

Zielona Góra, 26 września 2023 r.

prof. dr hab. inż. Dariusz Uciński
Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych
Uniwersytet Zielonogórski

RECENZJA
rozprawy doktorskiej Pana mgr. Pawła Mielcarka
pt. *Nieparametryczne metody identyfikacji w optymalizacji procesów produkcyjnych*
opracowana na wniosek Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika
i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej

I. Obszar problemowy rozprawy

Typowa dla zastosowań praktycznych bardzo mała wiedza o charakterystykach badanego systemu dynamicznego doprowadziła w ostatnich pięciu dekadach do spektakularnego rozwoju i niewątpliwego sukcesu technik identyfikacji nieparametrycznej. Świetnie sprawdzają one się w identyfikacji nieliniowych układów dynamicznych o złożonej strukturze (tzw. układów blokowo zorientowanych) z czasem dyskretnym i w obecności zakłóceń losowych. Układy tego typu często rozważa się w technice, biologii i finansach, modelując je jako połączenie nieliniowych podsystemów bez pamięci oraz liniowych podsystemów dynamicznych. W przeciwieństwie do podejścia parametrycznego, wymagającego bardzo dużej wiedzy *a priori*, np. o tym, że podsystem nieliniowy ma charakterystykę statyczną będącą wielomianem, w podejściu nieparametrycznym o tej samej charakterystyce zakłada się jedynie, że jest funkcją całkowalną, ograniczoną lub wręcz tylko funkcją mierzalną.

Pewna dojrzałość osiągnięta przez nieparametryczne metody identyfikacji nie oznacza bynajmniej, że zmierzono się ze wszystkimi problemami, jakie na tym polu przynoszą zastosowania, tym bardziej że gwałtowny rozwój sensoryki generuje coraz to nowe możliwości zastosowań wraz z towarzyszącymi im wyzwaniem. Takim wyzwaniem jest nadal problem zastosowania metodologii w kontekście rzeczywistych, a nie symulowanych danych, kiedy nie są znane dokładne rozkłady wielkości obciążonych niepewnością pomiarową, a modele matematyczne, mimo skomplikowania, są tylko do pewnego stopnia odzwierciedleniem procesów fizycznych. Sporym wyzwaniem pozostają również nietrywialne aspekty odnoszące się do dużej złożoności obliczeniowej algorytmów identyfikacji, stanowiące dużą przeszkodę w implementacji rozważanych metod w praktyce. Wreszcie samo podejście uwzględnia coraz bardziej skomplikowane architektury układów blokowo zorientowanych.

Tradycyjne struktury układów blokowo zorientowanych obejmują systemy Hammersteina i Wienera. W systemie Hammersteina wyjście statycznego bloku nieliniowego jest jednocześnie wejściem liniowego bloku dynamicznego. System Wienera składa się z tych samych bloków, ale w odwróconej kolejności. Te dwie struktury okazały się zadziwiająco elastyczne w

modelowaniu dużej klasy złożonych modeli nieliniowych. Gwałtowny rozwój techniki prowadzi jednak do powstawania coraz bardziej złożonych systemów, dla których takie klasyczne modele nie są już wystarczające. Powoduje to zainteresowanie modelami typu sandwich, np. systemem Wienera-Hammersteina (będącym szeregowym połączeniem jednego liniowego podsystemu dynamicznego, nieliniowego podsystemu statycznego i drugiego podsystemu liniowego), lub podobnymi uogólnieniami (układ NARMAX, wzajemnie połączone ze sobą systemy MIMO, itd.).

Właśnie w tym kontekście recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. Pawła Mielcarka, poświęcona w całości nieparametrycznym metodom identyfikacji nieliniowych układów dynamicznych, jest pozycją bardzo ambitną i aktualną. Zasadniczo, pomysł Autora polega na wykorzystaniu struktur układów blokowo zorientowanych do modelowania procesów cieplnych podczas badań szkieł chalcogenidkowych oraz detekcji uszkodzeń obrabiarek sterowanych numerycznie. Złożoność obu procesów stała się motywacją do rozważenia nieklasycznych struktur układów zorientowanych blokowo oraz zaproponowania nowych algorytmów identyfikacji. Co więcej, obszerną część rozprawy zajmuje praktyczna weryfikacja działania zaproponowanych technik w oparciu o dane rzeczywiste pochodzące z dwóch eksperymentów, dla których do tej pory nie stosowano tego typu modelowania.

Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione czynniki, sformułowane na str. 7 cele pracy, jak również wynikające z nich zadania szczegółowe sprecyzowane na str. 9–12, są stosunkowo jasne i dobrze określone. Sprowadzają się one do wykazania, że liczne problemy towarzyszące zazwyczaj metodom identyfikacji nieparametrycznej, takie jak restrykcyjne założenia dotyczące sygnału wejściowego, przekleństwo wymiarowości, brak wstępnej wiedzy o strukturze modelu i poszczególnych bloków oraz duża złożoność obliczeniowa, można w dużym stopniu ograniczyć poprzez rozważenie nowych struktur układów zorientowanych blokowo oraz opracowanie odpowiednich nowych lub zmodyfikowanie istniejących algorytmów identyfikacji, przez co w rezultacie staje się możliwym rozwiązywanie nie tylko zadań modelowania, ale również statystycznego sterowania procesem dla nietrywialnych procesów produkcyjnych. Tak zarysowaną problematykę rozprawy uważam za istotną i nadzwyczaj aktualną, o rezultatach mogących przewartościować dotychczasowe podejścia do modelowania i identyfikacji nieliniowych układów dynamicznych. Fakt ten przesądza o pozytywnej ocenie wybranego tematu jako przedmiotu opiniowanej rozprawy doktorskiej.

II. Koncepcja oraz realizacja rozprawy

Obszerna rozprawa, napisana w języku polskim i licząca 105 stron numerowanych, składa się z wprowadzenia, trzech zasadniczych rozdziałów przedstawiających koncepcję proponowanych metod, czterech rozdziałów raportujących wyniki eksperymentów weryfikujących działanie tych metod w praktyce w oparciu o dane rzeczywiste, rozdziału podsumowującego, oraz dwóch dodatków zawierających dowody oryginalnych rezultatów teoretycznych oraz wykorzystywane definicje i twierdzenia potrzebne w rozważaniach teoretycznych. Załączony wykaz 58 pozycji cytowanej literatury w zasadzie odzwierciedla stan badań w zakresie tematycznym rozprawy (o pewnych brakach w tym wykazie traktuję w części poświęconej uwagom krytycznym).

Zupełnie nietypowo, pierwszy numerowany rozdział to *Spis symboli* (materiał pomocniczy tego typu raczej nie powinno się traktować jako równoprawnego rozdziału pracy). W związku z tym

dopiero drugi rozdział stanowi *Wprowadzenie*, na które składa się bardzo krótki przegląd literatury, przedstawienie motywacji zagadnień rozprawy, bardzo ogólny cel pracy, oraz ogólny zarys proponowanego podejścia wraz z listą zaproponowanych rozwiązań licznych problemów szczegółowych.

Rozdział 3 stanowi opis i analiza własności algorytmu identyfikacji systemu Hammersteina-Wienera (szeregowego połączenia jednego nieliniowego podsystemu statycznego, liniowego podsystemu dynamicznego i drugiego nieliniowego podsystemu statycznego). Oczywiście, już analiza takiego połączenia bloków stanowi samo w sobie ogromne wyzwanie, jednak Doktorantowi udało się zaproponować oryginalne rozwiązanie dotyczące identyfikacji takiego systemu. Pomysł polega na przeprowadzeniu dwóch eksperymentów. W eksperymencie pasywnym układ pobudza się szumem losowym, podczas gdy w eksperymencie aktywnym pobudzeniem jest binarnym ciągiem losowym. Algorytm składa się z czterech kroków. Najpierw identyfikuje się skończoną odpowiedź impulsową podsystemu liniowego z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów w połączeniu z selekcją jądrową (eksperyment pasywny). Następnie, estymuje się nieliniowość wyjściową w oparciu o eksperyment aktywny (rolą binarnego wymuszenia jest eliminacja wpływu nieliniowości wejściowej) z wykorzystaniem estymatora jądrowego. Dodatkowo estymuje się funkcję gęstości prawdopodobieństwa szumu wyjściowego. W trzecim kroku estymuje się nieznaną sygnał pomiędzy blokiem liniowym a nieliniowością wyjściową (kluczowym jest tu założenie o ścisłej monotoniczności tej nieliniowości, równoznacznej z jej odwracalnością). Synteza filtra odwrotnego wymaga numerycznego rozwiązania operacji rozplotu. W czwartym kroku identyfikuje się nieliniowość wejściową w oparciu o estymaty nieznanego sygnału na wyjściu bloku liniowego otrzymane w poprzednim kroku. Jest to już jednak zadanie rutynowe, ponieważ przebiega dokładnie w taki sam sposób, jak podczas identyfikacji systemu Hammersteina. Rozdział uzupełniają dowody zbieżności estymatorów bloku nieliniowego i nieliniowej charakterystyki wyjściowej oraz prosty przykład potwierdzający symulacyjnie tę zbieżność.

