

prof. dr hab. inż. Józef Korbicz, czł. rzecz. PAN
Uniwersytet Zielonogórski
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych

Zielona Góra, 01 sierpnia 2025 r.

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI
Politechniki Gdańskiej
RPH/31883/2025
Wpłynęło dnia 05-08-2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Czyżniewskiego

pt. *Synthesis of state observers for non-linear uncertain systems in application
to biological wastewater treatment plant*

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Gdańskiej – prof. dr. hab. inż. Piotra Jasińskiego

1. Obszar problemowy

Analiza i sterowanie coraz bardziej złożonych procesów fizycznych i technologicznych wymaga dalszego rozwoju zaawansowanych metod modelowania matematycznego w tym obserwatorów stanu aby poprawić jakość i efektywność sterowania wybranymi procesami technologicznymi. Opiniowana rozprawa jest bardzo udaną propozycją opracowania nieliniowych obserwatorów stanu dedykowanych do odtwarzania zmiennych procesowych dynamicznych systemów biochemicznych, w tym procesów oczyszczania zachodzących w biologicznych oczyszczalniach ścieków. Sformułowana na str. 12 teza rozprawy oraz poprawnie określone szczegółowe cztery zadania badawcze wymagające rozwiązania których rozwiązanie będzie potwierdzeniem tezy uważam, że są bardzo dobrze opracowane.

Na podstawie dobrze opracowanego przeglądu literatury i oceny stanu wiedzy dotyczącej analizy wybranych obserwatorów stanu systemów dynamicznych do generowania estymat niemierzalnych związków biochemicznych zaproponowano nowe propozycje struktur nieliniowych obserwatorów oraz modyfikacje znanych algorytmów z literatury wraz z ich teoretyczną analizą. Przyjęto, że w opracowanych modelach procesów biochemicznych funkcje kinetyki reakcji traktowane są jako niepewności. W zaproponowanych rozwiązaniach i obszernych badaniach teoretycznych znajdują się obserwatory asymptotyczne i adaptacyjne, obserwatory przedziałowe, nieliniowe obserwatory Luenbergera jak również obserwatory ślizgowe. Aby zapewnić poprawną syntezę wybranych obserwatorów oraz jakość ich pracy wymagane jest opracowanie odpowiednich modeli matematycznych badanych procesów oraz

dokładna ich analiza. Zaproponowana i szczegółowo przeprowadzona analiza nieliniowych modeli obejmuje badania obserwowalności i wykrywalności. Ponadto aby zapewnić odporną estymację stanu zmiennych procesowych ze względu na przyjęte niepewności przeprowadzono stosowne badania z wykorzystaniem między innymi drugiej metody Lyapunova. Efektywność zaproponowanych rozwiązań i algorytmów jak również ich skuteczność została pokazana na drodze analitycznej oraz na podstawie obszernych badań symulacyjnych z wykorzystaniem wybranych modeli i danych reaktorów zbiornikowych z ciągłym mieszaniem.

2. Koncepcja oraz realizacja rozprawy

Rozprawa, o ogólnej objętości 283 strony opracowana jest w języku angielskim z krótkim 0.5 stronicowym streszczeniami w języku polskim. Praca składa się z czterech rozdziałów, podsumowania oraz wykazu 257 pozycji literaturowych będących podstawą opracowania bardzo dobrego stanu wiedzy w zakresie tematyki rozprawy dotyczących zarówno rozwiązań teoretycznych jak i częściowo technologicznych. Do pracy dołączone są dodatki zawarte w dwóch częściach. Część pierwsza zawiera wykaz opublikowanych 7 współautorskich prac własnych oraz jednej zgłoszonej do publikacji, oświadczenia doktoranta i współautorów o merytorycznym procentowym udziale w powstaniu poszczególnych publikacji. Część druga zawiera pełne kopie siedmiu opublikowanych prac własnych. Jest to trochę dyskusyjne rozwiązanie redakcyjne włączanie do rozprawy liczącej 99 strony pełnych kopii opublikowanych prac co zwiększa objętość rozprawy prawie do 300 stron.

Rozdział pierwszy jest ogólnym wprowadzeniem do tematyki rozprawy zawierającym wybrane aspekty infrastruktury oczyszczalni ścieków z naukowego, technologicznego i socjalnego punktu widzenia. Sformułowana została teza rozprawy oraz jej główny cel wraz z czterema zadaniami badawczymi wymagającymi rozwiązania. Szczególna uwaga została skierowana na rozwiązanie problemu rekonstrukcji i estymacji niemierzalnych koncentracji oddzielnych frakcji, których znajomość jest niezbędna do efektywnego działania oczyszczalni ścieków.

