

Napowietrzanie w oczyszczalni ścieków – od modelu do sterowania

Robert Piotrowski

Jednym z podstawowych procesów w oczyszczalni ścieków jest napowietrzanie. Aby nastąpił proces biologicznego rozkładu związków organicznych, trzeba do układu dostarczyć tlen, który jest niezbędny bakteriom do życia [2]. Zmiany ilości wymaganego powietrza w czasie zależą od ładunku zanieczyszczeń w ściekach w komorach tlenowych, które określają pożądane wartości stężenia tlenu w tych komorach. Stężenie tlenu powinno wynosić nie mniej niż $2 \text{ g O}_2/\text{m}^3$. Przy jego spadku poniżej $1 \text{ g O}_2/\text{m}^3$ nityfikacja przebiega wyraźnie wolniej (przy zawartości ok. $0,2 \text{ g O}_2/\text{m}^3$ praktycznie już nie zachodzi), zaś wzrost stężenia tlenu powyżej $2 \text{ g O}_2/\text{m}^3$ nie zwiększa wydajności procesu, a wiąże się jedynie ze wzrostem zużycia energii, jak również może spowodować przenoszenie tlenu do strefy niedotlenionej wraz z recyrkulowanymi ściekami oraz rozbijanie kłaczków osadu czynnego w wyniku zbyt intensywnego mieszania. Sztuczne doprowadzenie powietrza dostarcza drobnoustrojom odpowiednią ilość tlenu, a utrzymanie ścieków w stałym ruchu zapobiega opadaniu osadu czynnego na dno, gdzie brak tlenu spowodowałby ich obumarcie. Jednocześnie właściwe napowietrzanie zmniejsza ogólne koszty oczyszczania ścieków, które stanowią ok. 60% całkowitych kosztów eksploatacji oczyszczalni ścieków.

W zależności od wielkości oczyszczalni i technologii oczyszczania ścieków stosuje się różne sposoby napowietrzania, a mianowicie: napowietrzanie mechaniczne, napowietrzanie tlenem o wysokiej czystości i napowietrzanie sprężonym powietrzem (grubopęcherzykowe, średniopęcherzykowe i drobnopęcherzykowe). W artykule rozważane jest drobnopęcherzykowe napowietrzanie sprężonym powietrzem jako sposób efektywny i często stosowany w przepływowych oczyszczalniach ścieków. Układem dostarczającym powietrze jest instalacja napowietrzająca złożona z dmuchaw, rurociągów, przepustnic i dyfuzorów. Mniejsze pęcherzyki są lepsze, ponieważ lepiej rozpuszczają się w ściekach i rozchodzą się w większej ich objętości. Jednocześnie zanurzenie dyfuzorów na większej głębokości poprawia transfer tlenu do ścieków. Związane jest to z dłuższym kontaktem pomiędzy ściekami i pęcherzykami powietrza oraz wyższą koncentracją nasycenia tlenem przy wyższym ciśnieniu.

Artykuł opiera się na wynikach kilkuletnich prac prowadzonych przez autora i kolegów z Katedry Inżynierii Systemów Sterowania.

Obiekt sterowania i jego model

Obiektem zainteresowania jest mechaniczno-biologiczno-chemiczna oczyszczalnia ścieków w Kartuzach. Jest to przykład typowej oczyszczalni przepływowej. W pracy rozważana jest tylko część biologiczna (rys. 1).

Stosowaną metodą oczyszczania jest technologia osadu czynnego z procesami nityfikacji, denityfikacji i biologicznej defosfatacji. Oczyszczanie biologiczne jest realizowane w bloku biologicznym składającym się z dwóch części. Pierwsza z nich

Streszczenie: W artykule przedstawiono dynamiczny model instalacji napowietrzającej, a następnie opracowano nieliniowy predykcyjny układ sterowania tym obiektem. Przedstawiono wyniki sterowania instalacją pracującą w oczyszczalni ścieków w Kartuzach.

