

**Robert PIOTROWSKI, Adam MOJSIEWICZ**  
POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

## Nieliniowy regulator predykcyjny w sterowaniu instalacją napowietrzającą

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@ely.pg.gda.pl

Mgr inż. Adam MOJSIEWICZ

W roku 2009 ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej na kierunku Automatyka i Robotyka. Obecnie słuchacz studiów doktoranckich na tym samym wydziale. Zainteresowania naukowe związane są systemami sterowania urządzeniami i procesami technologicznymi.



e-mail: adammoj@gmail.com

### Streszczenie

Napowietrzanie ścieków to jeden z najważniejszych i najdroższych procesów biologicznego oczyszczania ścieków. Wzrost wymagań związanych ze stopniem oczyszczenia ścieków wymusza poszukiwanie nowych rozwiązań w zakresie technologii oraz w sterowaniu tymi procesami. W artykule zbudowano dynamiczny model instalacji napowietrzającej, a następnie zaprezentowano nowy sposób sterowania tym obiektem. Jako metodę wybrano technologię sterowania predykcyjnego. W badaniach symulacyjnych przedstawiono wyniki sterowania instalacją pracującą w oczyszczalni ścieków w Nowym Dworze Gdańskim.

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

### Nonlinear model predictive controller for aeration system control

#### Abstract

Aeration is an important and expensive activity that is carried out during wastewater treatment plant operation. New environmental policies and regulations enforce more efficient operation of the wastewater treatment plant. Aeration is used in different kind of plant operations. Biological processes carried out in wastewater treatment plant require the dissolved oxygen concentration to have sufficiently high level to maintain microorganisms in activated sludge. The paper presents design, implementation and simulation of a novel type of nonlinear model predictive controller for aeration system tracking in a wastewater treatment plant. The controller is applied to the wastewater treatment plant in Nowy Dwor Gdański. The paper is divided into 6 sections. Section 1 contains a short introduction to the issues of this paper. The structure of the wastewater treatment plant in Nowy Dwor Gdański and the aeration system are described in Section 2. Section 3 presents synthesis of the dynamical nonlinear model of the aeration system. A nonlinear model predictive controller is derived in Section 4. Simulation tests and discussion of the obtained results are described in Section 5. Section 6 concludes the paper.

**Keywords:** mathematical modelling, dynamic systems, nonlinear systems, predictive control, aeration, biological wastewater treatment.

### 1. Wstęp

W ostatnich latach jedną z najpopularniejszych i najbardziej efektywnych metod oczyszczania ścieków jest oczyszczanie biologiczne oparte na reakcjach biochemicznych [1, 3, 4]. Procesy te (np. nityfikacja, denityfikacja, defosfatacja) są złożone i wzajemnie powiązane. Do ich prawidłowego przebiegu potrzebny jest tlen – niezbędny do życia bakteriom „pracującym” przy oczyszczaniu ścieków. Sztuczne doprowadzenie powietrza, bez względu na technologię, zapewnia drobnoustrojom odpowiednią ilość tlenu, a utrzymanie ścieków w stałym ruchu zapobiega opadaniu bakterii na dno, gdzie brak tlenu spowodowałby ich obumarcie.

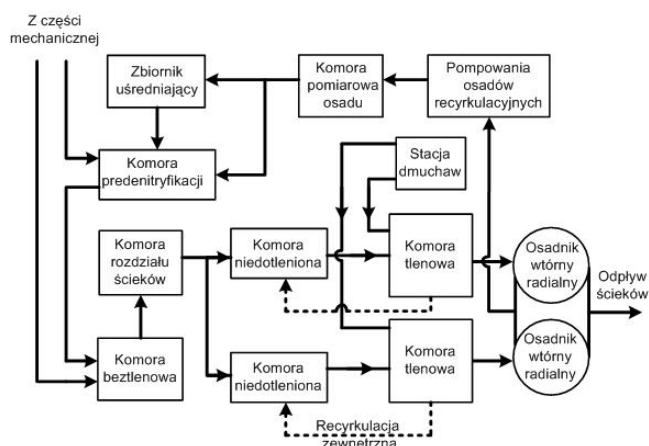
Głównym składnikiem kosztów związanych z działalnością operacyjną oczyszczalni ścieków jest koszt napowietrzania, czyli dostarczenia powietrza do bioreaktora. Zbyt niskie wartości tlenu wpływają na spowolnienie procesu nityfikacji. Ponadto nie warto dostarczać większych ilości tlenu, niż wymagają tego procesy technologiczne, gdyż nie wzrasta wydajność procesu, a tylko niepotrzebnie rosną koszty. Ostatnia z sytuacji może dodatkowo spowodować przenoszenie tlenu do strefy niedotlenionej wraz z recykulowanymi ściekami (pogarszając tym samym proces denityfikacji) oraz rozbijanie kłaczków osadu czynnego w wyniku zbyt intensywnego mieszania.

