

dr hab. inż. Andrzej Jardzioch, prof. ZUT
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
70-310 Szczecin
Al. Piastów 19

Szczecin 10.12.2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Topczaka

**pt. „Modelowanie i ocena efektywności zastosowania technologii
wytwarzania przyrostowego w przedsiębiorstwach produkcyjnych”**

Podstawa opracowania recenzji: Uchwała nr 929 Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego o wyznaczeniu recenzentów w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr inż. Marcinowi Topczakowi. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Justyna Patalas Maliszewska.

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Przedmiotem opiniowanej rozprawy jest opracowanie oryginalnej metody oceny efektywności wdrożenia technologii wytwarzania przyrostowego. Proponowana metoda dedykowana jest dla przedsiębiorstw produkcyjnych ujętych w klasie małych i średnich przedsiębiorstw z branży metalowej i motoryzacyjnej.

Doktorant postawił sobie cztery bardzo trudne zadania: określenie stanu zapotrzebowania na technologie wytwarzania przyrostowego w polskich przedsiębiorstwach produkcyjnych, opracowanie modelu oceny poziomu zapotrzebowania na technologie przyrostowe przy zastosowaniu sieci Bayesa, opracowanie modelu oceny efektywności technologii przyrostowych przy zastosowaniu sieci Periego oraz opracowanie modelu wspierającego proces podejmowania decyzji o wdrożeniu technologii wytwarzania przyrostowego.

Temat pracy jest bardzo aktualny i poruszany w pracach badawczych wielu ośrodków naukowych na świecie. Obejmuje on bardzo ważne z naukowego i praktycznego punktu widzenia zagadnienia projektowania technologii wytwarzania, a także eksploatacji maszyn i urządzeń w zakładach przemysłowych. Cechą szczególną pracy jest jej zorientowanie na problemy praktyczne związane z określeniem stanu zapotrzebowania na technologie

wytwarzania przyrostowego w polskich przedsiębiorstwach produkcyjnych oraz opracowanie oryginalnej metody oceny efektywności technologii przyrostowej. Technologie wytwarzania przyrostowego są stosowane przez przedsiębiorstwa przemysłowe ze względu na możliwość uzyskania produktu o skomplikowanych kształtach, redukcję odpadów oraz stosunkowo szybki czas uzyskania wyrobu, w szczególności w przypadku produkcji jednostkowej lub małoseryjnej. Opracowanie metody oceny efektywności wdrożenia technologii wytwarzania przyrostowego oraz identyfikacja parametrów wpływających na tę efektywność ma ogromne znaczenie dla prawidłowej pracy przedsiębiorstwa oraz zapewnienia ciągłości jego produkcji. Z naukowego punktu widzenia temat rozprawy wymaga prawidłowego wykorzystania nowoczesnych metod badawczych, opracowania obszernych danych uczących, zastosowania modelowania sieciowego oraz wnioskowania opartego na opracowanych modelach. Oceniając wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Topczaka należy stwierdzić, że jest on trafny i uzasadniony zarówno pod względem poznawczym jak i aplikacyjnym.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Topczaka składa się ze streszczenia, spisu ważniejszych oznaczeń, wprowadzenia, siedmiu rozdziałów merytorycznych, podsumowania, bibliografii oraz wykazu rysunków i tabel. W ramach pracy znajdują się też załączniki, w których zamieszczono dodatkowe informacje dotyczące wyników analizy literatury oraz wyników badań przemysłowych.

