

**Robert Piotrowski**

**OPTIMALIZACJA  
PROCESÓW BIOLOGICZNYCH  
W OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW  
TYPU SBR**

**Gdańsk 2022**

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ  
*Dariusz Mikielewicz*

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH  
*Michał Szydłowski*

RECENZENCI  
*Witold Nocoń*  
*Piotr Tatjewski*

REDAKCJA JĘZYKOWA  
*Agnieszka Frankiewicz*

SKŁAD I PROJEKT OKŁADKI  
*Wioleta Lipska-Kamińska*

ZDJĘCIE NA OKŁADCE  
*Stanisław Cytawa, Spółka Wodno-Ściekowa „SWARZEWO”*

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem  
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie  
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy.

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2022

ISBN 978-83-7348-855-7

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 6,4, ark. druku 7,5, 260/1183

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski  
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

*Dla moich najbliższych:  
Iwony, Adama i Mai*



## Spis treści

WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW .....	7
1. WPROWADZENIE .....	13
1.1. Informacje ogólne .....	13
1.2. Aktualny stan wiedzy .....	14
1.3. Struktura monografii .....	15
2. OBIEKTY STEROWANIA – SBR I INSTALACJA NAPOWIETRZAJĄCA .....	17
2.1. Wiadomości podstawowe .....	17
2.2. Oczyszczalnia sekwencyjna .....	18
2.3. Proces napowietrzania .....	20
2.4. SBR w Swarzewie .....	21
2.5. Instalacja napowietrzająca w Swarzewie .....	24
2.6. Sterowanie procesami biologicznymi w SBR w Swarzewie .....	27
3. MODELE MATEMATYCZNE OBIEKTÓW STEROWANIA .....	28
3.1. Reaktor SBR .....	28
3.2. Instalacja napowietrzająca .....	31
4. ADAPTACYJNY UKŁAD REGULACJI Z NADRZĘDNYM REGULATOREM REGUŁOWYM .....	38
4.1. Projektowanie układu regulacji .....	38
4.2. Testy symulacyjne .....	43
5. ADAPTACYJNY UKŁAD REGULACJI Z NADRZĘDNYM REGULATOREM HEURYSTYCZNYM .....	62
5.1. Projektowanie układu regulacji .....	62
5.2. Testy symulacyjne .....	67
6. OPTIMALIZACJA PROCESÓW BIOLOGICZNYCH – PROPOZYCJA 1 .....	74
6.1. Algorytmy ewolucyjne .....	76
6.2. Metoda gradientowa .....	79
6.3. Wyniki optymalizacji .....	79

---

7. OPTIMALIZACJA PROCESÓW BIOLOGICZNYCH – PROPOZYCJA 2 .....	87
7.1. Algorytm rojowy ABC .....	88
7.2. Metoda poszukiwania bezpośredniego .....	91
7.3. Wyniki optymalizacji .....	91
8. OPTIMALIZACJA PROCESÓW BIOLOGICZNYCH – PROPOZYCJA 3 .....	98
8.1. Modyfikacje układu .....	98
8.2. Wyniki optymalizacji .....	100
9. PODSUMOWANIE .....	106
BIBLIOGRAFIA .....	107
Streszczenie w języku polskim .....	117
Streszczenie w języku angielskim .....	118

## WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

### Oznaczenia

$A$	– pole powierzchni podstawy reaktora SBR o kształcie walca [m <sup>2</sup> ]
$a_d$	– współczynnik zlinearyzowanej charakterystyki dyfuzora [–]
$a_i$	– współczynnik zlinearyzowanej charakterystyki $i$ -tej dmuchawy [–]
$b_i$	– współczynnik zlinearyzowanej charakterystyki $i$ -tej dmuchawy [–]
$B$	– wektor sterowania [–]
$BZT_5$	– pięciodniowe biologiczne zapotrzebowanie na tlen [g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]
$C_c$	– pojemność powietrza w głównym rurociągu
$C_{d,j}$	– pojemność powietrza w $j$ -tej gałęzi
$ChZT$	– chemiczne zapotrzebowanie na tlen [g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]
$c_i$	– współczynnik zlinearyzowanej charakterystyki $i$ -tej dmuchawy [–]
$DO$	– stężenie tlenu rozpuszczonego ( <i>dissolved oxygen</i> ) [g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]
$DO^{sat}$	– współczynnik nasycenia tlenem [g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]
$DO_{zad}$	– trajektoria zadana stężenia tlenu rozpuszczonego [g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]
$dTSS_2$	– bieżąca zmiana stężenia zawiesiny stałej w środkowej warstwie reaktora SBR [g/m <sup>3</sup> ]
$d_c$	– średnica głównego rurociągu [m]
$d_{d,j}$	– średnica rurociągu w $j$ -tej gałęzi [m]
$E$	– energia elektryczna związana z pracą dmuchaw [kWh]
$e$	– uchyb regulacji [–]
$e_u$	– uchyb od wielkości sterującej [–]
$error$	– błąd regulacji DO
$F_i$	– wartość funkcji przystosowania dla $i$ -tej pszczoły w populacji
$f_i$	– wartość funkcji kosztu dla $i$ -tej pszczoły w populacji
$f_{\text{średnia}}$	– wartość średniego kosztu dla całej populacji
$f\_kary(j)$	– funkcja kary [–]
$g$	– przyspieszenie ziemskie [m/s <sup>2</sup> ]
$g$	– parametr regulatora adaptacyjnego podlegający adaptacji [–]
$h$	– parametr regulatora adaptacyjnego podlegający adaptacji [–]

$h_j$	– głębokość zanurzenia dyfuzorów w reaktorze dla $j$ -tej gałęzi [m]
$h_{\max}$	– wysokość reaktora SBR [m]
$K$	– współczynnik wzmocnienia obiektu [–]
$K_0$	– współczynnik Monoda rozpuszczania tlenu [g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]
$\mathbf{K}_{\text{AW}}$	– wektor wzmocnień filtru przeciwnasyceniowego [–]
$k_c$	– współczynnik konwersji dla głównego rurociągu [m <sup>2</sup> ·s <sup>4</sup> /kg <sup>2</sup> ]
$k_{d,j}$	– współczynnik konwersji w $j$ -tej gałęzi [m <sup>2</sup> ·s <sup>4</sup> /kg <sup>2</sup> ]
$k_{\text{La}}(\cdot)$	– funkcja przenoszenia tlenu [1/godz.]
$L_{\text{cykle}}$	– liczba cykli pracy reaktora SBR [cykl/d.]
$l_c$	– długość głównego rurociągu [m]
$l_{d,j}$	– długość rurociągu w $j$ -tej gałęzi [m]
$m$	– parametr regulatora adaptacyjnego podlegający adaptacji [–]
<i>mnożnik</i>	– mnożnik populacji tymczasowej T
$N(0,1)$	– liczba losowa z rozkładu normalnego losowana jednorazowo dla całego chromosomu [–]
$N_i(0,1)$	– liczba losowa z rozkładu normalnego losowana dla każdego genu [–]
$N_{\text{tot}}$	– stężenie azotu ogólnego [g N/m <sup>3</sup> ]
$\text{NH}_4$	– bieżące stężenie azotu amonowego [g NH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> ]
$\text{NH}_{4\text{max}}$	– maksymalna wartość stężenia azotu amonowego [g NH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> ]
$\text{NO}_2$	– stężenie azotynów [g N/m <sup>3</sup> ]
$\text{NO}_3$	– bieżące stężenie azotynów i azotanów [g NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]
$\text{NO}_3$	– stężenie azotanów [g NO <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> ]
$\text{NO}_{3\text{max}}$	– maksymalna wartość stężenia azotynów i azotanów [g NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]
$n$	– liczba genów osobnika [–]
$n_b$	– prędkość obrotowa dmuchawy [obr/min]
$n_{b,i}$	– prędkość obrotowa $i$ -tej dmuchawy [obr/min]
$P_{\text{tot}}$	– stężenie fosforu ogólnego [g P/m <sup>3</sup> ]
$\text{PO}_4$	– stężenie fosforanów [g PO <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> ]
$p_1$	– ciśnienie powietrza na początku głównego rurociągu [Pa]
$p_2$	– ciśnienie powietrza na końcu głównego rurociągu [Pa]
$p_3$	– ciśnienie powietrza na końcu pierwszej gałęzi [Pa]
$p_4$	– ciśnienie powietrza na końcu drugiej gałęzi [Pa]
$p_a$	– ciśnienie atmosferyczne [Pa]
$p_b$	– ciśnienie w punkcie węzłowym [Pa]
$p_c$	– ciśnienie powietrza w głównym rurociągu [Pa]
$p_{d,j}$	– ciśnienie powietrza w $j$ -tej gałęzi [Pa]
$p_{\max}$	– ciśnienie maksymalne [Pa]
$p(\tau)$	– chwilowa wartość ciśnienia [Pa]
pH	– skala kwasowości i zasadowości roztworów wodnych związków chemicznych
$Q$	– natężenie przepływu powietrza [m <sup>3</sup> /godz.]
$Q_{\text{air}}$	– natężenie przepływu powietrza przez dyfuzor [m <sup>3</sup> /godz.]



