

## Recenzja

rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Kornela Rostka

pt. Generalized Metric of Fault Distinguishability for Diagnostics of Industrial Processes  
opracowana na wniosek Rady Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej

### 1 Obszar problemowy rozprawy

Obecnie jesteśmy świadkami niezwykle dynamicznego rozwoju systemów przemysłowych i linii technologicznych. Przy projektowaniu takich systemów należy spełnić wysokie wymagania niezawodnościowe i bezpieczeństwa pracy. Niestety, niechcianą właściwością rzeczywistych instalacji przemysłowych jest ich podatność na uszkodzenia, nieprawidłowe działanie czy nieprzewidziane tryby pracy. Dlatego diagnostyka uszkodzeń odgrywa niezwykle ważną rolę w układach sterowania procesami przemysłowymi. Wczesne wykrycie uszkodzenia umożliwia szybkie podjęcie odpowiednich działań prewencyjnych. W ogólności process diagnostyczny składa się z trzech faz: detekcji uszkodzeń, lokalizacji uszkodzeń oraz identyfikacji uszkodzeń. Większość prac z zakresu diagnostyki procesów dotyczy detekcji uszkodzeń czyli wykrycia nieprawidłowości w pracy systemu. Dużo trudniejszym problemem jest lokalizacja uszkodzeń, czyli ich umiejscowienie. Aby wykonać to zadanie wymaga się, aby uszkodzenia były rozróżnialne od siebie w jak największym stopniu.

W opiniowanej rozprawie doktorskiej rozważono aktualny i ważny problem lokalizacji uszkodzeń. Główny nacisk rozprawy położono na opracowanie nowej miary rozróżnialności uszkodzeń. Celem jaki postawił sobie Doktorant było zaproponowanie uniwersalnej miary, która mogłaby mieć zastosowanie w systemach diagnostycznych pracujących w oparciu o binarne macierze diagnostyczne, systemy informacyjne czy residua sekwencyjne. W ramach rozprawy przebadano zaproponowaną miarę rozróżnialności uszkodzeń i porównano z istniejącymi wskaźnikami. Oprócz tego w rozprawie rozważa się również problem optymalnego rozmieszczenia czujników pomiarowych tak, aby spełnić dwa główne cele: 1) zmaksymalizować miarę rozróżnialności uszkodzeń, 2) wykonać system diagnostyczny minimalnymi kosztami.

Tak zarysowaną problematykę rozprawy uważam za istotną i aktualną. Każda metoda powodująca zwiększenie stopnia rozróżnialności uszkodzeń jest warta przebadania, ponieważ umożliwia zbudowanie systemu diagnostycznego o większej czułości, a co za tym idzie zwiększenie poziomu niezawodności i bezpieczeństwa pracy procesu przemysłowego. Fakt ten decyduje o pozytywnej ocenie wybranego tematu jako przedmiotu opiniowanej rozprawy doktorskiej.

## 2 Koncepcja oraz realizacja rozprawy

Rozprawa licząca 120 stron składa się z wprowadzenia, czterech zasadniczych rozdziałów oraz podsumowania. Załączony wykaz 90 pozycji cytowanej literatury dość dobrze odzwierciedla stan badań w zakresie tematycznym rozprawy.

Rozdział 1 *Introduction* został w dużej mierze poświęcony definicjom związanym z problemem rozróżniania uszkodzeń. Zarysowany został także problem rozmieszczenia optymalnej liczby czujników pomiarowych w celu uzyskania jak najlepszego stopnia rozróżnienia uszkodzeń. W rozdziale Doktorant podał motywacje leżące u podstaw prowadzonych w ramach doktoratu badań oraz sformułował główne cele pracy. Niestety materiał przedstawiony został w chaotyczny sposób. Brak jest systematycznego przeglądu literatury w rozważanej tematyce, tzw. *state-of-the-art*. Brak jest jasnego zdefiniowania niedociągnięć istniejących metod stosowanych do lokalizacji uszkodzeń. Na tak przygotowanym gruncie łatwiej by było Doktorantowi wskazać motywację do podjęcia tematu oraz zdefiniować cele pracy.

Kolejny rozdział poświęcony jest w całości problemowi lokalizacji uszkodzeń. Doktorant przedstawił różne definicje lokalizowalności uszkodzeń w zależności od zastosowanej metody wyznaczania sygnałów diagnostycznych. W szczególności zaprezentowano lokalizację uszkodzeń za pomocą: binarnych macierzy diagnostycznych, systemu informacyjnego, skierowanych sygnałów residuum oraz sekwencyjnych sygnałów residuum. Całość materiału ilustrowana jest przykładem systemu dwóch zbiorników, w którym symulowano siedem różnych uszkodzeń.

