

Prof. dr hab. inż. Antoni Ligeza  
Katedra Informatyki Stosowanej  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
e-mail: ligeza@agh.edu.pl

Kraków, 18 maja 2018

*Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Kornela Rostka pt.*

## **Generalized Metric of Fault Distinguishability**

**for**

### **Diagnostics of Industrial Processes**

Wydział Mechatroniki

Politechnika Warszawska

#### **1. Wstęp**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr inż. Kornela Rostka pt. ***Generalized Metric of Fault Distinguishability for Diagnostics of Industrial Processes***. W pracy nie podano tytułu w języku polskim (jest tylko streszczenie). Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Michał Bartyś.

Tematyka pracy jest zlokalizowana w obszarze *diagnostyki systemów technicznych*, w dyscyplinie naukowej *Automatyka i Robotyka*. Głównym przedmiotem zainteresowania Autora jest problematyka rozróżnialności uszkodzeń systemów technicznych na bazie dostępnych symptomów i sygnatur uszkodzeń. W pracy przedstawiona jest autorska propozycja miary stopnia rozróżnialności uszkodzeń. Może ona być stosowana do doboru sygnałów i sensorów dla efektywnej diagnostyki, w tym zapewnienia rozróżnialności uszkodzeń na określonym poziomie oraz przy ograniczonych kosztach. Tematyka pracy obejmuje zatem ważne, dobrze zdefiniowane i aktualne zagadnienia naukowe o potencjalnie szerokich zastosowaniach praktycznych.

Obok modelowania, sterowania czy projektowania, diagnostyka systemów technicznych stanowi szybko rozwijającą się gałąź wiedzy inżynierskiej na pograniczu automatyki, teorii systemów, informatyki, a także obszarów takich jak mechanika i elektromechanika, hydraulika, pneumatyka, a więc związanych z konkretnymi technologiami. Rozwijane są zarówno elementy teorii jak i podejścia praktyczne, zorientowane na zastosowania w rzeczywistych instalacjach technologicznych.

Pomimo osiągnięcia istotnego poziomu zaawansowania obserwowany jest ciągły rozwój metod diagnostycznych. Aktualnie stosowane i rozwijane metody diagnostyki oparte są na wykorzystaniu koncepcji macierzy diagnostycznej (BDM, FIS), regułowych systemów eksperckich, wnioskowania w oparciu o model, a także pewnych paradygmatów obliczeniowych, takich jak sieci neuronowe (neuropodobne) czy systemy rozmyte. Stosowane są modele jakościowe i ilościowe, elementy logiki i algebry oraz teorii grafów.

Współczesne systemy diagnostyczne bazują często na sformalizowanych teoriach wywodzących się z automatyki (teorii sterowania), analizy systemowej czy inżynierii wiedzy (sztucznej inteligencji). Mogą one także opierać się na wykorzystaniu wiedzy eksperckiej i doświadczenia (systemy eksperckie, systemy typu *Case-Based Reasoning*), danych statystycznych czy uczenia maszynowego. Zaawansowane systemy diagnostyczne stwarzają możliwości monitorowania pracy złożonych układów przemysłowych (tzw. systemy SCADA) oraz automatycznego diagnozowania poprzez wykrywanie błędnego zachowania się systemów i lokalizację uszkodzeń.

Czynnikami warunkującymi konieczność rozwoju metod monitorowania i diagnostyki są przede wszystkim wzrastające wymagania dotyczące *efektywności, jakości, bezpieczeństwa i niezawodności* coraz bardziej złożonych systemów i procesów technologicznych, w tym wymagania ekonomiczne dotyczące długookresowej, bezawaryjnej pracy, możliwości stałego monitorowania i predykcji stanu systemu, szybkiego diagnozowania on-line, lokalizacji i usuwania zaistniałych awarii, a w konsekwencji zapobiegania i likwidacji skutków poważniejszych awarii i związanych z tym strat ekonomicznych. Rozwój metod i systemów diagnostycznych ma istotne znaczenie dla efektywnego i bezpiecznego użytkowania złożonych instalacji technologicznych i jest jednym z istotnych czynników warunkujących konkurencyjność i szeroko rozumianą niezawodność systemów.

