

dr hab. inż. Krzysztof Pietruszewicz, prof. ZUT
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Elektryczny
Katedra Automatyki i Robotyki

Szczecin,.....2024 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Norberta Kukurowskiego

Tytuł rozprawy: Metody estymacji uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia dla systemów Takagi-Sugeno

Autor rozprawy: mgr inż. Nobert Kukurowski

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Marcin Mrugalski, prof. UZ

Dziedzina: nauki inżyniersko-techniczne

Dyscyplina: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

1. Wstęp i podstawa prawna

Recenzowana przeze mnie rozprawa porusza istotne, zarówno z naukowego jak i praktycznego oraz aplikacyjnego punktu widzenia, zagadnienia jednoczesnej estymacji uszkodzeń elementów wykonawczych oraz układów pomiarowych oraz sterowania tolerującego jednoczesne uszkodzenia systemów opisywanych z zastosowaniem modelu Takagi-Sugeno.

Recenzja pracy została sporządzona na prośbę Komisji doktorskiej do przeprowadzenia czynności w postępowaniu o nadanie stopnia doktora Panu mgr. inż. Norbertowi Kukurowskiemu wyrażoną w Uchwale Nr 927 Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego z dnia 25 października 2023 roku w sprawie wyznaczenia recenzentów w powyższym postępowaniu.

2. Ocena formalna pracy

Praca doktorska pt. „Metody estymacji uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia dla systemów Takagi-Sugeno” obejmuje łącznie 164 strony (I-XVI oraz 1-148). Składa się z 5 zasadniczych rozdziałów (w tym numerowanego wprowadzenia oraz podsumowania i dodatku), Bibliografii z wykazem 116 prac, w tym 91 artykułów w czasopiśmie, 9 materiałów konferencyjnych, 1 dysertacji, 2 instrukcji technicznych stanowisk laboratoryjnych, 1 noty technicznej oraz 12 książek.

Praca jest uzupełniona streszczeniem w języku polskim i angielskim w formie oddzielnych dokumentów, przydatnymi dla czytelnika listami: skrótów oraz symboli, spisem treści, spisem rysunków, spisem tabel.

Praca jest napisana w języku polskim i zorganizowana jak poniżej:

1. Rozdział 1. Wprowadzenie – wprowadzenie czytelnika w problematykę i przedstawienie szeregu istotnych dla zrozumienia pracy definicji, związanych

- z uszkodzeniami w systemach sterowania, ich estymacją (metodami lokalizacji i detekcji), sterowaniem tolerującym uszkodzenia, predykcją pozostałej żywotności, czy wreszcie modelem Takagi-Sugeno; w Rozdziale 1 przedstawiono również cel główny i cele szczegółowe, tezę pracy oraz przybliżono zakres i strukturę pracy;
2. Rozdział 2 w całości poświęcono zagadnieniu estymacji stanu i uszkodzeń; przedstawiono podstawy teoretyczne dwóch typów obserwatorów dla systemów Takagi-Sugeno: adaptacyjnego oraz obserwatora z rozszerzonym wektorem stanu; na przykładzie estymacji stanu i uszkodzeń dla układu baterii litowo-jonowych dokonano porównania efektywności tychże obserwatorów; omówiono uzyskane wyniki; w końcowej części Rozdziału 2 wprowadzono zagadnienie predykcji pozostałej żywotności systemów na przykładzie baterii pojazdu AGV; w podsumowaniu Rozdziału 2 wykazano zalety i wady obu typów obserwatorów;
 3. Rozdział 3 przedstawia zagadnienia sterowania tolerującego uszkodzenia; Autor prezentuje w strukturze z rysunku 3.1 podejścia do rozwiązania problemu sterowania z zastosowaniem dwóch rodzajów obserwatorów, szczegółowo omówionych w Rozdziale 2; poza procedurami projektowania regulatorów, w Rozdziale 3 (najistotniejszym z perspektywy celu naukowego pracy) przedstawiono wyniki badań efektywności sterowania tolerującego uszkodzenia dla stanowisk badawczych: układu trzech zbiorników oraz dwuwirnikowego układu aerodynamicznego (systemu o wysokim rzędzie dynamiki); zaprezentowano procedury definiowania schematów uszkodzeń oraz uzyskane wyniki badań; dodatkowo, pod koniec Rozdziału 3 Autor przedstawia wyniki badań nad predykcją pozostałej żywotności urządzenia wykonawczego dla dwuwirnikowego układu aerodynamicznego;
 4. Rozdział 4 to podsumowanie całości pracy; Autor nawiązuje do postawionych w Rozdziale 1 celów badawczych (opracowania metod estymacji jednoczesnych uszkodzeń czujników i urządzeń wykonawczych dla systemu Takagi-Sugeno; opracowania metod sterowania tolerującego wielokrotne uszkodzenia czujników i urządzeń wykonawczych dla systemu Takagi-Sugeno; zastosowania opracowanych obserwatorów w predykcji pozostałej żywotności komponentów systemu Takagi-Sugeno; walidacji skuteczności i dokładności opracowanych metod estymacji uszkodzeń, sterowania tolerującego wielokrotne uszkodzenia, oraz predykcji pozostałej żywotności komponentów systemu typu Takagi-Sugeno); Autor w Rozdziale 4 wskazuje jeden z oczywistych wątków badawczych, jakimi chciałby się zająć w najbliższej przyszłości;
 5. Rozdział 5 to Dodatek, zawierający macierze dyskretnych modeli Takagi-Sugeno badanych w ramach rozprawy systemów.

