

Łódź, 8 czerwca 2022 r.

Prof. Andrzej Bartoszewicz
członek korespondent PAN
Instytut Automatyki
Politechniki Łódzkiej
ul. Stefanowskiego 18
90-537 Łódź

Recenzja rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Marcina Pazery

pt.: Integrated fault diagnosis and fault-tolerant control strategies for multiple faults of dynamic systems

opracowana na zlecenie Uniwersytetu Zielonogórskiego

promotor rozprawy: dr hab. inż. Robert Smoleński, prof. UZ

Recenzowana rozprawa doktorska poświęcona jest, ważnym zarówno z praktycznego jak i naukowego punktu widzenia zagadnieniom estymacji stanu oraz uszkodzeń urządzeń wykonawczych i czujników pomiarowych, a także sterowaniu tolerującemu uszkodzenia. Chociaż na system mogą oddziaływać zarówno uszkodzenia urządzeń wykonawczych jak i czujników pomiarowych, w dostępnej literaturze często przyjmuje się do rozważań tylko jeden rodzaj uszkodzeń, na przykład wyłącznie uszkodzenia czujników. Wówczas zakłada się, że drugi rodzaj uszkodzeń nie wpływa na diagnozowany i sterowany system. Mimo zastosowania tego uproszczenia, takie podejście może dawać zadowalającą dokładność otrzymanej estymaty uszkodzeń, jednak jest tak tylko w pewnym, ograniczonym obszarze zastosowań. Przyjęcie do analizy tylko jednego rodzaju uszkodzeń stanowi pewne zaniedbanie w analizie części systemu. Co więcej, sterowanie tolerujące uszkodzenia dla uproszczonego systemu, w którym w analizie pomijana jest część uszkodzeń, nie daje stuprocentowej niezawodności systemu. Aby uniknąć tego problemu w przedstawionej do recenzji rozprawie Doktorant zajmuje się technikami i metodami projektowania estymatorów dla celów diagnostyki *wielokrotnych* uszkodzeń systemów nieliniowych. Biorąc pod uwagę przytoczone fakty, problem podjęty przez Doktoranta należy uznać za ważny i aktualny. Wybór tej tematyki uważam za bardzo trafny również dlatego, że zajmując się tym zagadnieniem Doktorant mógł korzystać z ogromnego doświadczenia i imponującej wiedzy zespołu z Uniwersytetu Zielonogórskiego od lat z dużymi sukcesami zajmującego się problematyką wykrywania uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia.

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje swym zakresem techniki i metody projektowania estymatorów stanu i uszkodzeń urządzeń wykonawczych, czujników pomiarowych, jak i występujących jednocześnie uszkodzeń urządzeń wykonawczych i czujników dla systemów liniowych i nieliniowych. Ponadto rozprawa dotyczy także metod projektowania sterowania tolerującego uszkodzenia z zastosowaniem technik sprzężenia od wyjścia lub stanu. Wynikiem prac Doktoranta jest analiza teoretyczna i synteza algorytmów diagnostyki i sterowania wraz z

ich weryfikacją z zastosowaniem technik symulacji komputerowych. Autor przyjmuje, że system nieliniowy jest klasy Lipschitza i może być opisany z zastosowaniem teorii zbiorów wypukłych, co prowadzi do opisu liniowego o zmiennych parametrach. Ponadto, Doktorant bierze pod uwagę wpływ niepewności procesu i szumów pomiarowych na diagnozowany i sterowany system oraz zakłada możliwość odtworzenia niedostępnego pomiarowo stanu systemu. Uzyskane przez Doktoranta rezultaty obejmują:

- opracowanie algorytmów pozwalających na estymację stanu i uszkodzeń urządzeń wykonawczych i/lub czujników pomiarowych systemów liniowych i nieliniowych,
- opracowanie algorytmów sterowania pozwalających na tolerancję uszkodzeń wielokrotnych,
- weryfikację skuteczności opracowanych algorytmów.

