

Zenon OCIEPA, Krzysztof LIPIŃSKI

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, INSTYTUT MECHATRONIKI, NANOTECHNOLOGII I TECHNIKI PRÓŻNIOWEJ
EKOWODROL SP. Z O.O. KOSZALIN

Model symulacyjny układu sterowania reaktorami SBR oczyszczalni ścieków

Dr inż. Zenon OCIEPA

Zajmuje się programowanymi układami sterowania, zwłaszcza przemysłowymi sterownikami PLC i systemami SCADA. W pracy naukowej prowadzi badania dyskretnych algorytmów sterowania oraz rozwija metody komputerowego wspomaganie projektowania regulatorów cyfrowych. Jest Bieglym Sądowym w zakresie komputerowych systemów monitorowania i sterowania w przemyśle i gospodarce.



e-mail: zenon.ociepa@tu.koszalin.pl

Mgr inż. Krzysztof LIPIŃSKI

Jest absolwentem Politechniki Koszalińskiej. W 2007 roku obronił pracę magisterską na kierunku Informatyka i podjął pracę zawodową w firmie Ekowodrol w Koszalinie. Specjalizuje się w automatyzacji procesów.



e-mail: krzysztof.lipinski@ekowodrol.pl

Streszczenie

Praca dotyczy sekwencyjnego reaktora biologicznego (szarżowego) SBR, stosowanego w oczyszczalniach ścieków. Autorzy skupili się na potrójnym reaktorze SBR i opracowali jego model symulacyjny. Opracowano także modele sterowań sekwencyjnych takimi reaktorami. Modele symulacyjne pozwalają analizować poprawność sterowań i bieżące poziomy ścieków w zbiornikach rozpatrywanej oczyszczalni. Wyniki symulacji mogą być wykorzystane na etapie projektowania oczyszczalni oraz w czasie eksploatacji działających reaktorów do prognozowania stanów krytycznych.

Słowa kluczowe: system sterowania, reaktor biologiczny, symulacja

The model of simulation of SBR reactor control

Abstract

The project concerns of SBR reactor control system used in biological treatment plant. The authors developed the simulation model of triple SBR reactor as well as and the models of sequence control system. The simulation models allow to analyze work of the control system and the current level of sewage in reservoirs of the sewage treatment plant. The advantage of simulation models could be taken during plant designing. They could be also useful for monitoring and prediction of critical states of working reactors.

Keywords: control system, SBR reactor, simulation

1. Wprowadzenie

W Polsce nadal istnieją potrzeby uruchamiania kolejnych nowoczesnych oraz modernizowania istniejących już oczyszczalni ścieków. Nowoczesność oczyszczalni ścieków postrzegana jest często poprzez wprowadzenie komputerowych metod do projektowania i eksploatacji takich obiektów [1].

W fazie projektowania metody komputerowe stosuje się do wspomaganie obliczeń inżynierskich i doboru najważniejszych urządzeń oczyszczalni. Wspomaganie to może mieć charakter komputerowych obliczeń statycznych, które były wykonywane dotychczas tradycyjnie, bez udziału komputera, lub z uwzględnieniem dynamiki procesów projektowanej oczyszczalni. Projektowanie oczyszczalni z uwzględnieniem dynamiki procesów wymaga znajomości modelu symulacyjnego procesu technologicznego w całej oczyszczalni lub chociażby jego najważniejszych urządzeń.

W fazie eksploatacji technika komputerowa wykorzystana jest do sterowania i monitorowania urządzeń oczyszczalni. To drugie zastosowanie nazywane jest w przemyśle wprowadzeniem systemu SCADA (ang. Supervisory Control and Data Acquisition), czyli nadrzędnego monitorowania i sterowania wspomaganego

techniką komputerową [2, 3, 4]. Niektóre systemy komputerowe SCADA, np. często stosowany iFix32 i InTouch mają możliwość wykonania symulacji komputerowej działania oczyszczalni z predykcją czasową w stosunku do aktualnie zmieniającego się strumienia ścieków na wejściu oczyszczalni. Taka symulacja zdarzeń procesowych, które mogą wystąpić w krótkiej przyszłości pozwala kierownictwu oczyszczalni podejmować racjonalne decyzje technologiczne. Ważne jest to zwłaszcza podczas nagłych załamania pogody na terenie funkcjonowania oczyszczalni lub wystąpienia długotrwałych przerw w zasilaniu elektrycznym czy też awarii ważnych urządzeń oczyszczalni.

