

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

Szczecin, dnia 2 czerwca 2022 r.

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ NA ZLECENIE SENATU UNIWERSYTETU ZIELONOGÓRSKIEGO

Tytuł rozprawy: **Integrated fault diagnosis and fault-tolerant control strategies for multiple faults of dynamic systems**

Autor rozprawy: **mgr inż. Marcin Pazera**

### **I. Cel, zakres i charakter rozprawy**

Recenzowana rozprawa dotyczy budowy algorytmów estymacji uszkodzeń urządzeń wykonawczych i pomiarowych oraz układów sterowania tolerujących te uszkodzenia. Autor rozprawy włączył się w nurt badań prowadzonych przez grupy badawcze z kraju i zagranicy i postanowił opracować algorytmy estymacji i sterowania zapewniające skuteczne wykrywanie uszkodzeń z jednoczesnym zapewnieniem niezakłóconej stabilnej pracy układu sterowania.

Teza pracy została przedstawiona na stronie czwartej pracy i brzmi:

**Teza:** Możliwe jest efektywne sterowanie obiektem dynamicznym w obecności uszkodzeń wykorzystując do tego zintegrowane metody sterowania odpornego i estymacji wielokrotnych uszkodzeń z jednoczesnym uwzględnieniem szumów i niepewności modelowania oraz niepełnej wiedzy o uszkodzeniach.

Praca wpisuje się bardzo dobrze w dotychczasowe osiągnięcia w tym zakresie i stanowi ważne uzupełnienie znanych już rozwiązań. Realizacja tego zadania jest trudna do analizy od strony teoretycznej jak i w praktycznej realizacji. Wymaga znajomości i umiejętności zastosowania skomplikowanych algorytmów teorii sterowania, dużej wiedzy z zakresu modelowania układów dynamicznych, analizy, syntezy i implementacji algorytmów automatycznego sterowania.

Badania te, mają w mojej ocenie potencjalnie bardzo duże zastosowanie praktyczne, umożliwiają bowiem konstrukcję efektywnych algorytmów estymacji, a z ich wykorzystaniem, i na ich podstawie, algorytmów sterowania odpornego tolerującego uszkodzenia obiektu sterowania. Mogą potencjalnie znaleźć zastosowania w niemal każdym urządzeniu i instalacji przemysłowej poprawiając tym samym ciągłość i bezpieczeństwo ich pracy.

Uważam, że tak postawione zadanie i określone cele rozprawy są zadaniem ambitnym od strony teoretycznej, ciekawym od strony poznawczej i potrzebnym ze względów praktycznych. Są istotne i aktualne na tle obecnego stanu wiedzy, stanowiąc oryginalne zadanie badawcze.

## **II. Zawartość merytoryczna rozprawy**

Rozprawa liczy 121 stron i została podzielona na pięć rozdziałów, podsumowanie i spis literatury. Ich uzupełnienie stanowią umieszczone na początku rozprawy wykazy: rysunków, tablic, skrótów i oznaczeń. Praca napisana jest w języku angielskim.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do zasadniczej części rozprawy, w którym Autor przedstawia tezę pracy oraz formułuje jej cele. Zawarto tam też krótki, aczkolwiek rzeczowy i wyczerpujący przegląd literatury oraz aktualny stan wiedzy i trendów badań w zakresie metod wrywania uszkodzeń i algorytmów sterowania je tolerujących. Przegląd ten potwierdza gruntowną wiedzę Autora z zakresu przedmiotu oraz potwierdza właściwe ugruntowanie tematyki badań.

Zasadniczą część pracy stanowią rozdziały od drugiego do piątego.

W rozdziale drugim Autor analizuje problem i przedstawia autorskie metody syntezy estymatorów uszkodzeń urządzeń wykonawczych. Opracowane metody pozwalają na estymację uszkodzeń zarówno liniowych jak i nieliniowych obiektów sterowania. Wynikiem analizy teoretycznej jest opracowana procedura syntezy estymatora stanu i uszkodzeń urządzeń wykonawczych obiektu sterowania. Rozważania i ich wyniki poddano weryfikacji praktycznej, wykorzystując do tego laboratoryjny model aerodynamicznej maszyny dwuwirnikowej.

Podobnie zorganizowano kolejne rozdziały, w których po analizie teoretycznej problemu, ścisłych dowodach stabilności estymatorów i propozycji stosownego algorytmu przedstawia się wyniki eksperymentów ilustrujące skuteczność opracowanych metod.

