

dr hab. inż. Rafał Stanisławski, prof. uczelni
Katedra Systemów Informatycznych i Sterowania
Wydział Informatyki
Politechnika Opolska
e-mail: r.stanislawski@po.edu.pl

POLITECHNIKA ŚLĄSKA Opole, 19.01.2026
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 20.01.26
nr zał.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Examining of feasibility and usefulness of agent-based control systems for controlling of biotechnology processes

Autor rozprawy: mgr inż. Jakub Pośpiech

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Witold Nocoń, prof. Pol Śl.

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Piotr Skupin, prof. Pol. Śl.

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej, dr hab. inż. Adama Gałuszki, prof. PŚ, z 12 stycznia 2026 roku.

1. Zawartość pracy i ocena formalna

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska zawiera łącznie 86 stron podzielonych na dziewięć rozdziałów, literatury liczącej 176 pozycji, wykazu ważniejszych skrótów, oraz spisu rysunków i tabel. Dysertacja została napisana w języku angielskim. Zawartość rozprawy zaprezentowano poniżej.

W Rozdziale pierwszym przedstawiono wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy. Scharakteryzowano kontekst prowadzonych badań oraz zaprezentowano krótki rys historyczny. Wprowadzono podstawowe pojęcia związane z systemami agentowymi i wieloagentowymi, a także omówiono zagadnienia dotyczące procesów biotechnologicznych. Dokonano również przeglądu wybranych implementacji systemów wieloagentowych w różnych obszarach zastosowań. Na tej podstawie przedstawiono koncepcję recenzowanej pracy, sformułowano jej tezę dysertacji oraz pytania badawcze. Ponadto w Rozdziale pierwszym zaprezentowano strukturę pracy.

Rozdział drugi poświęcony jest przeglądowi narzędzi programistycznych wspierających implementację systemów wieloagentowych. Autor koncentruje się na frameworkach ogólnego przeznaczenia, które są najczęściej wykorzystywane zarówno w badaniach naukowych, jak i w zastosowaniach przemysłowych. Na podstawie przeprowadzonej analizy autor uzasadnia wybór frameworka *Java Agent Development Framework* (JADE) jako platformy implementacyjnej dla badań prowadzonych w rozprawie. Ze względu na ograniczenia narzędzi opartych na językach interpretowanych, w szczególności Java, w kontekście pracy w systemach o ostrych wymaganiach czasu rzeczywistego,

autor proponuje architekturę hybrydową. W zaproponowanym rozwiązaniu system wieloagentowy realizuje funkcje decyzyjne i adaptacyjne, natomiast zadania wymagające spełnienia restrykcyjnych wymagań czasowych są delegowane do niskopoziomowych komponentów sterujących.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawia stanowiska laboratoryjne, na których implementowane i testowane są opracowane modele wieloagentowe. Obejmują one proces regulacji stężenia tlenu rozpuszczonego oraz proces fermentacji kwasu mlekowego. Autor opisuje zastosowane stanowiska badawcze, przedstawia równania fizykalne modelowanych procesów oraz omawia procedurę identyfikacji parametrów modeli. Szczególnie szczegółowo przeanalizowany został proces regulacji stężenia rozpuszczonego tlenu. Znaczną część wyników zaprezentowanych w rozdziale oparto na wcześniejszych pracach współautorskich Doktoranta.

Rozdział czwarty zawiera opis pierwszego, wstępnego etapu badań, którego celem było opracowanie i weryfikacja systemu wieloagentowego przeznaczonego do regulacji stężenia tlenu rozpuszczonego podczas usuwania zanieczyszczeń organicznych w bioreaktorze laboratoryjnym z wykorzystaniem sterowania typu ON-OFF. W rozdziale przedstawiono koncepcję modularnej architektury systemu wieloagentowego, umożliwiającej modyfikację, wymianę oraz usuwanie poszczególnych agentów przy minimalnym wpływie na funkcjonowanie całego systemu, a także integrację algorytmów sterowania o różnym poziomie złożoności i niezawodności. Istotnym elementem badań była zdolność systemu do reagowania na awarie regulatorów poprzez płynne przełączanie się pomiędzy dostępnymi algorytmami sterowania w celu zapewnienia możliwie najwyższej jakości regulacji. Celem sterowania było utrzymanie stężenia tlenu rozpuszczonego na poziomie zbliżonym do $2 \text{ mgO}_2/\text{l}$, optymalnie w zakresie $1,95\text{-}2,05 \text{ mgO}_2/\text{l}$. Wyniki przeprowadzonych prac pokazały skuteczność systemów wieloagentowych w zastosowaniu do sterowania procesem i pozwoliły na sformułowanie istotnych wniosków, które wyznaczyły kierunki dalszych badań. Zawartość zaprezentowana w rozdziale została opublikowana w pracy współautorskiej Doktoranta.

