

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

mgra inż. Norberta Kukurowskiego pt.

"Metody estymacji uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia dla systemów Takagi-Sugeno"

### **1. Podstawa recenzji**

Podstawą recenzji jest uchwała Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego nr 927 z dnia 25.10.2023 r. w sprawie powołania recenzentów w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr inż. Norberta Kukurowskiego. Rozprawa doktorska pt. "*Metody estymacji uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia dla systemów Takagi-Sugeno*" została przekazana recenzentowi przez Przewodniczącego Komisji Doktorskiej do przeprowadzenia czynności w postępowaniu o nadanie stopnia doktora Panu mgr. inż. Norbertowi Kukurowskiemu przez prof. dr hab. inż. Dariusza Ucińskiego pismem z dn. 13.11.2023 r.

### **2. Omówienie podstawowych osiągnięć rozprawy**

#### **2.1. Oryginalne osiągnięcia rozprawy**

Za podstawowe oryginalne osiągnięcia rozprawy doktorskiej uważam:

- propozycję systematycznego podejścia do projektowania obserwatora adaptacyjnego oraz obserwatora z tzw. rozszerzonym wektorem stanu z wykorzystaniem rozmytego modelu wnioskowania Takagi i Sugeno,
- propozycję podejścia do projektowania pewnej klasy systemów tolerujących uszkodzenia z wykorzystaniem opracowanych w pracy obserwatorów,
- propozycję podejścia do predykcji pozostałego okresu użytkowania elementów wykonawczych i pomiarowych,
- propozycję zastosowania opracowanych obserwatorów do detekcji i identyfikacji uszkodzeń,
- egzemplifikację i weryfikację laboratoryjną zaproponowanych podejść.

## 2.2. Wkład rozprawy w dyscyplinę automatyki

Rozprawa wnosi ewidentny wkład teoretyczny, metodyczny i badawczy w obszarze automatyki adresując aspekty aplikacyjne zwłaszcza w zakresie diagnostyki procesów i sterowania tolerującego uszkodzenia.

Za podstawowy wkład teoretyczny pracy należy uznać zaproponowane przez Doktoranta oryginalne systematyczne podejścia do projektowania pewnej klasy obserwatorów bazujących na modelu wnioskowania rozmytego zaproponowanego przez Takagi i Sugeno.

Wkład aplikacyjny pracy polega na prezentacji zweryfikowanych eksperymentalnie propozycji zastosowania opracowanych obserwatorów do detekcji i identyfikacji uszkodzeń, realizacji sterowania tolerującego uszkodzenia oraz predykcji pozostałego okresu użytkowania elementów wykonawczych.

## 2.3. Teza pracy

Teza pracy jest rozbudowana i bardzo pojemna. Można ją uważać za postawioną niezwykle ambitnie. Obejmuje cztery zasadnicze, ale powiązane wzajemnie cele badawcze:

- propozycję syntezy odpornych estymatorów uszkodzeń,
- propozycję sterowania tolerującego uszkodzenia,
- predykcję okresu pozostałego użytkowania komponentów systemu sterowania,
- propozycję detekcji i identyfikacji uszkodzeń wielokrotnych.

Pewne zastrzeżenia budzi jednak brak przekonującej, zwerbalizowanej i poszerzonej motywacji takiego a nie innego sformułowania tezy pracy. Czytelnik w pierwszym jej odbiorze dostrzega jej pewną eklektyczność.

Teza pracy zawiera element zabezpieczenia, ponieważ jest sformułowana w kategoriach warunkowych. Zakłada ona, bowiem możliwość, a nie pewność osiągnięcia głównego celu, jakim jest opracowanie efektywnego sterowania tolerującego uszkodzenia. Lektura pracy nie pozwala jednak na stwierdzenie, aby którykolwiek z zakładanych szczegółowych celów badawczych nie został osiągnięty, lub którykolwiek z przytoczonych wyników badań laboratoryjnych jej przeczył. Doktorant zastosował w praktyce skuteczną i ekonomiczną metodę wykazania niesprzeczności tezy wykorzystując znane i ekonomiczne podejście „*reductio ad absurdum*”. W tym sensie nie można zakwestionować zgodności wyników pracy z postawionymi w tezie celami naukowymi.