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

AERATION IN THE WASTEWATER TREATMENT PLANT – FROM MODEL TO CONTROL

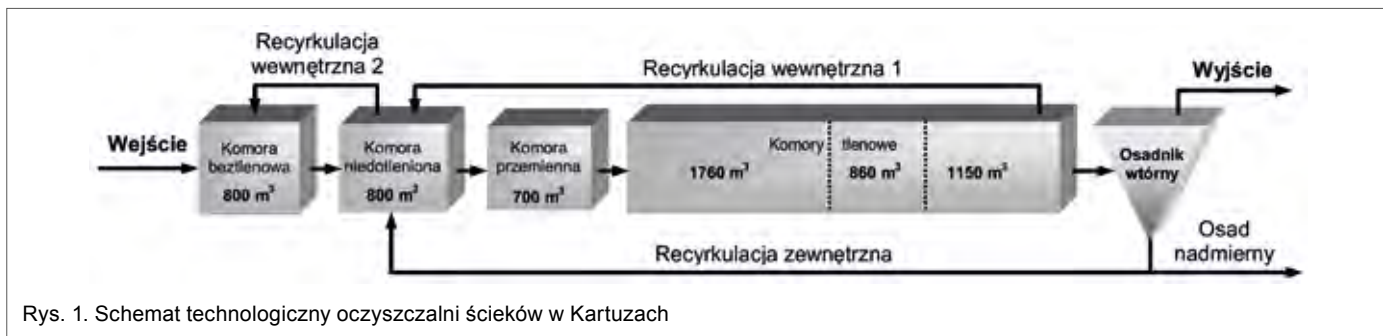
Abstract: The paper addresses control design for an aeration system in the wastewater treatment plant. The nonlinear predictive controller is developed and its performance is investigated. The controller is applied to wastewater treatment plant at Kartuzy.

Keywords: mathematical modeling, dynamic systems, nonlinear systems, predictive control, aeration, biological wastewater treatment plant.

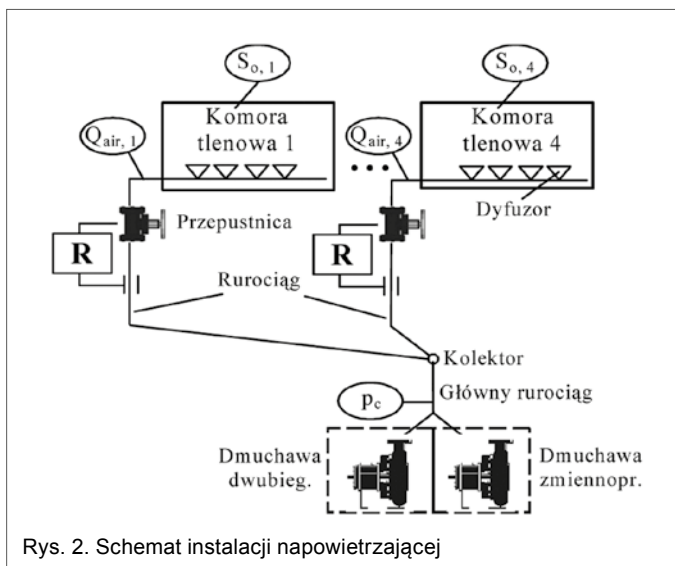
to komora beztlenowa i niedotleniona. Drugą część stanowi zblokowany układ komór: przemiennej i tlenowych oraz osadników wtórnych. W komorze beztlenowej, przy recyrkulacji mieszaniny ścieków i osadu, następuje biologiczna defosfatacja, a w komorze niedotlenionej, przy recyrkulacji ścieków ze zbiorników tlenowych i osadu powrotnego, następuje denityfikacja. W komorze przemiennej zachodzą równoległe procesy denityfikacji i nityfikacji, zaś w komorach tlenowych-nityfikacja. Po napowietrzaniu w komorach tlenowych ścieki trafiają do dwóch osadników wtórnych. Osad z tych komór jest rozdzielany na: osad recyrkulowany (kierowany do komory niedotlenionej) i osad nadmierny (poddawany dalszej przeróbce w celu jego późniejszego wykorzystania np. w rolnictwie). Oczyszczone ścieki są odprowadzane do odbiornika.

Część biologiczną zamodelowano z wykorzystaniem danych rzeczywistych w oparciu o model ASM2d (ang. *Activated Sludge Model*). Rozwój modeli rodziny ASM rozpoczął się w latach 80. zeszłego stulecia i trwa do dzisiaj. Model ASM2d obejmuje procesy usuwania węgla organicznego i azotu oraz przemiany z udziałem bakterii wykorzystujących zdolność magazynowania fosforu w biomacie komórkowej. Szczegółową charakterystykę modeli ASM można znaleźć w [3]. Model ASM2d oczyszczalni ścieków w Kartuzach zaimplementowano i zweryfikowano w środowisku Matlab/Simulink.

