



Gliwice, 10.05.2026 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Ujazdowskiego

pt. **“Optimisation of biological processes and management of several reactors in a batch type wastewater treatment plant.”**

napisanej pod kierunkiem naukowym promotora
dr hab. inż. Roberta Piotrowskiego, prof. uczelni
oraz promotora pomocniczego
dr inż. Tomasza Zubowicza

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawą prawną opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Automatyka Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Gdańskiej z dnia 10.03.2026 r. w sprawie powołania recenzentów rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Ujazdowskiego pt. *“Optimisation of biological processes and management of several reactors in a batch type wastewater treatment plant.”*.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska skupia się na zagadnieniu optymalizacji biologicznego oczyszczania ścieków w reaktorze SBR oraz harmonogramowaniem zadań dla biologicznej oczyszczalni ścieków typu wsadowego składającej się z wielu reaktorów. Rozprawa wraz z trzema załącznikami i spisem literatury zawierającym 156 pozycji materiałów źródłowych zajmuje 171 stron. Ponadto w pracy umieszczono strony zawierające spis treści, ilustracji, tabel, skrótów i symboli. Treść rozprawy napisana została w języku angielskim i została podzielona na 8 rozdziałów. Treść pracy została sformatowana prawidłowo z zachowaniem walorów estetycznych, wszystkie wzory, tabele oraz ilustracje są czytelne i posiadają kolejne unikalne numery. W tym zakresie nie dostrzeżono uchybień.

3. Ocena dorobku naukowego i sylwetki autora

Na szczególną uwagę i uznanie zasługuje bardzo szczegółowa i o szerokim zakresie kwerenda materiałów źródłowych przeprowadzona przez autora. Przegląd literatury tematu został podzielony na trzy zagadnienia związane z modelowaniem, sterowaniem oraz system realizacji produkcji (MES). W każdym z tych zagadnień omówiono aktualny stan oraz postęp wiedzy jaki dokonał się od czasów, kiedy proces oczyszczania ścieków stał się zagadnieniem naukowym. Jakość przeprowadzonej kwerendy materiałów źródłowych przedmiotowego zagadnienia oraz uwzględnienie w nim najnowszych źródeł **świadczy niewątpliwie o znajomości współczesnej literatury z zakresu dziedziny naukowej, której t rozprawa dotyczy.**

Autor rozprawy przedstawił również w przedmowie swój dorobek naukowy powiązany z tematem rozprawy, na który składają się publikacje współautorskie. Pięć ze wskazanych publikacji są publikacjami w czasopismach: *IEEE Access* (100pkt. 2022), *Journal of Water Process Engineering* (100 pkt. 2023), *Acta Mechanica et Automatica* (100 pkt. 2023), *Journal of Process Control* (140 pkt. 2024, 2025). Jedno z w/w czasopism (*Journal of Water Process Engineering*) nie ma na liście ministerialnej czasopism punktowanych przypisanej dziedziny, w której zgłoszona jest do oceny rozprawa, jednakże tytuł tej publikacji oraz jej treść wskazują jednoznacznie na powiązanie z dziedziną naukową jaką jest automatyka. Biorąc również pod uwagę, że dziedzina naukowa jaką jest automatyka charakteryzuje się interdyscyplinarnością uważam, że bezdyskusyjnie należy zaliczyć wspomnianą publikację do dorobku autora rozprawy mimo braku przypisania wspomnianego czasopisma do dziedziny naukowej rozprawy. Publikacje konferencyjne również poruszają tematykę powiązaną z tematem pracy oraz dziedziną Automatyka. Na uwagę zasługuje również fakt, że w czterech publikacjach w czasopismach i trzech konferencyjnych mgr inż. T. Ujazdowski wyróżniony został jako główny autor.

Przedstawione jako dorobek doktoranta publikacje obejmują zagadnienia, związane z procesami oczyszczania ścieków. Merytoryczną zawartość opublikowanych artykułów można ocenić jako oryginalną. Poniżej omówiłem skrótowo treść publikacji ograniczając się do tych najbardziej cennych, czyli opublikowanych w punktowanych czasopismach.

