



Gliwice, 12.01.2026r.

Prof. dr hab. inż. Bożena Skołod
Katedra Automatyzacji Procesów Technologicznych
I Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
Politechnika Śląska

Recenzja

rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Wojciecha Majewskiego

„Badanie i modelowanie procesów technologicznych opon na maszynach VMI MAXX w celu uzyskania określonych wyników jednorodności”

Przygotowanej pod kierunkiem promotorskim

Dr hab. inż. Ewy Dostatni, prof. PP

oraz promotora pomocniczego

dr. inż. Jacka Diakuna

Podstawą opracowania recenzji jest Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej nr 10/III/11/2025 z dnia 1. grudnia 2025 r.

Wprowadzenie

Ostatnia dekada charakteryzuje się znaczącym wzrostem nacisku na *data-driven manufacturing*, czyli produkcję opartą na danych, stanowiącą jeden z kluczowych filarów koncepcji Industry 4.0. W tym paradygmacie dane stają się podstawowym zasobem decyzyjnym, wokół którego realizowane są działania na wszystkich poziomach zarządzania przedsiębiorstwem — od strategicznego po operacyjny. Rozwój systemów cyber-fizycznych, Internetu Rzeczy (IoT) oraz zaawansowanych systemów akwizycji danych umożliwia ciągłe monitorowanie procesów produkcyjnych w czasie rzeczywistym.

Jednocześnie dynamiczny wzrost wolumenu, różnorodności produkcji i z tym związanej prędkości napływu danych powoduje konieczność stosowania zaawansowanych metod analitycznych. W tym kontekście coraz większe znaczenie zyskują techniki sztucznej inteligencji oraz uczenia maszynowego, które pozwalają na automatyczną identyfikację wzorców, predykcję stanów procesów, wykrywanie anomalii oraz optymalizację parametrów

produkcyjnych. Zastosowanie tych metod wspiera przejście od reaktywnego do proaktywnego modelu zarządzania produkcją, obejmującego m.in. predykcyjne utrzymanie ruchu, adaptacyjne sterowanie procesami oraz dynamiczne planowanie produkcji.

Wskazane działania stanowią bezpośrednią odpowiedź na narastające wymagania rynkowe, skracanie cykli życia produktów, dużą zmienność konfiguracji wyrobów oraz rosnącą złożoność czynników determinujących wyniki produkcyjne. W konsekwencji podejście oparte na danych przestaje być jedynie narzędziem poprawy efektywności operacyjnej, a staje się istotnym elementem budowania trwałej przewagi konkurencyjnej w nowoczesnych systemach wytwarzania.

Przedłożona do recenzji dysertacja stanowi przykład pracy doktorskiej silnie osadzonej w aktualnych problemach praktycznych przemysłu. Jej geneza związana jest z wdrożeniem w zakładzie Bridgestone w Poznaniu nowoczesnych maszyn konfekcyjnych, wyposażonych w funkcjonalności umożliwiające rejestrację danych procesowych. Rozprawa została przygotowana w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” ogłoszonego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, we współpracy z przedsiębiorstwem Bridgestone. Punktem wyjścia do realizacji badań naukowych oraz opracowania rozprawy doktorskiej był zakup maszyny konfekcyjnej umożliwiającej systematyczne gromadzenie danych produkcyjnych. Dostrzegając potencjał tych możliwości, podjęto próbę ich wykorzystania w celu podniesienia jakości procesów, w kontekście rosnących wymagań środowiskowych oraz coraz bardziej rygorystycznych standardów narzucanych przez producentów samochodów. Poruszona problematyka ma istotne znaczenie dla przedsiębiorstwa funkcjonującego na wymagającym i wysoce konkurencyjnym rynku.

Ocena pracy

Choć jako główny cel pracy wskazano wdrożenie w przedsiębiorstwie rozwiązania umożliwiającego wytwarzanie produktów spełniających rygorystyczne wymagania producentów samochodów oraz zwiększenie konkurencyjności firmy na rynku, należy zauważyć, że rzeczywisty zakres oddziaływania rozprawy jest znacznie szerszy. Zaprezentowano uniwersalną metodykę postępowania, która może znaleźć zastosowanie również w innych problemach o zbliżonym charakterze, w szczególności w obszarach wykorzystujących podejście data-driven w procesach produkcyjnych.

Zanim przejdę do ostatecznej konkluzji, przedstawię ocenę zawartości pracy.

Po szczegółowym wprowadzeniu precyzyjnie określono przedmiot badań, którym jest proces produkcji opon w fabryce Bridgestone w Poznaniu. W rozdziale drugim omówiono konstrukcję opon radialnych, zwracając szczególną uwagę na standaryzację ich budowy oraz na funkcje, które muszą być spełnione niezależnie od zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Dokonano również klasyfikacji rozwiązań konstrukcyjnych ze względu na sposób wzajemnego ułożenia bieżnika i boku opony oraz przedstawiono podstawowe komponenty składowe. Nie

zostało jednak jednoznacznie wyjaśnione, co autor rozumie pod pojęciem „synergii działania komponentów”.

Na pierwszy rzut oka tak rozbudowany opis konstrukcji opon może wydawać się nadmierny. Dopiero jednak jego analiza oraz wynikające z niej zależności pozwalają czytelnikowi dostrzec wysoki stopień złożoności procesu produkcyjnego, niezbędnego do spełnienia licznych i często sprzecznych wymagań jakościowych.

W rozdziale trzecim zaprezentowano proces wytwarzania opon radialnych, podkreślając skalę i zmienność produkcji, sięgającą około 30 tysięcy opon dziennie w blisko 500 różnych rozmiarach. Tak duża skala oraz wysoki poziom dywersyfikacji jednoznacznie obrazują złożoność zarówno samego procesu produkcyjnego, jak i systemu kontroli jakości. Zwrócono uwagę, że w zależności od indywidualnych wymagań klienta zakres kontroli końcowej może się istotnie różnić, co jest szczególnie widoczne w przypadku opon przeznaczonych do zastosowań ekstremalnych, takich jak sporty motorowe. W takich sytuacjach stosuje się dodatkowe badania, wykraczające poza standardowe procedury, przykładem czego jest szerografia umożliwiającą wykrywanie defektów wewnętrznych, rozwarstwień, pęknięć oraz wad strukturalnych.

Szczegółowe przedstawienie maszyny konfekcyjnej, jej budowy oraz wykazów podzespołów (rys. 3.5 i 3.6) nie wnosi istotnej wartości merytorycznej do pracy i mogłoby zostać pominięte bez uszczerbku dla jej treści.

W rozdziale czwartym omówiono proces kontroli jakości w kontekście indywidualizacji wymagań klientów. Podkreślono, że nie ogranicza się on wyłącznie do zagadnień normalizacyjnych i homologacyjnych, lecz uwzględnia również dodatkowe, często bardzo specyficzne oczekiwania odbiorców. Przedstawiono możliwe defekty, ich przyczyny oraz metody detekcji, koncentrując się na identyfikacji źródeł niedoskonałości. Pominięto jednak zagadnienia związane z eliminacją tych defektów, mimo że zostały one zapowiedziane w tytule podrozdziału.

W dalszej części zaprezentowano typowe wymagania klientów, takich jak producenci samochodów osobowych, oraz sposoby ich oznaczania na etykietach produktów. W odniesieniu do jednorodności opon trafnie zauważono, że zmiany poszczególnych parametrów wpływają na pozostałe. Szkoda jednak, że autor nie przedstawił tych zależności z wykorzystaniem narzędzia QFD (tzw. domu jakości), które w sposób graficzny mogłoby lepiej zilustrować powiązania pomiędzy oczekiwaniami klienta a parametrami opisującymi produkt oraz ich wzajemne korelacje.

Omawiając zagadnienie zmienności siły promieniowej, autor wskazał liczne rozwiązania służące poprawie tego parametru, jednocześnie zauważając, że niektóre z nich, takie jak szlifowanie, nie są akceptowane przez wszystkich producentów pojazdów. Analizując poszczególne parametry, zwrócono również uwagę na praktyczne konsekwencje ich nieprawidłowych wartości, takie jak zjawisko ściągania kierownicy, mające bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo użytkownika pojazdu.

Opisane zjawiska wymagają stałego monitorowania, co wiąże się z koniecznością systematycznego gromadzenia danych pomiarowych. Umożliwia to ocenę jednorodności opon oraz podnoszenie jakości wyrobu finalnego. W dalszej części zaprezentowano testy stacjonarne bieżnika, wykonane w ramach rozprawy doktorskiej w celu zilustrowania wymagań stawianych produktowi, jakim jest opona. Podkreślono potrzebę wdrażania innowacyjnych rozwiązań w zakresie materiałów, procesów produkcyjnych oraz metod kontroli, aby możliwe było ciągłe doskonalenie jakości wyrobów i sprostanie rosnącym oczekiwaniom klientów. Autor jest świadomy faktu, że wymagania stawiane przez producentów samochodów są zasadniczo spełniane, jednak w praktyce końcowy użytkownik często decyduje się na wymianę opon na inne, niezgodne z pierwotnie określoną specyfikacją. Działanie to niweczy wysiłki zarówno producentów pojazdów, którzy formułują precyzyjne wymagania gwarantujące jakość, komfort i bezpieczeństwo, jak i producentów opon, którzy ponoszą znaczne nakłady, aby wymagania te spełnić. W ramach rekomendacji można rozważyć sformułowanie bardziej precyzyjnych wymagań, zgodnie z którymi dopuszczalne byłyby wymiany opon w pojazdach wyłącznie na modele w pełni zgodne ze specyfikacją pierwotnie przewidzianą dla danego typu samochodu, co w sposób jednoznaczny przyczyniłoby się do podniesienia poziomu bezpieczeństwa.

Przeprowadzona analiza wskazuje na wysoki poziom zaawansowania technologicznego, który jednak okazuje się niewystarczający w obliczu rosnących oczekiwań odbiorców, w szczególności producentów pojazdów. W konsekwencji obszar ten nadal wymaga intensywnych badań oraz ciągłego doskonalenia. Implikuje to konieczność prowadzenia prac nad nowymi materiałami, rozwojem procesów produkcyjnych oraz doskonaleniem metod kontroli jakości.

Wcześniejsze analizy, sformułowane wnioski oraz informacje zwrotne, pochodzące głównie od klientów flotowych, stanowiły inspirację dla Doktoranta do wskazania kierunków dalszych badań nad oponami samochodowymi, które zostały zaprezentowane w rozdziale piątym rozprawy. Zwrócono w nim uwagę na potrzebę dwukierunkowej informacji zwrotnej pomiędzy użytkownikiem a producentem w zakresie eksploatacji opon, co z jednej strony umożliwiałoby klientowi otrzymanie sygnału o konieczności wymiany, a z drugiej dostarczałoby producentowi danych wspierających planowanie produkcji.

W tej części pracy przedstawiono proponowane kierunki badań, obejmujące m.in. estymację sił działających w oponie, modelowanie opon z wykorzystaniem zaawansowanych metod przetwarzania danych, analizę zależności pomiędzy charakterystyką śladu opony a generowanymi przez nią siłami, identyfikację deformacji, ocenę wpływu masy pojazdu na drogę hamowania oraz inne zagadnienia. Ponadto omówiono kierunki badań związane z inspekcją defektów oraz rozwojem metod pomiarowych. Zauważono, że w tym obszarze dominują podejścia oparte na uczeniu maszynowym. Przytoczone w przeglądzie literatury badania potwierdzają, że zastosowanie metod sztucznej inteligencji istotnie zwiększa skuteczność i precyzję wykrywania defektów, a jednocześnie skraca czas inspekcji. W konsekwencji zaproponowano wykorzystanie metod uczenia maszynowego do predykcji

stożkowatości, co stało się przedmiotem badań własnych Doktoranta. W nawiązaniu do tak sformułowanego celu w rozdziale szóstym zaprezentowano modele uczenia maszynowego, przyjmując klasyfikację obejmującą uczenie nadzorowane, nienadzorowane oraz uczenie ze wzmocnieniem. Ostatnie z wymienionych, jako najbardziej elastyczne, znajduje szerokie zastosowanie w praktyce przemysłowej.