Autorzy zajęli się modelowaniem procesu sterowania reaktorami biologicznymi SBR oczyszczalni ścieków na przykładzie konkretnej modernizowanej oczyszczalni w Jarosławcu. Opracowano modele symulacyjne układu sterowania trzema reaktorami SBR oczyszczalni. Modele te można wykorzystać na etapie projektowania oczyszczalni, np. przy doborze elementów wykonawczych systemu automatyki oraz na etapie eksploatacji do prognozowania stanów oczyszczalni.

2. Uproszczony opis funkcjonowania reaktora biologicznego SBR

Jednym ze współczesnych sposobów oczyszczania ścieków jest zastosowanie sekwencyjnego reaktora biologicznego SBR. W dosłownym tłumaczeniu SBR oznacza sekwencyjny reaktor szarżowy (ang. Sequencing Batch Reactor), który w zależności od potrzeb projektowych może wystąpić jako pojedynczy, podwójny lub potrójny. Uważa się, że oczyszczalnie z takimi reaktorami nie są drogie, nie zajmują dużych powierzchni i mogą być dość łatwo rozbudowane [1]. Reaktory SBR charakteryzują się cyklicznością pracy i szczególnie nadają się do automatyzacji z zastosowaniem programowalnych sterowników przemysłowych PLC (Programmable Logic Control). Sterowanie oczyszczalnią z reaktorami SBR, w dużym uproszczeniu, polega na wymuszaniu przez układ automatyki odpowiednich sekwencji działań urządzeń, w zależności od obserwowanych aktualnych warunków (stanów) pracy oczyszczalni i czasu bieżącego, z uwzględnieniem historii dotychczasowych działań (sterowań).

W tego typu reaktorach oczyszczanie ścieków odbywa się w sposób porcjowy (proces szarżowy) z częściowym napełnianiem i opróżnianiem, a wszystkie procesy i fazy oczyszczania biologicznego zachodzą sekwencyjnie w tym samym zbiorniku.

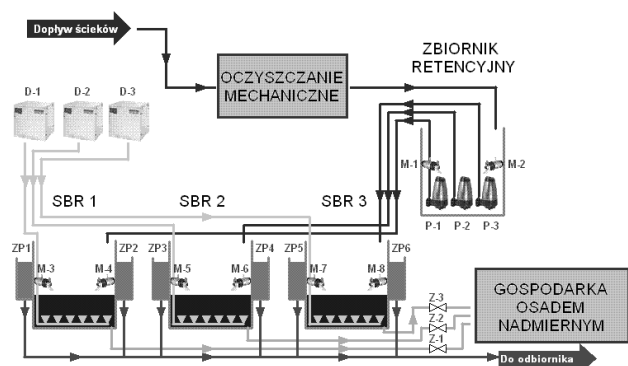
Każdy z reaktorów SBR wyposażony jest w następujące urządzenia (rys. 1):

- ✓ napowietrzające, składające się najczęściej z rusztów napowietrzających zainstalowanych na dnie zbiornika i wyposażonych

w odpowiednie dyfuzory zapewniające prawidłowe rozpraważenie tlenu, ruszty napowietrzające zasilane są przez dmuchawy, znajdujące się w stacji dmuchaw (D-1÷D-3),

- ✓ mieszające, są to najczęściej mieszadła zatapialne, zapewniające prawidłowe wymieszanie wsadu z osadem czynnym znajdującym się na dnie reaktora (M3÷M8),
- ✓ odprowadzające sklarowaną warstwę ścieków oczyszczonych – do tego celu stosuje się dekantery pływające lub zastawki przelewowe (ZP-1÷ZP-6),
- ✓ odprowadzające osad nadmierny – do tego celu wykorzystuje się pompy do osadu nadmiernego, lub stosuje się metodę grawitacyjną – sterowanie spustem osadu odbywa się wtedy za pomocą zasuw elektrycznych (Z-1÷Z-3),
- ✓ rurociągi i armaturę.

