

## Recenzja rozprawy doktorskiej

mgra inż. Pawła Mielcarka

pt. *Nieparametryczne metody identyfikacji w optymalizacji procesów produkcyjnych*

Recenzja została przygotowana na podstawie Uchwały nr 669/30/RDND02/2021-2024 Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej z dnia 10.07.2023 roku.

### 1. Przedmiot i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy modyfikacji wybranych metod identyfikacji blokowych nieliniowych systemów dynamicznych czasu dyskretnego typu Hammersteina (H), Wienera (W) lub Hammersteina-Wienera (H-W), oraz zastosowania zmodyfikowanych algorytmów do modelowania i analizy procesów przemysłowych. Wspomniane modyfikacje mają na celu osłabienie lub eliminację praktycznych ograniczeń wynikających z oryginalnych własności wybranych metod identyfikacji dostępnych w literaturze przedmiotu, w szczególności ograniczeń dotyczących: silnych założeń nakładanych na sygnały pobudzające, dużej wymiarowości przestrzeni parametrów modelu, złożoności obliczeniowej rozważanych metod, a także silnych założeń co do wiedzy a priori o strukturze modelu identyfikowanego procesu. Autor proponuje formalne i koncepcyjne modyfikacje algorytmów identyfikacji w celu ułatwienia ich późniejszego praktycznego zastosowania do dwóch przykładowych problemów praktycznych, mianowicie do analizy termicznej szkieletu chalkogenidkowych oraz do modelowania przebiegu prądu maszyny CNC i wykrywania nienominalnych stanów procesu obróbczego realizowanego przez tę maszynę. Rozprawa składa się z części teoretycznej (silnie zmatematyzowanej oraz ilustrowanej przykładami numerycznymi) a także doświadczalnej, w której zaprezentowano wyniki uzyskane na podstawie pomiarów odpowiedzi rzeczywistych procesów fizycznych uzyskanych z wykorzystaniem przemysłowej aparatury pomiarowej. Wyniki zawarte w części eksperymentalnej mają stanowić ilustrację skuteczności zmodyfikowanych metod identyfikacji rozważanych w rozprawie.

Tematyka rozprawy bez wątplenia plasuje się w zakresie dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (AEEITK), w szczególności w obszarze automatyki, do której od lat zalicza się identyfikację systemów (pomimo tendencji do klasyfikowania jej w ostatnich latach jako podobszaru uczenia maszynowego). Zastosowane przez Autora połączenie teorii, przykładów numerycznych oraz walidacji eksperymentalnej stanowi dziś *złotą triadę* metodyki prac badawczych w obszarze automatyki rozumianej jako składowej dyscypliny naukowo-inżynierskiej.

### 2. Kompozycja i redakcja rozprawy

Rozprawa została zredagowana w języku polskim i liczy 101 stron numerowanych głównego tekstu. Treść zasadnicza została podzielona na pięć części: wstęp, opis teoretyczny, opis zastosowań praktycznych, dodatki oraz bibliografię. Główny tekst rozprawy został uzupełniony spisem treści, streszczeniem (w języku polskim i angielskim), spisem symboli matematycznych, a także spisami rysunków i tabel. Wstęp zawiera rys historyczny rozwoju identyfikacji systemów, cel pracy i jego uzasadnienie, a także wyszczególnienie deklarowanego autorskiego wkładu naukowego zawartego w rozprawie. Część teoretyczna prezentuje trzy metody identyfikacji, tj. wieloetapową identyfikację systemów H-W, jądrową identyfikację ogólnych systemów dynamicznych przy ograniczonej wiedzy o strukturze modelu oraz rekurencyjną identyfikację systemów H z predykcją interakcji bloków, wraz z zaproponowanymi modyfikacjami i wynikami wybranych przykładów numerycznych. Część doświadczalna przedstawia wyniki zastosowania algorytmu identyfikacji rekurencyjnej z predykcją interakcji

bloków i modelem typu ARMAX/ARX dla części liniowej do modelowania zmian termicznych szkieł chalcogenidkowych, a także zastosowanie dekompozycji sygnału wyjściowego i regresji jądrowej do modelowania przebiegu prądu zasilającego maszynę CNC oraz do detekcji nienominalnych stanów procesu obróbczego realizowanego przez tę maszynę. Główny tekst rozprawy kończy krótkie podsumowanie oraz opis otwartych problemów i potencjalnych dalszych kierunków badań. Dwa dodatki zawarte w czwartej części rozprawy zawierają wybrane dowody twierdzeń, uwagi, definicje, lematy i algorytmy pomocnicze. Przedstawiony na końcu rozprawy spis bibliografii zawiera 58 pozycji literatury. Można stwierdzić, że układ i kolejność prezentacji treści rozprawy są poprawne i logicznie uzasadnione.

Bibliografia cytowana w rozprawie jest właściwie dobrana – wszystkie pozycje literatury są istotnie związane z treścią rozprawy. Jednak przy tak licznych publikacjach dostępnych dziś w literaturze, także z zakresu identyfikacji, wybór zaledwie 58 pozycji jest zaskakująco powściągliwy i wymaga uzasadnienia. Autor cytuje bardzo niewiele prac z ostatnich lat, bo tylko 34 cytowania pochodzą z XXI wieku, w tym zaledwie 3 z lat 2020-2023.

