

wpłynęło dnia 25.10.2023

nr zał.

Zielona Góra, 20 października 2023 r.

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

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Oliwii Krauze

pt. *Measurements, modelling and control of flows in grinding installation with electromagnetic mill*
opracowana na wniosek Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej

I. Obszar problemowy rozprawy

Rosnąca złożoność nowoczesnych systemów przemysłowych, obiektów i linii technologicznych, a z drugiej strony spełnienie wysokich wymagań jakościowych i niezawodnościowych stanowią dzisiaj wyzwanie dla dynamicznie rozwijającej się teorii oraz praktyki inżynierii procesowej i automatyki. Głównym elementem kształtującym rozwój systemów sterowania jest gwałtowny rozwój postęp techniki komputerowej (mocy obliczeniowej nowych generacji procesorów, pojemności pamięci, szybkości transmisji danych w sieciach, rozwój oprogramowania systemowego), wdrożenie inteligentnych urządzeń pomiarowych i wykonawczych, wprowadzenie nowych funkcji systemów sterowania, np. zaawansowanych algorytmów modelowania, sterowania i diagnostyki procesów. Nową generację systemów automatyki charakteryzuje otwartość, wysoki komfort obsługi, łatwość projektowania, oraz możliwość aplikacji dla instalacji technologicznych różnych wielkości.

W niektórych zastosowaniach funkcje sterowania i nadzoru w systemach sterowania i monitorowania procesów przemysłowych są jednak wciąż ograniczone, co wiąże się często z brakiem adekwatnych modeli procesów, niezbędnych do realizacji zaawansowanych algorytmów regulacji, optymalizacji procesów, detekcji uszkodzeń, czy realizacji symulatorów procesów. Wprawdzie intensywnie rozwija się oprogramowanie do modelowania fizyko-chemicznego, jednak nie zawsze modele matematyczne procesów są wystarczająco znane i jedyną opcją pozostaje modelowanie na podstawie dostępnych danych pomiarowych. Jednym z problemów tego typu jest proces mielenia, jedno z podstawowych zadań wykonywanych w ciągach technologicznych w dziedzinie chemii budowlanej, przetwarzaniu surowców mineralnych (np. rudy miedzi), wytwarzaniu produktów spożywczych, pasz, lekarstw, farb. itp. Rozdrabnianie materiału jest zazwyczaj operacją przygotowawczą przed właściwym wzbogacaniem surowca i ma na celu uzyskanie jak największych stopni rozdrobnienia i uwolnienie minerałów użytecznych. Dokonuje się go w młynach, których zadaniem jest produkcja ziaren o odpowiedniej wielkości i kształcie.

Mielenie charakteryzuje się wysoką koszto- i energochłonnością oraz generowaniem hałasu i drgań, więc naturalnym staje się dążenie do zwiększenia efektywności energetycznej, technologicznej i eksploatacyjnej instalacji mielenia. Intuicja podpowiada, że do znaczącej poprawy efektywności i obniżenia kosztów produkcji można przyczynić się dobrze zaprojektowany układ sterowania młynem, jednak w praktyce to zadanie istotnie komplikuje duża liczba zmiennych procesowych i interakcje między nimi. Oznacza to, że gdy jedna zmienna regulowana jest pewnym sygnałem sterującym, ma to wpływ również na inne zmienne regulowane, które zmieniają się w niepożądany sposób. Interakcje między pętlami sprzężenia zwrotnego mogą prowadzić do tego, że układ sterowania ma trudności z utrzymaniem stabilności. Sytuację komplikuje dodatkowo występowanie dużych opóźnień czasowych, parametrów zmiennych w czasie, oraz nieliniowości, co może powodować niepożądane skutki i zachowania procesu.