Implementacja efektywnych algorytmów sterowania w istniejącej strukturze urządzeniowo – pomiarowej powinna optymalizować koszty prowadzenia procesów, oraz spełniać wymagania na jakość ścieków na wyjściu z oczyszczalni.

## 2. Oczyszczalnia ścieków w Nowym Dworze Gdańskim

### 2.1. Struktura i ogólna charakterystyka

W zależności od sposobu rozwiązania oczyszczalni ścieków wyróżnić można różne układy technologiczne oczyszczania ścieków [1], [3]. Oczyszczalnia ścieków w Nowym Dworze Gdańskim jest oczyszczalnią mechaniczno-biologiczną z osadem czynnym (rys. 1).



Rys. 1. Schemat technologiczny oczyszczalni ścieków  
Fig. 1. Technological scheme of wastewater treatment plants

Ścieki dostarczane są do oczyszczalni siecią kanalizacyjną oraz dowożone wozami asenizacyjnymi. Część mechaniczna służy do wstępnego oczyszczania ścieków. Składa się ona z krat, piaskownika z odfuszczacem oraz separatora piasku. Następuje usuwanie zanieczyszczeń stałych, zanieczyszczeń mechanicznych, mineralnych (zwanych ogólnie piaskiem), zbieranie mieszaniny tłuszcz-

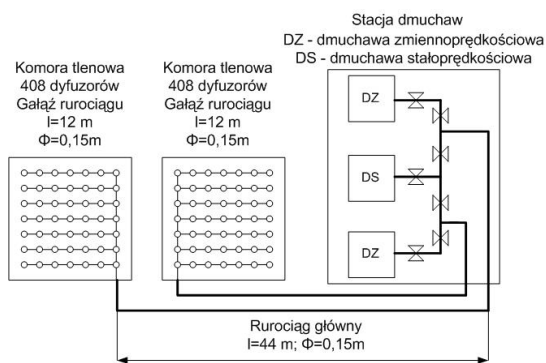
czów, olejów pochodzenia organicznego oraz mineralnego, usuwanie zanieczyszczeń organicznych nierozpuszczonych. Ta część oczyszczalni nie jest przedmiotem artykułu.

Z części mechanicznej ścieki przepływają do części biologicznej, w której najważniejszym elementem jest reaktor biologiczny (połączone zbiorniki) wraz z instalacją napowietrzającą. Oczyszczaniu biologicznemu poddawana jest pozostała w ściekach zawiesina organiczna oraz nieorganiczne związki chemiczne. W pierwszej kolejności ścieki trafiają do komory beztlenowej. Przewidziano również możliwość doprowadzania ścieków do komory predenitryfikacji osadu recykulowanego (wymieszanie osadu czynnego ze ściekami), z której osad czynny dopływa do komory beztlenowej. W komorze rozdziału ścieków następuje podział ścieków na dwa ciągi technologiczne. Każdy z nich składa się z komory niedotlenionej, komory tlenowej i radialnego osadnika wtórnego. Do prawidłowego przebiegu procesów nityfikacji w komorze tlenowej niezbędny jest tlen. W związku z tym powietrze ze stacji dmuchaw poprzez układ rurociągowy jest w sposób ciągły doprowadzane do tych komór. Pomiędzy komorami nityfikacyjnymi i denitryfikacyjnymi występują recyrkulacje wewnętrzne do zawracania ścieków i osadu czynnego. W osadnikach następuje rozdział osadu na recykulowany, który jest zawracany i trafia do komory predenitryfikacyjnej oraz nadmierny, który jest usuwany.

## 2.2. Instalacja napowietrzająca – opis obiektu

Napowietrzanie ścieków może odbywać się na różne sposoby, jako: napowietrzanie mechaniczne (za pomocą urządzeń z pionowym lub poziomym wałem) – stosowane głównie w małych oczyszczalniach ścieków, napowietrzanie tlenem o wysokiej czystości – rzadko wykorzystywane na dużą skalę ze względu na wysokie koszty oraz napowietrzanie sprężonym powietrzem. Ostatnia metoda dzieli się ponadto ze względu na wielkość pęcherzyków na napowietrzanie: grubopęcherzykowe, średniopęcherzykowe i drobnopęcherzykowe [5]. W rozważanej oczyszczalni ścieków stosuje się drobnopęcherzykowe napowietrzanie sprężonym powietrzem.