Strona redakcyjna przedłożonej rozprawy jest w wielu miejscach kontrowersyjna lub niestaranna i tym samym nie spełnia, w mojej ocenie, wysokich standardów zwyczajowo oczekiwanych od prac doktorskich. W punkcie 2.2 (ani w żadnym innym miejscu tekstu pracy), pomimo sugestii wynikającej z tytułu punktu 2.2, nie sformułowano tezy rozprawy. Ponadto deklarowane w punkcie nr 1 listy enumeracyjnej ze strony 10 rozwiązanie wynikające z wykorzystania zmiennych instrumentalnych nie zostało przedstawione w treści rozprawy. Notacja wektorów i macierzy jest niespójna w różnych częściach pracy, a symbolika zastosowana w tekście rozprawy nie jest w pełni zgodna z notacją podaną w spisie symboli (np. oznaczenie procesu deterministycznego lub użycie nawiasów klamrowych przy operatorze wartości oczekiwanej). Poza tym wiele wielkości matematycznych wprowadzonych w tekście oraz założeń nie zostało wyjaśnionych ani skomentowanych, wielokrotnie wprowadzając czytelnika w konfuzję. Podczas formułowania algorytmów Autor często stosuje skróty myślowe lub być może niejawnie zakłada powszechną znajomość pewnych wyników pomocniczych, co utrudnia percepcję treści (w wielu miejscach intencje Autora nie są jasne). Aby zrozumieć niektóre fragmenty pracy trzeba sięgać do treści innych artykułów, w tym do artykułów których współautorem był sam Doktorant (nie jest to dobra praktyka, bo rozprawa w części opisującej wyniki autorskie powinna stanowić zamkniętą i kompletną całość). Niektóre fragmenty opisu algorytmów i wyników numerycznych są niekompletne (np. na stronie 22 nie podano wprost jak należy estymować sygnał  $x_k$ ; na stronie 23 nie podano twierdzenia dotyczącego własności estymatora odwzorowania  $\mu(u)$ ; w punkcie 3.5 nie podano wyniku identyfikacji nieliniowej charakterystyki wejściowej systemu H-W). Ponadto dowody kluczowych twierdzeń (tj. twierdzeń stanowiących oryginalny wkład Autora w rozprawę) powinny być zawarte w głównej treści pracy a nie w dodatkach. Przy przytaczaniu wyników znanych z literatury lub opublikowanych wcześniej przez samego Doktoranta nie zawsze wskazywane jest źródło pochodzenia takich wyników. Przykładem są twierdzenia podane na stronie 23, twierdzenie ze strony 31, własność podana na stronie 41, własność 5.3.1 podana bez rygorystycznego dowodu i bez cytowania na stronie 44, zawartość punktów 5.3-5.5, zawartość dodatku A oraz pochodzenie wyników przykładów numerycznych z punktów 3.5, 4.6 i 5.5, a także wyników eksperymentalnych podanych w rozdziale 7. Ujawnia się tutaj zdecydowanie zbyt swobodne podejście Autora do cytowania wcześniej opublikowanych wyników. Przy prezentacji wyników w postaci graficznej w rozdziałach 7 i 8 brakuje jednostek wykreślonych sygnałów, a oś odciętych zamiast w sekundach jest wyskalowana w numerach próbek mimo, iż wyniki dotyczą fizycznych procesów zachodzących w czasie rzeczywistym. Styl wykresów prezentowanych w rozdziałach 3-5 i 7-8 jest niespójny. Ponadto opis warunków prowadzenia eksperymentów w rozdziale 7 jest niepełny i niejasny. Hipoteza sformułowana na stronie 62 jest bardzo nieprecyzyjna i tym samym trudna do obalenia lub potwierdzenia. Poza tym jej obecność wydaje się niepotrzebna do realizacji postawionych celów rozprawy. Dalsze szczegółowe uwagi związane z redakcją rozprawy zostały sformułowane w punkcie 4 niniejszej recenzji.

Podsumowując stronę redakcyjną rozprawy należy podkreślić odczuwalne wrażenie pośpiechu Autora w przygotowywaniu treści rozprawy, a także wrażenie sklepania jej fragmentów powstałych w dużych odstępach czasu bez dbałości o spójność całości tekstu i części matematycznej. W konsekwencji redakcja tekstu jest niestety zdecydowanie słabą stroną rozprawy, negatywnie wpływającą na jej jakościową ocenę końcową.

### 3. Ocena zastosowanej metodyki badawczej i uzyskanych wyników

Problem badawczy postawiony przez Doktoranta uważam za dobrze zdefiniowany i zasadny w punktu widzenia potencjalnych praktycznych zastosowań rozważanych metod identyfikacji. Ograniczanie wymaganej a priori wiedzy o modelowanym procesie, osłabienie założeń co do charakteru pobudzenia oraz zmniejszenie złożoności obliczeniowej metod identyfikacji są istotnymi problemami natury aplikacyjnej i ich rozwiązanie może skutkować szerszą stosowalnością rozważanych metod identyfikacji w praktyce przemysłowej. Ponadto zastosowane przez Autora połączenie teorii, przykładów numerycznych oraz walidacji eksperymentalnej stanowi w mojej opinii *złotą triadę* metodyki prac badawczych w obszarze automatyki. Pod tym względem zatem praca zasługuje na uznanie.

Wyniki przykładów numerycznych zawartych w dysertacji są przekonujące, ale jest ich niestety niewiele (po jednym przykładzie podano w punktach 3.5, 4.6 i 5.5) i wydają się one stosunkowo mało złożone. Przykłady te należy zatem traktować jako studium przypadku o charakterze raczej ilustracyjnym niż weryfikacyjnym. Ponadto w punkcie 5.5 należało się spodziewać przykładu z liniową częścią modelu typu ARMAX (jako ilustracja rozszerzenia zaproponowanego przez Autora w punkcie 5.4), gdy tymczasem model (5.43) jest innego typu. Jaki zatem był cel prezentowania wyników symulacyjnych w punkcie 5.5? Zbieżność estymatora pokazana na rysunku 5.5 jest dość wolna (w sensie liczby danych potrzebnych do uzyskania zbieżności w otoczenie wartości prawdziwej), a wynik podany w tabeli 5.1 na stronie 47 dla  $N=6000$  wydaje się o rząd mniejszy od tego obserwowanego na wykresie z rys. 5.5. Jak to wyjaśnić?

Autor, pomimo postawionego celu uczynienia metod identyfikacji bardziej praktycznymi, w swoich propozycjach w rozdziale 3 przyjmuje pewne założenia, które wydają się stosunkowo silne i tym samym mało praktyczne. Chodzi o założenie dotyczące skończoności odpowiedzi impulsowej systemu, a w szczególności o znajomość a priori wartości horyzontu  $q$  w równaniu (3.1). Poza tym założenie o jednostkowym kresie górnym wzmocnienia bloku nieliniowego na stronie 17 wydaje się dość arbitralne. Czy takie założenia nie narzucają istotnych ograniczeń na stosowalność algorytmu w praktyce? Ponadto algorytm podany w rozdziale 3 pozwala na oszacowanie tylko skończonej liczby  $N_0$  punktów charakterystyki wyjściowej modelu H-W. Wydaje się, że słabością takiego podejścia jest brak możliwości narzucania liczby  $N_0$  punktów siatki, która powinna wynikać z lokalnej zmienności identyfikowanej charakterystyki statycznej. Czy zakłada się znajomość a priori tej zmienności i odpowiadającej jej wystarczającej liczby punktów  $N_0$ ? Jeżeli tak, jest to raczej silne założenie. Jeżeli nie, to w jakim sensie użytkownik może ufać, że pomiędzy  $N_0$  punktami charakterystyka ta będzie wystarczająco dokładnie odwziewiedlona przez ostatecznie przyjęty model parametryczny?

Pewne wątpliwości budzi fakt, że Autor podkreśla nieparametryczne podejście do identyfikacji, podczas gdy ostatecznie modele bloków nieliniowych są parametryzowane liniowo. Wydaje się zatem, że podejście nieparametryczne do identyfikacji ma na celu raczej uniknięcie wzrostu liczby estymowanych parametrów w modelu parametrycznym a nie wypracowanie samego modelu nieparametrycznego. Ta kwestia wymaga komentarza. Warto też zaznaczyć, że model parametryczny ma istotne zalety nad modelem nieparametrycznym z punktu widzenia jego potencjalnych zastosowań w automatyce. Jak Autor skomentowałby zalety i ograniczenia obu klas modeli w tym kontekście?