- a) Ujazdowski T., Piotrowski R. (2022). Task Scheduling – Review of Algorithms and Analysis of Potential Use in a Biological Wastewater Treatment Plant. *IEEE Access*.
Publikacja zawiera przegląd zakres stosowania metod planowania zadań w przemyśle. W artykule omówiono metody i algorytmy służące do rozwiązywania problemów związanych z planowaniem zadań. Przeprowadzono przede wszystkim analizę możliwości wykorzystania takich metod planowania zadań do poprawy wydajności biologicznych oczyszczalni ścieków. Analiza ta została przeprowadzona przy założeniu równomiernego obciążenia pracą wielu reaktorów.
- b) Ujazdowski T et al. (2023). A comprehensive approach to SBR modelling for monitoring and control system design. *Journal of Water Process Engineering*,
Publikacja zawiera propozycję kompleksowego opisu modelowania reaktora sekwencyjnego (SBR) dla celów monitorowania, sterowania oraz optymalizacji pracy instalacji. Przeprowadzono badania symulacyjne porównujące wpływ różnych modeli prędkości osiadania osadu czynnego, a także dwóch różnych podejść do modelowania reakcji w reaktorze SBR (ASM2d oraz ASM3d), gdzie uzupełniono model o grupę enzymów XEH i XEA modelującą fazę opóźnienia obserwowaną u mikroorganizmów podczas gwałtownej zmiany warunków środowiskowych.

- c) Kolankowski M. et al. (2023). A new approach to design control of dissolved oxygen and aeration system in SBR by applied backstepping control algorithm. *Acta Mechanica et Automatica*.

W publikacji przedstawiono adaptacyjny algorytm jako nowe podejście do projektowania nieliniowego systemu sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego w reaktorze biologicznym. W celu opracowania systemu sterowania wykorzystano zarówno model procesów biologicznych oraz model systemu napowietrzania. Publikacja zawiera szczegółowy opis tworzenia adaptacyjnego regulatora „backstepping” działającego w oparciu o rekurencyjną metodę pozwalającą uzyskać globalnie stabilny układ. Wyniki przeprowadzonych testów symulacyjnych systemu sterowania dały zdaniem autorów bardzo dobre wyniki, a zaproponowane rozwiązanie okazało się skuteczne i wydajne obliczeniowo, czyli możliwe do implementacji w typowym sprzęcie automatyki (PLC).

- d) Ujazdowski T. et al. (2024). A stochastic approach for the solution of single and multi-objective optimisation problems of biological processes in sequencing batch reactor. *Journal of Process Control*.

W artykule przedstawiono metodę adaptacyjnej regulacji ekstremalnej dla sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego (DO) w reaktorze SBR oraz implementację tej regulacji w warstwowej strukturze sterowania. Przedstawiono również metodę wprowadzenia warstwy optymalizacyjnej w tej strukturze dla parametrów reaktora SBR poprzez syntezę metod stochastycznych. Wyniki stworzonego układu regulacji zostały porównane z klasycznym podejściem do sterowania reaktorem SBR opartym o stałe parametry cyklu. Autorzy wskazują na korzyści płynące z optymalizacji parametrów cyklu, w tym liczby faz oraz wartości tlenu rozpuszczonego, dla przebiegu procesu. Proponowane podejście do sterowania wykazuje wymierną poprawę wydajności operacyjnej oraz znaczne zmniejszenie zużycia energii elektrycznej dla celów napowietrzania, która jest jednym z największych kosztów prowadzenia tego procesu technologicznego.

- e) Ujazdowski T. et al. (2025). Design and comparison of PI and boundary-based predictive controller for control of aeration in activated sludge bioreactor—Simulation and laboratory research. *Journal of Process Control*.

W publikacji porównano i zweryfikowano klasyczny algorytm PI oraz algorytm predykcyjny bazujący na ograniczeniach BBPC. W tym celu wykorzystano model procesu osadu czynnego składający się z reaktor i osadnika wtórnego. Model ten bazuje na układzie technologicznym w skali laboratoryjnej, który został zweryfikowany za pomocą rzeczywistych danych pomiarowych. W badaniach wzięto pod uwagę charakter sterowania napowietrzaniem typu włącz/wyłącz stosując modulację szerokości impulsu PWM. Jednym z głównych wniosków tego badania wskazuje na lepszą jakość działania regulatora BBPC niż PI z punktu widzenia ograniczania kosztów sterowania z jednoczesnym zastrzeżeniem, że implementacja takiego regulatora jest bardziej złożona. Ponadto regulator BBPC wykazał się zdolnością do natychmiastowej kompensacji zmian obciążenia procesu, podczas gdy dla regulatora PI konieczna jest modyfikacja obliczeń błędu regulacji, aby regulator PI mógł prawidłowo sterować tym procesem.

Warto zaznaczyć również, że po przesłaniu rozprawy do recenzji zauważyłem, że ukazała się kolejna publikacja współautorska doktoranta w *czasopiśmie Chemical Engineering Research and Design*, co świadczy pozytywnie o jego aktywności i kontynuowania badań nad zagadnieniami poruszonymi w przedstawionej do oceny pracy.