Schemat oczyszczalni z potrójnym reaktorem SBR przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat oczyszczalni ścieków z potrójnym reaktorem biologicznym SBR
Fig. 1. Schema of biological treatment plant with threefold biological reactor SBR

Ścieki po oczyszczeniu mechanicznym trafiają do zbiornika retencyjnego. Ze względu na to, że reaktor SBR pracuje w sposób sekwencyjny, nie może on przyjmować ścieków w trakcie wykonywania cyklu oczyszczania. Komora retencyjna służy zatem do gromadzenia ciągle napływających ścieków. W komorze retencyjnej znajdują się trzy pompy zatapialne P-1, P-2 i P-3. Każda pompa tłoczy z odpowiednim harmonogramem ścieki do swojego reaktora SBR-1, SBR-2 i SBR-3. Ponadto w zbiorniku retencyjnym znajdują się dwa mieszadła M-1 i M-2, które pracując cyklicznie zapobiegają gromadzeniu się na dnie komory zalegającego osadu. Każdy z reaktorów SBR jest prostopadłościennym zbiornikiem z osadem czynnym w postaci odpowiednio wyhodowanych bakterii pożywiających się zanieczyszczeniami zawartymi w ściekach.

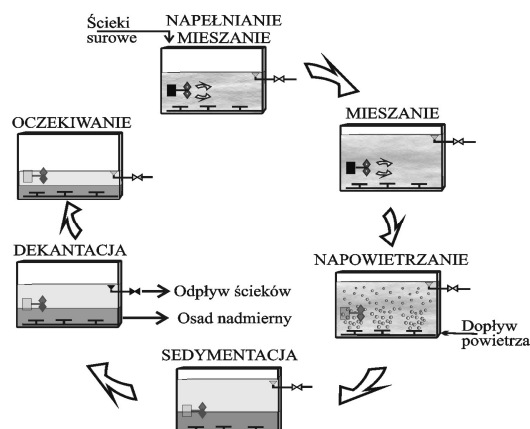
Reaktory SBR są napełniane i opróżniane częściowo. Podczas fazy napełniania reaktora zastawki są zamknięte, napowietrzanie jest wyłączone. Co pewien okres czasu uruchamiane są mieszadła. Ponieważ w fazie napełniania reaktor spełnia także rolę zbiornika retencyjnego, mieszadła spełniają podobną rolę jak w komorze retencyjnej. Dodatkowym zadaniem mieszadeł jest ujednoczenie gęstości wsadu w całym przekroju reaktora. Po fazie napełniania reaktora następuje faza oczyszczania biologicznego. Uzyskuje się to poprzez intensywne napowietrzanie zawartości reaktora, oraz dokładne mieszanie osadu i wsadu. W tym momencie dawkowana jest także substancja PIX, mająca na celu głównie wytrącenie fosforu z oczyszczanych ścieków. Po fazie oczyszczania następuje faza sedymentacji, czyli oddzielenia się osadu od oczyszczonych już ścieków. Drobinos osadu opadają na dno, natomiast wyżej znajdują się oczyszczone ścieki.

Po fazie sedymentacji następuje spust wsadu do odbiornika (w tym wypadku do rzeki), poprzez opuszczenie zastawek

spustowych. Następnym krokiem jest odprowadzenie nadmiernego osadu przez otwarcie zasów z napędem elektrycznym i specjalnych rur umieszczonych na dnie reaktora. Odprowadzenie osadu jest niezbędne, ponieważ przy każdym cyklu oczyszczania, jego objętość się zwiększa. Osad nadmierny trafia do komory osadu nadmiernego i podlega dalszym procesom technologicznym, które w niniejszej pracy nie były rozpatrywane.