W pierwszym rozdziale pracy przedstawiono cel pracy, sformułowano problem badawczy oraz zdefiniowano tezy pracy doktorskiej. Jako cel pracy przyjęto opracowanie efektywnej metody oceny zapotrzebowania i predykcji skutków wdrożenia technologii wytwarzania przyrostowego w przedsiębiorstwie. Doktorant zdefiniował bardzo istotne z naukowego punktu widzenia pytanie badawcze związane z możliwością zbudowania takich modeli wspierających podejmowanie decyzji o wdrożeniu technologii wytwarzania przyrostowego, których zastosowanie umożliwi uzyskanie użytecznych rekomendacji. Sformułowano też dwie tezy badawcze. Pierwsza teza wskazuje, iż zastosowanie sieci Bayesa oraz sieci Petriego pozwoli na zbudowanie modeli wspierających podejmowanie decyzji o wdrożeniu technologii wytwarzania przyrostowego. Druga teza zakłada, iż zastosowanie opracowanej metody oceny efektywności technologii przyrostowych pozwoli na poprawę procesu wytwarzania, optymalizację kosztów magazynowania i zatrudnienia oraz skrócenie

czasu trwania procesu produkcyjnego. Należy zauważyć, iż zarówno zdefiniowany problem badawczy jak i zaproponowane tezy są prawidłowe. Problem badawczy jest dobrze zdefiniowany, oryginalny, istotny i wykonalny. Doktorant jednoznacznie wskazał, iż prace badawcze prowadzone będą na przykładzie technologii wytwarzania przyrostowego DMLS, a opracowane rozwiązania mają dotyczyć procesu produkcyjnego realizowanego przez średnie przedsiębiorstwa produkcyjne z branży metalowej. ,

W rozdziale drugim szczegółowo opisano zastosowany model badawczy i metodę badawczą. Na rys. 2.1.1. wskazano efekty poszczególnych etapów procesu badawczego oraz oznaczono dane wejściowe i wyjściowe. Zaznaczono też planowane do opracowania narzędzia umożliwiające rozwiązanie postawionych problemów badawczych.

W ramach rozdziału trzeciego, na podstawie analizy literatury, opisano istniejące technologie wytwarzania przyrostowego oraz wskazano główne obszary ich zastosowania w przemyśle. Wyróżniono grupę technologii przyrostowych wykorzystujących termoplasty (FDM, FFF, MEM0, grupę technologii wykorzystujących żywice światłoutwardzalne (SLA, DLP, PolyJet) oraz grupę technologii wykorzystujących proszki materiałów, głównie metali, (SLM/DMLS, EBM).

W ramach czwartego rozdziału przedstawiono podstawowe informacje o modelowaniu procesów produkcyjnych. Szczególną uwagę skupiono na zastosowaniu sieci Bayesa oraz sieci Petriego. Prawidłowo wskazano, iż sieci te umożliwiają modelowanie procesów produkcyjnych, wyznaczanie prawdopodobieństw wystąpienia zdarzeń oraz badanie efektywności procesów.

W rozdziale piątym przedstawiono wyniki badania potrzeb przedsiębiorstw produkcyjnych w zakresie wytwarzania przyrostowego. Badania te zrealizowano za pomocą interaktywnej ankiety skierowanej do przedsiębiorstw produkcyjnych zachodniej Polski. Jako najważniejszy efekt przeprowadzonych badań należy uznać stwierdzenie, iż ponad 30% badanych przedsiębiorstw wskazało chęć wdrożenia technologii wytwarzania przyrostowego podając jako decydujący czynnik konieczność obniżenia kosztów produkcji i zwiększenie elastyczności w reagowaniu na potrzeby klientów.

W ramach rozdziału szóstego opisano zaproponowaną metodę oceny poziomu zapotrzebowania na technologię wytwarzania przyrostowego oraz metodę oceny efektywności wybranej technologii wytwarzania przyrostowego. Opracowane rozwiązanie oparte jest na modelu zbudowanym za pomocą sieci Petriego oraz posiada algorytm analizy prawdopodobieństwa bazujący na sieci Bayesa. Zastosowanie sieci Bayesa umożliwiło