Część badawcza, stanowiąca zasadniczy element doktoratu wdrożeniowego, została przedstawiona w rozdziale siódmym. Na wstępie sformułowano cel badawczy polegający na opracowaniu modelu umożliwiającego generowanie w czasie rzeczywistym wartości stożkowatości opon na podstawie danych wejściowych pochodzących z procesu konfekcji. Przyjęto hipotezę badawczą, zgodnie z którą pomiary zmiennych wejściowych komponentów składowych opony, rejestrowane w trakcie procesu konfekcji, pozwalają na skuteczną predykcję jej stożkowatości.

W dalszej części przedstawiono charakterystykę danych, metodykę ich przetwarzania, zestaw wybranych modeli uczenia maszynowego oraz analizę porównawczą uzyskanych wyników. Ponadto omówiono potencjał aplikacyjny opracowanego rozwiązania, w tym możliwość jego wykorzystania w warunkach przemysłowych oraz wdrożenia w przedsiębiorstwie. Doktorant wskazał, że dopiero uruchomienie maszyn VMI MAXX, zakupionych przez przedsiębiorstwo, stworzyło realne możliwości systematycznej rejestracji danych, a w dalszej kolejności umożliwiło prowadzenie predykcji na ich podstawie, co wcześniej nie było wykonalne. Prace badawcze zostały podzielone na dziesięć etapów, z których każdy został szczegółowo uzasadniony. Proces konfekcji, stanowiący kluczowy obszar analiz, przedstawiono w szerszym kontekście całego procesu wytwarzania opon. Badania prowadzono dla wybranego typu opon, bez zastosowania wkładki runflat.

W ramach przygotowania danych przeprowadzono kalibrację czujnika, opartą na pięciu zmiennych wyjściowych wskazanych przez eksperta dziedzinowego. Pozwoliło to na ograniczenie rozbieżności pomiędzy wartościami pomiarów a wynikami prezentowanymi przez oprogramowanie. Jednocześnie pojawia się pytanie: czy w tym przypadku opinia pojedynczego eksperta jest wystarczającą podstawą do takiego doboru zmiennych?

Spośród danych pogrupowanych w sześć kategorii wybrano dwie skrajne grupy: obejmującą opony o największej szerokości i masie oraz grupę zawierającą opony najwęższe i najlżejsze. Wybór ten najprawdopodobniej wynikał z istotnego zróżnicowania pomiędzy tymi grupami — w pierwszej z nich odnotowano dużą liczbę wartości odstających, podczas gdy w drugiej takie zjawiska praktycznie nie występowały.

Analiza danych pochodzących z przedsiębiorstwa wykazała, że dla grupy I wartości odchyłeń standardowych były istotnie wyższe niż w przypadku grupy V, co pozwalało przewidywać występowanie licznych problemów jakościowych właśnie w tej pierwszej grupie. W tym kontekście zastanawiający jest brak reakcji producenta na zaobserwowaną tendencję dotyczącą wyników pomiarów szerokości opasania 1, które utrzymywały się w górnym zakresie

tolerancji. Rodzi się pytanie, czy zjawisko to nie zostało wcześniej zidentyfikowane lub odpowiednio przeanalizowane.