W *rozdz. 4* proponuje się bardzo ogólne podejście do nieparametrycznej identyfikacji systemów, których struktura nie jest znana. Odwzorowanie przekształcające ciąg wejść na niezakłóconą odpowiedź systemu powinno jedynie spełniać warunek Lipschitza, a pamięć układu wykładniczo zanikać (można więc przyjąć, że odpowiedź impulsowa jest skończona). W systemie nie występuje sprzężenie zwrotne. Niezakłóconą odpowiedź układu można więc przybliżyć wielowymiarową funkcją regresji, traktując kolejne wartości wejść w horyzoncie pamięci układu jako pojedynczą wartość wektorowego predyktora. Do estymacji odpowiedzi używa się estymatora jądrowego, co rzeczywiście czyni podejście bardzo ogólnym. Niestety, nawet niewielki wzrost długości odpowiedzi impulsowej szybko prowadzi do pojawienia się przekleństwa wymiarowości. Oryginalny pomysł znaczącego ograniczenia wpływu tego zjawiska polega na zastosowaniu kwantyzacji wejść lub zastosowaniu wejść okresowych, co bardzo poprawia szybkością zanikania błędu średniokwadratowego. Nieparametryczne oceny wyjść można podstawić do kryterium najmniejszych kwadratów w miejsce obserwacji i poszukiwać modelu parametrycznego w pewnej założonej rodzinie modeli dopuszczalnych. Taka strategia dekompozycji zadania identyfikacji może być istotna z punktu widzenia zapewnienia stabilności numerycznej estymacji parametrycznej, a samą procedurę estymacji nieparametrycznej można wówczas interpretować jako kompresję danych. Rozważania uzupełnia prosty przykład symulacyjny.

W rozdz. 5 zaproponowano w pełni rekurencyjny algorytm identyfikacji systemu Hammersteina. Oparto go o koordynację procesów naprzemiennej identyfikacji bloków nieliniowego i dynamicznego. Nieliniowość estymuje się nieparametrycznie (stosując regresję jądrową lub ortogonalną), a blok dynamiczny – z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów. Niewątpliwą zaletą jest istotne ograniczenie zjawiska przekleństwa wymiarowości, co wynika z niezależnej identyfikacji obu bloków oraz wyprowadzania efektywnej wersji rekurencyjnej. I tu również analizuje się asymptotyczne własności algorytmu. Kluczowy jest pomysł obliczania przesunięcia między funkcją regresji (między wejściem a wyjściem), a charakterystyką nieliniową, co redukuje się do rozwiązywania pewnego zadania optymalizacji wypukłej. Podejście uogólniono do systemów klasy ARMAX, a rozważania teoretyczne uzupełniono prostym przykładem symulacyjnym.

Rozdział 7 opisuje zastosowanie algorytmu zaproponowanego w rozdz. 4 do analizy procesów cieplnych zachodzących w szklach chalcogenidkowych w kalorymetrze różnicowym podczas badań ich starzenia fizycznego. Wykorzystanie danych rzeczywistych dostarcza silnych dowodów na istotną poprawę jakości modelowania w porównaniu z parametrycznym modelem ARMA oraz z tradycyjnym podejściem opartym o model Hammersteina.