predykcję szansy prawidłowego wdrożenia wybranej technologii wytwarzania przyrostowego, natomiast model procesu opracowany za pomocą sieci Petriego posłużył do oceny efektywności wdrożenia wybranej technologii wytwarzania przyrostowego. Doktorant porównał proces produkcyjny aktualnie realizowany w przedsiębiorstwie (rys. 6.2.1) z procesem, w którym wykorzystano technologię wytwarzania przyrostowego (rys.6.2.2). Do budowy modelu sieci Petriego zastosowano program PIPE2. Model sieci Bayesa opracowano z wykorzystaniem programu AgNIe Academic Version. Przedstawiony na rys. 6.3.2 model zależności oparty jest na zbiorach uczących i uwzględnia obszar odnoszący się do wiedzy pozyskanej z przemysłu oraz obszar wiedzy pozyskanej na podstawie analizy literatury. Doktorant przeprowadził prawidłowo proces uczenia sieci poprzez implementację baz wiedzy w postaci odpowiednio zorganizowanego zestawu uczącego (zaprezentowanego w załącznikach 2,3,4). Wyuczone obszary sieci Bayesa połączono poprzez wprowadzenie równań wyznaczających prawdopodobieństwo wynikowe. Za oryginalne osiągnięcie autora należy uznać pomysł zastosowania sieci Petriego do oceny efektywności technologii wytwarzania przyrostowego. Zaproponowana koncepcja przewiduje, iż model sieci Petriego będzie w stanie wygenerować jedną z trzech możliwych odpowiedzi („aktualnie stosowana technologia jest optymalna”, „implementacja AM jest optymalna”, „potrzeba więcej badań”). W pracy zaprezentowano dwa modele rekomendacyjne: pierwszy, w którym nie uwzględniono zakłóceń procesu produkcyjnego oraz drugi, w którym uwzględniono zakłócenia związane z opóźnieniem w dostawie materiałów, rotacją pracowników oraz koszty energii elektrycznej. W podrozdziale 6.5 przedstawiono koncepcję wyznaczania wskaźnika, na podstawie którego oceniany jest stopień efektywności wdrożenia technologii przyrostowej. Zaproponowano trzy stopnie oceny: „wdrożenie AM jest optymalne”, „konieczna jest większa liczba badań”, „obecna technologia jest optymalna”. Opracowana koncepcja nie została zaprezentowana w sposób precyzyjny. Nie przedstawiono algorytmu, który pozwala na przydzielenie oceny „wdrożenie AM jest optymalne” dla procesu, dla którego parametr „WYNIK” ma wartość większą od 4. Odczuwalny jest też w tym miejscu brak precyzyjnej definicji zastosowanych w pracy pojęć „optymalne wdrożenie” oraz „optymalna technologia”. Interesującym elementem pracy jest natomiast model efektywności zastosowania technologii wytwarzania przyrostowego z uwzględnieniem takich zakłóceń jak zaburzenia dostaw materiałów, rotacja pracowników oraz zmienne koszty energii elektrycznej. Opracowany model pozwala na wygenerowanie numerycznego wskaźnika o nazwie „wynik zakłócenia”, który został wykorzystany do definiowania rekomendacji w zakresie konieczności przeprowadzenia dodatkowych analiz.

W ramach rozdziału siódmego zaprezentowano wyniki weryfikacji opracowanej metody. Weryfikacji dokonano z wykorzystaniem danych pochodzących z rzeczywistego przedsiębiorstwa, które rozważa wdrożenie technologii wytwarzania przyrostowego. Przeprowadzono weryfikację modelu sieci Bayesa do oceny zapotrzebowania na technologię AM (etap I) oraz weryfikację modelu sieci Petriego do oceny efektywności implementacji tej technologii. Pierwszy etap eksperymentów miał na celu ocenę zapotrzebowania na technologie wytwarzania przyrostowego. Zidentyfikowano relacje występujące pomiędzy wiedzą teoretyczną a realnymi potrzebami przedsiębiorstw produkcyjnych. W ramach drugiego etapu przeprowadzono szczegółową analizę parametrów procesu produkcyjnego. Stwierdzono, iż zastosowanie technologii wytwarzania przyrostowego pozwoli jedynie na redukcję kosztów zatrudnienia. W innych obszarach (czas procesu, koszty materiału, koszt wyposażenia) nie stwierdzono przewagi technologii wytwarzania przyrostowego w stosunku do procesu produkcyjnego stosowanego obecnie w przedsiębiorstwie. Zaobserwowano też zakłócenia w obszarze dostaw materiałów, a opracowany model wygenerował rekomendację wskazującą na potrzebę przeprowadzenia dodatkowych analiz i testów.