Funkcjonowanie każdego reaktora SBR można podzielić na fazy, które trwają określony z góry czas, lub uzależnione są od warunków aktualnie panujących w reaktorze, np.:

- 1) Napełnianie komory ściekami,



Rys. 2. Cykl pracy reaktora SBR
Fig. 2. Working cycle of the reactor SBR

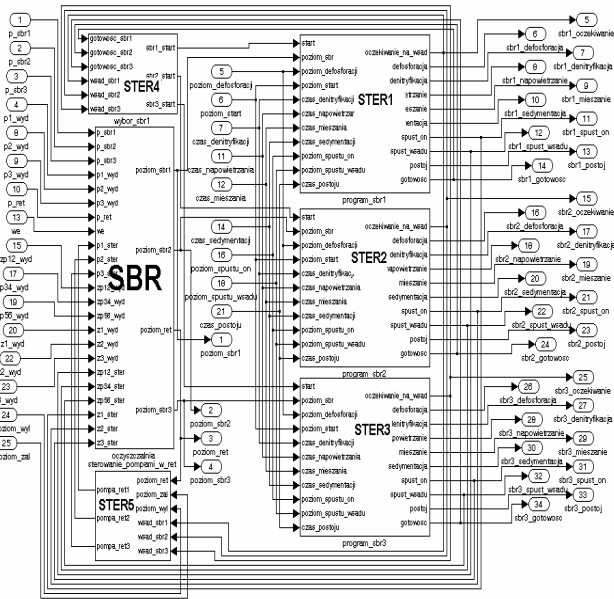
- 2) Reakcja biologiczna połączona z mieszaniem i napowietrzaniem,
- 3) Sedymentacja – oddzielenie osadu czynnego od ścieków oczyszczonych (klarowanie),
- 4) Dekantacja – odprowadzenie ścieków oczyszczonych i osadu nadmiernego,
- 5) Oczekiwanie – chwilowy przestój reaktora po zakończonym cyklu.

3. Modele i badania symulacyjne sterowania reaktorem SBR

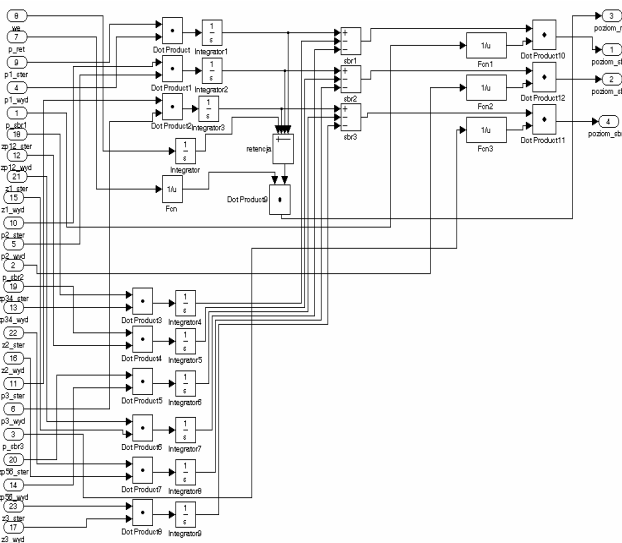
Kierując się znajomością funkcjonowania oczyszczalni [1, 2, 3] zbudowano w środowisku programowym Matlab/Simulink model symulacyjny (rys. 3) układu sterowania pracą potrójnego reaktora SBR. W modelu uwzględniono: moduł SBR reprezentujący trzy reaktory biologiczne wraz ze zbiornikiem retencyjnym, trzy moduły STER z algorytmami sterowania poszczególnymi reaktorami, moduł STER4 z algorytmami kolejności załączania reaktorów oraz moduł STER5 z algorytmami sterującymi pracą pomp w zbiorniku retencyjnym. Moduł symulacyjny reaktora SBR uwzględnia harmonogramy czasowe jego naturalnej cyklicznej pracy (rys. 2), rzeczywiste parametry geometryczne zbiorników reaktorów i zbiornika retencyjnego, rzeczywiste parametry elementów wykonawczych (pomp, zaworów zastawek, kłap, mieszadeł) oraz sygnały z czujników poziomu ścieków w zbiornikach.

W modelu SBR (rys. 4) uwzględniono dynamikę procesów napełniania i opróżniania zbiorników reaktorów i zbiornika retencyjnego, natomiast nie uwzględniano dynamiki procesów biologicznych zachodzących w reaktorach. Reaktory SBR stosowane są w małych i średnich oczyszczalniach gdzie często nie prowadzi

się regulacji ciągłej istotnych dla oczyszczalni wielkości, np. stężenia tlenu rozpuszczonego i potencjału redox [1]. W reaktorach SBR sterowanie dostarczaniem określonej porcji ścieków, kolejnością i czasem trwania faz pracy reaktora sterują odpowiednio oprogramowane sterowniki przemysłowe PLC. Współczesne komputerowe systemy automatyki, zwłaszcza w większych oczyszczalniach monitorują ważne dla oczyszczania parametry, takie jak stężenie CO₂, gęstość biomasy, potencjał redox i zawartość azotu w związkach azotowych. Sygnały odpowiadające wyżej wymienionym pomiarom wykorzystuje się w sekwencyjnym układzie sterowania do wyznaczenia gotowości reaktora do zmiany czasu trwania faz pracy reaktora. Taką sytuacją można nazwać sterowaniem programowalnym z automatyczną korektą czasów sekwencji sterowań.



Rys. 3. Model symulacyjny układu sterowania reaktora SBR
Fig. 3. The simulating model of control system of the reactor SBR



Rys. 4. Model symulacyjny potrójnego reaktora SBR
Fig. 4. The simulation model of triple SBR reactor

Do modelu symulacyjnego wprowadza się (rys. 3, 4, 5):

1) parametry techniczne urządzeń oczyszczalni, takie jak:

p_sbr , p_ret – powierzchnię zbiorników: reaktora i retencyjnego [m²], $p1_wyd$ – wydajność pomp [m³/s]; $zp12_wyd$, z_wyd – przepustowość zastawek przelewowych reaktora i zasuwy osadu nadmiernego [m³/s];

Wydajności pomp, przy danej wysokości podnoszenia, wprowadzano do modelu symulacyjnego na podstawie kart katalogowych, natomiast przepustowość zastawek i zasuw została wyznaczona eksperymentalnie, podczas uruchamiania rzeczywistej oczyszczalni w Jarosławcu.

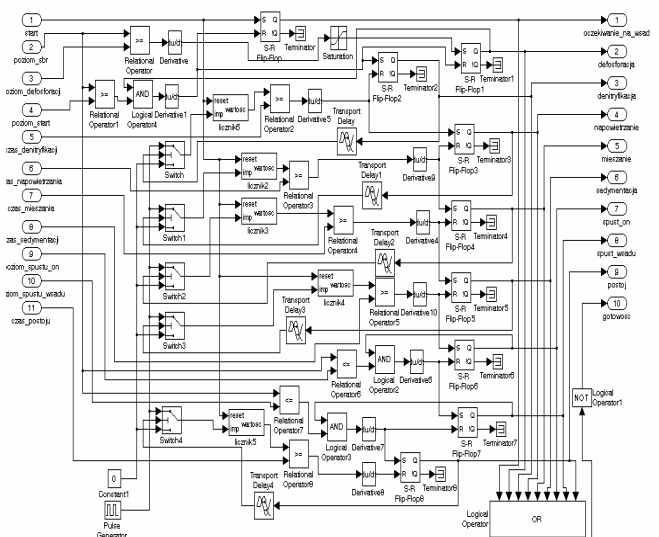
2) nastawy wynikające z technologii oczyszczania oraz funkcjonowania urządzeń automatyki, takie jak:

we – dopływ ścieków do oczyszczalni [m³/s]; ret_poziom_wyl – poziom ścieków w zbiorniku retencyjnym, przy której następuje wyłączenie pompy tłoczącej ścieki do jednego z reaktorów [m]; ret_poziom_zal – poziom ścieków w zbiorniku retencyjnym, przy którym następuje załączenie pompy tłoczącej ścieki do danego reaktora [m]; $poziom_defosforacji$ – poziom ścieków w reaktorze SBR, przy którym załączana jest procedura defosforacji [m]; $poziom_start$ – poziom ścieków w reaktorze SBR, przy którym kończy się faza oczekiwania na wsad (napelniania reaktora) i faza defosforacji, a zaczyna się procedura oczyszczania ścieków, zapoczątkowana fazą denitryfikacji [m]; $czas_denitryfikacji$ - czas trwania fazy denitryfikacji [s]; $czas_napowietrzania$ - czas trwania fazy napowietrzania [s]; $czas_mieszania$ - czas trwania fazy mieszania [s]; $czas_sedymetacji$ - czas trwania fazy sedymetacji [s]; $poziom_spustu_on$ - poziom, do jakiego zostanie spuszczone osad nadmierny, wytworzony podczas oczyszczania ścieków [m]; $poziom_spustu_wsadu$ - poziom, do jakiego zostanie spuszczone wsad reaktora – wsad nie może być spuszczone do końca, gdyż na dnie reaktora znajduje się osad czynny, który powoduje biologiczne oczyszczanie ścieków [m]; $czas_postoiu$ - czas postoiu (odpoczynku) reaktora, po oczyszczeniu porcji ścieków [s];

