

Dr hab. Anna Witkowska
Politechnika Gdańska
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Katedra Automatyki
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 17.02.2026r.

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 24.02.2026
nr zał.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Pośpiecha

pt.: „Examining of feasibility and usefulness of agent-based control systems for controlling biotechnological processes”

opracowanie na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej
- dr. hab. inż. Adama Gałuszki, prof. Politechniki Śląskiej

1. Obszar badawczy i tematyka rozprawy

Współczesny przemysł biotechnologiczny charakteryzuje się rosnącym zapotrzebowaniem na autonomiczne systemy sterowania, które pozwalają na bardziej efektywne zarządzanie tymi procesami. Wysoka złożoność, nieliniowość, trudności w pozyskiwaniu pełnych, wiarygodnych informacji o stanie procesu, rozproszenie danych, a także konieczność ciągłego działania instalacji (minimalizacja przestojów), stanowią główne wyzwania w projektowaniu systemów sterowania procesami biotechnologicznymi.

Opiniowana rozprawa zawiera propozycję systemu wieloagentowego (Multi-Agent System - MAS), dedykowanego do sterowania procesami biotechnologicznymi. Motywacją badań jest zderzenie dwóch obserwacji: MAS posiadają duży potencjał adaptacyjny, szczególnie dzięki możliwości rekonfiguracji online, co mogłoby znacząco poprawić niezawodność i jakość sterowania w warunkach zmienności procesów biologicznych. W literaturze brakuje jednak analiz oraz metod potwierdzających ich praktyczną wykonalność i użyteczność w kontekście sterowania procesami biologicznymi. W związku z tym sterowanie tymi procesami z wykorzystaniem MAS wymaga dalszych badań, w szczególności w zakresie standaryzacji, architektury rozwiązań, skalowalności systemów oraz ich zastosowań w warunkach przemysłowych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej oraz stanu wiedzy sformułowano tezę (strona 5 rozprawy), która w moim przekonaniu jest odpowiedzią na realne, jak wyżej sformułowane trudności charakterystyczne dla sterowania procesami biologicznymi.

Rozprawa doktorska miała na celu wypełnienie luki pomiędzy teoretycznym potencjałem systemów wieloagentowych, a praktycznymi wymaganiami ich zastosowania w sterowaniu procesami biologicznymi. W szczególności, skoncentrowano się na analizie zdolności adaptacyjnych MAS, ich niezawodności oraz ocenie, czy uzyskiwane korzyści z adaptacji i autonomii systemu przewyższają możliwości oferowane przez alternatywne, klasyczne rozwiązania sterowania. Weryfikacja zaproponowanej koncepcji systemu agentowego, została przeprowadzona dla dwóch procesów: regulacji stężenia tlenu rozpuszczonego (DO) w procesie oczyszczania ścieków i regulacji fermentacji mlekowej. W pierwszym przypadku system był testowany zarówno w środowisku symulacyjnym, jak i laboratoryjnym, do sterowania rzeczywistym obiektem testowym. W drugim przypadku weryfikacja opierała się wyłącznie na symulacjach przebiegu procesu.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych oraz eksperymentów laboratoryjnych można stwierdzić, że postawiona teza została uzasadniona w odniesieniu do analizowanych scenariuszy badawczych, obejmujących wybrane procesy biologiczne i warunki pracy systemu. Zaproponowane podejście potwierdziło użyteczność i wykonalność systemów wieloagentowych w tym zakresie.