Recenzowana rozprawa dobrze wpisuje się w aktualne trendy badań naukowych w obszarze diagnostyki technicznej. Wykorzystuje ona proste i efektywne podejście do modelowania zależności pomiędzy symptomami a uszkodzeniami w postaci tzw. macierzy diagnostycznej. Głównym celem rozprawy jest opracowanie nowego wskaźnika poziomu rozróżnialności uszkodzeń. Zaproponowany wskaźnik może być wykorzystany do optymalizacji rozmieszczenia sensorów przy ograniczeniach lub optymalizacji kosztów.

Praca przedstawia także badania ukierunkowane na poprawę efektywności procesu diagnostycznego w oparciu o odpowiednią konfigurację urządzeń pomiarowych. Konfiguracja ta powinna być z jednej strony najprostsza (najtańsza), a z drugiej zapewniać wymaganą rozróżnialność uszkodzeń.

Rozważania teoretyczne zawarte w pracy zostały zilustrowane obszernymi przykładami modeli obliczeniowych programowania z ograniczeniami.

## 2. Struktura pracy

Praca składa się z sześciu rozdziałów oraz zawiera dodatkowo obszerny wykaz bibliograficzny (dziewięćdziesiąt pozycji; nienumerowanych), skrócony wykaz stosowanych oznaczeń oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Praca liczy ogółem 120 numerowanych stron. Została wydana nakładem Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej w formie estetycznego skryptu.

W rozdziale pierwszym przedstawiono problematykę pracy – obszar badawczy, sformułowano problemy badawcze i naszkicowano cele rozprawy. Przedstawiono również strukturę pracy.

Rozdział drugi zawiera bardziej szczegółowe wprowadzenie w obszar analizy uszkodzeń, w szczególności w problematykę ich rozróżnialności. Przedstawiono stan wiedzy dla różnych typów sygnałów diagnostycznych i modeli opartych na zależnościach symptomu-uszkodzenia.

W rozdziale trzecim przedstawiono bazową, oryginalną propozycję Autora nowego indeksu (metryki) stopnia rozróżnialności uszkodzeń. Proponowany indeks jest uniwersalny i może być dostosowany do różnych typów sygnałów.

W rozdziale czwartym przedstawiono porównanie różnych metryk rozróżnialności uszkodzeń. Przedyskutowano różne model diagnostyczne: binarne macierze diagnostyczne (BDM), systemy FIS, systemy sekwencyjne oparte na BDM oraz systemy sekwencyjne oparte na FIS.

Bardzo interesujący i obiecujący zarazem jest rozdział piąty. Rozważano tam zastosowanie metod optymalizacji z ograniczeniami do wyznaczania optymalnej alokacji sensorów. Przedstawiono propozycje kilku modeli szczegółowych. Przedstawiono także trzy przykłady obliczeniowe.

Rozdział 6 to podsumowanie osiągnięć pracy i szkic możliwych kierunków dalszych prac badawczych.

Kompozycja pracy jest poprawna i czytelna, a sama praca jest relatywnie dobrze zredagowana i zwarta.

### **3. Przedmiot i cele pracy. Najważniejsze osiągnięcia**

Przedmiotem recenzowanej rozprawy są rozważania dotyczące diagnostyki złożonych systemów technologicznych, w tym zwłaszcza metoda oceny stopnia rozróżnialności uszkodzeń oraz optymalizacja alokacji sensorów wykorzystująca zaproponowaną metrykę. Autor rozważa zagadnienia zapewnienia pożądanej rozróżnialności uszkodzeń w oparciu o odpowiedni dobór lokalizacji urządzeń pomiarowych przy ograniczonych kosztach.