I tak, w rozdziale trzecim analizuje się problemy uszkodzeń czujników pomiarowych. Autor proponuje specjalną konstrukcję estymatora stanu i uszkodzeń sensorów, w wersji zarówno dla obiektów liniowych jak i nieliniowych. Opracowana metoda syntezy estymatora jest następnie poddana weryfikacji z wykorzystaniem laboratoryjnego układu trzech zbiorników.

W rozdziale czwartym przedstawia się estymator stanu oraz uszkodzeń urządzeń wykonawczych i pomiarowych sterowanego urządzenia. Nie jest to proste połączenie dwóch wcześniejszych propozycji – nie może takim być – ale stanowi dedykowany zestaw równań opisujących jego działanie. Wykorzystując opracowany tu algorytm w rozdziale piątym Autor proponuje dwa układy sterowania tolerujące uszkodzenia, jednoczesne uszkodzenia urządzeń wykonawczych i pomiarowych obiektu. Pierwszy z nich skonstruowano na bazie sprzężenia zwrotnego od wyjść, drugi sprzężenia od stanu sterowanego obiektu.

W każdym algorytmie uwzględnia się niepewna wiedzę o uszkodzeniach i zakłóceniach oddziałujących na sterowany obiekt. Zasadniczym elementem jest tutaj wykorzystanie metody wykorzystywanej dotąd do syntezy układów sterowania odpornego QB, z ang. Quadratic Boundedness. Odpowiednie macierze wzmocnień obliczane są, a stabilność estymatorów zapewniana jest, poprzez iteracyjne rozwiązywanie – formułowanych różnorodnie, w zależności od problemu – układów nierówności macierzowych LMI. Podobnie, obiekty nieliniowe modeluje się i przedstawia jako zbiór modeli wykorzystywanych następnie do rozwiązywania nierówności LMI. Opracowane algorytmy estymacji przedstawiane są i omawiane bardzo metodycznie, każdorazowo poprawność założeń potwierdzona jest twierdzeniami i ich dowodami, prezentowanymi w stosownych etapach opracowania.

Ostatecznie Autor podsumował wyniki pracy, przedstawił wnioski wyciągnięte po ich analizie oraz naszkicował kierunki dalszych prac.

Spis literatury zawiera 118 pozycji, głównie z ostatnich lat. Są one prawidłowo dobrane i zostały zacytowane w treści pracy. 14 z nich stanowią cytowania współautorskich artykułów naukowych; w ośmiu z nich Doktorant jest pierwszym autorem.

### **III. Ogólna ocena rozprawy**

Recenzowana rozprawa bardzo dobrze wpisuje się w wyniki prac innych grup badawczych zajmujących się estymacją uszkodzeń i układami sterowania tolerującymi uszkodzenia. Autor umiejętnie wykorzystuje znane idee i metody, uzyskując nowe, bardziej zaawansowane układy estymacji i sterowania. Uwzględniając istniejącą niemal zawsze możliwość jednoczesnego uszkodzenia urządzeń sterujących i pomiarowych czyni prezentowane algorytmy bardziej niezawodnymi i przydatnymi w praktycznych zastosowaniach. Opracowane estymatory mają szansę być wykorzystane w układach sterowania szerokiej klasy obiektami i instalacjami przemysłowymi narażonymi na działanie nieznanymi zakłóceń.

W mojej opinii teza pracy została potwierdzona, a jej cele osiągnięte. Ich realizację w recenzowanej rozprawie postrzegam jako przygotowanie i gruntowną podbudowę algorytmów, które z pewnością mogą zostać użyte do sterowania różnorodnymi obiektami dynamicznymi.

Generalnie do głównych osiągnięć Autora zaliczam:

- opracowanie algorytmu estymacji wektora stanu i uszkodzeń urządzeń wykonawczych sterowanego obiektu wraz z dowodem stabilności jego pracy,
- opracowanie algorytmu estymacji wektora stanu i uszkodzeń urządzeń pomiarowych sterowanego obiektu wraz z dowodem stabilności jego pracy,
- opracowanie algorytmu jednoczesnej estymacji wektora stanu, uszkodzeń urządzeń wykonawczych i pomiarowych sterowanego obiektu wraz z dowodem stabilności jego pracy,

- opracowanie algorytmów syntezy układów sterowania – od wektora stanu i od wyjść obiektu – tolerujących jednocześnie uszkodzenia urządzeń wykonawczych i pomiarowych obiektu,
- implementację i weryfikację praktyczną powyższych algorytmów estymacji i sterowania.