Biorąc pod uwagę dobre rozeznanie w aktualnej literaturze przedstawiających zagadnienia poruszone w pracy oraz dorobek publikacyjny autora rozprawy, można stwierdzić, że **mgr inż. T. Ujazdowski posiada zaawansowaną i szczegółową wiedzę w przedmiotowej tematyce**, a wieloaspektowość przedmiotu rozważań naukowych pozwala również stwierdzić, że **autor rozprawy posiada także dostatecznie dobrą wiedzę podstawową w dziedzinie automatyka**.

4. Ocena wyboru tematu rozprawy

Na wstępie należy zaznaczyć, że zagadnienia zarządzania i sterowania procesami biologicznego oczyszczania ścieków należą do jednych z trudniejszych ze względu na dość złożony charakter tego procesu, którego nie wszystkie niuanse są dostatecznie rozpoznane oraz ze względu na losowy charakter wielkości wejściowych. W związku z tym spora część modeli bazuje na danych uśrednionych, na podstawie których organizacja IAWPRC opracowywała kolejne wersje modeli ASM (*Activated Sludge Model*). Jednocześnie proces ten jest nie tylko ciekawym z punktu widzenia naukowego, ale istotnie ważnym z punktu widzenia społecznego i środowiskowego. **Wszelkie prace poszerzające zakres wiedzy o tym procesie oraz proponujące nowe rozwiązania podnoszące efektywność prowadzenia tych procesów są aktualne oraz bardzo cenne i ważne. Do takich prac można zaliczyć przedstawiona do oceny rozprawę doktorską.**

5. Ocena tezy i celów oraz omówienie struktury i treści rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny praca składa się z ośmiu rozdziałów i trzech załączników.

Tezę pracy można sformułować w języku polskim następująco:

„Wprowadzenie warstwy harmonogramowania zadań służącej do zarządzania odzyskiem zasobów wodnych w biologicznych oczyszczalniach ścieków, wbudowanej w hierarchiczną strukturę sterowania, pozwala na obniżenie kosztów eksploatacji obiektów wieloreaktorowych przy jednoczesnym zachowaniu zgodności z przepisami prawnymi i normami jakości ścieków.”

W celu weryfikacji powyższej tezy autor postawił jako cele opracowanie dwóch systemów. Pierwszy z nich ma za zadanie wspomagać decyzje operatora w odniesieniu do procesów biologicznych w reaktorze SBR poprzez rozwiązanie wielokryterialnych zadań optymalizacyjnych z ograniczeniami. Drugi system ma za zadanie wydajne i ekonomiczne zarządzanie kilkoma reaktorami poprzez rozwiązanie problemu planowania zadań. **Autor obszernie i wiarygodnie uzasadnił wybór zagadnienia badawczego, przedstawił metodykę badawczą oraz założenia poczynione dla realizacji zadań badawczych.** Jedynie, odnośnie niektórych założeń można byłoby choć skrótowo uzasadnić ich przyjęcie dla celów niniejszych przedmiotowych badań.

Teza pracy jest w mojej opinii sformułowana prawidłowo. Autor pragnie swoimi badaniami udowodnić, że jest w stanie wprowadzić takie zmiany w strukturze układu sterowania oczyszczalni ścieków, które pozwolą na obniżenie kosztów operacyjnych instalacji składającej się z wielu reaktorów SBR. Należy wziąć pod uwagę, że w większości przypadków instalacje przemysłowe i komunalne działają w oparciu o klasyczne sprawdzone schematy i procedury. Implementacja nowych rozwiązań napotyka w praktyce na duże opory ze strony rządów lub właścicieli takich instalacji. Jest to głównie związane z niepewnością co do skutków finansowych i innych ich wdrażania w przypadku niepowodzenia. Dużą rolę w przekonaniu do prób implementacji nowatorskich podejść w zakresie sterowania mogą zapewne być wszelkie analizy i badania symulacyjne poparte również pilotażowym wdrożeniem, jeśli jest to możliwe. Taki

kierunek działania został obrany przez autora przedstawionej do oceny pracy, co należy ocenić pozytywnie.