W celu oceny efektywności wdrożenia technologii wytwarzania przyrostowego opracowano ogólnodostępną aplikację webową opartą na opracowanym w ramach pracy modelu sieci Petriego. Szczegółowy opis przeprowadzonych badań z wykorzystaniem opracowanej aplikacji znajduje się w rozdziale ósmym. Dla trzech badanych przedsiębiorstw wyznaczono rekomendacje w zakresie oceny efektywności technologii wytwarzania przyrostowego oraz zidentyfikowano ograniczenia zaproponowanej metody.

W rozdziale dziewiątym doktorant zamieścił podsumowanie i sformułował wnioski z przeprowadzonych badań. Należy stwierdzić, iż zaproponowana metoda pozwala przeprowadzić analizę zapotrzebowania na technologię wytwarzania przyrostowego. Zdefiniowano parametry procesowe, które mogą mieć wpływ na podejmowanie decyzji w tym obszarze. Opracowano oryginalny model sieci Petriego umożliwiający ocenę efektywności wdrożenia technologii AM oraz przeprowadzono badania pozwalające na weryfikację tej metody. Na pozytywną ocenę zasługuje przeprowadzenie weryfikacji z wykorzystaniem danych pozyskanych od trzech rzeczywistych przedsiębiorstw produkcyjnych. Potwierdzono możliwość wykorzystania opracowanej metodyki w procesie oceny efektywności implementacji technologii wytwarzania przyrostowego.

Jako najważniejsze wyniki uzyskane w ramach pracy można wskazać opracowanie modelu opisującego zapotrzebowanie na technologie wytwarzania przyrostowego, określenie



obszarów zapotrzebowania za pomocą sieci Bayesa, opracowanie modelu do oceny efektywności implementacji technologii AM, bazującego na sieci Petriego oraz opracowanie oryginalnej metody oceny efektywności technologii przyrostowych, a także opracowanie aplikacji webowej pozwalającej na praktyczną weryfikację opracowanej metody.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Problem badawczy został określony prawidłowo, lecz niezbyt precyzyjnie. W rozdziale pierwszym zdefiniowano pytanie badawcze „Czy możliwe jest zbudowanie metody, której zastosowanie umożliwi **efektywną ocenę** zapotrzebowania i predykcję skutków wdrożenia technologii wytwarzania przyrostowego?”. Nie zdefiniowano jednoznacznie kryteriów, jakie powinna spełniać planowana do opracowania metoda oraz nie zdefiniowano pojęcia „efektywna ocena”. Drugie pytanie badawcze jest sformułowane w sposób bardzo ogólny. Postawiono pytanie „Czy możliwe jest zbudowanie takich modeli wspierających podejmowanie decyzji o wdrożeniu technologii wytwarzania przyrostowego, których zastosowanie umożliwi uzyskanie rekomendacji w obszarze implementacji AM w danym procesie produkcyjnym?”. Brak zdefiniowania przynajmniej ogólnych wymagań w zakresie planowanych do uzyskania rekomendacji i ich jakości nie pozwala na jednoznaczną ocenę jego istotności dla rozwoju teorii i praktyki.
2. W rozdziale 6 przedstawiono algorytm wyznaczania wskaźnika „WYNIK”, na podstawie którego oceniany był stopień efektywności wdrożenia technologii przyrostowej. Opis zaproponowanego algorytmu jest nieprecyzyjny. Nie wyjaśniono, dlaczego zaproponowano tylko trzy stopnie oceny: „wdrożenie AM jest optymalne”, „konieczna jest większa liczba badań”, „obecna technologia jest optymalna”. Nie wyjaśniono też, co oznacza sformułowanie „wdrożenie AM jest optymalne”. Brak jest też informacji, dlaczego przyjęto, iż jeżeli wskaźnik „WYNIK” ma wartość większą od 4, to „wdrożenie AM jest optymalne” (a jeżeli wskaźnik jest równy 4 to już nie). Pojawia się pytanie, dlaczego przyjęto tak ostre granice? Czy możliwe było w tym etapie zastosowanie np. wnioskowania Fuzzy Logic? Podobne pytania dotyczą rekomendacji „Obecna technologia jest optymalna”. Odczuwalny jest w tym miejscu brak precyzyjnej definicji pojęcia „optymalna technologia”.