Wykazanie efektywności sterowania tolerującego uszkodzenia wymagało zaproponowania metody lub metod ich weryfikacji. W związku z tym można było oczekiwać, że w rozprawie zostaną być może przedłożone i przedyskutowane pewne

nowe miary efektywności sterowania. Tak się jednak nie stało. W pracy zostały zastosowane tylko proste i ogólnie znane miary w postaci:

- wartości średnich i średniokwadratowych błędów estymacji dla obu typów opracowanych obserwatorów oraz
- wartości średnich i średniokwadratowych błędów śledzenia i opcjonalnie kryterium znaku w układach regulacji bazujących na obu typach opracowanych obserwatorów.

### 3. Uwagi, problemy dyskusyjne, pytania

#### 3.1 Implikacja Takagi-Sugeno

Sposób ewaluacji stopnia spełnienia (aktywacji) przesłanki złożonej reguły w oryginalnej (kanonicznej) metodzie wnioskowania rozmytego został zdefiniowany przez Takagi i Sugeno w [1] w postaci identycznej jak w implikacji Mamdaniego [2]. Do wyznaczenia stopnia spełnienia przesłanki złożonej reguły stosowany jest zgodnie w obu podejściach operator *min*. Tymczasem Doktorant w rozprawie stosuje w to miejsce operator iloczynowy *prod* ((1.2) – str. 17). Z punktu widzenia formalnego nie jest to zgodne z kanoniczną definicją implikacji Takagi-Sugeno.

Ponieważ operatory *min* i *prod* nie są równoważne, to powstają w związku z tym następujące pytania:

- a) Jaki był główny motyw (poza uproszczeniem przekształceń algebraicznych) wyboru operatora *prod* zamiast *min*?
- b) Czy dla dopełnienia formalizmu nie należałoby w związku ze zmianą operatora zaproponować dodatkowy deskryptor precyzujący odmienną zastosowanego podejścia do oryginalnej metody wnioskowania Takagi-Sugeno?
- c) Czy i w jakim stopniu zastosowany przez Doktoranta sposób ewaluacji przesłanek reguł ma wpływ na proces wnioskowania?
- d) Czy Doktorant dokonał oceny tego wpływu?

#### 3.2. Oznaczenie funkcji przynależności

Tradycyjnie, za propozycją Zadeh'a funkcję przynależności zwykło się oznaczać symbolem  $\mu$ . Tymczasem we wzorze (1.1) symbol ten ma znaczenie indeksu, co oczywiście samo przez się nie jest problemem, lecz narusza pewne niepisane konwencje.

#### 3.3. „Zmienne przesłanki”

W opisie symboli do reguły (1.1) Doktorant stosuje nieprawidłowo pojęcie „zmiennej przesłanki”. Przesłanką prostą przesłanki złożonej nie jest jak pisze Doktorant  $z_i(t)$ , ale  $\langle z_i(t) \text{ is } M_{ji} \rangle$ .

### 3.4. Definicja funkcji przynależności

Jeśli  $\omega_i(z(t))$  we wzorze (1.2) oznacza stopień spełnienia przesłanki  $i$ -tej reguły to  $h_i(z(t))$  we wzorze (1.5) nie wydaje się być funkcją przynależności jak pisze Doktorant.

### 3.5. System Takagi-Sugeno

Definicja werbalna systemu Takagi-Sugeno (str. 16) „*Model rozmyty Takagi-Sugeno jest opisany regułami „JEŻELI-TO”, które reprezentują lokalne relacje pomiędzy wektorem wejść i wyjść rozważanego systemu nieliniowego*” jest niewystarczająco precyzyjna.

Należałoby także nadmienić, że pojęcie model i system Takagi-Sugeno są w rozprawie używane zamiennie. Jest to oczywiście dopuszczalne, tak długo jak długo nie budzi to wątpliwości interpretacyjnych. Natomiast wszędzie tam, gdzie jest mowa o sterowaniu w odniesieniu do rzeczywistych obiektów, sterowaniu podlega nie system Takagi-Sugeno, ale sterowanie bazuje na modelu rozmytym obiektu sterowania, lub wykorzystywany jest sposób rozmytej identyfikacji parametrów modelu obiektu zaproponowany przez Takagi i Sugeno.

### 3.6. Ograniczenia kształtu funkcji przynależności

Wymagałoby wyjaśnienia powodu dlaczego Doktorant dość kategorycznie zawęża klasę stosowalnych funkcji przynależności w implikacji Takagi-Sugeno (str. 17/18). Zapewne wybór Doktoranta wynika nie tyle ze względów formalnych, co implementacyjnych, w tym zwłaszcza w zakresie możliwości zastosowania pewnych metod optymalizacyjnych.