$Q_{air,j}$	– natężenie przepływu powietrza przez $j$ -tą gałąź związane z dyfuzorami [ $m^3/godz.$ ]
$Q_{air}(\tau)$	– chwilowa wartość natężenia przepływu powietrza [ $m^3/d.$ ]
$Q_{air}^{zad}$	– trajektoria zadana natężenia przepływu powietrza [ $m^3/godz.$ ]
$Q_{air,org}^{zad}$	– wielkość sterująca ograniczona [-]
$Q_b$	– natężenie przepływu powietrza na wyjściu z dmuchawy [ $m^3/godz.$ ]
$Q_{b,i}$	– natężenie przepływu powietrza na wyjściu z $i$ -tej dmuchawy [ $m^3/godz.$ ]
$Q_c$	– natężenie przepływu powietrza przez główny rurociąg [ $m^3/godz.$ ]
$Q_{in}$	– natężenie dopływu ścieków [ $m^3/d.$ ]
$Q_j$	– natężenie przepływu powietrza przez $j$ -tą gałąź [ $m^3/godz.$ ]
$Q_{osad}$	– ilość osadu nadmiernego odprowadzona z reaktora SBR [ $m^3/godz.$ ]
$Q_{out}$	– natężenie odpływu ścieków [ $m^3/d.$ ]
$Q_{ścieki}$	– natężenie odpływu ścieków oczyszczonych z reaktora SBR [ $m^3/cykl$ ]
$R$	– szybkość przenikania tlenu (respiracja) [ $g O_2/godz.$ ]
$R_{d,j}$	– rezystancja powietrza w $j$ -tej gałęzi związana z dyfuzorami [ $Pa \times godz/m^3$ ]
$R_{g,j}$	– rezystancja powietrza w $j$ -tej gałęzi związana z rurociągiem [ $Pa \times godz/m^3$ ]
$R_m$	– stała gazowa [ $J/m^3 \cdot K$ ]
$R_r$	– rezystancja powietrza związana z połączeniem stacji dmuchaw i głównego rurociągu [ $Pa \times godz/m^3$ ]
$S_i$	– koncentracja $i$ -tego substratu znajdującego się w reaktorze [ $g/m^3$ ]
$S_{i,in}$	– koncentracja $i$ -tego substratu w dopływie ścieków [ $g/m^3$ ]
SVI	– wskaźnik objętościowy osadu ( <i>sludge volume index</i> ) [ $ml/g$ ]
$s$	– odwrotność współczynnika sprawności dmuchaw [-]
$sa$	– część stała współczynnika korekcyjnego zmniejszającego $v_{max}$ [ $ml/g$ ]
$sb$	– część zależna współczynnika korekcyjnego zmniejszającego $v_{max}$ [-]
$T$	– stała czasowa obiektu [ $s$ ]
$T_1$	– temperatura powietrza na początku głównego rurociągu [ $^{\circ}C$ ]
$T_2$	– temperatura powietrza na końcu głównego rurociągu [ $^{\circ}C$ ]
$T_3$	– temperatura powietrza na końcu pierwszej gałęzi [ $^{\circ}C$ ]
$T_4$	– temperatura powietrza na końcu drugiej gałęzi [ $^{\circ}C$ ]
$T_{ścieki}$	– temperatura ścieków dopływających do reaktora SBR [ $^{\circ}C$ ]
TSS	– bieżące stężenie zawiesiny ogólnej w reaktorze ( <i>total suspended solids</i> ) [ $g/m^3$ ]
TSS <sub>1</sub>	– bieżące stężenie zawiesiny stałej w górnej warstwie reaktora [ $g/m^3$ ]
TSS <sub>1min</sub>	– minimalna wartość stężenia zawiesiny stałej w górnej warstwie reaktora [ $g/m^3$ ]
TSS <sub>dno</sub>	– bieżące stężenie zawiesiny ogólnej na dnie reaktora [ $g/m^3$ ]
TSS <sub>e</sub>	– bieżące stężenie zawiesiny stałej w odpływie ścieków oczyszczonych do odbiornika [ $g/m^3$ ]
TSS <sub>ema</sub>	– maksymalna wartość stężenia całkowitej zawiesiny stałej w odpływie ścieków oczyszczonych do odbiornika [ $g/m^3$ ]
TSS <sub>odpływ</sub>	– bieżące stężenie zawiesiny ogólnej w odpływie ścieków z reaktora [ $g/m^3$ ]
$t_n$	– bieżący czas napełniania reaktora SBR [ $d.$ ]
$t_{n,max}$	– maksymalny czas napełniania reaktora SBR [ $d.$ ]