W rozprawie rozważano dwa zasadnicze wątki problemowe o wspólnym podtekście, stanowiące de facto problemy badawcze podejmowane w pracy:

1). Przedstawiono oryginalny indeks stopnia rozróżnialności uszkodzeń dla modeli diagnostycznych opartych o macierz diagnostyczną.

2). Zaproponowano podejście do optymalizacji alokacji sensorów wykorzystujące zaproponowany indeks rozróżnialności i metody optymalizacji z ograniczeniami.

Celem pracy było zaproponowanie autorskiego rozwiązania wskazanych wyżej problemów i opracowanie odpowiednich procedur, algorytmu, a także zilustrowanie wypracowanych rozwiązań przykładami. Osiągnięcie tych celów zostało udokumentowane w przedłożonej do oceny rozprawie.

### **4. Ocena pracy**

Przystępując do oceny pracy należy na wstępie stwierdzić, że praca obejmuje dwa precyzyjnie zdefiniowane cele szczegółowe zlokalizowane w dobrze określonym obszarze badawczym diagnostyki technicznej, w podejściu określanym jako FDI<sup>1</sup>. Wybrane do rozwiązania problemy stanowią o oryginalnym i twórczym charakterze podjętego zadania. Przedstawiono rozwiązania w oparciu modele teoretyczne, a rozważania zilustrowano realistycznymi przykładami zastosowań mających wymiar praktyczny.

W pracy dokonano wyboru podejścia do modelowania systemu z wykorzystaniem macierzy diagnostycznej; wybór ten jest uzasadniony i – pomimo pewnych zastrzeżeń co do

---

<sup>1</sup>Ang. Fault Detection and Isolation; podejście wywodzące się z klasycznej automatyki.

zakresu możliwości metod tej klasy - wydaje się być racjonalny zwłaszcza w przypadku złożonych instalacji technologicznych.

Do najważniejszych rezultatów stanowiących oryginalny dorobek recenzowanej pracy zaliczyć można:

- zaproponowanie nowej miary stopnia rozróżnialności uszkodzeń dla wybranej klasy systemów; zaproponowane podejście może być zastosowane do modeli binarnych, wielowartościowych i ciągłych, a także uwzględnić sekwencyjny charakter występowania symptomów;
- opracowanie modeli optymalizacji rozmieszczenia sensorów w oparciu o metody optymalizacji z ograniczeniami; umożliwiają one zapewnienie zadanego poziomu i optymalizację stopnia rozróżnialności, a także uwzględniają koszty modyfikacji systemu sensorów;
- opracowanie trzech modeli i przykładów obliczeniowych dobrze ilustrujących zawarte w pracy propozycje rozwiązań.

Dodatkowym osiągnięciem pracy jest syntetyczna analiza stanu wiedzy i porównanie znanych z literatury podejść i metod w omawianym zakresie.

Przedstawione rezultaty mogą być uznane za oryginalny dorobek naukowy Autora pracy. Równocześnie przedstawione wyniki uzyskane na bazie przykładów stanowią oryginalny i wartościowy materiał ilustracyjny i poglądowy.

Autor wykazał dobrą znajomość prezentowanej tematyki, zarówno podstaw teoretycznych, najnowszych wyników badań jak i literatury problemu. Prezentacja elementów teorii jest w większości poprawna, jednak zauważalne są pewne niedociągnięcia (braki oznaczeń, niespójności notacji, nieprecyzyjna formalizacja czy odwołania – zwłaszcza w rozdziale 5.). Obserwowane jest także dość swobodne formułowanie zapisów formalnych z użyciem symboli logicznych. Zaprezentowane przykłady dobrze ilustrują prezentowany materiał teoretyczny, jednak i tutaj zdarzają niedociągnięcia w definiowaniu użytych symboli. Należy jednak uznać, że cele założone w pracy zostały osiągnięte.