Bardzo ciekawy jest rozdz. 8 dotyczący monitorowania pracy obrabiarek sterowanych numerycznie (tokarko-frezarka CNC). Przedstawia się tu szczegóły wykorzystania pomiarów chwilowego natężenia prądu pobieranego przez maszynę do wykrywania ewentualnych anomalii lub uszkodzeń. Pobierany prąd przedstawia się jako sumę składowej deterministycznej (otrzymuje się ją poprzez uwzględnienie ustalonej arbitralnie liczby składników szeregu Fouriera w aktualnym oknie czasowym), składowej stochastycznej z nieliniową autoregresją, oraz nieskorelowanego czasowo zakłócenia losowego. Składową autoregresyjną modeluje się z zastosowaniem wielowymiarowej regresji jądrowej omówionej wcześniej w rozdz. 4. Monitoring odbywa się poprzez bieżącą kontrolę odchylenia przeciętnego lub odchylenia standardowego reszt (reszty stanowią oszacowania nieskorelowanego czasowo szumu wyjściowego). Przekroczenie przez jedno z tych odchyłeń arbitralnie ustalonej wartości progowej jest symptomem wystąpienia anomalii i może być powodem alarmu. Jak sam Doktorant zaznacza, pomysł nie został jeszcze szczegółowo przeanalizowany od strony teoretycznej, jednak wyniki eksperymentów na danych rzeczywistych okazują się dużo lepsze niż dla alternatywnych metod wykorzystujących uczenie maszynowe (drzewa regresyjne i sieci neuronowe).

Oceniając merytorycznie całą rozprawę stwierdzam, że jest ona napisana na bardzo dobrym poziomie. Zawiera jasno sformułowany i ważny problem naukowy, oraz prezentuje poprawne rozwiązanie tego problemu, które zostało uzyskane przez Autora samodzielnie i z zastosowaniem właściwej metodologii naukowej. Na podstawie przedstawionego skrótowo omówienia treści całej rozprawy doktorskiej należy odnotować, że jej Autor wykazał się dobrymi umiejętnościami formułowania problemów naukowo-badawczych oraz ich efektywnego rozwiązywania z zastosowaniem zaawansowanych narzędzi statystyki, modelowania i identyfikacji systemów. Już na podstawie wstępnej analizy można stwierdzić, że rozprawa stanowi dzieło wartościowe, zdecydowanie odpowiadające wymaganiom stawianym przez stosowne przepisy.

Pod względem redakcyjnym pracę napisano poprawnie. Użyte słownictwo odpowiada powszechnie stosowanemu. Zawiera pewną liczbę błędów składu i niedociągnięć językowych,

co jednak nie podważa jej bardzo dobrego poziomu merytorycznego.

III. Oryginalne osiągnięcia

Przyjmując, że głównym celem rozprawy było znaczące rozszerzenie zakresu stosowalności technik nieparametrycznych identyfikacji systemów dynamicznych na procesy produkcyjne, co w efekcie ułatwiłoby zarządzanie jakością i statystyczne sterowanie tymi procesami, należy stwierdzić, że cel ten Autor osiągnął. Co więcej, weryfikacji rezultatów dokonano w oparciu o dane rzeczywiste pochodzące z nietrywialnych procesów (badanie starzenia szkieł chalkogenidkowych poprzez analizę termiczną oraz monitorowanie pracy tokarko-frezarki CNC).