Liczba i waga prezentowanych przez Autora wyników skłania mnie do wyrażenia pozytywnej opinii merytorycznej. Oczywiście podczas lektury rozprawy nasunęło mi się kilka pytań i uwag, w zdecydowanej większości dyskusyjnych:

1. W pracy zakłada się nieliniowość obiektu sterowania modelowaną jako funkcję wektora stanu  $h(x_k)$  (spełniająca warunki Lipschitza). Czy Autor widzi możliwość stosowania innych modeli nieliniowości, zależnych np. od sygnału sterującego? Czy istnieje możliwość modelowania nieliniowości w równaniu wyjść modelu obiektu (1.5)?
2. Według jakich przesłanek dobiera się macierze  $D_1$ ,  $D_2$  oraz  $L_u$ ,  $L_y$ ? W przedstawianych przykładach dobierane są metodą „prób i błędów”.
3. W pracy, kiedykolwiek mowa jest o zakłóceniach, to zakłada się że są to zakłócenia stochastyczne. Żadna symulacja nie zakłada pojawienia się zakłóceń deterministycznych. Rozumiem, że miałyby one formę, lub algorytm traktowałby je jako potencjalne uszkodzenia, ale formalnie takowymi nie są, np. boczny wiatr oddziałujący na helikopter.
4. Dlaczego obserwator (2.1)-(2.3) nazwany został adaptacyjnym skoro macierze  $F_x$ ,  $F_u$  liczone są offline, zgodnie z procedurą przedstawioną na rys. 2.1 i nie są zmieniane (żaden parametr nie podlega adaptacji) podczas pracy układu?
5. Opis nieliniowości zgodnie z lematem 2.5 jest wyjaśniony wprawdzie ściśle od strony matematycznej, ale trudnym do samodzielnej analizy. Przedstawiony przykład na str. 14-15 nie ułatwia wyobrażenia sobie sposobu modelowania nieliniowości obiektów wykorzystanych do zilustrowania wyników pracy.
6. W przykładach nie przedstawia się w ogóle przyjętych modeli urządzeń, opisu punktu pracy, modelu nieliniowości. W przypadku nieliniowości nie przedstawia się ani funkcji  $h(x_k)$  ani wyniku modelowania po zastosowaniu lematu 2.5, np. skąd 13 „vertices of the LPV system” na str. 26-27? To praktycznie uniemożliwia analizę wyników w tym zakresie.
7. Na podstawie jakich eksperymentów generowano histogramy zakłóceń? Sygnały  $x$  na rys. 3.6-3.8 wydają się być niezakłócone, przynajmniej nie tak bardzo jak wyjścia  $y$ . Czy przedstawione wyniki są pomiarami z rzeczywistego obiektu, są wynikami eksperymentu czy symulacji komputerowej? W rzeczywistym obiekcie poziom cieczy w zbiornikach jest mierzalnym stanem i zarazem wyjściem obiektu. Dlaczego zatem  $x$  jest mniej zaszumiony niż  $y$ ?
8. Przebiegi zmian poziomów cieczy przedstawione na rys. 3.6 – 3.8 wyglądają jakby stopnie otwarcia zaworów się nie zmieniały. Nie ma tam żadnych wahań, a jedynie ciągle zwiększanie poziomu – przebiegi wyglądają jak odpowiedzi skokowe idealnych obiektów inercyjnych, odpowiednio, pierwszego, drugiego i trzeciego rzędu.

9. Fig. 4.9, na powiększeniu wykresu nie widać przebiegu estymaty SFE, czy to oznacza że jest ona identyczna z ASFE? Byłoby to raczej mało prawdopodobne.
10. Szkoda, że w przykładzie z rozdziału czwartego testuje się jedynie jedną awarię urządzenia wykonawczego (pompy) i jedną sensora. Ciekaw jestem wyników w sytuacji lawiny awarii. Do jakiego poziomu uszkodzenia obiektu estymator dawałby właściwe wyniki? Pomijam tu fakt, że uszkodzenia takie wiązałyby się pewnie z koniecznością zakończenia użytkowania obiektu.
11. W podsumowaniu Autor zaznacza, że tworzone regulatory FTC są typu proporcjonalnego, i że w planowanych badaniach będzie chciał zmniejszać błędy nadążania za wartością zadaną. Tymczasem w podsumowaniu wyników słusznie wskazywano, że błędy są zerowe lub bliskie zera (jedynie z powodu szumów) nawet w obecności uszkodzeń – patrz rys. 5.6, 5.12. Jaki zatem charakter mają tworzone regulatory i dlaczego jeśli są regulatorami proporcjonalnymi to błędy regulacji na rys. 5.12 są niemal zerowe?