Rozdział 3 stanowi główny wkład Doktoranta do dyscypliny Automatyka i Robotyka. Część właściwa poprzedzona jest kilkoma przykładami wskazującymi wady istniejących rozwiązań oraz zestawieniem definicji lokalizowalności uszkodzeń. Następnie Doktorant wprowadził nową miarę oceny lokalizowalności uszkodzeń oraz zaprezentował jej działanie na przykładach systemów diagnostycznych wykorzystujących różne postaci sygnałów diagnostycznych. Rozdział kończy się przykładami działania nowej miary dla typowych przypadków: braku rozróżnialności uszkodzeń, słabo rozróżnialnych uszkodzeń oraz moc-



no rozróżnialnych uszkodzeń.

W rozdziale 4 Doktorant przedstawił studium porównawcze omawianej miary z miarami już istniejącymi. Rozważono różne warianty systemów diagnostycznych począwszy od systemu wykorzystującego macierze diagnostyczne, poprzez system informacyjny i sekwencyjne sygnały residuum. Badania przeprowadzono na systemie dwóch zbiorników, w którym symulowano siedem uszkodzeń. W mojej ocenie, aby bardziej kompleksowo ocenić jakość wprowadzonej miary, badania porównawcze powinny obejmować większą liczbę obiektów przemysłowych o zróżnicowanym charakterze. Tym bardziej, że w pracy brak jest analitycznej analizy zaproponowanego rozwiązania.

Rozdział 5 zawiera propozycję rozwiązania bardzo interesującego i ważnego zarazem problemu optymalnego doboru i umiejscowienia zestawu czujników pomiarowych tak, aby zmaksymalizować miarę lokalizowalności uszkodzeń. Co więcej Doktorant zaproponował również wariant ekonomiczny biorący pod uwagę koszty zestawienia systemu pomiarowego. Aby ułatwić rozwiązanie tak postawionego problemu optymalizacji nieliniowej z ograniczeniami Doktorant dokonał transformacji oryginalnego problemu do postaci liniowej, którą można efektywnie rozwiązać za pomocą istniejących pakietów inżynierskich.

Rozdział 6 stanowią uwagi końcowe, na które składa się podsumowanie osiągniętych oryginalnych rezultatów naukowych oraz omówienie ciągle otwartych problemów badawczych.

Oceniając merytorycznie całą rozprawę doktorską stwierdzam, że zawiera ona ciekawe i wartościowe wyniki. Definiuje ważny oraz aktualny problem naukowy oraz prezentuje poprawne rozwiązanie tego problemu, które zostało uzyskane przez Doktoranta samodzielnie i z zastosowaniem poprawnej metodologii naukowej. Co prawda pewnym mankamentem rozprawy jest zbyt pobieżny opis znanych z literatury metod czy też zdawkowe komentowanie wprowadzanych definicji. Zapewne Doktorant stwierdził, że nie ma potrzeby szczegółowego przedstawiania dobrze udokumentowanych metod i algorytmów. Jednakże, zbytne uproszczenie opisu powoduje problemy w zrozumieniu i przyswojeniu opisywanych treści.

Pod względem redakcyjnym praca została przygotowana w stopniu zadowalającym. Poziom języka angielskiego jest poprawny. W pracy występują drobne błędy językowe, np. zamiast “a new of isolability metric” powinno być “a new isolability metric (str. 11), zamiast “is a called” powinno być “is called a” (str. 12), zamiast “transittance” powinno być “transfer function” (str. 41), zamiast “combine” should be “combined” (str. 45), zamiast “to formulating and solving” powinno być “to formulate and solve” (str. 52), zamiast “this formula” powinno być “these formulae” (str. 60), podwójne “the” (str. 62), zamiast “as Algorithm 1” powinno być “by Algorithm 1” (str 87).

Jednakże uwagi redakcyjne nie umniejszają poziomu merytorycznego rozprawy.

### 3 Oryginalne osiągnięcia

Głównym celem jaki postawił sobie Doktorant, było opracowanie nowej uniwersalnej miary rozróżnialności uszkodzeń w procesach przemysłowych, która mogłaby znaleźć zastosowanie w systemach wykorzystujących różne postaci sygnałów diagnostycznych. Implikuje to uniezależnienie się od postaci sygnału diagnostycznego co tym samym powoduje zwiększenie stopnia skomplikowania problemu. Celem drugorzędym było opracowanie metody doboru i rozmieszczenia optymalnej liczby czujników pomiarowych w celu osiągnięcia zadowalającego poziomu rozróżnialności uszkodzeń. Co więcej Doktorant uwzględnił również wątki ekonomiczne w postaci kosztów realizacji systemu pomiarowego co ma duży wymiar praktyczny.

