

prof. dr hab. inż. Zdzisław Kowalczyk
profesor zwyczajny PG
Katedra Systemów Decyzyjnych i Robotyki
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

10 października 2018

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY WYDZIAŁU
ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI
POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ**

Tytuł rozprawy: **„Decentralized Tracking of Dissolved Oxygen Concentration in Interacting Multi Zone Bioreactor by Supervised PI Controller”**
Autor rozprawy: **mgr inż. Tomasz Zubowicz**

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrywane w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Przedmiotem przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej jest zagadnienie projektowania złożonych przemysłowych systemów sterowania (związanych z problematyką środowiskową obejmującą systemy z infrastrukturą krytyczną, ang. *CIS*) – na przykładzie regulacji poziomu stężenia rozpuszczonego tlenu (ang. *DO*) w sprzężonych komorach tlenowych reaktora biologicznego wykorzystywanego w oczyszczalni ścieków, opartej na kapsztadzkiej technologii osadu czynnego *MUCT* (ang. *University of Cape Town*).

Złożoność takiego bioreaktora polega na nieliniowej dynamice, wieloosiowej skali czasu oraz wiąże się ze zmienną sytuacją pogodową i sezonową, zmiennymi warunkami pracy oraz zakłóceniami – przypisywanymi zmiennej charakterystyce (ilości i składowi chemicznemu) napływających ścieków. Stan procesu zachodzącego w komorach tlenowych najlepiej charakteryzuje aktualne stężenie tlenu.

Podobnie jak w wielu innych gałęziach przemysłu, również w automatyzacji zakładów oczyszczania ścieków najczęściej stosuje się regulatory PI/PID w różnych konfiguracjach (nie tylko kaskadowych). Chociaż układy PI(D) z natury swojej (jako małoparametryczne) cechują się względnie wysoką odpornością na wiedzę o modelu procesu, w ogólności jednak zwykle wymagają stosownego dostrajania do aktualnego operacyjnego punktu pracy. Przy czym wiadomo, że nawet proste odchylenie od ustalonego technologicznie punktu pracy (co stanowi jeden z wielu szkodliwych czynników) może spowodować pogorszenie jakości działania układu sterowania (produkcji, oczyszczania ścieków, *etc.*), które łatwo może doprowadzić do sytuacji krytycznej (niestabilności, czy też awarii lub wybuchu).

Wobec powyższego właściwa techniczna obsługa procesu wymaga od jego operatorów zaawansowanej wiedzy i dużych umiejętności oraz operatywności i czujności. Proste okresowe dostrajanie parametrów regulatorów okazuje się przy tym

nie wystarczające w praktyce. Związane z tym zadanie przestrajania jest zatem bardzo trudne do automatyzacji, choć istnieją prace teoretyczne stosujące różne mechanizmy adaptacji albo wyrafinowane zasady sterowania predykcyjnego MPC (ang. *Model Predictive Control*), opartego na (zwykle, dyskretno-czasowych stanowych) modelach matematycznych sterowanego procesu.

Zamierzeniem autora była budowa pomostu, a raczej opracowania naukowego godzącego nowoczesne techniki sterowania z doświadczeniem technologicznym oraz uwarunkowaniami przemysłowymi. Docelowym obiektem przemysłowym dla opracowywanych metod i algorytmów jest oczyszczalnia ścieków w Kartuzach.

Doktorant w przedstawionej dysertacji proponuje specjalistyczne rozwiązanie (zdecentralizowane proste oraz z nadzorcą) dla problemu sterowania reaktorami biologicznymi wybranej oczyszczalni ścieków, oparte na koncepcji wieloobszarowych rozmytych algorytmów PI z typowym, statycznym zabezpieczeniem przeciwnasyceniowym, z wykorzystaniem znanej możliwości miękkiego przełączania pomiędzy zastosowanymi blokami podstawowymi, reprezentującymi regulatory PI. Celem automatycznego przełączania rozmytego jest uzyskanie skutku w miarę niezmiennej jakości działania układu sterowania w różnych punktach pracy.