Rozdział drugi stanowi rozszerzone wprowadzenie do tematyki rozprawy gdzie dokonano bardzo dobrego przeglądu literatury oraz omówiono matematyczne i technologiczne właściwości jak również wybrane charakterystyki oczyszczalni ścieków.

Omówiono ogólną postać dynamicznego modelu biochemicznych procesów zachodzących w bioreaktorze, właściwości funkcji kinetycznych oraz sygnałów wejściowych. Dokonano omówienia wybranych właściwości nieliniowego modelu dynamicznego z punktu widzenia rekonstrukcji zmiennych stanu. Przede wszystkim zwrócono uwagę na problem obserwowalności i wykrywalności rozpatrywanego modelu dynamicznego systemu. Kończącą część rozdziału poświęcono algorytmom rekonstrukcji stanu w oczyszczalni ścieków z uwzględnieniem zakłóceń i niepewności oraz sposobom ich rozwiązywania z wykorzystaniem obserwatorów stanu i filtrów Kalmana. Omówiono szeroki przegląd znanych struktur obserwatorów stanu zwracając szczególną uwagę na obserwatory ślizgowe i ich szerokie zastosowanie w systemach diagnostyki procesów w tym procesów chemicznych i biochemicznych jak również w systemach elektro-mechanicznych i mechanicznych.

Rozdział trzeci jest pewnym przedłużeniem rozdziału drugiego i poświęcony jest aspektom metodologicznym podejmowanych w rozprawie. Między innymi rozpatruje się metody analizy charakterystyk systemów dynamicznych z punktu widzenia rekonstrukcji stanu obejmujące zagadnienia odwzorowania obserwowalności, metody nierozróżnialności dynamiki oraz analizę przedziałową. Przedstawiono problem stabilności nieliniowych systemów w kontekście drugiej metody Lyapunova. Zwrócono też uwagę na problemy uproszczenia i redukcji dynamiki modeli biochemicznych oraz problemy projektowania obserwatorów ślizgowych pierwszego i drugiego rzędów. W zakończeniu rozdziału przedstawiono oryginalną strukturę hybrydową obserwatora dla systemów biochemicznych która zawiera obserwator asymptotyczny oraz ślizgowy.

W ostatnim rozdziale piątym przedstawiony jest wkład doktoranta do treści artykułów włączonych do niniejszej rozprawy. Na początku dokonano omówienia treści siedmiu artykułów oraz wkładu doktoranta do każdego z nich w kontekście sformułowanych w rozprawie czterech zadań i problemów badawczych. Rozdział jest bardzo dobrze opracowany z szerokim uzasadnieniem i podkreśleniem własnego wkładu merytorycznego do rozwiązywania czterech problemów badawczych.

Na podstawie skrótowego omówienia treści rozprawy stwierdzam, że mgr inż. Mateusz Czyżniewski w bardzo dobrym stopniu wykazał się umiejętnościami formułowania problemów naukowo-badawczych i technologicznych na podstawie analizy stanu wiedzy z wykorzystaniem dostępnej literatury światowej zawierającej 257 pozycji obejmujących

artykuły opublikowane w wiodących czasopismach, materiałach konferencyjnych i monografiach. W tym obszernym wykazie odczuwalny jest brak niektórych prac wydanych przez autorów krajowych np. J.Korbicz, M.Witczak, V.Puig. LMI-based strategies for designing observers and unknown input observers for non-linear discrete-time systems, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2007, Vol. 55, no 1, pp. 31—42 czy M. Witczak, J. Korbicz, R. Józefowicz. Design of unknown input observers for non-linear stochastic systems and their application to robust fault diagnosis, *Control and Cybernetics*, 2013, Vol. 42, no. 1, pp. 227—256. Sformułowany problem syntezy stabilnych i odpornych obserwatorów dla wybranych modeli biologicznych oczyszczalni ścieków rozwiązał właściwymi metodami badawczymi dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne na wysokim poziomie teoretycznym z pełnym zachowaniem rygorów matematycznych. Dodatkowo wykonane liczne badania symulacyjne potwierdziły własności i zalety zaproponowanych metod i algorytmów. Rozprawa posiada charakter teoretyczno-praktyczny a do opisu metod i algorytmów zastosowano właściwy formalizm matematyczny. Ponadto doktorant wykazał się bardzo dobrą wiedzą z takich metod badawczych jak np. analiza nieliniowych modeli matematycznych obejmująca zagadnienia stabilności, obserwowalności czy wykrywalności jak również teoria estymacji stanu i identyfikacji parametrów nieliniowych procesów dynamicznych.

