

Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczny

Katedra Technologii Laserowych, Automatykacji i Organizacji Produkcji

e-mail: anna.burduk@pwr.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jerzego Patera pt. „Modelowanie przepływu strumienia wartości produkcji części lotniczych na elastycznej linii produkcyjnej”

Promotor: dr hab. inż. Dorota Stadnicka, prof. PRz

Recenzję sporządzono na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza na podstawie uchwały w sprawie powołania recenzentów rozprawy doktorskiej mgr inż. Jerzego Patera z dnia 30.11.2022 r.

Uchwała RD IMech Nr 06/11/2023

Kryteria oceny dysertacji wynikają z przepisów zawartych w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478)

I. OGÓLNA OCENA ROZPRAWY I ZNACZENIE TEMATYKI

Recenzowana praca została napisana w języku polskim i liczy 167 stron maszynopisu. Składa się ze spisu treści, wykazu oznaczeń, skrótów i pojęć, streszczeń w języku polskim i angielskim, 11 rozdziałów merytorycznych do których zaliczono również wstęp, wnioski z badań oraz podsumowanie. Na końcu pracy znajduje się bibliografia, obejmująca spis 78 pozycji oraz spisów tabel i rysunków. Wybór pozycji literatury jest odpowiedni, aktualny i adekwatny do podjętej tematyki rozprawy doktorskiej. Do pracy dołączono ponadto 3 załączniki zawierające mapę VSM dla produktu kadłub – stan obecny, mapę VSM dla produktu kadłub – stan przyszły oraz kod reguły wejścia do i z magazynu palet.

Układ pracy jest poprawny i odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim. Tytuły poszczególnych rozdziałów odpowiadają ich zawartości jednak dyskusyjny może być podział treści pracy na poszczególne rozdziały. Autor, wydaje się niepotrzebnie, zaliczył wstęp, wnioski z badań oraz podsumowanie do rozdziałów pracy. Konsekwencją tego jest jej podział na aż 11 rozdziałów oraz nieprawidłowe zbilansowanie objętościowe treści poszczególnych rozdziałów. Przykładowo najdłuższy, rozdział pracy (rozdział ósmy) liczy 26 stron, a najkrótszy (rozdział szósty) jedynie pół strony.

Praca napisana została w języku polskim. Na podkreślenie zasługuje fakt, że napisano ją w sposób bardzo staranny i bardzo poprawnym językiem. W pracy nie znaleziono błędów ortograficznych, gramatycznych i stylistycznych. Występują jedynie pojedyncze błędy interpunkcyjne.

Rozprawa doktorska podejmuje problematykę modelowania i symulacji elastycznych systemów produkcyjnych. Symulacja jest jedną z ważniejszych technik wspomagających zarządzanie produkcją. Metody modelowania i symulacji komputerowej stosuje się wtedy, gdy uzyskanie rozwiązania metodami analitycznymi jest zbyt skomplikowane, a bezpośrednie eksperymentowanie na systemie

rzeczywistym jest zbyt pracochłonne lub niemożliwe do przeprowadzenia. Modelowanie i symulacja procesów wytwarzania umożliwia ich analizę oraz rozwiązanie problemów zarządzania firmą, które cechuje wysoki poziom złożoności, co oznacza, że istnieje wiele alternatyw realizacji zadań postawionych przed systemem produkcyjnym. Problematyka modelowania i symulacji systemów produkcyjnych jest również ważna i aktualna dla współczesnych przedsiębiorstw. Pozwala przeprowadzić weryfikację przyjętych założeń przed ich zastosowaniem, a także określić nieprawidłowości, jakie mogą wystąpić w czasie eksploatacji, w tym szczególnie słabe punkty projektowanego lub reorganizowanego systemu produkcyjnego.

Dlatego uważam, że tematyka podjęta Doktoranta jest ważna i w pełni uzasadniona z naukowego punktu widzenia oraz odpowiada na potrzeby współczesnych przedsiębiorstw produkcyjnych. Recenzowana rozprawa bez wątplenia podejmuje bardzo istotny wątek badawczy mieszczący się w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna (dawniej inżynieria produkcji).

