

Gliwice, 19.01.2024 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Norberta Kukurowskiego

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska **mgr inż. Norberta Kukurowskiego** zatytułowana „*Metody estymacji uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia dla systemów Takagi-Sugeno*”. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Marcin Mrugalski. Praca została opracowana na Wydziale Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki Uniwersytetu Zielonogórskiego. Formalną podstawą do sporządzenia tej recenzji jest Uchwała nr 927 Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego z dnia 25.10.2023 powierzająca, między innymi mnie, funkcję recenzenta w tym przewodzie.

1. Zawartość pracy i ocena formalna

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska zawiera łącznie 148 stron podzielonych na cztery rozdziały oraz dodatek. Rozprawa zawiera również spisy rysunków, tabel i skrótów oraz spis literatury liczący 116 pozycji. Dysertacja została napisana w języku polskim. Zawartość rozprawy zaprezentowano poniżej.

W rozdziale pierwszym przedstawiono krótkie wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy. Scharakteryzowano w nim kontekst pracy, zaprezentowano szczegółowo zakres przeprowadzonych badań i tezę dysertacji. Również w rozdziale pierwszym szczegółowo odniesiono pracę do obecnego stanu wiedzy i na tej podstawie zaprezentowano główne osiągnięcia dysertacji.

W rozdziale drugim przedstawiono procedurę projektowania obserwatora adaptacyjnego oraz obserwatora z rozszerzonym wektorem stanu dla systemu Takagi-Sugeno z uwzględnionymi możliwościami uszkodzeń czujników i urządzeń wykonawczych oraz dodatkowymi zakłóceniami w postaci niepewności pomiaru i/lub procesu. Wyniki teoretyczne zilustrowano na przykładzie systemu baterii. W symulacjach uwzględniono scenariusz z trzema rodzajami uszkodzeń (chwilowe, wolno-narastające i permanentne) jak i możliwość występowania zakłóceń w postaci niepewności pomiaru i procesu. W końcowej części rozdziału przedstawiono zastosowanie opracowanych obserwatorów do predykcji pozostałej żywotności baterii w pojeździe AGV.

W rozdziale trzecim przedstawiono procedurę projektowania schematów sterowania tolerujących uszkodzenia. Jeden z nich bazuje na obserwatorze adaptacyjnym, a drugi wykorzystuje obserwator z rozszerzonym wektorem stanu. W obu przypadkach zadaniem sterowania jest śledzenie stanu referencyjnego w sytuacji gdy mogą wystąpić uszkodzenia zarówno czujników jak i urządzeń wykonawczych oraz zakłócenia w postaci niepewności procesu i pomiaru.

W końcowej części rozdziału przedstawiono metodę predykcji pozostałej żywotności urządzenia wykonawczego bazującą na obserwatorze z rozszerzonym wektorem stanu. Wyniki teoretyczne zilustrowano na przykładzie dwuwirnikowego układu aerodynamicznego oraz schematu uszkodzeń, w którym uszkodzenie urządzenia wykonawczego narasta wykładniczo, aż do wystąpienia awarii. W rezultacie uzyskano predykcję awarii urządzenia wykonawczego oraz pozostałego czasu do jej wystąpienia przy danym poziomie uszkodzenia.

Rozdział czwarty ma charakter podsumowania pracy, natomiast w dodatku zawarto szczegółowy opis systemu Takagi-Sugeno dla systemu baterii, układu trzech zbiorników oraz aerodynamicznego systemu dwuwirnikowego, które wykorzystano w pracy do ilustracji otrzymanych wyników teoretycznych.

Warta podkreślenia jest bardzo dobra strona edycyjna i układ pracy. Rozdziały, podrozdziały, sekcje, nagłówki, stopki itp. utrzymane są tej samej konwencji, przez co praca bardzo dobrze wygląda. Rysunki są bardzo starannie przygotowane z dbałością o estetyczne i precyzyjne przedstawienie graficzne zastosowanych algorytmów i wyników badań. Język użyty w pracy jest czytelny, przez co pracę dobrze się czyta. Pewien niedosyt budzi precyzja sformułowań matematycznych w niektórych fragmentach pracy, do której odniosę się dokładniej w dalszej części recenzji.