$t_{on}$	– bieżący czas usuwania osadu nadmiernego [d.]
$t_{on,max}$	– maksymalny czas usuwania osadu nadmiernego [d.]
$t_s$	– bieżący czas trwania sedymentacji [d.]
$t_{s,max}$	– maksymalny czas trwania sedymentacji [d.]
$t_{sym}$	– czas symulacji [s]
$V$	– bieżąca objętość napełnienia reaktora SBR ściekami [m <sup>3</sup> ]
$V_c$	– objętość głównego rurociągu [m <sup>3</sup> ]
$V_{d,j}$	– objętość rurociągu w $j$ -tej gałęzi [m <sup>3</sup> ]
$V_k$	– objętość ostatniego dolania ścieków surowych do reaktora SBR [m <sup>3</sup> ]
$V_{max}$	– maksymalna objętość napełnienia reaktora SBR ściekami surowymi [m <sup>3</sup> ]
$V_{min}$	– minimalna objętość napełnienia reaktora SBR ściekami [m <sup>3</sup> ]
$V_s$	– objętość mieszaniny ścieków z osadem czynnym w zbiorniku [m <sup>3</sup> ]
$V_{s,max}$	– największa możliwa objętość mieszaniny ścieków z osadem czynnym w reaktorze SBR [m <sup>3</sup> ]
$v_{max}$	– maksymalna prędkość opadania osadu czynnego [m/d.]
$v_s$	– prędkość opadania osadu czynnego [m/d.]
$w_1$	– liczba dyfuzorów w pierwszej gałęzi [–]
$w_2$	– liczba dyfuzorów w drugiej gałęzi [–]
$w_j$	– liczba dyfuzorów w $j$ -tej gałęzi [–]
$x_1$	– kolejność faz (tlenowa – wartość 1, beztlenowa – wartość 0) [–]
$x_2$	– długość fazy (tlenowa lub beztlenowa) [d.]
$x_3$	– liczba sekwencji (tlenowa + beztlenowa) [–]
$[x_3]$	– zaokrąglenie w dół zmiennej decyzyjnej $x_3$ [–]
$x_4$	– $DO_{zad}$ [g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]
$x_{b,i}$	– zmienna binarna związana z załączeniem/wyłączeniem $i$ -tej dmuchawy; $x_{b,i} = 1$ , jeśli $i$ -ta dmuchawa jest załączona, $x_{b,i} = 0$ , jeśli jest wyłączona
$x_i$	– $i$ -ty gen przed mutacją
$x_i'$	– $i$ -ty gen po mutacji
$y$	– zmienna regulowana [–]
$y_{ref}$	– wartość zadana [–]
$Z$	– % zmiana wybranego parametru (ChZT, $N_{tot}$ , $P_{tot}$ ) z układu heurystycznego $z_{he}$ względem układu odniesienia $z_{od}$
$\rho$	– gęstość ścieków w reaktorze [kg/m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	– współczynnik transferu tlenu [1/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_1$	– krok mutacji związany z pierwszym genem [–]
$\sigma_{1,pocz}$	– parametr startowy kroku mutacji dla pierwszego genu [–]
$\sigma_2$	– krok mutacji związany z drugim genem [–]
$\sigma_{2,pocz}$	– parametr startowy kroku mutacji dla drugiego genu [–]
$\sigma_3$	– krok mutacji związany z trzecim genem [–]
$\sigma_{3,pocz}$	– parametr startowy kroku mutacji dla trzeciego genu [–]
$\Delta_{dj}^{open}$	– spadek ciśnienia związany z otwarciem dyfuzora w $j$ -tej gałęzi [Pa]
$\gamma_1$	– współczynnik szybkości adaptacji (parametr funkcji Lapunowa) [–]