Instalacja napowietrzająca składa się z trzech dmuchaw wporowych i dwóch niezależnych od siebie rurociągowych dostarczających powietrze do dwóch komór tlenowych (rys. 2).



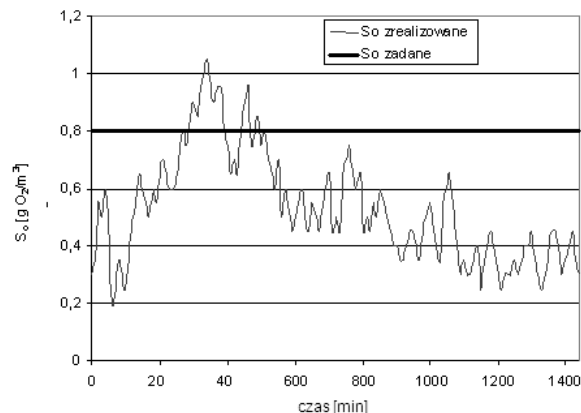
Rys. 2. Schemat instalacji napowietrzającej  
Fig. 2. Configuration of the aeration system

Każdy z tych rurociągowych 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.

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 powyższym w dalszej części artykułu zostanie przyjęta następująca konfiguracja: dmuchawa zmiennoprędkościowa i jedna gałąź rurociągu.

## 2.3. Sterowanie instalacją napowietrzającą

W sterowaniu instalacją napowietrzającą stosuje się wiedzę ekspercką i regulatory typu PI. Podobnie jest w rozważanej oczyszczalni ścieków. Bieżąca wartość stężenia tlenu w komorach tlenowych mierzona jest za pomocą sond tlenowych. Jest to jedyna wielkość mierzona związana z napowietrzaniem ścieków. Algorytm sterowania wypracowuje wartości sterowań w oparciu o uchyb pomiędzy trajektorią zadaną stężenia tlenu a trajektorią realizowaną. Wartości sterowań są przekazywane do falowników, które sterują prędkością obrotową dmuchaw. Wyniki sterowania są pokazane na rys. 3.



Rys. 3. Bieżące sterowanie stężeniem tlenu  
Fig. 3. Results of present dissolved oxygen control

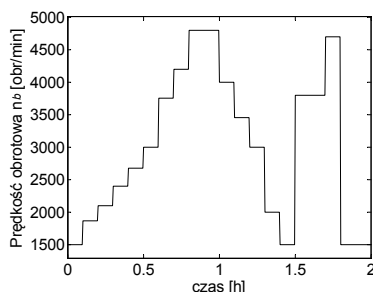
Duże błędy sterowania mogą spowodować, że procesy nityfikacyjne praktycznie przestaną zachodzić (zbyt niskie stężenie tlenu) lub zwiększone stężenie tlenu nie tylko nie poprawi efektywności procesu, ale zwiększy niepotrzebnie koszty. Stosowany układ sterowania jest daleki od zadowalającego, ponieważ słabo realizuje wartość zadaną stężenia tlenu rozpuszczonego i pochłania zbyt dużo energii. Potrzebne wydaje się zatem zastosowanie bardziej zaawansowanych algorytmów sterowania.

## 3. Dynamiczny model matematyczny instalacji napowietrzającej

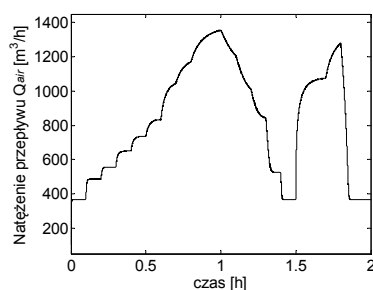
Szczegóły dotyczące ogólnej metodologii związanej z modelowaniem instalacji napowietrzającej można znaleźć w [6]. Model ten został dopasowany do struktury opisanej instalacji napowietrzającej. Budowa modelu oparta była na wiedzy teoretycznej, danych rzeczywistych z obiektu oraz danych katalogowych urządzeń pracujących w oczyszczalni ścieków. Instalację napowietrzającą (rys. 2) zamodelowano traktując jej poszczególne elementy jako równoważne elementom elektrycznym. Charakterystyki dmuchaw zostały zlinearyzowane 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. Ponieważ rezystancja tego rurociągu może zostać pominięta, zatem gałąź zamodelowano jako pojemność przepływającego powietrza (od głównego rurociągu do dyfuzorów) z nieliniową rezystancją dyfuzorów i hydrostatycznym źródłem ciśnienia. Model był również z powodzeniem użyty do budowy i badań scentralizowanego układu sterowania stężeniem tlenu [7]. Brak pomiarów uniemożliwił weryfikację modelu na obiekcie rzeczywistym. Przeprowadzone zatem zostaną badania symulacyjne. Inne prace z tej tematyki [2, 6] są dowodem poprawności przyjętej metodologii.