3. Przy wyznaczaniu całkowitego czasu trwania procesu produkcyjnego (wzór 9) przyjęto, iż znany jest parametr „nieplanowany czas przestojów maszyn”. W pracy brak jest informacji, w jaki sposób wyznaczony zostaje czas nieplanowanych przestojów oraz nie wskazano w jakim stopniu niepewność w wyznaczeniu tego czasu może wpłynąć na wynik rekomendacji.
4. Algorytm wyznaczania wskaźnika kosztu wyposażenia zakłada znajomość „szacowanego czasu bezawaryjnej pracy każdej maszyny”. W pracy nie przedstawiono sposobu szacowania tego czasu. Jednocześnie autor wskazał, iż „w przypadku braku danych należy przyjąć przewidywany czas żywotności maszyn”. Żywotność maszyny to określony przez producenta czas jej eksploatacji i może być on wielokrotnie dłuższy od średniego czasu pracy bezawaryjnej (po awarii maszyna nadal może być z powodzeniem użytkowana). Pojęć tych nie można więc stosować zamiennie. W pracy brak jest jednoznacznego wskazania, czy w proponowanym algorytmie należy przyjąć średni czas bezawaryjnej pracy czy żywotność maszyny.
5. Algorytm wyznaczania strat materiałowych uwzględnia znajomość „strat na i-tym materiale w procesie na analizowanym etapie [% na 1 t]”. Zapis ten jest nieprecyzyjny. Nie wiadomo, jakie straty należy w tym miejscu uwzględnić. Nie wiadomo też, do jakiej wartości bazowej należy odnieść te straty, aby obliczyć ich procentową wartość.

4. Końcowa ocena rozprawy

Końcowa ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Topczaka jest pozytywna. Autor wykazał się teoretyczną i praktyczną wiedzą z zakresu inżynierii mechanicznej, analizy procesów produkcyjnych oraz zagadnień związanych z organizacją produkcji w przedsiębiorstwie produkcyjnym. Przedstawione w rozprawie badania stanowią oryginalny wkład w rozwój wiedzy w zakresie oceny zapotrzebowania na technologie wytwarzania przyrostowego w polskich przedsiębiorstwach produkcyjnych. Doktorant opracował oryginalną metodę oceny efektywności technologii AM oraz aplikację webową pozwalającą na weryfikację opracowanej metody. Metoda oceny efektywności technologii AM została zweryfikowana za pomocą eksperymentu symulacyjnego z wykorzystaniem rzeczywistych danych pozyskanych od trzech przedsiębiorstw produkcyjnych. Ważnym osiągnięciem pracy jest holistyczne podejście do zagadnień związanych z problemem podejmowania decyzji technologicznych w zakładach przemysłowych. Zastosowane w pracy metody badawcze (analiza literatury, sieci Bayesa, sieci Periego, badania weryfikacyjne) są trudne w stosowaniu



i wymagają dużego zaangażowania od prowadzącego badania, konsekwencji i umiejętności metodycznego prowadzenia badań oraz analitycznego myślenia.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Topczaka stanowi oryginalną pracę, mieszczącą się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnoszę zatem o przyjęcie przedłożonej rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Dr hab. inż. Andrzej Jardzioch, prof. ZUT

Szczecin 10.12.2023