Postawiona w rozprawie teza o możliwości efektywnego sterowania systemami w obecności wielokrotnych uszkodzeń sformułowana jest jasno i nie budzi wątpliwości. Z pewnością można również stwierdzić, że zarówno problem, którym zajął się Doktorant, jak i sposób jego rozwiązania, a także zastosowane do tego celu narzędzia i metody świadczą o tym, że rozprawa doktorska magistra inżyniera Marcina Pazery nie tylko z powodzeniem mieści się w zakresie dyscypliny automatyka elektronika i elektrotechnika, a w szczególności w obszarze automatyki i robotyki, ale należy do jednego z najważniejszych i najbardziej aktualnych nurtów badań w tej dyscyplinie.

Rozprawa doktorska napisana jest po angielsku, liczy 121 stron i obejmuje: wykaz symboli i skrótów, wprowadzenie wraz z przeglądem rozwiązań prezentowanych w literaturze zawarte w rozdziale pierwszym oraz własne rozwiązania problemów badawczych postawionych przez Autora zamieszczone w rozdziałach od drugiego do piątego. Końcowa część pracy zawiera podsumowanie i wykaz literatury zawierający 118 dobrze wybranych pozycji, w tym 15 prac, których współautorem jest Doktorant. Warto dostrzec, że własne prace, na które powołuje się Doktorant nie są – jak często zdarza się w rozprawach doktorskich – wyłącznie referatami konferencyjnymi, lecz ukazały się także w prestiżowych czasopiśmie, między innymi takich jak: *ISA Transactions*, *International Journal of Systems Science*, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* oraz *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. Trzeba jednak zauważyć, że wszystkie prace zawarte w tym wykazie omówione są dość pobieżnie, co pozostawia pewien niedosyt czytelnika rozprawy.

We wstępie Doktorant omówił zagadnienia potrzebne do sformułowania tezy rozprawy oraz związanych z nią celów szczegółowych. Tematyka badawcza dotyczy przede wszystkim diagnostyki systemów oraz sterowania tolerującego uszkodzenia wielokrotne. Autor skoncentrował się na zastosowaniu metod analitycznych, a w pracy założył, że dostępny jest model analityczny badanego systemu. Ponadto, Autor podkreślił, że rozważany system cechują niepewności procesu i szumy pomiarowe. Co więcej, w pracy założył, że na system mogą działać jednocześnie uszkodzenia zarówno urządzeń wykonawczych, jak i czujników pomiarowych. W rozdziale pierwszym Doktorant formalnie postawił tezę, która odnosi się do możliwości opracowania efektywnego sterowania w warunkach uszkodzeń przy użyciu zintegrowanych strategii odpornego sterowania i estymacji uszkodzeń wielokrotnych, minimalizując wpływ szumów i niepewności procesu. W dalszych rozdziałach przedstawił swoje własne wyniki. W rozdziale drugim opisał metody estymacji uszkodzeń urządzeń wykonawczych, z pominięciem