II. OCENA MERYTORYCZNA I UWAGI KRYTYCZNE

We **wstępie**, będącym pierwszym rozdziałem pracy, Autor przedstawia swoją motywację do jej napisania oraz strukturę pracy. Motywacja wynikała z potrzeby rozwiązania problemu praktycznego polegającego na zwiększeniu wydajności elastycznej linii produkcyjnej do produkcji części lotniczych poprzez taki dobór parametrów pracy linii, aby uzyskać maksymalny stopień wykorzystania czasu pracy maszyn, minimalny czas przejścia wyrobów przez linię produkcyjną oraz minimalną liczbę wyrobów w toku produkcji zapewniając realizację zwiększonego planu produkcyjnego. Dalsza część wstępu zawiera opis struktury pracy.

Uwaga 1. Autor niepotrzebnie wprowadza numerację wstępu pracy. Przez co wstęp staje się rozdziałem pierwszym i w konsekwencji przekłada się na brak zbilansowania objętościowego poszczególnych części (rozdziałów) pracy.

Uwaga 2. Oprócz pierwszego akapitu, w którym przedstawiono motywację podjęcia tematu pracy, wstęp zawiera jedynie szczegółowy opis treści pracy w poszczególnych rozdziałach, który można potraktować jako rozbudowane streszczenie pracy. Brak natomiast opisu tematyki i zagadnień, których dotyczyć będzie rozprawa doktorska.

Tematyka i zagadnienia, których dotyczyć będzie rozprawa doktorska została opisana w **rozdziale drugim** zatytułowanym „Wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy”. Autor w bardzo ogólny sposób przedstawił podstawowe informacje i definicje elastycznych systemów produkcyjnych, statystycznego i dynamicznego mapowania strumienia wartości (MSW) i wskaźników oceny funkcjonowania linii produkcyjnej. W rozdziale scharakteryzowano również specyfikę produkcji lotniczej.

Uwaga 3. Poszczególne treści rozdziału podzielono na podrozdziały i potraktowano odrębnie. Brak uzasadnień lub odniesień zarówno do wcześniejszych podrozdziałów jak i nawiązywania do tematu oraz celu pracy.

Uwaga 4. Rozdział zawiera jedynie podstawowe, ogólnie i powszechnie znane definicje oraz informacje takie jak np. zestaw symboli graficznych do budowy mapy przepływu wartości. Autor nie przedstawił trendów rozwojowych i najnowszych badań literaturowych dla omawianych zagadnień. Biorąc pod uwagę treści rozdziału drugiego, wydaje się że korzystna byłaby rezygnacja z prezentacji powszechnie znanych zagadnień oraz ewentualnie przedstawienie wybranych zagadnień we wstępie pracy.

Pytanie 1. Jaki był cel rozdziału drugiego z punktu widzenia zdefiniowanego celu w rozprawie doktorskiej?

W **rozdziale trzecim** przedstawiono tezę oraz zdefiniowano cele pracy i metodykę badań. Cel główny pracy zdefiniowano jako „przeprowadzenie symulacji funkcjonowania elastycznej linii produkcyjnej, aby umożliwić optymalną organizację pracy linii zapewniając jak największy stopień wykorzystania czasu pracy maszyn (U), najkrótszy czas przejścia wyrobu przez wszystkie procesy produkcyjne (LT), jak najmniejsze koszty utrzymania produkcji w toku (WIP) oraz jak najmniejsze koszty narzędzi”. Oprócz celu głównego zdefiniowano 9 celów szczegółowych. Przedstawiona w rozdziale ogólna metodyka badań została opisana w sposób bardzo poprawny i czytelny. Podzielono ją na sześć odrębnych zadań do których przypisano cele cząstkowe planowane do realizacji w danym zadaniu oraz opisano sposób w jaki zadanie zostanie zrealizowane.