#### IV. Uwagi szczegółowe

Rozprawa napisana jest generalnie starannie, poprawnym językiem. Jest również całkiem dobrze zredagowana pod względem edycyjnym. Autor nie ustrzegł się jednak niedociągnięć edycyjnych, które w niektórych miejscach utrudniają analizę i odbiór treści pracy. Poniżej wskażę kilka z nich:

1. Na str. 12 w dowodzie twierdzenia Autor odwołuje się do twierdzenia 4.2 (zamiast 2.2); w definicji 2.4 do równania (4.14), które nie ma związku z tą definicją; na str 12 napisano również „based on (2.9) ... it can be pointed out that QB is equivalent to (2.15)” co czytane literalnie nie ma sensu.
2. Autor nadużywa znaku  $\prec$  zamiast  $<$ , a przecież w (bardzo) wielu miejscach, jak np. dla (2.17) wynik wyrażenia jest liczbą, a nie macierzą.
3. W wektorze (2.62) wykorzystuje się symbol  $v$  a na rysunku 2.3 e, f  $\theta$ .
4. Patrz równanie (2.67).
5. Czy macierze  $D_u$ ,  $D_y$  w (2.63) i (2.64) to  $D_1$ ,  $D_2$  w (1.4)-(1.5)? Skoro macierz (2.64) ma sześć wierszy to dlaczego macierz wyjściowa obiektu  $C$  (2.73) ma ich tylko cztery?
6. Wyjaśnienia dotyczące sposobu przedstawiania sygnałów na rysunkach w postaci linii ciągłych czy przerywanych, pozbawione są sensu bo tego po prostu nie widać. Dobrze, że w większości przypadków można przebiegi rozróżnić na podstawie kolorów.
7. W równaniu (3.8) w wyrażeniu przed  $e_{y,k}$  brakuje  $L_y$ .
8. W równaniu (3.17) w pierwszym wyrażeniu powinno być  $\tilde{e}_{k+1}^T R \tilde{e}_{k+1}$ .
9. Jeżeli  $\tilde{e}_k^T R \tilde{e}_k + \tilde{e}_{k-1}^T S \tilde{e}_{k-1}$  w równaniu (4.18) może przyjmować wartość równą 1 i  $\tilde{d}_k^T Q \tilde{e}_k$  może również przyjąć wartość równą 1, to w (4.19) i (4.20) nie można wpisać mocnej nierówności.
10. Na str. 70 wyjaśniany jest założony harmonogram uszkodzeń pompy. Jednakże zgodnie

z (4.66) po „abrupt loss of efficiency of the pump” nie ma „then slow fluctuation of its degradation”.

11. Na rys. 5.6 legenda opisuje jedynie trzy z czterech sygnałów.

12. Wektory  $r_k$  i  $x_k$  w równaniu (5.102) mają formalnie różną wymiary, nie można ich więc bezpośrednio odjąć.

## V. Wnioski końcowe

Dyplomant w recenzowanej Rozprawie jednoznacznie dowiódł swoich umiejętności systematycznej analizy problemu technicznego, dużej wiedzy z zakresu teorii sterowania, umiejętności analizy, syntezy i weryfikacji wyników opracowywanych układów sterowania. Wykazał wiedzę i umiejętności właściwe dyscyplinie naukowej *Automatyka, elektronika i elektrotechnika* dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych oraz potwierdził predyspozycje do prowadzenia badań naukowych. Przedstawione w pracy algorytmy i wyniki badań stanowią cenne uzupełnienie osiągnięć innych grup badawczych.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska mgra inż. Marcina Pazery, pt. „Integrated fault diagnosis and fault-tolerant control strategies for multiple faults of dynamic systems” merytorycznie spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki stawiane rozprawom doktorskim, i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.