W szczególności, za najważniejsze rezultaty rozprawy uważam następujące:

1. Zaproponowanie prekursorskiego algorytmu identyfikacji systemu Hammersteina-Wienera, opierającego się o wykonanie dwóch eksperymentów z dwoma ciągami wymuszeń losowych, oraz udowodnienie zbieżności generowanych estymat (rozd. 3). Co prawda algorytm ma pewne ograniczenia (wymaga ścisłej monotoniczności wyjściowej charakterystyki nieliniowej oraz względnie krótkiej odpowiedzi impulsowej podsystemu liniowego, aby uniknąć zjawiska przekleństwa wymiarowości), jednak nie ma dla niego do tej pory przekonujących alternatyw, a poza tym stanowi świetny punkt wyjścia do syntezy bardziej zaawansowanych podejść.
2. Zaproponowanie i asymptotyczna analiza uniwersalnego algorytmu estymacji systemów dynamicznych z zakłóconym wyjściem nie wymagającego ani wstępnej wiedzy o strukturze system, ani parametrycznej reprezentacji nieliniowości (rozd. 4). Algorytm opiera się o nieparametryczną (jądrową) estymację wielowymiarowej funkcji regresji. Zweryfikowano go pozytywnie w oparciu o dane rzeczywiste dotyczących procesów cieplnych w szklach chalkogenidkowych w kalorymetrze różnicowym (rozd. 7)
3. Zaproponowanie nowego rekurencyjnego algorytmu identyfikacji systemu Hammersteina, bazującego na połączeniu naprzemiennej identyfikacji bloków nieliniowego i dynamicznego z koordynacją obu etapów (rozd. 5). Algorytm znacząco ogranicza zjawisko przekleństwa wymiarowości oraz drastycznie redukuje wymagania pamięciowe. W rozprawie zademonstrowano również, jak uogólnić podejście do systemów klasy ARMAX.
4. Zaproponowanie nowej techniki monitorowania procesów produkcyjnych, mającej na celu detekcję ich zaburzeń. Technikę zweryfikowano pozytywnie w rzeczywistym eksperymencie mającym na celu wykrywanie anomalii w pracy obrabiarki sterowanej numerycznie w oparciu o monitorowanie natężenia prądu pobieranego przez maszynę. Podejście może okazać się bardzo perspektywiczne dla metod statystycznego sterowania procesami.

Należy podkreślić, że uzyskane rezultaty udokumentowano trzema publikacjami w czasopiśmie (*International Journal of Modelling, Identification and Control*, IF = 0.7,

wyd. Inderscience, lista JCR, wg WoS kwartył Q4 w Automation and Control Systems, 40 pkt. MEiN; *Algorithms*, IF = 2.3, MDPI, lista JCR, wg WoS kwartył Q3 w Computer Science: Theory and Methods, 40 pkt. MEiN; *IFAC-PapersOnLine*, lista JCR, 20 pkt. MEiN).

W podsumowaniu, należy stwierdzić, że **sformułowane cele rozprawy zostały osiągnięte, a jej Autor wykazał się głęboką wiedzą i umiejętnościami niezbędnymi do samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.**

IV. Uwagi i komentarze

Przedstawiona do recenzji praca zawiera istotną treść naukową i wiele nowych wyników. Stanowi logiczną całość poczynwszy od uzasadnienia praktycznego problemu, poprzez jego formalizację, aż do rozwiązania różnorodnych wersji problemu z przykładami zastosowań zaproponowanej metodologii w nietrywialnych zadaniach testowych. Praca prezentuje bardzo dobry poziom naukowy, a Autor biegle posługuje się aparatem matematycznym, m.in. w zakresie statystyki oraz modelowania i identyfikacji systemów.

Lektura rozprawy skłania jednak również do sformułowania następujących uwag krytycznych:

1. Przegląd literatury dotyczący identyfikacji systemów (rozdz. 2.1) jest rażąco krótki i fragmentaryczny. To tylko dwie strony tekstu, z których jedną poświęcono pionierskiej pracy Gaussa z XIX w. Wbrew tytułowi (*Historia identyfikacji systemów*) brak jest szerszego komentarza nt. różnic między nurtem parametrycznym i nieparametrycznym. Ten pierwszy nie jest wręcz omawiany, a ten drugi redukuje się do wybranych i bardzo ogólnych osiągnięć szkoły polskiej.
2. Rozdział 2.2 nosi nazwę *Teza i cele pracy*. Niestety, wbrew tytułowi, teza pracy nie jest w nim jawnie sformułowana, a lista celów szczegółowych pojawia się dopiero w rozdz. 2.4, i to raczej w formie listy problemów odnoszących się do stosowalności metod identyfikacji nieparametrycznej w praktyce oraz stosownych rozwiązań zaproponowanych w tym kontekście w rozprawie. Mówi się tu jedynie o „zaproponowaniu rozwiązań problemu stosowalności teoretycznych metod identyfikacji systemów w problemach praktycznych z naciskiem na środowiska przemysłowe i badawczo-rozwojowe” jako o głównym celu rozprawy. Czytelnik może odnieść błędne wrażenie, że do tej pory technik nieparametrycznych nie stosowano w praktyce, a autor ma zamiar skupienia się na zaadaptowaniu i implementacji znanych technik identyfikacji nieparametrycznej w praktyce przemysłowej.
3. Materiał rozdz. 3 dotyczący identyfikacji systemów Hammersteina-Wienera zawarto w pracy Mzyk, G., Biegański, M., and Mielcarek, P. (2019). Multi-Level Identification of Hammerstein-Wiener Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 52(29), 174-179. Niestety, w rozprawie się o tym w ogóle nie wzmiankuje, a artykuł pominięto w bibliografii. Być może jest to efektem roztargnienia lub pośpiechu, jednak takie pomijanie wkładu współautorów niepotrzebnie zostawia pole rozmaitym interpretacjom intencji autora rozprawy.



4. W rozdz. 3 podstawowym założeniem jest ścisła monotoniczność wyjściowej charakterystyki statycznej. Jak zagwarantować tę monotoniczność dla estymaty nieliniowości? To przecież jest mocno uwarunkowane monotonicznością funkcji bazowych $g_i(x)$, ale wtedy metoda najmniejszych kwadratów implementująca wzór (3.13) powinna uwzględniać ograniczenia na znaki ocen parametrów b_i .
5. W rozdz. 3 na str. 19 stwierdza się, że L jest „losową liczbą wybranych przez estymator jądrowy wartości wyjścia”. Jest to mylące, bo L jest liczebnością sekwencji określonych wektorem φ_i w ciągu wymuszeń. W związku z tym, zamiast L powinno się też używać oznaczenia L_i .
6. W pracy Brouri, A., Chaoui, F. Z., and Giri, F. (2022). Identification of Hammerstein–Wiener models with hysteresis front nonlinearities. *International Journal of Control*, 95(12), 3353-3367 omawia się identyfikację systemów Hammersteina-Wienera, w których wejściowa nieliniowa charakterystyka statyczna zawiera histerezę, a wyjściowa charakterystyka statyczna nie jest odwracalna. Na ile algorytm zaproponowany w rozdz. 3 dałoby się zaadaptować do takich osłabionych założeń?
7. Materiał rozdz. 4 oraz 7 dotyczących jądrowej identyfikacji nieliniowych systemów dynamicznych o ogólnej strukturze wraz z zastosowaniem do modelowania szkieł chalcogenidkowych zawarto w pracy Mzyk, G., Hasiewicz, Z., & Mielcarek, P. (2020). Kernel identification of non-linear systems with general structure. *Algorithms*, 13(12), 328. Niestety, w rozprawie się o tym nie wzmiankuje, a artykuł pominięto w bibliografii. Mam tu więc ten sam komentarz, jak w punkcie 3 powyżej.
8. Czy algorytm rekurencyjny z rozdz. 5 można zaadaptować do problemu z wolno zmiennymi parametrami, stosując np. współczynnik zapominania, tak jak w rekurencyjnej wersji metody najmniejszych kwadratów?
9. Pomysł monitorowania procesu z zastosowaniem modelowania składowej autoregresyjnej i statystyczną kontrolą reszt, zaprezentowany w rozdz. 8, jest znany w statystycznym sterowaniu procesem od dawna, chociaż do tej pory stosowano tu modele typu ARMA lub ARIMA. Warto byłoby jednak odnieść się do tych technik, m.in. z powodu dobrze opracowanych statystycznych procedur monitorowania reszt, stosujących rozmaite karty kontrolne, a nie tylko proste porównywanie z arbitralnie ustalonymi wartościami progowymi. Odpowiednie techniki opisano np. w pracach
 - a. Psarakis, S., and Papaleonida, G. E. A. (2007) SPC procedures for monitoring autocorrelated processes. *Quality Technology & Quantitative Management*, 4(4), 501-540,
 - b. Vander Wiel, S. A. (1996) Monitoring processes that wander using integrated moving average models. *Technometrics*, 38(2), 139-151,
 - c. rozdz. 10.4 klasycznego podręcznika Douglasa C. Montgomery'ego pt. *Introduction to Statistical Quality Control*, 6th Edn., Wiley, Hoboken, NJ, 2009.
10. W rozdz. 8 nie podano jak podzielono dane na uczące i testujące. Nie podano też, jak