### 3.7. „Część inkluzyjna”

Wymagające wyjaśnienia jest dość zaskakujące i trudne interpretacyjnie sformułowanie na str. 18. Cyt.: *”Natomiast część inkluzyjna [reguły] opisana jest metodami numerycznymi.”*

Zapewne chodzi nie o „*inkluzję*”, ale *konkluzję* reguły. Tylko, co do tego mają metody numeryczne?

### 3.8. Efektywność sterowania

Zasadniczymi miarami służącymi do oceny efektywności sterowania stosowanymi w pracy przez Doktoranta są wskaźniki wartości średniej i średniokwadratowej błędzie śledzenia. Prezentacja ich wyników w formie prezentacji wartości bezwzględnych nie jest najbardziej przyjazną formą ich szybkiej oceny. W związku z tym nasuwają się następujące pytania:

- Jakimi motywami kierował się Doktorant prezentując nieunormowane wartości obu wskaźników jakości regulacji?

- Skądinąd wiadomo, że w automatyce znane i stosowane są od dawna liczne inne kryteria jakości regulacji definiowane w dziedzinie czasu, np. wskaźniki czasowe, częstotliwościowe, całkowe, itp. Należałoby wyjaśnić dlaczego do oceny efektywności regulacji zastosowano akurat tylko proste wskaźniki statystyki opisowej, które nie pozwalają na pełną, wielowymiarową ocenę jakości (efektywności) regulacji?
- Ważnym elementem podnoszonym w ocenie jakości układu sterowania jest nie tylko zestaw wartości wskaźników jakości regulacji odnoszących się do wielkości sterowanych, ale także wysiłek regulatora odnoszący się do sygnału sterującego. Wydaje się, że ten element nie był analizowany w pracy.

### 3.9. Obserwator adaptacyjny z rozszerzonym wektorem stanu

Z lektury pracy i analizy wartości błędów estymacji wynika, że obserwator adaptacyjny z rozszerzonym wektorem stanu jest bardziej złożony i w zasadzie nie gwarantuje lepszej jakości estymacji niż prostszy obserwator adaptacyjny. W tej sytuacji wydaje się być zasadne pytanie, czy i w jakich warunkach tak nie jest?

### 3.10. Metodyka badawcza eksperymentalnej części pracy

Pewne zastrzeżenia metodologiczne budzi metodyka badawcza zastosowana w eksperymentalnej części pracy. Metodyka ta ma bowiem charakter wycinkowej, komparatywnej oceny wzajemnej jakości estymacyjnej obserwatorów i efektywności regulacji w odniesieniu wyłącznie do tych, które zostały opracowane w pracy. Zabrakło analizy porównawczej uzyskanych wartości wskaźników efektywności z ich odpowiednikami uzyskanymi innymi podejściami. W związku z tym nasuwa się pytanie jakie były powody, dla których Doktorant zrezygnował z przeprowadzenia rozszerzonej analizy porównawczej?

### 3.11. Uszkodzenie wielokrotne

Z lektury pierwszej strony rozprawy czytelnik może odnieść wrażenie błędnego rozumienia przez Doktoranta pojęcia uszkodzenia wielokrotnego. Zapewne to lapsus redakcyjny, ale prosiłbym o komentarz.

### 3.12. Schematy blokowe układów regulacji

W rozdziale 3.4 (str. 81) przedstawione jest zdjęcie stanowiska laboratoryjnego zestawu trzech zbiorników. Zestaw ten jest obiektem podlegającym sterowaniu. Samo zdjęcie ma jednak znaczenie wyłącznie ilustracyjne. W żaden sposób nie można na podstawie tego zdjęcia jednoznacznie odtworzyć schematu blokowego układu regulacji. Ta sama uwaga dotyczy także aerodynamicznego układu dwuwirnikowego przedstawionego w podrozdziale 3.4.

### 3.13. Rozkłady częstości empirycznych

W części eksperymentalnej pracy prezentowane są liczne rozkłady częstości empirycznych odchyłek regulacji dla różnych układów regulacji. Zwróciłbym uwagę na następujące aspekty:

- analizowane obiekty sterowania nie posiadają właściwości statycznych,
- rozkłady są silnie zależne od dynamiki sterowanego obiektu i wartości odpowiednich elementów macierzy  $A$  i  $B$ ,
- rozkłady częstości empirycznych w zasadzie nie są komentowane w pracy.

