

## MODEL INSTALACJI NAPONIEWRZAJĄCEJ DLA CELÓW STEROWANIA STUDIUM PRZYPADKU

ADAM SKIBA, ROBERT PIOTROWSKI

*Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Polska,  
e-mail: ad.skiba@gmail.com, r.piotrowski@ely.pg.gda.pl*

Streszczenie. Biologiczne oczyszczanie ścieków stanowi podstawową grupę procesów w oczyszczalni ścieków. Jednym z nich jest napowietrzanie ścieków realizowane z wykorzystaniem instalacji napowietrzającej. Powszechnie uważa się go za jeden z najważniejszych i najdroższych procesów w oczyszczalni ścieków. Model procesu jest potrzebny do szczegółowej jego analizy, zbadania możliwości modyfikacji istniejących lub zastosowania innych metod sterowania. W artykule przedstawiono matematyczny model instalacji napowietrzającej pracującej w oczyszczalni ścieków w Swarzewie. Następnie dokonano jego modyfikacji dla celów sterowania. W badaniach symulacyjnych porównano oba modele i dokonano analizy uzyskanych wyników.

### 1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach realizowane są wielomilionowe inwestycje na budowę nowych oczyszczalni ścieków lub modernizację już istniejących. Ma to związek z dostosowaniem się Polski do zaleceń Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska, w tym ochrony wód. Procesy zachodzące w typowych oczyszczalniach ścieków można podzielić na: mechaniczne, biologiczne i chemiczne. W części mechanicznej następuje usuwanie zanieczyszczeń stałych, mineralnych, organicznych nierozpuszczonych i zbieranie tłuszczów. Powszechnie stosowanymi technologiami biologicznego oczyszczania ścieków są: oczyszczanie beztlenowe, złoża biologiczne i osad czynny. Czasami procesy biologicznego oczyszczania ścieków wspomaga się metodami chemicznymi dodając do ścieków koagulanty, głównie wapno, sole glinu i żelaza [3].

Podstawowym celem biologicznego oczyszczania ścieków jest usunięcie związków azotu i fosforu. Kluczowym procesem tej części oczyszczalni jest napowietrzanie. W biologicznym oczyszczaniu ścieków do zaspokojenia swoich potrzeb życiowych bakterie wykorzystują związki organiczne i nieorganiczne zawarte w ściekach. Celem pracy oczyszczalni jest zapewnienie takich warunków dla specjalnie dobranych bakterii, aby zoptymalizować procesy rozkładu materii organicznej w ściekach. W tym celu trzeba do układu dostarczyć tlen, co wymaga wtłoczenia odpowiedniej ilości powietrza do reaktora biologicznego. Dzięki temu dostarcza się drobnoustrojom odpowiednią ilość tlenu, a utrzymanie ścieków w stałym ruchu, dzięki procesom mieszania, zapobiega opadaniu osadu czynnego na dno, gdzie brak tlenu spowodowałby ich obumarcie. Ponadto zmniejsza się największy koszt operacyjny działalności oczyszczalni ścieków, a mianowicie koszt energii pompowania powietrza.

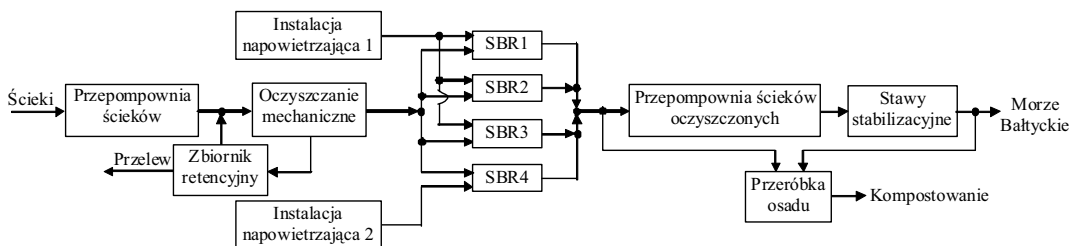
W oczyszczalniach ścieków można wyróżnić następujące metody napowietrzania: mechaniczne, tlenem o wysokiej czystości i sprężonym powietrzem (grubopęcherzykowe, średniopęcherzykowe, drobnopęcherzykowe). Artykuł dotyczy ostatniej z metod (wielkość pęcherzyków powietrza jest mniejsza od 3 mm).

W celu poznania procesu, zbadania możliwości modyfikacji istniejących lub zastosowania innych, nowoczesnych metod sterowania, niezbędny jest model obiektu sterowanego. Wraz z dostępną informacją pomiarową stanowi on punkt wyjścia do dalszych prac. Prace na temat modelowania i sterowania procesem napowietrzania ścieków są realizowane przez pracowników Katedry Inżynierii Systemów Sterowania (Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska) od wielu lat, np. [1, 5, 6, 7, 2, 8].

Oczyszczalnia ścieków w Swarzewie jest mechaniczno-biologiczno-chemiczną oczyszczalnią z reaktorami wsadowymi (ang. Sequencing Batch Reaktor – SBR). Jest to jeden z wielu przykładów systemów tej rodziny. Stosowaną metodą napowietrzania jest drobnopęcherzykowe napowietrzanie sprężonym powietrzem. Jest ono realizowane z wykorzystaniem układu dmuchach, rurociągów i dyfuzorów. Modelowanie instalacji napowietrzającej jest skomplikowane z powodu właściwości fizycznych powietrza jako transponowanego medium. Wcześniejsze prace zaowocowały budową modelu tego obiektu, identyfikacją parametrów, jego weryfikacją i walidacją [4]. W artykule zaproponowano modyfikację tego modelu dla celów sterowania. Przeprowadzono badania symulacyjne, których wyniki porównano z pierwotnym modelem. Na koniec wyciągnięto wnioski z uzyskanych wyników.

