



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Ujazdowskiego
pt. *Optimisation of biological processes and management of several
reactors in a batch type wastewater treatment plant*
opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Gdańskiej – prof. dr. hab. inż. Piotra Jasińskiego

1. Obszar problemowy

Analiza i sterowanie coraz bardziej złożonych procesów fizycznych i technologicznych wymaga dalszego rozwoju zaawansowanych metod modelowania matematycznego, sterowania i optymalizacji procesów oraz zarządzania nimi. Tematyka rozprawy jest aktualna i istotna zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Współczesne oczyszczalnie ścieków wymagają zwiększania efektywności energetycznej oraz optymalnego wykorzystania infrastruktury technologicznej, co uzasadnia podjęcie badań nad integracją metod sterowania i harmonogramowania. Opiniowana rozprawa jest bardzo udaną propozycją opracowania metod optymalizacji procesów biologicznych oraz zarządzania pracą wielu reaktorów sekwencyjnych w oczyszczalni ścieków. Autor koncentruje się na integracji zagadnień sterowania procesowego, optymalizacji wielokryterialnej oraz harmonogramowania zadań w ramach hierarchicznej architektury sterowania. Sformułowana na str. 18 teza rozprawy oraz poprawnie określone szczegółowe dwa zadania badawcze wymagające rozwiązania, których rozwiązanie będzie potwierdzeniem tezy uważam, że są bardzo dobrze opracowane.

Na podstawie dokonanego bardzo dobrego przeglądu literatury i oceny stanu wiedzy dotyczącej sterowania i zarządzania pracą oczyszczalni ścieków sformułowano cel rozprawy sprowadzający się opracowania kompleksowego systemu sterowania i zarządzania pracą wieloreaktorowej oczyszczalni ścieków typu wsadowego, umożliwiającego zwiększenie efektywności operacyjnej oraz energetycznej. Głęboka analiza problemu dotyczyła między innymi identyfikacji aktualnego stanu wiedzy w zakresie biologicznego oczyszczania ścieków,

analizy metod sterowania i optymalizacji stosowanych w reaktorach wsadowych oraz przeglądu algorytmów harmonogramowania zadań w systemach wieloreaktorowych. Realizując cel rozprawy w zakresie modelowania procesów biologicznych między innymi opracowano i zmodyfikowano modele osadu czynnego z uwzględnieniem usuwania biogenów. Omówiono modelowanie sekwencyjnego reaktora wsadowego oraz pokazano budowę modeli wielowarstwowych reaktora czy opracowanie modeli dopływu ścieków oraz parametrów pracy instalacji. Budowę modeli procesów przeprowadzono z punktu widzenia dalszego ich wykorzystania w układach sterowania i optymalizacji. Opracowano strukturę hierarchiczną procesami sterowania oczyszczalni ścieków obejmującą trzy warstwy a mianowicie warstwę sterowania bezpośredniego, warstwę sterowania procesem oraz warstwę optymalizacji i zarządzania procesem. Pokazano integracja warstw w spójny system sterowania oczyszczalnią.

W zakresie sterowanie procesem biologicznego oczyszczania zastosowano nieliniowe sterowanie predykcyjne, pokazano regulację stężenia tlenu rozpuszczonego w fazach napowietrzania, opracowano projekt algorytmów sterowania dla zmiennych warunków dopływu oraz przeprowadzono analizę stabilności i jakości sterowania. Analizując złożony problem optymalizacji procesu oczyszczania sformułowano problem optymalizacji cyklu pracy reaktora z zastosowaniem algorytmów optymalizacji wielokryterialnej. Wyznaczono optymalne parametry cyklu biologicznego z uwzględnieniem ograniczeń technologicznych i eksploatacyjnych oraz przeprowadzono analizę kompromisu między efektywnością energetyczną a jakością oczyszczania.

Rozpatrując problemy pracy wielu reaktorów zdefiniowano problemy harmonogramowania zadań w oczyszczalni oraz opracowano algorytmy harmonogramowania na określonym horyzoncie czasowym. Ponadto przeprowadzono proces modelowania pracy kilku reaktorów wsadowych z uwzględnieniem zbiorników retencyjnych jako buforów oraz integrację harmonogramowania zadań z optymalizacją procesową. Efektywność zaproponowanych rozwiązań i algorytmów, jak również ich skuteczność została pokazana przede wszystkim na podstawie obszernych badań eksperymentalnych z wykorzystaniem opracowanego środowiska symulacyjnego. Przeprowadzono analizy różnych scenariuszy pracy oczyszczalni oraz dokonano oceny wpływu optymalizacji na zużycie energii i efektywność operacyjną. Przeprowadzona szeroka analiza wyników badań symulacyjnych dotyczyła również oceny skuteczności zaproponowanego podejścia i identyfikacji korzyści operacyjnych i energetycznych.

2. Koncepcja oraz realizacja rozprawy

Rozprawa o ogólnej objętości 171 strony opracowana jest w języku angielskim z krótkimi 0.5 stronicowymi streszczeniami w języku polskim i angielskim. Składa się z siedmiu rozdziałów, podsumowania oraz trzech dodatków, w tym opis modelu tlenu rozpuszczonego na podstawie bilansu masowego, przedstawienie modeli szybkość respiracji dla biologicznego usuwania fosforu w modelu osadu czynnego oraz sformułowanie jednokryterialnej optymalizacji cyklu operacyjnego reaktora sekwencyjnego. Ponadto załączony wykaz ponad 150 cytowanych pozycji literaturowych zarówno krajowych i międzynarodowych bardzo dobrze określa stan wiedzy w zakresie tematyki rozprawy i potwierdza dobrze przeprowadzone studia literaturowe przez doktoranta chociaż odczuwalna jest potrzeba głębszej analizy metod uczenia maszynowego w zastosowaniach sterowania procesami technologicznymi i ich porównanie.

Rozdział pierwszy jest ogólnym wprowadzeniem do tematyki rozprawy zawierającym bogaty przegląd literatury dotyczącej wybranych aspektów infrastruktury oczyszczalni ścieków takich jak sterowanie procesem, model osadu czynnego, osadnik i transport, system napowietrzania czy czujniki i estymatory. Omawia także podejście wielowarstwowego sterowania oraz wprowadza koncepcję harmonogramowania zadań w oczyszczalni ścieków. Krótki bo 6-stronicowy rozdział drugi stanowi podstawę do budowy modeli i systemu sterowania gdzie omawia się oczyszczalnię ścieków w Swarzewie zarządzaną przez Spółkę Wodno-Ściekową 'Swarzewo', w tym układ technologiczny, parametry pracy, cykl pracy sekwencyjnego reaktora wsadowego oraz wymagania jakościowe dla ścieków oczyszczonych.

Kolejny rozdział trzeci zawiera opracowane modele matematyczne służące do projektowania algorytmów sterowania i optymalizacji w dalszych częściach rozprawy. Mając na uwadze silne powiązania między zjawiskami hydraulicznymi, biochemicznymi i sedymentacyjnymi zachodzącymi w reaktorze wsadowym do jego modelowania zastosowano podejście strukturalne. Podstawowy model opisany jest równaniem różniczkowym cząstkowym, który po przyjętych uproszczeniach i założeniach wykorzystano do opisu modelu trójwarstwowego. Ponadto opracowano modele osadu czynnego, tlenu rozpuszczonego jak również modele systemów pomiarowych i układów wykonawczych, dopływu ścieków oraz modele optymalizacyjne i harmonogramowania. Rozdział czwarty przedstawia architekturę hierarchicznego systemu sterowania i jej uzasadnienie z punktu widzenia wymagań pracy oczyszczalni ścieków, czyli zapewnienia bezpieczeństwa operacyjnego, utrzymania wymaganej jakości oczyszczonych ścieków oraz optymalizację zużycia zasobów i kosztów

operacyjnych. Zaproponowana struktura hierarchiczna z podziałem na warstwy sterowania obejmuje warstwę sterowania bezpośredniego, warstwę sterowania procesem, warstwę optymalizacji procesu oraz warstwę harmonogramowania zadań.

Z kolei w rozdziale piątym przedstawiono system sterowania obejmujący sterowanie procesem oraz optymalizację parametrów biologicznego procesu oczyszczania. Do sterowania rozpuszczonego tlenu w sekwencyjnym reaktorze wsadowym zastosowano metodę nieliniowego sterowania predykcyjnego wraz z analizą horyzontu predykcji i sekwencji sterowań. Sformułowano problem optymalizacji sterowania procesem rozpuszczania tlenu przy założeniu dwóch funkcji celu, a mianowicie jakości sterowania procesem oraz kosztów procesu, który jest bezpośrednio związany z ilością energii elektrycznej zużywanej przez dmuchawy. Opisano cykle pracy reaktora oraz diagramy i tabele cykli stanów wraz z alfabetem. Przedstawiono także problem wyboru i wdrożenia optymalnych cykli z zastosowaniem algorytmu genetycznego.

Rozdział szósty wprowadza zarządzanie pracą oczyszczalni na poziomie produkcyjnym i dotyczy harmonogramowania pracy wielu reaktorów. Pokazano architektury systemów integracji harmonogramowania zadań w ramach struktury kontroli hierarchicznej oraz zarządzania i kontroli zespołu wielu reaktorów. Sformułowano problem optymalizacji dla przyjętej funkcji celu wraz z ograniczeniami technologicznymi. Przedstawiono model harmonogramowania zadań, algorytm optymalizacji oraz integrację harmonogramowania z systemem sterowania.

Ostatni rozdział siódmy przedstawia wyniki badań symulacyjnych, które ilustrują wpływ proponowanych metod na efektywność pracy oczyszczalni. Podano konfiguracje wykonanych eksperymentów oraz parametry symulacji. Przedstawione wyniki sterowania procesem, jego optymalizacji oraz harmonogramowania bardzo dobrze ilustrują i potwierdzają efektywność proponowanych algorytmów oraz procedur sterowania oczyszczalnią ścieków na poziomie sterowania procesem oraz zarządzania. Pokazano wpływ proponowanych metod i rozwiązań na efektywność pracy oczyszczalni.

Na podstawie skrótowego omówienia treści rozprawy stwierdzam, że mgr inż. Tomasz Ujazdowski w bardzo dobrym stopniu wykazał się umiejętnościami formułowania problemów naukowo-badawczych i technologicznych na podstawie głębokiej analizy stanu wiedzy z wykorzystaniem dostępnej literatury światowej zawierającej ponad 150 pozycji obejmujących

monografie oraz artykuły opublikowane w wiodących czasopismach i materiałach konferencyjnych. Sformułowany problem opracowania kompleksowego hierarchicznego systemu sterowania i zarządzania pracą wieloreaktorowej oczyszczalni ścieków typu wsadowego celem zwiększenie efektywności operacyjnej oraz energetycznej rozwiązał właściwymi metodami badawczymi dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne na wysokim poziomie teoretycznym i technicznym. Dodatkowo wykonane liczne i obszerne badania symulacyjne potwierdziły własności, zalety i efektywność zaproponowanych metod, algorytmów i rozwiązań. Rozprawa posiada charakter praktyczno-teoretyczny a do opisu metod i algorytmów zastosowano właściwy formalizm matematyczny. Ponadto doktorant wykazał się bardzo dobrą wiedzą z takich metod badawczych jak np. modelowanie matematyczne złożonych procesów technologicznych, metody sterowania procesami nieliniowymi w tym sterowanie predykcyjne, optymalizacja procesów czy zarządzanie procesami i harmonogramowanie zadań.

3. Osiągnięcia oryginalne

Uzasadniając postawioną tezę rozprawy i realizując sformułowane cele badawcze oraz zadania mgr inż. Tomasz Ujazdowski uzyskał wiele ciekawych, ważnych i oryginalnych wyników naukowych potwierdzonych zarówno na drodze formalnych analiz matematycznych jak i przede wszystkim badań symulacyjnych. Do ważnych osiągnięć naukowych mgr. inż. Tomasza Ujazdowskiego zaliczam m.in. następujące

1. Jednym z kluczowych osiągnięć rozprawy jest zaproponowanie i implementacja hierarchicznego systemu sterowania dla oczyszczalni ścieków typu wsadowego, obejmującego trzy poziomy: sterowanie procesem, optymalizację procesu, oraz zarządzanie procesem (harmonogramowanie pracy reaktorów). W każdej warstwie został zdefiniowany odrębny problem optymalizacji oraz opracowano metody jego rozwiązania. Takie podejście umożliwiło integrację zagadnień sterowania, optymalizacji i planowania pracy instalacji w ramach jednego spójnego systemu sterowania.
2. Opracowanie oraz modyfikacja modeli matematycznych opisujących proces oczyszczania ścieków, w szczególności modeli osadu czynnego rozszerzone o moduły usuwania fosforu, wielowarstwowe modele sekwencyjnych reaktorów wsadowych oraz modeli do formułowania problemu harmonogramowania pracy wielu reaktorów. Zastosowanie modeli pozwoliło na realistyczne odwzorowanie dynamiki procesów

biologicznych (przy przyjętych założeniach) oraz ich wykorzystanie w zadaniach sterowania i optymalizacji.