### 3.14. Koszt identyfikacji elementów macierzy modelu Takagi-Sugeno

Pewnym niedostatkim pracy jest brak poszerzonej dyskusji dotyczącej szacunku kosztów (obliczeniowego lub czasowego) identyfikacji elementów macierzy  $A$  i  $B$  modelu Takagi-Sugeno przedstawionych w dodatku do pracy. Pewne wnioski z takiej dyskusji w jakiś sposób pozwoliłyby na wypracowanie odpowiednich rekomendacji, co do potencjalnej aplikacyjności procesowej prezentowanych podejść.

## 4. Redakcja rozprawy

W zasadzie redakcja rozprawy nie odbiega od pewnego, tradycyjnego wzorca dysertacji doktorskich. Teza pracy, krótkie podsumowania poszczególnych rozdziałów i uwagi końcowe spinające rozprawę swoistą klamrą świadczą o dobrym przygotowaniu Doktoranta do uporządkowanego wykładu swoich racji. Indeks, wykaz symboli i skrótów oraz liczne odnośniki ułatwiają czytanie pracy.

Rozprawa składa się z czterech rozdziałów i dodatku. Pierwszy rozdział poświęcony jest wprowadzeniu, ostatni podsumowaniu pracy. Zasadniczymi, merytorycznymi rozdziałami pracy są rozdziały poświęcone estymacji stanu i uszkodzeń (Rozdział 2) i sterowaniu tolerującemu uszkodzenia (Rozdział 3). W pewnym stopniu układ tych ostatnich dwóch rozdziałów odzwierciedla podstawowe zamierzenia rozprawy sformułowane zarówno w tezie jak i przedstawione w tytule pracy. Przyjętą strukturę pracy uznałbym za racjonalną i przejrzystą.

Uważam jednak, że zawartość rozdziału pierwszego oraz poziom ogólności wniosków i sformułowań zawartych w rozdziale czwartym mogłyby być zdecydowanie lepsze. Wymienię w tym miejscu kilka uwag dotyczących tych dwóch rozdziałów, których zastosowanie moim zdaniem mogłyby poprawić przekaz i jakość rozprawy.

Rozdział 1. Wprowadzenie.

Wprowadzenie do pracy powinno odzwierciedlać erudycję Doktoranta w zakresie tematyki rozprawy. Oczekiwana formą ukształtowania tej części rozprawy jest potrzeba przeprowadzenia poszerzonej analizy krytycznej źródeł, identyfikacji problemu, przedstawienie przekonującej motywacji podjęcia tematyki pracy, sformułowanie celu i tezy pracy oraz projekcja zamierzeń pracy.

Niestety, nie wszystkie te elementy są prezentowane we wprowadzeniu. W szczególności:

- brak jest pogłębionej analizy krytycznej przynajmniej najważniejszych źródeł literaturowych. W to miejsce Doktorant w zasadzie tylko enumeratywnie wymienia wybór znanych podejść,
- opisane struktury układów tolerujących uszkodzenia reprezentują tylko pewną klasę takich układów, których stosowalność w praktyce jest ograniczona, ze względu na brak ich odporności na uszkodzenia katastroficzne,
- brak jest przekonującej motywacji podjęcia tematu pracy. W to miejsce przedstawiono w zasadzie tylko cele naukowe pracy,
- pewne trywializmy (por. str. 1) mogłyby bez szkody dla pracy zostać z niej usunięte.

#### Rozdział 4. Podsumowanie.

Podsumowanie pracy powinno zwyczajowo odzwierciedlać wyniki pracy, zawierać pewne uogólnienia, wnioski i uwagi oraz przedstawiać propozycję lub projekcję dalszych prac w zakresie tematyki pracy wskazując na napotkane problemy w trakcie jej realizacji. Powinno też, a może przede wszystkim, odnieść się do stopnia realizacji celu badawczego zdefiniowanego w tezie pracy.

Niestety, pierwsze czytanie podsumowania pracy nie robi najlepszego wrażenia ze względu na:

- brak syntetycznego ujęcia podstawowych wyników pracy,
- nadmierną skłonność do zbytniego eksponowania szczegółów, które i tak są omawiane w treści pracy,
- brak ekspozycji możliwych wdrożeń przemysłowych wyników pracy,
- dość skromna projekcja dalszych kierunków rozwoju prac.

