

Dr hab. inż. Robert Suszyński, prof. PK  
Wydział Elektroniki i Informatyki  
Politechnika Koszalińska

wpłynęło dnia 27.03.26  
nr ..... zał. ....

## Recenzja

### rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Pośpiecha pt. „Examining of feasibility and usefulness of agent-based control systems for controlling biotechnological processes”

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Pośpiecha została przygotowana na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, pod opieką naukową promotora dr. hab. inż. Witolda Noconia, prof. PŚ. oraz promotora pomocniczego dr. hab. inż. Piotra Skupina, prof. PŚ. Rozprawa nosi tytuł „Examining of feasibility and usefulness of agent-based control systems for controlling biotechnological processes”.

#### 1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologicie Kosmiczne Politechniki Śląskiej dra hab. inż. Adama Gałuszki prof. PŚ, w związku z powołaniem mojej osoby pismem RDAEETK.512.6.2026 z dnia 12.01.2026 r. na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Pośpiecha. Podstawę prawną sporządzenia niniejszej oceny stanowią przepisy ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571). Rozprawa została złożona w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologicie kosmiczne.

#### 2. Cel, zakres i teza rozprawy

Celem rozprawy jest ocena wykonalności i użyteczności systemów wieloagentowych w sterowaniu procesami biotechnologicznymi. Autor wychodzi z trafnego rozpoznania, że mimo szerokiego zainteresowania systemami MAS w różnych obszarach przemysłu, ich zastosowanie w sterowaniu procesami biotechnologicznymi pozostaje nadal stosunkowo słabo rozwinięte, choć właśnie ta klasa procesów – ze względu na ich złożoność, zmienność warunków pracy, ograniczoną dostępność części pomiarów oraz wysokie wymagania w zakresie niezawodności – wydaje się szczególnie interesującym polem dla rozwiązań opartych na architekturze agentowej. W tym sensie problem badawczy został osadzony poprawnie i ma zarówno znaczenie poznawcze, jak i praktyczne.

Na pozytywną ocenę zasługuje to, że autor nie ogranicza celu pracy do wykazania możliwości budowy pojedynczego systemu sterowania, lecz ujmuje go szerzej – jako próbę odpowiedzi na pytanie, czy systemy wieloagentowe mogą stanowić rozwiązanie rzeczywiście użyteczne i wykonalne w zastosowaniach biotechnologicznych. W rozprawie pojęcie użyteczności odniesiono do zdolności systemu do realizacji założonych celów sterowania, odpowiadania na potrzeby użytkownika oraz zapewniania przewagi nad rozwiązaniami alternatywnymi, natomiast wykonalność rozumiana jest w kategoriach analizy wykonalności, sprowadzonego do dwóch zasadniczych pytań: czy systemy wieloagentowe są zdolne do sterowania procesami biotechnologicznymi oraz czy korzyści wynikające z ich zastosowania uzasadniają ich wybór względem podejść alternatywnych. Takie ujęcie celu nadaje pracy wyraźny wymiar ewaluacyjny i metodologiczny.

Zakres rozprawy został podporządkowany temu celowi w sposób konsekwentny. Obejmuje on z jednej strony analizę przesłanek teoretycznych przemawiających za przydatnością systemów MAS w sterowaniu procesami biotechnologicznymi, z drugiej zaś przygotowanie oraz weryfikację konkretnych rozwiązań agentowych dla dwóch klas procesów: sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego w procesie oczyszczania ścieków oraz sterowania procesem fermentacji mlekowej. Istotne jest również to, że autor nie poprzestaje na warstwie implementacyjnej, lecz rozszerza zakres pracy o opracowanie reguł rozwoju systemów MAS oraz ontologii przeznaczonej do tego typu zastosowań. Dzięki temu rozprawa nie sprowadza się do opisu jednostkowego rozwiązania, lecz podejmuje próbę sformułowania bardziej ogólnych podstaw projektowych dla budowy agentowych systemów sterowania w rozważanym obszarze.

Teza rozprawy została sformułowana *explicite* i głosi, że zastosowanie systemu agentowego, zbudowanego na podstawie zestawu reguł rozwoju dla procesów biotechnologicznych, umożliwi opracowanie systemu sterowania o rekonfigurowalnej strukturze, zdolnego do dostosowywania się do warunków procesu w celu osiągnięcia zadowalającej jakości sterowania, zwiększając wykonalność systemów MAS i potwierdzając ich użyteczność. Teza ta jest sformułowana jasno i pozostaje spójna z zakresem przeprowadzonych badań. Jej istotnym elementem jest powiązanie skuteczności podejścia agentowego nie tylko z samym faktem zastosowania MAS, lecz także z oparciem projektowania na określonych regułach rozwoju i z ideą rekonfigurowalnej struktury sterowania. Nadaje to pracy walor bardziej ogólny niż w przypadku rozpraw ograniczających się do prezentacji pojedynczej implementacji.

### 3. Ogólna charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska liczy 86 stron tekstu zasadniczego i została podzielona na 9 rozdziałów. Po części głównej zamieszczono bibliografię, wykaz skrótów, spis rysunków oraz spis tabel. Zgodnie ze spisem treści rozdziały zasadnicze obejmują strony 1–73, bibliografia rozpoczyna się na s. 76, wykaz skrótów na s. 83, spis rysunków na s. 84, a spis tabel na s. 86. Układ pracy jest przejrzysty i podporządkowany logicznej sekwencji: od wprowadzenia teoretycznego i przeglądu narzędzi, przez opis procesów wykorzystanych do weryfikacji, po kolejne etapy badań własnych oraz końcową syntezę wyników.

Kompozycja rozprawy odpowiada logice stopniowo rozwijanego programu badawczego. Autor rozpoczyna od zarysowania problemu badawczego, następnie przedstawia zaplecze technologiczne i obszar zastosowań, po czym przechodzi do kolejnych etapów badań własnych: od studiów pilotażowych do bardziej dojrzałych studiów wykonalności. Taki układ został zresztą zapowiedziany już w końcowej części rozdziału pierwszego, gdzie autor wprost wskazuje, że rozdziały 4 i 5 mają charakter badań pilotażowych, rozdział 6 rozwija zagadnienie ontologii, natomiast rozdziały 7 i 8 zawierają właściwe studia wykonalności, zamknięte w rozdziale 9 wnioskami końcowymi.

