

dr hab. inż. Izabela Rojek, prof. uczelni

Bydgoszcz, dnia 27.01.2025 r.

Dziekan Wydziału Informatyki
Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

Członek Komitetu Inżynierii Produkcji Polskiej Akademii Nauk
Przewodnicząca Sekcji Cyfryzacji Produkcji KIP PAN



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Meller

pt. „System adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji

z zastosowaniem technologii cyfrowych w średniej wielkości przedsiębiorstwie metalowym”

Promotor: prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko, dr h.c., prof. h.c., Politechnika Poznańska

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Marcin Suszyński, Politechnika Poznańska

Recenzję sporządzono na podstawie

uchwały nr 3/III/11/2024 Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna

Politechniki Poznańskiej z dnia 2 grudnia 2024 r.

I. TEMATYKA I UKŁAD ROZPRAWY

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska reprezentuje dziedzinę nauk inżynieryjno-technicznych dyscyplinę naukową inżynieria mechaniczna. W ogólnym ujęciu tematyka badawcza recenzowanej rozprawy dotyczy systemu adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji opartego na autonomicznych metodach wspomagania decyzji. Jest ona zgodna z dyscypliną naukową, w ramach której została opracowana.

Szczegółowa tematyka rozprawy zawiera opracowanie koncepcji adaptacyjnego systemu sterowania procesem produkcji, w tym opracowanie metodyki wspomagania modelowania, monitorowania i sterowania procesem produkcyjnym, tak aby w ograniczonych uwarunkowaniach funkcjonowania przedsiębiorstwa zwiększyć efektywność tego procesu. Ponadto Doktorant dokonał wyboru i oprogramował model decyzyjny w zintegrowanym systemie informatycznym do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji. Uzupełnieniem wynikającym z wdrożeniowego charakteru pracy jest opracowanie prototypu zintegrowanego systemu informatycznego

wspomagającego adaptacyjne sterowanie produkcją oraz usprawnienie obiegu informacji w procesie produkcyjnym.

Pomimo, że zagadnienia dotyczące adaptacyjnego sterowania procesem produkcji są rozpatrywane i publikowane w literaturze, ważność tematu podjętego przez Autora pracy nie budzi wątpliwości. Ważnym elementem wyróżniającym pracę było opracowanie koncepcji zintegrowanego systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji wykorzystującym różnorodne techniki wytwarzania na wielu stanowiskach produkcyjnych, opartego na metodach wspomagania decyzji i kluczowych wskaźnikach efektywności KPI. Rozszerzając koncepcję została opracowana metodyka adaptacyjnego sterowania procesem produkcji wraz z modelem decyzyjnym oraz prototyp zintegrowanego systemu informatycznego wspomagającego adaptacyjne sterowanie produkcją i usprawnienie obiegu informacji w procesie produkcyjnym. Należy też podkreślić wdrożeniowy charakter pracy, co zostało wykazane poprzez wdrożenie prototypu systemu w przedsiębiorstwie FAS.

Stwierdzam, że tematyka podjęta w rozprawie wypełnia lukę badawczą w obszarze adaptacyjnego sterowania procesem produkcji.

Tytuł pracy jest zgodny z podjętą tematyką badawczą oraz treścią pracy. Cel pracy został jasno i poprawnie sprecyzowany, a zakres pracy jest spójny i powiązany z tematyką rozprawy.

Rozprawa obejmuje 164 strony i składa się z 7 rozdziałów. W rozprawie zawarto również streszczenie w języku polskim i angielskim, załączniki, spis rysunków, spis tabel, spis załączników oraz bibliografię (łącznie 156 pozycji, w tym 7 współautorskich Doktoranta, dla których w 4 był pierwszym autorem). Jedynym mankamentem tego układu pracy jest brak spisu skrótów, który ułatwiłby dalsze czytanie pracy, ale wyjaśnienia skrótów mieszczą się w tekście rozprawy.

Układ pracy odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim. Praca jest dobrze opracowana pod względem edytorskim, zawiera schematy, rysunki i wykresy, opracowane z dużą starannością i dbałością o szczegóły, co znacznie ułatwia jej czytanie i zrozumienie. Tylko czasami zdarzają się drobne błędy językowe. Niektóre treści zostały umieszczone w załącznikach. Takie rozwiązanie uważam za bardzo trafne, ponieważ umieszczanie wszystkich treści z rozbudowanymi schematami w rozdziałach głównych pracy miałoby wpływ na jakość odbioru czytanego tekstu.

Tekst pracy napisany jest poprawną polszczyzną.

Ogólnie układ rozprawy i jej stronę edycyjną oceniam bardzo dobrze.