Pozytywnie należy natomiast ocenić przedstawioną w podsumowaniu charakterystykę wkładu pracy w rozwój dziedziny.

#### Bibliografia

Dobór źródeł bibliograficznych nie budzi większych zastrzeżeń. Ze względu na tematykę rozprawy należałoby ją ewentualnie uzupełnić chociażby o podstawową monografię z zakresu sterowania tolerującego uszkodzenia (Blanke *et al.*, 2016) czy publikację ściśle dotyczącą tematyki rozprawy (Thumati *et al.*, 2014).

- 
- [1]. Takagi T. and M. Sugeno (1985): *Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modelling and Control*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 15(1), 116-132.
  - [2]. Mamdani, E.H. (1974): *Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant*, Proceedings of the IEEE, 12(121), IET Digital Library.
  - [3]. Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M., J. Schröder, (2016). *Diagnosis and fault-tolerant control*. Berlin: Springer.
  - [4]. Thumati, M.A., Feinstein, S. and S. Jagannathan (2014): *A Model-Based Fault Detection and Prognostics Scheme for Takagi–Sugeno Fuzzy Systems*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 4(22), 736-748

## 5. Edycja rozprawy

Uważam, że strona edycyjna rozprawy zasługuje na pewną, aczkolwiek moim zdaniem zasłużoną dozę krytycyzmu.

Czytelnik rozprawy może odnieść wrażenie wyraźniej nierówności stylu, mieć zastrzeżenia do stosowanej terminologii, precyzji sformułowań, czy stosowania skrótów myślowych. Krytycznie pod tym względem oceniłbym zwłaszcza rozdział 1 (Wprowadzenie) i rozdział 4 (Podsumowanie) pracy.

Z pewnym zażenowaniem należy stwierdzić, że korekta językowa pracy została przeprowadzona w stopniu niewystarczającym. Skutkuje to licznymi błędami interpunkcyjnymi, typograficznymi, ortograficznymi, stylistycznymi i nomenklaturowymi. Poniżej zostanie przedstawionych tylko kilka wybranych przykładów.

### Sformułowanie tytułu rozprawy

Ze sformułowania tytułu rozprawy wynika, że proponowane metody estymacji i sterowania tolerującego uszkodzenia dotyczą systemów Takagi-Sugeno.

W tym miejscu należałoby podkreślić, że formalnie T. Takagi i M. Sugeno (1985) zaproponowali nie tyle system, co oryginalną metodę modelowania i identyfikacji systemów bazującą na regułowym wnioskowaniu rozmytym. W tym kontekście, występujące w tytule pracy sformułowanie „system Takagi-Sugeno”, należy interpretować raczej w kategorii skrótu myślowego i utożsamiać je z „opisem systemu wykorzystującym rozmyty model Takagi-Sugeno” (por. (1.1) str. 16). Z drugiej strony, na obronę chciałbym dodać, że w literaturze przedmiotu funkcjonuje pojęcie systemu T-S, choć często okraszane dodatkowymi deskryptorami.

### Sformułowanie tezy rozprawy

Ze sformułowania tezy rozprawy wynika fakt istnienia bliżej nieokreślonych komponentów systemu Takagi-Sugeno. Doktorant przytacza, co prawda, definicję uszkodzenia komponentu (str. 3), ale nie podaje niestety definicji lub interpretacji uszkodzenia komponentów systemu Takagi-Sugeno. Czytelnik rozprawy może się jedynie domyślać, że komponent systemu Takagi-Sugeno to eufemizm, pod którym kryją się albo komponenty fizyczne systemów, (na co wskazuje część eksperymentalna pracy) albo komponenty abstrakcyjne.

### Terminologia

#### a) Czujnik

W niezrozumiały sposób, zaburzając symetrię stylistyczną, Doktorant stosuje konsekwentnie w pracy pojęcia elementów wykonawczych i czujników. Tymczasem od lat dobrze ugruntowane w polskiej terminologii technicznej są pojęcia elementów wykonawczych i elementów pomiarowych. Pod pojęciem czujnik rozumiany jest element przetwarzający bezpośrednio wartość wielkości



mierzonej na wartość innej wielkości fizycznej – najczęściej elektrycznej. Bezpośrednie stosowanie czujników pomiarowych ma marginalne znaczenie w układach automatyki. Natomiast są one natomiast stosowane powszechnie, jako komponenty elementów pomiarowych. Należałoby jednak podkreślić, że w literaturze anglosaskiej pojęcie sensor stosowane jest często zamiennie w obu znaczeniach, w tym zwłaszcza w pracach o charakterze teoretycznym.