Na rys. 4-7 można zaobserwować jak zmieniają się poszczególne wartości natężeń przepływów i ciśnienia w zależności od zmiany prędkości dmuchawy. W przypadku natężenia przepływu powietrza  $Q_c$  w rurociągu głównym widać wpływ jego pojemności na uzyskane wyniki. Charakterystyki natężenia przepływu powie-

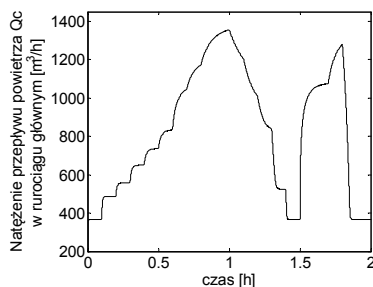
trza  $Q_{air}$  do komór tlenowych i spadku ciśnienia w głównym rurociągu  $\Delta p_c$  wynikają z wpływu pojemności tego rurociągu na całą instalację napowietrzającą.



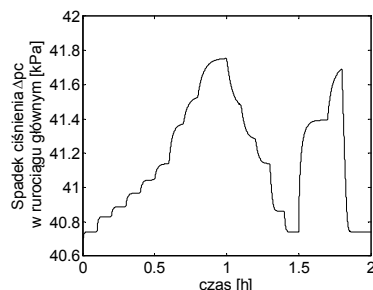
Rys. 4. Prędkość obrotowa dmuchawy  $n_b$   
Fig. 4. Speed of the blower  $n_b$



Rys. 5. Natężenie przepływu powietrza  $Q_{air}$   
Fig. 5. Air flow  $Q_{air}$



Rys. 6. Natężenie przepływu powietrza w głównym rurociągu  $Q_c$   
Fig. 6. Air flow at the main pipe  $Q_c$



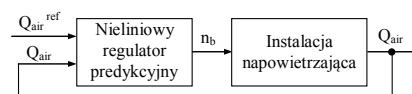
Rys. 7. Spadek ciśnienia w głównym rurociągu  $\Delta p_c$   
Fig. 7. Pressure drop across at the main pipe  $\Delta p_c$

#### 4. Nieliniowy predykcyjny układ regulacji

Algorytmy predykcyjne należą do grupy zaawansowanych metod sterowania. Ich działanie opiera się na wykorzystaniu wiedzy o przyszłym zachowaniu się wielkości regulowanej, w celu wyznaczenia wartości wielkości sterujących. Przewidując przyszłe wartości wielkości regulowanych korzysta się z modelu matema-

tycznego sterowanego obiektu, wcześniejszych wartości sygnału sterującego oraz wartości sygnałów zakłócających. Specyficzne cechy tych algorytmów spowodowały, że wiele nich zostało z sukcesem wdrożonych w rozwiązaniach przemysłowych [8].

Na rys. 8 pokazano strukturę zaprojektowanego układu regulacji.



Rys. 8. Struktura układu regulacji  
Fig. 8. Structure of the control system

Korzystając z nieliniowego modelu układu napowietrzania (Sekcja 3), zbudowano nieliniowy dynamiczny regulator predykcyjny. W projektowanym algorytmie sterowania predykcyjnego sygnałem sterującym jest prędkość obrotowa dmuchawy  $n_b$ .

Ograniczenie na minimalną i maksymalną wartość  $n_b$ :

$$n_{b, \min} \leq n_b(k+i|k) \leq n_{b, \max} \quad (1)$$

gdzie:  $n_{b, \min} = 1500$  obr/min,  $n_{b, \max} = 4800$  obr/min,  $i = 1, \dots, N$ .