Cele badawcze mające służyć udowodnieniu postawionej tezy są z nią spójne, logicznie i jasno sformułowane. Pierwszy z celów ma za zadanie zwiększenie efektywności pracy pojedynczego reaktora SBR poprzez rozwiązanie zadania optymalizacyjnego, a w konsekwencji określenie ilości i czasu trwania faz tlenowych i beztlenowych, a także określenie trajektorii referencyjnej tlenu rozpuszczonego. Tutaj należy zauważyć, że koszty związane z działaniem oczyszczalni ścieków to głównie koszt energii związanej z przettaczaniem cieczy i napowietrzaniem. Szacuje się w różnych publikacjach, że koszt napowietrzania oscylują w zakresie od 25% do nawet 60% zużycia energii przez taki zakład. Zatem wszelkie działania optymalizacyjne w zakresie napowietrzania reaktorów SBR z pewnością mają szanse na uzyskanie wymiernych efektów finansowych, a również środowiskowych. Drugi z celów polega na opracowaniu systemu wspierającego zarządzanie dla oczyszczalni ścieków składającej się z wielu reaktorów SBR poprzez harmonogramowanie zadań z uwzględnieniem kosztów (taryf) energii oraz pojemności reaktorów ich dostępności powiązanej ze zmiennym doptywem ścieków. Należy zauważyć, że zarządzanie wieloreaktorowym systemem oczyszczania ścieków jest dość trudne i obciążone niepewnością w zakresie ilości i jakości doptywających ścieków. Zarządzanie takim systemem odbywa się często w oparciu o intuicję i doświadczenie zespołu nadzorującego taką instalację. Nietrudno w takim przypadku o popełnienie błędu lub nieprawidłową analizę bieżącej sytuacji. Sformalizowanie schematu postępowania w zarządzaniu takim obiektem w postaci systemu wspomagającego pracę operatora procesu z pewnością podniesie jakość działania w rozumieniu również efektów finansowych, czyli redukcji kosztów operacyjnych (związanych głównie ze zużyciem energii).

W rozdziale pierwszym autor skoncentrował się na zarysowaniu problematyki będącej przedmiotem dysertacji poprzez szczegółowy przegląd literatury przedmiotu. Można stwierdzić, że rozprawa porusza szerokie spektrum zagadnień związanych z dziedziną automatyka. W związku z tym przegląd literatury został podzielony przez autora na trzy główne części: związane z opisem procesu, zagadnieniami sterowania zarządzania przedmiotowym procesem technologicznym. Pierwsza część zawiera przegląd literatury pod kątem rodzajów oraz opisu procesu oczyszczania ścieków i skupia się na zagadnieniach związanych z modelowaniem tego procesu. Przegląd ten obejmuje publikacje naukowe dotyczące modelu osadu czynnego (ASM), reaktora sekwencyjnego (SBR) oraz siłowników i urządzeń pomiarowych istotnych dla przedmiotu badań przedstawionego w pracy. Drugi część przeglądu literatury koncentruje się na kwestiach sterowania i optymalizacji. Autor przedstawił publikacje związane z warstwami sterowania bezpośredniego, a także sterowania procesem obejmującego regulację stężeniem tlenu rozpuszczonego (DO) oraz optymalizacji związanej z wyborem parametrów operacyjnych reaktora SBR. W trzeciej części autor analizuje publikacje związane ze strukturą zarządzania MES. Tak szeroka i dogłębna analiza piśmiennictwa pozwoliła autorowi na zidentyfikowanie luk badawczych i na tej bazie sformułowanie tezy, a także określenie dwóch celów pracy mających służyć udowodnieniu tezy. Dla osiągnięcia tych celów autor określił również precyzyjnie cztery zadania badawcze.

W rozdziale drugim przedstawiono szczegółowy opis wybranej biologicznej oczyszczalni ścieków (w okolicy miejscowości Swarzewo), w tym występujące w niej procesy i parametry eksploatacyjne. Obiekt ten posłużył w pracy jako punkt odniesienia dla badań i modelowania. Opis tej oczyszczalni ścieków obejmuje zarówno aspekty techniczne, jak i charakterystykę zachodzących w niej procesów. Autor wskazuje, że analiza tej oczyszczalni pozwoliła na dobre

zrozumienie problemów i wyzwań związanych z optymalizacją sterowania oraz zarządzaniem takim obiektem. Należy tu zauważyć, że przykładowa oczyszczalnia ścieków jest pracuje w dość specyficznym trybie, gdyż w sezonie wakacyjnym ilość przyjmowanych ścieków jest blisko 3 krotnie większa niż poza tym sezonem, co stanowi zapewne duże wyzwanie dla operowania tym obiektem w porównaniu do oczyszczalni w typowych aglomeracjach, gdzie dopływ ścieków przez cały rok nie charakteryzuje się tak dużą zmiennością.

Rozdział trzeci zawiera opis zbioru modeli wykorzystanych w pracy. Modele te zostały opracowane w ramach zadań badawczych sformułowanych w rozdziale pierwszym i były niezbędne do opracowania systemu sterowania. Rozdział ten zawiera opis modelu reaktora biologicznego SBR, wykorzystywany na późniejszym etapie do symulacji procesu. Następnie przedstawione zostały modele stosowane w algorytmach sterowania, w szczególności model tlenu rozpuszczonego ujmujący proces transferu tlenu, a także kwestię szacowania konsumpcji tlenu przez mikroorganizmy. W tym rozdziale zaprezentowany został również uproszczony model reaktora SBR wykorzystywany w zadaniach optymalizacyjnych. W następnej kolejności omówiony został model matematyczny układu kilku reaktorów SBR wraz z dodatkowymi zbiornikami, który to model został później wykorzystany dla celów harmonogramowania zadań. Rozdział ten kończy się opisem modelu ścieków doptywających (BSM2).