3. Osiągnięcia oryginalne

Realizując sformułowane cele badawcze i zadania mgr inż. Mateusz Czyżniewski uzyskał wiele ciekawych, ważnych i oryginalnych wyników naukowych potwierdzonych zarówno na drodze formalnych analiz matematycznych jak i eksperymentalnych badań symulacyjnych. Do ważnych osiągnięć naukowych mgr. inż. Mateusza Czyżniewskiego zaliczam m.in. następujące:

1. Rozwój i opracowanie modyfikacji obserwatorów ślizgowych z punktu widzenia poprawienia ich odporności i stabilności generowanych estymat zmiennych stanu oraz rekonstrukcji niepewności. Stabilność i odporność badano z punktu widzenia niepewności parametrycznej i strukturalnej modeli systemów dynamicznych. Badania stabilności błędu estymacji przeprowadzono z wykorzystaniem teorii stabilności Lyapunova wraz z warunkami Lipschitza dla badanych funkcji nieliniowych. Ważnym osiągnięciem jest również propozycja nowego dowodu stabilności oraz

przeprowadzenie badań symulacyjnych z wykorzystaniem dwu-wymiarowego modelu reaktora zbiornikowego z mieszadłem.

2. Przeprowadzenie obszernych badań obserwowalności i wykrywalności własności dla wybranych nieliniowych i niepewnych biochemicznych modeli procesów. Badania przeprowadzono z punktu widzenia niepewności parametrycznych i strukturalnych systemów dynamicznych, które manifestują się nieznanymi wejściami i warunkami początkowymi. Pełną analizę obserwowalności i wykrywalności przeprowadzono dla wielu scenariuszy zawierających szeroki zakres potencjalnych kombinacji mierzalnych sygnałów wyjściowych i nieznanymi wejść.
3. Przeprowadzenie pełnej analizy obserwowalności i wykrywalności czterowymiarowego modelu reaktora zbiornikowego z mieszadłem reprezentującego wybrane właściwości biochemiczne. Z wykorzystaniem metody nierozróżnialności trajektorii stanu i narzędzi bazujących na drugiej metodzie Lyapunova przeprowadzono badania dotyczące zależności systemu dynamicznego od warunków początkowych i wpływu wejść mając na uwadze określone mierzalne wyjścia.
4. Opracowanie i rozwój dwóch nieliniowych obserwatorów stanu, a mianowicie nieliniowego adaptacyjnego obserwatora typu Luenbergera oraz tzw. super-twisting obserwatora ślizgowego i ich zastosowanie do wyznaczania stabilnych i ograniczonych estymat dla wybranego modelu oczyszczalni ścieków. Analizę obserwowalności przyjętego modelu przeprowadzono z zastosowaniem metody nierozróżnialności trajektorii stany a do analizy stabilności obserwatorów wykorzystano teorię stabilności Lyapunova.
5. Rozwiązanie problemu estymacji stanu dla specyficznej klasy biochemicznych systemów w warunkach niepewności dynamiki. Zaproponowano nowy hybrydowy obserwator stanu polegający na integracji metodologii obserwatora asymptotycznego z obserwatorem ślizgowym drugiego rzędu. Z kolei analizę stabilności obserwatora przeprowadzono z wykorzystaniem teorii stabilności Lyapunova jak również teorii zbiorów niezmiennych i zbiorów ograniczonych.
6. Opracowanie nowego hierarchicznego obserwatora estymacji niemierzalnych zmiennych stanu i nieznanymi funkcji kinetycznych reakcji dla wybranych procesów

biochemicznych zachodzących w ciągłych reaktorach zbiornikowych z mieszadłem. Przeprowadzono analizę stabilności z zastosowaniem teorii Lyapunova przy założeniu niepewności dynamiki systemu. Z kolei stabilność dynamiki błędu estymacji została zbadana z zastosowaniem metod odnoszących się do liniowych systemów zmiennych w czasie i ślizgowego trybu pracy.