Rozdział 1 (*Introduction*) ma charakter wprowadzający i pełni ważną funkcję porządkującą. Składa się z pięciu podrozdziałów: poświęconych agentom i systemom wieloagentowym, procesom biotechnologicznym, zastosowaniom MAS w przemyśle, potencjałowi adaptacyjnemu MAS w procesach biotechnologicznych oraz strukturze rozprawy. Autor przedstawia w nim podstawy pojęciowe związane z agentami programowymi i systemami wieloagentowymi, a następnie osadza własne badania w szerszym kontekście zastosowań przemysłowych i biotechnologicznych. W dalszej części rozdziału formułuje główną tezę pracy, zgodnie z którą system agentowy budowany na podstawie zestawu reguł rozwojowych dla procesów biotechnologicznych może umożliwić skonstruowanie systemu sterowania o rekonfigurowalnej strukturze, zdolnego do dostosowywania się do warunków procesu i osiągnięcia zadowalającej jakości sterowania. Już w tym miejscu czytelnik otrzymuje więc zarówno podstawy teoretyczne, jak i główne założenia oraz cel rozprawy.

Rozdział 2 (*Tools for MAS development*) ma charakter przeglądowy i metodologiczny. Autor omawia w nim dostępne narzędzia wykorzystywane do budowy systemów wieloagentowych, ze szczególnym uwzględnieniem środowisk ogólnego przeznaczenia. Przedstawia między innymi platformy JADE, ASTRA, JACK, a także nowsze rozwiązania bazujące na Pythonie, takie jak SPADE, BSPL i PIAF. Rozdział zawiera również podrozdział 2.1 poświęcony narzędziom MAS w środowiskach czasu rzeczywistego. W tej części autor wskazuje na ograniczenia platform agentowych budowanych w językach Java i Python w zastosowaniach czasu rzeczywistego oraz omawia możliwe obejścia tego problemu, zwłaszcza przez wykorzystanie architektury hybrydowej i komunikacji poprzez OPC UA. Rozdział ten ma istotne znaczenie dla całej pracy, gdyż uzasadnia wybór środowiska JADE jako podstawowego narzędzia implementacyjnego oraz pokazuje techniczne uwarunkowania dalszych badań.

Rozdział 3 (*Biotechnological processes used in MAS verification*) wprowadza obszar aplikacyjny, na którym weryfikowane są proponowane rozwiązania agentowe. Autor wskazuje, że wszystkie systemy sterowania przedstawiane w dalszych rozdziałach zostały sprawdzone na jednym z dwóch procesów biotechnologicznych: sterowaniu stężeniem tlenu rozpuszczonego w procesie oczyszczania ścieków oraz sterowaniu fermentacją mlekową. Pierwsza część rozdziału, dotycząca stężenia tlenu rozpuszczonego, obejmuje opis laboratoryjnego stanowiska badawczego, model procesu, procedurę identyfikacji modelu oraz środowisko symulacyjne zbudowane w LabVIEW i komunikujące się poprzez serwer OPC UA. Druga część rozdziału poświęcona jest

fermentacji mlekowej i zawiera opis celu sterowania, modelu dwuzbiornikowego układu reaktorów oraz jego implementacji symulacyjnej. Rozdział ten jest bardzo istotny dla konstrukcji całej rozprawy, ponieważ nie tylko definiuje obiekty badań, lecz także przedstawia techniczne i modelowe podstawy wszystkich późniejszych eksperymentów.

Rozdział 4 (*Multi-Agent System for dissolved oxygen concentration control*) rozpoczyna zasadniczą część badawczą pracy i ma charakter pierwszego studium pilotażowego. Autor przedstawia w nim wieloagentowy system sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego w warunkach laboratoryjnych, wykorzystujący sterowanie typu ON-OFF. Rozdział obejmuje opis architektury MAS, konstrukcję modelowego regulatora ON-OFF opartego na współpracy agentów oraz wyniki walidacji eksperymentalnej. Szczególnie istotne jest to, że autor projektuje system modułowy, umożliwiający modyfikację, wymianę i usuwanie agentów przy minimalnym wpływie na resztę systemu, a także wprowadza mechanizm płynnego przełączania pomiędzy kontrolerami o różnej złożoności i niezawodności. Rozdział kończy się podsumowaniem, w którym autor wyprowadza pierwsze praktyczne wnioski dotyczące użyteczności podejścia agentowego w sterowaniu procesem ciągłym oraz wskazuje trudności projektowe, które stały się punktem wyjścia dla dalszych badań.

Rozdział 5 (*Preparation of rules for efficient development of MAS*) stanowi drugi etap badań pilotażowych i ma już wyraźnie bardziej metodyczny charakter. Autor przechodzi tu od pojedynczej implementacji do próby sformułowania reguł ułatwiających projektowanie systemów wieloagentowych dla sterowania procesami ciągłymi. Rozdział obejmuje projektowanie architektury systemu, projektowanie komunikacji między agentami, weryfikację zaproponowanych reguł oraz końcowe podsumowanie. Jak wynika z wniosków końcowych pracy, wyniki przedstawione w tym rozdziale traktowane są jako podstawa dla dalszych projektów badawczych, a sama walidacja może być uznana za dowód koncepcji proponowanego układu architektury. W sensie konstrukcyjnym jest to ważny moment rozprawy, ponieważ autor przechodzi z poziomu rozwiązania jednostkowego na poziom bardziej ogólnych zasad projektowych.

Rozdział 6 (*Ontology in MAS for control of biotechnological processes*) rozwija i dopełnia poprzedni etap badań, koncentrując się na ontologii dla systemów MAS przeznaczonych do sterowania procesami biotechnologicznymi. Rozdział składa się z części dotyczących schematu ontologii, modelu obiektowego opartego na ontologii oraz podsumowania. W świetle końcowych wniosków autora przygotowana ontologia opiera się na hierarchii pojęć związanych z danymi i wartościami, tworząc uniwersalny rdzeń, który może być ponownie wykorzystany w innych systemach sterowania. Rozdział ten pełni zatem ważną funkcję formalizującą: nie dotyczy już tylko samej architektury systemu, lecz także semantycznej organizacji wiedzy w środowisku agentowym. W rezultacie wzmacnia on metodologiczną spójność całego podejścia proponowanego w rozprawie.

Rozdział 7 (*MAS for continuous control and its application to activated sludge process*) otwiera właściwą fazę analizy wykonalności. Jest to jeden z najbardziej rozbudowanych rozdziałów rozprawy. Obejmuje on zdefiniowanie celu sterowania, opis kontrolera *Boundary-Based Predictive Controller*, architekturę implementacji MAS, ontologię używaną w przedstawionej implementacji, sterowanie pompą perystaltyczną, procedurę detekcji uszkodzeń, system oceny niezawodności, wyniki symulacyjne, wyniki eksperymentalne oraz podsumowanie. Z końcowego rozdziału wynika, że w tej części autor bada system sterowania rzeczywistym obiektem — procesem oczyszczania ścieków z osadem czynnym — w konfiguracji wielowejściowej, z możliwością rekonfiguracji MAS w czasie pracy przez dodawanie i usuwanie agentów. Jest to zatem rozdział kluczowy z punktu widzenia oceny praktycznej wykonalności proponowanego podejścia.