możliwości wystąpienia uszkodzenia czujników. Najpierw przedstawił estymację dla układu liniowego, a następnie jej uogólnienie – opracowane z użyciem teorii systemów liniowych o zmiennych parametrach (ang. *Linear Parameter Varying*, LPV) – na układy nieliniowe. Dalej, jako przykład Doktorant pokazał zastosowanie estymacji do nieliniowego modelu helikoptera o dwóch stopniach swobody. W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił metodę wykrywania uszkodzeń czujników, analogicznie do poprzedniego rozdziału zakładając, że nie będzie występowała jednocześnie awaria urządzeń wykonawczych. Podobnie jak w poprzednim rozdziale Doktorant zaproponował estymator najpierw dla układu liniowego, po czym uogólnił go na układy nieliniowe. Następnie wykrywanie awarii czujników Doktorant zweryfikował w układzie trzech zbiorników cieczy. Rozdział czwarty łączy podejścia przedstawione w rozdziałach drugim i trzecim i przedstawia metodę jednoczesnego wykrywania uszkodzeń urządzeń wykonawczych i czujników. Tak samo jak w dwóch poprzednich rozdziałach przedstawione podejście zostało najpierw opracowane dla układów liniowych, a później uogólnione na układy nieliniowe. Działanie zaproponowanej metody Doktorant zweryfikował w tym samym układzie co w rozdziale trzecim, z tym że dodatkowo dopuścił możliwość awarii urządzeń wykonawczych. Ponadto, porównał działanie tej metody z algorytmami przedstawionymi w poprzednich rozdziałach. Wszystkie rozwiązania przedstawione przez Doktoranta w rozdziałach drugim, trzecim i czwartym dotyczyły wyłącznie estymacji stanu i uszkodzeń w systemie. We wszystkich symulacjach przedstawionych w tych rozdziałach układ działał w pętli otwartej, a przebieg sygnału sterującego był z góry zadany. Z kolei w rozdziale piątym Doktorant zaproponował dwa regulatory tolerujące uszkodzenia: jeden ze sprzężeniem zwrotnym od stanu, a drugi ze sprzężeniem od wyjścia układu. Podobnie jak we wszystkich wcześniejszych rozdziałach, najpierw przedstawił rozwiązanie dedykowane dla układów liniowych a następnie dla nieliniowych. Tym razem rezultaty teoretyczne zweryfikował w symulacjach modelu helikoptera o dwóch stopniach swobody (takim samym jak w rozdziale drugim). Dodatkowo, działanie zaproponowanych rozwiązań porównał z klasycznym liniowym sprzężeniem od zmiennych stanu i obserwatorem Luenbergera zastosowanym do estymacji niemierzonych zmiennych stanu. Rozwiązanie zaproponowane przez Doktoranta działa lepiej, co nie jest zaskakujące ponieważ to do którego było porównywane z założenia nie jest przeznaczone dla układów nieliniowych. Rozdział szósty zawiera podsumowanie pracy.

Podsumowując omówienie głównych treści rozprawy doktorskiej pana magistra Marcina Pazery, z przekonaniem stwierdzam, że wykazał się on umiejętnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów badawczych, właściwą wiedzą w zakresie współczesnych metod automatyki oraz umiejętnością wykorzystywania nowoczesnych technik obliczeniowych i komputerowych narzędzi inżynierskich.

Cała rozprawa jest opracowaniem interesującym i wartościowym. Za oryginalne wyniki uzyskane przez Doktoranta bez wątpienia należy uznać: opracowanie strategii odpornej estymacji uszkodzeń urządzeń wykonawczych dla systemów liniowych i nieliniowych, opracowanie strategii odpornej estymacji uszkodzeń czujników pomiarowych dla systemów liniowych i nieliniowych, opracowanie strategii odpornej estymacji uszkodzeń urządzeń wykonawczych i czujników pomiarowych występujących jednocześnie dla systemów liniowych i nieliniowych, opracowanie strategii odpornego sterowania ze sprzężeniem od wyjścia dla systemów liniowych i nieliniowych oraz opracowanie strategii odpornego sterowania ze sprzężeniem od stanu dla systemów liniowych i nieliniowych. Przedstawione wyniki prac

teoretycznych Doktorant zastosował do zadań diagnostyki uszkodzeń, w tym estymacji uszkodzeń urządzeń wykonawczych i czujników pomiarowych oraz sterowania tolerującego uszkodzenia dwóch układów laboratoryjnych, tj. aerodynamicznego układu dwóch wirników oraz układu trzech zbiorników cieczy. Moim zdaniem magister inżynier Marcin Pazera udowodnił tezę i zrealizował cele szczegółowe rozprawy, wykazując się przy tym wiedzą i dużymi umiejętnościami w zakresie: diagnostyki uszkodzeń i sterowania tolerującego uszkodzenia oraz nowoczesnych technik i metod automatyki. Wykazał się także umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów teoretycznych i inżynierskich.