Większą siłą weryfikacyjną (w porównaniu do nielicznych i stosunkowo mało złożonych przykładów numerycznych) prezentują wyniki doświadczeń podane w rozdziałach 7 i 8, co stanowi mocną stronę rozprawy. I tutaj jednak można sformułować pewne wątpliwości metodyczne. Mianowicie, w punkcie 7.2 (strona 54) Autor przyjął model ARMAX/ARX z wymiarami poszczególnych części bloku liniowego dla  $M=299$  i  $a=1$ . Oznacza to, że część autoregresyjna modelu jest bardzo skąpa i dominuje część związana z opóźnionymi próbkami wejścia  $v_k$ , a przy tym cały model liniowy ma aż 300 parametrów. Nie do końca jest to spójne z celem modyfikacji algorytmu jakim było ograniczanie wymiarowości przestrzeni parametrów modelu. Zwykle modele IIR (ang. Infinite Impulse Response) z nieco większą liczbą parametrów części autoregresyjnej są bardziej elastyczne i pozwalają na istotne zmniejszenie liczby parametrów toru sygnału wejściowego  $v_k$ . Dlaczego zatem nie sprawdzono modelu z większą wartością wymiaru 'a' i zdecydowanie mniejszą wartością wymiaru 'M'?

Wyniki zestawione w tabeli 7.2 wskazują, że model uzyskany w wyniku użycia zaproponowanego algorytmu identyfikacji nieparametrycznej tylko w stosunkowo niewielkim stopniu jest lepszy od modelu uzyskanego klasycznymi metodami parametrycznymi. Czy istnieje zatem tutaj przekonujący argument za

stosowaniem podejścia nieparametrycznego proponowanego przez Autora, np. w kontekście znacznego zmniejszenia wymiarowości przestrzeni parametrów i co za tym idzie zmniejszenia złożoności obliczeniowej (lub polepszenia numerycznego uwarunkowania) procedury identyfikacji? Czy można to bardziej konkretnie (tj. ilościowo) określić w tym przypadku?

Wyniki zawarte w rozdziale 8 nie są ściśle związane z wynikami teoretycznymi podanymi w rozdziałach 3-5, choć w pewien sposób do nich nawiązują (pisze o tym sam Autor na stronie 62). Należy je zatem traktować jako ilustrację potencjalnej skuteczności pewnych heurystyk zastosowanych przez Autora na podstawie metod identyfikacji wprowadzonych i analizowanych w rozdziałach 3-5. Takie podejście jest akceptowalne, choć siła przekonywania tego typu wyników jest ograniczona (brak silnej podbudowy formalnej). W modelu (8.1) nie jest jasne czym jest składowa stochastyczna  $g_k$  w kontekście składowej  $z_k$ , która także ma charakter stochastyczny. Dlaczego wyróżniono w modelu dwie składowe stochastyczne? Jaki jest cel takiego wyróżnienia i jego uzasadnienie praktyczne? Zwykle bowiem składowa stochastyczna w modelach empirycznych agreguje wszystkie jawnie niemodelowane efekty deterministyczne, a zatem rozbijanie jej na dwie składowe wymaga uzasadnienia. Tym bardziej, że na stronie 64 Autor stwierdza iż proces stochastyczny  $g_k$  jest różnicą między odpowiedzią  $y_k$  i składową deterministyczną  $d_k$ , co sugeruje pominięcie obecności składnika  $z_k$  (potem we wzorze (8.8) ta koncepcja została zastosowana do wyznaczenia ocen próbek składowej  $g_k$ ).

W opisie warunków akwizycji danych (strona 65) Doktorant pisze o przyjęciu okresu próbkowania równego 100 ms, co przy pomiarze sygnału prądowego wydaje się dość długim okresem (szybkość zmian prądu przy małej indukcyjności obwodu może być bardzo duża). Czy tak rzadkie próbkowanie nie prowadzi do zjawiska aliasingu w tym przypadku?

Uzyskane wartości wskaźnika MAE podane w tabeli 8.2 na stronie 71 (wyniki weryfikacji modelu) wskazują na gorszą jakość modelu przy wzroście wymiaru 's' (tj. liczby parametrów użytych w strukturze modelu). Czy jest to skutek tzw. *przepasowania* (ang. *overfitting*) wynikającego z nadparametryzacji modelu podczas jego uczenia? Nie jest też jasne jak wzrost wymiaru 's' modelu wpływa na zdolność do wykrywania awarii z wykorzystaniem tych modeli. Z tabeli 8.3 na stronie 72 nie można tego wywnioskować, ale fakt wyboru w tym miejscu modelu dla  $s=3$  może sugerować, że ten właśnie model był najbardziej skuteczny w wykrywaniu awarii.

Porównanie jakości i skuteczności wykorzystania trzech wybranych typów modeli przedstawione w punkcie 8.4 uważam za zasadne i interesujące. Ujawnia ono pewne zalety modelu otrzymanego na podstawie algorytmu zaproponowanego przez Autora w rozdziale 8. Wykazana tam mała zdolność do wykrywania awarii z użyciem modelu neuronowego typu MLP (tabela 8.6 na stronie 77), który należy do uniwersalnych aproksymatorów, jest nieco zaskakująca (szczególnie w porównaniu ze znacznie większą zdolnością uzyskaną dla zaproponowanego modelu) i powinna skłaniać do podjęcia próby wyjaśnienia tego nieintuicyjnego wyniku, której Autor jednak nie podjął. Nie podano także informacji o złożoności poszczególnych modeli (w postaci liczby parametrów lub wymaganej złożoności obliczeniowej odpowiedzi modelu), co nie pozwala na pełną i obiektywną ilościową ocenę porównania podanego w punkcie 8.4.3.

#### 4. Pozostałe uwagi krytyczne i pytania szczegółowe

- [U1] Tytuł rozprawy dotyczy wykorzystania nieparametrycznych metod identyfikacji, podczas gdy np. w algorytmie z punktu 3.3 (przy założeniach z punktu 3.2) wszystkie bloki modelu Hammersteina-Wienera mają strukturę parametryczną (wektor parametrów 'a', skończony zestaw parametrów '\gamma' bloku FIR oraz wektor parametrów 'b'). Jak zatem rozumieć w tym kontekście użycie metod nieparametrycznych?
- [U2] Treść tekstu pt. Abstract nie jest w pełni spójna z treścią Streszczenia (w Abstract użyto skrótu ARMAX, który nie pojawia się w Streszczeniu i ten fragment wydaje się nieco inny w obu opisach).
- [U3] Tytuł punktu 2.2 sugeruje, że w jego treści znajduje się teza rozprawy. Niestety nie mogłem doszukać się takiej tezy ani w treści punktu 2.2, ani w innym miejscu rozprawy. Proszę zatem o sformułowanie tezy.
- [U4] W punkcie 2.2 Autor zaznacza, że nieliniowość będzie reprezentowana w rozprawie modelem nieparametrycznym. Jednak już na stronie 16 (wzory (3.2)-(3.3)) wprowadzane są parametryczne opisy bloków nieliniowych z rys. 3.1. Proszę zatem o wyjaśnienie, jak należy rozumieć sformułowanie o nieparametrycznych modelach podane w punkcie 2.2.