$\gamma_2$	– współczynnik szybkości adaptacji (parametr funkcji Lapunowa) [–]
$\gamma_3$	– współczynnik szybkości adaptacji (parametr funkcji Lapunowa) [–]
$\Delta p$	– spadek ciśnienia powietrza [Pa]
$\Delta p_b$	– spadek ciśnienia na dmuchawie [Pa]
$\Delta p_{b,i}$	– spadek ciśnienia na $i$ -tej dmuchawie [Pa]
$\Delta p_d$	– spadek ciśnienia na dyfuzorze [Pa]
$\Delta p_{d,j}$	– spadek ciśnienia powietrza w $j$ -tej gałęzi związany z dyfuzorami [Pa]
$\Delta p_{g,j}$	– spadek ciśnienia powietrza w $j$ -tej gałęzi związany z rurociągiem [Pa]
$\Delta p_{h,j}$	– spadek ciśnienia hydrostatycznego w $j$ -tej gałęzi [Pa]
$\Delta p_r$	– spadek ciśnienia związany z połączeniem stacji dmuchaw i głównego rurociągu [Pa]
$\lambda$	– liczba osobników populacji tymczasowej T [–]
$\mu$	– liczba osobników populacji początkowej (rodzicielskiej) P [–]
$\tau', \tau$	– współczynniki szybkości uczenia
$\Phi_i$	– szybkość tworzenia $i$ -tego substratu [–]
$\delta_i$	– krok mutacji $i$ -tego genu [–]
$\delta_i'$	– krok mutacji $i$ -tego genu po mutacji [–]

## Skróty

ABC	– algorytm rojowy ABC ( <i>artificial bee colony</i> )
AE	– algorytm ewolucyjny
ASM	– model osadu czynnego ( <i>activated sludge model</i> )
ASM2	– model osadu czynnego nr 2 ( <i>activated sludge model no. 2</i> )
ASM2d	– model osadu czynnego nr 2d ( <i>activated sludge model no. 2d</i> )
DMRAC	– bezpośrednia regulacja adaptacyjna z modelem referencyjnym ( <i>direct model reference adaptive control</i> )
DS	– metoda poszukiwania bezpośredniego ( <i>direct search</i> )
GPS	– metoda poszukiwania bezpośredniego ( <i>generalized pattern search</i> )
IMC	– sterowanie z wykorzystaniem wewnętrznego modelu odwrotnego ( <i>internal model control</i> )
MBR	– membranowy reaktor biologiczny ( <i>membrane biological reactor</i> )
MG	– metoda gradientowa
ORP	– potencjał redoks ( <i>oxidation reduction potential</i> )
OUR	– wskaźnik szybkości poboru tlenu ( <i>oxygen uptake rate</i> )
PI	– regulator proporcjonalno-całkujący PI ( <i>proportional–integral</i> )
SBR	– sekwencyjny reaktor porcjowy, oczyszczalnia sekwencyjna ( <i>sequencing batch reactor</i> )
SQP	– numeryczna procedura optymalizacji ( <i>sequential quadratic programming</i> )
SRT	– czas przetrzymania osadu ( <i>sludge retention time</i> )
SVI	– wskaźnik objętościowy osadu ( <i>sludge volume index</i> )