Właśnie w tym kontekście recenzowana praca Pani mgr Oliwii Krauze, poświęcona w całości modelowaniu, obserwacji i sterowaniu przepływu w nowatorskiej instalacji mielenia z młynem elektromagnetycznym i pneumatycznym transportem materiału jest pozycją bardzo ambitną i aktualną. Koncepcję młyna, będącego nowym rozwiązaniem w dziedzinie ultradrobnoziarnego mielenia twardych materiałów, rozwija od kilku lat zespół z Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej we współpracy z lokalnymi firmami i Wydziałem Górnictwa i Geoinżynierii AGH, również w ramach projektu NCBiR. Celem miała być budowa urządzenia istotnie redukującego zużycie energii i podwyższającego wydajność technologiczną dzięki możliwości kształtowania granulacji produktu. W ramach projektu opracowano urządzenia dozujące nadawę i mielniki oraz klasyfikujące produkt dla pracy w układzie z recyklem. Obecnie dostępny prototyp, przeznaczony do rozdrabniania materiałów suchych bądź zawieszin materiałów sypkich w cieczach, wyposażony jest w system kontrolno-pomiarowy z układami oceny jakości mielenia i stanu pracy młyna. Układ sterowania opiera się o nadrzędny system SCADA.

W rozprawie pani mgr Oliwia Krauze skupia się na pracach badawczych, dla których zaproponowała samodzielnie oryginalne rozwiązania lub w realizacji których uczestniczyła jako członek zespołu. Po pierwsze, dotyczyły one opracowania nowatorskich metod pośredniego szybkiego i bezkontaktowego pomiaru wielkości opisujących przetwarzany materiał (przepływu masowego, uziarnienia i wilgotności) wykorzystującego informację pochodzącą z monitorowania drgań, sygnałów dźwiękowych lub wizyjnych. Po drugie, w rozprawie zaproponowano metodologię syntezy charakterystyk statycznych i liniowych modeli dynamicznych typu SISO dla odchyłeń od statycznego punktu pracy, które wykorzystano następnie do symulacji pracy instalacji i syntezy układu regulacji przepływem powietrza transportowego.

Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione czynniki, sformułowane na str. 10 cele i tezę pracy, jak również wynikające z nich zadania szczegółowe, są jasne i dobrze określone. Sprowadzają się one do wykazania, że algorytmy analizy danych pochodzących z pośrednich pomiarów wielkości opisujących przetwarzany materiał oraz modelowanie przepływu powietrza transportowego w oparciu o eksperymentalne wyznaczenie charakterystyki statycznej i liniowych modeli dynamicznych dla odchyłeń od punktu pracy (człony inercyjne pierwszego i drugiego rzędu z opóźnieniami), pozwala na monitorowanie oraz sterowanie pracą instalacji mielenia z młynem elektromagnetycznym. Tak zarysowaną problematykę rozprawy uważam za istotną i nadzwyczaj aktualną, o rezultatach mogących istotnie wpłynąć na metodykę syntezy strategii obserwacji i układów regulacji instalacji mielenia z młynami elektromagnetycznymi. Fakt ten przesądza o pozytywnej ocenie wybranego tematu jako przedmiotu opiniowanej rozprawy doktorskiej.

II. Koncepcja oraz realizacja rozprawy

Obszerna rozprawa, napisana w języku angielskim i licząca 208 stron numerowanych, składa się ze wstępu, czterech zasadniczych rozdziałów przedstawiających koncepcję proponowanych metod, rozdziału podsumowującego, oraz dodatku precyzującego wkład Autorki do rozwoju metod opisanych w rozprawie. Załączony wykaz 118 pozycji cytowanej literatury odzwierciedla stan badań w zakresie tematycznym rozprawy.

Pracę rozpoczyna *Wstęp*, na który składa się krótkie przedstawienie motywacji zagadnień rozprawy, ogólny opis struktury, funkcjonalności i specyfiki rozważanego młyna elektromagnetycznego, a także cel i teza pracy (w tym momencie już intuicyjnie jasna). Rozdział kończy charakterystyka struktury pracy.