2. Ocena merytoryczna pracy

Przedmiotem recenzowanej pracy było opracowanie i analiza algorytmów sterowania tolerujących uszkodzenia z wykorzystaniem modelu Takagi-Sugeno. Autor zauważył i przeanalizował szereg interesujących aspektów problemu, które były pomijane lub stanowiły marginalny element w innych opracowaniach. Dlatego koniecznym okazało się rozwiązanie wielu cząstkowych celów naukowych. Najistotniejszym z nich są:

- Opracowanie metod estymacji jednoczesnych uszkodzeń czujników i urządzeń wykonawczych.
- Opracowanie metod sterowania tolerującego wielokrotne uszkodzenia czujników i urządzeń wykonawczych.
- Opracowanie metod estymacji uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia z zastosowaniem w predykcji żywotności komponentów.

Wszystkie te cele zostały osiągnięte w pracy, co pozwoliło w pełni udowodnić tezę badawczą sformułowaną w następujący sposób :

„Możliwe jest opracowanie efektywnego sterowania tolerującego uszkodzenia z zastosowaniem metod odpornej estymacji uszkodzeń bazujących na obserwatorach oraz predykcji pozostałej żywotności komponentów systemów Takagi-Sugeno uwzględniając jednoczesne uszkodzenia urządzeń wykonawczych i czujników oraz zakłócenia i błędy modelowania”.

Dorobek naukowy autora rozprawy obejmuje 15 prac odnotowanych w bazie Scopus, liczba cytowań tych prac wynosi 44, a indeks H to 3.

Uwzględniając wymienione osiągnięcia naukowo-badawcze oraz fakt ich opublikowania w renomowanych czasopiśmie i materiałach konferencyjnych, uważam że mgr inż. Norbert Kukurowski zrealizował cel rozprawy i udowodnił postawioną tezę oraz wykazał się wiedzą i umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów teoretycznych i praktycznych z szeroko rozumianej współczesnej automatyki i robotyki w zakresie przewidywania awarii urządzeń przemysłowych.

3. Krytyczna analiza i sugestie

Rozprawa prezentuje ambitne podejście do problemu estymacji uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia w systemach Takagi-Sugeno. Autor skupia się na szczegółowej analizie i opracowaniu metod, co jest godne uwagi. Warto jednak by podkreślić, jak praca wpisuje się w szerszy kontekst badań w tej dziedzinie, aby lepiej zarysować jej znaczenie.

Metody użyte w pracy są adekwatne i dobrze uzasadnione. Sugerowałbym jednak dokładniejsze omówienie wyboru tych metod w kontekście alternatywnych podejść, co mogłoby pomóc w lepszym zrozumieniu ich przewag i ograniczeń.

Wyniki są interesujące i pokazują potencjał zastosowanych metod. Byłoby korzystne, gdyby autor w większym stopniu skonfrontował wyniki z istniejącymi pracami w tej dziedzinie, co pozwoliłoby na lepsze zrozumienie ich unikalności i wkładu w rozwój dziedziny.

Praca jest solidna i dobrze zorganizowana, z wyraźnym wkładem w dziedzinę. Warto jednak zastanowić się nad bardziej szczegółowymi rekomendacjami, które mogłyby pomóc w przyszłych badaniach i rozwoju tej tematyki.

W pracy zastosowano zaawansowane metody matematyczne, co należy ocenić bardzo pozytywnie. Jednakże, używany język matematyczny powinien być bardziej precyzyjny. Poniżej zamieszczam kilka uwag krytycznych w stosunku do opisu matematycznego użytego w pracy

Na stronie 24 autor wprowadza układ dynamiczny opisany równaniami (2.1), (2.2) i (2.3). w opisie tego układu brakuje wyjaśnienia czym jest p_k i n_a .

Wielkość n_s zdefiniowana jest w opisie jako $\text{rank}(C_f)$, który zgodnie z Listą Symboli oznacza rozmiar macierzy C_f , moim zdaniem n_s jest rzędem macierzy C_f .