Rozdział 8 (*MAS for continuous control of lactic acid fermentation process*) stanowi ostatni etap badań własnych i zarazem drugie studium wykonalności, tym razem przeprowadzone dla innego procesu biotechnologicznego. Autor przenosi wcześniej opracowane reguły projektowe oraz ontologię do zadania sterowania ciągłego fermentacją mlekową w układzie dwóch zbiorników. Rozdział obejmuje definicję celu sterowania i zastosowanych regulatorów, w tym regulatora RAC i projekt regulatorów PI, opis architektury implementacji MAS, ontologii w przedstawionej implementacji, wyniki eksperymentalne oraz podsumowanie. Z punktu widzenia konstrukcji rozprawy rozdział ten ma bardzo duże znaczenie, ponieważ służy sprawdzeniu, czy rozwiązania opracowane wcześniej dla procesu napowietrzania mogą zostać przeniesione na odmienny obiekt technologiczny. Autor wskazuje w zakończeniu pracy, że była to zarazem pierwsza próba wykorzystania MAS do sterowania układem MIMO, a ponowne użycie wcześniej przygotowanej ontologii wymagało jedynie niewielkich modyfikacji.

Rozdział 9 (*Final conclusions*) ma charakter syntetyzujący i podsumowujący. Autor zbiera w nim rezultaty całego programu badawczego i wyraźnie wskazuje, że badania zostały podzielone na dwie fazy. Pierwsza

obejmowała dwa projekty pilotażowe, których celem było wstępne rozpoznanie użyteczności MAS w sterowaniu procesami biotechnologicznymi oraz zdobycie doświadczenia potrzebnego do opracowania reguł projektowania architektury i ontologii. Druga faza obejmowała właściwe studia wykonalności systemów zbudowanych zgodnie z zaproponowanymi regułami. Autor kolejno omawia znaczenie rozdziałów 4–8, wskazując, że rozdział 4 pokazał możliwość praktycznej implementacji prostego MAS, rozdział 5 doprowadził do sformułowania reguł rozwojowych, rozdział 6 rozwinął ontologię, natomiast rozdziały 7 i 8 potwierdziły możliwość zastosowania proponowanego podejścia odpowiednio do sterowania procesem osadu czynnego i fermentacji mlekowej. Tym samym rozdział końcowy dobrze domyka strukturę rozprawy i wzmacnia wrażenie jej etapowego, konsekwentnego budowania.

Całościowo należy stwierdzić, że rozprawa ma strukturę zwartą, lecz przemyślaną. Przy relatywnie niewielkiej objętości autor podejmuje problematykę wielowątkową, obejmującą podstawy systemów wieloagentowych, narzędzia ich implementacji, specyfikę procesów biotechnologicznych, zagadnienia modelowania i sterowania, projektowanie architektury MAS, ontologii oraz eksperymentalną weryfikację w dwóch różnych obszarach zastosowań. Z punktu widzenia kompozycyjnego praca została zbudowana logicznie: rozdziały 1–3 wprowadzają podstawy teoretyczne, technologiczne i aplikacyjne, rozdziały 4–6 dokumentują dojrzewanie podejścia od wdrożenia pilotażowego do poziomu reguł projektowych i ontologii, natomiast rozdziały 7–8 zawierają zasadnicze studia wykonalności, domknięte syntetycznym rozdziałem 9. Taki układ sprzyja zrozumieniu zarówno celu pracy, jak i sposobu rozwijania programu badawczego, a sama rozprawa nie sprawia wrażenia zbioru luźno zestawionych eksperymentów, lecz konsekwentnie budowanej całości.

#### 4. Ocena formalna rozprawy

Strona formalna pracy jest zasadniczo poprawna. Rozprawa posiada logiczny układ rozdziałów, a kolejność prezentowanych treści odpowiada przyjętemu celowi badawczemu. Tytuł pracy odpowiada jej problematyce, choć z językowego punktu widzenia jego sformułowanie nie jest w pełni naturalne. Podobne uwagi dotyczą również niektórych nagłówków rozdziałów i fragmentów tekstu głównego. Już w spisie treści widać sformułowania takie jak „*MAS potential to adaptation in biotechnological processes*” czy „*Ontology in MAS for control of biotechnological processes*”, które wskazują na wyraźny nienaturalny charakter języka angielskiego użytego w rozprawie.

Najpoważniejsze zastrzeżenia formalne odnoszą się właśnie do warstwy językowej. Język angielski pracy jest komunikatywny i pozwala zrozumieć sens naukowy wywodu, jednak zawiera liczne nienaturalne konstrukcje składniowe, uchybienia w zakresie rodzajników, przyimków, kolokacji oraz zgody podmiotu z orzeczeniem. Wpływa to ujemnie na poziom redakcyjny rozprawy i wskazuje, że tekst mógłby cechować się większą starannością językową przed dalszym wykorzystaniem publikacyjnym. Zastrzeżenie to nie podważa jednak wartości merytorycznej rozprawy.

Poniżej przedstawiono kilka wybranych przykładów zdań, które są formalnie zrozumiałe, ale brzmią jak tłumaczenie wprost z języka polskiego. W tekście często pojawiają się konstrukcje takie jak:

- *Examining of feasibility...* zamiast naturalnego tytułu typu *An examination of the feasibility...* albo *Examining the feasibility...*
- *MAS potential to adaptation...* zamiast *MAS potential for adaptation...*
- *biotechnological process control meet with relatively small count of research interest* zamiast np. *has attracted relatively limited research attention*
- *the use of term* zamiast *the use of the term*
- *the first research works ... has begun* zamiast *the first studies ... began*
- *other researches* zamiast *other researchers / other studies*
- *a conventional distributed systems* zamiast *a conventional distributed system*
- *theirs genomes* zamiast *their genomes*
- *this do not indicate* zamiast *this does not indicate*
- *agents exchange messages complaint to...* zamiast *compliant with...*
- *dynamical traits* zamiast częściej używanego *dynamic characteristics*
- *when control is handled to the controller* zamiast *when control is handed over to the controller*
- *Presented architecture, presented in fig. 4.1.* — powtórzenia i niezgrabna budowa zdań
- *MAS was incorporating..., was able to the control..., main conclusions ... is the fact...* — błędy fleksyjne i składniowe.