- [U5] W treści punktu 2.2 (drugi akapit od dołu strony) Autor uzasadnia próbę uogólnienia metod teoretycznych trudnościami zastosowania oryginalnych metod w praktyce inżynierskiej. Nie jest dla mnie jasne w jakim sensie uogólnienie metody miałyby ułatwić jej stosowalność praktyczną (raczej spodziewałbym się odwrotnego skutku). Proszę wyjaśnić intencje Autora dotyczące tego fragmentu.
- [U6] Moim zdaniem w punkcie 2.3 Autor omawia wykorzystanie analityki danych a nie wykorzystanie modeli procesów produkcyjnych (inaczej niż sugerowałby to tytuł punktu 2.3). Proszę zatem o wyjaśnienie jak zadaniem Autora dysponowanie modelem procesu pomaga w optymalizacji procesów produkcyjnych.
- [U7] W punkcie 2.4 znajduje się dyskusyjne stwierdzenie dotyczące ryzyka błędnej parametryzacji modelu. Każdy model bowiem jest tylko aproksymacją rzeczywistego procesu i w praktyce zawsze należy liczyć się z błędem struktury modelu. Błąd ten można jednak minimalizować i są dostępne do tego celu stosowne metody.
- [U8] W podpisach rysunków 2.1 i 2.2 brakuje wyjaśnienia elementów i znaczenia symboli użytych na tych rysunkach.
- [U9] Autor nazywa symbol  $\gamma$  'współczynnikiem' odpowiedzi impulsowej (strona 9). Dlaczego nie nazwać tego symbolu po prostu 'wartością j-tej próbki' odpowiedzi impulsowej? Z drugiej strony jest to j-ty parametr wielomianu w modelu FIR (ang. Finite Impulse Response).
- [U10] Na stronie 10 Autor deklaruje wykorzystanie metody zmiennych instrumentalnych w dalszej części pracy, przy czym takiego wykorzystania ja nie znalazłem. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.
- [U11] Jak rozumieć sformułowanie 'niezastosowalności modelu na rzeczywistych danych' zawarte na stronie 11?
- [U12] Sformułowanie podane w dwóch liniach na dole strony 11 w punkcie 3 wydaje się mylące, bo brzmi jakby rozwiązanie jednego problemu generowało inny problem (problem wielowymiarowości), a chyba nie o to tutaj chodziło.
- [U13] Wprowadzony we wzorze (3.1) model zakłada skończoną górną granicę 'q' sumy. Jest to ważne i dość silne założenie o dynamice bloku liniowego w modelu z rys. 3.1. Dopiero dalej, w punkcie 2 na stronie 17, jest krótki komentarz na ten temat, w którym dodatkowo zakłada się znajomość wartości 'q' (czyli de facto strukturę bloku liniowego z rys. 3.1). Nie podano jednak żadnego komentarza jakich konsekwencji takiego założenia można spodziewać się w praktyce i czy jest ono realistyczne (a jeżeli tak, to w jakich warunkach). Proszę o skomentowanie tego założenia.
- [U14] W wielu miejscach Autor nie wyjaśnia wprowadzanych symboli, np.: symbole na rysunkach 2.1, 2.2 i 3.1; pochodne w tekście pod wzorem (3.3); symbol  $r_k$  na stronie 18; symbol 'h' we wzorze (3.6); symbole 'h<sub>z</sub>', 'z', 'z<sub>(i)</sub>' we wzorze (3.14). Co prawda podanie spisu symboli na stronie 3 może być pomocne, jednak znaczenie wszystkich nowych symboli powinno być także wyjaśnione zaraz po ich wprowadzeniu w odpowiednich wzorach.
- [U15] Ciągłość w sensie Lipschitza narzucona na stronie 16 na funkcje nieliniowe powinna być zapisana odpowiednim wzorem, a jej zasadność krótko wyjaśniona. Definicja pochodnych zapisywanych z primem, wprowadzonych na tej samej stronie, powinna być podana (po czym należy tutaj różniczkować?).
- [U16] Szkoda, że Autor nie stosuje w wielu miejscach symbolu 'równe z definicji', co wyjaśniłoby intencje niektórych wzorów (np. we wzorach (3.5), (3.7), (3.9), (4.9), (5.5)-(5.9), (7.2), (8.2), (8.5)).
- [U17] We wzorze (3.5) w drugim warunku powinno być raczej  $|v| > 1$  zamiast  $|v| > 0$ .
- [U18] W punkcie 4 na stronie 17 zakłada się, że sygnał wejściowy do bloku nieliniowego  $\mu(x,b)$  jest od góry ograniczony wartością jednostkową. Proszę wyjaśnić z czego wynika takie ograniczenie i czy jest praktycznie uzasadnione?
- [U19] Wydaje się, że w nienumerowanym wzorze na stronie 19 (ponad (3.8)) powinno być  $\gamma$  z daszkiem (podobnie w tekście przed tym wzorem).
- [U20] Algorytm identyfikacji opisany w punkcie 3.3 jest niejasny w kilku miejscach. Wydaje się, że autor stosuje w opisie szereg skrótów myślowych i niedopowiedzeń. Mianowicie, patrząc na schemat blokowy z rys. 3.1 wydaje się, że elementami wektora regresji na stronie 18 (nienumerowany wzór ponad (3.5)) powinny być próbki 'w<sub>k</sub>, w<sub>k-1</sub>' itd. a są próbki 'u<sub>k</sub>, u<sub>k-1</sub>' itd. Proszę wyjaśnić dlaczego możemy tu poczynić takie podstawienie. Nie podano także informacji jakie warunki należy spełnić, aby macierz we wzorze (3.6) była

odwracalna. Dalej, w opisie Kroku 2 na stronie 19 nie wyjaśniono jaka jest relacja między elementami oznaczonymi symbolami  $\varphi_k$  i  $\varphi_i$ . W opisie Kroku 3 (strona 20) mamy odniesienie do sygnału  $x_k$ , przy czym nie wiadomo jak się ma ten sygnał do sygnału  $r_k$  wspomnianego w opisie Kroku 3 na stronie 18. Fragment opisu ze strony 21 jest bardzo niejasny (niejasna jest intencja niektórych wzorów oraz co jest założeniem, co definicją, a co celem Autora). Jaki jest cel wprowadzenia i interpretacja wzoru (3.15)? Czy funkcja  $\alpha(v)$  pojawiająca się dalej w rozważaniach na stronie 21 jest tym samym co  $\alpha$  z Twierdzenia 3.4.1 i z dodatku A.1? Skąd wziął się trzeci nienumerowany wzór licząc o góry strony 21 i co wyraża? Dalej, nie jest jasne jak jest estymowany sygnał  $x_k$  w Kroku 3 (końcowy wzór w opisie tego Kroku na stronie 22 nie wyjaśnia tego aspektu dostatecznie jasno). Ponownie w opisie Kroku 4 na stronie 22 Autor wraca do sygnału  $r_k$ , którego znaczenia i odniesienia do sygnału  $x_k$  znowu nie podaje. Metoda SVD wywołana w końcowej części opisu Kroku 4 na stronie 22 powinna być tu podana lub powinno być podane stosowne odniesienie do dodatku, gdzie ta metoda jest przedstawiona.