Przy lekturze rozprawy pojawia się także pewien niedosyt – chętnie widziałbym **pełniejszą dyskusję** i sposób prezentacji trochę bardziej „zorientowany na czytelnika” - zawierający pełne objaśnienia i intuicje związane z prezentowanymi pojęciami, definicjami i wzorami. W tym kontekście wymienię tylko 3 uwagi:

1. W pracy skoncentrowano się na modelu diagnostycznym opartym na macierzy diagnostycznej (FDI na bazie BDM czy FIS). Jest to podejście typowe dla badań wywodzących się z obszaru automatyki, jednak jego możliwości są ograniczone. W pracy nie zdefiniowano formalnie macierzy diagnostycznej i nie podano jej semantyki. Byłoby ciekawe podanie i dyskusja modeli logicznych tej macierzy w formie zależności przyczynowo-skutkowych (a więc typu uszkodzenia  $\rightarrow$  symptomy) oraz w formie diagnostyczno-dedukcyjnej (a więc symptomy  $\rightarrow$  uszkodzenia). Te pierwsze – modele przyczynowo-skutkowe – dla uzyskania diagnoz korzystają z abdukcji – i w konsekwencji pozwalają jedynie generować alternatywne hipotezy diagnostyczne, a zatem w ogólnym przypadku nie mogą gwarantować pełnej rozróżnialności. Te drugie, stanowiące próbę ujęcia bardziej eksperckiego, de facto bazują na odwróceniu kierunku wnioskowania i w konsekwencji także generują alternatywne hipotezy. Ujęcie dyskusji w formie logicznego „frameworka” pozwoliłoby zapewne na porównanie z innymi podejściami (np. Model-Based Diagnosis;

Consistency-Based Reasoning) i przyczyniło się do klarownej specyfikacji materiału w kontekście znanych pojęć logicznych<sup>2</sup>.

2. Omawiane w pracy modele mają charakter deterministyczny. Tymczasem w praktyce przemysłowej często dostępna jest informacja o relatywnych częstościach uszkodzeń a nawet ich prawdopodobieństwach. Ciekawe byłoby ujęcie problematyki rozróżnialności w miary kontekście zysku informacyjnego na drodze doboru sensorów. Jak się wydaje, odpowiednie kryterium można by zbudować na bazie pojęcia entropii (a proces diagnostyczny przebiegałby analogicznie do np. algorytmu ID3 Quinlana znanego z obszaru ML). Generalnie, w pracy brak jest dyskusji problematyki rozróżnialności od strony teorii informacji. Przyjmując np., że jeden pomiar/czujnik wnosi 1 bit informacji, dla rozróżnienia  $N$  uszkodzeń powinno wystarczyć  $\log_2(N)$  pomiarów/czujników. Np. dla  $N=16$  liczba czujników to 4. Innym ciekawym aspektem byłoby wykorzystanie Sieci Bayesowskich, które mogłyby stanowić pewne uogólnienie „płaskiej” macierzy BDM/FIS.

3. Pewien niedosyt rodzi się w trakcie lektury rozdziału piątego. Zawarty tam materiał jest nowatorski, ale sposób jego prezentacji i pojawiające się modele pozostawiają wiele do życzenia. Występują braki i niekonsekwencje oznaczeń, odwołań, niepełna dokumentacja modeli, a miejscami tok rozumowania jest nieintuicyjny. Przykładowo, maksymalizacja liczby sensorów i sygnałów diagnostycznych powinna prowadzić do maksymalizacji rozróżnialności uszkodzeń; wydaje się, że w pewnych miejscach pominięto ograniczenia typu kosztowego.

Powyższe uwagi mają charakter ogólny i mogą stanowić propozycję dalszych kierunków badań i udoskonalień prezentacji materiału.