Uzyskane przez Doktoranta rezultaty są interesujące i wartościowe, a do najważniejszych wyników oryginalnych zaliczam:

- Opracowanie nowej miary rozróżnialności uszkodzeń działającej w oparciu o różną postać sygnałów diagnostycznych w tym binarną, wielowartościową i ciągłą.
- Opracowanie metody wyznaczania miary rozróżnialności uszkodzeń dla przypadku symptomów sekwencyjnych poprzez przekształcenie ich w postać symptomów wielowartościowych.
- Sformułowanie i rozwiązanie problemu optymalnego rozmieszczenia czujników pomiarowych w oparciu o binarne sygnały diagnostyczne, wielowartościowe sygnały diagnostyczne oraz sekwencyjne sygnały diagnostyczne.
- Sformułowanie problemu optymalnego rozplanowania czujników pomiarowych z uwzględnieniem kosztów realizacji systemu pomiarowego.

Dodatkowo, należy podkreślić solidny dorobek naukowy Doktoranta obejmujący w sumie 6 publikacji w tym 2 artykuły w czasopismach indeksowanych w bazie Web of Science (WoS) i umieszczonych na liście Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) (*Energy*, 45pkt. – lista MNiSW, IF 4,29 – WoS, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 25 pkt. – MNiSW, IF 1,42 – WoS). W większości prac Doktorant jest głównym autorem co wskazuje na jego duże zaangażowanie w rozwiązywanie problemów naukowych.



Należy stwierdzić, że sformułowany cel rozprawy został osiągnięty, a jej Autor wykazał się umiejętnościami niezbędnymi do samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych w dyscyplinie Automatyka i Robotyka.

## 4 Uwagi i komentarze

Przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera oryginalne wyniki. W rozprawie widoczne są: warstwa teoretyczna (wprowadzenie miary rozróżnialności uszkodzeń i jej analiza) oraz warstwa ilustracyjna (przykłady praktycznych zastosowań). Można jednak sformułować następujące uwagi natury ogólnej:

1. Z rozdziału 1.7 nie wynika motywacja zajęcia się opracowaniem nowej metody optymalnego rozmieszczenia urządzeń pomiarowych. Jakie są wady i niedociągnięcia metod przywołanych w tym rozdziale, np. metod opisanych w pracy (Sarrate *i in.*, 2012a).
2. Rozdział 3.2 przedstawia propozycję nowej miary rozróżnialności uszkodzeń. Niestety brakuje przedstawienia motywacji leżącej u podstaw wprowadzonego algorytmu.
3. Ważną właściwością zaproponowanej miary rozróżnialności uszkodzeń jest brak potrzeby założenia, że uszkodzenie zostanie zaobserwowane we wszystkich sygnałach residuum powiązanych z tym uszkodzeniem (ang. *exoneration assumption*). Niestety zabrakło takiego sformułowania w pracy doktorskiej, a analizując wyniki eksperymentów zestawione w tabel 4.12 widać wyraźnie, że takie założenie ma kluczowy wpływ na poziom uzyskanego stopnia rozróżnialności uszkodzeń.
4. Rozdział 3.3 został zatytułowany *Właściwości zaproponowanej miary* (Properties of the proposed metric). Należy jasno stwierdzić, że ten rozdział w żaden sposób nie zestawia własności zaproponowanej miary rozróżnialności uszkodzeń. Doktorant zaprezentował trzy przykładowe scenariusze systemów diagnostycznych i wyznaczył dla nich miary rozróżnialności. Pytanie jakie się tutaj nasuwa można sformułować następująco: jakie są własności zaproponowanej miary?
5. W rozdziale 5.2.1 Doktorant proponuje metodę uwzględniania ograniczeń kosztowych (ang. *budgetary constraints*). W tym celu zaproponował problem optymalizacji minimalizujący koszty związane z systemem czujników, natomiast miara rozróżnialności uszkodzeń została przesunięta do zbioru ograniczeń. Niestety analizując (5.13) pojawia się problem odpowiedniego doboru pożądanej wartości miary rozróżnialno-

ści uszkodzeń  $G$ . Jak doktorant dobierał wartość tego parametru. Najprościej dobrać  $G = 0$ , ale czy taki wybór jest uzasadniony?