Rozdział 2 koncentruje się na technikach pośredniego pomiaru wielkości opisujących materiał przetwarzany w młynie, przy czym metoda oceny przepływu masowego materiału i jego uziarnienia jest oryginalnym pomysłem Autorki, a technika szacowania zawartości wilgoci powstała w zespole, w którym Autorka brała udział w wykonywaniu eksperymentów i wysokopoziomowym przetwarzaniu danych. Z krótkiego, ale rzeczowego przeglądu istniejących rozwiązań wynika, że w przypadku

szacowania przepływu masowego materiału i jego uziarnienia brak jest technik jednocześnie działających na, bieżąco, bezkontaktowych, względnie tanich, i zarazem prostych do zaimplementowania. Pomysłem Autorki na wypełnienie tej luki jest ekstrakcja informacji o przepływie i uziarnieniu z drgań rejestrowanych przez akcelerometr piezoelektryczny, a spowodowanych ruchem ziaren materiału. Eksperyment wykonywano nie tyle w instalacji mielenia, co na specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku ułatwiającym określanie rzeczywistej wielkości przepływu, niezbędnej do kalibracji metody. Są to więc poniekąd rezultaty badań wstępnych, które będą jeszcze wymagać kontynuacji w celu dostosowania do instalacji mielenia. Sygnał akcelerometru jest dzielony na zachodzące na siebie okna czasowe, a w każdym z nich wyznacza się gęstość widmową mocy, poddaną następnie przetwarzaniu w celu eliminacji wpływu zakłóceń oraz zagregowania i wygładzenia. Kształt i zmienność krzywej gęstości oraz scałkowana wersja gęstości (nazywana indeksem mocy) okazują się być skorelowane z przepływem masowym materiału i wielkością ziaren. Autorka demonstruje analizę jakościową korzystając z licznych wykresów. Nieco lepsze rezultaty uzyskuje się po zastąpieniu akcelerometru mikrofonem i rejestracją sygnału dźwiękowego, również przetwarzanego na widmową gęstość mocy. Niewątpliwą zaletą obu podejść jest użycie jednego czujnika (akcelerometru lub mikrofonu) do jednoczesnej oceny obu nieznanymi wielkości. Rozdział uzupełnia opis pośredniej techniki pomiaru wilgotności materiału w oparciu o obrazy termowizyjne oraz obrazy z kamery kolorowej. Technikę opracowano zespołowo w ramach projektu SYSMEL. W tym przypadku analiza jest pełniejsza z uwagi na określenie modelu regresji liniowej, w którym rolę zmiennej objaśniającej (predyktora) pełni względna wilgotność materiału, a zmiennej objaśnianej (odpowiedzi) – mediana intensywności obrazu. Badane modele to funkcja liniowa i, ogólniej, modele wielomianowe, a także splajny wygładzające. Doboru modelu dokonuje się w oparciu o kryterium Akaike, a oceny wilgotności dokonuje się wykorzystując funkcję odwrotną funkcji regresji.

Rozdział 3 skupia się na modelowaniu przepływu czystego powietrza (czyli bez mielonego materiału i mielników) w rozważanej instalacji mielenia. Celem była predykcja przepływów i względnych ciśnień powietrza w trzech głównych strumieniach instalacji (głównym, recyklu i dodatkowym) na podstawie stopnia otwarcia przepustnic motylkowych związanych z tymi strumieniami. Wielkościami mierzonymi dla każdego z trzech wlotowych strumieni powietrza były prędkość powietrza, temperatura i ciśnienie względne. Przepływy masowe można otrzymać z wielkości mierzonych poprzez rozwiązanie układu algebraicznych opisujących fizyczne zależności między nimi (nb. fragment dotyczący budowy tego układu równań uważam za jeden z ciekawszych w pracy, z uwagi na interesujące wykorzystanie niebanalnej wiedzy nt. fizyki zachodzących zjawisk). W pierwszej części rozdziału omawia się wyznaczenie charakterystyk statycznych sześciu wielkości, których dotyczy predykcja, każda będąca funkcją trzech zmiennych niezależnych określających położenia przepustnic. Obserwacji stanów ustalonych dokonuje się dla każdego z punktów arbitralnie wybranej zgrubnej siatki położań przepustnic, po czym następuje usunięcie artefaktów i obserwacji odstających, co w efekcie implikuje konieczność uzupełnienia usuniętych danych poprzez interpolację w oparciu o sąsiednie obserwacje. Ponieważ stany ustalone mogą się nieco różnić w zależności od kierunku zmian położań przepustnic (efekt histerezy), dokonuje się uśrednienia wyników. W oparciu o dane pomiarowe dokonuje się trójwymiarowej interpolacji liniowej stanów ustalonych na dużo gęstszej siatce położań trzech przepustnic, której wynik dodatkowo podlega procedurze wygładzania. Podobną technikę zastosowano do budowy odpowiednich liniowych modeli dynamicznych SISO dla odchylenia od punktu pracy. Spośród testowanych członów inercyjnych pierwszego i drugiego rzędu z opóźnieniami najlepsze rezultaty dały te pierwsze. Ponieważ wymuszenia mają charakter odpowiedzi skokowych, podobnie jak podczas pracy instalacji (przełączenia przepustnic), identyfikację parametrów oparto o odpowiedzi skokowe. Parametry modeli liniowych wyznaczonych dla zadanej zgrubnej siatki punktów pracy przepustnic interpoluje się na pozostałe możliwie punkty pracy. Rozdział kończą ciekawe rozważania na temat estymacji spadku ciśnień w wybranych punktach instalacji w oparciu o pomiary ciśnień dostępne jedynie na wlotach. Kalibracja współczynników potrzebnych do takiego oszacowania prowadzi do dopasowywania silnie nieliniowych funkcji regresji przy ograniczeniach liniowych i nieliniowych. Autorka zwięźle raportuje również rezultaty pracy magisterskiej p. Bartosza Kordali, poświęconej identyfikacji charakterystyki statycznej w instalacji mielenia w obecności mielonego medium.

Rozdział 4 dotyczy implementacji symulatora przepływu powietrza w instalacji, wykorzystującego rezultaty opisane w poprzednim rozdziale i zaimplementowanego w Simulinku. Wbrew pozorom, nie jest to zadanie trywialne z uwagi na to, że zakładane tu skokowe zmiany położenia przepustnic przesuwają punkt pracy zanim jeszcze zanikną przebiegi przejściowe po poprzednim przełączeniu. Pewien problem sprawia również agregacja odpowiedzi skokowych modeli dynamicznych w sytuacji równoczesnego przełączenia dwóch przepustnic. Autorka identyfikuje te problemy i rozważa różne rozwiązania prowadzące do ciągłych zmian symulowanych wielkości, a poprawność wyników najlepiej potwierdza uderzająca zgodność przebiegów przewidywanych przez symulator z przebiegami obserwowanymi w eksperymencie, i to zarówno w stanie ustalonym, jak i w stanie przejściowym.

Rozdział 5 stanowi próbę wykorzystania opracowanego symulatora do syntezy układu sterowania przepływami powietrza. Najpierw rozważa się najprostsze podejście, polegające na zastosowaniu trzech niezależnych pętli sprzężenia zwrotnego (sprzężenia od przepływu do nastawy odpowiedniej przepustnicy) i zastosowanie w każdej pętli sprzężenia regulatora PI. Autorka testuje szereg różnych metod sterowania znanych z literatury i rozważa różne scenariusze praktyczne (np. zarówno pełna, jak i tylko przybliżona znajomość parametrów modelu). Niestety, jakość układu sterowania nie jest zadowalająca z uwagi na duże przeregulowanie w pętlach strumienia głównego i recyklu, gdy następują przesunięcia punktu pracy w innych strumieniach. Powodem są oczywiście duże zależności między strumieniami. Pomysłem na ich uniknięcie jest zastosowanie modelu odwrotnego, który na podstawie zadanych wartości trzech strumieni wyznacza nastawy przepustnic. Implementuje się go poprzez odwracanie charakterystyk statycznych omówionych w rozdz. 3. W połączeniu z niezależnymi sprzężeniami zwrotnymi poprzez regulatory PI, uzyskuje się zauważalną poprawę jakości układu sterowania. Obiecujące rozważania mają charakter wstępny i pokazują przede wszystkim możliwości opracowanego symulatora procesu. Otwiera się w ten sposób pole do zastosowania w przyszłości bardziej zaawansowanych technik sterowania, np. sterowania predykcyjnego.

Rozprawę kończy podsumowanie oryginalnych wyników naukowych oraz lista wkładu Autorki w badania opisane w rozprawie, co jest istotne o tyle, że pewna część rezultatów została osiągnięta w zespole.

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 Autorkę samodzielnie i z zastosowaniem właściwej metodologii naukowej. Na podstawie przedstawionego skrótowo omówienia treści całej rozprawy doktorskiej należy odnotować, że jej Autorka wykazała się dobrymi umiejętnościami formułowania problemów naukowo-badawczych oraz ich efektywnego rozwiązywania z zastosowaniem zaawansowanych narzędzi analizy danych, modelowania i symulacji, oraz technik układów regulacji. Już na podstawie wstępnej analizy można stwierdzić, że rozprawa stanowi dzieło wartościowe, zdecydowanie odpowiadające wymaganiom stawianym przez stosowne przepisy.

Pod względem redakcyjnym pracę napisano z dużą dbałością o szczegóły. Użyte słownictwo odpowiada powszechnie stosowanemu. Jak na tak dużą objętość, nie zawiera błędów składu, co tym bardziej koresponduje z jej dobrym poziomem merytorycznym. Na szczególne podkreślenie zasługuje to, że mimo długiej historii, publikacji poświęconych kompleksowemu modelowaniu i sterowaniu instalacjami mielenia jest bardzo niewiele. Rozprawa jest więc również z tego powodu warta rozpropagowania.

III. Oryginalne osiągnięcia

Zaprezentowane podejście do obserwacji, modelowania, symulacji i sterowania instalacją mielenia z młynem elektromagnetycznym może wydawać się standardowe z uwagi na to, że wykorzystuje wiele standardowych narzędzi automatyki. Ta prostota jest jednak tylko pozorna z uwagi na bardzo złożony proces fizyczny, dla którego nie są zresztą znane gotowe sprawdzone alternatywne rozwiązania. Rozwiązanie tak wielu problemów, w których dane pochodzą z rzeczywistych pomiarów, a nie z

wyidealizowanych symulacji, i to w ramach jednej rozprawy, jest zadaniem nadzwyczaj trudnym, a to, w jaki sposób Autorka sobie z nimi poradziła, zasługuje na uznanie. Przedstawiony w pracy matematyczny opis problemu, jego analizę, zaproponowaną metodę modelowania przepływów powietrza w instalacji poprzez połączenie interpolowanych charakterystyk statycznych z modelami prostych członów dynamicznych z interpolowanymi współczynnikami, oraz praktyczną weryfikację opracowanego na tej podstawie symulatora uważam za najważniejszy wkład Autora w rozważaną dziedzinę. Choć przedstawiony pomysł wydaje się dość naturalny biorąc pod uwagę obecny stan wiedzy z zakresu automatyki, jednak jego implementacja dla rozważanych scenariuszy rzeczywistej pracy instalacji mielenia nie jest bynajmniej oczywista, a recenzowana praca stanowi jedną z pierwszych tak całościowych prób jego ujęcia i formalnego uzasadnienia. Główną zaletą podejścia proponowanego w rozprawie jest duża efektywność obliczeniowa oraz względnie prosta możliwość jego rozwinięcia do działającego prototypu.

Przyjmując, że głównym celem rozprawy było pokazanie, że zastosowanie pośrednich pomiarów przepływu, uziarnienia i wilgotności w połączeniu z modelowaniem przepływu i ciśnienia pozwala monitorować i sterować instalacją mielenia z młynem elektromagnetycznym, należy stwierdzić, że cel ten Autorka osiągnęła. Co więcej, weryfikacji rezultatów dokonano w oparciu o dane pochodzące z rzeczywistej instalacji.