Zmiennymi wyjściowymi modelu symulacyjnego, na podstawie których można analizować poprawność funkcjonowania reaktorów SBR mogą być aktualne poziomy ścieków w zbiorniku retencyjnym i w reaktorach SBR:

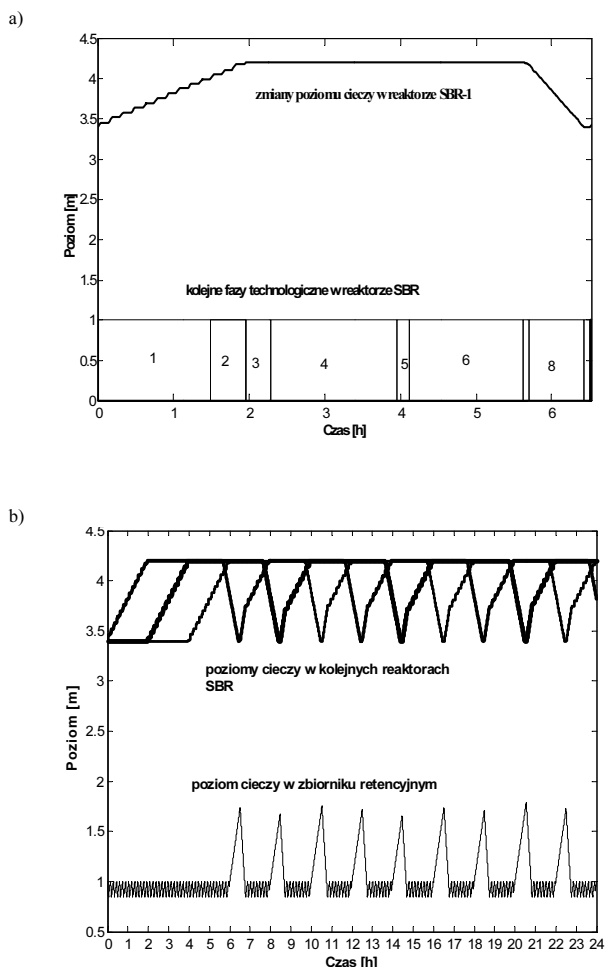
$poziom_ret$, $poziom_sbr1(sbr2, sbr3)$ [m].

Na rysunku 5 przedstawiono model układu sterowania reaktorami SBR.



Rys. 5. Model układu sterowania reaktorem SBR
Fig. 5. The model of control system of the reactor SBR

Przedstawione modele symulacyjne (rys. 3, 4, 5) pozwalają przeprowadzić symulacje działania reaktora SBR po zadaniu na jego wejście np. maksymalnie możliwych dopływów ścieków. Dla oczyszczalni w Jarosławcu było to 2600 m³/d. Wyniki symulacji pozwalały oceniać poprawność pracy trójstopniowego reaktora SBR przez obserwacje zmian w czasie poziomów ścieków w poszczególnych zbiornikach reaktorów i zbiorniku retencyjnym (rys. 6). Można było też ocenić: poprawność doboru wielkości i liczby zbiorników reaktora SBR, dobór elementów wykonawczych systemu sterowania, takich jak pompy i inne elementy instalacji wodnej.



Rys. 6. Zmiany poziomu ścieków w reaktorze SBR: a) w kolejnych fazach (krokach) działania, b) podczas synchronicznego działania trzech reaktorów SBR i zbiornika retencyjnego

Fig. 6. The change of level of sewages in SBR reactor: a) in next steps working, b) during synchronic working of three reactors SBR and reservoir

Symulacje pozwalają ocenić poprawność algorytmów sterowania potrójnym reaktorem SBR na podstawie przebiegu zmian poziomów ścieków w poszczególnych zbiornikach. Zmiany te powinny być skorelowane między sobą w czasie rzeczywistym, z zachowaniem ustalonych faz pracy reaktora i czasów ich trwania.