Dodatkowym argumentem przemawiającym za pozytywną oceną badań Doktoranta jest ich opublikowanie w 15 współautorskich artykułach, rozdziałach i referatach konferencyjnych, a przede wszystkim w artykułach w następujących – wcześniej już przeze mnie wymienionych – czasopismach: *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, *ISA Transactions*, *International Journal of Systems Science* oraz *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*.

W trakcie czytania rozprawy nasunęły mi się także uwagi szczegółowe, głównie o charakterze porządkowym, dyskusyjnym oraz polemicznym. Część z nich przytaczam poniżej:

- Rozprawa dotyczy sterowania układem 1.4, 1.5. Wobec tego przedstawienie równań 1.1 i 1.2 nie było konieczne, ponieważ ten bardziej ogólny model nie jest w rozprawie rozważany.
- Na stronie 11, we wzorze 2.12 macierz Q_d powinna być dodatnio, a nie ujemnie określona.
- Założenie o elipsoidalnych ograniczeniach wektora \vec{d} , w którym występują między innymi zakłócenia pomiarowe, nie jest w pełni przekonujące. Takie założenie oznacza bowiem, że na przykład zakłócenia pomiarowe jednej ze zmiennych zależą od zakłóceń pomiarowych innych zmiennych, czyli nie mogą wystąpić jednocześnie chociażby maksymalne zakłócenia pomiarowe wszystkich zmiennych. W rzeczywistości zakłócenia pomiarowe różnych zmiennych stanu na ogół nie są ze sobą skorelowane i to założenie prawdopodobnie nie będzie spełnione.
- Na stronie 12, w pierwszym zdaniu dowodu zamiast Theorem 4.2 powinno być napisane Theorem 2.2.
- We wzorach 2.17 (strona 12), 2.53 (strona 17), 3.18 (strona 39), 4.52 i 4.53 (strona 66), lewa i prawa strona nierówności są wielkościami skalarnymi. Dlatego w tych wzorach Doktorant powinien użyć zwykłego znaku nierówności „ $<$ ” zamiast symbolu zastosowanego w pracy.
- We wzorze 2.37 pojawia się zbędny nawias zamykający.
- Na stronie 16 Doktorant napisał „as a result of applying Lemma 1, the ...”, podczas gdy prawdopodobnie chodziło mu o lemat 2.5, a nie lemat 1.
- Wielokrotnie w rozdziałach „Final design procedure” Doktorant posługuje się pojęciem „seed”, które ma związek z generatorami liczb losowych. Czytając pracę ma się wrażenie że słowo „seed” powinno być zastąpione przez słowo „step” ponieważ liniowe nierówności macierzowe rozwiązywane są dla różnych wartości np. parametru α , zmieniając ten parametr ze stałym krokiem a nie losowo. Jednak i po takiej modyfikacji tekst nie jest jasny. Odnoszę wrażenie, że wielu tego typu niejasności dałoby się w całej pracy uniknąć, gdyby została ona napisana z większą starannością.