W artykule rozważana jest instalacja napowietrzająca pracująca w oczyszczalni ścieków w Kartuzach (rys. 2). Powietrze dostarczane jest do trzech komór tlenowych, komory przemiennej



Rys. 1. Schemat technologiczny oczyszczalni ścieków w Kartuzach

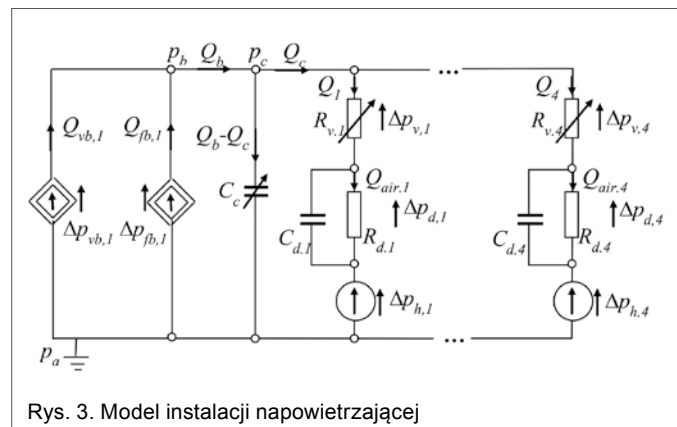


Rys. 2. Schemat instalacji napowietrzającej

nej (jeżeli pracuje jako komora tlenowa) i piaskownika (niewielkie ilości). W dalszej części pracy zakłada się, że napowietrzane są cztery komory (trzy tlenowe i przemienna). Dla uproszczenia nazewnictwa komora przemienna będzie traktowana jako komora tlenowa i nazywana komorą tlenową 1. W układzie zastosowano dwie dmuchawy: dwubiegowa (prędkość na pierwszym biegu: 1500 obr./min; prędkość na drugim biegu: 3000 obr./min) i zmiennoprędkościowa z regulacją falownikową prędkości (w zakresie 1200–2900 obr./min). Dmuchawy pracują równolegle na wspólny kolektor i posiadają ograniczenia technologiczne, wśród których najważniejszym jest liczba załączeń danej dmuchawy w jednostce czasu. Dmuchawa wyłączona musi pozostać w tym stanie przez ok. 10 minut. Sprężone powietrze dochodzi do kolektora, a stamtąd do czterech gałęzi instalacji napowietrzających i wydostaje się na zewnątrz w postaci drobnych pęcherzyków poprzez dyfuzory umieszczone przy dnie komór tlenowych (na głębokości ok. 0,5 m od dna). Na czterech gałęziach instalacji napowietrzającej, o zmniejszających się średnicach, zainstalowano przepustnice kątowe, które charakteryzują się silnie nieliniową zależnością spadku ciśnienia od natężenia przepływu powietrza dla różnych kątów otwarcia (w zakresie 0–90°). W układzie zastosowano dyfuzory membranowe o nieliniowej charakterystyce spadku ciśnienia od natężenia przepływu powietrza. Dyfuzory te otwierają się przy spadku ciśnienia wynoszącym 2,25 kPa. Liczba dyfuzorów w poszczególnych komorach wynosi odpowiednio: 282, 915, 303 i 323.

Modelując instalację napowietrzającą, skorzystano z analogii pneumatyczno-elektrycznej i potraktowano ją jak układ elektryczny (rys. 3). Budowa modelu oparta była na wiedzy teoretycznej, danych rzeczywistych z obiektu oraz danych

katalogowych urządzeń pracujących w oczyszczalni ścieków. Dmuchawy zostały potraktowane jak źródła prądowe. Ich charakterystyki zlinearyzowano metodą najmniejszych kwadratów. Główny rurociąg zamodelowano jako nieliniową pojemność przepływającego powietrza z pomijalnie małą wartością rezystancji. Poszczególne gałęzie składają się z nieliniowych modeli przepustnic i dyfuzorów oraz rurociągu łączącego główny rurociąg z dyfuzorami. Po badaniach okazało się, że rezystancja tego rurociągu może zostać pominięta, zatem zamodelowano ją jako pojemność przepływającego powietrza (od głównego rurociągu do dyfuzorów). Ponadto zamodelowano hydrostatyczne źródło ciśnienia związane z oporami przepływu powietrza w ściekach. Na koniec połączono wszystkie elementy modelu,



Rys. 3. Model instalacji napowietrzającej

gdzie:

- P_a – ciśnienie atmosferyczne;
- $Q_{fb,1}$ – natężenie przepływu powietrza na wyjściu z dmuchawy stałoprędkościowej;
- $Q_{vb,1}$ – natężenie przepływu powietrza na wyjściu z dmuchawy zmiennoprędkościowej;
- $\Delta p_{fb,1}, \Delta p_{vb,1}$ – spadek ciśnienia powietrza na dmuchawach;
- p_b – ciśnienie powietrza w węźle dmuchaw;
- Q_b – natężenie wypływu powietrza ze stacji dmuchaw;
- p_c – ciśnienie powietrza w głównym rurociągu;
- Q_c – natężenie przepływu powietrza przez główny rurociąg;
- C_c – pojemność głównego rurociągu;
- Q_1-Q_4 – natężenie przepływu powietrza przez przepustnicę;
- $R_{v,1}-R_{v,4}$ – rezystancja przepustnicy;
- $\Delta p_{v,1}-\Delta p_{v,4}$ – spadek ciśnienia na przepustnicy;
- $Q_{air,1}-Q_{air,4}$ – natężenie dopływu powietrza do komory tlenowej;
- $C_{d,1}-C_{d,4}$ – pojemność przepływającego powietrza w rurociągu łączącym kolektor z dyfuzorami;
- $R_{d,1}-R_{d,4}$ – rezystancja dyfuzora;
- $\Delta p_{d,1}-\Delta p_{d,4}$ – spadek ciśnienia na dyfuzorach;
- $\Delta p_{h,1}-\Delta p_{h,4}$ – ciśnienie hydrostatyczne w komorze tlenowej.

Model opisano nieliniowymi równaniami algebraicznymi i różniczkowymi (1) – (3).

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{p_c}{V_c} \left[\sum_{i \in \{1,2\}} Q_{b,i} (p_c, x_b, n_{fb}, n_{vb}) - \sum_{j \in \{1,2,3,4\}} Q_j \right] \quad (1)$$

$$\frac{dQ_{air,j}}{dt} = \frac{1}{R_{d,j} \cdot C_{d,j}} \cdot (Q_j - Q_{air,j}); \quad j \in \{1,2,3,4\} \quad (2)$$

$$p_c = \Delta p_{d,j}^{otwarty} + R_{d,j} \cdot Q_{air,j} + \Delta p_{v,j} (Q_j, \varphi_j) + \Delta p_{h,j} + p_a; \quad j \in \{1,2,3,4\} \quad (3)$$

gdzie:

x_b – stan dmuchawy (załączona/wyłączona);

n_{fb} – prędkość dmuchawy stałoprędkościowej;

n_{vb} – prędkość dmuchawy zmiennoprędkościowej;

$\Delta p_{d,1}^{otwarty} - \Delta p_{d,4}^{otwarty}$ – spadek ciśnienia otwarcia dyfuzora;

$\varphi_1 - \varphi_4$ – kąt otwarcia przepustnicy.

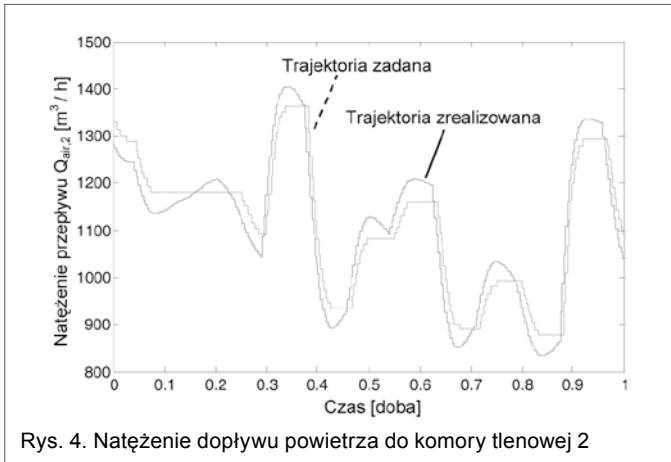
Szczegóły związane z metodologią modelowania instalacji napowietrzającej wraz z opisem wszystkich zależności matematycznych i badaniami symulacyjnymi można znaleźć w [5]. Inne prace z tej tematyki przeprowadzone dla innej oczyszczalni ścieków są dowodem poprawności przyjętej metodologii [4].