2. Struktura rozprawy i ocena zawartości poszczególnych rozdziałów

Praca napisana jest w języku angielskim, ma 86 stron i składa się z 9 rozdziałów oraz spisu literatury zawierającego 176 pozycji, w tym cztery autorstwa lub współautorstwa Doktoranta. Na początku znajduje się spis treści, a na końcu lista skrótów oraz wykaz rysunków i tabel. Podział na rozdziały i podrozdziały jest logiczny i adekwatny do tematyki pracy. **W mojej opinii struktura pracy jest przejrzysta, jednak brak streszczenia w języku polskim i angielskim ogranicza możliwość szybkiego zapoznania się z głównymi założeniami i wynikami pracy.**

Rozdział 1 przedstawia tło teoretyczne i praktyczne zastosowania systemów wieloagentowych w sterowaniu procesami biologicznymi. Autor w sposób przejrzysty opisuje specyfikę tych procesów, ich złożoność, niepewność pomiarową oraz ograniczoną dostępność danych online, wskazując jednocześnie na istotną niszę badawczą w kontekście adaptacji MAS do procesów biologicznych.

Rozdział 2 omawia narzędzia i platformy do tworzenia systemów MAS, zarówno otwarcie źródłowe (np. JADE, ASTRA), jak i komercyjne (np. JACK), a także nowsze platformy Pythonowe (SPADE, BSPL, PIAF). **Autor uzasadnia wybór platformy JADE jej popularnością, zgodnością ze standardem FIPA oraz dobrą dostępnością materiałów edukacyjnych.**

W Rozdziale 3 szczególną uwagę poświęcono dwóm procesom, które stanowią podstawę badań eksperymentalnych: kontroli stężenia tlenu rozpuszczonego w osadzie czynnym oraz fermentacji mlekowej. Przedstawiono uproszczone modele dynamiki tych procesów, przyjęte założenia oraz sposób integracji z systemem MAS za pomocą protokołu OPC UA.

Wybór procesu stężenia tlenu w osadzie czynnym oraz fermentacji mlekowej jako obiektów badań jest zasadny, gdyż procesy te są zróżnicowane pod względem złożoności i stawiają odmienne wymagania sterowania (proces tlenowy wymaga adaptacji układu do zmieniających się warunków obciążenia, natomiast fermentacja mlekowa stabilnego utrzymania parametrów biochemicznych procesu).

Do regulacji stężenia tlenu rozpuszczonego przyjęto uproszczony, nieliniowy model, z pominięciem zmiennych związanych z dopływem do reaktora oraz rozszerzony o równanie opisujące wewnętrzną dynamikę stężenia tlenu, wynikające z obserwacji pracy rzeczywistej instalacji laboratoryjnej. Autor przedstawił procedurę wstępnej identyfikacji parametrów modelu, w trybie offline, przy użyciu metody najmniejszych kwadratów, bazując na danych z pojedynczego cyklu napowietrzania z pompą dwustanową (typu ON-OFF).

Uzupełnieniem jest opisany w dalszej części pracy wielowymiarowy model fermentacji mlekowej w układzie dwóch połączonych reaktorów o stałej objętości i dobrze wymieszanej zawartości. Model ten uwzględnia zmienne stanu w postaci stężeń biomasy, substratu i kwasu mlekowego oraz współczynnik wzbogacenia, a także kluczowe zależności kinetyczne, w tym efekty nasycenia i ograniczenia tempa wzrostu biomasy.

W obu przypadkach przyjęto klasyczne założenia o idealnym wymieszaniu reaktora oraz stałym poziomie cieczy, które są uzasadnione w warunkach laboratoryjnych i na etapie weryfikacji koncepcji sterowania, jednak ograniczają możliwość odwzorowania niektórych zjawisk charakterystycznych dla rzeczywistych warunków eksploatacyjnych. Dotyczy to w szczególności lokalnych wahań stężeń tlenu lub substratu, a także zmian poziomu cieczy wynikających z objętości wsadu i pracy pomp.

Celem badań przedstawionych w rozdziale 4 było opracowanie pilotażowej wersji systemu wieloagentowego oraz jego wstępna weryfikacja w warunkach laboratoryjnych, w zastosowaniu do sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego, z wykorzystaniem pompy dwustanowej. Autor przedstawił ogólne założenia projektowanej architektury MAS, które w dalszej części pracy zostały wykorzystane przy konstrukcji systemu. Architektura ta miała umożliwić modyfikację, dodawanie, usuwanie i wymianę agentów przy minimalnym wpływie na pozostałe elementy systemu. Przyjęto rozwiązanie warstwowe i modułowe, grupujące agentów według funkcji oraz zapewniające niezależność i wymiennność poszczególnych modułów. Założenia obejmowały również algorytmy sterowania o zróżnicowanym stopniu złożoności, zdolność do reagowania na awarie oraz płynne przełączanie między algorytmami w celu skutecznej realizacji celów sterowania.