[U21] Twierdzenia 3.4.1 i 3.4.2 podane na stronie 23 są sformułowane bardzo lakonicznie, bez oczekiwanej dbałości o rygor matematyczny (brak powołania się na stosowne założenia i przyjęty model procesu). Nie jest też jasne czy interpretacja znaczenia symbolu  $\alpha$  zawartego w treści Twierdzenia 3.4.1 jest tożsama z funkcją  $\alpha(v)$  wprowadzoną na stronie 21. Proszę o wyjaśnienie znaczenia tego symbolu. Dlaczego Autor nie podał stosownego twierdzenia dotyczącego zbieżności estymatora  $\hat{\mu}(u)$ , skoro estymator ten jest częścią składową algorytmu identyfikacji w Kroku 4 (strona 22)? Czy można podać własności estymatora ze wzoru (3.17)?

[U22] Dowody twierdzeń 3.4.1 i 3.4.2 ze strony 23 podano w dodatkach A.1 i A.2. W dodatku A.1 Autor powołuje się na analizę dowodową Twierdzenia 3 z publikacji cytowanej jako [41]. Moim zdaniem, poza cytowaniem oryginału należało w tym miejscu przeprowadzić dalszą analizę na podstawie [41] (choćby skrótową), aby zachować kompletność rozważań. Analiza dowodowa przedstawiona w dodatku A.2 jest niejasna w kilku miejscach (Autor stosuje skróty myślowe, co przy analizie dowodowej nie jest właściwą praktyką). Po pierwsze podczas analizy brakuje klarownych odniesień do wzorów wprowadzonych przy opisie algorytmu – czytelnik musi domyślać się źródła niektórych elementów analizy. Notacja '|L' użyta w (A.3) jest niestandardowa i myląca; poza tym nie wiadomo czym jest czynnik 'P' w (A.3) i dlaczego się tam znalazł (zastosowanie operatora wartości oczekiwanej do estymatora (3.8) na to wprost nie wskazuje). Wzór (A.6) dotyczy własności asymptotycznej estymatora, ale ani nie zaznaczono tego w (A.6), ani nie podano w jakim sensie jest to zależność asymptotyczna (dla  $N \rightarrow \infty$ ?). Przy wyznaczaniu wariancji estymatora (wzory (A.8)) nie jest jasne skąd wziął się pierwszy wzór po znaku = w pierwszej linii (A.8) i przejście do drugiej linii także jest niejasne (brak jest jakichkolwiek komentarzy do tej części analizy). Proszę także wyjaśnić przedostatnie przejście w ostatnim wierszu (A.8) – z czego wynika końcowa postać sumy  $\sum P(L=k)$ ? W trzeciej linii ostatniego akapitu dowodu powinno być raczej  $\hat{\gamma}$  zamiast  $\gamma$ .

[U23] Wynik przykładowej identyfikacji nieparametrycznej podany na rys. 3.3 (strona 25) ma postać ośmiu dyskretnych punktów charakterystyki bloku nieliniowego. Na podstawie tych ośmiu punktów zidentyfikowano funkcję wielomianową stanowiącą już model parametryczny tego bloku. W tym miejscu pojawia się pytanie skąd wiadomo, że osiem punktów jest wystarczające do akceptowalnej jakości estymacji rzeczywistej charakterystyki bloku nieliniowego? To zależy od zmienności takiej charakterystyki między wyznaczonymi dyskretnymi punktami. A skoro liczby tych punktów nie można zwiększyć ponad wartość  $N_0$  (zależnej od przyjętej struktury bloku liniowego), to czy nie jest to istotne ograniczenie proponowanej metody? Czy któreś z założeń algorytmu osłabia (lub usuwa) to potencjalne ograniczenie? Proszę o komentarz w tej kwestii. Poza tym nie jest jasne (Autor tego nie komentuje) jakie binarne wartości przyjmuje sygnał wejściowy  $u_k^{(2)}$  w przykładzie z punktu 3.5 (strona 23). Dlaczego na końcu przykładu z punktu 3.5 nie podano wyniku identyfikacji nieliniowej charakterystyki wejściowej  $\mu(u,a)$ ? (przykład jest niekompletny)

[U24] W legendzie rys. 3.3 na stronie 25 oznaczenie niebieskiej linii wydaje się błędne (chyba powinno być tutaj  $\eta(x)$ ). Ponadto w podpisie rysunku 3.3 stwierdzono, że przedstawia on 'estymator', podczas gdy są to raczej konkretne realizacje estymatora (czyli estymaty/oceny).

- [U25] Dlaczego wprowadzono nowe oznaczenie wektora regresji we wzorze (4.4)?
- [U26] Jaka jest interpretacja wzorów (4.5)-(4.6)? To nie jest dobrze wyjaśnione - proszę o komentarz. Podobnie brakuje komentarza do wzoru (4.9) i wyjaśnienia symbolu 'h' tam użytego.
- [U27] Pierwsze zdanie w punkcie 4.4 jest podane bez klarownego odniesienia do wcześniejszych rozważań i tym samym nie ma większego sensu. Proszę wyjaśnić intencje Autora w tym miejscu.
- [U28] Na stronie 30 podano dwie własności: w linii 9 od góry strony i w 5 ostatnich liniach od dołu strony bez analizy formalnej i bez cytowania stosownej literatury. Czy należy te własności przyjąć jako dogmat? Czy to jest wynik Autora?
- [U29] Na wykresie z rysunku 4.3 brakuje opisu osi pionowej - czym ona jest? Poza tym na skali z rysunku 4.4 nie widać koloru czerwonego.
- [U30] Zdanie przed wzorem (4.25) jest urwane i nie ma sensu. Jak zatem należy rozumieć treść wzoru (4.25)?
- [U31] Lemat 4.2 powinien być raczej Twierdzeniem 4.2, bo stanowi główny wynik tego rozdziału (a jeżeli wynik ten został zaczerpnięty z literatury, to powinno być wyraźne cytowanie źródła pochodzenia tego lematu). Poza tym analiza dowodowa lematu 4.2 jest ponownie niepełna - częściowo odnosi się do literatury, a częściowo została przeniesiona do dodatków. W mojej opinii główne wyniki Doktoranta powinny być kompletne i znajdować się w głównej części rozprawy, nie w dodatkach. Jaką interpretację ma symbol  $\tau$  użyty w równaniach (4.30)-(4.31)?
- [U32] Przy komentarzu do wzoru (5.1) nie jest wyjaśnione czy granica sumy 'q' jest skończona. Dalej, we wzorze (5.2), nie jest jasne znaczenie symbolu 'u' (w odróżnieniu od  $u_k$ ). Czy postać wzoru (5.3) wynika z niejawnego założenia o stacjonarności procesu  $v_k$ ? Znaczenie zapisu matematycznego we wzorze (5.4) wymaga wyjaśnienia (element 'P(.,.)').
- [U33] Znaczenie symboli  $Y_N$  oraz  $\bar{Y}_N$  nie zostało wyjaśnione przy okazji wzoru (5.5). Podobnie z symbolem  $V_N$  we wzorze (5.14). Wydaje się, że z lewej strony wzoru (5.15) winno być  $\hat{\gamma}_N(d)$ .
- [U34] Zasada użycia indeksów dolnych i górnych we wzorach na stronach 42-43 nie jest jasna i wydaje się niespójna. Poza tym mianownik we wzorze (5.17) jest chyba niepoprawny (por. z (5.35)).
- [U35] Czy macierz ze wzoru (5.26) jest zawsze kwadratowa? Jeżeli nie, to jej postać nie jest do końca jasna. Proszę to wytłumaczyć.
- [U36] Element ze wzoru (5.32) nigdzie więcej nie jest użyty. Po co zatem został wprowadzony i jakie jest jego znaczenie dla algorytmu?
- [U37] Kroki 7 i 8 podane na stronie 44 powinny być traktowane razem (jako jeden krok), bo oba wzory tam występujące stanowią metodę najmniejszych kwadratów.
- [U38] Znaczenie symbolu '[0]' we wzorze (5.39) oraz symbolu '[1]' w tabeli 5.1 nie są wyjaśnione.
- [U39] W punkcie 5.4 Autor pisze o rozszerzeniu liniowej części modelu do postaci ARMAX lub ARX. Jednak nie jest wyjaśnione jak rozumieć strukturę ARMAX i ARX w kontekście własności zakłócenia stochastycznego występującego na schemacie z rys. 5.2. Zwykle w modelu ARX błąd równaniowy jest szumem białym, a w modelu ARMAX - szumem kolorowym; jak to się ma do schematu z rys. 5.2? Ponadto, nie wytłumaczono jak wektor parametrów ze wzoru (5.40) ma się do równania różnicowego opisującego część liniową modelu. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.
- [U40] W punkcie 5.4 nie sformułowano żadnych twierdzeń dotyczących własności estymatora dla modelu typu ARMAX/ARX. Czy własność 5.3.1 ze strony 44 zachodzi dla rozszerzonego modelu podanego na rys. 5.2?
- [U41] Podpisy pod rysunkami 5.3, 5.4 i 5.5 (i sformułowania w tekście na stronie 46) są nieściśle lub mylące, bo na odpowiednich wykresach pokazano przebieg wartości estymatora, a nie estymator.
- [U42] Legenda na wykresie z rys. 5.5 jest niepoprawna (nieznane symbole  $\lambda_N$ ).
- [U43] Opis eksperymentu identyfikacyjnego z rozdziału 7 jest bardzo lakoniczny i prawie pozbawiony odniesień do algorytmu omawianego w rozdziale 5, co bardzo utrudnia (jeśli nie uniemożliwia) jego powtarzalność przez czytelnika. Jak inicjowano rekurencję w tym przypadku? Ile wynosił okres próbkowania sygnałów w tym przykładzie i dlaczego na osi odciętych na rys. 7.3-7.5 nie podano czasu w sekundach a tylko numery próbek? Na czy polegała różnica w przyjętych strukturach modelu ARMAX i ARX (tabela 7.1)? Dlaczego nie podano uzyskanych wartości estymatora parametrów dla zidentyfikowanych modeli? Oznaczenia górnych