Układ sterowania instalacją napowietrzającą

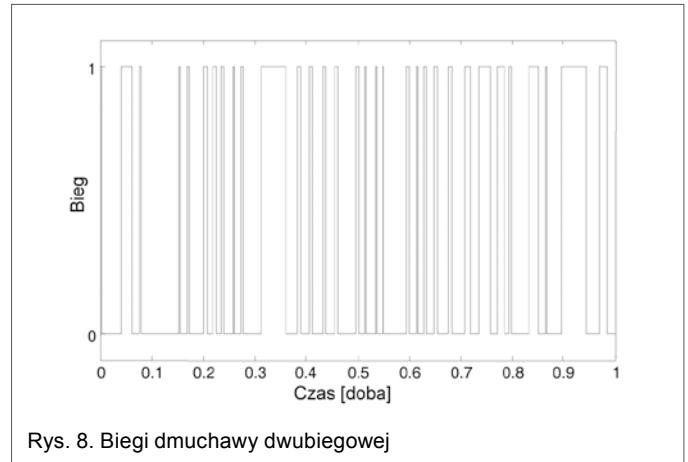
Instalacja napowietrzająca jest obiektem nieliniowym i stosowane klasyczne metody sterowania oparte na wiedzy eksperckiej i regulatorach PI, w szerokim zakresie zmian zapotrzebowania na powietrze, nie przynoszą pożądanych efektów. Sterowanie instalacją napowietrzającą ma na celu dostarczenie wymaganej ilości powietrza, a co za tym idzie – zapewnienie odpowiedniej wartości stężenia tlenu w komorach tlenowych. Wielkościami mierzonymi są najczęściej: ciśnienie w głównym rurociągu p_c , natężenia przepływu powietrza w gałęziach instalacji napowietrzającej Q_{air} oraz stężenie rozpuszczonego tlenu w poszczególnych komorach tlenowych S_o (rys. 2). Dwie pętle regulacji (sterowanie załączaniem/wyłączaniem x_b i prędkością obrotową dmuchaw n_b w celu utrzymania stałego ciśnienia p_c oraz sterowanie stopniem otwarcia przepustnic φ w celu dostarczenia wymaganej ilości powietrza Q_{air} , a dzięki temu zapewnienia wymaganego poziomu stężenia tlenu S_o) pracują niezależnie. Podejście takie generuje sytuacje, w których zbyt duża wartość stężenia tlenu powoduje tłumienie przepływu powietrza przez zamykanie przepustnic, a tym samym naraża na niepotrzebny wzrost kosztów związanych z napowietrzaniem. W sytuacji gdy tlenu jest za mało, nie można dopompować powietrza ze względu na stałą wartość ciśnienia p_c , które nie zależy od stężenia tlenu S_o . Jednocześnie często ciśnienie to musi być na tyle duże, aby w każdym przypadku obciążenia oczyszczalni (ilościowym i jakościowym) możliwe było dostarczenie potrzebnej ilości powietrza. W związku z powyższym zaprojektowany zostanie nowy sposób sterowania z wykorzystaniem regulatora predykcyjnego.

reklama

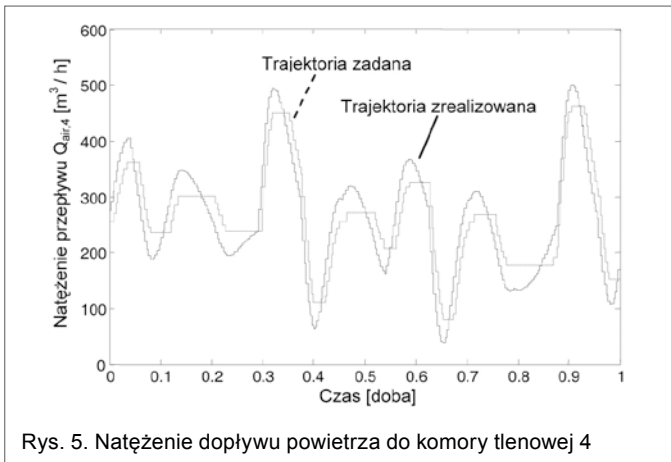




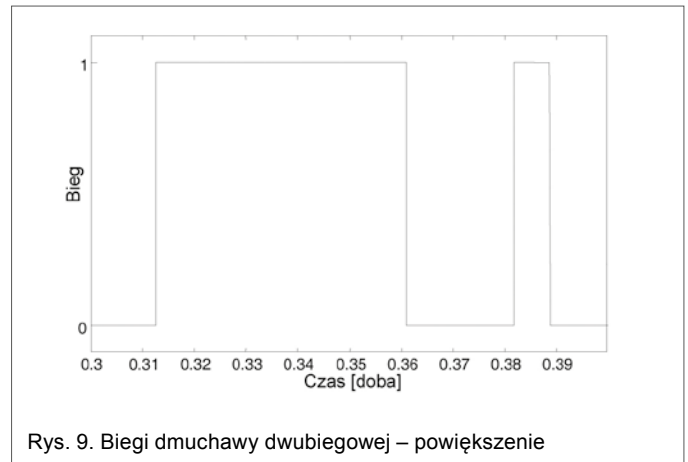
Rys. 4. Napięcie dopływu powietrza do komory tlenowej 2