II. OGÓLNA OCENA TREŚCI I ZAKRESU ROZPRAWY

W **Rozdziale 1** ogólnie przedstawiono tematykę dotyczącą problemu adaptacyjnego sterowania procesem produkcji z zastosowaniem technologii cyfrowych w przedsiębiorstwach. Doktorant sformułował pytania szczegółowe dotyczące rozwiązywania problemów zachodzących w przedsiębiorstwach podczas podejmowania skutecznych decyzji zarządczych w procesach sterowania produkcją. W podsumowaniu Autor rozprawy stwierdził, iż w działalności przedsiębiorstw istnieje luka obejmująca opracowanie koncepcji zintegrowanego systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji wykorzystującym różnorodne techniki wytwarzania na wielu stanowiskach produkcyjnych, opartego na metodach wspomagania decyzji i kluczowych wskaźnikach efektywności KPI.

***Uwaga 1.** Określenie luki badawczej w podsumowaniu rozdziału dotyczącego wprowadzenia wydaje się przedwczesne. W mojej opinii umieszczenie jej w podsumowaniu kolejnego rozdziału dotyczącego przeglądu literatury daje lepsze uzasadnienie dlaczego Doktorant podjął się tych badań.*

***Uwaga 2.** W strukturze tego rozdziału występuje tylko jeden podrozdział 1.1. Geneza problemu. W takim ujęciu formułowanie podrozdziału jest zbędne.*

W **Rozdziale 2** dokonano przeglądu i analizy literatury związanej z tematem pracy. Scharakteryzowano sterowanie procesem produkcji, ze szczególnym uwzględnieniem trendów i innowacji w tym obszarze wiedzy. Omówiono definicję i cele adaptacyjnego sterowania procesem produkcji, a także przedstawiono metody, techniki, rozwiązania i systemy wspomagające ten proces. Omówiono pozyskiwanie danych i odkrywanie wiedzy, metody oceny stanu procesu produkcji. Przeanalizowano również metody walidacji systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji stosując wskaźniki KPI. Cennym w tym rozdziale jest podrozdział 2.5, w którym dokonano podsumowania z wnioskami dotyczącymi przeglądu literatury z tego zakresu. Doktorant określił w sposób syntetyczny złożoność adaptacyjnego sterowania produkcją, konieczność stosowania algorytmów sztucznej inteligencji oraz metod wielokryterialnego podejmowania decyzji, czy kluczowych wskaźników efektywności KPI do pomiaru oraz oceny sprawnego funkcjonowania przedsiębiorstwa na różnych szczeblach działania. Doktorant podkreślił, że tradycyjne narzędzia nie posiadają mechanizmów ekstrakcji informacji prognostycznych oraz wspomagających podejmowanie decyzji o ewentualnych działaniach, nie pozwalają też w analizie na jednoczesne uwzględnienie danych związanych ze stosowaną technologią, wyrobem, parametrami maszyn, środowiskiem itp. Analiza takich zmiennych pozwoliła w praktyce odkryć zależności pomiędzy nimi i zbudować skuteczne modele

prognostyczne dla procesu. Takie podejście do tematu pracy przyczyni się do pogłębienia wiedzy teoretycznej w tej dziedzinie oraz zapewni praktyczne usprawnienie procesów produkcyjnych przy użyciu technologii cyfrowych. Doktorant podkreślił, że celem pracy było wykazanie, że dzięki adaptacyjnemu systemowi sterowania procesem produkcji, integrującemu hierarchiczną strukturę wskaźników z modelami wspomagania decyzji w zintegrowanym systemie informatycznym, przedsiębiorstwa mogą osiągnąć znaczną poprawę zarówno efektywności jak i jakości.

Uwaga 3. Na stronie 24 Autor omawia pozyskiwanie danych oraz odkrywanie wiedzy powołując się na literaturę. W przypadku zagadnień informatycznych powoływanie się na literaturę z roku 1998, 2007, czy 2008 nie jest dobrym rozwiązaniem. Powszechnie uważa się, że literatura taka maksymalnie powinna pochodzić z 10 lat, a najlepiej 5.

Uwaga 4. Na stronie 29 i 30 Autor wymienił systemy informatyczne wspierające sterowanie procesem produkcyjnym. Nazwy tych systemów powinny być również wymienione w języku polskim, a nie tylko angielskim.