6. Wprowadzając problem optymalizacji uwzględniający koszty realizacji systemu pomiarowego Doktorant wskazał na dwa źródła kosztów: koszty zakupu sprzętu (np. czujników pomiarowych) oraz koszty realizacji systemu diagnostycznego (np. realizacja modeli). Niestety opisując przykładowe realizacje optymalnego doboru liczby czujników pomiarowych Doktorant uwzględnił tylko koszty dotyczące czujników pomiarowych. Co z kosztami wyznaczania sygnałów diagnostycznych? Dlaczego nie zostały wzięte pod uwagę? Problem dotyczy zarówno systemu diagnostycznego dla systemu ogniwo paliwowych jak również dla zespołu trzech zbiorników.
7. W rozdziale 5.7 rozważany jest problem optymalnego rozmieszczenia czujników pomiarowych w ograniczeniach nałożonych na koszt realizacji systemu pomiarowego dla systemu ogniwo paliwowych. Niestety, ale brak jest jawnego wskazania zadania optymalizacji w tym przypadku. Poza tym na stronie 93 Doktorant wskazał, że problem optymalizacji został rozwiązany za pomocą algorytmu Sympleks, podczas gdy na stronie 96 czytamy, że użyto algorytmu *Branch-and-Bound*. Należy wyjaśnić jaki algorytm został wykorzystany. Czym kierował się Doktorant wybierając odpowiednią metodę optymalizacji i czy wykonał badania porównawcze różnych metod w tym celu.

Do uwag szczegółowych można zaliczyć:

1. Str. 17, roz. 1.4. DX to nazwa społeczności naukowej zajmującej się zastosowaniami sztucznej inteligencji w diagnostyce uszkodzeń, a nie nazwa metody rozwiązywania problemów diagnostycznych.
2. Str. 17. Sformułowanie “faults are calculated offline” jest zbyt kategoryczne. Uszkodzenia zazwyczaj są wyznaczane offline, ale nie zawsze.
3. Str. 18, skrót ARR był już rozwijany wcześniej.
4. Definicje 1.4.2 i 1.4.3, operatory  $\models$  i  $\perp$  nie należą do często stosowanych, więc należy podać ich znaczenie.
5. Definicja 1.4.3, skrót SM nie został wyjaśniony.
6. Str. 19, konflikt Reitera nie został zdefiniowany.
7. Wzór (1.2), symbol  $F$  nie został wyjaśniony.

8. Przykład 1.6.2, założenie (exoneration assumption) powinno zostać dokładnie wyjaśnione i zaprezentowane w przykładach z mocniejszym komentarzem.
9. Jeżeli  $d_i$  oznacza  $i$ -tą diagnozę to  $card(d_i)$  powinno być równe 1 i nie musi jawnie występować w (1.3). Należy to wyjaśnić.
10. W opisie wzoru (2.1) powinno być  $\mathbf{y}(s)$ ,  $\mathbf{u}(s)$  i  $\hat{\mathbf{f}}(s)$ .
11. Przykład 2.2.2, co oznacza symbol  $S_2$ ?
12. Str. 34 ostatnia linia, brakująca kropka po "state".
13. Tabela 2.6, jak uzyskano wpisy w tej tabeli?
14. Str. 41, ostatnia linia, co oznaczają symbole  $s_1$  i  $s_2$ ?
15. Wzór (2.30), argument odwrotnego przekształcenia Laplace'a powinien być ujęty w nawiasy, np. klamrowe

$$\mathcal{L}^{-1}\{r_j(s)|_{f_k}\}.$$

16. Brak wyjaśnienia dlaczego wprowadzono dodatkowe residua w postaci (2.36) i (2.37). Na jakiej postawie?
17. Brak spójności opisu wzoru (2.38), raz stan jest zależny of  $\mathbf{f} - \mathbf{x}(t, \mathbf{p}, \mathbf{f})$ , a kolejnym razem nie –  $\mathbf{x}(t, \mathbf{p})$ . Poza tym brak wyjaśnienia postaci  $\mathbf{g}()$ ,  $\mathbf{h}()$  i  $T$ .
18. Wzór (2.39), nieznane symbole  $\bar{\epsilon}$ ,  $\bar{\mathbf{u}}$  i  $\bar{\mathbf{y}}$ . Jak się one mają do  $\epsilon$ ,  $\mathbf{u}$  i  $\mathbf{y}$ ?
19. Str. 46, nieznaną zmienna  $v$ .
20. Wzór (2.41) co oznaczają symbole  $w_{0,i}$  i  $w_{1,i}$ . Na jakiej podstawie dokonano transformacji (2.41)?
21. Definicje 2.6.2 i 2.6.3,  $u$  powinno być pisane czcionką pogrubioną.
22. Przykład 2.6.1, po co jeszcze raz przepisywać wzory (2.46) i (2.47)? Niezrozumiała postać sygnatur (2.53) i (2.54). Skąd się wziął pierwszy pierwiastek w (2.53) i (2.54). Poza tym pochodne powinny chyba mieć inną postać, tzn.