#### 4.1 Uwagi szczegółowe

Tematyka pracy jest dobrze osadzona w kontekście aktualnych badań w obszarze diagnostyki technicznej. Również ogólna wiedza teoretyczna Autora o zagadnieniach poruszanej problematyki naukowej jest bezdyskusyjna, a umiejętność prowadzenia samodzielnej pracy naukowej została potwierdzona w rozprawie.

Tym niemniej, wydaje się, że analizując rozprawę w nieco szerszym kontekście, a zwłaszcza na tle prac prowadzonych w innych dziedzinach związanych z diagnostyką techniczną w pracy należałoby uwzględnić następujące zagadnienia:

1. Praca ogranicza się do jednego, wybranego modelu diagnostycznego opartego na koncepcji „płaskiej” macierzy diagnostycznej opisującej relacje symptomy-uszkodzenia (brak elementów pośrednich jak np. w grafach przyczynowo-skutkowych czy Sieciach Beysowskich). Umożliwia to wykrywanie i rozróżnianie uszkodzeń jednokrotnych; w opinii recenzenta stanowi to pewne ograniczenie. Dysponując możliwościami umieszczania dodatkowych czujników czy elementów pomiarowych można by – jak się wydaje – uwzględnić również wybrane uszkodzenia wielokrotne.
2. Przedstawione w rozdziale 1. rozważania dotyczące detekcji i izolacji uszkodzeń - chociaż oparte na literaturze - wydają się być zawężone – obejmują one w zasadzie

---

<sup>2</sup>Punktem wyjścia mogłaby tu być praca: A new approach to multiple fault diagnosis: A combination of diagnostic matrices, graphs, algebraic and rule-based models. The case of two-layers models, Antoni Ligęza, Jan Kościelny. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Tom18, Wydanie 4, Strony, 465-476, 2008.

jedynie **uszkodzenia komponentów**. Podejście takie jest dość powszechnie przyjmowane w literaturze teoretycznej, jednak w praktyce należałoby uwzględnić możliwość powstawania uszkodzeń o charakterze **strukturalnym i parametrycznym** (np. drgania będące przyczyną wzbudzenia powstałego w pętli sprzężenia zwrotnego przy zbyt dużym wzmocnieniu sygnału; podobny charakter ma **niestabilność systemu dynamicznego**).