Przedstawione w rozprawie oryginalne wyniki naukowe potwierdzone badaniami teoretycznymi i symulacyjnymi zostały opublikowane przez doktoranta w siedmiu współautorskich artykułach, w tym sześciu w prestiżowych czasopismach naukowych z reprezentowanej dyscypliny i indeksowanych w bazie JCR. We wszystkich artykułach deklarowany udział doktoranta wynosi 50%. Są to czasopisma: *ISA Transactions*, 2022 (IF: 7.3, 140 pkt, udział 50 %), *Scientific Reports*, 2022 (IF: 4.6, 140 pkt., udział 50%), *Journal of Process Control*, 2023 (IF: 3.3, 140 pkt., udział: 50%), *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2024. (IF: 1.6, 100 pkt., udział: 50%), *Journal of Process Control*, 2024 (IF: 3.3, 140 pkt., udział: 50%), oraz *Archives of Control Sciences*, 2024 (IF: 1.2, 100 pkt., udział: 50%).

Uwzględniając wymienione oryginalne wyniki badań naukowych oraz ich opublikowanie w sześciu prestiżowych czasopismach z listy JCR uważam, że mgr inż. Mateusz Czyżniewski zrealizował cele badawcze, rozwiązał sformułowane zadania w stopniu wyróżniającym i uzasadnił postawioną tezę.

4. Uwagi i komentarze

Ogólnie całą rozprawę oceniam bardzo dobrze zarówno pod względem merytorycznym jak i redakcyjnym. Pewne uwagi zamieszczone niżej mają charakter dyskusyjny ale są istotne aby je skomentować.

1. Praca dotyczy problemu technologicznego dotyczącego poprawy jakości pracy biologicznej oczyszczalni ścieków. O ile z punktu widzenia badań teoretycznych dotyczących projektowania nieliniowych obserwatorów stanu i ich analizę zadanie wykonano na poziomie celującym to odczuwalny jest pewien brak komentarzy a może i dodatkowych badań odnośnie poziomu uzyskiwanej poprawy jakości pracy oczyszczalni z zastosowaniem wybranych rozwiązań (obserwatorów) zaproponowanych w pracy.

2. Mając na uwadze problem niemierzalnych lub niedostępnych pomiarowo niektórych zmiennych stanu i nieznanymi wartościami parametrów w przyjętych nieliniowych modelach matematycznych procesów technologicznych w rozprawie zaproponowano rozwiązanie problemu ich wyznaczenia z zastosowaniem nieliniowej teorii obserwatorów z uwzględnieniem w modelu procesu niepewności strukturalnych i parametrycznych. Przyjęte rozwiązanie jest właściwe i poprawne ale odczuwalny jest brak analizy lub tylko szerszej dyskusji odnośnie możliwości zastosowania alternatywnego rozwiązania, czyli teorii filtru Kalmana w warunkach stochastycznych.

5. Podsumowanie

Mając na uwadze wszystkie aspekty rozprawy doktorskiej mgr. inż., Mateusza Czyżniewskiego a w szczególności odnotowane osiągnięcia naukowe oraz wyróżniający wykaz publikacji współautorskich, jak również uwagi dyskusyjne, które nie mają znaczącego wpływu na końcową ocenę rozprawy:

- **Stwierdzam**, że rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania Prawa o szkolnictwie wyższym i nauki z dnia 20 lipca 2018 roku (art. 168) w dziedzinie *inżynierijno-technicznej* w dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*.
- **Rozprawę zaliczam do kategorii wybitnych.**
- **Wnoszę** o przyjęcie rozprawy przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Gdańskiej.

6. Wniosek o wyróżnienie

W rozprawie rozwiązano ważny problem teoretyczny projektowania nieliniowych obserwatorów stanu w warunkach niepewności strukturalnej i parametrycznej przyjętych modeli procesów technologicznych, w tym biochemicznych zachodzących w biologicznych oczyszczalniach ścieków poprzez opracowanie nowych struktur obserwatorów i przeprowadzenie głębokiej analizy ich właściwości z zastosowaniem właściwych metod badania stabilności i wykrywalności systemów dynamicznych. Efektywność zaproponowanych rozwiązań pokazano na drodze analiz teoretycznych jak i symulacyjnych. Wyniki badań opublikowano w sześciu artykułach współautorskich w

czasopismach z listy JCR z przypisaną punktacją MEiN w zakresie 100-140, co potwierdza pośrednio ważność i duże znaczenie otrzymanych wyników dla dyscypliny oraz jest osiągnięciem wybitnym.