## 2. SCHEMAT TECHNOLOGICZNY OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW

Oczyszczalnia ścieków w Swarzewie jest obiektem oczyszczającym średnio rocznie około 6 tys. m<sup>3</sup> ścieków. W części mechanicznej (kraty, sito, piaskownik i separator piasku) następuje oczyszczenie ścieków z zanieczyszczeń stałych i mineralnych, zwanych ogólnie piaskiem. Część chemiczna służy do usuwania związków fosforu ze ścieków z wykorzystaniem koagulantów (rys. 1).



Rys. 1. Ogólny schemat oczyszczalni ścieków w Swarzewie

Szczególne uwagi zostaną zwrócone na część biologiczną związaną z napowietrzaniem ścieków. Cztery reaktory SBR mają kształt walca o średnicy podstawy 30 m i wysokości ponad 7 m, dlatego w każdym z nich mieści się około 5000 m<sup>3</sup> ścieków. Technologią oczyszczania ścieków jest technologia oparta na osadzie czynnym [3]. W przeciwieństwie do oczyszczalni przepływowych, oczyszczalnie typu SBR dostarczają ścieki porcjami, potem następuje ich oczyszczenie i wypływ ścieków oczyszczonych. W oczyszczalni ścieków w Swarzewie każdy SBR pracuje cyklicznie z podziałem na cztery fazy: napełnienie reaktora ściekami, oczyszczenie z procesem napowietrzania, sedymentacja, czyli oddzielenie osadu czynnego od wody nadosadowej i dekantacja wraz z odpływem ścieków oczyszczonych do



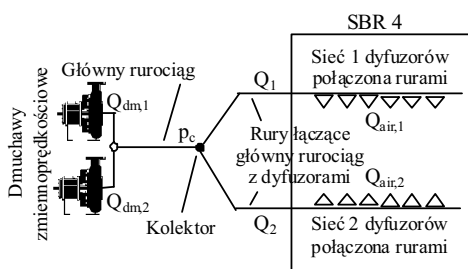
odbiornika. Dostarczanie powietrza do reaktorów odbywa się z wykorzystaniem dwóch niezależnych instalacji napowietrzających. Pierwsza z nich zasila trzy reaktory SBR (1, 2 i 3), druga instalacja obsługuje reaktor SBR 4. Składają się one ze stacji dmuchaw, systemu dyfuzorów oraz łączących je rurociągów. W artykule rozważana jest instalacja napowietrzająca 2.

Oczyszczony ścieki przepompowywane są przez przepompownię do stawów stabilizacyjnych (następuje sedimentacja resztek osadu czynnego i doczyszczanie ścieków przez rozwijające się w stawach glony oraz żywiący się nimi zooplankton), a stamtąd do odbiornika, którym jest Morze Bałtyckie. Nadmiar osadu czynnego po przeróbce jest składowany jako kompost.

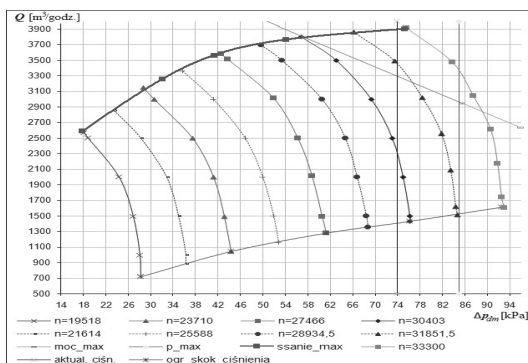
### 3. INSTALACJA NAPOWIETRZAJĄCA – CHARAKTERYSTYKA I MODEL

#### 3.1. Charakterystyka obiektu

Pierwszym elementem instalacji napowietrzającej 2 jest para dmuchaw High Speed Tech ABS typu 2500-1-H-400V, każda o mocy 83 kW. Wyjścia z dmuchaw są połączone ze sobą kolektorem, który dalej przechodzi w główny rurociąg łączący stację z reaktorem SBR 4. Przy reaktorze rurociąg rozgałęzia się na dwie części, z których każda zasila w powietrze sieć rur z dyfuzorami, ostatnimi elementami instalacji (rys. 2).



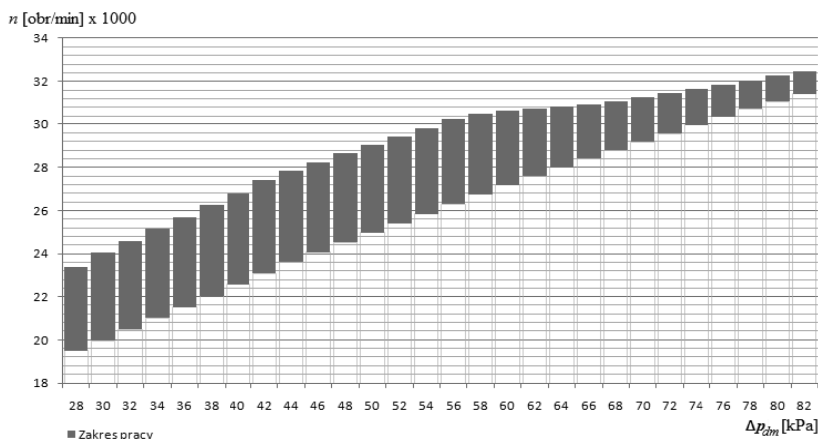
Rys. 2. Schemat instalacji napowietrzającej w oczyszczalni ścieków w Swarzewie



Rys. 3. Charakterystyka pracy dmuchaw

Dmuchawy są przystosowane do pracy w zakresie ciśnień od 60 do 85 kPa, mogą jednak pracować już od 40 kPa. Maksymalny zakres wydajności obejmuje przedział od 1000 do 3700 m<sup>3</sup>/godz. przy ciśnieniu 50 kPa. Przy ciśnieniu najczęściej występującym w układzie napowietrzania (około 70 kPa) zakres ten wynosi od 1250 do 3200 m<sup>3</sup>/godz. Charakterystyka przepływu od spadku ciśnienia jest nieliniowa (rys. 3).