Zgodnie z tymi założeniami, zaproponowana w rozdziale koncepcja systemu sterowania odwołuje się do układów adaptacyjnych, o strukturze przełączalnej oraz sterowania wyzwalanego zdarzeniami. Agent kliencki OPC pełni rolę interfejsu pomiędzy systemem a obiektem laboratoryjnym, umożliwiając wymianę danych z urządzeniami za pośrednictwem protokołu OPC UA. Agent cyklu sterowania przekształca wartości sterujące generowane przez MAS na sygnały fizycznie akceptowalne urządzenie wykonawcze co pozwala na dopasowanie sterowania do charakterystyki elementu wykonawczego. Mechanizm przełączania pomiędzy algorytmami sterowania realizowany jest przez agenta selekcji, który ocenia propozycje sterowania pochodzące od agentów sterujących i wybiera wartość na podstawie zadanych priorytetów. Agenci sterujący obejmują dwa regulatory: modelowy regulator typu ON-OFF, realizujący pracę w 30-sekundowych cyklach oraz autorski, adaptacyjny regulator typu ON-OFF. W regulatorze adaptacyjnym parametry procesu estymowane są przez agenta estymacji, natomiast wartości sterujące wyznaczone są przez agenta strojenia, który adaptacyjnie oblicza wartości progowe, umożliwiając zdarzeniowo wyzwalane załączanie pompy.

Walidacja obejmowała dwa eksperymenty. Pierwszy oceniał zdolność systemu wieloagentowego do regulacji stężenia tlenu rozpuszczonego oraz jego adaptację do zmiennych warunków procesu - zmian strumienia dopływu substratu. Drugi eksperyment polegał na porównaniu jakości sterowania MAS z klasycznym regulatorem typu ON-OFF. **Zastosowanie adaptacyjnego wyznaczania momentu załączania pompy, opartego na estymowanych parametrach procesu, pozwoliło uzyskać lepszą jakość regulacji, utrzymując stężenie tlenu blisko dolnej granicy wartości zadanej przy jednoczesnym ograniczeniu liczby cykli napowietrzania.**

W kolejnym rozdziale (5) Autor rozwija wcześniejszy, pilotażowy system, uzupełniając go o dodatkowe warstwy funkcjonalne. Warstwa centralna odpowiada bezpośrednio za sterowanie procesem, natomiast warstwa interfejsu i warstwa diagnostyczna pełnią funkcje wspomagające. **Taki podział na warstwy centralne odpowiadające sterowaniu procesem oraz warstwy pomocnicze, takie jak interfejs i diagnostyka, nawiązuje do klasycznych idei hierarchii sterowania, jednak w systemach MAS przyjmuje bardziej elastyczną i modułową formę, sprzyjającą dalszej rozbudowie systemu.**

W rozdziale Autor przedstawia i uzasadnia przyjęcie lekkiego schematu ontologii. Grupuje pojęcia w trzy główne domeny: Akcje, Dane i Diagnostyka, odpowiadające funkcjom realizowanym przez agentów. Autor zaznacza, że podział ten jest elastyczny i dopuszcza pewne zależności między domenami, choć zakłada jednocześnie, że w praktyce ich liczba pozostaje niewielka. **Należy jednak zauważyć, że wraz ze wzrostem złożoności systemu może pojawić się potrzeba precyzyjnego określenia zasad interakcji między domenami, aby zapewnić spójną, terminową i wolną od konfliktów wymianę informacji między agentami.**