Konsekwencją realizacji procesu napowietrzania w systemie zbiorników bioreaktora jest naturalna technologiczna decentralizacja i rozłożona struktura układu sterowania. Wprowadzenie nadzorcy ma na celu stworzenie platformy wymiany informacji między zdecentralizowanymi lokalnymi regulatorami.

Od dziesiątków lat różne warianty problematyki tego rodzaju są tematem rozważań naukowców, jednak pojawiające się nowe obiekty przemysłowe wymagające automatyki i wyzwania z nimi związane, oraz postęp technologiczny w dziedzinie technik komputerowych, nieustannie dostarczają nowych bodźców badawczych.

Istotność zagadnienia, wynikająca głównie z olbrzymiego gospodarczego i ekologicznego znaczenia przemysłowych systemów sterowania, jest bezsprzeczna i stanowi solidne uzasadnienie celowości specyficznego tematu podjętego w rozprawie, tj.: zdecentralizowanego systemu kontroli stężenia rozpuszczonego tlenu w bioreaktorze oczyszczalni ścieków z wykorzystaniem wielozakresowego regulatora PI (z nadzorcą).

Za podstawowy cel rozprawy Doktorant Tomasz Zubowicz przyjął opracowanie metodologii dla zdecentralizowanych (z nadzorcą i bez) strategii sterowania w zastosowaniu do kontroli koncentracji rozpuszczonego tlenu w systemie komór tlenowych reaktora biologicznego oczyszczalni ścieków. Cel ten został wyrażony formalnie przez sformułowanie w odpowiednich miejscach wymagań jakościowych, stabilnościowych i wrażliwościowych.

W tym świetle formalnie postawiona na stronie 11 teza pracy, odnosząca się do możliwości:

zaprojektowania kwadratowo-stabilnego zdecentralizowanego wieloobszarowego regulatora PI dla śledzenia trajektorii odniesienia stężenia rozpuszczonego tlenu w zestawie komór tlenowych reaktora biologicznego w oczyszczalni ścieków w obecności niepewności

wyrażona jest całkowicie jasno. W świetle badań naukowych oraz znanych wyników teoretycznych i praktycznych teza ta postawiona jest niekontrowersyjnie i wystarczająco innowacyjnie (choć niezbyt intrygująco).

Zaproponowano również trzy tezy pomocnicze dotyczące możliwości: (1) wprowadzenia nadzorczej warstwy sterowania, aby sprostać ograniczeniom pojemnościowym układu utleniania, (2) użycia teorii Lapunowa w celu oceny kwadratowej stabilności zcentralizowanego systemu sterowania (z niepewnością)

sformułowanej w kategoriach modelowania rozmytego (Takagi-Sugeno), oraz (3) podobnego użycia teorii Lapunowa w kontekście kwadratowej stabilności systemu zdecentralizowanego przy ograniczeniach w członie wykonawczym. Powyższe subtezy wnoszą pierwiastki innowacyjne oraz pokazują wartościową głębię warsztatu naukowego doktoranta.

W swojej istocie zaprezentowana rozprawa ma charakter silnie teoretyczny – w części metodologicznej i projektowej, oraz praktyczno-eksperymentalny – w zakresie implementacji i weryfikacji algorytmów oraz docelowej problematyki przemysłowej.

Biorąc pod uwagę przemysłową i ekologiczną wagę rozważanej metodologii projektowania systemu sterowania komorami tlenowymi reaktora biologicznego w oczyszczalni ścieków tematykę rozprawy należy zaliczyć do aktualnych.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono analizę źródeł we właściwy sposób (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle), świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Autor dysertacji załączył obszerne wprowadzenie oraz przeprowadził poprawną analizę światowych źródeł literaturowych w zakresie przedmiotowej teorii, efektywnie wykorzystując również doświadczenie zespołu naukowego skupionego wokół profesora Mieczysława Brdysia. Zgromadzony materiał przeglądowy dobrze świadczy o dziedzinowej wiedzy, którą opanował doktorant.