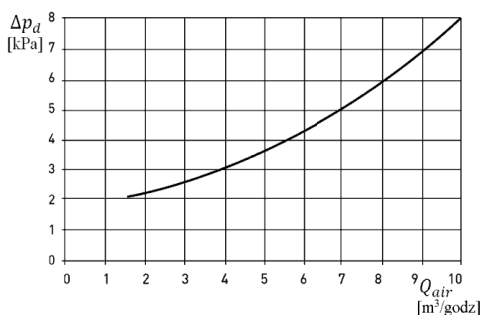
Charakterystyki dmuchaw pozwalają określić przedziały prędkości dmuchaw przy danym ciśnieniu (rys. 4). Cechą charakterystyczną jest wąski przedział pracy w stosunku do całego zakresu prędkości (mniej niż 10% zakresu). Nie bez znaczenia jest również silna zależność położenia przedziału pracy od panującego ciśnienia.



Rys. 4. Zakres pracy dmuchawy w zależności od spadku ciśnienia

Średnica rurociągów zmienia się od 0,6 do 0,1 m na długości około 65 m. Objętość całego rurociągu wynosi ponad 20 m<sup>3</sup>, co istotnie wpływa na dynamikę całej instalacji.

W instalacji wykorzystuje się dyfuzory membranowe typu ABS NOPON PIK 300 (616 sztuk – gałąź 1 i 600 sztuk – gałąź 2). Odznaczają się one nieliniową charakterystyką spadku ciśnienia od przepływu i otwierają się przy ciśnieniu powyżej 2 kPa (rys. 5). Rozmieszczenie dyfuzorów w reaktorze SBR pokazano na rys. 6.



Rys. 5. Charakterystyka dyfuzora ABS NOPON PIK 300



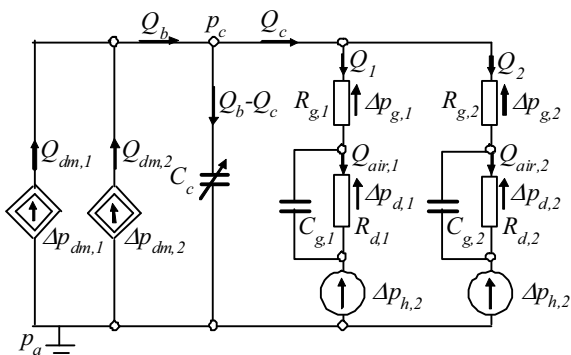
Rys. 6. Rozmieszczenie dyfuzorów na dnie reaktora SBR

### 3.2. Model matematyczny i jego modyfikacje

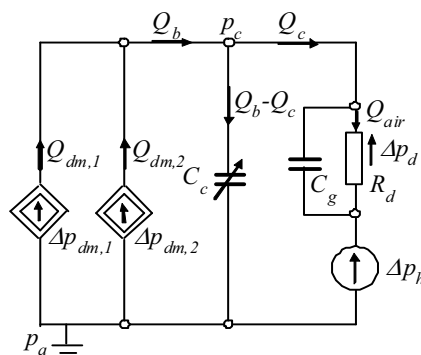
Wyczerpujący opis związany z ogólną metodologią modelowania instalacji napowietrzającej można znaleźć w pracy [7]. Model ten został dopasowany do struktury opisanej instalacji napowietrzającej (patrz: sekcja 3.1) i przedstawiony po raz pierwszy w artykule [4]. Budowę modelu oparto na wiedzy teoretycznej, danych rzeczywistych z obiektu oraz danych katalogowych urządzeń pracujących w opisanym obiekcie. Instalację napowietrzającą zamodelowano, traktując jej elementy jako równoważne elementom elektrycznym (rys. 7). Przepływ powietrza jest analogiem natężenia prądu, zaś spadek ciśnienia jest odpowiednikiem napięcia w obwodzie elektrycznym. Dmuchawy przedstawiono jako źródła prądowe o nieliniowej charakterystyce zależnej od spadku ciśnienia oraz prędkości obrotowej. Pojemność głównego rurociągu zamodelowana jest jako kondensator  $C_c$  o zmiennej pojemności, zaś pojemności poszczególnych gałęzi jako kondensatory  $C_{g,1}$  i  $C_{g,2}$ .



Rezystory  $R_{g,1}$  i  $R_{g,2}$  odpowiadają oporom powietrza w rurociągach, natomiast  $R_{d,1}$  i  $R_{d,2}$  rezystancjom dyfuzorów. Źródła napięciowe są analogiem ciśnienia hydrostatycznego występującego w reaktorze SBR.