Uwaga 5. Cel pracy ma charakter bardziej użytkowy niż naukowy. Szkoda, że Autor nie sformułował również celu naukowego, którym jest budowa modelu elastycznej linii produkcyjnej. Tym bardziej, że cel cząstkowy nr 5 zakłada właśnie przygotowanie i analizę danych do budowy takiego modelu.

Pytanie 2. Jaką lukę badawczą zidentyfikował Autor w kontekście zdefiniowanego celu pracy?

Pytanie 3. Dlaczego do realizacji celu pracy założono jedynie wykorzystanie symulacji komputerowej jako jedynej narzędzia umożliwiającego optymalną organizację pracy elastycznej linii produkcyjnej, a pominięto inne narzędzia optymalizacyjne np. metody inteligentne wykorzystywane często w optymalizacji systemów produkcyjnych?

Rozdział czwarty przedstawia przegląd aktualnego stanu wiedzy. Cel rozdziału został zdefiniowany jako „identyfikacja i ocena badań, dotyczących wybranej tematyki, na podstawie jasno zdefiniowanych kryteriów”. W dalszej części prowadzonego przeglądu aktualnego stanu wiedzy, Autor jednak nie posługuje się kryteriami, ale stawia następujące pytania badawcze:

- Jakie matematyczne modele są prezentowane w literaturze w zastosowaniu do mapowania strumienia wartości w kontekście elastycznych systemów produkcyjnych?
- Jak często temat matematycznego modelowania jest omawiany w połączeniu z mapowaniem strumienia wartości w kontekście elastycznych systemów produkcyjnych?

Bazując na postawionych pytaniach, Autor definiuje następujące słowa kluczowe w języku angielskim, w liczbie pojedynczej i mnogiej: „model matematyczny”, „strumień wartości”, „mapowanie strumienia wartości” oraz „elastyczny system produkcyjny”. Następnie, dla tych słów kluczowych przeszukuje wybrane bazy danych artykułów. Na podstawie uzyskanych wyników formułuje wnioski z przeprowadzonych badań literaturowych oraz charakteryzuje wybraną do realizacji celu pracy metodę, czyli symulację komputerową jako matematyczny model w zastosowaniu do mapowania strumienia wartości w kontekście elastycznych systemów produkcyjnych. Rozdział kończy ogólna charakterystyka symulacji komputerowej w kontekście korzyści zastosowania jej w przedsiębiorstwach produkcyjnych.

Uwaga 6. Mimo zdefiniowanego celu systematycznego przeglądu aktualnego stanu wiedzy, Autor nie podaje kryteriów identyfikacji i oceny badań dotyczących wybranej tematyki, a jedynie słowa kluczowe na podstawie których przeprowadził wyszukiwania artykułów w wybranych bazach publikacji naukowych.

Pytanie 4. Jakie kryteria przyjął Autor do przeprowadzenia przeglądu aktualnego stanu wiedzy?

Pytanie 5. Dlaczego w postawionych pytaniach badawczych, a następnie przy definiowaniu słów kluczowych, Autor skoncentrował się jedynie na modelach matematycznych, pomijając inne modele systemów produkcyjnych np. modele symulacyjne?

Uwaga 7. Charakteryzując symulację komputerową w kontekście narzędzia do podejmowania decyzji w przedsiębiorstwach produkcyjnych, Autor koncentruje się jedynie na zaletach tego narzędzia pomijając natomiast istotne wady. Przykładem tego są zdania, np.:

- *Str. 46: „Zakłady produkcyjne chcąc podejmować decyzje biznesowe oparte na szczegółowej analizie danych coraz częściej sięgają po narzędzia symulacyjne, które znajdują coraz szersze zastosowanie. Największą ich zaletą jest brak ograniczeń dotyczących struktury i stopnia skomplikowania analizowanego systemu [34]”. Autor pominął fakt, iż duży stopień skomplikowania modelu przekłada się na długi czas jego budowy oraz wysoki koszt dla przedsiębiorstwa. Ponadto, skomplikowany model zwraca mniej dokładne wyniki z powodu ograniczeń programów symulacyjnych oraz możliwości popełnienia większej liczby błędów przez osobę budującą model. Ze względu na wysokie koszty, przedsiębiorstwa rzadko posiadają licencje programów do modelowania i symulacji oraz własnych specjalistów, którzy zajmują się budowaniem modeli na użytek wewnętrzny. Zazwyczaj są to firmy zewnętrzne.*
- *Str. 47: „Możliwe jest wykrycie i usunięcie wszystkich potencjalnych strat podczas wykonywania planu produkcyjnego przed jego fizyczną realizacją.” Autor nie podał źródła literaturowego tego stwierdzenia, które wydaje się błędne. Możliwość wykrycia potencjalnych strat podczas wykonywania planu produkcyjnego możliwe jest jedynie wówczas, jeśli do modelu zostaną wprowadzone wszystkie czynniki zakłócające pracę rzeczywistego systemu produkcyjnego, co nie jest możliwe w modelach symulacyjnych będących jedynie uproszczeniem systemu rzeczywistego.*

Pytanie 6. Jakie inne wady modelowania i symulacji komputerowej systemów produkcyjnych z punktu widzenia przedsiębiorstw produkcyjnych znane są Autorowi?

W **rozdziale piątym** przedstawiono obiekt badań, czyli zautomatyzowaną linię produkcyjną włoskiej firmy MCM S.p.A. do produkcji dużych kadłubów przekładni akcesoriów. Autor w bardzo przejrzysty i umiejętny sposób charakteryzuje produkowane wyroby, layout omawianej linii wraz ze sposobem sterowania, przepływ produktów oraz gospodarkę narzędziową. Na potrzebę charakterystyki linii produkcyjnej sporządzono mapy VSM stanu obecnego dla analizowanych produktów i opisano trzy wskaźniki stosowane do oceny pracy analizowanej linii.

Uwaga 8. Podrozdział 5.6 „Zarządzanie danymi” nie odpowiada przedstawionej w nim treści, ponieważ ogranicza się do bardzo ogólnego opisu systemu sterowania JFMX z pominięciem wielu istotnych kwestii związanych z zarządzaniem danymi produkcyjnymi. Znacznie dokładniej zarządzanie danymi opisano w rozdziale siódmym.

Zarówno objętość jak i treść **rozdziału szóstego** jest kontrowersyjna. Rozdział ma objętość niecałej pół strony i składa się jedynie z dwóch akapitów, w których Autor przypomina i pośrednio uzasadnia wyznaczony cel pracy jak również wskazuje konieczność realizacji celów cząstkowych oraz zadań wyznaczonych w rozdziale trzecim.

Uwaga 9. Rozdział szósty wydaje się niepotrzebny, ponieważ nie zawiera żadnych nowych treści, a jego objętość to niecałe pół strony, co powoduje brak zbilansowania objętościowego całej pracy.

Pytanie 7. We wstępie Autor napisał „W rozdziale szóstym opisany został etap przygotowania do badań. Zostały opracowane narzędzia do pozyskiwania danych oraz przedstawione zostały dostępne raporty z linii ESP.” Dlaczego treść rozdziału szóstego różni się od treści zadeklarowanej we wstępie pracy?

Rozdział siódmy opisuje sposób zbierania i przygotowania danych do wykonania badań na modelach symulacyjnych. Przedstawiono w nim zarówno źródła pochodzenia danych, sposób przeprowadzenia

analizy pod kątem ich poprawności oraz przeprowadzono testy normalności rozkładu dla zarejestrowanych czasów rzeczywistych poszczególnych operacji wraz z ich oceną pod kątem użycia danych w modelu symulacyjnym.

W **rozdziale ósmym** opisano sposób budowy modelu symulacyjnego analizowanej elastycznej linii produkcyjnej w programie Witness. Opracowanie modelu rozpoczęto od zdefiniowania założeń i zidentyfikowania parametrów wejściowych i wyjściowych dla modelu. Opisano sposób budowy modelu oraz przeprowadzono ocenę jego adekwatności, czyli walidację z wykorzystaniem danych rzeczywistych i danych z symulacji. Porównane zostały dane wyjściowe pod kątem występowania korelacji wskaźników WIP i LT. Do badania korelacji wybrano metodę Pearsona. Dodatkowo przeprowadzono 2 sample TTest dla obu zestawów wskaźników WIP i LT. Test miał na celu potwierdzenie hipotezy zerowej (H0) stwierdzającej, że nie ma istotnej różnicy pomiędzy danymi rzeczywistymi, a danymi pochodzącymi z symulacji.

Uwaga 10. W pierwszym zdaniu podrozdziału 8.1 Autor napisał, że jego celem jest „prezentacja ograniczeń występujących na analizowanej linii produkcyjnej oraz przyjęcie założeń do opracowania wirtualnego modelu elastycznego systemu produkcyjnego”. Jednak w dalszej części w tabelach 8.1 i 8.2 przedstawia jedynie założenia ogólne dla linii ESP oraz założenia do opracowania modelu symulacyjnego w programie Witness. W podrozdziale pominięto natomiast opis występujących ograniczeń.

Pytanie 8. Jak w pracy zdefiniowano pojęcie ograniczeń występujących na analizowanej linii produkcyjnej i jakie ograniczenia zidentyfikowano?

Pytanie 9. Czy w oprogramowaniu do modelowania i symulacji procesów biznesowych Witness występują ograniczenia programowe podczas budowy modelu systemu produkcyjnego? Jeśli tak to jakie i w jaki sposób wpłynęły na budowę modelu?

Pytanie 10. Czy podczas walidacji modelu przyjęto wielkość dopuszczalnych błędów dla wyników z symulacji modelu w odniesieniu do czasów produkcji, liczby wyprodukowanych sztuk wyrobów i innych wielkości? Jeśli tak to jaką wielkość błędów przyjęto za dopuszczalną?

Pytanie 11. Czy zdefiniowano kryteria, których niespełnienie wyklucza zastosowanie modelu do dalszych badań?

W **rozdziale dziewiątym** przedstawiono opis przeprowadzonych badań symulacyjnych oraz wyniki przeprowadzonych eksperymentów na modelach. Autor w bardzo umiejętny sposób formułuje plan badań eksperymentalnych oraz przyjęte w badaniach założenia. Również uzyskane wyniki ze wszystkich zdefiniowanych i przeprowadzonych 21 eksperymentów przedstawiono i zinterpretowano w przejrzysty, poprawny i szczegółowy sposób. Natomiast wnioski z badań dotyczące optymalnego sparametryzowania linii ESP przedstawiono w **rozdziale dziesiątym**.

Uwaga 11: W pierwszym zdaniu rozdziału dziewiątego, Autor napisał: „Głównym elementem/osią planu eksperymentów były koszty, jakie trzeba potencjalnie ponieść w celu rozszerzenia stanu obecnego o możliwość zastosowania kolejnych maszyn do realizacji określonych operacji produkcyjnych na określonych wyrobach dla zwiększenia elastyczności linii produkcyjnej poprzez maksymalizację wykorzystania czasu pracy maszyn”. Natomiast w tezie pracy przyjęto więcej kryteriów optymalizacyjnych: kosztowe, czasowe oraz maksymalny stopień wykorzystania czasu pracy maszyn, minimalny czas przejścia wyrobu przez linie produkcyjną i minimalna liczbę wyrobów w toku produkcji.

Pytanie 12: Czy i w jaki sposób pozostałe kryteria zostały uwzględnione przy planowaniu eksperymentów?

Uwaga 12: Autor niepotrzebnie wydzielił wnioski z badań eksperymentalnych jako rozdział dziesiąty, ponieważ rozdział ten obejmuje niecałe 2 strony, a przedstawione wnioski mają formę podpunktów.

Ostatni rozdział pracy stanowi jej podsumowanie (**rozdział jedenasty**). Przedstawiono w nim m. in. wniosek końcowy z pracy, iż „przeprowadzone badania jednoznacznie mówią, że prawidłowo wykonana symulacja na adekwatnym modelu wirtualnym może być skutecznym narzędziem do podejmowania kluczowych decyzji biznesowych wspierającym obszar planowania produkcji” oraz potwierdzenie przyjętej tezy pracy. Wskazano kierunki prowadzenia dalszych prac nad badaniami symulacyjnymi z wykorzystaniem opracowanego modelu. W rozdziale Autor przedstawił również główne zalety i wady dla przeprowadzonych badań symulacyjnych.

III. UWAGI SZCZEGÓŁOWE I EDYCYJNE

1. W pracy wyróżniono zbyt wiele podrozdziałów/ podpunktów, które czasem są bardzo krótkie. Przykładowo podrozdział 3.1 „Teza pracy” obejmuje jedynie dwa zdania, natomiast podrozdział 3.3 „Zakres pracy” jedno 1 zdanie.
2. W rozdziale czwartym przedstawiającym między innymi wyniki przeszukiwania wybranych baz danych artykułów naukowych, ale nie podano dat dla wykonywanych badań.
3. Zamieszczony w pracy wykaz przyjętych skrótów, oznaczeń i pojęć jest opracowany w sposób niekonsekwentny. Większość zamieszczonych skrótów, oznaczeń i pojęć zawiera pełne nazwy i definicje zgodne z przyjętymi w literaturze. Jednak niektóre jak np. Witness będący nazwą oprogramowania do symulacji i optymalizacji procesów biznesowych zdefiniowano z punktu widzenia celu tematu pracy jako „program komputerowy do modelowania linii ESP”.
4. W zamieszczonej we wstępie strukturze pracy pominięto ostatni jej rozdział „Podsumowanie”.
5. Autor w sposób niekonsekwentny pisze nazwę oprogramowania do modelowania i symulacji procesów biznesowych Witness. Przykładowo na str. 87 nazwę tego oprogramowania można zobaczyć zarówno małymi jak i wielkimi literami.

IV. PODSUMOWANIE RECENZJI I WNIOSKÓW KOŃCOWY

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozprawy doktorskiej i sposobu rozwiązywania postawionych zadań badawczych, metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy oceniam bardzo pozytywnie. Rozprawa zawiera opis i analizę wirtualnego modelu linii produkcyjnej dla którego udowodniono, iż jest on zdalny do przeprowadzania eksperymentów i uzyskania wyników, na podstawie których można dokonywać zmian w konfiguracji linii produkcyjnej. Ponadto dane wyjściowe z symulacji są istotną wskazówką w podejmowaniu kluczowych decyzji biznesowych przez kierownictwo zakładu.

Mgr inż. Jerzy Pater potrafi definiować, realizować zaplanowane zadania badawcze oraz analizować uzyskane wyniki, co potwierdza jego właściwe przygotowanie do samodzielnego prowadzenia prac naukowych. Ponadto posiada dużą wiedzę teoretyczną z zakresu planowania, organizacji i modelowania procesów produkcyjnych, o czym świadczy rzeczowa i merytoryczna analiza oraz synteza literatury przedstawiona w rozprawie doktorskiej.

Stwierdzam, że zadania badawcze, które podjął Autor rozprawy doktorskiej uzupełniają oraz poszerzają wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna (dawniej inżynieria produkcji). Przytoczone

przeze mnie uwagi w niniejszej recenzji mają charakter dyskusyjny i powinny stać się jedynie inspiracją oraz zachęcić Autora do prowadzenia dalszych badań.

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona do recenzji praca doktorska mgra inż. Jerzego Patera pt. „Modelowanie przepływu strumienia wartości produkcji części lotniczych na elastycznej linii produkcyjnej” stanowi oryginalną pracę mieszczącą się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna (dawniej inżynieria produkcji) i odpowiada kryteriom określonym w przepisach zawartych w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478). Tym samym uznaję, że praca może być przedmiotem publicznej obrony w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.



Dr hab. inż. Anna Burduk, profesor uczelni