3. W definicji 1.3.1. zapewne nieświadomie zawarte jest istotne ograniczenie dotyczące występowania uszkodzeń 2 i więcej elementów. Otóż macierz BDM jest w stanie reprezentować tylko proste zależności przyczynowo-skutkowe (uszkodzenie powoduje zbiór symptomów). Natomiast nie da się tu opisać sytuacji, gdy np. każde z pewnych 2 uszkodzeń powoduje pewien sygnał błędu, ale o ile wystąpią jednocześnie - sygnału tego nie będzie (np. efekt kompensacji lub oddziaływanie typu EX-OR). W praktyce może to stanowić istotne ograniczenie, zwłaszcza w układach niemonotonicznych, nieliniowych i zawierających sprzężenia zwrotne.
4. Na stronie 21 przytoczono 2 kroki wyznaczania miary stopnia diagnozowalności; krok 1 wymaga podziału zbioru uszkodzeń na rozłączne podzbiory uszkodzeń nierozróżnialnych (de facto partycjonowania relacją równoważności). Pytaniem otwartym pozostaje czy relacja nierozróżnialności uszkodzeń jest przechodnia? Można sobie wyobrazić, że w pewnych przypadkach nie – np. w przypadku ciągłych wartości sygnałów uszkodzeń i wprowadzenia pewnej kwantyfikacji (przedziałów) dla detekcji uszkodzenia.
5. W rozdziale 2 przedstawiono bazowe rozważania dotyczące definiowania i realizowalności rozróżnialności uszkodzeń dla różnych typów sygnałów (binarnych, trójwartościowych, etc.). Diagnostyka odbywa się przy założeniu, że zdefiniowana jest relacja diagnostyczna typu  $S \times F$  – macierz BDM lub FIS, wektory, sekwencje, ... . I właśnie to założenie wydaje się być jednym z istotnych – immanentnych - ograniczeń rozróżnialności. Z natury rzeczy, zależności symptomy  $\rightarrow$  uszkodzenia jest zależnością relacyjną (symptom lub ich kombinacja może wskazywać na występowanie różnych uszkodzeń – vide przykłady żarówek połączonych szeregowo). Zasadniczym problemem jest, jak się wydaje, ograniczona siła ekspresji przyjętego podejścia.
6. W rozdziale 3 przedstawiono bazowe oryginalne propozycje nowej miary rozróżnialności uszkodzeń dla macierzy diagnostycznej. Ograniczenia: dotyczą pojedynczych uszkodzeń. Miara ma charakter zliczania par rozróżnialnych w odniesieniu do do wszystkich par, a więc jest to prosta charakterystyka częstościowa. Podejście to – jak się wydaje - nie sprawdzi się w przypadku występowania uszkodzeń wielokrotnych.
7. Strona 60: Formuła (3.4) jest trudno porównywalna ze schematem (3.2). (3.2) określa typ funkcji, a (3.4) jest specyficznym przepisem (w sensie wyliczenia) i ma inny zbiór wartości (szerszy).
8. Sformułowanie problemu optymalnego rozmieszczenia sensorów na stronie 78 (formuła 5.1) wydaje się być dyskusyjne. Intuicyjnie: im więcej sensorów – tym większa rozróżnialność uszkodzeń<sup>3</sup>. Wydaje się, że kryterium wyrażone formułą 5.1 powinno przyjmować maksimum dla wszystkich  $x_i = 1$ . Zmienne  $x_i$  nie występują bezpośrednio w formule kryterialnej, nie podano także modelu ograniczeń. W sformułowaniu pominięto problem ograniczeń kosztu.

<sup>3</sup>Trudno mi wyobrazić sobie sytuację, w której zmniejszenie liczby sensorów powodowałoby zwiększenie rozróżnialności uszkodzeń. Wydaje się, że zależność ma charakter monotoniczny.

9. Formuła 5.2 nie jest jasna (brak wyjaśnienia użytych oznaczeń; podwójne „=”).
10. Przykład 5.2.1 (strony 79-80): w nawiązaniu do p. 9 – czy przyjęcie istnienia wszystkich 3 sensorów nie rozwiązuje problemu? Kryterium optymalizacji jest addytywne – wydaje się, że wszystkie sumowane elementy powinny być równe 1 (?). Dlaczego nie przytoczono rozwiązania przykładu? Uwaga formalna: w (5.4) mamy zdefiniowane ograniczenia, a nie równania (ang. equations). Podobne uwagi dotyczą przykładu 5.3.1. na stronach 83-84.
11. Rozważania przedstawione w sekcji 5.4 (*Problem linearization*) oraz 5.5 (*Solving ILP problem with the branch-and-bound algorithm*), a także ich celowość pozostają dla mnie nie do końca jasne i dyskusyjne. Z czego wynikają wnioski (ang. Corollary) 5.4.1 i 5.4.2? Czy nie stanowią one w istocie dość trywialnego przeformułowania podanych funkcji celu? Czy zapewniają zysk operacyjny? Czy wobec rozwoju metod programowania z ograniczeniami (ang. Constraint Programming) i dostępności efektywnych Solverów (np. MiniZinc, Numberjack) reformulacja problemu ma istotne znaczenie? Metoda Branch-and-Bound może być zastosowana do problemów nieliniowych. Brak jest jakiegokolwiek dyskusji problematyki skalowalności (złożoności obliczeniowej). Czy Autor wykonał implementację algorytmu 1 podanego na stronie 88?