# 1. WPROWADZENIE

## 1.1. Informacje ogólne

Rozwój cywilizacyjny powoduje wzrost ilości produkowanych przez społeczeństwo ścieków i zanieczyszczeń, które przyjmują różną postać, od stanu gazowego, przez ciekły, po zanieczyszczenia stałe. Równocześnie rośnie świadomość społeczna negatywnego wpływu, jaki wywierają one na środowisko. Przekłada się to na zaostrzenie aktów prawnych regulujących warunki wytwarzania i utylizacji zanieczyszczeń (Council Directive 1991; Framework Directive 2000; Dziennik Ustaw 2001a; Dziennik Ustaw 2001b; Dziennik Ustaw 2005; Dziennik Ustaw 2014).

Oczyszczalnie ścieków to skomplikowane systemy techniczne, w których następują oczyszczanie ścieków i ich transport do odbiornika. Nikogo nie trzeba obecnie przekonywać, że dobrze działające oczyszczalnie ścieków są niezbędne do ochrony zasobów wodnych.

Każda oczyszczalnia ścieków, bez względu na jej rodzaj, posługuje się pozwoleniem wodnoprawnym, które określa dopuszczalne wartości wskaźników zanieczyszczeń dla oczyszczonych ścieków. Ponadto osoby zarządzające oczyszczalniami chciałyby obniżyć koszty operacyjne pracy systemu, z których największy wiąże się z instalacją napowietrzającą dostarczającą tlen do oczyszczalni ścieków.

Najlepszy sposób na efektywną i taną pracę oczyszczalni ścieków to opracowanie i implementacja skutecznych, nowoczesnych algorytmów sterowania i optymalizacji. Zagadnienia te stanowią tematykę niniejszej monografii.

Oczyszczalnie ścieków można podzielić następująco:

- ze względu na rodzaj oczyszczanych ścieków: komunalne i przemysłowe;
- ze względu na rodzaj zachodzących procesów: mechaniczne, biologiczne i chemiczne;
- ze względu na strukturę oczyszczalni: przepływowe i sekwencyjne (sekwencyjny reaktor porcjowy; *sequencing batch reactor*, SBR).

W monografii rozważaniom poddano komunalną, biologiczną, sekwencyjną oczyszczalnię ścieków z drobnopęcherzykowym napowietrzaniem sprężonym powietrzem.

Procesy w oczyszczalni ścieków odznaczają się dynamiką o różnych stałych czasowych, określanych w różnych jednostkach czasu, od sekund po godziny. Stała czasowa zmian stę-

żenia tlenu (*dissolved oxygen*, DO) w SBR wynosi kilkadziesiąt minut, a dynamikę instalacji napowietrzającej, głównie z powodu pracy dmuchaw, należy liczyć w sekundach. W niniejszym opracowaniu oba te systemy połączono i potraktowano jako jeden.

Procesy biologiczne zachodzące w reaktorze są bardzo złożone, dynamiczne, nieliniowe, cechują się wieloma interakcjami. Mimo to do sterowania stężeniem tlenu implementuje się proste układy regulacji: regułowe lub jednowymiarowe układy regulacji z regulatorem proporcjonalno-całkującym (*proportional–integral*, PI) ze stałymi wartościami nastaw. Niestety jakość sterowania jest słaba, co powoduje nieefektywne oczyszczanie ścieków i niepotrzebnie zwiększa koszty operacyjne pracy oczyszczalni. Dlatego też w wielu ośrodkach naukowych pracuje się nad nowymi strukturami i algorytmami sterowania procesami biologicznymi w oczyszczalni ścieków. Ponadto trwają prace związane z optymalizacją tych procesów w celu minimalizacji kosztów operacyjnych przy równoczesnym spełnieniu pozwolenia wodnoprawnego. Zagadnienia te omówiono w monografii.

## 1.2. Aktualny stan wiedzy

Historia projektowania algorytmów regulacji stężenia tlenu jest bardzo długa i sięga lat 80. ubiegłego stulecia (np. Ko i in. 1982; Olsson i in. 1985; Holmberg i in. 1989). Obecnie trwają liczne prace związane z tą tematyką.