3. Istotnym osiągnięciem było zaproponowanie nieliniowego sterowania predykcyjnego dla regulacji stężenia tlenu rozpuszczonego w fazach napowietrzania. Zaproponowane rozwiązanie poprawia śledzenie trajektorii referencyjnej, zapewnia bardziej płynne działania sterujące, redukuje zużycie energii oraz spełnia wymagania jakościowe procesu oczyszczania. Ponadto przeprowadzone badania wykazały, że metoda ta stanowi efektywną alternatywę dla klasycznych strategii sterowania stosowanych w literaturze.
4. Opracowanie metody wielokryterialnej optymalizacji parametrów cyklu oczyszczania, obejmującą m.in. czas trwania poszczególnych faz cyklu, poziom stężenia tlenu w fazach napowietrzania oraz liczbę sekwencji tlenowych i beztlenowych. Zastosowanie podejścia optymalizacyjnego typu Pareto umożliwiło analizę kompromisu między jakością oczyszczania a kosztami operacyjnymi, co pozwala na dobór strategii pracy dostosowanej do różnych warunków dopływu ścieków.
5. Nowatorskim elementem rozprawy jest wprowadzenie harmonogramowania zadań do zarządzania wieloma reaktorami wsadowymi, z uwzględnieniem ograniczeń magazynowania w zbiornikach retencyjnych, dostępności zadań technologicznych, zmiennych warunków dopływu ścieków oraz horyzontu planowania obejmującego dwa tygodnie. Badania potwierdziły możliwość efektywnego i optymalnego zarządzania pracą wielu reaktorów w czasie, przy zachowaniu ograniczeń technologicznych.
6. Zaprojektowanie kompletnego, wielowarstwowego systemu sterowania i zarządzania, który łączy sterowanie procesem z optymalizacją, umożliwia planowanie pracy wielu reaktorów, oraz pozwala dostosować parametry pracy do zmiennych warunków. Pokazanie poprawy efektywności energetycznej oczyszczalni co zostało potwierdzone badaniami przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych, które wykazały znaczące zmniejszenie zużycia energii dla napowietrzania.

Przedstawione w rozprawie oryginalne wyniki naukowe potwierdzone badaniami teoretycznymi i symulacyjnymi zostały opublikowane przez doktoranta w pięciu współautorskich artykułach w prestiżowych czasopismach naukowych z reprezentowanej dyscypliny i indeksowanych w bazie JCR. Są to czasopisma: *IEEE Access*, 2022 (IF:3,6), *Journal of Water Process Engineering*, 2023 (IF: 6,7), *Acta Mechanica et Automatica*, 2023 (IF: 0.738), *Journal of Process Control*, 2024 i 2025 (IF: 3,9). Ponadto doktorant jest

współautorem czterech referatów konferencyjnych opublikowanych w materiałach międzynarodowych konferencji naukowych takich jak *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics – MMAR 2022*, 2024, Międzyzdroje, *European Control Conference – ECC*, 2024, Stockholm, Szwecja oraz *IFAC Symposium on Large Scale Complex Systems: Theory and Applications – LSS*, 2025, Dublin, Irlandia.

Uwzględniając wymienione osiągnięcia i oryginalne wyniki badań naukowych oraz ich opublikowanie w pięciu prestiżowych czasopismach z listy JCR oraz w czterech referatach opublikowanych w materiałach konferencji międzynarodowych odbywających się w Szwecji, Irlandii i w kraju, uważam, że mgr inż. Tomasz Ujazdowski zrealizował cele badawcze, rozwiązał sformułowane zadania w stopniu wyróżniającym i uzasadnił postawioną tezę.

1. Uwagi i komentarze

Ogólnie całą rozprawę oceniam bardzo dobrze zarówno pod względem merytorycznym jak i redakcyjnym. Pewne uwagi zamieszczone niżej mają charakter dyskusyjny ale mogą być istotne z punktu widzenia prowadzenia przez doktoranta dalszych badań i zastosowań proponowanych rozwiązań.

1. Rozprawa opiera się w znacznym stopniu na badaniach symulacyjnych oraz modelowych, natomiast brak jest szerszej walidacji na rzeczywistych danych eksploatacyjnych pochodzących z pracy oczyszczalni np. w Swarzewie. Autor wskazuje zastosowanie opracowanych modeli i przeprowadzonych symulacji jako podstawy weryfikacji zaproponowanych algorytmów sterowania i harmonogramowania, a wyniki przedstawiono głównie jako rezultaty obliczeń symulacyjnych. W przypadku systemów sterowania oczyszczalniami ścieków istotna jest odporność na zakłócenia i niepewności modelowe. Odczuwalny jest też brak szerszej walidacji eksperymentalnej co ogranicza możliwość oceny przydatności proponowanego rozwiązania w warunkach rzeczywistych.