Interesującym rezultatem jest również przesunięcie (przecentrowanie) opasania w danych ze zbioru I, szczególnie widoczne po przerwie produkcyjnej. Ponad 40% pomiarów przekroczyło dopuszczalne limity, a blisko 28% wartości stożkowatości znalazło się poniżej dolnej granicy tolerancji. Jako potencjalne rozwiązanie wskazano renegocjację limitów z klientem. Choć takie podejście może być uzasadnione z perspektywy biznesowej, nie rozwiązuje ono problemu jakościowego i nie powinno być traktowane jako docelowe działanie naprawcze. Pojawia się również pytanie o przyczyny tak silnego wpływu przerwy produkcyjnej na uzyskiwane wyniki. Zgodnie z oczekiwaniami, analiza danych dla grupy V wykazała zdecydowanie lepsze rezultaty — wyniki te nie budzą istotnych zastrzeżeń i w przeważającej mierze mieszczą się w przyjętych granicach tolerancji. Przeprowadzona analiza eksploracyjna danych umożliwiła doktorantowi identyfikację struktury zbiorów danych oraz rozpoznanie ich ukrytych właściwości. Pozwoliła ona również na wykrycie anomalii oraz obserwację występujących trendów.

Zdecydowano, że ocena skuteczności poszczególnych modeli będzie prowadzona z uwzględnieniem kryteriów dokładności predykcji oraz czasu reakcji modelu, tak aby zapewnić niezakłócony i płynny przebieg procesu produkcyjnego.

Dalsze analizy wykazały, że wielowymiarowa regresja liniowa nie jest w stanie adekwatnie odwzorować zależności pomiędzy badanymi zmiennymi. Niska jakość dopasowania oraz znaczna część niewyjaśnionej zmienności stanowiły podstawę do odrzucenia tego podejścia i zastosowania bardziej zaawansowanych modeli.

W kolejnym etapie rozważono wykorzystanie perceptronu wielowarstwowego (MLP), uznawanego za relatywnie szybką metodę uczenia maszynowego o szerokim spektrum zastosowań. Równolegle przeanalizowano modele oparte na drzewach decyzyjnych, w tym algorytmy XGBoost, FastTreeRegression oraz LightGBM Regression. Wstępne wyniki wskazywały na zasadność wyboru modelu FastTreeRegression, jednak Doktorant zdecydował się na rozszerzenie zbioru cech o dodatkową zmienną wejściową — średnią wartość pomiaru szerokości PA, która wykazuje istotny wpływ na stożkowatość opony będącą przedmiotem badań.

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że spośród wszystkich testowanych metod najlepsze rezultaty uzyskał model XGBoost, charakteryzujący się najniższą wartością błędu średniokwadratowego predykcji (RMSE) oraz najwyższym współczynnikiem determinacji R^2 . Proces uczenia przeprowadzono z wykorzystaniem zbioru danych I, cechującego się większą różnorodnością, a tym samym lepszą zdolnością do przewidywania wartości odstających. Walidację modelu wykonano na pozostałych zbiorach danych oznaczonych numerami II, III, IV oraz VI, co pozwoliło na ocenę jego skuteczności w prognozowaniu wyników dla nowych, wcześniej niewidzianych danych.

Ostatecznie model XGBoost został wybrany do wdrożenia w przedsiębiorstwie. Wśród jego kluczowych zalet należy wskazać bardzo krótki czas reakcji, co ma szczególne znaczenie w warunkach produkcji masowej. Umożliwia to ciągłe prognozowanie i ocenę jakości wyrobów, ograniczenie ilości złomu obiegowego oraz identyfikację potencjalnych przyczyn powstawania niezgodności w procesie produkcyjnym.

W rozdziale ósmym omówiono proces implementacji modelu w systemie informatycznym przedsiębiorstwa oraz jego integrację z maszynami VMI MAXX. Prawidłowe funkcjonowanie modelu jest ściśle uzależnione od poprawnego wdrożenia go w środowisku informatycznym firmy. W tym zakresie Doktorant zaproponował i zrealizował szereg działań usprawniających, obejmujących m.in. zwiększenie częstotliwości kalibracji aparatury pomiarowej, modyfikację oraz ujednolicenie interfejsu użytkownika, a także wymuszenie wprowadzania kluczowych danych, takich jak limity stożkowatości. Dodatkowo utworzono bazę danych integrującą dane wejściowe i wyjściowe, przeznaczoną do dalszego doskonalenia algorytmu. Maszyny produkcyjne zostały połączone z bazą danych, do której automatycznie przekazują wyniki pomiarów. Na tej podstawie model dokonuje przetwarzania danych i generuje predykcje, a w przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości stożkowatości system wysyła komunikat do maszyny, która wyświetla ostrzeżenie stanowiące impuls do podjęcia dalszych działań, takich jak analiza materiału mogącego wpłynąć na pogorszenie jakości wyrobu.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że cel pracy został osiągnięty, a opracowany model spełnia założone wymagania i jest przygotowany do wdrożenia. Jego uruchomienie w warunkach produkcyjnych wymaga jednak doprecyzowania wybranych ustaleń organizacyjnych wewnątrz przedsiębiorstwa.