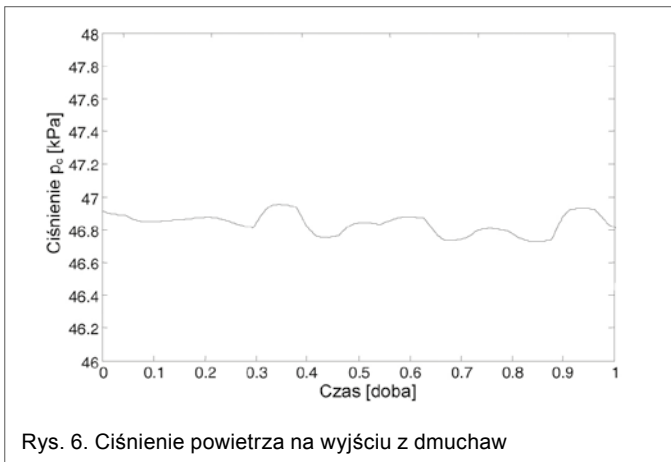
Rys. 8. Biegi dmuchawy dwubiegowej



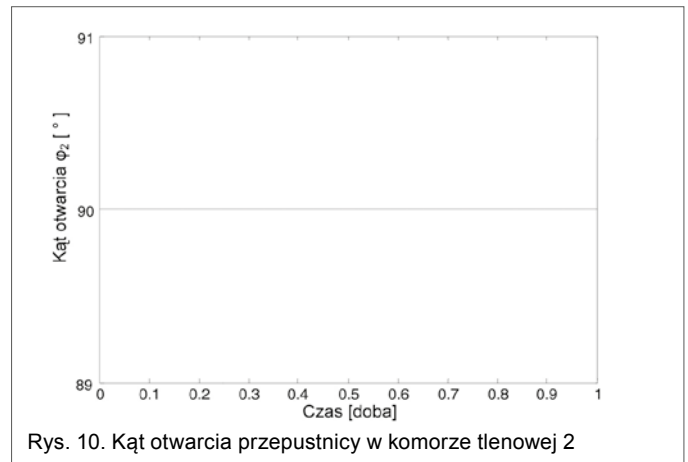
Rys. 5. Napięcie dopływu powietrza do komory tlenowej 4



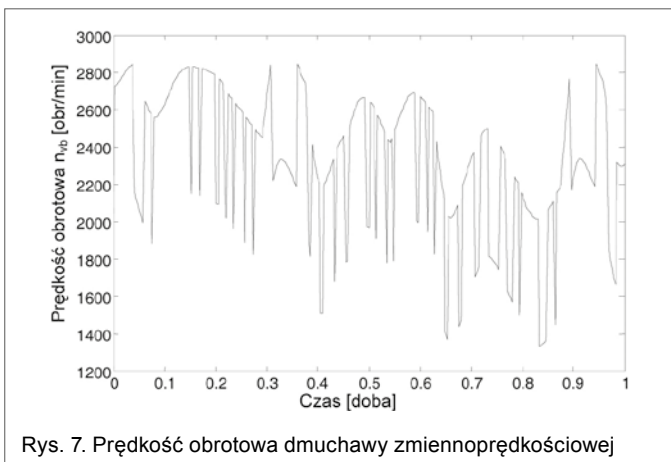
Rys. 9. Biegi dmuchawy dwubiegowej – powiększenie



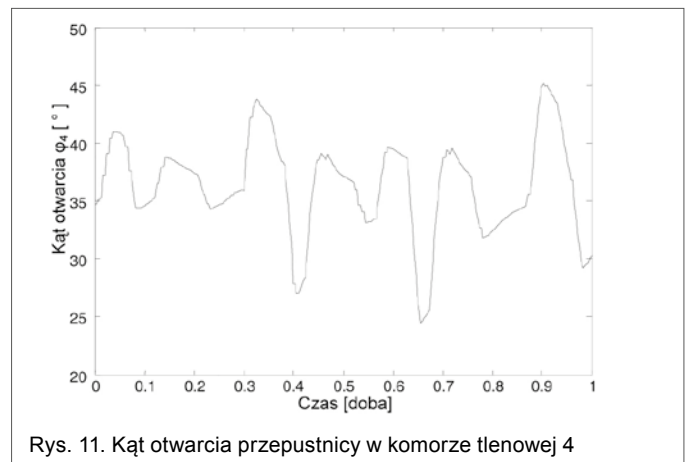
Rys. 6. Ciśnienie powietrza na wyjściu z dmuchaw



Rys. 10. Kąt otwarcia przepustnicy w komorze tlenowej 2



Rys. 7. Prędkość obrotowa dmuchawy zmiennoprędkościowej



Rys. 11. Kąt otwarcia przepustnicy w komorze tlenowej 4

Algorytmy predykcyjne (ang. *Model Predictive Control* – MPC) pojawiły się w latach 80. zeszłego stulecia. 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 matematycznego sterowanego obiektu, wcześniejszych wartości sygnału sterującego oraz wartości sygnałów zakłócających (przeszłych, teraźniejszych i ewentualnie przyszłych). Specyficzne cechy tych algorytmów spowodowały, że wiele rodzajów algorytmów MPC zostało z sukcesem wdrożonych w rozwiązaniach przemysłowych [6].