W opisie modelu (2.1)-(2.3). nie wyjaśniono znaczenia symbolu A^f .

Model opisany równaniami (2.1), (2.2) i (2.3), to w istocie ten sam model, który doktorant opisuje później równaniami (2.29), (2.30) i (2.31) oraz (3.1), (3.2) i (3.3). Wystarczyło raz zdefiniować taki model, a następnie odwoływać się jedynie do niego poprzez doprecyzowanie jaką interpretację mają zmienne f . Jest to jedynie mankament notacyjny ale prowadzi do dalszych konsekwencji. Autor niepotrzebnie powiela twierdzenia (Twierdzenie 2.3, Twierdzenie 3.3, Twierdzenie 3.6, Twierdzenie 3.9, Twierdzenie 3.12), ich dowody oraz poprzedzające je definicje układu ściśle kwadratowo ograniczonego i zbioru niezmienniczego. twierdzenia te wraz z dowodami i definicjami mogły być podane jedynie dla układu (2.1)-(2.3).

Oznaczenie E_w wprowadzone równaniem (2.16), a następnie powtórzone w równaniu (3.24) jest bardzo mylące. Zbiór ten zależy bowiem od macierzy Q i dlatego powinien być oznaczony jako E_Q , tak jak to zrobiono w pracy [96].

W Definicji 2.2 słowo „zakłada” powinno być zastąpione słowem „implikuje” lub symbolem „ \Rightarrow ”, którego użyto w Definicji 2.1.

Twierdzenie 2.3 powinno być porównane z Theorem 1 z pracy [96]. **Prosiłbym aby doktorant taką dyskusję przedstawił w trakcie publicznej obrony.**

W dowodzie Twierdzenia 2.3 doktorant stwierdza, że zależność (2.23) implikuje zależność (2.25), a implikacja ta może być pokazana z użyciem koncepcji dopełnienia Schura. Ten fragment rozumowania wymaga moim zdaniem bardziej szczegółowego wyjaśnienia.

W zależności (2.36) doktorant używa pojęcia macierzy pseudoodwrotnej. Pojęcie to ma w literaturze wiele nierównoważnych znaczeń i w związku z tym powinno być odnotowane jak autor je rozumie i dlaczego zależność (2.35) implikuje zależność (2.36).

W kilku miejscach pracy (np. na stronach 56 i 57 w podsumowaniu rozdziału drugiego) autor używa sformułowania „obliczyć liniową nierówność macierzową”, powinno być „rozwiązać liniową nierówność macierzową”

Wyniki pracy są przedstawione w sposób jasny i zrozumiały. Jednakże, mogłoby być korzystne dokładniejsze omówienie, w jaki sposób wyniki te wpływają na istniejące teorie i praktyki w dziedzinie sterowania i estymacji uszkodzeń. Szczególnie przydatne byłoby podkreślenie unikalnych wniosków lub niespodziewanych odkryć. Wskazanie konkretnych obszarów i problemów gdzie dalsze badania mogą przynieść znaczące postępy, byłoby również wskazane. **Prosiłbym o odniesienie się do uwag z ostatniego akapitu w trakcie publicznej obrony.**

4. Podsumowanie recenzji

Reasumując, podniesione wyżej uwagi krytyczne i komentarze nie wpływają jednak na wysoką ocenę oryginalnych i opublikowanych osiągnięć naukowo-badawczych, zasadniczych wyników zawartych w recenzowanej pracy oraz jej ogólnej pozytywnej oceny. Przedstawione wyniki stanowią niewątpliwie rozwiązanie istotnego, niebanalnego i dobrze postawionego problemu naukowego o praktycznym wymiarze, a także dobrze świadczą o erudycji Doktoranta. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Norberta Kukurowskiego rozprawa pt. „*Metody estymacji uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia dla systemów Takagi-Sugeno*” spełnia w pełni kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dziennik Ustaw z 2023 roku, poz. 742 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgra Norberta Kukurowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne