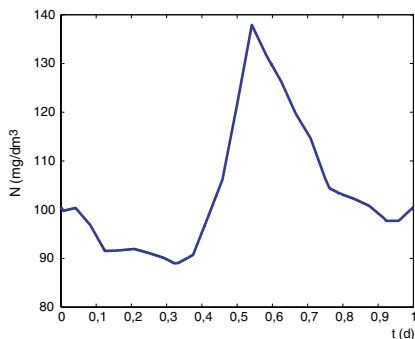
Rys. 5. Funkcje przynależności dla poszczególnych regulatorów strefowych



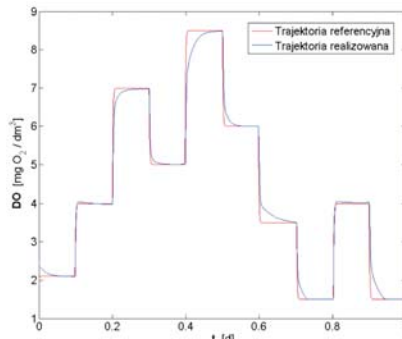
Rys. 6. Natężenie dopływu ścieków do oczyszczalni



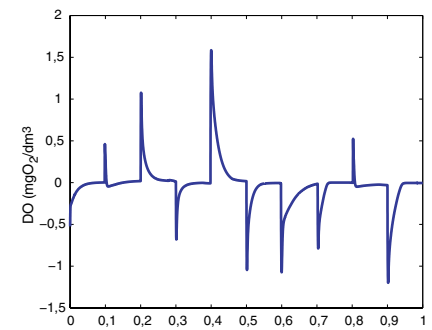
Rys. 7. Chemiczne zapotrzebowanie na tlen na wejściu do oczyszczalni



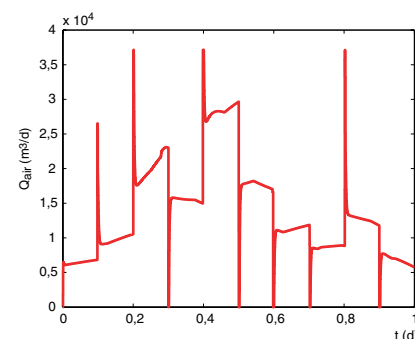
Rys. 8. Stężenie azotu ogólnego na wejściu oczyszczalni



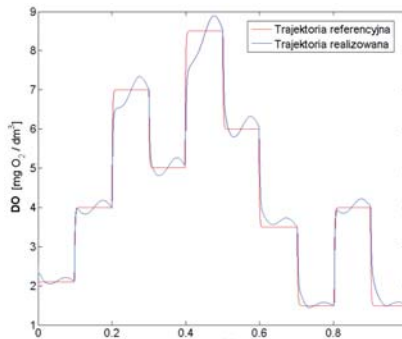
Rys. 9. Wartość zadana i zrealizowana stężenia tlenu w komorze tlenowej



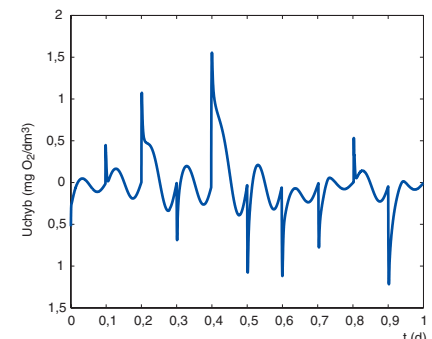
Rys. 10. Błąd sterowania stężeniem tlenu



Rys. 11. Natężenie dopływu powietrza do komory tlenowej 1



Rys. 12. Wartość zadana i zrealizowana stężenia tlenu w komorze tlenowej



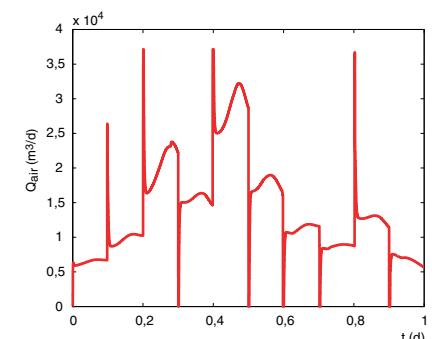
Rys. 13. Błąd sterowania stężeniem tlenu

Simba [10] oraz wieloobszarowy miękko przełączalny regulator PI zaimplementowany w środowisku MATLAB.

Dopływające do oczyszczalni ścieki są scharakteryzowane przez trzy parametry zmienne w czasie:  $Q$ ,  $ChZT$  i  $N$  (rys. 6–8). Ich wartości i zmienność (co do wartości średnich i zakresu) mieszczą się w granicach dotyczących normalnej pracy oczyszczalni ścieków w Kartuzach.

Wyniki sterowania pokazano dla pierwszej komory tlenowej (rys. 9). Zmienne trajektorie referencyjne stężenia tlenu zostały wyznaczone przez wyższą warstwę sterowania oczyszczalni ścieków [4]. Błąd sterowania stężeniem tlenu został przedstawiony na rys. 10, zaś wielkość sterująca (natężenie dopływu powietrza) na rys. 11.