Korzystając z modelu instalacji napowietrzającej (patrz rozdział 2), zbudowano układ sterowania w oparciu o nieliniowy hybrydowy regulator predykcyjny z optymalizacją hybrydową ze względu na zmienne mieszane (ciągłe i dyskretne) związane z dmuchawami.

Zadaniem układu sterowania instalacją napowietrzającą jest generacja trajektorii sterowania dmuchawami (ustalenie harmonogramu pracy dmuchaw – wyznaczenie trajektorii prędkości obrotowej dmuchawy z falownikiem oraz rodzaju biegu dmuchawy biegowej) i regulacja stopnia otwarcia przepustnic, tak aby zapewnić wymagane natężenie dopływu powietrza.

W algorytmie sterowania uwzględniono następujące ograniczenia: równość przepływu powietrza generowanego przez dmuchawy i zużytego do napowietrzania, równość spadku ciśnienia na dmuchawach, równość spadku ciśnienia na dyfuzorach i przepustnicach dla wszystkich gałęzi instalacji napowietrzającej.

Korzystając z modelu instalacji napowietrzającej opisanego zależnościami (1) – (3) dla stanu ustalonego, mamy

$$\frac{dQ_{air,j}}{dt} = 0, \text{ z czego wynika: } Q_j = Q_{air,j}. \text{ Ponadto } \frac{dp_c}{dt} = 0.$$

Tak więc model ten może być przedstawiony w postaci [5]:

$$\sum_{i \in \{1,2\}} Q_{b,i}(p_c, x_b, n_{fb}, n_{vb}) - \sum_{j \in \{1,2,3,4\}} Q_{air,j} = 0 \quad (4)$$

$$p_c = \Delta p_{d,j}^{otwarty} + R_{d,j} \cdot Q_{air,j} + \Delta p_{v,j}(Q_{air,j}, \varphi_j) + \Delta p_{h,j} + p_a; \quad j \in \{1,2,3,4\} \quad (5)$$

Dodatkowe ograniczenia są następujące:

$$0 \leq p_c \leq p_c^{max}; \quad Q_{air,j} \geq 0; \quad (6)$$

$$\varphi_j^{min} \leq \varphi_j \leq \varphi_j^{max}; \quad j \in \{1,2,3,4\}$$

Zmiennymi decyzyjnymi są: $x_{b,i}$, $n_{fb,i}$, $n_{vb,i}$ oraz p_c , $Q_{air,j}$, φ_j .

Zadanie optymalizacji jest zadaniem nieliniowym mieszanym (ang. *Mixed Integer Nonlinear Problem* – MINLP) zawierającym binarne zmienne stanu, które wskazują, czy dmuchawa jest



załączona czy wyłączona. Zamodelowano je z użyciem zmiennych specjalnego uporządkowania typu SOS (ang. *Special Order Set*). Ponadto w celu uwzględnienia ograniczenia na częstotliwość załączeń dmuchaw zaprojektowano model dynamiki ich stanu.

Celem sterowania jest minimalizacja zużycia energii związanej z pracą dmuchaw – zależność (7). W stanie ustalonym jest ono proporcjonalne do ciśnienia w głównym rurociągu p_c :

$$J = \sum_{i=1}^{H_p} \left[\eta \cdot p_c(k+i|k) + \sum_{j \in \{1,2,3,4\}} \left\{ Q_{air,j}^{ref}(k+i|k) - Q_{air,j}(k+i|k) \right\}^2 \right] \quad (7)$$

gdzie:

H_p – horyzont predykcji;

$Q_{air,1}^{ref}, Q_{air,4}^{ref}$ – trajektoria referencyjna natężenia przepływu powietrza.

Współczynnik η w (7) dotyczy taryfy elektrycznej i jest związany z zużyciem energii. Drugi człon w funkcji celu (7) opisuje błąd nadążania natężenia dopływu powietrza.

Ze względu na nieliniowe funkcje w zmiennych ciągłych i całkowitoliczbowych opisujące funkcje ograniczeń w zadaniu optymalizacji predykcijnej układu sterowania, została przeprowadzona linearyzacja tego zadania, a w szczególności przeprowadzono linearyzację modelu dmuchaw, częstotliwości załączeń dmuchaw i charakterystyk przepustnic [5].