Zaprezentowane wprowadzenie (21 stron) obejmuje przemysłową dziedzinę, będącą przedmiotem rozprawy (z zagadnieniami biologicznego oczyszczania ścieków oraz kwestii prawnych z tym związanych, procesem utleniania, oraz zadaniami sterowania takim procesem), określenie rozwiązywanego problemu, znaczenie i zamierzenia prezentowanego projektu, tezy i cele badawcze, opis metodologii i ram teoretycznych, zakresu, założeń i ograniczeń oraz technicznych definicji, jak również szkic strukturalny rozprawy.

Koncepcje własnych, współautorskich rozwiązań udokumentowane są ośmioma publikacjami i innymi wynikami pracy zespołu WEiA PG. Wnioski wyciągane z zaczerpniętych źródeł literaturowych nie budzą zastrzeżeń. Również sposób wykorzystania cytowanych pozycji bibliograficznych w rozprawie doktorskiej jest w ogólności (zwłaszcza w części przeglądowej) poprawny i wydaje się, że wyniki własne doktoranta są właściwie uwypuklone w przekroju całej pracy, a zwłaszcza w rozdziałach 3 do 8.

Praca ogólnie liczy 307 stron, przy czym listy różnego rodzaju elementów struktury tekstu, oznaczeń i symboli to 42 strony (pisane małą czcionką), spis bibliograficzny (w stylu harwardzkim) obejmuje 115 pozycji (brak referatu z IFAC LSS w Szanghaju 2013), merytoryczne rozdziały dysertacji zajmują 196 stron, zaś teoretyczne i techniczne dodatki obejmują 40 stron.

3. Czy autor rozwiązał postawione zadania, czy użył właściwej do tego metody, oraz czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Postawione zadanie *opracowania projektu kwadratowo-stabilnego zdecentralizowanego wielozakresowego regulatora PI dla śledzenia trajektorii odniesienia stężenia rozpuszczonego tlenu w układzie komór tlenowych bioreaktora oczyszczalni ścieków w*

warunkach niepewności doktorant rozwiązał skutecznie, stosując zasady współczesnej inżynierii i teorii sterowania.

Na podstawie lektury rozprawy można uznać, iż jej autor wykazał się znajomością analizowanego problemu przemysłowego oraz opanowaniem materiału teoretycznego, dobrze rozwiniętym warsztatem naukowym (w zakresie matematycznej teorii i przemysłowej praktyki sterowania), umiejętnością przyjmowania stosownych założeń, definiowania pojęć, prowadzenia analizy matematycznej formułowania twierdzeń i wniosków matematycznych, i rozwiązywania w ten sposób postawionych zadań systemowych, jak również opanowaniem wirtualnych środowisk dla inżynierskich obliczeń, biegłością w komputerowej implementacji procesów i algorytmów sterowania oraz umiejętnością weryfikacji osiągniętych efektów systemowych w warunkach symulacyjno-laboratoryjnych.

Adekwatnie do poprawnie przyjętych ustaleń, jako cele szczegółowe, służące za kamienie milowe projektu doktorskiego, przyjęto opracowanie: (1) użytkowych modeli procesu, (2) zdecentralizowanych struktur sterowania z nadzorem i bez, (3) kwadratowych kryteriów stabilności dla układów zdecentralizowanego sterowania w warunkach niepewności, (4) metody strojenia gwarantującej kwadratową stabilność w obliczu niepewności, jak również (5) numerycznej weryfikacji jakości projektowanego zamkniętego układu sterowania na wirtualnych stanowiskach laboratoryjnych, które pozwalają na imitowanie sterowania symulowanymi komorami tlenowymi odzwierciedlającymi procesy oczyszczania ścieków w Kartuzach.