Rozdział czwarty prezentuje analizę warstwowej struktury sterowania oraz argumentację zasadności zastosowania takiej struktury w przedmiotowych badaniach. Wskazano na trzy główne i istotne dla realizacji celów pracy pętle regulacji (napętniania i dekantacji, mieszania oraz napowietrzania). W rozdziale tym zdefiniowano ogólnie zadania dla każdej warstwy, uwypuklając interakcje między tymi warstwami.

W rozdziale piątym zaprezentowany został system sterowania procesem, a w szczególności układ regulacji DO z opisem nieliniowego regulatora predykcyjnego NMPC dla tego zadania. Wskazano, że algorytm ten nadaje się do integracji z wyższymi warstwami optymalizacji i harmonogramowania. W rozdziale tym przedstawiono opis cyklu reaktora w postaci maszyny stanów. Zaproponowana została procedura operowania cyklami pracy reaktora SBR, która bazuje na wynikach optymalizacji. Procedura ta zastępuje statyczną konfigurację pracy reaktora, w której czas trwania kolejnych faz cyklu i parametry są ustawiane jednorazowo dla wielu następujących po sobie cykli. Autor przedstawił sposób optymalizacji cyklu pracy reaktora SBR z zastosowaniem metody wielokryterialnej optymalizacji. Sformułowany został problem optymalizacji poprzez określenie funkcji kosztu ze wskazaniem ograniczeń dla zmiennej stanu i wielkości sterującej. W tym celu określone zostały cztery funkcje celu powiązane ze zużyciem energii na napowietrzanie oraz wartościami parametrów jakości cieczy (TN, TP, COD) określanymi przez normy dla fazy dekantacji. Odrębnym zagadnieniem omówionym przez autora jest postępowanie w przypadku, gdy w wyniku optymalizacji otrzymuje się nie otrzymuje się jednego rozwiązania, lecz zbiór rozwiązań Pareto-optymalnych.

W rozdziale szóstym autor pracy omawia problem harmonogramowania zadań (TS) w operowaniu wieloreaktorowym systemem oczyszczania ścieków, zaznaczając na wstępie, że ta funkcjonalność stanowi najwyższą warstwę hierarchicznej architektury sterowania. Autor stwierdza, że zapewnia ona ramy koordynacyjne, które integrują poszczególne strategie sterowania na poziomie cyklu w plan operacyjny obejmujący cały obiekt. Na początku zdefiniowane zostało 12 optymalnych cykli pracy dla pojedynczego reaktora SBR (po 6 dla dużego i małego reaktora) dla różnych warunków dopływu i ilości faz tlenowych. Zadaniem warstwy wyższej sterowania jest natomiast nie tylko zapewnienie ogólnej koordynacji pracy reaktorów, ale także przekazywanie do każdego reaktora parametrów konfiguracji cyklu oraz

odpowiadających im czasów rozpoczęcia. W rozdziale tym zdefiniowany został zatem problem optymalizacyjny najwyższej warstwy sterowania, funkcja celu oraz ograniczenia. Funkcja celu wyrażona jest jako suma ważona czterech istotnych dla optymalnego prowadzenia tego procesu aspektów. Autor zaprezentował algorytm MA (Memetic Algorithm), który posłużył do rozwiązania postawionego problemu optymalizacyjnego harmonogramowania zadań.

W rozdziale siódmym zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych przeprowadzonych na podstawie rozważań teoretycznych nad opracowanym systemem hierarchicznej, warstwowej struktury sterowania dla biologicznej oczyszczalni ścieków z reaktorami SBR. Autor opisuje na wstępie sprzęt i oprogramowanie zastosowane do obliczeń oraz wydajność różnej konfiguracji komputerów dla przedmiotowych zadań obliczeniowych. W następnej kolejności przedstawione zostały zestawy wartości parametrów oraz wartości początkowe zmiennych stanu zastosowanych w procedurach symulacyjnych oraz parametry regulatora NMPC zastosowanego do sterowania poziomem tlenu rozpuszczonego. Zaprezentowane zostały również przeskalowane zestawy zmian wartości wejściowych dla trzech scenariuszy (normal, rain, dry). Pierwsze zaprezentowane testy symulacyjne oceniają efektywność warstwy regulacyjnej. W ramach tego badania dobrano parametry algorytmu regulacji NMPC jako wynik kompromisu pomiędzy efektywnością sterowania, a jego kosztem. W następnej kolejności zaprezentowane zostały wyniki badań nad wielokryterialną optymalizacją cyklu pracy reaktora SBR związaną z określeniem długości faz w cyklu SBR i poziomem stężenia tlenu w fazach tlenowych, a także wyborem ilości faz tlenowych i beztlenowych. Badania te odpowiadają i realizują pierwszy celów badawczy mający udowodnić postawioną tezę. Następnie zaprezentowano wyniki badań nad najwyższym poziomem sterowania, ukierunkowane na zrealizowanie drugiego celu badawczego. Przeprowadzono eksperymenty dla wybranych scenariuszy rozwiązania problemu UPMSP przedstawionego w rozdziale szóstym. Autor podsumowuje rozdział przedstawieniem wyników w postaci wymiernych redukcji kosztów operowania przedmiotowym procesem z zastosowaniem zaproponowanego przez siebie algorytmów. W konkluzji autor stwierdza, że dzięki zaproponowanemu zoptymalizowanemu algorytmowi sterowania reaktorem SBR uzyskuje się redukcję kosztów napowietrzania rzędu 40%, a dodatkowe 15-20% oszczędności można uzyskać dzięki zoptymalizowanemu harmonogramowaniu zadań.