- granic sum we wzorze (7.1) nie są spójne z wcześniej wprowadzoną notacją.
- [U44] Opisy bloków na schemacie z rysunku 7.1 powinny być podane w języku polskim.
- [U45] Jak rozumieć określenie regresja 1-wymiarowa, 2-wymiarowa, 3-wymiarowa, 4-wymiarowa użyte w podpisach rysunków 7.6-7.9? O jakim wymiarze jest tu mowa?
- [U46] Znaczenie i sposób obliczania elementu  $y_k^p$  we wzorze (7.2) nie zostały podane.
- [U47] Sens zdania z linii 2-4 o góry strony 59 nie jest jasny. Gdzie znajdują się wyniki potwierdzające to stwierdzenie? Proszę o wyjaśnienia.
- [U48] Zdanie w liniach 1-3 od dołu strony 59 nie ma sensu.
- [U49] Punkty na wykresach 7.4 i 7.5 są interpolowane, podczas gdy wyznaczonych punktów pokazanych na wykresach 7.6-7.9 nie interpolowano. Dlaczego? Jakie są jednostki zmiennej na osi odciętych wykresów z rysunków 7.6-7.9 i dlaczego opisy tej osi w przypadku rysunków 7.6-7.7 i rysunków 7.8-7.9 są różne?
- [U50] W jaki sposób ogólny model podany we wzorze (8.2) został zastosowany w przykładzie doświadczalnym opisanym w punkcie 8.3? Jaką strukturę przyjęto?
- [U51] Podpis pod rysunkiem 8.3 jest niepełny (wykres prezentuje dwa sygnały).
- [U52] Wzór (8.5) nie został wyjaśniony. Jaką postać ma wektor  $x^{(s)}$ ? Jaką wartość parametru 'h' przyjęto i jak zdefiniowano jądro  $K()$ ?
- [U53] Współczynniki 'a' i 'b' we wzorze (8.7) powinny mieć indeksy dolne 'k' a nie 'n'. Poza tym wspomniane zaraz pod wzorem (8.7) wektory nie są obecne we wzorze (8.7).
- [U54] Wymowa drugiego zdania w punkcie 8.3 nie jest jasna. Co Autor miał na myśli? Co oznacza termin 'poprawny proces' (str. 68) lub 'poprawny cykl produkcyjny' (str. 69)?
- [U55] Nie wiadomo jak wzór (8.12) jest powiązany ze wzorem (8.11) – wydaje się, że indeksy we wzorze (8.12) są niepoprawne. Poza tym element  $\Delta_s$  wprowadzony we wzorze (8.11) nie zależy jawnie od 's', zatem jak należy rozumieć znaczenie indeksu 's' w tym przypadku?
- [U56] Celu wprowadzenia wskaźnika jakości MAE we wzorze (8.10) można się domyślić (dotyczy on oceny jakości modelu), jednak cel wprowadzenia wskaźnika MSE we wzorze (8.11) nie jest podany i nie jest jasny. Dopiero na stronie 72 okazuje się, że służy on do detekcji nienominalnych stanów procesu obróbki realizowanego przez maszynę CNC.
- [U57] W punkcie 8.4.1 Autor wprowadza pojęcia 'procesu zgodnego' i 'procesu niezgodnego'. Terminy te mogą być mylące, ponieważ nie wiadomo czy dotyczą cechy zgodności estymatora czy zgodność jest tu rozumiana inaczej i skojarzona z procesem obróbczym modelowanym z rozdziale 8. Proszę o wyjaśnienie.
- [U58] Podpis pod rysunkiem 8.11 jest językowo nieprecyzyjny.
- [U59] Znaczenie ostatniego akapitu w punkcie 8.4.3 na stronie 78 jest niejasne. Co Autor chciał tutaj przekazać?
- [U60] Punkt 9.2 na stronie 80 jest bardzo niejasno napisany i w mojej opinii nie wnosi do rozprawy istotnej treści.
- [U61] Rozważania podane w treści dodatku A.6 są zaczerpnięte z literatury i nie jest jasne co ma z nich wynikać dla uzasadnienia własności 5.2.1 ze strony 41. Proszę to wyjaśnić.
- [U62] W dodatku B.3 ostatnia linia zawiera dziwne (wg mnie niepoprawne) stwierdzenie. Poza tym intencja zapisu MSE z daszkiem nie jest zrozumiała (daszek wskazuje na estymator, więc to raczej argument MSE we wzorze (B.4) powinien być zapisany z daszkiem).
- [U63] Bibliografia cytowana w rozprawie jest mało liczna. Dlaczego nie powołano się we wprowadzeniu na tak znane i fundamentalne prace, jak: L. Ljung: *System identification. Theory for the user*, Prentice Hall, Upper Saddle River 1999 oraz T. Söderström, P. Stoica: *Identyfikacja systemów*, PWN, Warszawa 1997? Poza tym względnie niedawno opublikowano ciekawe prace przeglądowe ściśle związane z tematyką rozprawy, jak: M. Schoukens, K. Tiels: *Identification of block-oriented nonlinear system starting from linear approximations: A survey* (Automatica, 2017) oraz J. Schoukens, L. Ljung: *Nonlinear system identification. A user-oriented map* (IEEE Control Systems Magazine, 2019). Dlaczego Autor nie cytuje tych publikacji?
- [U64] Pośród cytowanych przez Doktoranta prac zagranicznych autorów pojawia się sporo cytowań wyników polskich badaczy (co jest właściwe), jednak są to w zasadzie wyłącznie prace wrocławskiej szkoły identyfikacji. Szczególnie brakuje cytowań prac szkoły gliwickiej, znanej z wieloletniej i nadal aktualnej działalności badawczej, dydaktycznej i wdrożeniowej w tym obszarze. Poza tym w wielu pozycjach literatury