- Na wykresach 2.3 i 3.3 na osiach pionowych prawdopodobnie nie powinny występować częstotliwości, lecz liczby pomiarów (po angielsku counts) o danym odchyleniu. Gdyby miałyby to być częstotliwości to powinna być podana jej jednostka. Brakuje też jednostek na osiach poziomych. Ich zamieszczenie z pewnością pomogłoby czytelnikowi ocenić jak precyzyjne czujniki zostały zastosowane.
- Zgodnie ze wzorem 2.68 na stronie 23 wielkości $\tilde{d}_{i,k}$ są skalarami, więc we wzorze 2.67 na tej samej stronie nie powinny być zapisane wyłuszczonej czcionką.
- We wzorze 2.69 na stronie 23 element 0.0003 oznacza że sygnał sterujący drugiego, „tylnego” wirnika generuje przyspieszenie kątowe w osi pitch. Jest to logiczne, bowiem przyspieszając masę wirnika całość helikoptera będzie próbowała poruszyć się w przeciwną stronę. Dlaczego jednak nie zostało uwzględnione analogiczne oddziaływanie pierwszego sygnału sterującego na przyspieszenie w osi yaw, a więc dlaczego piąty element pierwszej kolumny równy jest dokładnie zero?
- Na wykresie 2.5 na stronie 25 parametr α może zmieniać się od zera do jednego. Nie jest więc jasne, dlaczego ten wykres „kończy się” przy wartości argumentu około dziewięć dziesiątych. Podobna uwaga odnosi się do analogicznych wykresów zamieszczonych w pracy, tj. wykresu 3.4 na stronie 49, wykresu 5.2 na stronie 98 oraz wykresu 5.3 na stronie 99.
- W zasadzie na wszystkich wykresach pokazujących wyniki symulacji brakuje jednostek mierzonych wartości, zmiennych stanu itd. Ponadto wydaje się, że wszystkie rezultaty są otrzymane dla symulacji komputerowych, co nie jest jasno powiedziane w pracy, a zamieszczenie zdjęć prawdziwych układów sugeruje, że były to rzeczywiste eksperymenty laboratoryjne.
- Nasuwa się oczywista uwaga w odniesieniu do wzorów 2.77 na stronie 33, 3.57 na stronie 53 i 5.103 na stronie 106. Taki wskaźnik jakości nie odzwierciedla właściwie jakości (precyzji) regulacji, ponieważ dodatnie i ujemne uchyby mogą się wzajemnie znosić.
- Na stronie 44 Autor rozprawy napisał: „The PWM signal is also used to attain the desired pump attitude.” Nie jest jasne co ma znaczyć słowo attitude w odniesieniu do pompy.
- Na stronie 48 Doktorant napisał „it is guaranteed that a chance of finding of a local extreme of optimisation is reduced to minimum”. W jakim sensie jest to zagwarantowane? Wydaje się, że jeszcze mniejszy krok dawałby jeszcze większą pewność.
- W opisie pod wzorem 4.67 na stronie 70 „Such involved fault scenario with pre-defined fault profiles, allows for investigating abrupt loss of efficiency of the pump and then slow fluctuation of its degradation.” nie mogę dostrzec związku z wyżej przedstawionymi równaniami. Przecież w pokazanym wzorze definiującym wielkość $f_{i,k}$, która określa awarię pompy nie ma „fluktuacji”.
- Na stronie 87 Autor rozprawy napisał „The question that might be placed at this point is why not to use the real state or the output of the system? The answer for such a raised question is based on a few premises”. Z drugim i trzecim punktem wyjaśnienia należy się zgodzić, ale pierwszy: „First of all, the state might be affected by the actuator fault.” wydaje się dyskusyjny. Przecież nawet jeśli prawdziwy stan układu jest zmieniony pod wpływem uszkodzenia, to i tak ten prawdziwy stan należy doprowadzić do stanu zadanego.
- Na stronie 107 czytamy „Even the arithmetic mean values which is sensitive for outliers is at a very low level.” Pomijając uchybienie gramatyczne występujące w tym zdaniu, trzeba zauważyć, że spośród dwóch przedstawionych miar – średniej arytmetycznej i średniego

kwadratu błędu – to akurat ta druga miara, poprzez podnoszenie próbek do kwadratu jest bardziej wrażliwa na „outliers” czyli pojedyncze, znacznie odbiegające od rzeczywistości wartości pomiarów.

Wyżej wymienione uwagi nie mają wpływu na moją pozytywną ocenę całości rozprawy, tym samym nie powodują konieczności zmian ani uzupełnień. Przedstawione wyniki stanowią rozwiązanie istotnego problemu naukowego, a także dobrze świadczą o ogólnej wiedzy teoretycznej Doktoranta oraz o jego umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Marcina Pazerę rozprawa spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z późniejszymi zmianami i wnioskuję o dopuszczenie go do publicznej obrony.