Rys. 7. Analog elektryczny modelu napowietrzania w Swarzewie (Wariant A)



Rys. 8. Analog elektryczny modelu napowietrzania w Swarzewie (Wariant B)

Założenia do modelu: (a)  $p_a = 0$ , zatem  $p_c = \Delta p_{dm,1} = \Delta p_{dm,2} = \Delta p_{dm}$  oraz  $\Delta p_{h,1} = \Delta p_{h,2} = \Delta p_h$ ; (b) przepływy w modelu wyrażane są w jednostkach masowych –  $m^3/godz$ ; (c) ze względu na niskie ciśnienia w odniesieniu do ciśnienia atmosferycznego  $p_a$ , oraz niskie temperatury, powietrze w rurociągu traktuje się jak gaz doskonały; (d) zmiany objętości rurociągu pod wpływem ciśnienia są zanedbywalnie małe.

Elementami decydującymi o dynamice obiektu są pojemności. Punktem wyjścia do ich określenia jest równanie stanu gazu doskonałego postaci:

$$p = \frac{n_g}{V} \cdot R \cdot T \tag{1}$$

gdzie:  $p$  – ciśnienie [Pa],  $n_g$  – liczebność gazu [mol],  $V$  – objętość [ $m^3$ ],  $R=8,314472$  J/mol\*K – stała gazowa,  $T$  – temperatura [K].

Zaobserwowano, że występuje duża różnica temperatury sprężonego powietrza między punktem przy dmuchawach a punktem przy reaktorze. Zmiany temperatury w rurociągu, nie wynikające ze zmian ciśnienia, przebiegają bardzo powoli wraz ze zmianami temperatury otoczenia. Przyjmuje się zatem, że temperatura i objętość są stałymi w czasie parametrami modelu. Różniczkując równanie (1), otrzymano :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{R \cdot T}{V} \cdot \frac{dn_g}{dt} \tag{2}$$

Pochodna liczebności gazu jest różnicą przepływu dopływającego do danego odcinka rurociągu  $Q_{dop}$  i z niego odpływającego  $Q_{odp}$  :

$$\frac{dn_g}{dt} = Q_{dop} - Q_{odp} \tag{3}$$

Dla warunków normalnych, przepływów w  $m^3/godz.$  i ciśnieniach w kPa, pojemność  $C$  odcinka rurociągu wynosi:



$$C = f(T) = \frac{1000 \cdot V}{R_m \cdot T} \quad (4)$$

gdzie:  $R_m = 8,314472 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ .

Dodatkowo temperatura w rurociągu zależy od temperatury powietrza w otoczeniu, czyli też od powietrza ssanego przez dmuchawy oraz od ciśnienia sprężania. Zatem można zapisać, że temperatura powietrza wewnątrz  $k$ -tej części rurociągu  $T_k$  ma dwie składowe: temperaturę zewnętrzną  $T_{zew}$  oraz składową zależną od spadku ciśnienia na dmuchawach  $T(\Delta p_{dm})$ :

$$T_k = T_{zew} + T(\Delta p_{dm}) \quad (5)$$

Model opisany jest równaniami algebraicznymi i różniczkowymi związanymi z dynamiką zmian ciśnienia w funkcji przepływu w rurociągu głównym (zależność (8)) i gałęziach (równanie (10)). Przepływ powietrza z dmuchaw  $Q_{dm,i}; i \in \{1,2\}$  jest nieliniową funkcją spadku ciśnienia na dmuchawach  $\Delta p_{dm}$  i prędkości obrotowej dmuchaw  $n_i; i \in \{1,2\}$  (równanie (6)). Zależność tą wyznaczono z charakterystyk pracy dmuchaw (patrz rysunek 3) jako rodzinę krzywych. Przepływ w głównym rurociągu  $Q_b$  jest sumą przepływów obu dmuchaw (wyrażenie (7)). Zależność (9) określa pojemność głównego rurociągu  $C_c$  w funkcji objętości  $V_c$  i temperatury  $T_c$ . Analogiczna sytuacja występuje dla pojemności obu gałęzi rurociągu  $C_{g,i}; i \in \{1,2\}$  (wyrażenie (11)). Wymiary poszczególnych rurociągów zmierzono [4] i są one równe:  $d_c = 0,6 \text{ m}; l_c = 44 \text{ m}; d_{g,1} = d_{g,2} = 0,1 \text{ m}; l_{g,1} = 426 \text{ m}; l_{g,2} = 417 \text{ m}$ .

Ze względu na niewielką liczbę danych pomiarów temperaturę w poszczególnych rurociągach przyjęto jako stałą wartość równą  $T_c = T_{g,1} = T_{g,2} = 293 \text{ K}$ .

$$Q_{dm,i} = f_{dm,i}(\Delta p_{dm}, n_i); i \in \{1,2\} \quad (6)$$

$$Q_b = \sum_{i=1}^2 Q_{dm,i} \quad (7)$$

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{1}{C_c} \cdot (Q_b - Q_c) \quad (8)$$

$$C_c = \frac{1000 \cdot V_c}{R_m \cdot T_c} \wedge V_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot l_c \quad (9)$$

$$\frac{d\Delta p_{d,i}}{dt} = \frac{1}{C_{g,i}} \cdot (Q_i - Q_{air,i}) = \frac{1}{C_{g,i}} \cdot \left\{ \frac{1}{R_{g,i}} \cdot (p_c - \Delta p_{d,i} - \Delta p_h) - \frac{1}{R_{d,i}} \cdot \Delta p_{d,i} \right\}; i \in \{1,2\} \quad (10)$$

$$C_{g,i} = \frac{1000 \cdot V_{g,i}}{R_m \cdot T_{g,i}} \wedge V_{g,i} = \frac{\pi \cdot d_{g,i}^2}{4} \cdot l_{g,i}; i \in \{1,2\} \quad (11)$$