w spisie bibliografii nie ma wszystkich wymaganych danych, w tym także w pozycjach autorstwa samego Doktoranta, np.: w pozycjach [9], [11], [26], [21], [47], [55] brak miejsca wydania; w pozycjach [31], [38], [40] brak informacji o miejscu konferencji; w pozycjach [34], [35], [36] brakuje danych o miejscu i roku publikacji oraz o numerach stron. Tytuł pozycji [35] jest analogiczny jak tytuł pozycji [34]. Numery stron w spisie bibliografii powinny być złożone w wersji polskojęzycznej (str. zamiast pp.).

[U65] Tekst rozprawy zawiera niezręczności i błędy językowe oraz liczne błędy typograficzne. Sens niektórych zdań w tekście rozprawy jest niejasny.

[U66] Uwagi dotyczące notacji:

- (a) Szkoda, że Autor nie zastosował tłustej czcionki do wyróżnienia wektorów i macierzy, co istotnie poprawiłoby czytelność wzorów (choć na stronach 42-43 incydentalnie pojawiają się macierze **M** i **R** pisane czcionką wytłuszczoną – brak spójności notacyjnej w tekście rozprawy).
- (b) W tekście rozprawy brakuje nawiasów klamrowych '{}' przy stosowaniu operatora wartości oczekiwanej 'E', pomimo jego wprowadzenia w spisie symboli.
- (c) Autor stosuje opis zmiennych losowych (w tym estymatorów) oraz ich realizacji stosując w obu przypadkach małe litery, co jest dopuszczalne i stosowane w literaturze z zakresu identyfikacji, jednak wymagałoby wyjaśnienia w tekście rozprawy (takiego wyjaśnienia nie znalazłem).
- (d) W niektórych miejscach (np. na stronie 21) występuje notacja zmiennych bez indeksu dolnego 'k' (w odróżnieniu od notacji z indeksem 'k' stosowanej wcześniej). Jak należy interpretować te zmienne podane bez indeksu?
- (e) Notacja składowych wektorów nie jest spójna w tekście pracy – np. na stronach 16-23 elementy wektora są objęte nawiasami okrągłymi '()', a na stronach 30, 42 i 43 nawiasami kwadratowymi '[]'. Jeżeli wektor potraktujemy jako szczególny przypadek macierzy, to elementy wektorów powinny być obejmowane nawiasami kwadratowymi, tak jak elementy macierzy.
- (f) Jako separatora części całkowitej i ułamkowej przyjęto kropkę zamiast przecinka. To jest dopuszczalne podejście (jest to notacja środowiska obliczeniowego Matlab), jednak ze względu na niezgodność z notacją polskojęzyczną taka zmiana notacji powinna być wskazana i uzasadniona w tekście rozprawy.
- (g) W niektórych miejscach rozprawy Autor stosuje te same symbole do opisu (jak się wydaje) różnych wielkości matematycznych, np.: symbolu 'L' użyto w dowodzie w dodatku A.2 oraz we wzorze (3.14) i jednocześnie na stronie 28 jako stałą Lipschitz'a; symbol  $\alpha$  pojawia się w treści Twierdzenia 3.4.1 oraz jako funkcja w analizie na stronie 21; symbol  $N_0$  pojawia się w jednym znaczeniu na stronie 20, a w innym znaczeniu na stronie 30.
- (h) Jaka jest różnica między znaczeniem symboli  $R_s$  (strona 28) i  $R^s$  (strona 30)?
- (i) Rodzaj nawiasu użyty we wzorze (4.14) nie jest spójny z wcześniejszą notacją.

## 5. Ocena spełnienia warunków wymaganych zapisami Ustawy (zgodnie z zaleceniami sformułowanymi w [RDN:22])

(5a) Rozwiązanie przez Doktoranta oryginalnego problemu naukowego i/lub jego zastosowanie w sferze gospodarczej oraz wykazanie przez Doktoranta umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Wyniki zawarte w rozprawie zostały w większości opublikowane w ramach czterech artykułów z udziałem Doktoranta. Są to następujące prace:

- [A] G. Mzyk, Z. Hasiewicz, **P. Mielcarek**: *Kernel identification of non-linear systems with general structure*, Algorithms, MDPI, 13, 328, str. 1-16, 2020,
- [B] B. Kozdraś, G. Mzyk, **P. Mielcarek**: *Identification of the heating process in differential scanning calorimeter with the use of Hammerstein model*, 21<sup>th</sup> International Carpathian Control Conference (ICCC), str. 1-6, High Tatras, Slovakia, 2020,
- [C] G. Mzyk, M. Biegański, **P. Mielcarek**: *Multi-level identification of Hammerstein-Wiener systems*, IFAC PapersOnLine 52-29:174-179, 2019,
- [D] **P. Mielcarek**, G. Mzyk: *Recursive algorithm for interaction prediction in Hammerstein system identification with experimental studies*, International Journal of Modelling, Identification and Control, 43(2):134-144, 2023.