W eksperymencie symulacyjnym wykorzystano dwa regulatory PI o zróżnicowanych nastawach, sterujące mocą pompy napowietrzającej, przy skokowej zmianie wartości zadanej. Eksperyment pełnił rolę demonstracji podstawowej koncepcji architektury MAS oraz komunikacji między agentami. Badany układ regulacji miał stosunkowo prostą strukturę, obejmował regulatory tego samego typu, bez implementacji warstwy diagnostycznej oraz automatycznego mechanizmu przełączania, przy czym

przełączanie regulatorów odbywało się płynnie na podstawie poleceń użytkownika. Efektem badań w rozdziale było przygotowanie zestawu zasad projektowania architektury MAS i przygotowania ontologii, stanowiący podstawę dla dalszych badań Autora w dysertacji.

W rozdziale 6 Autor przedstawia **lekki model ontologii**, stanowiący rozwinięcie prototypu zaprezentowanego w poprzednim rozdziale, opartego na strukturach danych i relacjach funkcjonalnych. Kluczową częścią ontologii jest domena Dane, zawierająca uniwersalną hierarchię pojęć opisujących dane pozyskiwane bezpośrednio z procesu, dane pomiarowe z czujników, wartości obliczane na podstawie wartości procesowych oraz wartości sterujące przekazywane do elementów wykonawczych. Istotnym uzupełnieniem domeny Dane jest klasa Propozycja Sterowania, umożliwiająca wybór najlepszego sygnału sterującego w sytuacji współistnienia wielu algorytmów sterowania, zgodnie z przyjętymi kryteriami jakości. Zaproponowana ontologia nie korzysta z dostępnych silników ontologii. **Autor celowo zrezygnował ze złożonej semantyki, aby uprościć strukturę i zapewnić szybkie przetwarzanie danych w sterowaniu procesami ciągłymi, gdzie kluczowe znaczenie ma determinizm czasowy i jednoznaczna wymiana danych.** Zaproponowany schemat ontologii został przedstawiony w postaci modelu UML i zaimplementowany w środowisku JADE z wykorzystaniem komunikatów XML.

W rozdziale 7 Autor prezentuje pełną implementację systemu wieloagentowego (MAS) przeznaczonego do sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego w procesie osadu czynnego, weryfikując wcześniej opracowaną ontologię oraz przyjęte zasady projektowania MAS w środowisku symulacyjnym i laboratoryjnym. Zadanie sterowania polegało na utrzymaniu DO w określonym zakresie z wysoką precyzją, przy wykorzystaniu dwóch pomp napowietrzających – typu ON-OFF i perystaltycznej – oraz bazowego algorytmu predykcyjnego BBPC.

System został zaimplementowany w środowisku JADE z integracją OPC UA, z warstwową strukturą obejmującą dane wejściowe, algorytmy sterowania, urządzenia wykonawcze, diagnostykę, interfejs użytkownika oraz komunikację. **Rozszerzenie ontologii o klasy diagnostyczne oraz mechanizmy oceny wiarygodności agentów stanowi istotny wkład w zapewnienie stabilności i niezawodności systemu.**

W warstwie algorytmów sterowania zdefiniowano pięciu agentów odpowiedzialnych za: predykcję parametrów procesu, generowanie propozycji sygnałów sterujących, wybór najlepszej propozycji z uwzględnieniem przewidywanej efektywności, ocenę reputacji agentów oraz dobór typu pompy.

System MAS wykazał przewagę nad klasycznym algorytmem BBPC w zakresie: dokładności regulacji (rys. 7.13). Wybrane scenariusze badań wskazują na zdolność MAS do uwzględnienia mechanizmu reputacji agentów (rys. 7.14), diagnostyki błędów komunikacji (rys. 7.15) oraz do rekonfiguracji i automatycznego przełączania się na nowy regulator o lepszej precyzji sterowania (rys. 7.18).

W rozdziale 8 Autor prezentuje ponowne zastosowanie opracowanego systemu MAS do sterowania ciągłym procesem MIMO fermentacji kwasu mlekowego, weryfikując tym samym jego uniwersalność poza napowietrzaniem osadu czynnego. Sterowanie realizowano za pomocą adaptacyjnego regulatora RAC oraz klasycznego regulatora PI jako rezerwowego.