Kilka wybranych przykładów potwierdzających powyższe zastrzeżenia językowe:

- Błędy w tytułach i nagłówkach  
Strona tytułowa: “*Examining of feasibility and usefulness...*” — w języku angielskim konstrukcja *examining of* brzmi nienaturalnie. Bardziej poprawne byłyby formy: *An examination of the feasibility and usefulness...*, *Examining the feasibility and usefulness...* lub *Assessment of the feasibility and usefulness...*  
Spis treści / s. 4: “*MAS potential to adaptation in biotechnological processes*” — konstrukcja *potential to adaptation* jest niepoprawna lub co najmniej bardzo nienaturalna; naturalniejsze byłoby: *MAS potential for adaptation in biotechnological processes* albo *The adaptive potential of MAS in biotechnological processes*.  
Spis treści / s. 38: “*Ontology in MAS for control of biotechnological processes*” — sformułowanie jest zrozumiałe, ale nienaturalne stylistycznie; lepiej: *Ontology in MAS for the control of biotechnological processes* albo *An ontology for MAS-based control of biotechnological processes*.
- Błędy w użyciu rodzajników  
S. 1: “*The use of term ‘agent’*” — brakuje rodzajnika *the*; poprawnie: *The use of the term “agent”*.  
S. 1: “*This dissertation is a summary of author’s research*” — poprawniej: *This dissertation is a summary of the author’s research*.  
S. 2: “*a conventional distributed systems*” — występuje niezgodność rodzaju i liczby; poprawnie: *a conventional distributed system* albo *conventional distributed systems*.
- Błędy zgodności podmiotu z orzeczeniem  
S. 1: “*the first research works in this area has begun*” — liczba mnoga nie zgadza się z czasownikiem; poprawnie: *the first research works in this area began* lub lepiej *the first studies in this area began*.  
S. 12: “*this do not indicate*” — poprawnie: *this does not indicate*.  
S. 62: “*Main conclusions from this chapter in the context of the dissertation is the fact that...*” — poprawnie: *The main conclusion from this chapter is that...* albo *The main conclusions from this chapter are that...*
- Niepoprawne formy gramatyczne i fleksyjne  
S. 1: “*Other researches tried to use more generic terminology*” — forma *researches* została użyta niepoprawnie; właściwie: *Other researchers tried...* albo *Other studies used...*  
S. 2: “*theirs genomes*” — poprawnie: *their genomes*.  
S. 74: “*systems for biotechnological system control undergone feasibility studies*” — poprawnie: *systems for biotechnological system control underwent feasibility studies* albo *were subjected to feasibility studies*.
- Nienaturalne kolokacje i kalki z języka polskiego  
S. 1: “*biotechnological process control meet with relatively small count of research interest*” — zdanie jest zrozumiałe, ale brzmi jak dosłowne tłumaczenie z języka polskiego; naturalniej: *has attracted relatively limited research interest* albo *has received relatively little research attention*.  
S. 20: “*provide seamless switch between control algorithms*” — bardziej naturalnie: *provide seamless switching between control algorithms* albo *ensure a seamless switch between control algorithms*.  
S. 62: “*costs spent for maintenance*” — naturalniej: *maintenance costs*.
- Błędy przyimków i konstrukcji składniowych  
S. 4: “*MAS potential to adaptation*” — po *potential* powinno wystąpić *for*, nie *to*; poprawnie: *MAS potential for adaptation*.  
S. 20: “*exchange messages complaint to...*” — poprawnie: *exchange messages compliant with...*  
S. 43: “*comply with specific needs of any application*” — zdanie jest poprawne, ale naturalniej byłoby: *meet the specific needs of a given application*.
- Nienaturalne sformułowania terminologiczne i stylistyczne  
S. 20: “*dynamical traits of aeration process*” — w technicznym j. angielskim naturalniejsze byłoby: *dynamic characteristics of the aeration process*.  
S. 19: “*Prepared architecture, presented in fig. 4.1.*” — zdanie jest niepoprawne; lepiej: *The proposed architecture is presented in Fig. 4.1.* albo *Figure 4.1 presents the proposed architecture*.  
S. 74: “*This proved that...*” — w stylu akademickim częściej stosuje się formy ostrożniejsze, np. *This suggests that...* albo *These results indicate that...*
- Niepoprawne zdania w rozdziałach końcowych pracy  
S. 73: “*The result of this research – sets of rules for MAS architecture design and ontology preparation - is a base for following research projects.*” — zdanie jest zrozumiałe, ale nienaturalne składniowo; lepiej: *The outcome of this research—a set of rules for MAS architecture design and ontology development—provides a foundation for subsequent research projects.*

S. 74: “*This proved that with enough knowledge and preparation, a MAS based solution might be a competitive alternative to conventionally built systems.*” — naturalniej: *This suggests that, with sufficient expertise and preparation, an MAS-based solution may constitute a competitive alternative to conventionally designed systems.*

Przytoczone przykłady pokazują, że najczęstsze problemy językowe dotyczą rodzajników, przymków, zgody podmiotu z orzeczeniem, niepoprawnych form fleksyjnych, kolokacji oraz ogólnej naturalności akademickiego języka angielskiego. Tekst pozostaje komunikatywny, jednak w wielu miejscach sprawia wrażenie tłumaczenia dosłownego, co obniża jego poziom redakcyjny.

Bibliografia jest obszerna i liczy 176 pozycji. Na podstawie analizy wykazu literatury można stwierdzić, że ma ona niemal w całości charakter anglojęzyczny: 175 pozycji zostało zapisanych w języku angielskim, a 1 pozycja ma charakter polskojęzyczny. Pod względem rodzaju źródeł dominują artykuły naukowe — około 101 pozycji, obok około 36 publikacji konferencyjnych, około 5 książek i monografii, około 20 źródeł internetowych i projektowych oraz około 14 pozycji o innym charakterze. Z punktu widzenia aktualności literatury należy stwierdzić, że jej dobór jest zasadniczo poprawny. Spośród 170 pozycji literatury z jednoznacznie określonym rokiem publikacji, 40 pochodzi z lat 2021–2025, 36 z lat 2016–2020, 27 z lat 2011–2015, 27 z lat 2006–2010, 20 z lat 2001–2005 oraz 20 z lat 1993–2000. Oznacza to, że około 45% pozycji pochodzi z ostatnich 10 lat, a około 61% z lat 2011–2025. Wskazuje to, że podstawa literaturowa pracy jest generalnie aktualna, zwłaszcza w partiach odnoszących się do zastosowań i współczesnych narzędzi, choć część odwołań dotyczących środowisk MAS ma charakter stron projektowych i repozytoriów, a nie wyłącznie recenzowanych publikacji naukowych. Bibliografia jest zatem obszerna, tematycznie adekwatna i w znacznej mierze aktualna, a praca posiada również aparat ilustracyjny oraz odwołania do wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych.

Analiza sposobu wykorzystania odsyłaczy bibliograficznych w tekście prowadzi do wniosku, że system cytowań został zastosowany zasadniczo poprawnie pod względem technicznym, jednak nie jest wolny od uchybień redakcyjnych i kilku zastrzeżeń natury merytorycznej. W pracy numery odsyłaczy w tekście odpowiadają pozycjom ujętym w wykazie literatury, a znaczna część cytowanych publikacji odnosi się do rozpoznawalnych źródeł. Dotyczy to między innymi klasycznych prac z zakresu systemów agentowych, takich jak publikacje Nwany, d’Inverno i Lucka oraz Wooldridge’a i Jenningsa, a także prac odnoszących się bardziej bezpośrednio do architektur agentowych, w tym podejścia BDI (*Belief–Desire–Intention*) i pokrewnych rozwiązań architektonicznych. Świadczy to o tym, że rozprawa została osadzona w przemyślany sposób w literaturze przedmiotu.