Badania przedstawione w rozdziale piątym skoncentrowano na zagadnieniach związanych z projektowaniem architektury agentów w systemie wieloagentowym oraz komunikacją pomiędzy nimi. W rozdziale zaprezentowano zestaw reguł dotyczących projektowania systemów wieloagentowych przeznaczonych do sterowania procesami ciągłymi. Przedstawione wytyczne odnoszą się do dwóch kluczowych aspektów projektowania systemów wieloagentowych: architektury systemowej oraz komunikacji pomiędzy agentami. Przeprowadzone eksperymenty walidacyjne w obszarze regulacji stężenia tlenu rozpuszczonego potwierdzają poprawność zaproponowanego podejścia. Jednocześnie wykazano, że mechanizm adaptacji systemu wieloagentowego, nawet w postaci prostego mechanizmu progowego, może prowadzić do poprawy jakości regulacji. Zaprezentowane w rozdziale wyniki, które były również przedmiotem publikacji Doktoranta, stanowią punkt wyjścia do dalszych badań przedstawionych w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Rozdział szósty przedstawia propozycję schematu ontologii oraz opartego na niej modelu. Zaproponowana ontologia oferuje uniwersalny rdzeń pojęć, który może być wykorzystywany w różnych systemach sterowania. Jednocześnie jej struktura pozostaje na tyle prosta i elastyczna, że umożliwia łatwą modyfikację oraz dostosowanie do specyficznych wymagań aplikacyjnych. Przedstawiony schemat ontologii został oparty na dogłębnej analizie literatury przedmiotu.

Zastosowanie zaproponowanego systemu wieloagentowego do regulacji stężenia tlenu rozpuszczonego w procesie oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego przedstawiono w rozdziale siódmym. Zaprezentowano w nim projekt oraz implementację wieloagentowego, rozproszonego sys-

temu sterowania predykcyjnego. Autor opisuje sposób wykorzystania dynamicznego modelu procesu, algorytmów predykcyjnych oraz interakcji społecznych agentów do precyzyjnego utrzymywania wartości regulowanej w zadanym zakresie. Istotnym elementem rozdziału jest wprowadzenie mechanizmu oceny wiarygodności agentów, opartego na porównaniu ich deklaracji z rzeczywistymi pomiarami procesu, oraz algorytmu detekcji uszkodzeń umożliwiającego identyfikację nieprawidłowo działających agentów. Zaproponowany system wykazuje zdolność do rekonfiguracji swojej struktury oraz płynnego przełączania algorytmów sterowania w trakcie pracy. Przeprowadzona walidacja eksperymentalna na laboratoryjnym obiekcie osadu czynnego potwierdziła skuteczność zaproponowanego podejścia, wskazując na wyższą jakość regulacji w porównaniu z klasycznym algorytmem *Boundary-Based Predictive Controller*. Rozdział ten zawiera, zdaniem recenzenta, zasadniczy wkład kandydata.

Zastosowanie opracowanych rozwiązań do sterowania procesem fermentacji kwasu mlekowego przedstawiono w rozdziale ósmym. Podobnie jak w poprzednich badaniach, opracowany system wieloagentowy wykazywał zdolność do rekonfiguracji w zależności od napotkanych warunków procesu poprzez płynne przełączanie pomiędzy dostępnymi algorytmami sterowania. Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły skuteczność zaproponowanej metodologii również w odniesieniu do tego procesu. Pomimo wykorzystania rozwiązań analogicznych do wcześniej omawianych, rozdział ten wnosi element nowości w postaci zastosowania sterowania układem wielowymiarowym typu wiele-wejść–wiele-wyjść (MIMO).

W Rozdziale dziewiątym zostało zawarte podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań, wraz z odniesieniem do postawionej tezy dysertacji. W Rozdziale przedstawiono również kierunki potencjalnych przyszłych prac Doktoranta.

Układ rozprawy jest poprawny i przejrzysty. Treść dysertacji została logicznie podzielona na kolejne rozdziały, a zakres oraz struktura poszczególnych rozdziałów, podrozdziałów i sekcji nie budzą zastrzeżeń recenzenta.

