

Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczny

Katedra Technologii Laserowych, Automatyzacji i Organizacji Produkcji

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

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Topczaka pt. „Modelowanie i ocena efektywności zastosowania technologii wytwarzania przyrostowego w przedsiębiorstwach produkcyjnych”

Promotor: prof. dr hab. inż. Justyna Patalas-Maliszewska

Recenzję sporządzono na zlecenie Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego na podstawie uchwały nr 929 w sprawie wyznaczenia recenzentów w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Panu mgr. inż. Marcinowi Topczakowi z dnia 25.10.2023 r.

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 178 stron maszynopisu. Składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, wykazu skrótów, wstępu, ośmiu rozdziałów merytorycznych oraz podsumowania i wniosków. Na końcu pracy znajduje się bibliografia, obejmująca spis 199 pozycji literaturowych, wykaz tabel i rysunków. Do pracy dołączono ponadto 7 załączników zawierających: kwestionariusz przeprowadzonej na potrzeby realizacji celu pracy ankiety, wyników analizy literatury, wyniki badania przemysłu (załączniki 3 i 4), rysunek wyrobu CQD-dystrybutor przyjęty do oszacowania czasu wytworzenia na EOS M 290 oraz dwa widoki tego wyrobu w ułożeniu prostopadłym i pod kątem względem platformy roboczej (załączniki 6 i 7). Układ pracy jest poprawny i zgodny z wymaganiami stawianymi rozprawom doktorskim. Tytuły poszczególnych rozdziałów odpowiadają ich zawartości.

Wybór literatury jest odpowiedni, aktualny i adekwatny do podjętej tematyki rozprawy doktorskiej. Na podkreślenie zasługuje fakt, że wśród 199 pozycji literaturowych jest aż 11 pozycji w których Pan mgr. inż. Marcin Topczak jest współautorem.

Rozprawa doktorska podejmuje problematykę oceny zasadności i efektywności wdrożenia technologii wytwarzania przyrostowego (AM) w małych i średnich przedsiębiorstwach (MŚP) z branży metalowej i motoryzacyjnej. Biorąc pod uwagę szybki rozwój technologii przyrostowych oraz cechy takie jak: krótki czas przygotowania produkcji i wprowadzenia nowego wyrobu na rynek, elastyczność produkcyjna, możliwość przetwarzania niezwykle szerokiej gamy materiałów, generowanie małej ilości odpadów w porównaniu z technologiami tradycyjnymi i wiele innych, można stwierdzić, że technologie przyrostowe stanowią istotny element przemysłu przyszłości. Liczne zalety technologii AM powodują duże zainteresowanie nimi przedsiębiorstw produkcyjnych. Niestety wysokie koszty związane z zakupem i wdrożeniem powodują, że decyzja często jest obciążona dużym ryzykiem technicznym,

organizacyjnym i finansowym. Literatura zdominowana jest przez aspekty techniczne związane z wytwarzaniem przyrostowym, brakuje natomiast metod i narzędzi pozwalających na ocenę ekonomiczną decyzji związanych z wdrożeniem do praktyki produkcyjnej.

Dlatego uważam, że tematyka podjęta przez Doktoranta jest ważna i w pełni uzasadniona z naukowego punktu widzenia oraz odpowiada na potrzeby współczesnych przedsiębiorstw produkcyjnych w zakresie wsparcia procesu podejmowania decyzji. W rozprawie doktorskiej podjęto prace badawcze dotyczące zbudowania modeli wspomagających podejmowanie decyzji i oceny zapotrzebowania oraz efektywności wdrożenia technologii AM. Opracowane modele, oparte na sieciach Bayesa i sieciach Petriego, pozwalają na wygenerowanie rekomendacji na temat implementacji technologii AM do praktyki produkcyjnej. 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** przedstawiono zalety oraz dane statystyczne świadczące o wzroście zainteresowania wdrożeniami technologii AM w polskich przedsiębiorstwach produkcyjnych. Ponadto, na podstawie przeglądu literatury w zakresie wykorzystania technologii AM w przemyśle oraz na podstawie wyników ankiet przeprowadzonych w 250 przedsiębiorstwach z branży metalowej i motoryzacyjnej, zdefiniowano problem badawczy, tezy badawcze, cele i zakres pracy.

Cel główny rozprawy zdefiniowano jako „zbudowanie oryginalnego modelu oceny efektywności wdrożenia technologii wytwarzania przyrostowego dla danej klasy przedsiębiorstw produkcyjnych.” Sformułowano następujące dwie tezy badawcze: teza 1. „Wykorzystanie sieci Bayesa oraz sieci Petriego pozwoli na sformułowanie modeli wspierających podejmowanie decyzji o wdrożeniu technologii wytwarzania przyrostowego w wybranej klasie przedsiębiorstw produkcyjnych”; teza 2. „Zastosowanie metody oceny efektywności stosowania technologii przyrostowych w produkcji pozwoli na predykcję skutków wdrożenia technologii wytwarzania przyrostowego w obszarze efektywności wykorzystania materiałów, optymalizacji kosztów, w tym kosztu maszyn i zatrudnienia oraz czasu trwania procesu produkcyjnego”.

Uwaga 1. Dokonując przeglądu literatury pominięto aspekt tendencji rozwojowych technologii AM, co w kontekście decyzji o ich wdrożeniu, mającej charakter strategiczny, jest bardzo ważnym aspektem dla przedsiębiorstw produkcyjnych.

Uwaga 2. Definiując cel pracy użyto sformułowania „oryginalny model oceny efektywności” jednak nie zdefiniowano w sposób jednoznaczny kryteriów tej oceny.

Pytanie 1. Jakie inne wady technologii AM są wskazywane w literaturze oprócz wymienionych wysokich kosztów inwestycyjnych i dłuższego czasu produkcji w porównaniu z technologiami tradycyjnymi?

Pytanie 2. Jakie są tendencje rozwojowe technologii AM mogące zniwelować wymieniane wady tych technologii?

Pytanie 3. Czy oprócz modeli sieci Bayesa i sieci Petriego rozważono wykorzystanie innych modeli do realizacji celu pracy? Jeśli tak to jakie?

Rozdział drugi zawiera opis, opracowanego na potrzeby realizacji celu pracy, modelu badawczego oraz przyjętą, sześćelementową metodę badawczą. Model badawczy przedstawiono na trzech bardzo czytelnych schematach graficznych: w postaci ogólnej, rozszerzonej o produkty poszczególnych

etapów i dane wejściowe oraz w postaci rozszerzanej o wykorzystywane w modelu elementy metody badawczej.

Uwaga 3. Ponieważ rozdział drugi liczy jedynie 6 stron, włącznie z trzema schematami modelu badawczego, można było rozważyć połączenie rozdziału ze wstępem pracy w którym przedstawiono zarówno cele jak i tezy rozprawy.

W **rozdziale trzecim** przeprowadzono krótką charakterystykę rodzajów technologii AM. Najważniejszą częścią tego rozdziału jest przeprowadzona analiza literaturowa z zakresu wykorzystania technologii AM w produkcji. Jej wyniki przedstawiono w dwóch tabelach. Pierwsza tabela zawiera porównanie opłacalności zastosowania technologii przyrostowych oraz technologii tradycyjnych z podziałem na obszary produkcyjne. W drugiej tabeli, z uwzględnieniem podziału na sektor motoryzacyjny i metalowy, zestawiono obszary procesów produkcyjnych z rodzajami technologii przyrostowych, ich cechami i wykorzystywanymi materiałami.

Pytanie 4. Jakie kryteria przyjęto do przeprowadzenia przeglądu aktualnego stanu wiedzy? Z jakich baz danych korzystano oraz jakie słowa kluczowe zostały wykorzystane?

Rozdział czwarty zawiera przegląd przykładów modelowania procesów w obszarze produkcyjnym. W kolejnych dwóch podrozdziałach przedstawiono definicje formalne sieci Bayesa i sieci Petriego oraz scharakteryzowano możliwości wykorzystania tych narzędzi w formułowaniu modeli wspomagających podejmowanie decyzji w przedsiębiorstwach produkcyjnych.

Uwaga 4. Przeglądu przykładów modelowania procesów w obszarze produkcyjnym dokonano w sposób bardzo wybiórczy i nieusystematyzowany. Powodem tego może być zbyt ogólny tytuł podrozdziału „Modelowanie procesów produkcyjnych” lub brak zdefiniowania w treści rozdziału celu wykonanego przeglądu albo podania kryteriów doboru przykładów w podrozdziale.

Uwaga 5. Zestawienie metod modelowania wykorzystywanych w obszarze procesów produkcyjnych przedstawiono w postaci czytelnej tabeli. Niestety nie przeprowadzono oceny tych metod pod kątem możliwości wykorzystania ich realizacji celu pracy lub w rozwiązaniu problemu badawczego.

Uwaga 6. W rozdziale czwartym, co prawda, scharakteryzowano możliwości wykorzystania sieci Bayesa i sieci Petriego w formułowaniu modeli wspomagających podejmowanie decyzji w przedsiębiorstwach, jednak nie wyjaśniono w sposób jednoznaczny dlaczego narzędzia te będą wykorzystywane do realizacji celu pracy. Nie napisano również czy brano pod uwagę wykorzystania innych modeli lub narzędzi.

W **rozdziale piątym** przedstawiono wyniki badania ankietowego na próbie 250 przedsiębiorstw z branży metalowej i motoryzacyjnej. Opisany sposób przeprowadzenia badania potwierdza, że wykonano je w sposób umiemy i poprawny metodologicznie. Badanie właściwie poprzedzono badaniem pilotażowym. Sposób doboru próby badawczej również nie budzi zastrzeżeń.

Pierwsza część **rozdziału szóstego**, najobszerniejszego rozdziału pracy, poświęcona została przeglądowi literatury z zakresu metod modelowania wykorzystywanych do oceny możliwości zastosowania technologii AM w produkcji. Przedstawiono również charakterystykę procesu wytwarzania przy wykorzystaniu technologii AM. Następnie zaprezentowano autorskie modele sieci Bayesa i sieci Petriego, których zastosowanie pozwala na ocenę poziomu zapotrzebowania na technologie przyrostowe oraz na ocenę efektywności wdrożenia technologii przyrostowych w danej klasie przedsiębiorstw produkcyjnych. Opisano sposób budowy modeli, strukturę i zależności pomiędzy zmiennymi, przedstawiając je na czytelnych schematach graficznych.

Uwaga 7. Przedstawiając przegląd literatury w zakresie metod modelowania wykorzystywanych do oceny możliwości zastosowania technologii AM w produkcji, nie podano słów kluczowych oraz nie wskazano nazw baz naukowych dla których prowadzono przegląd.

Uwaga 8. W podrozdziale 6.2 przedstawiono korzyści w kontekście modelowania procesów produkcyjnych z wykorzystaniem modeli sieci Petriego, pomijając ograniczenia jakie niesie ta metoda modelowania.

Uwaga 9. W podrozdziale 6.5 „Parametry i wskaźniki oceny efektywności procesu produkcyjnego przy wykorzystaniu AM”, przedstawiono koncepcję wskaźnika WYNIK na podstawie którego oceniana jest efektywność wdrożenia AM. Przyjęto, że jeśli wartość wskaźnika WYNIK jest większa niż 4 to „wdrożenie AM jest optymalne”, a jeżeli jest równe 1 to „obecna technologia jest optymalna”. Niestety Autor nie precyzuje zastosowanych pojęć i nie definiuje przyjętych kryteriów: „wdrożenie optymalne” i „technologia optymalna”. Nie wyjaśnia również dlaczego ustala trzy przedziały wartości dla wskaźnika WYNIK.

Pytanie 5. Jakie ograniczenia w kontekście modelowania procesów produkcyjnych mają modele sieci Petriego?

Pytanie 6. Dla zaprojektowanego drugiego modelu sieci Petriego umożliwiającego dokonanie analizy zakłóceń wpływających na proces produkcyjny, przyjęto trzy rodzaje zakłóceń: opóźnienia w dostawie materiałów, rotacji pracowników i zmienności kosztów energii elektrycznej. Dlaczego zdecydowano się na uwzględnienie akurat tych rodzajów zakłóceń i czy można w modelu uwzględnić większą liczbę zakłóceń?

Pytanie 7. Jak zdefiniowano i jakie przyjęto kryteria dla określenia „optymalność technologii” i „optymalność wdrożenia” przy obliczaniu wartości wskaźnika WYNIK?

Rozdział siódmy przedstawia eksperymentalną weryfikację opracowanej metody na przykładzie średniego przedsiębiorstwa produkcyjnego działającego w branży metalowej. Eksperymenty przeprowadzono w dwóch etapach. Etap pierwszy miał na celu weryfikację modelu sieci Bayesa w ocenie zapotrzebowania na technologię AM. Celem etapu drugiego była weryfikacja modeli sieci Petriego do oceny efektywności implementacji technologii AM do produkcji. Analiza wyników przeprowadzonych eksperymentów na modelach, z wykorzystaniem danych rzeczywistej pochodzących z analizowanego przedsiębiorstwa, potwierdziła możliwość oceny efektywności implementacji AM oraz możliwość zbadania poziomu zakłóceń wpływających na proces produkcyjny.