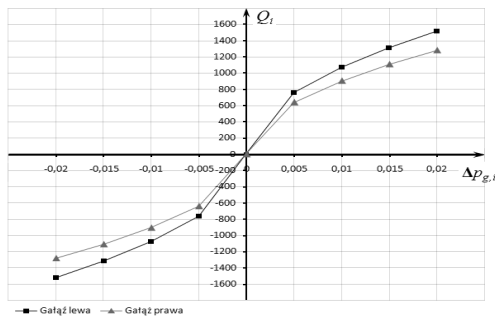
Na podstawie obliczeń rezystancji przepływu powietrza przez gałęzie rurociągu jest [4]:

$$\Delta p_{g,1} = 8,664816 \cdot 10^{-9} \cdot Q_1^2 \Rightarrow Q_1 = \sqrt{1,15409 \cdot 10^8 \cdot \Delta p_{g,1}} \quad (12a)$$

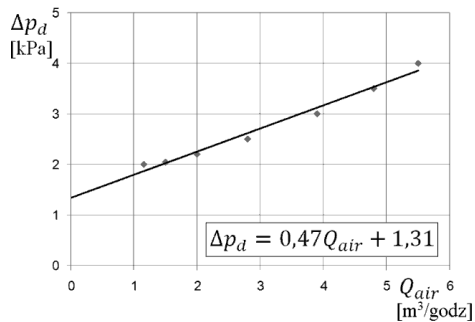
$$\Delta p_{g,2} = 1,216792 \cdot 10^{-8} \cdot Q_2^2 \Rightarrow Q_2 = \sqrt{8,21833 \cdot 10^7 \cdot \Delta p_{g,2}} \quad (12b)$$



W rzeczywistym układzie spadki ciśnień w gałęziach  $\Delta p_{g,i}; i \in \{1,2\}$  nie mogą przyjmować wartości ujemnych. Ponadto niewielkie zmiany tej wielkości w okolicy zera powodują bardzo duże zmiany przepływu  $Q_i; i \in \{1,2\}$ . Trudności te rozwiązano poprzez aproksymację równań (12a-12b) zbiorem liniowych funkcji, będących odcinkami łączącymi punkty w odległościach co 5 Pa, zachowując symetryczność względem początku układu współrzędnych (rys. 9).



Rys. 9. Aproksymacja zależności (12a-12b) w okolicy zera



Rys. 10. Zlinearyzowany fragment charakterystyki otwarcia dyfuzora

Dyfuzory opisuje nieliniowa funkcja przepływu od ciśnienia i otwierają się one przy ciśnieniu 2 kPa (rys. 5). Biorąc pod uwagę, że sumaryczna maksymalna wydajność obu dmuchaw wynosi 6310 m<sup>3</sup>/godz. oraz zamontowanych jest 1216 dyfuzorów, otrzymano maksymalny przepływ przez jeden dyfuzor nieprzekraczający wartości 5,2 m<sup>3</sup>/godz. Natomiast najmniejszy przepływ powietrza w układzie napowietrzania wynosi 1450 m<sup>3</sup>/godz. Zatem przez jeden dyfuzor przepływa około 1,2 m<sup>3</sup>/godz. Przy linearyzacji tej charakterystyki przepływy wychodzące poza podany przedział nie były rozważane. Linearyzację wykonano metodą najmniejszych kwadratów (rys. 10 i zależność (13)), uzyskując:

$$\Delta p_d = 0,47 \cdot Q_{air}^6 + 1,31 \tag{13}$$

Ciśnienie hydrostatyczne  $\Delta p_h$  występuje przy dnie reaktora, na wysokości umieszczenia dyfuzorów (0,35 m nad dnem zbiornika). Zależy ono od wysokości słupa cieczy  $h$ , gęstości ścieków  $\rho_s = 1150 \text{ kg/m}^3$ , przyspieszenia ziemskiego  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  i ciśnienia otwarcia dyfuzorów  $\Delta p_{ow} = 2 \text{ kPa}$ . Pomiar ciśnienia w rurociągu [4] umożliwiły jej wyznaczenie:

$$\Delta p_h = \begin{cases} (h - 0,35) \cdot \rho_s \cdot g \cdot 10^{-3} + p_{ow} & \text{dla } h > 0,35\text{m} \\ p_{ow} & \text{dla } h \leq 0,35\text{m} \end{cases} \tag{14}$$

Ze względu na ograniczenia pomiarowe, w modelu przyjęto przybliżone wartości średniej temperatury powietrza w danej części rurociągu. Pomiar wykonano w temperaturze otoczenia 25°C i wypełnieniu reaktora do wysokości 5,95 m i 6,95 m [4]. Wpływ ciśnienia na temperaturę aproksymowano funkcją liniową (równanie (5)) postaci:

$$T = 0,92 \cdot \Delta p_{dm} + 281 \tag{15}$$

Podjęto decyzję o modyfikacji modelu. Celem było zmniejszenie liczby parametrów do strojenia, mała wrażliwość na błędy numeryczne oraz wzrost szybkości działania przy niewielkiej stracie dokładności modelu.



Cechą charakterystyczną rozważanej instalacji są małe wartości i różnice w rezystancji obu gałęzi (równania (12a-12b)) oraz zbliżona liczba dyfuzorów w tych gałęziach. Występuje więc mała różnica w wartości przepływu pomiędzy dwiema gałęziami wynosząca około 2% sumarycznego przepływu. Rezystancja gałęzi w porównaniu z rezystancją dyfuzorów ma również niewielką wartość (od około 1% dla najmniejszych przepływów, do około 5% dla przepływu maksymalnego). W związku z powyższym zdecydowano się na zastąpienie dwóch gałęzi instalacji napowietrzającej jedną (rys. 8).