W pierwszej kolejności trzeba wspomnieć o różnych układach regulacji podążających za znaną trajektorią zadaną stężenia tlenu (np. Cristea i in. 2011; Kandare i Nevado Reviriego 2011; Piotrowski 2011; Belchior i in. 2012; Han i in. 2012; Dai i in. 2013; Yang i in. 2014; Lin i Luo 2015; Piotrowski 2015; Ozturk i in. 2016; Piotrowski 2016; Jujun i in. 2017; Du i in. 2018; Santín i Vilanova 2019; Lemita i in. 2020; Li i in. 2020; Piotrowski i in. 2021).

Inne podejście stosuje się w pracach, w których oprócz pomiarów DO wykorzystuje się pomiary stężeń azotu amonowego ( $\text{NH}_4$ ), azotanów ( $\text{NO}_3$ ) i fosforanów ( $\text{PO}_4$ ) (np. Guerrero i in. 2011; Vrečko i in. 2011; Åmand i Carlsson, 2012; Piotrowski, 2013; Rieger i in. 2014; Santín i in. 2015; Harja i in. 2016; Caraman i in. 2020).

Kolejnym zagadnieniem, szeroko opisywanym w literaturze, jest problem wyznaczania zadanej trajektorii stężenia tlenu  $\text{DO}_{\text{zad}}$  w zależności od ilości i stopnia zanieczyszczenia ścieków dopływających do oczyszczalni oraz zmiennych warunków biologicznych, jakie w niej panują (np. Houzhaio i in. 2013; Santín i in. 2015; Grochowski i Rutkowski 2016; Caraman i in. 2020). Z punktu widzenia sterowania instalacja napowietrzająca traktowana jest w tym wypadku jako układ wykonawczy, który ma tę trajektorię możliwie dokładnie zrealizować.

Wskazane trzy grupy problemów regulacji stężenia tlenu dotyczą zarówno oczyszczalni przepływowych, jak i wsadowych. Dodatkowo w SBR, w przeciwieństwie do oczyszczalni przepływowej, ścieki pozostają zatrzymane w zbiorniku przez ściśle określony czas, który określa technolog lub regulator nadrzędny. Zatem odrębną, czwartą grupę zagadnień naukowych stanowi wyznaczenie zadań dla tego regulatora. Jego podstawową funkcją może być obliczenie czasu trwania cyklu pracy reaktora SBR i kolejnych faz cyklu. W pracy Artan i in.

(2002) zadania regulatora nadrzędnego obejmowały wyznaczenie: czasu trwania cyklu pracy reaktora SBR, stosunku czasu trwania fazy beztlenowej do czasu trwania fazy tlenowej, długości trwania faz i sekwencji doboru faz. Należy stwierdzić, że nie istnieje jeden najlepszy scenariusz pracy reaktora SBR w zmiennych warunkach operacyjnych (Traoré i in. 2005).

Ostatnim zagadnieniem jest optymalizacja procesów biologicznych zachodzących w reaktorze. W tym celu potrzebne są, oprócz pomiaru DO, dodatkowe pomiary, np.: pH, potencjału redoks (*oxidation reduction potential*, ORP) (Pavšelj i in. 2001; Peng i in. 2004; Fan i Xie 2011), wskaźnika szybkości poboru tlenu (*oxygen uptake rate*, OUR) (Traoré i in. 2005; Lemaire i in. 2008), czasu napowietrzania, kolejności faz (tlenowa/beztlenowa), liczby faz (Vives Fabregas 2004; Ferrari i in. 2010; Bournazou i in. 2013; San Martín i in. 2014; Wu i in. 2015; Flores-Tlacuahuac i Pedraza-Segura 2016). Poszukiwano różnych wielkości/parametrów optymalnych, takich jak: długość trwania faz cyklu pracy reaktora SBR (Pavšelj i in. 2001), długość trwania fazy tlenowej (Traoré i in. 2005; Lemaire i in. 2008), pary sekwencji beztlenowo-tlenowych i tlenowo-beztlenowych (Vives Fabregas 2004), trajektoria oczyszczania, czyli pośrednio czas napowietrzania (Ferrari i in. 2010; Bournazou i in. 2013; San Martín i in. 2014; Flores-Tlacuahuac i Pedraza-Segura 2016), kolejność faz, długość trwania fazy i liczba sekwencji (Ferrari i in. 2010), stosunek ilości pierwszego dolania ścieków do drugiego, stosunek długości trwania pierwszej fazy tlenowej do długości trwania pierwszej fazy beztlenowej, stosunek długości trwania drugiej fazy tlenowej do długości trwania drugiej fazy beztlenowej (Wu i in. 2015). W w pierwszej kolejności (Irizar 2021) obliczono wymiary reaktora SBR, a następnie zredukowano koszty operacyjne z wykorzystaniem optymalizacji wielokryterialnej.