Architektura MAS zachowała warstwową strukturę z rozdziału 7, z wyjątkiem pominiętej warstwy diagnostyki. Warstwa algorytmów obejmowała pięciu agentów: RAC do głównej kontroli, dwóch agentów PI sterujących zmiennymi procesu oraz dwóch agentów priorytetowych wybierających najlepszy sygnał sterujący dla każdej zmiennej, przy czym RAC miał najwyższy priorytet.

Zastosowana ontologia była zmodyfikowaną wersją poprzedniej, bez elementów diagnostyki i dostosowaną do mechanizmu priorytetowego, co w mojej opinii potwierdza elastyczność i możliwość ponownego wykorzystania opracowanego schematu. Testy wykazały, że MAS prawidłowo przypisywał

sterowanie, utrzymując wysoką precyzję nawet przy utracie informacji o wartości estymowanej, przy czym pozostałe zmienne były obsługiwane przez swoich preferowanych agentów.

Choć eksperyment przedstawiony w rozdziale 8 ograniczony jest do symulacji i nie uwzględnia pełnej diagnostyki, w kontekście dysertacji stanowi solidne rozszerzenie wcześniejszych wyników, pokazując zastosowanie systemu w nowym, bardziej złożonym procesie biotechnologicznym.

Rozdział 9 podsumowuje dotychczasowe badania, wyciąga wnioski oraz przedstawia kierunki przyszłych badań. Autor wskazuje na możliwość rozszerzenia MAS o bardziej złożone procesy biotechnologiczne, w tym sterowanie całym systemem oczyszczania ścieków, oraz potrzebę dalszej optymalizacji zasad projektowania systemów wieloagentowych.

3. Oryginalne osiągnięcia

Do ważnych osiągnięć naukowych mgr. inż. Jakuba Pośpiecha zaliczam, m.in. następujące:

- *Sformułowanie oryginalnego, dotychczas nie w pełni zbadanego i opisanego w literaturze problemu badawczego*

Autor zauważa brak analiz użyteczności i praktycznej wykonalności MAS w sterowaniu procesami ciągłymi o wolnej i niepewnej dynamice oraz ograniczonej dostępności pomiarów. Takie ujęcie stanowi autorską i praktycznie uzasadnioną propozycję badań wzbogacającą dotychczasowe podejścia badawcze w tym obszarze.

- *Propozycja metodyki oceny użyteczności i wykonalności systemów wieloagentowych w sterowaniu procesami ciągłymi. Przyjęcie oryginalnego programu badań symulacyjnych i eksperymentalnych*

W odróżnieniu od klasycznych analiz projektowych stosowanych w przemyśle, koncentrujących się głównie na badaniu stabilności algorytmów, dokładności regulacji, ocena obejmuje także zdolność MAS do adaptacji, rekonfiguracji online, współpracy konkurujących algorytmów sterowania, odporności na awarie modułów oraz integrację z systemami czasu rzeczywistego.

- *Opracowanie symulacyjnego modelu dynamiki stężenia tlenu rozpuszczonego, uwzględniającego specyfikę i własności instalacji laboratoryjnej*

Autor opracował i dokonał wstępnej identyfikacji parametrów nieliniowego modelu dynamiki stężenia tlenu rozpuszczonego. Model ten, pomija część zjawisk opisywanych w modelach literaturowych, jednak zachowuje kluczowe własności dynamiczne procesu. Z kolei wprowadzenie dodatkowego równania opisującego wewnętrzną dynamikę stężenia tlenu, opartego na obserwacjach pracy rzeczywistego obiektu laboratoryjnego, stanowi praktycznie uzasadnione rozszerzenie klasycznych modeli opisywanych w literaturze.