Wyniki pracy zweryfikowano na gruncie teoretycznym i matematycznym (w rozdziałach od 3 do 7) oraz w aspekcie symulacyjnym i eksperymentalnym (rozdział 8). Metodologia projektowania rozłożonego systemu sterowania bioreaktorami w określonej (technologicznie) oczyszczalni ścieków mogą służyć do rozwiązywania praktycznych problemów syntezy innych układów sterowania rzeczywistymi złożonymi, trudnymi obiektami przemysłowymi (z nieliniową charakterystyką) dopuszczającej możliwość występowania zakłóceń oraz niepewności.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Wobec widocznych dowodów kwalifikacji naukowych i inżynierijno-społecznych doktoranta do pracy w zespole rozwiązującym problemy naukowe i przemysłowe, jak również opanowania przez doktoranta podstaw teoretycznych omawianej problematyki analizy i syntezy zaawansowanych układów sterowania obiektami nieliniowymi oraz jego umiejętności w zakresie komputerowej implementacji i badań eksperymentalnych, mogą stwierdzić, że zgodnie z postawioną tezą i zamierzonymi celami badawczymi rozprawy doktorskiej, jej autor osiągnął sporo oryginalnych wyników, które można opisać jako:

- 4.1. opracowanie struktury modelu poznawczego i identyfikacji (parametrów oraz zbiorów niepewnościowych) użytkowych modeli procesu (aktywnego osadu),
- 4.2. synteza procedur zdecentralizowanego sterowania z nadzorem i bez, z wykorzystaniem rozmytego wnioskowania,
- 4.3. opracowanie kwadratowych kryteriów stabilności wyizolowanych podsystemów i całości zdecentralizowanego układu sterowania, z uwzględnieniem warunków deterministycznych oraz niepewnościowych,

- 4.4. propozycja czterech podejść do problemu projektowania i strojenia systemu sterowania gwarantujących kwadratową stabilność w obliczu niepewności, z wykorzystaniem rozmytego podejścia do modelowania i sterowania,
- 4.5. matematyczne modele odzwierciedlające proces oczyszczania ścieków w kartuskich zakładach,
- 4.6. opracowanie symulacyjnych modeli komór tlenowych (symulator VBA),
- 4.7. implementacja struktur sterowania (system VLB),
- 4.8. numeryczna weryfikacja jakości projektowanego układu sterowania na opracowanych wirtualnych stanowiskach laboratoryjnych, z eksperymentami ilustrującymi funkcjonalność i skuteczność eliminacji wpływu zakłóceń oraz odporności zdecentralizowanego systemu na cząstkowe uszkodzenie.

W powyższym należy też docenić umiejętność przeprowadzenia rygorystycznych rozważań matematycznych, uwzględniania stosownych podejść teoretycznych i narzędzi inżynierskich do budowy systemów sterowania nieliniowymi procesami przemysłowymi z uwzględnieniem modelowej niepewności.

Uwzględniając wymienione wyżej oryginalne przyczynki naukowo-badawcze oraz fakt ich ogłoszenia w specjalistycznych dla automatyki konferencjach (IFAC LSS 2010, 2013, oraz MMAR 2017) oraz w profilowanych czasopismach:

- *Pomiary Automatyka Robotyka* (PIAP, 2010),
- *Journal of Automation Mobile Robots and Intelligent Systems* (2010),
- *Applied Mathematics and Computer Science*, (2013, no. 1, no. 3),
- *Journal of Process Control* (IFAC 2015),

uważam, że mgr inż. Tomasz Zubowicz dowiódł tezy i zrealizował cel rozprawy oraz wykazał się wiedzą i umiejętnością rozwiązywania zagadnień naukowych w zakresie zaawansowanych metod sterowania procesami nieliniowymi.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Na podstawie lektury rozprawy widać, że autor posiadał należyłą umiejętność korzystania i rozwijania teorii, metod i technik zaczerpniętych z literatury i opracowań własnych raz mierną zdolność zwięzłego i przejrzystego przedstawiania uzyskanych wyników.