Jednocześnie sposób wykorzystania odwołań bibliograficznych wymagałby większej staranności redakcyjnej. Występują bowiem pojedyncze przypadki błędnego lub nieprecyzyjnego opisu pozycji bibliograficznych. Przykładowo, pozycja [12], odnosząca się do książki *An Introduction to MultiAgent Systems*, została zapisana niepoprawnie zarówno pod względem autorstwa, jak i pisowni nazwiska autora. Książka ta jest znaną monografią Michaela J. Wooldridge’a, natomiast w bibliografii przypisano jej dwóch autorów oraz zastosowano błędną formę nazwiska. Tego rodzaju uchybienie nie podważa istnienia samego źródła, ale obniża poziom formalnego opracowania bibliografii i wskazuje na brak końcowej weryfikacji zapisów bibliograficznych.

Pewne zastrzeżenia budzi również adekwatność doboru niektórych źródeł do treści zdań, które mają one wspierać. W części wprowadzającej pojawia się na przykład odwołanie do pozycji [1, 2] przy stwierdzeniu dotyczącym genezy użycia terminu „agent” i jego obecności już w latach siedemdziesiątych XX wieku. Choć wskazane publikacje zawierają omówienie rozwoju tej problematyki, nie stanowią one najlepszego oparcia dla twierdzenia historycznego, ponieważ są raczej późniejszymi opracowaniami przeglądowymi lub książkowymi niż źródłami pierwotnymi. W takim przypadku bardziej trafne metodologicznie byłoby odwołanie się do wcześniejszych prac źródłowych albo uznanych opracowań historycznych poświęconych początkom badań nad agentami programowymi.

Podobny charakter ma uwaga dotycząca pozycji [131]. Została ona użyta jako podstawa zdania odnoszącego się do pogorszenia warunków tlenowych i możliwej degradacji życia mikrobiologicznego, a więc do twierdzenia o charakterze ogólnobiologicznym i technologicznym. Tymczasem sama pozycja bibliograficzna odnosi się do pracy autora dotyczącej systemu wieloagentowego dla sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego. O ile publikacja ta może być istotna z punktu widzenia architektury sterowania, o tyle nie wydaje się optymalnym źródłem dla szerzej sformułowanej tezy o konsekwencjach biologicznych zaburzeń procesu. W takim miejscu

bardziej adekwatne byłoby odwołanie się do literatury podręcznikowej lub specjalistycznej z zakresu inżynierii ścieków, biotechnologii procesowej albo mikrobiologii środowiskowej.

Na uwagę zasługuje również struktura części bibliografii poświęconej narzędziom i platformom MAS. W pozycjach [110]–[123] ujęto liczne strony internetowe projektów, repozytoria GitHub i GitLab oraz dokumentacje środowisk programistycznych, takich jak JADE, WADE, BDI4JADE, Jadescript, ASTRA, JACK, SPADE, BSPL czy PIAF. Źródła te mogą być uznane za właściwe tam, gdzie autor opisuje istnienie, funkcjonalność lub dostępność konkretnych narzędzi. Nie mają one jednak tej samej rangi naukowej co artykuły recenzowane, monografie czy prace przeglądowe. Z tego względu ich obecność w bibliografii należy uznać za dopuszczalną pomocniczo, zwłaszcza w warstwie implementacyjnej, lecz mniej przekonującą wtedy, gdy mają one stanowić podstawę bardziej ogólnych ocen dotyczących znaczenia, popularności lub dojrzałości danych rozwiązań. W takich miejscach wskazane byłoby silniejsze oparcie wywodu na literaturze naukowej. Pozytywnie należy natomiast ocenić wykorzystanie pozycji [124], która ma charakter aktualnego opracowania przeglądowego i wydaje się dobrana trafnie do omawianej problematyki.

Odrębną grupę uchybień stanowią niedokładności redakcyjne w zapisach poszczególnych pozycji. Przykładem może być pozycja [2], która odpowiada istniejącej książce, jednak w bibliografii została opisana w sposób skrócony i nie w pełni zgodny z jednolitą konwencją stosowaną w innych wpisach. Podobnie w pozycji [130] widoczny jest błąd redakcyjny w zapisie tytułu książki *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, gdzie zabrakło odstępów między wyrazami. Są to uchybienia pozornie drobne, ale w rozprawie doktorskiej mają znaczenie, ponieważ wpływają na odbiór staranności warsztatowej autora.

Całościowo należy zatem stwierdzić, że aparat bibliograficzny rozprawy jest funkcjonalny i oparty na zweryfikowanych źródłach, a sam system odsyłaczy został zastosowany poprawnie. Nie stwierdzono w analizowanych fragmentach poważniejszych niezgodności technicznych, takich jak brak odpowiadającej pozycji w bibliografii czy oczywiste przypisanie numeru do zupełnie innego źródła niż cytowane w tekście. Zastrzeżenia dotyczą raczej jakości opracowania bibliografii, doboru części źródeł do konkretnych tez oraz nadmiernego udziału materiałów internetowych i projektowych w tych partiach pracy, w których należałoby preferować publikacje naukowe. Uwagi te nie przekreślają wartości poznawczej rozprawy, wskazują jednak, że pod względem formalnym wykaz literatury oraz sposób wykorzystania części cytowań mogłyby zostać opracowane z większą starannością i ujednolicone redakcyjnie.

Praca została opracowana z wykorzystaniem licznych rysunków ilustrujących schematy systemów, algorytmy, architekturę układów, stanowiska badawcze oraz wyniki pomiarów i symulacji. Aparat ilustracyjny jest rozbudowany i dobrze wspiera tok wywodu, ułatwiając śledzenie kolejnych etapów badań oraz interpretację uzyskanych rezultatów. Numeracja rysunków w rozprawie jest poprawna i konsekwentna, a spis rysunków pozostaje zgodny zarówno z oznaczeniami w tekście, jak i ze stronami ich wystąpienia. Podpisy rysunków zostały zredagowane zasadniczo prawidłowo i pozwalają na jednoznaczny identyfikację zawartości ilustracji, choć w kilku przypadkach widoczne są drobne niedoskonałości stylistyczne i językowe, wskazujące na możliwość większego dopracowania redakcyjnego.

Reasumując, rozprawa jest pod względem formalnym przygotowana poprawnie, choć mogłaby cechować się większą starannością redakcyjną, zwłaszcza w warstwie językowej; uwaga ta nie wpływa jednak na pozytywną ocenę jej zawartości merytorycznej.