Na podkreślenie zasługuje bardzo wysoki poziom edycyjny pracy. Rozdziały, podrozdziały, sekcje, nagłówki oraz elementy pomocnicze utrzymane są w jednolitej i konsekwentnie stosowanej konwencji, co pozytywnie wpływa na czytelność i estetykę rozprawy. Rysunki zostały przygotowane z dużą starannością, z dbałością o precyzyjne i estetyczne przedstawienie zastosowanych algorytmów oraz uzyskanych wyników badań.

Język pracy (język angielski) jest klarowny i precyzyjny, co sprawia, że rozprawę czyta się z łatwością. Należy również zaznaczyć, że dysertacja została bardzo dobrze przygotowana pod względem redakcyjnym – recenzent nie stwierdził żadnych istotnych uchybień interpunkcyjnych ani stylistycznych.

Jedynym uchybieniem formalnym rozprawy jest brak streszczeń w języku angielskim i polskim. Należy jednak podkreślić, że uchybienie to ma charakter drugorzędny i nie wpływa na bardzo pozytywną ocenę strony formalnej pracy.

2. Ocena merytoryczna pracy

Pierwsze istotne prace związane z systemami agentowymi i wieloagentowymi zaczęły pojawiać się w latach dziewięćdziesiątych XX wieku, początkowo w kontekście systemów informatycznych. Z biegiem czasu problematyka ta rozszerzyła się na inne obszary badawcze, takie jak zarządzanie, ekonomia czy nauki społeczne. Różnorodność tych dziedzin oraz odmiennosc celów badawczych utrudniały

jednak jednoznaczne zdefiniowanie pojęcia agenta oraz ujednoczenie klasy systemów wieloagentowych. Pewną próbę uporządkowania i uogólnienia tego zagadnienia zaproponował Wooldridge, którego definicje do dziś stanowią jeden z najczęściej przywoływanych punktów odniesienia. Systemy wieloagentowe zostały przeniesione z informatyki do teorii sterowania na przełomie lat dziewięćdziesiątych i dwutysięcznych, natomiast ich pełniejsza integracja z automatyką nastąpiła po 2003 roku, wraz z rozwojem sterowania rozproszonego oraz teorii konsensusu. Istotny wkład w formalne ujęcie systemów wieloagentowych z wykorzystaniem narzędzi teorii sterowania wniósł Reza Olfati-Saber, którego prace zapoczątkowały szeroko rozwijany nurt sterowania kooperacyjnego i systemów sieciowych. Zainteresowanie systemami wieloagentowymi wynikało przede wszystkim z ich uniwersalności oraz zdolności do efektywnej realizacji złożonych zadań poprzez współdziałanie wielu autonomicznych podsystemów. Systemy te znalazły zastosowanie m.in. w inteligentnych sieciach elektroenergetycznych, systemach produkcyjnych i wytwórczych (w tym w rekonfigurowalnych systemach typu Plug & Produce), a także w transporcie i logistyce, gdzie wykorzystywane są do zarządzania ruchem drogowym, kolejowym i lotniczym. Ponadto MAS stosowane są w inteligentnych budynkach, sieciach telekomunikacyjnych oraz w algorytmach sterowania kooperacyjnego i konsensusu. W obszarze procesów ciągłych systemy wieloagentowe pełnią głównie funkcje systemów nadrzędnych, monitorujących i diagnostycznych, a rzadziej są wykorzystywane do bezpośredniego sterowania. Pomimo rosnącej popularności systemów wieloagentowych, ich zastosowania w przemyśle biotechnologicznym pozostają ograniczone. Jak zauważa autor dysertacji, w literaturze przedmiotu można znaleźć jedynie nieliczne przykłady praktycznych implementacji MAS w tym obszarze, co wskazuje na istnienie istotnej luki badawczej i uzasadnia podjęcie badań przedstawionych w niniejszej pracy.

W związku z powyższym autor podejmuje badania w ważnym i aktualnym obszarze, który posiada solidne podstawy w światowej literaturze naukowej, a jednocześnie stwarza możliwości uzyskania nowych, istotnych wyników, w szczególności o charakterze aplikacyjnym. Recenzent lokuje przedmiotową dysertację w obszarze trzech dyscyplin naukowych, tj. Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika oraz Technologie Kosmiczne, Informatyka Techniczna i Telekomunikacja oraz Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, należących do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych. Choć zasadnicza problematyka rozprawy odnosi się przede wszystkim do pierwszej z wymienionych dyscyplin, to zastosowane metody, narzędzia informatyczne oraz obszar potencjalnych zastosowań pozwalają, zdaniem recenzenta, również na jednoznaczne przypisanie pracy do pozostałych dwóch dyscyplin.