Rezygnując z rezystancji gałęzi i wprowadzając pojemność zastępczą dwóch gałęzi, otrzymano:

$$C_g = C_{g,1} + C_{g,2} \quad (16)$$

Ponieważ:

$$Q_{air} = Q_{air,1} + Q_{air,2} = a_d \cdot (k_1 \cdot \Delta p_{d,1} + k_2 \cdot \Delta p_{d,2}) \quad (17a)$$

oraz:

$$\Delta p_{d,1} = \Delta p_{d,2} = \Delta p_d \quad (17b)$$

otrzymano:

$$Q_{air} = a_d \cdot (k_1 + k_2) \cdot \Delta p_d \quad (18)$$

gdzie:  $a_d = 0,47$  – współczynnik kierunkowy zlinearyzowanej charakterystyki dyfuzora (patrz rysunek 10),  $k_1 = 616$  – liczba dyfuzorów w gałęzi 1,  $k_2 = 600$  – liczba dyfuzorów w gałęzi 2.

Zatem rezystancję zastępczą przepływu powietrza przez dyfuzory wyznaczono z zależności:

$$\frac{1}{R_d} = \frac{1}{R_{d,1}} + \frac{1}{R_{d,2}} = \frac{Q_{air}}{\Delta p_d} = a_d \cdot (k_1 + k_2) \quad (19)$$

Końcowa postać modelu wraz z wyrażeniami (17-19) jest następująca:

$$Q_{dm,i} = f_{dm,i}(\Delta p_{dm}, n_i); \quad i \in \{1,2\} \quad (20)$$

$$Q_b = \sum_{i=1}^2 Q_{dm,i} \quad (21)$$

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{1}{C_c} \cdot (Q_b - Q_c) \quad (22)$$

$$C_c = \frac{1000 \cdot V_c}{R_m \cdot T_c} \wedge V_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot l_c \quad (23)$$

$$\frac{d\Delta p_d}{dt} = \frac{Q_b}{C_g + C_c} - \frac{\Delta p_d}{R_d \cdot (C_g + C_c)} \quad (24)$$

$$C_g = \frac{1000 \cdot V_{g1,2}}{R_m \cdot T_{g1,2}} \wedge V_{g1,2} = \frac{\pi \cdot d_g^2}{4} \cdot l_{g1,2} \quad (25)$$

Wymiary rurociągów wynoszą:  $d_c = 0,6m$ ;  $l_c = 44m$ ;  $d_g = 0,1m$ ;  $l_{g1,2} = 843m$ . Temperaturę w poszczególnych rurociągach przyjęto jako stałą równą  $T_c = T_{g1,2} = 293K$ .

Oba modele są nieliniowe ze względu na nieliniową charakterystykę dmuchaw oraz zmienną pojemność rurociągów.





Podsumowując, stwierdza się, że w modelu układu napowietrzania jedną z istotnych cech jest jego dynamika, która przekłada się bezpośrednio na sposób sterowania dmuchawami. Wartości ciśnienia w poszczególnych częściach rurociągu odgrywają również ważną rolę, ponieważ od tej wielkości zależy wydajność dmuchaw, a tym samym ilość dostarczanego powietrza do reaktora. Budując model, postanowiono skupić się głównie na tych dwóch aspektach.

#### 4. TESTY SYMULACYJNE I ANALIZA WYNIKÓW

Oba modele, nazwane Wariant A (model pierwotny) i Wariant B (model uproszczony), zaimplementowano i zbadano w środowisku Matlab/Simulink. Wejściami do modeli są zadane prędkości obrotowe dmuchaw oraz stany ich pracy (załączona, wyłączona). Wyjściem jest sumaryczny przepływ powietrza przez wszystkie dyfuzory.

W pierwszej kolejności porównano charakterystyki statyczne dla dwóch poziomów wypełnienia reaktora – 5,95 i 6,95 m (Tabele 1 i 2). Wyniki są dokładne i bardzo zbliżone. Niewielkie błędy wynikają głównie z braku oporu gałęzi w wariantcie B. Wartości ciśnienia wskazują na stałą różnicę między wartościami ciśnienia pomierzonego i uzyskanego z modeli.

Tabela 1. Porównanie wyników symulacji z pomiarami przy wypełnieniu 5,95 m

Prędk. obr.	Pomiary		Wariant A			Wariant B		
$n$ [obr/min]	$Q_{air}$ [m <sup>3</sup> /godz]	$\Delta p_{dm}$ [kPa]	$Q_{air}$ [m <sup>3</sup> /godz]	$\Delta p_{dm}$ [kPa]	Błąd $Q_{air} / \Delta p_{dm}$ [%]	$Q_{air}$ [m <sup>3</sup> /godz]	$\Delta p_{dm}$ [kPa]	Błąd $Q_{air} / \Delta p_{dm}$ [%]
28 128	1 578	62,7	1 565	63,91	0,8 / 1,9	1 567	63,91	0,7 / 1,9
28 332	1 889	62,9	1 859	64,03	1,6 / 1,8	1 861	64,02	1,5 / 1,8
28 752	2 361	63,0	2 368	64,23	0,3 / 2,0	2 372	64,22	0,5 / 1,9
29 226	2 951	63,0	2 748	64,38	6,9 / 2,2	2 750	64,36	6,8 / 2,2
30 000	3 098	63,0	3 186	64,56	2,8 / 2,5	3 188	64,53	2,9 / 2,4
30 780	3 559	63,2	3 552	64,71	0,2 / 2,4	3 553	64,67	0,2 / 2,3