Badania symulacyjne i analiza wyników

Badania symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem zintegrowanego środowiska Matlab/Simulink i Gams. Dopływające do oczyszczalni ścieki zostały scharakteryzowane przez cztery parametry: zmienne natężenie dopływu ścieków i chemiczne zapotrzebowanie na tlen oraz stałe wartości azotu i fosforu ogólnego.

Na rys. 4 i 5 (dla dwóch wybranych komór tlenowych) widać dokładne nadążanie za trajekcją zadaną Q_{air}^{ref} i wyznaczoną przez układ sterowania Q_{air} . Ciśnienie p_c zmienia się w niewielkim zakresie (rys. 6), gdyż przepustnice pracują w obszarze praktycznie zerowych spadków ciśnień. Ze względu na silnie nieliniową charakterystykę, to one głównie decydują o ciśnieniu p_c . W zadaniu optymalizacji dąży się do minimalizacji ciśnienia. Obecnie stosowane algorytmy sterowania nie dokonują optymalizacji kosztów związanych z napowietrzaniem, a ciśnienie w głównym rurociągu utrzymywane jest na wyższym poziomie, niż to wynikające z rozwiązania zadania optymalizacji. Brak niektórych danych nie pozwolił na dokładną analizę zużycia energii, ale inne badania związane z oczyszczalnią ścieków w Tczewie pokazały, że zastosowana metoda umożliwia oszczędności rzędu kilkunastu procent [1]. Rys. 7 i 8 przedstawiają odpowiednio pracę dmuchaw: zmiennoprędkościowej i dwubiegowej. Na rys. 9 widać, że ograniczenie na 10-minutowy postój dmuchawy po jej wyłączeniu jest spełnione. Ponadto szybka dynamika stężenia tlenu we wszystkich komorach tlenowych (a przez to również częste zmiany zapotrzebowania na powietrze) wymusza dużą liczbę przełączeń biegów dmuchawy

dwubiegowej. Charakter dopływających ścieków i szeroki zakres zmian prędkości obrotowej dmuchawy zmiennoprędkościowej powodują, że nie ma potrzeby włączania drugiego biegu dmuchawy dwubiegowej. Na rys. 10 i 11 pokazano kąty otwarcia przepustnic w dwóch wybranych komorach tlenowych. Przepustnica w komorze tlenowej 2 jest przez cały czas symulacji otwarta na maksimum (rys. 10), gdyż komora ta jest największa i należy do niej dostarczyć ok. 2–3 razy więcej powietrza niż do pozostałych komór. Pozostałe przepustnice dla otrzymanych kątów otwarcia pracują praktycznie w obszarze zerowych spadków ciśnień. Wyniki związane z kątami otwarcia przepustnic mogą ponadto sugerować, iż moc zainstalowanych dmuchaw jest za duża i wystarczyłyby dmuchawy o mniejszych mocach.

Podsumowanie

W artykule rozważany był jeden z istotnych procesów zachodzących w oczyszczalni ścieków – napowietrzanie ścieków. Zbudowano model instalacji napowietrzającej pracującej w oczyszczalni ścieków w Kartuzach. Następnie zaprojektowano nieliniowy predykcijny układ regulacji tą instalacją. Przeprowadzono badania symulacyjne i pokazano dokładne nadążanie za trajekcją zadaną.

Literatura

- [1] CHOTKOWSKI W., PIOTROWSKI R., KONARCZAK K., BRDYS M.A., DUZINKIEWICZ K., LIDZBARSKI R.: *Optimised control of dissolved oxygen for activated sludge processes under limited pressure measurements condition-Tczew case study*. Proc. of the 1st IFAC International Conference on Technology, Automation and Control of Wastewater and Drinking Water Systems – TiASWiK'02, Gdańsk, June 19–21, 2002.
- [2] DYMACEWSKI Z., OLESZKIEWICZ J.A., SOZAŃSKI M.M.: *Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków*. PZITS, Poznań 1997.
- [3] HENZE M., GUJER W., MINO T., VAN LOOSDRECHT M.C.M.: *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. Scientific and Technical Report No. 9, IAWQ, London 2000.
- [4] KRAWCZYK W., PIOTROWSKI R., BRDYS 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.
- [5] PIOTROWSKI R., BRDYS 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.
- [6] TATJEWSKI P.: *Advanced control of industrial processes: structures and algorithms*. Springer-Verlag, London Limited 2007.

dr inż. Robert Piotrowski – absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (kierunek: Automatyka i Robotyka) (2001 r.). W 2005 r. 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