W badaniach naukowych instalację napowietrzającą traktuje się jak system statyczny o jednostkowym wzmocnieniu. W rzeczywistości jest to system dynamiczny, nieliniowy i najczęściej hybrydowy (ze względu na postać zmiennych sterujących). Cechy te zostały uwzględnione i zamodelowane w niniejszej monografii.

Podstawowe cele autora obejmują zaprojektowanie i symulacyjną weryfikację nowoczesnych algorytmów sterowania stężeniem tlenu wraz z optymalizacją procesów biologicznych zachodzących w oczyszczalni wsadowej.

### 1.3. Struktura monografii

Tematyka monografii dotyczy naukowych zainteresowań autora. Część struktur oraz wyników sterowania i optymalizacji opracowano wspólnie ze studentami w ramach prac magisterskich, których autor był promotorem (autor składa serdeczne podziękowania za współpracę). Częstkowe wyniki badań przedstawiono we wspólnie przygotowanych artykułach (Błaszkiwicz i in. 2014; Hirsch i in. 2015; Hirsch i in. 2016; Piotrowski i in. 2016; Piotrowski i in. 2018; Piotrowski i in. 2019a; Piotrowski i in. 2019b).

Niniejsze opracowanie stanowi zmienioną, uaktualnioną i rozszerzoną wersję monografii pt. *Zaawansowane algorytmy sterowania i optymalizacji w biologicznej oczyszczalni ścieków typu wsadowego*, która ukazała się w 2018 roku nakładem Wydawnictwa Politech-

niki Gdańskiej (Piotrowski 2018). Jeden z rozdziałów został usunięty. Zmodyfikowano treści sześciu rozdziałów, bez zmiany wyników przedstawionych w rozdziałach 3–6. Dodano rozdziały 7 i 8. Udział wprowadzonych zmian oszacowano na około 25–30%.

Zaprezentowane w monografii wyniki sterowania i optymalizacji dotyczą struktury biologicznej oczyszczalni ścieków w Swarzewie przed modernizacją.

W rozdziale drugim opisano szczegółowo procesy przebiegające w oczyszczalni ścieków, ze szczególnym uwzględnieniem procesów biologicznych. Następnie omówiono SBR i instalację napowietrzającą pracującą w oczyszczalni ścieków w Swarzewie. Na koniec tego rozdziału scharakteryzowano aktualnie wykorzystywane sterowanie procesami biologicznymi i napowietrzaniem w oczyszczalni ścieków w Swarzewie.

Rozdział trzeci zawiera szczegóły dotyczące modelowania reaktora SBR i instalacji napowietrzającej z oczyszczalni ścieków w Swarzewie.

W kolejnym rozdziale zaproponowano nowy hierarchiczny adaptacyjny układ regulacji stężenia tlenu z nadrzędnym regulatorem regulowym.

W rozdziale piątym zmodyfikowano układ regulacji stężenia tlenu z poprzedniego rozdziału. Ponadto opracowano nowy nadrzędny regulator heurystyczny.

Następne trzy rozdziały pracy stanowią propozycję sformułowania i rozwiązania trzech trudnych, nieliniowych, hybrydowych (ze względu na postać zmiennych decyzyjnych) zadań optymalizacji procesów biologicznych. Przeprowadzono analizę symulacyjną efektywności zaproponowanych struktur i algorytmów optymalizacji dla różnych warunków obciążeń oczyszczalni ścieków w Swarzewie.

Ostatni rozdział monografii jest jej podsumowaniem.