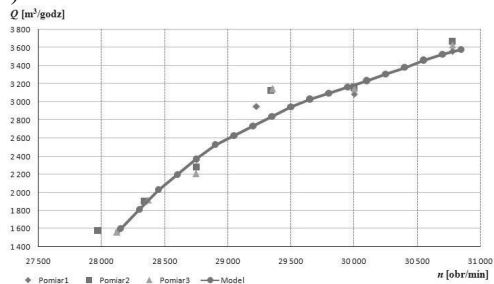
Tabela 2. Porównanie wyników symulacji z pomiarami przy wypełnieniu 6,95 m

Prędk. obr.	Pomiary		Wariant A			Wariant B		
$n$ [obr/min]	$Q_{air}$ [m <sup>3</sup> /godz]	$\Delta p_{dm}$ [kPa]	$Q_{air}$ [m <sup>3</sup> /godz]	$\Delta p_{dm}$ [kPa]	Błąd $Q_{air} / \Delta p_{dm}$ [%]	$Q_{air}$ [m <sup>3</sup> /godz]	$\Delta p_{dm}$ [kPa]	Błąd $Q_{air} / \Delta p_{dm}$ [%]
30 312	1 673	74,1	1 562	75,6	6,6 / 2,0	1 564	75,6	6,5 / 2,0
30 630	2 126	74,4	2 144	75,8	0,8 / 1,9	2 148	75,8	1,0 / 1,9
30 948	2 598	74,4	2 575	76,0	0,9 / 2,2	2 578	76,0	0,8 / 2,2
31 560	3 010	74,5	3 054	76,2	1,5 / 2,3	3 057	76,2	1,6 / 2,3
32 040	3 323	74,5	3 230	76,3	2,8 / 2,4	3 231	76,3	2,8 / 2,4

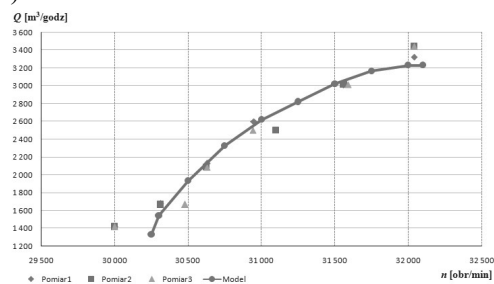
Na rys. 11 porównano charakterystyki statyczne  $Q = f(n)$  modelu Wariant B z pomiarami. Uzyskano zadowalającą dokładność modelu. Niewielki rozrzut wartości zmierzonych wynika z błędów pomiarowych.



a).



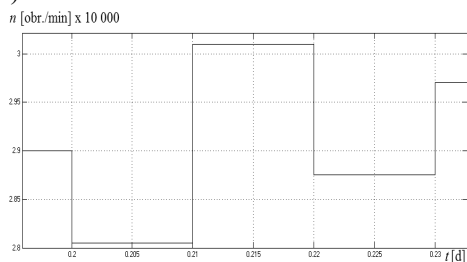
b).



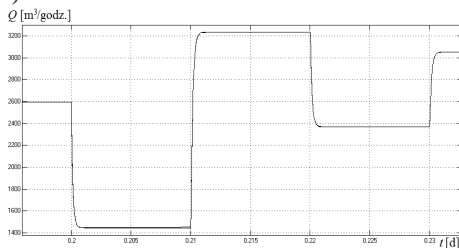
Rys. 11. Porównanie charakterystyki modelu symulacyjnego ze zmierzoną charakterystyką obiektu przy wypełnieniu reaktora: a). do 5,95 m; b). do 6,95 m

W celu zbadania nieliniowości charakterystyki obu modeli wykonano badania symulacyjne odpowiedzi modeli na trajektorię zadaną prędkości obrotowej dmuchawy (rys. 12). Różnica między wariantami jest niewidoczna. Spadek prędkości obrotowej o 950 obr./min spowodował spadek przepływu o  $1150 \text{ m}^3/\text{godz}$ , zaś wzrost prędkości obrotowej o 1100 obr./min doprowadził do wzrostu przepływu tylko o  $635 \text{ m}^3/\text{godz}$ .

a).



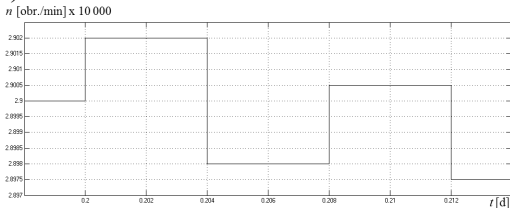
b).



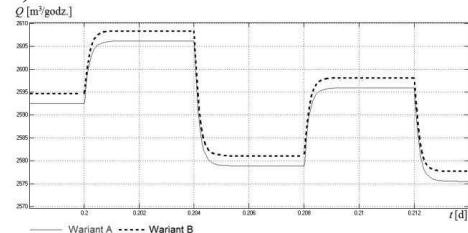
Rys. 12. Odpowiedź obu modeli b). na sygnał wymuszający a). przy wypełnieniu reaktora do 5,95 m

W kolejnym badaniu (rys.13) zmniejszono wielkość zmian prędkości obrotowej, dzięki czemu uzyskano przebiegi umożliwiające wizualne porównanie modeli w dwóch wariantach. W wariantcie B wartość przepływu jest większa tylko o około  $4 \text{ m}^3/\text{godz}$ . Obserwowana różnica jest niewielka.

a).



b).