- *Opracowanie mechanizmów estymacji parametrów procesu, w czasie rzeczywistym*

Autor opracował procedury bieżącej identyfikacji parametrów procesu napowietrzania, obejmujące m.in.: estymację szybkości poboru tlenu, identyfikację opóźnień czasowych oraz adaptacyjne wyznaczanie momentu załączenia pompy. Mechanizmy te zostały spójnie zintegrowane z architekturą systemu wieloagentowego i wykorzystywane przez agentów sterujących do dynamicznego dostosowywania strategii regulacji w warunkach niepewności modelowej.

- *Opracowanie i wdrożenie autorskiego systemu wieloagentowego do sterowania procesami biologicznymi*

Istotnym osiągnięciem Autora jest zaprojektowanie kompletnego systemu MAS o modularnej i warstwowej architekturze, uwzględniając specyfikę procesów biologicznych. System bazuje na architekturze heterogenicznej i składa się z agentów realizujących zróżnicowane funkcje.

Charakteryzuje się znacznym stopniem autonomii – poszczególni agenci podejmują decyzje w oparciu o lokalnie dostępne informacje. Wiedza w systemie jest rozproszona, co odpowiada klasycznemu ujęciu systemów wieloagentowych jako zbioru jednostek operujących na danych częściowych i potencjalnie niepewnych. Struktura systemu umożliwia dynamiczną wymianę, dodawanie lub usuwanie agentów bez zakłócania pracy pozostałych komponentów, co pozwala na łatwą adaptację do innych procesów biotechnologicznych. Ponadto Autor samodzielnie określił role agentów, ich interakcje oraz mechanizmy wymiany wiedzy przy użyciu lekkiej ontologii, co wspiera efektywne zarządzanie informacjami w rozproszonym systemie sterowania.

- ***Opracowanie środowisk testowych do kompleksowej oceny działania systemu MAS***

Znaczącym osiągnięciem Autora jest opracowanie środowisk testowych, zarówno laboratoryjnych, jak i symulacyjnych, które umożliwiły kompleksową weryfikację działania MAS. W eksperymentach laboratoryjnych system został zintegrowany z reaktorem biologicznym za pomocą protokołu OPC UA, co pozwoliło na testowanie komunikacji, sterowania oraz mechanizmów diagnostyki w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. W środowiskach symulacyjnych (LabView) Autor sprawdził system również na bardziej złożonym procesie, jak fermentacja kwasu mlekowego, co umożliwiło ocenę elastyczności, zdolności rekonfiguracji i uniwersalności architektury w nowych scenariuszach sterowania.

4. Uwagi ogólne i komentarze

Niektóre elementy proponowanego rozwiązania wymagają doprecyzowania lub szerszego omówienia:

- ***Zakres i ograniczona liczba scenariuszy walidacyjnych***

W ramach pracy oceniona została zarówno użyteczność, tj. zdolność MAS do rekonfiguracji w celu poprawy jakości sterowania, jak i wykonalność tj. czy MAS są praktycznie możliwe do wdrożenia w procesach biotechnologicznych i czy korzyści z adaptacji MAS przewyższają alternatywne rozwiązania. Analiza ta została przeprowadzona w oparciu o wybrane badania symulacyjne oraz eksperymenty laboratoryjne. Należy jednak zauważyć, że liczba przeprowadzonych testów jest ograniczona i może nie być wystarczająca dla pełnego uogólnienia wyników na szeroki zakres możliwych warunków pracy systemu. W związku z tym pojawia się pytanie, czy Autor przewiduje lub prowadził dodatkowe badania, obejmujące inne niż przedstawione w pracy scenariusze operacyjne lub większe układy bioreaktorów, co pozwoliłoby na pełniejszą ocenę stabilności, odporności i uniwersalności proponowanego podejścia?