## 5. Ocena merytoryczna rozprawy

Ocena merytoryczna rozprawy jest pozytywna. Autor podjął problem aktualny, trudny i nadal relatywnie słabo rozpoznany, a zarazem istotny zarówno poznawczo, jak i aplikacyjnie. Trafnie dostrzegł lukę pomiędzy dobrze rozwiniętą teorią i praktyką systemów wieloagentowych w wielu obszarach przemysłu a ich nadal ograniczonym wykorzystaniem w sterowaniu procesami biotechnologicznymi. Wybór takiego obszaru badań należy uznać za uzasadniony, ponieważ procesy biotechnologiczne cechują się złożoną dynamiką, niepewnością, niepełną dostępnością pomiarów online oraz wysokimi wymaganiami w zakresie niezawodności i ciągłości działania, a więc posiadają cechy, które potencjalnie sprzyjają zastosowaniu architektur agentowych.

Na pozytywną ocenę zasługuje to, że autor nie poprzestał na ogólnym, deklaracyjnym wskazaniu zalet systemów MAS, lecz podporządkował całą rozprawę sprawdzeniu jasno sformułowanej tezy, zgodnie z którą system agentowy budowany na podstawie reguł rozwoju dla procesów biotechnologicznych może prowadzić do

utworzenia rekonfigurowalnej struktury sterowania, zdolnej do dostosowywania się do warunków procesu przy zachowaniu zadowalającej jakości regulacji. Tak rozumiana teza ma charakter zarówno inżynierski, jak i metodologiczny: nie sprowadza się do pytania, czy MAS „działa”, lecz obejmuje również problem tego, jak takie systemy projektować, aby zwiększać ich wykonalność i praktyczną użyteczność. Jest to podejście dojrzałe, ponieważ łączy warstwę implementacyjną z próbą uogólnienia warsztatu projektowego.

Mocną stroną pracy jest jej spójność badawcza. Autor przeprowadza cztery studia badawcze zorganizowane w dwie wyraźne fazy: najpierw realizuje dwa projekty pilotażowe służące rozpoznaniu problemu, zdobyciu doświadczenia oraz sformułowaniu reguł rozwoju i ontologii, a następnie przechodzi do dwóch właściwych studiów wykonalności dla systemów zbudowanych już zgodnie z wcześniej opracowanymi zasadami. Taki układ świadczy o świadomym i konsekwentnym rozwijaniu programu badawczego. Rozprawa nie sprawia wrażenia zbioru odrębnych eksperymentów, lecz dokumentuje proces dochodzenia od pojedynczej implementacji do bardziej ogólnych narzędzi projektowych i ich ponownego zastosowania.

Pozytywnie oceniam również sam sposób rozumienia wykonalności i użyteczności systemów MAS. Autor nie utożsamia wykonalności z pełnym wdrożeniem przemysłowym, lecz traktuje ją jako rezultat analizy wykonalności, opartej na pytaniach o zdolność systemów wieloagentowych do sterowania procesami biotechnologicznymi oraz o to, czy korzyści wynikające z ich zastosowania uzasadniają ich wybór względem rozwiązań alternatywnych. Taka perspektywa jest metodologicznie właściwa dla rozprawy doktorskiej o charakterze projektowo-badawczym. Jednocześnie autor zachowuje potrzebny umiar interpretacyjny: sam wskazuje, że zastosowanie MAS nie musi być korzystne w prostych pętlach sterowania, natomiast ich przewaga ujawnia się przede wszystkim wtedy, gdy problem obejmuje rekonfigurację, diagnostykę, niepewność, niepełność pomiarów lub potrzebę adaptacji do zmiennych warunków procesu. To wyważenie wniosków należy uznać za przejaw dojrzałości naukowej.

Istotnym walorem merytorycznym pracy jest połączenie aspektu koncepcyjnego z rzeczywistą weryfikacją. Autor nie ogranicza się do poziomu modelu czy symulacji w jednym, sztucznie uproszczonym zadaniu, lecz prowadzi badania na dwóch różnych klasach procesów biotechnologicznych: sterowaniu stężeniem tlenu rozpuszczonego w procesie oczyszczania ścieków oraz sterowaniu fermentacją mlekową. Co więcej, w przypadku procesu napowietrzania wykorzystano nie tylko środowisko symulacyjne, ale również rzeczywisty laboratoryjny obiekt badawczy. Dzięki temu wnioski pracy nie opierają się wyłącznie na rozumowaniu teoretycznym, ale na wynikach uzyskanych w warunkach bliższych praktyce inżynierskiej.

Za szczególnie wartościowy uznaję fakt, że autor w badaniach pilotażowych zdiagnozował realne trudności związane z projektowaniem architektury agentowej, podziałem ról agentów, organizacją komunikacji i reprezentacją wiedzy, a następnie uczynił z tych problemów przedmiot dalszych badań. W konsekwencji rozprawa prowadzi do opracowania nie tylko konkretnych implementacji, ale także zestawu reguł rozwoju systemów MAS dla sterowania procesami ciągłymi oraz ontologii przeznaczonej dla zastosowań biotechnologicznych. W tym sensie dysertacja wyraźnie wykracza poza poziom pojedynczego rozwiązania i wnosi element uogólnienia metodycznego, który może mieć znaczenie również dla dalszych prac w tym obszarze.

Na podkreślenie zasługuje również warstwa implementacyjna i aplikacyjna badań. W rozdziale 4 autor pokazuje, że nawet przy wykorzystaniu standardowych, nieprzeznaczonych do zastosowań narzędzi agentowych czasu rzeczywistego możliwe jest zbudowanie działającego układu sterowania dla procesu o odpowiednio długim czasie próbkowania, z zachowaniem mechanizmu przełączania pomiędzy algorytmami sterowania. W rozdziale 7 podejście to zostaje rozwinięte do bardziej zaawansowanego systemu sterowania dla procesu osadu czynnego, obejmującego wielowejściową konfigurację, możliwość dodawania i usuwania agentów w czasie pracy, procedury detekcji uszkodzeń oraz system oceny niezawodności. Z kolei rozdział 8 stanowi cenną próbę przeniesienia opracowanych zasad na inny obiekt technologiczny, co wzmacnia wiarygodność wniosków dotyczących możliwości ponownego wykorzystania reguł projektowych i ontologii.

Do podstawowych osiągnięć dysertacji zaliczam w szczególności:

1. Wykazanie, że systemy wieloagentowe, mimo korzystania z popularnych środowisk nieprzeznaczonych do zastosowań czasu rzeczywistego, mogą być skutecznie wykorzystane do sterowania wybranymi procesami biotechnologicznymi przy odpowiednio zaprojektowanej architekturze hybrydowej i właściwym rozdzieleniu warstwy sterowania od warstwy agentowej.
2. Opracowanie i wstępną weryfikację zestawu reguł rozwoju systemów MAS dla sterowania procesami ciągłymi, obejmujących projektowanie architektury i komunikacji agentów. Wynik ten ma znaczenie

większe niż pojedyncza implementacja, ponieważ stanowi próbę uporządkowania warsztatu projektowego w obszarze, który autor trafnie rozpoznaje jako niedostatecznie zestandaryzowany.