W **rozdziale ósmym** opisano opracowaną aplikację webową wykorzystującą model sieci Petriego i pozwalającą przedsiębiorstwom na przeprowadzenie oceny efektywności wdrożenia technologii wytwarzania przyrostowego. Zarówno weryfikację jak i prezentację funkcjonalności opracowanej aplikacji przeprowadzono na przykładach trzech średnich przedsiębiorstw produkcyjnych. Opracowana aplikacja z pewnością zwiększa użyteczny charakter wyników recenzowanej rozprawy doktorskiej poprzez umożliwienie przedsiębiorstwom wykonania analiz efektywności wdrożenia technologii AM na własne potrzeby z dowolnego miejsca i o dowolnym czasie.

Ostatni rozdział pracy stanowi jej podsumowanie (**rozdział dziewiąty**). Przedstawiono w nim m. in. podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych i wnioski z badań, kierunki dalszych prac oraz wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna.

III. UWAGI SZCZEGÓŁOWE I EDYCYJNE

1. Praca napisana jest w sposób bardzo staranny i bardzo poprawnym językiem. W pracy nie znaleziono błędów ortograficznych, gramatycznych i stylistycznych. Występują jedynie pojedyncze błędy interpunkcyjne.
2. We wstępie, zalety technologii przyrostowych zostały opisane aż czterokrotnie. Natomiast opis wad tych technologii ogranicza się jedynie do wymienienia trzech wad.
3. Praca jest nieodpowiednio zbilansowana objętościowo treścią poszczególnych rozdziałów. Przykładowo rozdział drugi liczy 6 stron, a rozdział szósty 37 stron tekstu.
4. W streszczeniach, w języku polskim i angielskim, jest inny podział treści niż później w rozdziałach pracy. Przykładowo w streszczeniu Autor napisał: „W rozdziale piątym dokonano charakterystyki sieci Bayesa i sieci Petriego (...)”, podczas gdy rozdział piąty w spisie treści zatytułowano „Poziom wykorzystania technologii wytwarzania przyrostowego w polskich przedsiębiorstwach produkcyjnych”.
5. Tytuł rozdziału 1.5 „Struktura rozprawy” jest nieadekwatny do prezentowanych w nim treści ponieważ zaprezentowano w nim indywidualny plan badawczy z podziałem na prace metodologiczne i praktyczne.

IV. PODSUMOWANIE RECENZJI I WNIOSEK KOŃCOWY

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozprawy doktorskiej i sposobu rozwiązywania postawionych zadań badawczych, metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy oceniam bardzo pozytywnie. Rozprawa zawiera oryginalną metodę oceny efektywności wdrożenia technologii przyrostowych dla danej klasy przedsiębiorstw produkcyjnych. Opracowana metoda pozwala na predykcję skutków wdrożenia technologii przyrostowych w obszarach efektywności wykorzystania materiałów, optymalizacji kosztów (takich jak koszty maszyn i pracowników) oraz czasu trwania procesu produkcyjnego. Ponadto wykorzystanie sieci Bayesa i sieci Petriego pozwoliło na opracowanie modeli wspierających podejmowanie decyzji o wdrożeniu technologii wytwarzania przyrostowego w wybranej klasie przedsiębiorstw produkcyjnych.

Pan mgr inż. Marcin Topczak wykazał, że potrafi definiować, realizować zaplanowane zadania badawcze oraz analizować uzyskane wyniki, co potwierdza jego właściwe przygotowanie do samodzielnego prowadzenia prac naukowych. Ponadto, rzeczowa i merytoryczna analiza oraz synteza literatury przedstawiona w rozprawie doktorskiej świadczy o dużej wiedzy teoretycznej z zakresu planowania i organizacji produkcji.

Na tej podstawie 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. Marcina Topczaka** pt. „Modelowanie i ocena efektywności zastosowania technologii wytwarzania przyrostowego w przedsiębiorstwach produkcyjnych” 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. Jednocześnie, z uwagi na bardzo umiejętne zrealizowanie obszernego planu badawczego, użyteczność pracy oraz dorobek publikacyjnych Doktoranta wnioskuję o wyróżnienie pracy.

Prof. dr hab. inż. Anna Burduk

Handwritten signature of Anna Burduk in blue ink.