- ***Zakres prezentacji wyników estymacji parametrów procesu***

Autor wykazuje, że system MAS zaprezentowany w rozdziale 4 potrafi adaptować się do zmian obciążenia procesu, w tym do zmian dopływu substratu. W pracy nie zauważyłam jednak szczegółowych wyników ilościowych dotyczących działania agenta estymacji parametrów (np. przebiegów estymowanych wartości, ich stabilności ani wpływu błędów estymacji na jakość regulacji). Z punktu widzenia pełniejszej oceny systemu wskazane byłoby rozszerzenie wyników z rozdziału 4.3 o analizę działania agenta estymacji. Szczególnie istotne byłoby przedstawienie, jak estymowane parametry procesu reagują na zmiany strumienia dopływu substratu oraz w jaki sposób wpływa to na decyzje sterujące podejmowane przez MAS?

- ***Uproszczenia modelowe i ich wpływ na zastosowania przemysłowe***

W pracy przyjęto szereg uproszczeń modelowych, takich jak założenie pełnego wymieszania reaktorów, jednorodności rozkładu stężeń oraz uproszczonej dynamiki przepływów. Są one uzasadnione w warunkach laboratoryjnych, jednak rodzą pytania o skuteczność zaproponowanego systemu MAS w większych i bardziej złożonych instalacjach biotechnologicznych, gdzie występują lokalne gradienty

stężeń, opóźnienia transportowe oraz niejednorodności przestrzenne. Warto byłoby szerzej odnieść się do tego, w jaki sposób system MAS radziłby sobie z niepewnością wynikającą z takich zjawisk oraz czy obecna architektura umożliwia ich uwzględnienie bez istotnej przebudowy całego systemu. Jakie mogą być konsekwencje pominięcia tych zjawisk i czy jest to uzasadnione?

- ***Płynne przełączanie algorytmów sterowania***

Na rysunku 5.8 widoczny jest brak ciągłości pochodnej sygnału sterującego, co przejawia się w postaci „załamania” wykresu w chwili przełączania pomiędzy regulatorami, gdy nachylenie sygnału zmienia się gwałtownie. Rodzi to pytanie o interpretację pojęcia „płynnego przełączania” użytego w pracy. Czy Autor rozumie przez nie jedynie zachowanie ciągłości sygnału sterującego (oraz wyjścia obiektu), czy także spełnienie silniejszych warunków gładkości, takich jak ciągłość pochodnej? W szczególności celowe byłoby doprecyzowanie, jakie mechanizmy zastosowane w pracy zapewniają synchronizację stanów regulatorów podczas przełączania, co ma kluczowe znaczenie w przypadku przejść pomiędzy regulatorami o odmiennych właściwościach dynamicznych. Brak takiej synchronizacji może prowadzić do nieciągłości pochodnej sygnału sterującego, a w konsekwencji do chwilowego pogorszenia jakości regulacji lub wzrostu obciążeń elementów wykonawczych.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Na podstawie analizy treści rozprawy można stwierdzić, że mgr inż. Jakub Pospiech wykazał się umiejętnościami w formułowaniu problemów naukowo-badawczych i technologicznych w oparciu o przegląd dostępnej literatury światowej. Postawione zagadnienia dla wybranych modeli biologicznych zostały rozwiązane przy użyciu adekwatnych metod badawczych z zakresu automatyki, zarówno w ujęciu teoretycznym, jak i praktycznym. Przeprowadzone badania symulacyjne i eksperymenty laboratoryjne potwierdziły poprawność i efektywność zaproponowanych metod. Pracę cechuje przemyślana koncepcja i systematyczne realizowanie badań, prowadzące od prostych prototypów do pełnego, funkcjonalnego systemu. Teza została osiągnięta poprzez stopniowe zwiększanie złożoności systemu, wprowadzanie kolejnych funkcjonalności oraz testowanie i weryfikację każdego etapu, co umożliwiło dokładną analizę działania, krytyczną ocenę rozwiązań i sformułowanie wniosków do dalszych badań.

W związku z powyższą, wysoką oceną dysertacji, w szczególności podkreślając jej praktyczne znaczenie stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska pt. „Examining of feasibility and usefulness of agent-based control systems for controlling biotechnological processes” spełnia wymogi formalne określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z późniejszymi zmianami i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Jakuba Pośpiecha do publicznej obrony pracy doktorskiej.