W rozdziale ósmym autor podsumowuje treść pracy omawiając jej najważniejsze elementy oraz uwypukla wnioski płynące z przeprowadzonych przez siebie badań i analiz. Autor wskazuje również co uważa za swoje oryginalne osiągnięcie:

1. opracowanie i implementację modeli SBR w środowisku MATLAB/Simulink w oparciu o strukturę ASM3 i BioP, z dodatkowym elementem opóźnienia,
2. opracowanie hierarchicznej struktury sterowania łączącej regulację tlenem rozpuszczonym, optymalizację cyklu pracy reaktora SBR oraz optymalne harmonogramowanie zadań dla biologicznych systemów oczyszczania ścieków typu okresowego.
3. sformułowanie nowatorskiej opisu pracy wielu reaktorów w oczyszczalni ścieków zorientowanej na harmonogramowanie,
4. opracowanie i weryfikacja algorytmu NMPC do sterowania tlenem rozpuszczonym w fazie napowietrzania, która zapewnia lepszą wydajność oraz efektywność energetyczną,
5. zdefiniowanie i rozwiązanie problemu MOO w celu optymalizacji cyklu pracy reaktora SBR,

6. sformułowanie, opracowanie i wdrożenie stochastycznego algorytmu metaheurystycznego (MA – hybryda GA i SA) w celu rozwiązania problemu harmonogramowania zadań w układzie wielu reaktorów SBR.

Zagadnienia powyższe zostały w pracy przedstawione, a wyniki ich implementacji zostały zaprezentowane i omówione. Można zatem przyjąć, że wymienione wyżej osiągnięcia stanowią oryginalny dorobek autora pracy.

Podsumowując omówioną wyżej treść pracy można stwierdzić, że jej struktura jest prawidłowa, spójna i układa się w logiczną całość. Autor najpierw dokonuje analizy zagadnienia poprzez kwerendę publikacji naukowych, następnie identyfikuje luki badawcze, aby sformułować tezę i cele badawcze. Następnie opisuje dokładnie w kolejnych rozdziałach elementy niezbędne do realizacji postawionych celów i zadań badawczych. Ostatecznie, w rozdziale 7 zaprezentowane i omówione zostały wyniki badań z wykorzystaniem rozważań i narzędzi badawczych przedstawionych uprzednio.

Autor zrealizował wszystkie postawione cele i zadania badawcze, co w rezultacie podpira i dowodzi prawdziwość postawionej tezy. Autor opiera swoje badania i analizy na najnowszych osiągnięciach nauki w przedmiotowej dziedzinie. **Złożoność zagadnienia jakie zaprezentowano w pracy oraz różnorodność technik jakie zastosowano do przeprowadzenia badań świadczy pozytywnie o wszechstronności autora i jego umiejętności związanych z metodologią prowadzenia badań naukowych.**

6. Uwagi i pytania o charakterze ogólnym i merytorycznym

Oceniając badania nad procesami biologicznymi należy przede wszystkim zdawać sobie sprawę z trudność dogłębnego poznania i zrozumienia zachodzących w nim zależności. Procesy takie charakteryzują się bowiem zupełnie innym poziomem determinizmu i powtarzalności jaki występuje w innych procesach technologicznych takich jak np. procesy mechaniczne, cieplne czy nawet chemiczne. Analizując treść pracy nasunęły się następujące pytania, a spora część z nich ma lub może mieć charakter bardzo ogólny i dyskusyjny. Niemniej jednak liczę na to, że autor pracy się do nich ustosunkuje.