Przegląd literaturowy wraz ze spisem literatury zostały właściwie opracowane. Całość raportu dobrze dokumentuje wkład doktoranta i uzyskane przez niego wyniki. Ogólnie prezentuje się wiarygodnie. Zewnętrzna struktura pracy jest poprawna, z wyjątkiem spisów i list oznaczeń. Autor zwykle dokonuje stosownego wprowadzenia lub przeglądu niezbędnych podstaw oraz dostarcza podsumowania każdego rozdziału.

Całość raport nie jest niestety skomponowana umiejętnie. Porządek rzeczy (sekwencja materiału) wewnątrz poszczególnych rozdziałów, w szczególności w ramach niektórych podpunktów i akapitów posiada wadliwą strukturę. Zastosowany w raporcie język angielski jest co prawda ogólnie zrozumiały, ale niestety czasami jest błędny oraz zbędnie kwiecisty, z potężnymi paragrafami (druga lub trzecia część strony, albo nawet 2 całe strony proponowane są jako jedna myśl! patrz np. str. 12-15, 48-49), przydługimi zdaniem przeładowanymi istotną treścią lub zaburzonymi oboczną informacją.

Praca prezentuje się pod względem merytorycznym bardzo dobrze i dotyczy rozległej oraz trudnej, aczkolwiek bardzo praktycznej, dziedziny inżynierii systemów. Została przy tym ogólnie dobrze wyedytowana w systemie *LaTeX* pod względem

syntaktycznym/strukturalnym (adekwatnie do możliwości tego środowiska) i nie ma większych potknięć w tym zakresie (wymienić należy tu jedynie „puste nagłówki”). Doceniając wprowadzone definicje, w rozprawie – w celu poprawienia precyzji wypowiedzi – zalecałbym tylko bardziej przemyślanie i jednoznacznie (w każdym nowym kontekście) używać uprzednio zdefiniowanych pojęć oraz akronimów.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Streszczenie rozprawy stanowi w głównej mierze kolejne wprowadzenie do tematyki rozprawy. W wielu miejscach dobrze przygotowany, dodatkowy rysunek znacznie poprawiłby czytelność prowadzonych wywodów, Z kolei rysunki powinny być należycie uszeregowane z towarzyszącym im tekstem (patrz np. rys. 1.1). Inne błędy redakcyjne dostrzec można na przykład na rys. 5.1 (literówki), rys. 5.2 i 5.3 (niespójności w skrótach i symbolach), które nie pasują do pracy technicznie mocno posadowionej matematycznie.

Potwierdzając z jednej strony wysoką ocenę merytoryczną („5”) rozprawy, trzeba jednak też zauważyć niską jakość („3”) przygotowanego raportu, w tym nieprzemysłany tok wywodów, obszerność dysertacji („2+”), jak również niewłaściwą kolejność treści przekazywanych wewnątrz rozdziałów oraz zakres materiału uzupełniającego rozprawę: 30 stronicowe „maczkiem pisane” spisy na początku rozprawy, z ukrytą w środku (choć najbardziej użyteczną) listą skrótów, gdzie i tak nie ma wszystkich używanych akronimów (np. IA i UD z rys. 4.3). Wszystko to zmusza czytelnika do nieustającego wertowania kartek. Zagłębianie się w treść rozdziałów utrudnia zatem słabe panowanie doktoranta nad kolejnością/sekwencyjnością, wątle operowanie pseudo równoległością tekstu i dodatkami (część materiału, np. wywody, ciąg definicji, czy dowody lematów można by przesunąć na koniec pracy).

Wątpliwości wzbudza też nieprzejrzysty styl (sprawiający czasami wrażenie chaosu) oraz sposób konstruowania myśli, rozwlekłość i dwuznaczność opisu, niezgrabności i lapsusy w zastosowanym języku angielskim (przedimki/rodzajniki, przykłady:

„This basis for this research”, „using virtual simulation environment”, „t is the time in continuous domain”, „equipped with a static anti-windup filtration”, „is PID family controller”, „which justifies the Assumptions 1.7”, „ to find T-S fuzzy approximation”, „in considered space ...”, „and the tools from the so-called (CI) ...” .),

i inne błędy redakcyjne (jak na przykład:

„the use fuzzy logic based technology”, „...can be rewritten in term of its subsystems”, „it is possible derived”,)

oraz interpunkcyjne

(,, respectively and”, ..., „in the considered space two seemingly equal paths”,...).