$$A_1 \frac{d(L_1 + \hat{f}_6)}{dt} \quad A_2 \frac{d(L_2 + \hat{f}_7)}{dt}.$$

23. Przykład 3.1.2, Doktorant użył sformułowania "jeśli pierwszy symptom jest różny", ale nie wiadomo od czego różny.



24. Str. 58, zamiast  $f_k$  powinno być  $f_i$ , ponieważ Doktorant operuje indeksem  $i$ .
25. Tabela 4.12 zabrakło komentarza jak można porównać indeks lokalizowalności (ang. isolability index) z zaproponowaną miarą. Obie generują inny zakres wartości wyjściowych.
26. Wzór (5.2) nie jest jasne co oznacza  $x_{s_j}$ .
27. Tabela 5.2 jest nieczytelna, ponieważ brakuje opisu wiersza ( $c_i$ ).
28. Rozdział 5.2 brak jest sformułowania kompletnego zadania optymalizacji dla binarnych macierzy diagnostycznych obejmującego maksymalizację stopnia rozróżnialności uszkodzeń i minimalizację kosztów realizacji systemu pomiarowego.
29. Problem (5.17) jak wygląda formuła na  $x_{k+1}$ ?
30. Problem (5.19), jak uzyskano ograniczenie  $x_{D_{3,1}} \leq x_{s_2} + x_{s_3}$  z ograniczenia  $x_{D_{3,1}} = \max\{x_{s_2}, x_{s_3}\}$ ?
31. Rysunek 5.1 przedstawia graf przyczynowo-skutkowy urządzenia wykonawczego, a nie samo urządzenie.
32. Aby mieć lepszy przegląd uszkodzeń powinny zostać przedstawione ich charakterystyki, tzn. czy mamy do czynienia z uszkodzeniami nagłymi, wolno narastającymi czy przejściowymi, czy są to uszkodzenia mulitplikatywne czy addytywne, itp.
33. Problem (5.21), w takich przypadkach lepiej wprowadzać postać macierzową problemu.
34. Brak odnośnika literaturowego do metody Coin-or-branch-and-cut (str. 92).
35. Po rozwiązaniu problemu optymalizacji należy podać wartość funkcji celu dla rozwiązania optymalnego. Zabrakło takiej informacji w roz. 5.6.
36. Rozdział 5.7 zabrakło opisu badanego obiektu, przynajmniej zdawkowego.
37. W tab. 5.8 zostało zestawionych 8 czujników pomiarowych, zaś w tekście Doktorant wprowadził tylko 5. Dlaczego?
38. Rozdział 5.7, dlaczego Doktorant nie wziął pod uwagę kosztów wyznaczenia sygnałów diagnostycznych? Podobnie w rozdziale 5.8.



39. W tab. 5.10 zostały zestawione sygnały wejściowe i wyjściowe modeli wykorzystanych do wygenerowania sygnałów diagnostycznych. Niestety, w tekście nie ma słowa komentarza w jaki sposób zostały te modele zrealizowane.
40. Rozdział 5.7 brak sformułowania zadania optymalizacji.
41. Tabele 5.15 i 5.16 mogły zostać lepiej zaprojektowane. Wyniki tam zestawione są nieczytelne. Poza tym niezrozumiałe jest pogrupowanie uszkodzeń (3 z 4 i od 8 do 12). Dlaczego Doktorant tak postąpił?
42. Format wykazu literatury powinien zostać ujednolicony, np. raz autor używa pełnych imion autorów, a innym razem używa inicjałów, w niektórych przypadkach brakuje pełnej listy autorów (Doktorant użył skrótu *et al.*).

## 5 Podsumowanie

Uwzględniając wyżej wymienione uwagi i komentarze oraz całość rozprawy doktorskiej wraz z oryginalnymi osiągnięciami naukowo-badawczymi stwierdzam, że:

1. Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Kornela Rostka spełnia wszystkie wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. nr 65, poz. 595) z późniejszymi zmianami.
2. Wnoszę o przyjęcie rozprawy oraz jej dopuszczenie do publicznej obrony przed Radą Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

Krzysztof Rostek