3. Zaproponowanie ontologii dla systemów MAS stosowanych w sterowaniu procesami biotechnologicznymi, opartej na uniwersalnym rdzeniu pojęć związanych z danymi i wartościami, która może być modyfikowana i ponownie wykorzystywana w kolejnych aplikacjach.
4. Praktyczne potwierdzenie rekonfigurowalności architektury agentowej, przejawiającej się między innymi możliwością dodawania i usuwania agentów w czasie pracy systemu, przełączania pomiędzy algorytmami sterowania oraz realizacji funkcji samodiagnostycznych.
5. Wykazanie, że w badanym układzie sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego system MAS może skutecznie realizować zadanie regulacji, a według wniosków autora także przewyższać złożony algorytm konwencjonalny, przy jednoczesnym zachowaniu właściwości rekonfiguracyjnych i diagnostycznych.
6. Zweryfikowanie możliwości przeniesienia opracowanych reguł projektowych i ontologii na odmienny proces biotechnologiczny, tj. fermentację mlekową, co wzmacnia tezę o użyteczności proponowanego podejścia i potwierdza jego potencjał uogólniający. Szczególnie istotne jest tu ponowne wykorzystanie wcześniej przygotowanej implementacji ontologii przy jedynie niewielkich modyfikacjach.

W mojej ocenie powyższe osiągnięcia składają się na oryginalny i wartościowy wkład autora w badania nad zastosowaniem systemów wieloagentowych w automatyce procesowej, w szczególności w sterowaniu procesami biotechnologicznymi. Największą wartość rozprawy widzę nie tylko w samym zbudowaniu działających układów sterowania, lecz w połączeniu wyników implementacyjnych z próbą uporządkowania zasad projektowania architektury MAS i ontologii, a następnie ich ponownego wykorzystania w kolejnych badaniach. Dzięki temu rozprawa wnosi zarówno rezultat aplikacyjny, jak i metodyczny.

Konkludując, ocena merytoryczna rozprawy jest pozytywna. Autor przedstawił spójny program badawczy, poprawnie osadzony w literaturze i konsekwentnie podporządkowany postawionej tezie. Wykazał się umiejętnością łączenia zagadnień z zakresu systemów wieloagentowych, sterowania procesami ciągłymi oraz specyfiki procesów biotechnologicznych, a uzyskane wyniki mają zarówno wymiar poznawczy, jak i praktyczny. Rozprawę oceniam jako merytorycznie wartościową i wnoszącą istotny wkład do rozwoju badań nad agentowymi systemami sterowania w rozważanym obszarze.

## **6. Uwagi krytyczne, zagadnienia do dyskusji**

Pomimo pozytywnej oceny merytorycznej rozprawy, należy wskazać kilka uwag krytycznych i kwestii dyskusyjnych, które nie podważają wartości naukowej pracy, ale wyznaczają granice jej wniosków oraz wskazują obszary wymagające doprecyzowania.

W pierwszej kolejności należy odnotować zastrzeżenia dotyczące warstwy językowej rozprawy. Tekst został przygotowany w języku angielskim w sposób komunikatywny, pozwalający na zrozumienie toku rozumowania autora, jednak w wielu miejscach zawiera sformułowania nienaturalne, stylistycznie niezręczne, a niekiedy również nie w pełni poprawne gramatycznie. Uwagi te odnoszą się zarówno do tekstu głównego, jak i do części nagłówków, podpisów rysunków oraz niektórych fragmentów wniosków końcowych. W efekcie poziom redakcyjny pracy okazuje się słabszy niż jej zawartość merytoryczna. Uchybienie to nie wpływa na ocenę naukowej wartości rozprawy, ale pozostaje wyraźnie dostrzegalnym mankamentem formalnym.

Druga uwaga dotyczy zakresu uogólnienia uzyskanych wyników. Autor w przekonujący sposób pokazuje, że systemy wieloagentowe mogą być zastosowane do sterowania badanymi procesami biotechnologicznymi, a opracowane reguły rozwoju oraz ontologia zwiększają wykonalność tego podejścia. Trzeba jednak zauważyć, że materiał empiryczny rozprawy odnosi się do dwóch klas procesów: sterowania stężeniem tlenu rozpuszczonego w procesie oczyszczania ścieków oraz sterowania fermentacją mlekową. Są to obiekty dobrze dobrane z punktu widzenia celu pracy, jednak nadal reprezentują ograniczony wycinek szerszej rozumianej biotechnologii procesowej. Z tego względu część wniosków końcowych mogłaby zostać sformułowana z większą ostrożnością, z wyraźniejszym zaznaczeniem, że bezpośrednia ekstrapolacja wyników na inne klasy procesów, zwłaszcza bardziej złożone dynamicznie, silniej sprzężone wielowymiarowo lub wymagające szybszych reakcji sterowania, wymagałaby dalszej weryfikacji.

Kolejna kwestia wiąże się z relacją pomiędzy wykazaną użytecznością podejścia a kosztami jego praktycznej realizacji. Jednym z istotnych wniosków autora jest to, że przewaga systemów wieloagentowych ujawnia się przede wszystkim tam, gdzie rośnie znaczenie rekonfigurowalności, diagnostyki, zdolności adaptacyjnych oraz współpracy wielu algorytmów sterowania. Jednocześnie sama rozprawa pokazuje, że projektowanie takich systemów wiąże się z poważnymi trudnościami dotyczącymi przypisywania ról agentom, definiowania ich wzajemnych relacji, organizacji komunikacji oraz reprezentacji wiedzy. Autor trafnie rozpoznaje więc, że w obecnym stanie rozwoju tego obszaru brak powszechnie przyjętych dobrych praktyk projektowych stanowi istotną barierę dla szerszego wdrażania podejścia agentowego. Jednocześnie warto byłoby jednak jeszcze mocniej wyeksponować pytanie o bilans między zyskiem funkcjonalnym a złożonością projektowania, implementacji i utrzymania takiego systemu w porównaniu z klasycznymi architekturami sterowania rozproszonego.

Pewną uwagę należy także sformułować pod adresem sposobu wyeksponowania autorskiego wkładu doktoranta. Do wartościowych rezultatów rozprawy należą niewątpliwie opracowanie reguł rozwoju systemów MAS oraz propozycja ontologii dla sterowania procesami biotechnologicznymi. W pracy przydałoby się jednak jeszcze wyraźniejsze oddzielenie tych elementów, które stanowią oryginalny wkład autora sensu stricto, od tych, które mają charakter adaptacji, integracji lub rozwinięcia znanych już koncepcji architektury agentowej, komunikacji międzyagentowej oraz środowisk implementacyjnych. Uwaga ta nie zmienia pozytywnej oceny rezultatów, ale dotyczy bardziej jednoznacznego wyeksponowania granic oryginalności wkładu badawczego.