- a) Jak często w praktyce (np. w okresie miesięcznym lub rocznym) są spełnione założenia 1.2 oraz 1.3 wymienione w rozdziale 1.5, które posłużyły do udowodnienia tezy i osiągnięcia wyznaczonych celów pracy? Autor pracy, jak wynika z treści ma dość duże rozeznanie w konkretnym przypadku pełnowymiarowej instalacji oczyszczania ścieków (Swarzewo). W związku z tym pytanie jest jak najbardziej uzasadnione i rzutuje na możliwość praktycznego wykorzystania wyników pracy.
- b) W rozdziale 3.1 (str. 35) autor arbitralnie zdecydował się wyróżnić trzy warstwy w reaktorze SBR uzyskując przybliżenie modelu o parametrach rozłożonych przedstawianego równaniami różniczkowymi cząstkowymi. Z czego wynika wybór akurat 3 warstw, a nie większej ilości? Czy autor przeprowadził jakieś badanie wpływu ilości warstw n_z na uzyskiwane wyniki symulacyjne? Ewentualnie czy ta decyzja o wyborze trzech warstw może być uzasadniona wynikami badań z materiałów źródłowych (wymienionych na str.5).
- c) W pracy pada stwierdzenie, że moduł BioP rozszerzający model ASM3 ma tendencję do zawyżania wartości TP. Na podstawie tego modelu uzyskano główne wyniki pracy (rozdział 7.3). Powstaje pytanie czy ta cecha modułu BioP wpływa w jakiś sposób na użyteczność wyników i wnioski, które zostały na tej podstawie wyciągnięte?

- d) Wzory (3.33) oraz (3.34) przedstawiają statyczne charakterystyki dmuchaw z ograniczeniami. Na ich podstawie wyznaczono funkcje ograniczające ciśnienie. Niezbyt jasno wytłumaczone jest jak z charakterystyki statycznej można było wysnuć ograniczenia będące funkcją czasu. Publikacja, na którą autor pracy się powołuje w tym zakresie, niestety nie jest łatwo dostępna w zbiorach elektronicznych. Ponadto nasuwa się też pytanie: dlaczego ograniczenie na przegrzanie wyrażają alternatywnie dwa równania (a) lub (b), skoro na charakterystyce (rys. 3.5) jest to jedna linia ograniczająca, tak jak dla przeciążenia, a to ograniczenie wyrażone jest tylko jednym wzorem (c)?
- e) Dlaczego względny czas trwania (wzór 5.21) ustalony została jako 5/24.? Skąd wzięta się ta wartość? Podobne pytanie nasuwa się również w odniesieniu do wzorów (5.25 c i d): z czego wynikają występujące w nim wartości ułamkowe?
- f) Analizując zagadnienie optymalizacji przedstawione w rozdziale 5.3 autor stwierdza, że zastosowany algorytm MOO może zwracać zbiór rozwiązań wykonalnych, w którym nie można poprawić żadnego z celów bez pogorszenia co najmniej jednego innego. Czy w rozważanym przypadku należy to rozumieć w ten sposób, że prowadząc proces na podstawie wyników działania tego algorytmu występują sytuacje w których nie udaje się spełnić wszystkich wymagań jakościowych dekantowanej cieczy? Czy sytuacja opisana w komentarzu do rys. 7.9 (niemożność osiągnięcia wymaganego poziomu TN) występuje zawsze w trakcie suchych warunków pogodowych?
- g) Analizując tabelę 6.3 w powiązaniu z informacją na stronie 99, że numery 1, 2, 3 odnoszą się do mniejszych SBR, a 4, 5, 6, do dużych można zauważyć, że dla wzorców o nr. ID 5 i 6 nie ma w zasadzie różnicy, bo w odniesieniu do rozmiaru jest to M_s , M_s , M_L , M_s , M_L , M_L (gdzie M_s oznacza mniejszy SBR, a M_L większy). Czy w przypadku tego zadania optymalizacyjnego nie tylko rozmiar SBR ma znaczenie, lecz również jego numer? Czy można by było ograniczyć się do w tym zadaniu do oznaczeń M_s i M_L i ich różnych kombinacji w sekwencji?
- h) Na wykresie (rys. 6.3) druga i piąta linia mają identyczny opis w legendzie, a jednak linie te są co prawda blisko, lecz nie pokrywają się. Z czego wynika ta różnica?
- i) Tabela 7.2 zgodnie z omówieniem w treści pracy powinna zawierać średnie czasy symulacji w zależności od środowiska obliczeniowego dla realizacji algorytmów ewolucyjnych w trzech fazach rozwiązywania zdefiniowanych w rozdziale 6. Tymczasem w tabeli tej są tylko czasy dla dwóch faz i sumaryczny czas. Ponadto nie jest jasne w odniesieniu do treści rozdziału 6, w którym miejscu zdefiniowano te trzy fazy rozwiązywania algorytmu.
- j) W rozdziale 7.2 autor wspomina o ilości 66 możliwych strategii sterowania NMPC w zależności od różnych wartości parametrów A B Γ . Czy możliwe byłoby znalezienie parametrów wybranych jako kompromisowe ($A = 0.7$, $B = 0.1$, $\Gamma = 0.2$) w inny sposób niż metodą przeglądu zupełnego dla gradacji parametrów 0,1?
- k) W wynikach zaprezentowanych w rozdziale 7.4 (np. rys. 7.21 lub 7.25) można zauważyć, że niektóre reaktory SBR nie są używane przez ponad 2 doby. Czy nie pozostaje to bez wpływu na kondycję (ew. obumieranie) osadu czynnego? Czy nie powinno się też w rozważaniach uwzględnić maksymalnego czasu przerwy w pracy pojedynczego reaktora SBR? Szczególnie ważne może to być ze względu na specyfikę przykładowej oczyszczalni ścieków (rozdział 2), która ma bardzo drastycznie różne obciążenie w sezonie wakacyjnym i poza tym sezonem.
- l) Dlaczego w rozważaniach przedstawionych w pracy występuje ograniczenie do ilości faz tlenowych R_c jednej lub trzech, a nie uwzględnia się pośredniej możliwości $R_c=2$?