#### **4.2. Uwagi dotyczące redakcji, prezentacji, stylu i bibliografii**

Prezentacja materiału przedstawionego w pracy dokonana jest w sposób zwięzły, relatywnie czytelny i zrozumiały. Język prezentacji, stosowana terminologia, czy symbole nie budzą istotnych zastrzeżeń. Pewien niedosyt budzą natomiast braki objaśnień i niekonsekwencje oznaczeń zwłaszcza w rozdziale 5. Wybrane, zauważone, drobne uchybienia wykazano poniżej:

Str. 15-16: Zacytowano szereg definicji dotyczących własności macierzy BDM; zbrakło definicji tej macierzy, z pełnymi oznaczeniami i rysunkiem ilustrującym rozmieszczenie symboli uszkodzeń i sygnałów diagnostycznych – w szczególności nie jest jasne przypisanie odpowiednich klas (symptomy/uszkodzenia) do wierszy/kolumn. Przykład 1.3.1 również nie zawiera takiej informacji. Ponadto definicje 1.3.5. oraz 1.3.6. nie są jasne: nie widać różnicy pomiędzy określeniami „unidirectionally strongly isolating” oraz „bidirectionally strongly isolating”; nie wyjaśniono o jaką *jedno/dwukierunkowość* chodzi.

Str. 17: koncepcja *Potential Conflict Structure* została po raz pierwszy opisana w Raporcie technicznym: A. Ligęza: *A Note on Systematic Conflict Generation in CA-EN-Type Causal Structures*, LAAS Report No. 96317 (LAAS, Toulouse 1996). W pracy: *Towards Knowledge Compilation for Automated Diagnosis. A Qualitative, Model-Based Approach with Constraint Programming*, A. Ligęza, *Advanced and Intelligent Computations in Diagnosis and Control*, Springer, 2016, 355-367 opisano propozycje kompilacji wiedzy dla stworzenia efektywnego modelu diagnostycznego opartego o analizę opartą na modelu przeprowadzoną off-line – przy projektowaniu systemu diagnostycznego.

Str. 83, formuła 5.14 – zawiera zmienne decyzyjne  $x$  i  $s$  podczas gdy wskazana optymalizacja(5.2.1) odbywa się po bliżej niezdefiniowanym  $x$ .

Str. 91, przykład formalizacji: brak wyjaśnienia niektórych oznaczeń (Co to jest  $x_{CVI}$ ?).

## 5. Wnioski końcowe

Przedstawiona w pracy problematyka dotyczy aktualnych i ciekawych zagadnień naukowych, lokowanych w obszarze diagnostyki technicznej, w dyscyplinie Automatyka i Robotyka. Praca koncentruje się na problematyce zwiększenia efektywności diagnostyki złożonych systemów technologicznych. Wprowadzono nowy indeks pozwalający ocenić rozróżnialność uszkodzeń. W konsekwencji, pozwala to na stosunkowo łatwą rozbudowę i uszczegóławianie projektowanego systemu diagnostycznego o węzły pomiarowe niezbędne dla zapewnienia wymaganej rozróżnialności uszkodzeń.

Przedstawiony materiał zawiera interesujące wyniki pracy badawczej oraz oryginalne rozwiązania Autora. Rozprawa reprezentuje dobry poziom merytoryczny, a przedstawione powyżej uwagi krytyczne nie podważają sumarycznie pozytywnej oceny recenzowanej pracy.

Przedstawiony w pracy materiał prezentuje wysoki poziom naukowy a sposób prowadzenia dyskusji i jej wartość merytoryczna odpowiada standardom pracy doktorskiej. Praca zawiera oryginalne koncepcje naukowe doprowadzone do szczegółowego podejścia algorytmicznego, wsparte obszernym materiałem ilustracyjnym.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Kornela Rostka pt. ***Generalized Metric of Fault Distinguishability for Diagnostics of Industrial Processes***, lokowana w dyscyplinie *Automatyka i Robotyka*, spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, wynikające z *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dn. 14 marca 2003 (Dz.U. Nr 65 z dn. 16.04 2003, poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami) i na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