Na osobne podkreślenie zasługuje również sposób rozumienia pojęcia wykonalności, przyjęty przez autora. Został on zdefiniowany szerzej i bardziej ogólnie niż w klasycznych analizach wdrożeniowych, ponieważ autor nie dąży do pełnej oceny ekonomicznej czy przemysłowej, lecz koncentruje się na odpowiedzi na dwa zasadnicze pytania: czy systemy wieloagentowe są zdolne do sterowania procesami biotechnologicznymi oraz czy korzyści wynikające z ich zastosowania uzasadniają ich wybór względem rozwiązań alternatywnych. Takie ujęcie jest dopuszczalne i metodologicznie uzasadnione w rozprawie doktorskiej o charakterze projektowo-badawczym, wymaga jednak dopowiedzenia, że pozytywna ocena wykonalności odnosi się przede wszystkim do poziomu laboratoryjnego, symulacyjnego i architektonicznego, a nie stanowi jeszcze pełnego dowodu gotowości do szerokich wdrożeń przemysłowych.

Wreszcie, pewnej ostrożności interpretacyjnej wymagają te fragmenty rozprawy, w których autor sugeruje konkurencyjność systemów agentowych wobec rozwiązań konwencjonalnych. W końcowych wnioskach wskazuje on, że przygotowany system MAS był w stanie skutecznie sterować procesem napowietrzania, wykazywać zachowania rekonfiguracyjne i samodiagnostyczne, a nawet przewyższać złożony algorytm konwencjonalny w badanej konfiguracji. Są to obserwacje interesujące i niewątpliwie ważne, jednak zostały uzyskane w określonych warunkach eksperymentalnych, na ograniczonej liczbie przypadków i przy odniesieniu do konkretnych algorytmów porównawczych. W recenzowanej pracy bardziej ostrożne sformułowanie tych konkluzji byłoby wskazane, tak aby wyraźnie zaznaczyć, że chodzi o przewagę wykazaną w określonych warunkach badawczych, a nie o rozstrzygnięcie o charakterze całkowicie ogólnym.

Powyższe uwagi nie zmieniają ogólnie pozytywnej oceny rozprawy, lecz wskazują te elementy, które warto poddać dalszej refleksji w toku obrony. W szczególności zasadne byłoby odniesienie się przez doktoranta do następujących kwestii:

Po pierwsze, w jakim zakresie wyniki uzyskane dla analizowanych procesów można uogólnić na inne klasy procesów biotechnologicznych, zwłaszcza bardziej złożone dynamicznie, wielowymiarowe i wymagające szybszych reakcji sterowania?

Po drugie, jakie są praktyczne ograniczenia skalowania proponowanej architektury MAS wraz ze wzrostem liczby agentów, źródeł danych, algorytmów sterowania i mechanizmów diagnostycznych?

Po trzecie, jak autor ocenia relację pomiędzy zyskiem funkcjonalnym wynikającym z rekonfigurowalności i właściwości diagnostycznych MAS a kosztem projektowania, implementacji i utrzymania takiego systemu w porównaniu z klasycznymi architekturami sterowania rozproszonego?

Po czwarte, które elementy przedstawionego rozwiązania autor uważa za swój najbardziej oryginalny wkład, a które postrzega raczej jako twórczą adaptację istniejących już koncepcji architektury agentowej i metod sterowania?

Po piąte, na ile pozytywna ocena wykonalności systemów MAS odnosi się do poziomu laboratoryjno-badawczego, a na ile może być traktowana jako przesłanka do przyszłych wdrożeń przemysłowych?

## 7. Konkluzja

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi wartościowe opracowanie naukowe, podejmujące istotny i aktualny problem badawczy. Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań, poprawnego sformułowania celu i tezy rozprawy, zaplanowania spójnego programu badawczego oraz połączenia zagadnień teoretycznych z walidacją eksperymentalną i symulacyjną. Za szczególnie wartościowe należy uznać opracowanie reguł rozwoju oraz ontologii dla systemów wieloagentowych stosowanych w sterowaniu procesami biotechnologicznymi, a następnie ich wykorzystanie w kolejnych etapach badań.

Pomimo wskazanych uwag krytycznych, dotyczących głównie jakości językowej pracy oraz potrzeby ostrożniejszego formułowania części wniosków o charakterze uogólniającym, całościowa ocena rozprawy pozostaje pozytywna. W mojej ocenie praca zawiera wyraźny wkład autorski, zarówno w wymiarze metodologicznym, jak i aplikacyjnym, i spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Na tle typowych prac doktorskich recenzowana rozprawa wyróżnia się wysokim stopniem spójności programu badawczego, konsekwencją w rozwijaniu kolejnych etapów badań oraz umiejętnym połączeniem aspektu koncepcyjnego z praktyczną weryfikacją. Autor nie ograniczył się do przeprowadzenia pojedynczych eksperymentów, lecz zbudował logicznie rozwijany program badań obejmujący fazę projektów pilotażowych, opracowanie reguł rozwoju architektury systemów wieloagentowych i ontologii, a następnie ich weryfikację w studiach wykonalności dotyczących rzeczywistych i symulacyjnych procesów biotechnologicznych. Na szczególne podkreślenie zasługuje to, że rezultatem pracy są nie tylko działające implementacje sterowania, ale również bardziej ogólne narzędzia projektowe w postaci reguł rozwojowych i ontologii o wykazanej możliwości ponownego wykorzystania. Dodatkowo autor przedstawił wyniki wskazujące na rekonfigurowalność systemu, możliwość przełączania algorytmów sterowania, zachowania samodiagnostyczne oraz skuteczne zastosowanie opracowanego podejścia także w układzie wielowjęściowym oraz dla dwóch odmiennych klas procesów biotechnologicznych analizowanych w rozprawie.

Biorąc pod uwagę przedstawione argumenty, oceniam recenzowaną rozprawę pozytywnie.

## 8. Wniosek końcowy

Stwierdzam, iż recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Pośpiecha pt. *„Examining of feasibility and usefulness of agent-based control systems for controlling biotechnological processes”* stanowi samodzielne rozwiązanie problemu badawczego i spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora, określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571), w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Jednocześnie, ze względu na poziom merytoryczny pracy, spójność programu badawczego, wyraźny wkład autorski oraz walor aplikacyjny uzyskanych wyników, uważam, że istnieją podstawy do rozważenia jej wyróżnienia.

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej autora, Pana mgra inż. Jakuba Pośpiecha, do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.