Dla tych samych wejść zakłócających na rys. 12–14 zilustrowano wyniki sterowania stężeniem tlenu przy dodatkowych zakłóceniach w torze pomiarowym stężenia tlenu (nałożony został sygnał o charakterze sinusoidalnym i parametrach: amplituda 10 % bieżącej wartości pomiaru, częstotliwość 10 cykli na dobę).



Rys. 14. Natężenie dopływu powietrza do komory tlenowej 1



Można zaobserwować, że układ sterowania umożliwia nadążanie za trajekcją referencyjną  $DO$  z dużą dokładnością przy występowaniu silnych zakłóceń oddziaływujących na obiekt sterowania (rys. 9–10). Dodatkową zaletą takiego rozwiązania jest możliwość pracy układu sterowania w pełnym zakresie zmian  $DO$  z taką samą jakością sterowania. Można również zauważyć, że wartości natężenia dopływu powietrza mogą zostać zrealizowane przez pracujące w oczyszczalni ścieków układy wykonawcze. Pojawienie się dodatkowych zakłóceń w torze pomiarowym stężenia tlenu nieznacznie pogorszyło wyniki sterowania (rys. 12–14). Jest to normalna cecha układu sterowania pracującego w pętli sprzężenia zwrotnego, której wpływ można kompensować.

## Podsumowanie

Koszty związane z napowietrzaniem ścieków są głównym składnikiem kosztów związanych z eksploatacją oczyszczalni ścieków. Zaprezentowana w artykule metoda sterowania stężeniem tlenu z zastosowaniem wieloobszarowego regulatora typu PI, wykorzystuje standardowe opomiarowanie i może być zaimplementowana w infrastrukturze sprzętowej istniejącej w oczyszczalni ścieków. Strojenie wszystkich parametrów rozważanego układu sterowania może być przeprowadzone z wykorzystaniem klasycznych metod inżynierskich. Wdrożenie opisanego rozwiązania pozwoli zwiększyć efektywność pracy systemu, poprawi jakość sterowania i obniży koszty eksploatacji. Może to stanowić atrakcyjną propozycję dla osób odpowiedzialnych za bieżącą pracę tego typu obiektów. W najbliższej przyszłości planowana jest budowa zdecentralizowanego układu sterowania stężeniem tlenu dla czterech komór tlenowych, implementacja układu nadzorującego podział powietrza między poszczególnymi komorami tlenowymi oraz analiza stabilności przedstawionego w artykule układu sterowania.

## Bibliografia

1. Piotrowski R., Brdyś M.A., Konarczak K., Duzinkiewicz K., Chotkowski W.: *Hierarchical dissolved oxygen control for activated sludge processes*. Control Engineering Practice, Vol. 16, Issue 1, 2008. pp. 114–131.
2. Olsson G., Newell R.: *Wastewater Treatment Systems. Modelling, Diagnosis and Control*. IWA Publishing, London 1999.
3. Yoo C.K., Lee H.K., Beum Lee I.: *Comparison of process identification methods and supervisory control in the full scale wastewater treatment plant*. 15th IFAC World Congress, Barcelona, July 21–26, 2002.
4. Brdyś M.A., Grochowski M., Gmiński T., Konarczak K., Drewa M.: *Hierarchical predictive control of integrated wastewater systems*. Control Engineering Practice, Vol. 16, Issue 6, 2008. pp. 751–767.

5. Brdyś M.A., Diaz-Maiquez J.: *Application of fuzzy model predictive control to the dissolved oxygen concentration tracking in an activated sludge process*. Proc. of the 15th IFAC World Congress, Barcelona, July 21–26, 2002.
6. Sanchez A., Katebi M.R.: *Predictive control of dissolved oxygen in an activated sludge wastewater treatment plant*. Proc. European Control Conference ECC'2003, Cambridge, UK 2003.
7. Gerksić S., Vrečko D., Hvala N.: *Improving oxygen concentration control in activated sludge process with estimation of respiration and scheduling control*. Water Science Technology, Vol. 53, No. 4–5, 2006. pp. 282–291.
8. Henze M., Gujer W., Mino W., Matsuo T., Wentzel M.C., Marais G.v.R.: *Activated Sludge Model No. 2. Scientific and Technical Report No.3*, IAWQ, London 1995.
9. Brdyś M.A., Chang T., Konarczak K.: *Estimation of wastewater treatment plant state for model predictive control of N-P removal at medium time scale*. IFAC 10th Symposium Large Scale Systems: Theory and Applications, Osaka, July 26–28 2004, (sesja prozsjona).
10. Simba. User's guide. <http://simba.ifak.eu/simba/> 2005.
11. Yaochu Jin: *Advanced Fuzzy Systems Design and Applications*. Physica – Verlag. A Springer – Verlag Company. 2002. ■