W szczególności, za najważniejsze oryginalne rezultaty rozprawy uważam następujące:

1. Zademonstrowanie możliwości wykorzystania pomiarów drgań spowodowanych ruchem ziaren materiału do szacowania na bieżąco przepływu i uziarnienia. Jest to tym bardziej cenne, że do implementacji zaproponowanego pomiaru pośredniego potrzebny jest tylko jeden czujnik (akcelerometr piezoelektryczny lub mikrofon).
2. Opracowanie prostej metody numerycznej wyznaczania przepływu masowego powietrza na podstawie pomiaru prędkości powietrza.
3. Opracowanie metody wyznaczania charakterystyk statycznych przepływów powietrza i ciśnienia w instalacji mielenia w zależności do dowolnych położań przepustnic w oparciu o obserwacje stanów ustalonych zebrane dla arbitralnie wybranych punktów pracy przepustnic.
4. Opracowanie metody wyznaczania parametrów liniowych modeli dynamicznych opisujących odchylenia przepływów powietrza i ciśnienia od punktów pracy dla dowolnych położań przepustnic w oparciu o obserwacje przebiegów przejściowych dla arbitralnie wybranych punktów pracy przepustnic.
5. Opracowanie metody szacowania spadków ciśnienia w instalacji w punktach oddalonych od miejsc wykonywania pomiarów ciśnienia.
6. Opracowanie koncepcji symulatora przepływu powietrza i ciśnienia w oparciu o znajomość wyznaczonych charakterystyk statycznych oraz liniowych modeli dynamicznych dla odchyłań od punktów pracy, jego implementacja oraz udana weryfikacja w oparciu o dane eksperymentalne.
7. Zaproponowanie architektury układu sterowania łączącej model odwrotny wykorzystujący odwracalność charakterystyk statycznych oraz niezależne pętle sprzężenia zwrotnego wykorzystujące regulatory PI.

Należy podkreślić, że uzyskane rezultaty są udokumentowane publikacjami zarówno w czasopiśmie (jeden samodzielny artykuł w bardzo dobrym *Scientific Reports* (Nature Portfolio), IF = 4.9, dwa współautorskie artykuły w dobrym *Sensors* (MDPI), IF = 3.9) oraz, m.in. cztery referaty współautorskie w materiałach *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics* (MMAR,

dostępne w IEEE Xplore), najważniejszej międzynarodowej konferencji z zakresu automatyki organizowanej w Polsce.

W podsumowaniu, należy stwierdzić, że sformułowany cel rozprawy został osiągnięty, a jej Autorka 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 poczynając od uzasadnienia praktycznego problemu, poprzez jego formalizację, aż do rozwiązania różnorodnych wersji problemu z przykładami weryfikacji zaproponowanej metodologii w nietrywialnym procesie przemysłowym. Praca prezentuje wysoki poziom naukowy, a Autorka biegle posługuje się aparatem matematycznym, m.in. w zakresie modelowania, identyfikacji, analizy danych, oraz projektowania układów sterowania.

Lektura rozprawy skłania jednak również do sformułowania następujących uwag krytycznych:

1. W rozdz. 4 proponuje się pośrednią metodę pomiaru przepływu masowego materiału i uziarnienia, wykorzystującą akcelerometr. W jakim miejscu należałoby umieścić taki sensor w realnej instalacji mielenia, żeby otrzymywane oceny przepływu i uziarnienia były najprecyzyjniejsze?
2. Omówienie pośredniego pomiaru przepływu masowego i wielkości ziaren w rozdz. 2 ogranicza się do analizy jakościowej wskazującej na potencjalne skorelowanie obu wielkości z kształtem gęstości widmowej mocy i określonej na tej gęstości statystyk. Brakuje tu jednak analizy ilościowej, chociażby określenia wartości współczynnika korelacji, analizy wariancji (test ANOVA) lub budowy modelu regresji liniowej. Wyniki tego typu pojawiają się dopiero podczas pośredniego określania wilgotności w dalszej części rozdziału.
3. W rozdz. 2 buduje się modele regresji, w których rolę zmiennej objaśniającej (predyktora) pełni względna wilgotność materiału, a zmiennej objaśnianej (odpowiedzi) – mediana intensywności obrazu, po czym do oszacowania wilgotności względnej na podstawie intensywności obrazu używa się funkcji odwrotnej do funkcji regresji. Jak sama Autorka zauważa, w przypadku funkcji kwadratowej może to prowadzić do problemów z odwracalnością funkcji kwadratowej. Lepszym pomysłem wydaje się potraktowanie wilgotności jako odpowiedzi, a intensywności obrazu jako zmiennej objaśniającej, lub też zastąpienie funkcji kwadratowej funkcją wykładniczą. Poza tym, w zakresach, w których funkcja regresji jest spłaszczona, jej odwracanie powoduje dużą niepewność rezultatu.
4. W rozdz. 3 na str. 93 i 94 podano prosty iteracyjny algorytm określania wartości współczynników w , R_e , c oraz β , jednak nie ma gwarancji co do jego zbieżności. Pewną gwarancję można uzyskać traktując równania (3.4), (3.6), (3.7) i (3.8) jako jeden układ równań nieliniowych ze względu na te cztery niewiadome i rozwiązać go jedną z standardowych metod numerycznych (w Matlabie używa się w tym celu funkcji `fsolve`).
5. W rozdz. 3 po wykonaniu eksperymentów mających na celu wyznaczenie wybranych punktów charakterystyk statycznych, identyfikuje się obserwacje odstające, aby je następnie skorygować w oparciu o sąsiednie dane. Problem jednak w tym, że kryterium zakwalifikowania obserwacji jako odstającej jest przekroczenie przez odchylenie odpowiedzi zaobserwowanej od jej oczekiwanej oceny wartości progowej będącej 97 percentylem wszystkich takich odchyleń

(str. 99). Jest to niezrozumiałe, ponieważ wynika z tego, że zawsze 3% obserwacji będzie traktowane jako odstające, nawet gdyby wszystkie odchylenia były znikome!

6. W rozdz. 3 dokonuje się serii wielu eksperymentów, które mogą w sumie być bardzo czasochłonne. Pewnym rozwiązaniem mogącym zredukować tę czasochłonność poprzez redukcję liczby pomiarów mogłoby stanowić wykorzystanie metodologii planowania eksperymentu (zob. np. D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 8th Edn., Wiley, 2013), jak również zastosowanie np. interpolacji wielowymiarowymi splajnami sześciennymi (ich konstrukcję opisano np. w rozdz. 3.6 podręcznika W.H. Press, S.A. Teukolsy, W.T. Vetterling, B.P. Flannery, *Numerical Recipes, The Art. of Scientific Computing*, 3rd Edn., Cambridge University Press, 2007). Te ostatnie oferują również bezkosztowo bardzo dokładne oszacowania pochodnych cząstkowych.
7. Na str. 110 pojawia się uwaga, że identyfikacja współczynników członów inercyjnych prowadziła albo do rezultatu typu NaN (nie-liczba), albo do wartości dążących do nieskończoności. Czym to wytłumaczyć?
8. W rozdz. 3.2.4.4 identyfikuje się współczynnik spadku ciśnienia K , co sprowadza się do zadania regresji nieliniowej. Autorka raportuje problemy z uzyskaniem zadowalającego dopasowania. Wydaje się, że mogą one wynikać ze złego uwarunkowania zadania optymalizacji. Jeśli tak, można byłoby je złagodzić poprzez przeskalowanie identyfikowanych współczynników w taki sposób, aby ich dopuszczalne wartości ograniczały się np. do przedziału jednostkowego.

Powyższe uwagi krytyczne nie mają jednak przesadnego wpływu na ogólną opinię o recenzowanej dysertacji, którą oceniam jako bardzo wartościową. Uważam, że cele postawione przez Autorkę 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 praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z *Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r.* (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), oraz zgodnie z *Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne i wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony;
2. ponadto, uwzględniając wysoką wartość merytoryczną rozprawy oraz opublikowanie większości wyników w formie trzech artykułów w czasopismach z bazy WoS (w tym najważniejszych wyników jako samodzielnego artykułu w bardzo dobrym czasopiśmie *Scientific Reports*), wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.