Cytowane pozycje literaturowe, w których powstaniu Autor rozprawy brał udział:

1. [25] M. Pazera, M. Witczak, N. Kukurowski, and M. Buciakowski, „Towards simultaneous actuator and sensor faults estimation for a class of takagi-sugeno fuzzy systems: A twin-rotor system application,” *Sensors*, vol. 20, no. 12, p. 3486, 2020
2. [44] N. Kukurowski, M. Mrugalski, M. Pazera, and M. Witczak, „Fault-tolerant tracking control for a non-linear twin-rotor system under ellipsoidal bounding,”

International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol. 32, no. 2, pp. 171–183, 2022

3. [45] N. Kukurowski, M. Pazera, and M. Witczak, „Fault-tolerant tracking control for a descriptor system under an unknown input disturbances,” *Electronics*, Vol. 10, no. 18, pp. 1–15, 2021
4. [46] N. Kukurowski, M. Pazera, M. Witczak, „Fault-tolerant tracking control and remaining useful life estimation for takagi-sugeno fuzzy system,” in *IEEE CIS International Conference on Fuzzy Systems 2021 Virtual Conference, July 11th-14th 2021 : Conference Proceedings*; ISBN: 9781665444071, (Luxembourg, Luxembourg), pp. 687–693, - IEEE, 2021
5. [100] M. Witczak, M. Mrugalski, M. Pazera, N. Kukurowski, „Fault diagnosis of an automated guided vehicle with torque and motion forces estimation: A case study,” *ISA Transactions*, vol. Vol. 104, pp. 370–381, 2020
6. [101] N. Kukurowski, M. Witczak, M. Pazera, K. Patan, „Design and performance analysis of automated guided vehicle: Applications to terrain mapping,” in *15th European Workshop on Advanced Control and Diagnosis (ACD 2019) Proceedings of the Workshop Held in Bologna, Italy, on November 21-22, 2019* ISBN: 9783030853174 (G. C. eds. E. Zattoni, S. Simani, ed.), *Lecture Notes in Control and Information Sciences – Proceedings*, pp. 1241–1256, Cham: Springer Nature Switzerland, 2022

Spośród 6 prac, cytowanych w recenzowanej rozprawie, najważniejsze z perspektywy wytyczonych celów naukowych oraz tezy niniejszej dysertacji są w mojej ocenie prace: [25], [44] oraz [46].

Uwagi na temat poprawności językowej i redakcyjnej rozprawy:

1. W Rozdziale 1 (strona 10) Autor podaje literaturę jedynie dla punktu „Narzędzia do projektowania matematycznego”; brakuje cytowań dla pozostałych 3 kategorii technik projektowania schematów FTC;
2. Lista Symboli nie jest na tyle kompletna, by umożliwić czytelnikowi swobodne śledzenie analiz teoretycznych (wyprowadzenia wzorów), głównie w Rozdziale 2;
3. W całej pracy Autor używa sformułowania „zakłócenia w postaci niepewności (pomiaru i procesu)” (strony: XV, 20, 29, 45, 57, 60, 82, 87, 96, 123) – jest to skrót myślowy; poprawne, zgodne z nomenklaturą sformułowanie powinno brzmieć „zakłócenie skutkujące zjawiskiem (bądź wystąpieniem zjawiska) niepewności”; Autor zastosował w pracy zabieg, według którego do systemu wprowadzone zostały dwa dodatkowe sygnały, czyli wektory zakłóceń składające się z liczb losowych o rozkładzie normalnym, które miały na celu wprowadzenie/ uwzględnienie zjawiska niepewności do modelowanego systemu. Autor wyjaśnił tą wątpliwość na piśmie;
4. W pracy bardzo szczegółowo omówiono uzyskane wyniki badań układów sterowania tolerującego uszkodzenia (Rozdział 3), nie zaprezentowano jednak wyliczonych w procedurze projektowania macierzy wzmocnień regulatorów: nominalnego ani tolerującego uszkodzenia;

5. W Rozdziale 4 precyzyjnie wskazano na wypełnienie postawionych na wstępie celu głównego oraz celów szczegółowych; w mojej ocenie zabrakło czytelnego wskazania, iż teza pracy została udowodniona; moim zdaniem została udowodniona;
6. Liczne zawieszki (tzw. sieroty „a, i, o, u, w, z”) w całej pracy;
7. Liczne „wdowy” (przykładowo strony: 2, 6, 10, 11, 14, 15, 16, 18, 19, itd.);
8. Na rysunkach prezentujących stanowiska laboratoryjne nie zaprezentowano zmiennych definiujących obiekty sterowania (rys. 3.2; rys. 3.21); analiza wzorów jest przez to utrudniona;
9. Generalnie praca napisana starannie, bez błędów językowych; opisy bardzo szczegółowe, jednakże nie przytłaczające;
10. Rozdziały 2 i 3 mają swoje indywidualne wprowadzenia co wpływa na łatwość lektury;
11. Literatura przygotowana starannie, duża liczba ważnych dla rozprawy ksiązek (12) oraz staranne cytowanie ponad 90 artykułów z czasopism świadczą o dobrym wyczuciu stanu wiedzy w tematyce doktoratu;
12. Struktura pracy logiczna, Autor podzielił treści w bardzo staranny sposób; układ Rozdziału 1 niemal podręcznikowy;
13. Cel, zakres oraz teza pracy zostały zaprezentowane w jasny, nie pozostawiający wątpliwości sposób;
14. W Rozdziale 4 jasno wypunktowano osiągnięcia pracy, niestety nie nawiązując do tezy pracy; pośrednio wiemy, że teza naukowa została udowodniona.

3. Ocena merytoryczna pracy

3.1. Istotność zagadnienia

Tematyka recenzowanej dysertacji związana jest z opracowaniem oraz eksperymentalną weryfikacją i walidacją nowego podejścia do estymacji uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia dla systemów, które opisuje się modelem Takagi-Sugeno.

Zagadnienia poruszane w pracy są niezwykle istotne z perspektywy eksploatacji systemów technicznych, dla których chcemy zachować wysoką jakość sterowania pomimo występujących podczas ich działania niekorzystnych zjawisk, jak uszkodzenia elementów wykonawczych czy czujników oraz samego systemu. Dodatkowo zjawiska błędów modelowania i wynikających z tego niepewności co do parametrów i/lub struktury systemu, którym mamy sterować mogą być źródłem dalszego pogorszenia efektywności i jakości sterowania. W przypadku systemów sterowania czasu rzeczywistego niezwykle istotnym aspektem eksploatacji jest złożoność obliczeniowa projektowanych systemów sterowania.

3.2. Zawartość merytoryczna pracy

W recenzowanej rozprawie trudno jest wskazać najważniejszy naukowo rozdział. Autor w bardzo dobry sposób rozdzielił „ładunek naukowy” pomiędzy Rozdziały 2 i 3. Rozdział 1 stanowi doskonale wprowadzenie teoretyczne.

Rozważania teoretyczne w umiejętny sposób przeplatane są i konkludowane wynikami obliczeń oraz badań praktycznych.