Doktorant postawił sobie ambitny i istotny cel badawczy, polegający na opracowaniu zasad projektowania systemu wieloagentowego o określonej architekturze oraz ontologii, a następnie na jego skutecznej implementacji w zadaniach sterowania dwoma wybranymi procesami biotechnologicznymi. Istotnym elementem podjętych badań było również wykazanie efektywności zaproponowanego podejścia poprzez porównanie uzyskanych wyników z rezultatami osiąganymi przy zastosowaniu klasycznych metod sterowania. Sformułowana została następująca teza rozprawy:

Zastosowanie systemu opartego na agentach, zaprojektowanego zgodnie z zestawem reguł rozwojowych dla procesów biotechnologicznych, umożliwi opracowanie systemu sterowania o rekonfigurowalnej strukturze, zdolnego do dostosowywania się do zmiennych warunków procesowych w celu osiągnięcia zadowalającej jakości regulacji, co zwiększa zasadność stosowania systemów wieloagentowych oraz potwierdza ich użyteczność.

Ponadto w pracy zostały postawione dwa pytania badawcze:

- **Czy systemy wieloagentowe są zdolne do skutecznego sterowania procesami biotechnologicznymi?**
- **Czy korzyści wynikające z adaptacyjności systemów wieloagentowych uzasadniają ich zastosowanie w porównaniu z rozwiązaniami alternatywnymi?**

Zwartość rozprawy, omówiona w poprzednim punkcie recenzji, wynika bezpośrednio z jasno sformułowanych pytań badawczych i prowadzi do weryfikacji postawionej tezy. Osiągnięcia Kandydata koncentrują się zarówno na zagadnieniach teoretycznych związanych z opracowaniem zasad projektowania systemów wieloagentowych, jak i na aspektach praktycznych dotyczących ich implementacji w systemach biotechnologicznych. Ostatecznie do podstawowych osiągnięć rozprawy można zaliczyć:

- Przeprowadzenie kompleksowej oceny zasadności i użyteczności systemów wieloagentowych w sterowaniu procesami biotechnologicznymi, opartej na spójnej metodologii badawczej oraz serii badań pilotażowych i studiów wykonalności.
- Opracowanie zestawu reguł projektowych dla systemów wieloagentowych, obejmujących architekturę systemu oraz zasady budowy ontologii, ukierunkowanych na skuteczne zastosowania w sterowaniu procesami ciągłymi.
- Zaprojektowanie uniwersalnego schematu ontologii dla systemów wieloagentowych, opartego na hierarchii pojęć danych i wartości, umożliwiającego jego wykorzystanie w różnych systemach sterowania przy jedynie niewielkich modyfikacjach.
- Wykazanie, że systemy agentowe niebędące systemami czasu rzeczywistego mogą być skutecznie stosowane w sterowaniu procesami biotechnologicznymi o relatywnie długich czasach próbkowania, pod warunkiem zastosowania odpowiednich architektur hybrydowych.
- Implementacja oraz eksperymentalna weryfikacja adaptacyjnego systemu wieloagentowego, zdolnego do dynamicznego dodawania i usuwania agentów w trakcie pracy systemu bez utraty ciągłości sterowania.
- Zastosowanie zaproponowanego podejścia do sterowania rzeczywistym, złożonym procesem biotechnologicznym, tj. procesem oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego, oraz przeprowadzenie analizy porównawczej jakości regulacji względem klasycznego algorytmu sterowania predykcyjnego.
- Implementacja systemu wieloagentowego do sterowania procesem fermentacji kwasu mlekowego oraz wykazanie jego przewagi w porównaniu z klasycznymi układami regulacji stosowanymi w tego typu aplikacjach.

Recenzent nie zgłasza istotnych uwag odnoszących się do strony merytorycznej rozprawy i jednoznacznie stwierdza, że wszystkie wyżej wymienione osiągnięcia są znaczące oraz stanowią istotny wkład Kandydata w rozwój dyscypliny *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*. Przedstawione wyniki badań prowadzą do jednoznacznej weryfikacji postawionej tezy rozprawy, a także pozwalają na pozytywną odpowiedź na wcześniej sformułowane pytania badawcze.

Rozprawa ma wyraźnie zaznaczony charakter teoretyczno-praktyczny. Główny wkład teoretyczny Kandydata zawarty jest w rozdziałach piątym i szóstym, a częściowo również w rozdziale czwartym. Z kolei istotny wkład praktyczny stanowią rozdziały siódmy i ósmy oraz, w ograniczonym zakresie, rozdział czwarty.