Poza artykułem [D], gdzie Doktorant jest pierwszym autorem, w pozostałych pracach nazwisko Doktoranta pojawia się na ostatniej pozycji, co może sugerować mniejszy wkład w uzyskanie wyników tam opublikowanych. Nie jest to jednak wystarczająco jasne, ponieważ nie wiadomo jaki schemat kolejności umieszczania nazwisk współautorów został zastosowany (ta kwestia wymaga wyjaśnienia). Zgodnie z zapisem w sekcji 'Author Contributions' na stronie 14 publikacji [A], wkład Doktoranta zasadniczo dotyczył oprogramowania, zatem w domyśle także wyników numerycznych przedstawionych w rozdziale 4 oraz części wyników eksperymentalnych przedstawionych w rozdziale 7 rozprawy. Pozostałe wyniki eksperymentalne z rozdziału 7 zostały niedawno opublikowane w artykule [D] oraz częściowo nawiązują do treści artykułu [B]. W rozdziale 3 przedstawiono wybrane wyniki zawarte w artykule [C], natomiast praca [D] zasadniczo prezentuje algorytm rekurencyjny w rozdziale 5. Wyniki doświadczalne podane w rozdziale 8 dysertacji, zgodnie z moją najlepszą wiedzą, nie były wcześniej publikowane. W związku z powyższym nie budzi moich większych wątpliwości autorski wkład Doktoranta w treść rozdziałów 3 oraz 5-8. Uważam, że w tym zakresie Autor dysertacji podał przekonujące (choć nie wszystkie w jednakowym stopniu) wyniki badań ilustrujące skuteczność numeryczną oraz praktyczną zaproponowanych modyfikacji algorytmów identyfikacji systemów dynamicznych oraz wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych (podano stosowne twierdzenia z dowodami, ich ilustrację numeryczną oraz weryfikację w wykorzystaniu danych empirycznych). W szczególności:

- w rozdziale 3 Autor zaproponował parametryczno-nieparametryczną (tj. mieszaną) metodę identyfikacji modelu klasy Hammersteina-Wienera przy mniej restrykcyjnych założeniach dotyczących wejścia pobudzającego i podał jeden przykład numeryczny ilustrujący metodę dla systemu Hammersteina-Wienera,
- w rozdziale 4 Autor podał przykładowe wyniki numerycznej weryfikacji metody identyfikacji jądrowej dla nieliniowego systemu dynamicznego przy ograniczonym wykorzystaniu wiedzy a priori o strukturze tego systemu,
- w rozdziale 5 Autor przedstawił rozszerzenie rekurencyjnego algorytmu identyfikacji z predykcją sygnału interakcyjnego dla liniowej części modelu o strukturze ARMAX/ARX i podał przykład numeryczny ilustrujący metodę dla systemu Hammersteina,
- w rozdziale 7 Autor przedstawił eksperymentalną weryfikację działania metody identyfikacji z rozdziału 5 na przykładzie rzeczywistego procesu zmian termicznych szkieł chalcogenidkowych i podał wyniki porównania jakości uzyskanego modelu z liniowym modelem FIR oraz z klasycznym modelem Hammersteina wykorzystującym wielomianowy model statyczny na wejściu,
- w rozdziale 8 Autor przedstawił przykład praktycznego wykorzystania nieparametrycznej metody identyfikacji procesu z zastosowaniem dekompozycji zmierzonego (w warunkach przemysłowych) sygnału dyskretnego na składową deterministyczną i stochastyczną oraz zastosowanie identyfikacji w formie regresji jądrowej; wynik identyfikacji wykorzystał dalej do wykrywania stanów nienominalnych (awaryjnych) procesu obróbczego realizowanego przez maszynę CNC i porównał skuteczność detekcji z dwoma alternatywnymi metodami zaczerpniętymi z literatury (tj. z metodą drzewa decyzyjnego oraz ze sztuczną siecią neuronową typu perceptron wielowarstwowy).

Należy jednocześnie zauważyć, że Doktorant w treści dysertacji bardzo powściągliwie odnosi się do wcześniej opublikowanych prac ze swoim współudziałem, co nie jest właściwym postępowaniem, zwłaszcza, że prezentacja treści w wielu miejscach dysertacji jest znacznie mniej klarowna od tej zawartej w pracach [A]-[D] i tym samym zmusza czytelnika, chcącego zrozumieć prezentowane w dysertacji koncepcje, do sięgania po wspomniane publikacje, co jest niewygodne i nie powinno być konieczne w przypadku właściwie zredagowanej rozprawy doktorskiej. W spisie literatury Autor podaje tylko prace [B] oraz [D] (i to z niepełnymi danymi bibliograficznymi), natomiast artykułów [A] oraz [C] Autor w ogóle w spisie nie zawarł. Dlaczego?

Wątpliwości zatem budzi głównie zakres wkładu Doktoranta w uzyskanie wyników formalnych podanych w rozdziale 4 i pochodzących z pracy [A], która nie jest cytowana w dysertacji. Kwestia autorstwa treści punktów 4.1-4.5 wymaga szczegółowego wyjaśnienia przez Doktoranta.

**(5b) Prezentacja ogólnej wiedzy Doktoranta w zakresie identyfikacji systemów.** W mojej ocenie Autor rozprawy doktorskiej dobrze orientuje się w zagadnieniach związanych z identyfikacją systemów. Świadczą o tym

podane w rozdziale 2 zarówno krótki rys historyczny oraz przekonująca dyskusja problemów na temat stosowalności metod identyfikacji w warunkach praktycznych, wyniki matematyczne podane i analizowane w rozprawie, załączone dodatki A i B zawierające wybrane analizy formalne oraz definicje związane z zagadnieniami probabilistyki i teorii estymacji. Zamieszczone w rozprawie wyniki eksperymentalne pozytywnie weryfikują praktyczne umiejętności Doktoranta oraz jego zrozumienie nietrywialnych aspektów eksperymentalnego modelowania systemów rzeczywistych.

[RDN:22] Recenzje w postępowaniach o awans naukowy. Poradnik, Rada Doskonałości Naukowej, 2022.

## 6. Podsumowanie i konkluzja końcowa

Recenzowana rozprawa doktorska porusza istotny, nietrywialny i dobrze uzasadniony problem badawczy dotyczący próby osłabienia warunków skutecznego wykorzystania wybranych metod identyfikacji nieliniowych systemów dynamicznych w warunkach praktycznych. Argumenty przemawiające na korzyść rozprawy wynikają przede wszystkim z zastosowania przez Autora *złotej triady* metodyki badawczej przyjmowanej w obszarze współczesnej automatyki (teoria/symulacja/eksperyment), a także z przedstawienia przekonujących wyników badań eksperymentalnych przeprowadzonych z wykorzystaniem rzeczywistych procesów przemysłowych. Do słabych stron rozprawy należą: niedbała redakcja tekstu rozprawy, w tym niespójność notacji oraz ograniczona klarowność prezentacji wywodów matematycznych i stosowanie licznych skrótów myślowych, nie do końca czytelny zakres oryginalnego wkładu Doktoranta w uzyskanie wyników formalnych (teoretycznych) zaprezentowanych w rozdziale 4, a także zbyt swobodne/niedbałe podejście do cytowania literaturowych źródeł wyników przytaczanych w rozprawie. W świetle zwyczajowo wysokich wymagań jakościowych stawianych rozprawom doktorskim wspomniane wyżej słabości są istotne, a ich obecność znacząco obniża moją całościową ocenę recenzowanej dysertacji. Biorąc jednak pod uwagę wnioski sformułowane przeze mnie w punkcie 5 niniejszej recenzji (pomimo wątpliwości podanych w podpunkcie (5a)) **stwierdam, że rozprawa doktorska mgra inż. Pawła Mielcarka spełnia w dostatecznym stopniu wymagania ustawowe** formułowane w odniesieniu do rozpraw doktorskich i **wniosuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**



.....  
dr hab. inż. Maciej Marcin Michałek, prof. PP