3.3. Uwagi dyskusyjne

1. W Tezie (Rozdział 1.7) jest mowa o „błędach modelowania”. Autor w Podsumowaniu nie nawiązuje do tego wątku zawartego w Tezie. Można się domyślać, że chodzi o uwzględnienie wprowadzonych do systemu wektory zakłóceń oraz skutkujące tym niepewności;
2. Modele matematyczne układu trzech zbiorników (wzór 3.109) oraz dwuwirnikowego układu aerodynamicznego (strona 94, bez numeru) są niekompletne; brak w pracy wyjaśnienia znaczenia zmiennych, parametrów oraz funkcji zawartych w tych modelach;
3. Na stronach 40, 81, 95 oraz 114 przedstawiono schematy uszkodzeń wraz z macierzami dystrybucji uszkodzeń urządzenia wykonawczego i czujnika; brak w pracy wyjaśnienia powodów, dla których zdecydowano się akurat na przyjęte parametry schematów uszkodzeń.

3.4. Ogólna ocena merytoryczna pracy

Według mnie przedstawiona do recenzji rozprawa jest naukowo kompletna.

Potwierdzeniem tego niech będzie występowanie w rozprawie:

1. Odniesień do bogatej literatury przedmiotu badań;
2. Wprowadzenia niezbędnych do zrozumienia przedstawionych zagadnień definicji;
3. Szczegółowego omówienia opracowanych w pracy obserwatorów;
4. Szczegółowego omówienia procedur projektowania opracowanych wariantów układów sterowania;
5. Opisu stanowisk badawczych i sposobów prowadzenia eksperymentów;
6. Analizy i omówienia wyników badań własnych;
7. Podsumowania wyników, problemów i wskazanie ścieżki najbliższych badań.

Poszukiwania naukowe doktoranta zaowocowały uporządkowanymi, logicznie spójnymi oraz implementacyjnie atrakcyjnymi rozwiązaniami sterowania tolerującego uszkodzenia dla obiektów opisywanych z zastosowaniem modeli Takagi-Sugeno.

Zaprezentowane badania mają charakter rozwojowy, zmierzający w kierunku opracowania systemu sterowania tolerującego uszkodzenia nie tylko elementów wykonawczych i/lub czujników (co istotne jednocześnie) ale również uwzględniającego predykcję pozostałej żywotności urządzeń wykonawczych.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi w mojej ocenie oryginalne rozwiązanie zdefiniowanego na wstępie problemu naukowego. Zaprezentowane wyniki badań wykazują ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne zaś poziom precyzji opisu postawionej w pracy a następnie udowodnionej tezy badawczej dowodzą umiejętności doktoranta do zespołowego oraz samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Uważam, że doktorant dysponuje teoretycznym oraz praktycznym warształem badawczym, potrafi zaplanować eksperyment naukowy oraz posiada umiejętności publikowania wyników badań, czego dowodzą prezentowane i cytowane w rozprawie prace.

Pewien niedosyt budzi brak publikacji samodzielnych doktoranta, jednakże dokonania opisane w rozprawie jasno wytyczają wkład doktoranta w dyscyplinę naukową.

4. Wnioski końcowe

Po zapoznaniu się z pracą dokorską pt. „Metody estymacji uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia dla systemów Takagi-Sugeno” stwierdzam, że:

przedstawiona rozprawa spełnia

właściwe ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim oraz mieści się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne i w związku z powyższym

wniosuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie

mgr. inż. Norberta Kukurowskiego do publicznej obrony.



Krzysztof Pietrusewicz

Zgodnie z trybem, określonym przez Zasady wyróżniania rozpraw doktorskich uchwalonymi przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Uniwersytetu Zielonogórskiego w dniu 14.06.2023 r.

wniosuję o wyróżnienie przedstawionej mi do recenzji rozprawy

Wniosek swój uzasadniam wysoką jakością warsztatu naukowego jakim charakteryzuje się przedstawiona mi do recenzji praca. Ważność podjętych w rozprawie zagadnień oraz umiejętny, zgodny z aktualnym stanem wiedzy oraz techniki sposób ich rozwiązania świadczą o wysokiej dojrzałości naukowej doktoranta.

Nakład zadań praktycznych, jakie wyznaczył sobie doktorant w celu potwierdzenia rozważań teoretycznych był bardzo duży. Współcześnie, gdy olbrzymią popularnością cieszą się rozważania bazujące jedynie na wynikach badań symulacyjnych, podejście prezentowane przez doktoranta w pracy zasługuje w mojej ocenie na wyróżnienie.

Pietruszewicz

Krzysztof Pietruszewicz