Ograniczenia na przyrost wartości sygnałów sterujących wynoszą:

$$\begin{aligned} n_b(k+i+1|k) - n_b(k+i|k) &\leq \Delta n_{b, \max} \quad \text{dla } \Delta n_b \geq 0 \\ n_b(k+i+1|k) - n_b(k+i|k) &\geq -\Delta n_{b, \max} \quad \text{dla } \Delta n_b \leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:  $\Delta n_{b, \max} = 200$  obr/min,

Dodatkowymi ograniczeniami są ograniczenia wynikające z modelu instalacji napowietrzającej.

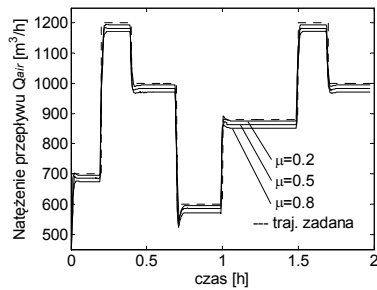
Wartości sterowań wyznaczane są w dyskretnych bieżących i następnym chwilach czasu w oparciu o model, poprzez minimalizację następującej funkcji kryterialnej:

$$J = \min \left\{ \sum_{i=1}^{H_p} (Q_{air}^{ref}(k+i|k) - Q_{air}(k+i|k))^2 + \mu \cdot \sum_{i=1}^{H_p} p_c(k+i|k) \right\} \quad (3)$$

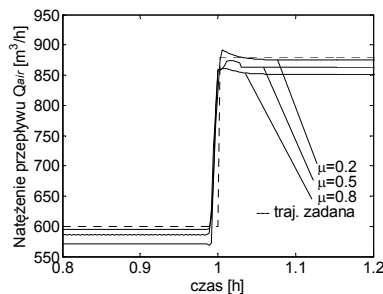
Pierwszym składnikiem jest uchyb regulacji, czyli różnica między trajektorią zadaną  $Q_{air}^{zad}$  a rzeczywistą  $Q_{air}$ . Zużycie energii elektrycznej pracy dmuchaw (koszt dostarczenia powietrza do komory tlenowej) związane jest z ciśnieniem panującym w głównym rurociągu  $p_c$  – im niższe ciśnienie tym mniejsze zużycie energii elektrycznej. W związku z tym drugim składnikiem funkcji celu jest  $p_c$ . Parametr  $\mu$  decyduje jaką wagę przykładają się do minimalizacji błędów nadążania za trajektorią zadaną, a jaką dla zmniejszenia ilości energii potrzebnej do pracy dmuchaw. Wartości parametru  $\mu$  zostały wyznaczone empirycznie, a ich wpływ został zbadany w następnej sekcji.  $H_p$  oznacza horyzont predykcyjny.

#### 5. Testy symulacyjne i analiza uzyskanych wyników

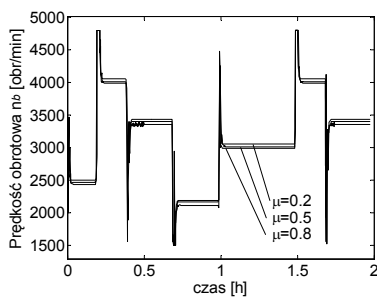
Testy symulacyjne zostały przeprowadzone w środowisku Matlab/Simulink, z wykorzystaniem biblioteki Optimization Toolbox i metody SQP (Sequential Quadratic Programming). W pierwszej kolejności zbadano wpływ zmiany kroku predykcyjnego  $T$  i horyzontu predykcyjnego  $H_p$  na czas obliczeń. Po analizie, uwzględniając dynamikę obiektu, wartości błędów nadążania, intensywność zmian prędkości obrotowej dmuchawy, czas rozwiązywania jednego zadania optymalizacji oraz całkowity czas symulacji przyjęto wartości:  $T=10s$  i  $H_p=5$ . Następnie przeprowadzono badania układu regulacji (rys. 9-14) dla różnych wartości parametru  $\mu$  (zależność 3).