Rozdział 3 przedstawia cel pracy, którym było opracowanie koncepcji oraz wdrożenie adaptacyjnego systemu sterowania procesem produkcji opartego na autonomicznych metodach wspomagania decyzji. Dla tak sformułowanego celu pracy Doktorant stwierdził, że konieczne jest opracowanie metodyki wspomagania modelowania, monitorowania oraz sterowania procesem produkcyjnym, tak aby w ograniczonych uwarunkowaniach funkcjonowania przedsiębiorstwa zwiększyć efektywność tego procesu. Co więcej integracja zdarzeń i informacji z wielu stanowisk produkcyjnych oraz okołoprodukcyjnych dostarczających ogromną ilość danych w czasie rzeczywistym wymaga zdaniem Autora wyboru oraz oprogramowania modelu decyzyjnego oraz jego skutecznego zaimplementowania w zintegrowanym systemie informatycznym do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji. Kolejno Doktorant przyjął określone założenia dla systemu adaptacyjnego sterowania produkcją obejmującego zaproponowaną metodykę oraz oprogramowany model decyzyjny. Dla celu głównego oraz przyjętych założeń Autor określił cele poznawcze i cel użytkowy. Następnie Doktorant określił tezę rozprawy, problemy badawcze oraz ogólny schemat realizacji badań oraz wdrożenia przemysłowego. Na końcu rozdziału przedstawiony został zakres rozprawy. Cel pracy i zakres zostały przedstawione w sposób jasny i czytelny.

W Rozdziale 4 scharakteryzowano wybrany proces produkcji w FAS (proces produkcji korpusu wodomierza), którego dotyczyły przeprowadzone badania. Dokonano jego szczegółowej

analizy. Przedstawiono również założenia projektowe do budowy adaptacyjnego systemu sterowania procesem produkcji, w tym badania ankietowe gotowości i potencjału do wdrażania elementów koncepcji Przemysłu 4.0 w MŚP branży metalowej oraz zaprezentowano wyznaczoną strategię przedsiębiorstwa. Kolejno omówiono koncepcję modelu hierarchicznej struktury wskaźników wspomagających proces sterowania produkcją oraz koncepcję modelu decyzyjnego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji i oceny jakości procesu oraz wyrobu. Autorskie modele są istotną wartością dodaną tej pracy w zakresie adaptacyjnego sterowania procesem produkcji.

Uwaga 5. Nazwa czwartego rozdziału „Proces produkcji korpusu wodomierza w FAS” wydaje się myląca. Sugeruje, że cały rozdział będzie dotyczył opisu procesu produkcji korpusu wodomierza w FAS. Natomiast rozdział zawiera dużo więcej elementów, między innymi autorski model hierarchicznej struktury wskaźników wspomagających proces sterowania produkcją oraz model decyzyjny do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji i oceny jakości procesu oraz wyrobu.

Uwaga 6. Przeprowadzenie badań ankietowych wśród 40 przedsiębiorstw było cennym źródłem informacji na temat gotowości i potencjału do wdrażania elementów koncepcji Przemysłu 4.0 w MŚP branży metalowej. Szkoda, że ten rozdział 4.2.1 został potraktowany tak ogólnie. Interesującym wydaje się pokazanie odpowiedzi na pytania ankietowe przedsiębiorstwa FAS na tle innych przedsiębiorstw, które wzięły udział w ankietach.

Uwaga 7. Na stronie 75 Doktorant wskazał, że do opracowania reguł wykorzystano między innymi drzewo decyzyjne CART. W rozprawie brakuje opisu w jaki sposób wykorzystano to drzewo. Proszę o przedstawienie fragmentu pliku uczącego, postaci drzewa CART lub jego fragmentu oraz wykresu ważności atrybutów. Ponadto proszę wskazać, w jaki sposób z drzewa powstały reguły decyzyjne? W jakim środowisku drzewo zostało wygenerowane?

Uwaga 8. Na rys. 4.8 brakuje opisu osi X i Y.

Rozdział 5 poświęcony został opisowi wdrożenia zintegrowanego systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusów wodomierza. W pierwszej części rozdziału Doktorant przedstawił rozbudowę infrastruktury linii produkcyjnej korpusu wodomierza o elementy umożliwiające jej cyfryzację, natomiast w drugiej oprogramowanie modelu decyzyjnego do adaptacyjnego systemu sterowania produkcją. Szczegółowo zostały opisane systemy informatyczne w FAS.

Rozdział 6 dotyczy walidacji systemu do adaptacyjnego sterowania produkcją korpusu wodomierza. Walidacja systemu polegała na przeprowadzeniu badań, których celem było potwierdzenie efektywności i potencjału zastosowania zbudowanego systemu w warunkach rzeczywistego procesu w zakładzie produkcyjnym FAS. Dążąc do uzyskania obiektywnego potwierdzenia i osiągnięcia zakładanych efektów, jakimi było po pierwsze skrócenie czasu przejścia materiału przez proces produkcyjny, po drugie ograniczenie liczby braków oraz po trzecie wzrost wskaźnika OEE wykonano testy funkcjonalności oraz przydatności systemu na bieżących danych produkcyjnych. Potwierdzono skuteczność zaproponowanych modeli, prawidłowość przyjętych założeń i rozwiązań oraz możliwość ich zastosowania i przydatność do adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji.