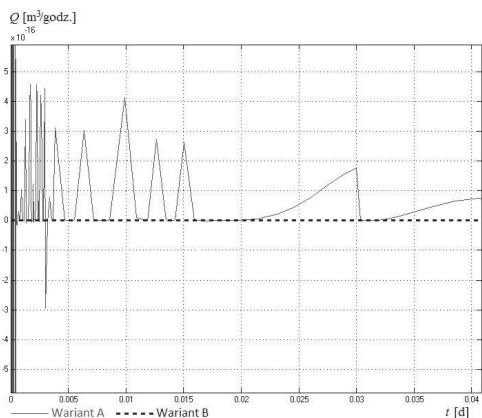


Rys. 13. Odpowiedź obu modeli b). na niewielkie zmiany sygnału wymuszającego a). przy wypełnieniu reaktora do 5,95 m

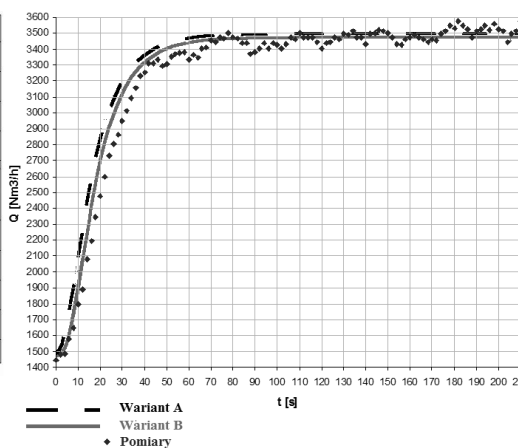


Jednym z kryteriów oceny modelu jest mała wrażliwość na błędy numeryczne, co bezpośrednio wpływa również na szybkość działania. Powiększenie przebiegu wartości przepływu przy wyłączonych dmuchawach (rys. 14) ujawnia wahania tej zmiennej, które nie powinny występować. Zjawisko to występuje tylko w wariancie A modelu. Wartości zmian przepływu są minimalne jednak mają wpływ na skracanie kroku całkowania w algorytmach obliczeniowych o zmiennym kroku, co skutecznie spowalnia proces symulacji. Ponadto utrudnia to dobór odpowiedniej metody całkowania numerycznego.

Na koniec porównano dynamikę pracy instalacji napowietrzającej z modelami (rys. 15). Uzyskane wyniki świadczą o tym, że oba warianty zachowują się niemal identycznie (wykresy praktycznie się pokrywają). Wartości przepływów są zbliżone z pomiarami z obiektu rzeczywistego. Model w obu wariantach stanowi bardzo dobre przybliżenie dynamiki rzeczywistego obiektu.



Rys. 14. Wahania wartości przepływu – porównanie obu modeli



Rys. 15. Charakterystyka dynamiki układu napowietrzania w odpowiedzi na sygnał wymuszający o czasie narastania 12s

## 5. PODSUMOWANIE

W ostatnich latach prowadzi się intensywne prace nad poprawą jakości działania układów sterowania w oczyszczalniach ścieków. Pierwszym krokiem jest budowa modelu rozważanego procesu. W artykule podjęta została próba uproszczenia modelu instalacji napowietrzającej dla oczyszczalni ścieków w Swarzewie. Zweryfikowany model pozwala na dokładne poznanie tej części oczyszczalni ścieków i badanie technik sterowania. Wprowadzone modyfikacje modelu okazały się właściwe. Pozwoliło to zmniejszyć liczbę parametrów do strojenia, uzyskać małą wrażliwość na błędy numeryczne, zwiększyć szybkość działania, zachowując dużą dokładność. W przyszłości model ten posłuży do budowy układu sterowania stężeniem tlenu. Rozważana instalacja posiada cechy charakterystyczne dla dużej rodziny obiektów tej klasy. Może to stanowić atrakcyjną propozycję dla technologów i operatorów oczyszczalni ścieków.



## LITERATURA

1. Brdyś M.A., Chotkowski W., Duzinkiewicz K., Konarczak K., Piotrowski R.: Two-level dissolved oxygen control for activated sludge processes. In: Proc. of the 15th IFAC World Congress. Barcelona 2002.
2. 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" 2009, Vol. 17, No. 5, p. 1183–1192.
3. Dymaczewski Z., Oleszkiewicz J.A., Sozański M.M.: Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków. Poznań: Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, 1997.
4. 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. In: Proc. of the 10th IFAC Symposium on Computer Applications in Biotechnology. Cancun 2007.
5. Piotrowski R.: Zintegrowane sterowanie predykcyjne stężeniem tlenu w reaktorze biologicznym. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 2005.
6. Piotrowski R., Brdyś M.A.: Lower-level controller for hierarchical control of dissolved oxygen concentration in activated sludge processes. In: Proc. of the 16th IFAC World Congress. Praga 2005.
7. Piotrowski R., Brdyś M.A., Konarczak K., Duzinkiewicz K., Chotkowski W.: Hierarchical dissolved oxygen control for activated sludge processes. "Control Engineering Practice" 2008, Vol. 16, No. 1, p. 114–131.
8. Piotrowski R., Mojsiewicz A.: Nieliniowy regulator predykcyjny w sterowaniu instalacją napowietrzającą. „Pomiary Automatyka Kontrola” 2011, vol. 57, nr 3, s. 253-256.

## AERATION SYSTEM MODEL FOR CONTROL PURPOSES CASE STUDY

Summary. The biological processes are a fundamental group processes at wastewater treatment plant. One of these is aeration realized based on aeration system. This process is a one of the most important and most expensive at wastewater treatment plant. Model of process is needed for detailed analysis of the process, investigate the possibility of modifying the existing or other methods of control. The paper proposes a aeration system model for Swarzewo wastewater treatment plant. This model is modified for control purposes. Both models are compared and analyzed by simulation.