ustalano wartość progową wskaźników błędu do sygnalizacji alarmu. Określono też, że perceptron wielowarstwowy miał 40 warstw ukrytych, co jest jakimś nieporozumieniem. Nie podano też innych szczegółów architektury sieci neuronowej.

11. W prezentowanych przykładach symulacyjnych lub eksperymentach odczuwalny jest brak porównań z innymi technikami nieparametrycznymi. Uzasadniałyby one np. sens używania systemów Hammersteina-Wienera zamiast np. tradycyjnego systemu Hammersteina, tradycyjnego systemu Wienera, lub systemu Wienera-Hammersteina.

W rozprawie pojawia się ponadto szereg nieprecyzyjności lub błędów składu:

1. Pierwszy numerowany rozdział to *Spis symboli*. Tego typu materiał powinien być poza numeracją.
2. Rozdział 6 to niecała strona stanowiąc wprowadzenie do omawianych dalej przykładów zastosowań do modelowania systemów rzeczywistych. Z powodzeniem można byłoby go z tymi przykładami połączyć.
3. Rażą liczne błędy językowe, np. *nagminne ilość parametrów* zamiast *liczba parametrów*, *ilość punktów* zamiast *liczba punktów*, *Narendra'e* zamiast *Narendrę* (str. 37), *Gallman'a* zamiast *Gallmana* (str. 37), *a priori* zamiast *a priori* (str. 37), *na przeciw* zamiast *naprzeciw* (str. 51), *i.e.* zamiast *tzn.* (str. 54).
4. Często pojawiają się błędy składu, np. *nastaw masz* zamiast *nastaw maszyn* (str. 8), *nie należy również zapinać* zamiast *nie należy również zapominać* (str. 8), *Lipshitz* zamiast *Lipschitza* (str. 35), *podstawowymi uprzedzeniami produkcyjnymi* zamiast *podstawowymi urządzeniami produkcyjnymi* (str. 61), *szeregu Furiera* zamiast *szeregu Fouriera* (str. 64).
5. Często występują zdania bez podmiotu i orzeczenia, np. *Dostarczając tym samym formalizmów udowadniających skuteczność opisywanych algorytmów jaki i przykładów ich zastosowania.* (str. 6), *Co prowadzi do wcześniej omawianego problemu wielowymiarowości.* (str. 11). Występują też kuriozalne zdania typu *Wpływa to znacząco na siły skrawania występujące w tym czasie, w związku z czym mogą nastąpić znaczne różnice zarówno w składowej deterministycznej.* (str. 64) lub zwroty typu *mogą być zastosowane do rzeczywistych aplikacji* (str. 79).
6. W bibliografii kilka pozycji ma niepełne opisy ([35], [36], [42], [49]).
7. We wzorze (3.5) warunki nie są komplementarne. W drugim warunku omyłkowo zapisano, że moduł argumentu jądra powinien być dodatni, podczas gdy powinien być większy od jedności.

Powyższe uwagi krytyczne nie mają jednak przesadnego wpływu na ogólną opinię o recenzowanej dysertacji, którą oceniam jako bardzo wartościową. Uważam, że cele postawione przez Autora rozprawy zostały osiągnięte, poparte silnymi wynikami empirycznymi, oraz przedstawione w interesujący sposób.

V. 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. Pawła Mielcarka spełnia wszystkie wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* w odniesieniu do rozpraw doktorskich;
2. w związku z tym wnoszę o dopuszczenie Autora rozprawy do dalszych, przewidzianych przepisami, etapów przewodu doktorskiego.

Dariusz Mielczak