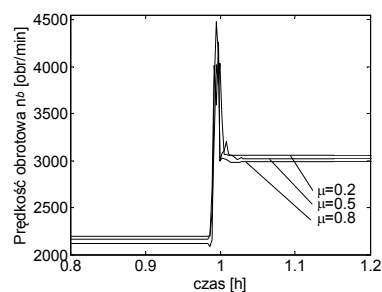
Rys. 9. Natężenie przepływu powietrza  $Q_{air}$   
Fig. 9. Air flow  $Q_{air}$



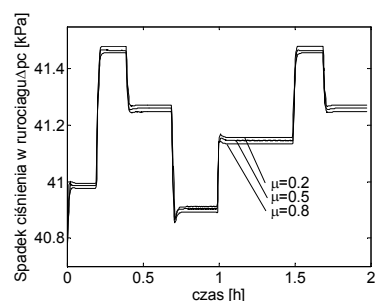
Rys. 10. Natężenie przepływu powietrza  $Q_{air}$  – powiększenie  
Fig. 10. Air flow  $Q_{air}$  – zoom



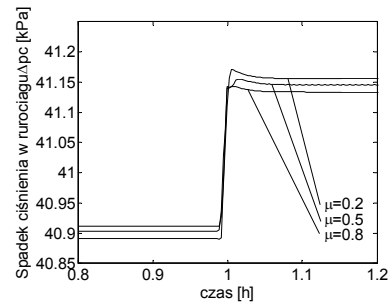
Rys. 11. Prędkość obrotowa dmuchawy  $n_b$   
Fig. 11. Speed of the blower  $n_b$



Rys. 12. Prędkość obrotowa dmuchawy  $n_b$  – powiększenie  
Fig. 12. Speed of the blower  $n_b$  – zoom



Rys. 13. Spadek ciśnienia w głównym rurociągu  $\Delta p_c$   
Fig. 13. Pressure drop across at the main pipe  $\Delta p_c$



Rys. 14. Spadek ciśnienia w głównym rurociągu  $\Delta p_c$  – powiększenie  
Fig. 14. Pressure drop across at the main pipe  $\Delta p_c$  – zoom

Można zauważyć, że prędkość obrotowa dmuchawy, ciśnienie w głównym rurociągu i natężenie przepływu powietrza zmniejsza się wraz ze wzrostem wagi  $\mu$ . Tym samym maleją koszty napowietrzania, ale nieznacznie rośnie błąd nadążania za trajektorią zadaną. Jest to bezpośrednio związane z postacią funkcji celu (zależność (3)). We wszystkich przypadkach obserwujemy dużą dokładność działania algorytmu sterowania. Zatem możliwe jest zmniejszanie kosztów pompowania powietrza z równoczesnym nadążaniem za trajektorią zadaną z dużą dokładnością. Dodatkowo w zadaniu optymalizacji układu sterowania dąży się do minimalizacji ciśnienia. Obecne sterowanie nie uwzględnia optymalizacji kosztów związanych z napowietrzaniem, a ciśnienie w głównym rurociągu utrzymywane jest na wyższym poziomie, niż to wynikające z rozwiązania zadania optymalizacji. Podobne badania przeprowadzono dla innych „trudniejszych” trajektorii zadaných uzyskując analogiczne wyniki.

## 6. Podsumowanie

W artykule rozpatrywane było napowietrzanie ścieków, jeden z najważniejszych i najdroższych procesów zachodzących w biologicznej oczyszczalni ścieków. W oparciu o dokumentację techniczną i dane rzeczywiste zbudowano model instalacji napowietrzającej pracującej w oczyszczalni ścieków w Nowym Dworze Gdańskim. Następnie zaprojektowano nieliniowy predykcyjny układ regulacji tą instalacją. Przeprowadzono badania symulacyjne uzyskując obiecujące wyniki, zarówno jeśli chodzi o dokładność nadążania, zużycie energii, jak również czas obliczeń.

## 7. Literatura

- [1] Dymaczewski Z., Oleszkiewicz J.A., Sozański M.M.: Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków. PZITS, Poznań 1997.
- [2] 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.
- [3] Łomotowski J., Szpindor A.: Nowoczesne systemy oczyszczania ścieków. Arkady, Warszawa 1999.
- [4] Miksch K., Sikora J.: Biotechnologia ścieków. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [5] Mueller J.A., Boyle W.C., Pöpel H.J.: Aeration: Principles and Practice. CRC Press, Boca Raton 2002.
- [6] Piotrowski R., Brdyś M.A., Konarczak K., Duzinkiewicz K., Chotkowski W.: Hierarchical dissolved oxygen control for activated sludge processes. Control Engineering Practice, Vol. 16 (2008), No. 1, pp. 114-131.
- [7] Piotrowski R., Brdyś M.A., Miotke D.: Centralized dissolved oxygen tracking at wastewater treatment plant: Nowy Dwor Gdański case study. Proc. of the 12th IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications, Villeneuve d'Ascq, July 11-14, 2010.
- [8] Tatjewski P.: Advanced control of industrial processes: structures and algorithms. Springer-Verlag, London Limited 2007.