Rozdział 7 przedstawia wnioski i kierunki dalszych prac. Wskazano oryginalne osiągnięcia w pracy, wnioski poznawcze, użytkowe i wdrożeniowe. Ponadto zaproponowano kierunek rozwoju dalszych prac, dotyczący poszerzenia zakresu i obszarów zastosowania opracowanej metodyki oraz systemu do obsługi kolejnych procesów technologicznych i rodzin wyrobów, charakteryzujących się zmienionymi danymi wejściowymi i oczekiwaniami wyjściowymi. W takim przypadku zaproponowane w pracy rozwiązanie podlegać będzie dalszym modyfikacjom, korzystając z już działających fundamentów systemu.

III. OCENA METODOLOGICZNEJ I METODYCZNEJ KONCEPCJI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Na podstawie przeprowadzonej analizy w rozprawie doktorskiej i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie, ponieważ zawiera ona opracowanie systemu adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji opartego na wskaźnikach KPI z zastosowaniem technologii cyfrowych w średniej wielkości przedsiębiorstwie metalowym.

Za oryginalne i ważne pod względem naukowym oraz użytkowym, rezultaty badań uzyskane przez Doktoranta, uznaję:

1. opracowanie metodyki adaptacyjnego sterowania procesem produkcji opartego na wskaźnikach KPI. Były to wskaźniki: czas przejścia materiału w procesie LT, wskaźnik braków SC, ogólna efektywność wyposażenia OEE;
2. opracowanie modelu hierarchicznej struktury wskaźników odzwierciedlającego zastosowanie wskaźników KPI na poszczególnych poziomach zarządzania, tj. strategicznym, taktycznym, operacyjnym;

3. opracowanie modelu decyzyjnego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji i oceny jakości procesu oraz wyrobu;
4. wdrożenie systemu adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji z zastosowaniem technologii cyfrowych w przedsiębiorstwie FAS;
5. wykazanie przydatności systemu i potwierdzenie poprawności założeń dla systemu oraz skuteczności jego działania, dzięki uzyskanemu skróceniu czasu przejścia materiału w procesie (obniżenie wskaźnika LT), redukcji poziomu sztuk brakowych (obniżenie wskaźnika SC) oraz poprawie ogólnej efektywności wyposażenia (wzrost wskaźnika OEE) dla procesu produkcji korpusu wodomierza w przedsiębiorstwie FAS.

Podczas przygotowania rozprawy doktorskiej Doktorant wykazał się dojrzałością naukową. O właściwym przygotowaniu mgra inż. Artura Mellerera do prowadzenia prac badawczych świadczą: umiejętność analizy literatury, zastosowanie właściwej wiedzy z zakresu adaptacyjnego sterowania procesem produkcji, poprawny dobór narzędzi do badań, autorskie opracowanie procedur badawczych, przeprowadzenie badań na rzeczywistym obiekcie i bazowanie na danych rzeczywistych oraz weryfikacja możliwości zastosowania opracowanego systemu w warunkach przemysłowych oraz umiejętność wskazania kierunków dalszych badań. Doktorant wykazał postawioną tezę badawczą.

Podsumowując stwierdzam, że zadania badawcze, które podjął Doktorant uzupełniają oraz poszerzają wiedzę z zakresu adaptacyjnego sterowania procesem produkcji. Rozprawę doktorską mgra inż. Artura Mellerera oceniam pozytywnie.

III. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Przytoczone uwagi mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości osiągniętych w pracy doktorskiej rezultatów. Mają one na celu pomóc w doskonaleniu warsztatu naukowego Doktoranta oraz stać się jedynie inspiracją i zachęcić do prowadzenia dalszych badań. Doktorant udowodnił, że potrafi prowadzić badania oraz rozwiązywać problemy naukowe.

Biorąc pod uwagę całość pracy stwierdzam, że **przedstawiona rozprawa doktorska mgra inż. Artura Mellerera pt. „System adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji z zastosowaniem technologii cyfrowych w średniej wielkości przedsiębiorstwie metalowym” stanowi oryginalną pracę, mieszczącą się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i odpowiada wymaganiom określonym w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami). W związku z tym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Grzegorz Rajek