Model symulacyjny układu sterowania (rys.5), po ustaleniu parametrów symulacji, może być zaimplementowany w rzeczywistych sterownikach PLC sterujących procesem w oczyszczalni. W modelu symulacyjnym układu sterowania (rys.5) występują elementy funkcjonalne, które mają swoje odpowiedniki w językach programowania sterowników przemysłowych PLC, np. języku drabinkowym LD (ang. Ladder Diagram). Autorom nie jest znany program komputerowy do automatycz-

nego prototypowania programów sterujących dla sterowników PLC wprost ze środowiska symulacyjnego Matlab, jak to jest w przypadku układów z procesorem sygnałowym DSP. Z uwagi na „otwartość” środowiska Matlab możliwe jest opracowanie takiego programu.

Przykładowe symulacje działania reaktorów SBR przedstawiają rysunki 6a i 6b.

Na rysunku 6a wyróżniono następujące fazy działania SBR: 1- napełnianie, 2- defosforacja, 3- denitryfikacja, 4- napowietrzanie, 5- mieszanie, 6- sedimentacja, 7-spust osadu nadmiernego, 8- spust wsadu, 9- postój. Na rysunku 6a można ocenić sekwencyjną i synchroniczną pracę potrójnego reaktora SBR, w którym zmienia się poziom ścieków w granicach od 3.4 do 4.2 m. Na wykresie poziomu ścieków w zbiorniku retencyjnym występują piki nieprzekraczające jednak założonej (projektowanej) wysokości. Ich występowanie jest cykliczne i powodowane zbieżnością czasową (pokryciem) faz pracy trzech reaktorów, w czasie których nie odbierają one kolejnych porcji ścieków ze zbiornika retencyjnego. Zbiornik retencyjny przyjmuje ciągle dopływ nowych ścieków.

4. Podsumowanie i wnioski

Opracowane modele symulacyjne reaktorów biologicznych SBR i układów sterowania nimi były przydatne w czasie projektowania oczyszczalni w Jarosławcu. Model symulacyjny układu sterowania reaktorami SBR stał się bardziej wiarygodny po wprowadzeniu do niego niektórych zidentyfikowanych w oczyszczalni parametrów technicznych urządzeń, np. wyznaczono eksperymentalnie przepustowość zastawek i zasuw elektrycznych. Przy projektowaniu symulacje pozwalają dobrać parametry konstrukcyjne reaktorów i aparatury sterującej tak aby zapewnić wymagane parametry technologiczne oczyszczalni, np. odpowiednią ich wydajność. W czasie eksploatacji symulacje mogą być wykorzystane do prognozowania stanów oczyszczalni, zwłaszcza w sytuacji wystąpienia nadmiernie dużych ilości ścieków, czy też awarii niektórych ważnych urządzeń oczyszczalni. Opracowane w modelach symulacyjnych algorytmy sterowania reaktorami SBR mogą być zaimplementowane w programowalnych sterownikach PLC. W przyszłości można rozbudować opracowane modele symulacyjne układu sterowania reaktorem SBR z uwzględnieniem regulacji ciągłej istotnych dla oczyszczalni wielkości, np. stężenia CO₂ czy też gęstości biomasy.

5. Literatura

- [1] Malej J., Piekarski J.: Wykorzystanie techniki komputerowej do projektowania i eksploatacji wysokosprawnych oczyszczalni ścieków. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2005.
- [2] Lipiński K.: Oprogramowanie pomiarowo-sterujące reaktora biologicznego oczyszczalni ścieków. Praca dyplomowa wykonana pod kierunkiem Z. Ociepa, Wydział Elektroniki i Informatyki, Politechnika Koszalińska 2006.
- [3] Ociepa Z.: Wymagania i założenia projektowe dla systemu wizualizacji i sterowania oczyszczalnią miejską Jamno k/Koszalin. Opracowanie na potrzeby Urzędu Miejskiego w Koszalinie, Koszalin 2001.
- [4] Kwaśniewski J.: Programowalne sterowniki przemysłowe w systemach sterowania. Kraków 1999.
- [5] Legierski T., Kasprzyk J., Wyrwał J., Hajda J.: Programowanie sterowników PLC. Gliwice 1998.