

Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Jerzego Patera
pod tytułem: „Modelowanie przepływu strumienia wartości produkcji części
lotniczych na elastycznej linii produkcyjnej”

1. Podstawa formalno-prawna opracowania recenzji

Podstawą prawną niniejszej recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 30 listopada 2022 roku, w sprawie powołania recenzentów rozprawy doktorskiej mgr inż. Jerzego Patera. Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza Pana dr hab. inż. Andrzeja Burghardta prof. PRz, w skierowanym do mnie piśmie z dnia 30 listopada 2022 roku (pismo nr RM-530-09-03/2022).

Przedmiotem opracowania jest recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Jerzego Patera, pod tytułem: „Modelowanie przepływu strumienia wartości produkcji części lotniczych na elastycznej linii produkcyjnej”, stanowiącej podsumowanie osiągnięć doktoranta oraz będącej podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Promotorem pracy jest Pani dr hab. inż. Dorota Stadnicka, prof. PRz.

2. Ocena tematyki pracy

Praktyka przemysłowa generuje wiele nowych oraz przypomina o już istniejących i jeszcze nierozwiązanych problemach, które tworzą szerokie spektrum różnorodnych zagadnień. Wymagają one prowadzenia prac zarówno na podstawie modeli teoretycznych, jak i doświadczeń przemysłowych. Jednym z istotnych aspektów będącym obecnie przedmiotem wielu dyskusji jest szeroko rozumiana efektywność systemów i procesów przemysłowych. Potrzeba, jak również możliwość osiągnięcia i utrzymania wysokiej efektywności dotyczy nie tylko pojedynczych obiektów czy zadań produkcyjnych, ale przede wszystkim złożonych układów technicznych, funkcjonujących w dynamicznych warunkach organizacyjnych i ekonomicznych.

Kluczowym problemem badawczym podejmowanym w tym obszarze jest optymalizacja. W tym kontekście dąży się do osiągnięcia, przy minimalnych kosztach całkowitych, maksymalnych zdolności produkcyjnych przedsiębiorstwa. Przekłada się to na maksymalizację wielkości wyjściowych, zapewnienie standardów bezpieczeństwa i

przewidywanego "czasu życia" urządzeń oraz minimalizację zużycia energii, surowców czy części zamiennych. Istotny jest jeszcze fakt, że w realizowanych w tym zakresie pracach badawczych, kładzie się obecnie nacisk na długoterminowy horyzont czasowy efektów i/lub skutków podejmowanych decyzji i działań. Przy wysokim stopniu niepewności decyzji o charakterze długoterminowym, a także wielości i różnorodności czynników wpływających na realizowane procesy przemysłowe, zastosowanie w tym zakresie modeli, metod i narzędzi symulacyjnych (w tym narzędzi symulacji komputerowej) wydaje się jak najbardziej uzasadnione.

W mojej ocenie, powyższe argumenty pokazują, że poruszana w recenzowanej pracy doktorskiej problematyka optymalizacji procesów produkcyjnych z zastosowaniem metod modelowania symulacyjnego jest aktualna zarówno w wymiarze naukowym, jak i przemysłowym. Warto także podkreślić, że dobór przez doktoranta praktycznego obszaru badań modelowych i weryfikacyjnych, w postaci elastycznego systemu produkcyjnego realizowanego w branży lotniczej, jest trafny ze względu na jego złożoność decyzyjną w ujęciu horyzontu długoterminowego.

3. Ocena treści pracy

Oceniana praca doktorska napisana jest w języku polskim, jej treść mieści się na 178 stronach. Na opracowanie składa się strona tytułowa, spis treści, wykaz oznaczeń i skrótów, 11 numerowanych rozdziałów stanowiących zasadniczą część pracy, bibliografię, spis tabel, spis rysunków, załączniki oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

W rozdziale 1. (Wstęp) Doktorant przedstawił w sposób jasny i klarowny motywację do realizacji badań. Kluczowym argumentem przemawiającym za podjęciem prac badawczych był aspekt praktyczny – przemysłowy, czyli potrzeba przedsiębiorstwa produkcyjnego do dysponowania skutecznym narzędziem planowania przepływu produkcji na nowej elastycznej linii produkcyjnej. Ponadto, w rozdziale tym, Doktorant szczegółowo omówił zawartość kolejnych rozdziałów, uzupełniając poszczególne opisy własną wstępną oceną sposobu i zakresu ich realizacji.

Rozdział 2. (Wprowadzanie do zagadnień poruszanych w pracy), stanowi wstęp do problematyki poruszanej w pracy. W tym rozdziale Doktorant omówił cztery zagadnienia będące w jego ocenie, kluczowymi aspektami tej pracy. Są to: elastyczne systemy produkcyjne, statystyczne i dynamiczne mapowanie strumienia wartości, specyfika produkcji lotniczej oraz wskaźniki oceny funkcjonowania linii produkcyjnej. Rozdział ten, ma charakter przeglądu literaturowego i w sposób prawidłowy wprowadza czytelnika w tematykę i istotne aspekty merytoryczne pracy. Przegląd literatury został przeprowadzony w oparciu o trafnie dobrane pozycje literaturowe, przywoływane pojęcia i zagadnienia Doktorant oznaczył prawidłowo stosownymi odnośnikami. Jednakże, w rozdziale tym zauważalny jest brak krótkiego wprowadzenia uzasadniającego potrzebę prezentacji właśnie tych zagadnień w kontekście przeprowadzonych badań. W tym miejscu brakuje także podrozdziału zawierającego przegląd i charakterystykę metod modelowania symulacyjnego, które są istotne w dalszej części pracy (m.in. symulacja znalazła swoje miejsce w głównym celu pracy). Co prawda, opis metod symulacyjnych Doktorant umieścił w podrozdziale 4.5, ale w mojej ocenie konsolidacja części literaturowej w jednym miejscu zwiększyłaby czytelność pracy.

Podrozdział 2.4 (Wskaźniki oceny funkcjonowania linii produkcyjnej), w mojej ocenie jest zbyt ogólny. Stanowi w zasadzie słowny opis wskaźników, a nie ich wymiar matematyczny. Dokonana została klasyfikacja miar, ale poza ogólnym opisem przydatności, ten wątek nie jest już kontynuowany. W efekcie Doktorant skoncentrował się w zasadzie na dwóch miarach ogólnych, które w swojej interpretacji wyrażają prawie to samo.

Rozdział 3. zawiera tezę, cele, zakres i metodykę pracy. Podrozdział zawierający tezę składa się z dwóch zdań następujących bezpośrednio po sobie. Doktorant nie wyodrębnił w tekście w sposób jednoznaczny zdania, które jest faktycznie tezą. Można przyjąć, z jednej strony, że cały akapit określa jedną dwuzdaniową tezę pracy, z drugiej zaś, że teza to pierwsze zdanie, a drugie zdanie jest formą uzupełniającego opisu pierwszego zdania. Należy jednak podkreślić, że pod względem merytorycznym tezę można uznać za prawidłową. W kontekście składni tezy, zarówno pierwsze, jak i drugie zdanie mają strukturę złożoną, co w pewnym stopniu może utrudnić ich wykazanie w toku prowadzonych badań. W dalszej części tego rozdziału zdefiniowano cel główny i cele cząstkowe, a także zaprezentowano metodykę pracy podzieloną na 5 zadań. Zarówno cele, jak również zadania szczegółowe zostały sformułowane w sposób prawidłowy, co czyni je wykonalnymi.

W rozdziale 4. Doktorant przeprowadził systematyczny przegląd literatury, którego celem było wyselekcjonowanie pozycji wiążących modelowanie matematyczne z mapowaniem strumienia wartości w kontekście elastycznych systemów produkcyjnych. Przeprowadzona analiza wykazała niedostatek wartościowych publikacji spełniających określone kryteria, co zostało zinterpretowane jako pole do możliwego rozwoju. W rozdziale tym, Doktorant zaproponował także metody symulacyjne jako sposób modelowania przepływu strumienia wartości. Wybór metod tej klasy dla potrzeb realizacji dalszych badań, szczególnie weryfikacyjnych, Doktorant uzasadnił w sposób prawidłowy i przejrzysty. Jednakże, zaprezentowana dalej klasyfikacja i charakterystyka metod symulacyjnych, została przedstawiona zbyt pobieżnie, z pominięciem aspektów modelowania matematycznego, co jest istotą tej grupy metod. Doktorant wskazał na metodę symulacji dyskretnej jako tej, która będzie stosowana w dalszej części pracy. Sam wybór jest jak najbardziej prawidłowy, ale nieprecyzyjny. Z uzasadnienia wyboru i dalszego przebiegu badań wynika, że chodzi o metody symulacji zdarzeń dyskretnych, a nie metody symulacji dyskretnej. Różnica w tym przypadku jest znacząca i leży w sposobie opisu charakterystyk zmiennych stanu systemu oraz opisie zjawiska upływu czasu.

Podsumowując tę część pracy (rozdziały 1-4), chciałbym podkreślić, że Doktorant prawidłowo przedstawił podejmowany problem badawczy na tle istniejącego stanu wiedzy. Przywoływane i opisywane treści mają charakter syntetyczny i dobrze wprowadzają w część badawczą. Chciałbym jeszcze zwrócić uwagę na całościowy układ i uporządkowanie tej. W mojej ocenie, lepszym rozwiązaniem dla zwiększenia czytelności pracy byłoby umieszczenie wszystkich wątków i zagadnień analizy literaturowej w jednym rozdziale. Obecnie, lektura rozdziału 4., zlokalizowanego po przeglądzie w rozdziale 2., może nasuwać pytania o zasadność przeprowadzenia odrębnego systematycznego badania literaturowego, tym bardziej, że wniosek, który wynika z tej analizy jest praktycznie zerojedynkowy (prawie całkowity brak publikacji spełniających założone kryteria).

Rozdział 5. prezentuje charakterystykę obiektu badań. Doktorant prace badawcze oparł na rzeczywistym obiekcie jakim jest elastyczna linia produkcyjna wybranych elementów

przekładni akcesoriów ADT, w szczególności kadłubów, pokryw i korpusów. Charakterystyka obiektu badań została zaprezentowana w sposób przejrzysty, czytelny, ale przede wszystkim kompletny. Z lektury tego rozdziału możemy zaznajomić się z kluczowymi etapami procesu produkcyjnego, cechami produktów, czy gospodarki narzędziowej przyporządkowanej do poszczególnych maszyn. W końcowej części rozdziału, Doktorant zaprezentował miary matematyczne, które służą do oceny funkcjonowania tej linii. Doktorant zaznaczył, że miary te są istotne dla przebiegu prac badawczych, dlatego w tym kontekście wydaje się, że elementy składowe wzorów zostały zaprezentowane zbyt opisowo.

Rozdział 6. zawiera problem badawczy. Doktorant skoncentrował się na aspekcie braku optymalnej organizacji pracy, która przekłada się na niemożliwy do osiągnięcia stopień wykorzystania czasu pracy maszyn, trudność w osiągnięciu optymalnego czasu przejścia przedmiotu produkcji przez cały proces produkcyjny w obszarze elastycznego systemu produkcyjnego, a także ograniczenie możliwości minimalizowania kosztów utrzymania produkcji w toku. W rozdziale tym, wskazano na kierunek rozwiązania tych problemów. W mojej ocenie, tak sformułowany problem badawczy w kontekście całej pracy (szczególnie dalszych jej rozdziałów) jest jak najbardziej słuszny i prawidłowy, ale w tym miejscu ma bardziej charakter deklaracyjny niż uzasadniony. Chodzi o to, że Doktorant nie wykazał braku wskazywanej optymalności, a tylko ją zadeklarował. Innymi słowy, brakuje analiz potwierdzających brak optymalnej organizacji pracy. Co prawda, z lektury dalszej części pracy, szczególnie wyników i interpretacji przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych z użyciem proponowanych wskaźników, można wyciągnąć wnioski, że dla potrzeb takiej oceny, a także rozwiązania problemów optymalizacji, można i należy zastosować metody symulacyjne. W mojej opinii problem badawczy mógłby być ukierunkowany bardziej na tego typu aspekt.

W rozdziale 7 Doktorant przedstawił sposób przygotowania do przeprowadzenia eksperymentów badawczych. W tym zakresie, scharakteryzował źródła pozyskiwania danych, stanowiących najczęściej zasoby baz danych systemów komputerowych, reprezentowanych przez raporty generowane na te potrzeby. Została tutaj zaprezentowana analiza danych historycznych, w kontekście poprawności (głównie w oparciu o identyfikację zdarzeń), możliwości użycia dla potrzeb symulacji (test normalności), a także dostępności narzędzi na poszczególnych maszynach. Rozdział ten został przygotowany starannie, wykonane analizy i interpretacja wyników nie budzą zastrzeżeń. W podsumowaniu tego rozdziału, Doktorant pokusił się o propozycję zastosowanie rozwiązań automatyzacji pozyskiwania i gromadzenia danych. Uważam, że to bardzo słuszny wniosek, który mógłby być także uwzględniony w podsumowaniu pracy, szczególnie w zakresie jednego z kierunków dalszych badań.

Rozdział 8. zawiera budowę modelu symulacyjnego odzwierciedlającego realizację procesów na badanej elastycznej linii produkcyjnej. Rozdział rozpoczyna się od sformułowanych i logicznie uporządkowanych założeń, począwszy od cech obiektu badań, przez parametry wejściowe, aż po wskaźniki reprezentujące parametry wyjściowe. W tej części pracy, został opisany szczegółowy sposób tworzenia modelu symulacyjnego z użyciem pakietu oprogramowania Witness Horizon. W tym zakresie, Doktorant udokumentował wykonanie układu ogólnego linii (tzw. layoutu), zdefiniował stosowne zmienne sterujące, określił zasady i reguły przepływu elementów przez obiekty modelu, a także przeprowadził weryfikację pod kątem występowania potencjalnych błędów. Dalsza część rozdziału opisuje sposób walidacji modelu. Jest to istotny aspekt modelowania z punktu widzenia przyszłej wiarygodności

uzyskiwanych wyników z eksperymentów symulacyjnych. Doktorant przeprowadził badanie zmierzające do oceny dokładności odzwierciedlenia rzeczywistej realizacji procesów na analizowanej linii produkcyjnej za pomocą opracowanego modelu symulacyjnego. W tym celu, przygotował i przeprowadził analizę korelacji pomiędzy założonymi wskaźnikami z użyciem danych pozyskanych z działania rzeczywistej linii produkcyjnej i modelu symulacyjnego. Wyniki analizy korelacyjnej wskazują na brak istotnych różnic w wartościach obliczanych wskaźników produkcyjnych. Prowadzi to do wniosku, że wyboru metody i narzędzia modelowania symulacyjnego dokonano adekwatnie do potrzeb, a model został prawidłowy przygotowany. Fakt, że Doktorant przeprowadził analizę dostosowania opracowanego modelu symulacyjnego do rzeczywistego obiektu badań oceniam bardzo pozytywnie.

Rozdział 9. obejmuje opis przebiegu eksperymentów z użyciem opracowanego modelu symulacyjnego. Cel eksperymentów został sformułowany w sposób prawidłowy i koncentruje się na kosztach narzędziowych, które należałoby ponieść jako wynik zmian doskonalących w realizowanym procesie produkcyjnym. Jednakże, następujące po tym uzasadnienie tak sformułowanego celu wydaje się zbyt szerokie, co może budzić wątpliwości, czy zamierzone efekty nie stoją ze sobą w przynajmniej częściowej sprzeczności, lub są od siebie niezależne. Na przykład, zastosowanie kolejnych maszyn może w niektórych sytuacjach być sprzeczne z maksymalizacją dostępności zintegrowanego systemu technicznego (co wynika m.in. z teorii niezawodności). Należy jednak podkreślić, że powyższa uwaga nie jest wadą, ale raczej głosem w dyskusji i zależy od określonych założeń interpretacyjnych. W kolejnej części tego rozdziału, Doktorant określił 10 szczegółowych założeń i plan przeprowadzenia badań. Plan ten został podzielony na dwa zestawy eksperymentów uporządkowanych w obrębie dwóch głównych etapów i etapu pośredniego. Zarówno poszczególne eksperymenty, jak i ich logika uporządkowania zostały przez Doktoranta prawidłowo opisane i uzasadnione. Procedura badań symulacyjnych obejmowała 18 eksperymentów dla poszczególnych grup części, każdorazowo w ramach pakietu 3 scenariuszy, które zakładały trzy poziomy kosztów wyposażenia narzędziowego. Ostatnim i bardzo istotnym elementem tego rozdziału jest interpretacja uzyskanych wyników. Doktorant w sposób systematyczny zaprezentował rezultaty przeprowadzonych eksperymentów, skupiając się na analizie porównawczej w obrębie trzech wskaźników: stopnia wykorzystania maszyn (U), kosztów utrzymania produkcji (WIP) oraz czasu przejścia wyrobu przez linię (LT). Uzyskane w tym zakresie wyniki, a szczególnie sposób ich prezentacji i interpretacji oceniam bardzo pozytywnie.

Rozdział 10., w aspekcie merytorycznym, stanowi w zasadzie kontynuację rozdziału 9. Z tego powodu rozdział ten równie dobrze mógłby być ostatnim podrozdziałem rozdziału 9. W tym zakresie, sformułowanych zostało 6 rekomendacji dotyczących zmian organizacji produkcji, które zostały oparte na przeprowadzonych eksperymentach. Doktorant zaznaczył także, że rekomendacje te będą miały odzwierciedlenie praktyczne, w szczególności wnioski bezkosztowe zostaną wdrożone, natomiast wnioski kosztowe będą przedmiotem analizy i decyzji zarządu firmy.

W rozdziale 11 zamieszczone zostało podsumowanie realizacji pracy i przeprowadzonych badań. Doktorant trafnie ocenił możliwości stosowania metod i narzędzi symulacyjnych dla potrzeb rozwiązywania problemów optymalizacyjnych w procesach produkcyjnych. W tym rozdziale, znalazło się także odniesienie do tezy pracy. Doktorant stwierdził, że teza została potwierdzona poprzez opracowanie wirtualnego modelu i słusznie wskazał, że użycie takiego

modelu i przeprowadzenie symulacji jest sposobem na optymalizację procesów produkcyjnych. Końcowa część tego rozdziału zawiera sugestie dotyczące przyszłych badań. Doktorant w tym zakresie skupił się przede wszystkim na zastosowaniu i rozwijaniu opracowanego modelu symulacyjnego w warunkach przemysłowych. Zdaniem doktoranta, działania takie powinny obejmować użycie opracowanego modelu i metody dla potrzeb rozwiązywania problemów optymalizacyjnych pozostałych linii i procesów produkcyjnych w firmie.

4. Ocena poprawności językowej i stylistycznej

Praca jest napisana w sposób właściwy pod względem poprawności językowej. Całość podzielono na rozdziały, których zawartość i kolejność nie budzi wątpliwości. Doktorant posługuje się poprawnym językiem, typowym dla prac naukowych. Na bieżąco wyjaśnia pojęcia kluczowe dla omawianej tematyki z uwzględnieniem odniesień do odpowiednich źródeł literaturowych. Na uwagę zasługuje także strona graficzna pracy. Zarówno tabele, rysunki, jak i wykresy są czytelne, przez co ułatwiają interpretację i ocenę wyników przeprowadzonych badań. W pracy występują również bardzo nieliczne błędy stylistyczne i interpunkcyjne, ale nie mają one żadnego wpływu na treść pracy.

5. Główne osiągnięcia doktoranta

Pracę jako całość oceniam bardzo wysoko. Do głównych osiągnięć naukowych Doktoranta można zaliczyć:

- przeprowadzenie systematycznego przeglądu i analizy publikacji naukowych pod kątem występowania w nich pojęć bezpośrednio związanych z tematyką pracy, w tym: modelowanie matematyczne, mapowanie strumienia wartości i elastyczne systemy produkcyjne,
- dokonanie identyfikacji i parametryzacji wybranych cech elastycznego systemu produkcyjnego w zakresie procesu produkcji wybranych elementów przekładni akcesoriów,
- opracowanie wirtualnego modelu badanego systemu produkcyjnego, w kierunku zastosowania metod symulacyjnych, a także przeprowadzenie procesu jego walidacji,
- opracowanie i przeprowadzenie szeregu eksperymentów symulacyjnych, a także interpretacja ich wyników i sformułowanie wniosków odniesionych bezpośrednio do badanego elastycznego systemu produkcyjnego.

6. Zagadnienia i uwagi do dyskusji

A. Zbudowany przez autora wirtualny model symulacyjny oparty jest o logikę modelowania zdarzeń dyskretnych związanych bezpośrednio z wykonywaniem poszczególnych zadań produkcyjnych. W modelu tym, Doktorant nie uwzględnił zmienności stanu poszczególnych maszyn odbywającą się w sposób ciągły w czasie. Takie zmiany mogą być wynikiem np. zużycia poszczególnych elementów i prowadzić do stopniowego

ograniczenia potencjału eksploatacyjnego, którego skutkiem może być np. zmniejszenie wydajności produkcji. W tym kontekście:

- czy jest możliwe zbudowanie modelu symulacyjnego uwzględniającego jednocześnie elementy procesu produkcyjnego oraz zmienność stanu technicznego poszczególnych maszyn?
- w jaki sposób model taki mógłby zostać zbudowany (które aspekty modelowania symulacyjnego należałoby uwzględnić)?
- czy i w jakim stopniu model uwzględniający zmienność stanu obiektu mógłby wpłynąć na przeprowadzone w pracy eksperymenty symulacyjne?

B. Jednym z założeń przyjętych przez autora, dotyczących przeprowadzanych eksperymentów, mówiło o nie uwzględnieniu w symulacji współczynnika awarii (założenie nr 9). W tym zakresie nasuwają się następujące kwestie:

- jakie konkretne argumenty przemawiały za wprowadzeniem takiego założenia?
- w jakim zakresie powyższe założenie i jednocześnie ograniczenie wpływa na przebieg eksperymentów i uzyskane wyniki?
- jeżeli założenia tego by nie było, to w jakim zakresie mogłyby zmienić się wyniki eksperymentów?

C. W podsumowaniu (rozdział 11) Doktorant wskazał na znaczne uproszczenie zbudowanego modelu symulacyjnego. Na czym mogłyby polegać dalsze prace badawcze w zakresie doskonalenia opracowanego modelu i stosowanej metody.

5. Ocena końcowa

W mojej ocenie, opiniowana praca doktorska zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Przedstawiony materiał teoretyczny, sposób przygotowania i przeprowadzenia badań, a także analiza wyników wskazują na ogólną wiedzę Doktoranta i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wskazane w recenzji uwagi i niedoskonałości, w zdecydowanej większości przypadków nie mają charakteru błędów, ale są subiektywnym spojrzeniem na prezentowany opis zrealizowanych badań w kontekście dyskusji naukowej.

Stwierdzam, że opiniowana praca doktorska Pana mgr inż. Jerzego Patera spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w rozumieniu Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668). Tym samym, wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony.