Dotychczasowe rezultaty uzyskano bez ingerencji w rzeczywisty proces produkcyjny, natomiast rozpoczęcie produkcji z wykorzystaniem opracowanego rozwiązania planowane jest na połowę 2026 roku. Należy podkreślić, że pełne wdrożenie rozwiązania do produkcji wiąże się z koniecznością dalszego zaangażowania ze strony przedsiębiorstwa. Doktorant wskazał kluczowe działania niezbędne na tym etapie, takie jak opracowanie standardów postępowania z materiałem wadliwym, a także zaproponował metodę weryfikacji poprawności działania modelu.

Zakłada się możliwość adaptacji opracowanego rozwiązania w innych zakładach produkujących opony, pod warunkiem zapewnienia realizacji odpowiednich pomiarów komponentów niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania algorytmu oraz dostępności infrastruktury informatycznej umożliwiającej zasilanie modelu danymi.

Istotną zaletą proponowanego rozwiązania jest ponadto ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko dzięki identyfikacji anomalii na wczesnym etapie produkcji i eliminacji wadliwych wyrobów.

Dysertację zamyka zestaw wniosków uporządkowanych w kategorie poznawcze, aplikacyjne oraz wskazujące kierunki dalszych badań.

Uwagi dot. sposobu prezentacji.

Dysertacja została opracowana z dużą starannością oraz dbałością o szczegóły. Pracę uzupełniono licznymi ilustracjami, choć część z nich mogłaby zostać pominięta bez uszczerbku dla jej wartości merytorycznej.

W rozprawie zabrakło wykazu oznaczeń i skrótów, który ułatwiłby czytelnikowi orientację w treści.

Dobór literatury wykorzystanej w analizach jest adekwatny do zakresu dysertacji i obejmuje aktualne pozycje. Zastanawiający pozostaje jednak brak odniesień do wcześniejszych publikacji Doktoranta oraz promotora w przedstawionym wykazie bibliograficznym.

Konkluzja i wniosek końcowy

Reasumując, stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr. Wojciecha Majewskiego pt. *„Badania i modelowanie procesów technologicznych opon na maszynach VMI MAXX w celu uzyskania określonych wyników jednorodności”* stanowi pracę wartościową, ukierunkowaną zarówno na potrzeby wymagającego odbiorcy końcowego, jak i producenta zobowiązanego do spełnienia tych oczekiwań. Ma ona wyraźnie wdrożeniowy charakter, a uzyskane rezultaty mogą w istotny sposób przyczynić się do poprawy funkcjonowania przedsiębiorstwa, zapewnienia wysokiej jakości wyrobów oraz zwiększenia bezpieczeństwa ich użytkowników.

Doktorant wykazał zdolność do samodzielnego prowadzenia zaawansowanych badań naukowych, projektowania eksperymentów, kompetencji w obszarze doboru i zastosowania metod AI, doboru odpowiednich metod oraz narzędzi informatycznych, a także formułowania wniosków.

Rozprawa spełnia wymagania określone w ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. poz. 1668) oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, postępowaniu habilitacyjnym oraz postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. 2018 poz. 261), a tym samym może stanowić podstawę do nadania panu mgr. Wojciechowi Majewskiemu stopnia doktora.

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony, przedstawiając ją z wysoką oceną pozytywną.

Bożena Skolna