2. Autor przyjął w optymalizacji wielokryterialnej stałą liczbę cykli reakcyjnych argumentując to zmniejszeniem złożoności obliczeniowej co oczywiście jest zasadne z punktu widzenia złożoności obliczeniowej. Takie założenie upraszcza problem, ale ogranicza ogólność rozwiązania. W praktyce liczba cykli może być zmienna i zależna od warunków dopływu, co mogłoby wpływać na optymalność harmonogramowania. Przyjęte ograniczenie powoduje, że

rozwiązanie nie obejmuje pełnej przestrzeni decyzyjnej. Czy możliwe jest takie rozszerzenie badań i ewentualnie jakim kosztem obliczeniowym?

3. Zmiennymi decyzyjnymi w procesie optymalizacji są jedynie wartości zadane stężenia tlenu oraz czasy faz napowietrzania i beztlenowej. Tak wąski zakres zmiennych nie uwzględnia innych istotnych parametrów technologicznych, np. przepływów recyrkulacji, temperatury, wieku osadu czy parametrów hydraulicznych. Ogranicza to potencjalną efektywność optymalizacji i jej aplikacyjność. Czy rozszerzenie liczby zmiennych decyzyjnych jest możliwe z punktu widzenia technologicznego i obliczeniowego?

4. Autor proponuje oryginalny hierarchiczny system sterowania oczyszczalnią ścieków obejmujący sterowanie, optymalizację i harmonogramowanie zadań ale odczuwalny jest brak pełniejszej analizy złożoności obliczeniowej całego systemu hierarchicznego. Taka analiza czasu obliczeń w trybie on-line czy wymagań sprzętowych dla implementacji w rzeczywistym systemie byłaby ciekawa i ważna z punktu widzenia potencjalnych wdrożeń proponowanego systemu.

5. Pomimo, że dokonany przegląd literatury jest aktualny i szeroki to jednak dominują w nim klasyczne podejścia sterowania i optymalizacji i odczuwalna jest ograniczona dyskusja z literaturą najnowszych metod sterowania. W pracy pojawiają się odniesienia do metod uczenia maszynowego, jednak nie są one szerzej porównywane z proponowanym rozwiązaniem w rozprawie. W kontekście aktualnych trendów (np. reinforcement learning, digital twins) brak pogłębionej analizy porównawczej co trochę osłabia argumentację o innowacyjności proponowanego podejścia w rozprawie.

2. Podsumowanie

Mając na uwadze wszystkie aspekty rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Ujazdowskiego a w szczególności odnotowane osiągnięcia naukowe i techniczne oraz wyróżniający wykaz publikacji współautorskich, jak również uwagi dyskusyjne, które nie mają znaczącego wpływu na końcową ocenę rozprawy:

- **Stwierdzam**, że rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania Prawa o szkolnictwie wyższym i nauki z dnia 20 lipca 2018 roku (art. 168) w dziedzinie *inżynierijno-technicznej* w dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*.

- **Rozprawę zaliczam do kategorii wybitnych.**
- **Wnoszę** o przyjęcie rozprawy przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Gdańskiej.

3. Wniosek o wyróżnienie

Doktorant zaproponował i zaimplementował oryginalną hierarchiczną strukturę systemu sterowania dla oczyszczalni ścieków typu wsadowego, obejmującą warstwy sterowania procesem, optymalizacji procesu, oraz zarządzania procesem (harmonogramowanie pracy reaktorów). W każdej warstwie został zdefiniowany odrębny problem optymalizacji oraz opracowano metody jego rozwiązania co umożliwiło pełną integrację zadań sterowania, optymalizacji i planowania pracy instalacji w ramach jednego spójnego systemu. Wyniki badań opublikowano w pięciu artykułach współautorskich w czasopismach z listy JCR z przypisanymi wskaźnikami wpływu IF z zakresu 0.738 – 6.7, oraz w czterech referatach konferencji międzynarodowych co potwierdzają pośrednio ważność i duże znaczenie otrzymanych wyników badawczych dla dyscypliny oraz jest osiągnięciem wybitnym.