## b) Definicje

W rozdziale 1 pracy sformułowano dwanaście definicji. Definicje 1.1 i 1.3 są literalnymi tłumaczeniami definicji Komitetu IFAC TC6.4 Safeprocess. Brak odniesienia do źródła tych definicji sugeruje, że mogą być to definicje własne Doktoranta.

Definicje 1.2 i 1.4 są niepełne i mylące.

Definicja 1.2. definiująca uszkodzenie elementu wykonawczego, jako „...zmianę sygnału wyjściowego zastosowanego do sterowanego obiektu” jest nieprawidłowa. Po pierwsze nie konweniuje z definicją 1.1. Po drugie odnosi się do pośredniego skutku uszkodzenia. Po trzecie jest niejednoznaczna, ponieważ zmiana sygnału sterującego może być także skutkiem kompensacji zakłóceń, lub np. być wywołana zmianą wartości zadanej, itp.

Definicja 1.4. definiująca uszkodzenie elementu pomiarowego, jako „...zmianę rzeczywistego pomiaru otrzymanego z wyjścia systemu” jest nieprecyzyjna. Po pierwsze pomiar to czynność. W wyniku wykonania pomiaru otrzymywana jest wartość wielkości mierzonej. Po drugie, zawężenie definicji do bliżej nieokreślonego wyjścia systemu nie jest w tej definicji konieczne.

## c) Przykłady braku precyzji sformułowań lub skrótów myślowych.

Przytoczę tylko kilka wybranych wyimków ilustrujących niedostatki frazeologiczne tekstu rozprawy. Wszystkie przykłady pozostawię bez komentarza ze względu na ich specyficzną semantykę:

- „... częściowa skuteczność elementu wykonawczego” (str.2);
- „... niedokładność pomiaru czujnika” (str. 3);
- „... 1.4. Predykcja pozostałej żywotności” (str. 12)
- „... dla obiektów związanych z bardzo niskim poziomem wydajności” (str. 7);
- „... duża ilość danych obciążonych szumami musi zostać przekształcona w informację logiczną...” (str. 14);
- „... zbyt stochastyczny” (str. 14),
- „... uszkodzenia pomiaru” napięcia lub prądu (Rys. 2.6, Rys. 2.7),
- „... niedokładność pomiaru” (str. 82),
- „... utrata skuteczności pompy cieczy” (str. 82)
- „... wartości dodatnie i ujemne uszkodzeń czujnika” (str. 82)
- „... regulator FTC zaczął tracić nastawę” (sic!) str. 127.

## 6. Konkluzja

Uważam, że Doktorant przedstawił oryginalne i potencjalnie aplikowalne podejście do syntezy rozmytych estymatorów uszkodzeń oraz do ich wykorzystania zarówno w odniesieniu do diagnostyki procesów jak i sterowania tolerującego uszkodzenia. Podejście to może być uznane za systematyczne lub kompletne w tym sensie, że proponuje dobrze zdefiniowaną metodykę i algorytm projektowania estymatorów uszkodzeń bazujących na rozmytym modelu wnioskowania Takagi-Sugeno. Uzyskane przez Doktoranta wyniki przeprowadzanych walidacyjnych badań eksperymentalnych stanowią dobry prognostyk w kierunku prowadzenia badań stosowanych.

Doktorant wykazał się szeroką wiedzą i biegłością w zakresie teorii sterowania, diagnostyki procesów, informatyki stosowanej oraz w zakresie przygotowania warsztatu badawczego. Zademonstrował umiejętność samodzielnego planowania, realizacji i oceny wyników eksperymentalnych prac badawczych.

Z przykrością muszę jednak stwierdzić, że Doktorant nie wykazał się nadmierną starannością w zakresie opracowania edycyjnego pracy.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenia, oświadczam, że recenzowana rozprawa doktorska pana mgr inż. Norberta Kukurowskiego pt. *„Metody estymacji uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia dla systemów Takagi-Sugeno”*, mimo podniesionych zastrzeżeń, spełnia wszystkie wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora zawarte w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dziennik Ustaw z 2023 roku, poz. 742 ze zmianami) i może być dopuszczona do publicznej obrony w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Warszawa, 20-01-2024