3. Analiza źródeł, pozycja rozprawy, znaczenie wyników Autora, umiejętność przedstawiania wyników

Motywacja dla podjęcia tematu rozprawy wniknęła z dobrze przeprowadzonej przez Autora analizy literatury przedmiotu, liczącej 176 pozycji. Dzięki szerokiej analizie literaturowej został poprawnie odzwierciedlony aktualny stan wiedzy na temat wszystkich zagadnień podejmowanych w pracy.

Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy reprezentowanej w literaturze światowej jest zdecydowanie wyróżniająca. Doktorant jest współautorem czterech artykułów w czasopismach indeksowanych na liście JCR, tj. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *Journal of Process Control*, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences - Technical Sciences*, jednego artykułu w krajowym periodyku o ugruntowanej pozycji (*Przegląd Elektrotechniczny*), jednego referatu na konferencji międzynarodowej *IEEE International Conference on Methods & Models in Automation Robotics*, oraz jest współautorem jednej monografii zbiorowej wydanej przez wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Na szczególną uwagę zasługuje publikacja wyników związanych z ocenianą dysertacją w uznanych, prestiżowych czasopismach światowych, tj. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* i *Journal of Process Control*. Należy również zauważyć, że pomimo krótkiego czasu od publikacji, prace Doktoranta wg bazy Web of Science zostały zacytowane 16 razy co obrazuje, że zostały zauważone przez środowisko naukowe.

Autor posiadał umiejętność poprawnego, przekonującego i precyzyjnego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Zarówno część merytoryczną rozprawy, jak również artykuły cechuje zwięzłość, jasność języka oraz precyzja.

4. Wady rozprawy, słabe strony, uwagi i pytania

Należy podkreślić, że poziom merytoryczny ocenianej dysertacji jest bardzo wysoki i recenzent nie dostrzegł w niej istotnych wad i niedostatków. Jednak warto również w nich wskazać na pewne, w większości drobne uchybienia oraz niejasności. Zostały one przedstawione w punktach:

- 1) W Rozdziale pierwszym przedstawiono przegląd literatury dotyczący systemów wieloagentowych oraz procesów biotechnologicznych. Zdaniem recenzenta przegląd ten w sposób poprawny oddaje aktualny stan wiedzy w zakresie poruszanych zagadnień, jednak zabrakło w nim pogłębionej, bardziej krytycznej analizy omawianych prac.
- 2) Część rysunków została przeniesiona z artykułów współautorstwa Doktoranta, co nie jest samo w sobie uchybieniem. Odnośnik do literatury został załączony w tekście, jednak zdaniem recenzenta cytowanie powinno zostać powielone w podpisie rysunku. Np. rys. 3.4 [26], rys. 3.1, 3.2, 7.6, 7.7, 7.17 [133].

- 3) Zwięzłość pracy recenzent ocenia pozytywnie, jednak została ona osiągnięta kosztem pewnych uproszczeń. Nieco zabrakło bardziej szczegółowego opisu rozpatrywanych w pracy systemów wieloagentowych.
- 4) W ocenie recenzenta rozprawa została dobrze odzwierciedlona w dorobku publikacyjnym Kandydata. Większość istotnych wyników uzyskanych w trakcie realizacji pracy została przez Doktoranta opublikowana, w przeważającej mierze we współautorstwie z promotorami rozprawy. Z tego względu przedmiotowa dysertacja mogłaby być również bronią w trybie rozprawy opartej na cyklu publikacji.

Należy podkreślić, że przedstawione powyżej uwagi, mają w większości charakter dyskusyjny i w związku z tym nie obniżają one pozytywnej oceny pracy.

5. Podsumowanie recenzji i wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi, zdaniem recenzenta, oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego oraz wykazuje dużą ogólną wiedzę teoretyczną i aplikacyjną Kandydata w dyscyplinie naukowej *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*, a także Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zatem stwierdzam, że **rozprawa mgr inż. Jakuba Pośpiecha spełnia** warunki określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych, w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*.

W związku z powyższym, uwzględniając oryginalność rozwiązania problemu naukowego przedstawionego w rozprawie, specjalistyczną wiedzę Kandydata w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne* oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej **wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Pośpiecha do publicznej obrony.**

Ponadto, ponadprzeciętna aktywność publikacyjna Doktoranta, w tym publikacja w dwóch uznanych periodykach w obszarze pracy (*IEEE Transactions on Industrial Electronics, Journal of Process Control*), wysoki poziom merytoryczny dysertacji oraz złożoność przeprowadzonych badań, skłania mnie do **zawnioskowania o wyróżnienie przedmiotowej rozprawy doktorskiej.**