7. Uwagi szczegółowe

Przedstawiona do oceny praca ma wysokie walory estetyczne to niemniej jednak dostrzeżono w niej pewne drobne uchybienia i niejasności, które wymagają doprecyzowania, poprawienia lub wyjaśnienia.

- a) W odniesieniu do przyjętych założeń (rozdział 1.5) można stwierdzić, że generalnie niektóre są dość oczywiste i zrozumiałe (np. 1.1 i 1.5), gdyż wynikają z własności fizycznych materii lub sposobu prowadzenia procesu technologicznego. Niemniej jednak w niektórych przypadkach można odczuwać niedosyt ich uzasadnienia (np. 1.7 i 1.9).
- b) Autor podaje informacje w tabeli 2.1 powołując się na normy krajowe i europejskie, jednakże zabrakło precyzyjnej informacji o tych normach (jeśli są skatalogowane i posiadają jakiś numer).
- c) W opisie warstwowego modelu reaktora SBR (pod rys. 3.1) występują inne symbole niż na rysunku mającym obrazować ten model. Przykładowo na rysunku są symbole Q_{mx} , Q_{sb} , które w omówieniu nie występują, natomiast w omówieniu tego modelu jest wymieniona wielkość oznaczona symbolem Q_{mb} , który to symbol na rysunku nie występuje.
- d) Na wykresach przedstawiających charakterystyki dmuchaw (rys. 3.5 i 3.6) występuje parametr „n”, który nie jest wymieniony w omówieniu. Czytelnik może się domyśleć co on oznacza, lecz formalnie powinien ten symbol być zdefiniowany, gdyż nie występuje on również w spisie symboli.
- e) Autor pracy wykorzystywał w pracy model BSM2, który pojawia się w rozdziałach 3, 7, oraz podsumowaniu 8. Jednakże, w przeglądzie literatury w zakresie modelowania procesu oczyszczania ścieków wymieniony został jedynie model BSM1, a BSM2 został pominięty.
- f) We wzorze (5.21) na $f_i(x)$ jest jeden nawias otwierający, a dwa zamykające.
- g) Czy rysunki 7.4 (a, b) są oryginalnymi autorskimi ilustracjami? Jeśli nie, to brakuje odniesienia do materiału źródłowego.
- h) Odwołanie do rysunku 7.5 w rozdziale 7.2 jest na stronie 117, a rysunek ten pojawia się dopiero na stronie 120 w treści kolejnego podrozdziału, a można było go umieścić na stronie 119. W konsekwencji spowodowało to kolejne oddalenie rysunków od ich powołań i omówienia w następnych podrozdziałach (nawet o 3 strony). Zalecane jest, aby rysunki umieszczać jak najbliżej treści, która je omawia.
- i) W załączniku A stosowane są jednostki ogólne masy, czasu i przestrzeni: M, T, oraz L bez wyjaśnienia. Czytelnik może domyśleć się znaczenia tych symboli, ale tekst techniczny powinien być precyzyjny i należałoby jednym zdaniem wyjaśnić tę kwestię, tym bardziej, że w pozostałej części pracy stosowane są jednostki systemu SI.

8. Podsumowanie, spełnienie wymogów ustawowych

Przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazanie na ekonomiczne zalety jego praktycznej implementacji. Prace prezentuje ogólną teoretyczną wiedzę Doktoranta w stosownej dyscyplinie naukowej oraz jest dowodem umiejętności samodzielnego prowadzenia badań.

W mojej ocenie przedłożona do oceny rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.).