Biorąc na przykład pod uwagę tytuł rozprawy – zamiast (po poprawieniu gramatyki/ przedimków):

“Decentralized tracking of dissolved oxygen concentration in an interactive multi-zone bioreactor using a supervised PI controller”

rozumianego jako →

„Zdecentralizowane śledzenie stężenia rozpuszczonego tlenu w interakcyjnym wielostrefowym bioreaktorze z użyciem nadzorowanego regulatora PI”

albo jako →

“Zdecentralizowany system kontroli stężenia rozpuszczonego tlenu w wielostrefowym bioreaktorze z wykorzystaniem wieloobszarowego regulatora PI z nadzorcą”

pracę można by (np.) zatytułować jako →

“Decentralized system for the control of dissolved oxygen concentration in a multi-zone bioreactor using a multi-zone PI controller with supervision”

W krótkich fragmentach polskich też pojawiają się literówki, błędy redaktorskie (gramatyczne i interpunkcyjne, błędy w użyciu czasu) oraz dwuznaczności, a w końcu

też i trywializmy lub oczywistości, oraz język hybrydowo-grypsowy (np. „jakości dopływających do WWTP ścieków”, czy „oparte o ... regulatory”).

Dla poprawienia jakości prezentacji i ze względów dydaktycznych (adekwatnie też do podniesionych uwag) należałoby zatem raport zasadniczo skrócić, uprościć kwieciste wypowiedzi przekazując podstawową treść, dopracować logicznie fragmenty wywodów, tj. poprawić ich styl, jasność lub precyzję oraz kompletność wypowiedzi, przywołać zdefiniowane pojęcia i symbole (często kontekst jest niejasny, albo znany autorowi kontekst jest nadmiernie eksploatowany, i zrozumienie tekstu wymaga skojarzenia wielu innych fragmentów mówiących najwyraźniej o tym samym). Dużą pomocą przy tak rozbudowanej dysertacji byłby załącznik w postaci dysku z tekstem rozprawy doktorskiej.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Rozprawa mieści się w obszarze nowoczesnych teorii modelowania i sterowania (stanowego, nieliniowego, rozłożonego, adaptacyjnego, odpornego, rozmytego), których integracja pozwala na budowanie praktycznych systemów sterowania procesami przemysłowymi (nieliniowymi, niepewnymi, interaktywnymi, zdecentralizowanymi, wielozakresowymi, ze zmiennym punktem pracy, o złożonej strukturze przestrzennej oraz hierarchicznej organizacji, przy niepewnościach i ograniczeniach, dotyczących m.in. wymagań czasu rzeczywistego). Przydatność pracy dla nauki oraz gospodarki i ekologii jest duża (poznawczo i aplikacyjnie). Autor dostarcza dowodów użyteczności swojej propozycji w zastosowaniu przemysłowym poprzez laboratoryjną implementację oraz eksperymenty. W tym kontekście można oczekiwać kontynuacji badań, ale też i bezpośredniego wykorzystania wyników rozprawy w przemyśle.

Praca ma zatem niewątpliwe znaczenie dla nauk technicznych. Krytyczne uwagi redakcyjno-edytorskie nie wpływają na wysoką ocenę zakresu oraz oryginalnych merytorycznych osiągnięć naukowo-badawczych doktoranta, zawartych w recenzowanej rozprawie, oraz pozytywną ocenę pracy, która w pewnych aspektach teoretycznych wykracza nawet poza poziom przeciętny.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- (a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- (b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- (c) spełniająca całkowicie wymagania,
- (d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,
- (e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.

podpis



ZKowalczyk

