

dr hab. inż. Sławomir Kłos, prof. UZ
Instytut Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytet Zielonogórski
Ul. Szafrana 4
65-516 Zielona Góra

Zielona Góra, 11.06.2024 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Matuszkiego pt.:

” Budowa baz wiedzy w celu poprawy efektywności procesów produkcyjnych części maszyn”

Dyscyplina naukowa: Inżynieria mechaniczna.

1. Obszar problemowy rozprawy

Problematyka badawcza dotycząca efektywnego zarządzaniem wiedzą produkcyjną, jest istotna dla potrzeb tworzenia nowych wyrobów i technologii oraz zrównoważonego rozwoju przedsiębiorstw. Głównym celem autora recenzowanej rozprawy doktorskiej, było opracowanie algorytmu budowy baz wiedzy z uwzględnieniem redukcji danych niepewnych i niepełnych, pozyskanych z procesów produkcyjnych na etapie konstrukcyjno-technologicznego przygotowania produkcji części maszyn w celu poprawy ich efektywności. Problematyka budowy i efektywnego zarządzania bazą wiedzy w przedsiębiorstwie produkcyjnym jest aktualna i ważna, szczególnie dla rozwoju takich obszarów jak: konstruowanie nowych wyrobów oraz projektowanie i implementacja nowych technologii wytwarzania. Autor rozprawy wykorzystał metodę indukcji drzew decyzyjnych oraz teorię Dempstera - Shafera dla potrzeb budowy bazy wiedzy dla wybranych procesów produkcyjnych związanych z obróbką skrawaniem i wytwarzaniem przyrostowym. Opracowany algorytm został zaimplementowany w systemie doradczym opracowanym w środowisku AI Sphinx. Utylitarnym wynikiem prowadzonych badań jest redukcja marnotrawstwa i poprawa efektywności wybranych procesów produkcyjnych. Temat podjęty przez doktoranta jest ważny i aktualny, szczególnie w kontekście rozwoju informatycznych systemów wspomagających projektowanie procesów produkcyjnych. Wyniki prowadzonych badań są interesujące zarówno ze względów poznawczych, jak i utylitarnych. Zaproponowany algorytm umożliwia efektywne wspomaganie decyzji na etapie projektowania procesów technologicznych dla potrzeb produkcji części maszyn w celu poprawy ich efektywności. Zarówno zastosowane metody jak również zakres dysertacji

doktorskiej, zostały wybrane w sposób przemyślany i adekwatny dla **dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna**.

Uważam, że podjęcie przez Doktoranta przedstawionej problematyki jest uzasadnione ze względów poznawczych, jak również oceny możliwości zastosowań nowych metod do wspomagania projektowania procesów wytwórczych. Badania przedstawione w recenzowanej pracy są istotne dla rozwoju metod i narzędzi związanych z budową bazy wiedzy dla procesów produkcyjnych w celu poprawy ich efektywności i redukcji kosztów wytwarzania.

2. Kompozycja i treść rozprawy

Opiniowana praca liczy 222 strony i składa się ze spisu treści, 4 rozdziałów, podsumowania oraz streszczenia (w języku polskim i angielskim). Tekst pracy został poprzedzony spisem najważniejszych skrótów i akronimów co ułatwiło interpretację wzorów zawartych w pracy.

Załączony spis cytowanej literatury obejmuje 281 pozycji. Spis literatury zawiera dwie publikacje Doktoranta we współautorstwie z promotorem pracy. Literatura została dobrana właściwie i poprawnie zacytowana w treści pracy. Pozycje [50], [83], [150], [270], mają ponad 40 lat, a pozycje [2], [3], [10], [23], [40], [41], [42], [46], [88], [109], [151], [194], [195], [218], [247], [264], [270] ponad 30 lat. Większość wymienionych pozycji może być zastąpione bardziej aktualną literaturą. Generalnie należy jednak stwierdzić, że przytoczona literatura jest aktualna i ściśle związana z obszarem badań, który obejmuje dysertacja. Recenzowaną pracę można podzielić na dwie części. Pierwsza z nich obejmuje trzy pierwsze rozdziały, związane z wprowadzeniem do zastosowań baz wiedzy w planowaniu procesów produkcyjnych, sformułowanie celu i zakresu pracy oraz analizę literatury związaną z problematyką pracy. Należy podkreślić duży wkład autora w analizę wyników badań dotyczących metod pozyskiwania, identyfikacji i przetwarzania wiedzy obejmującej procesy produkcyjne. W aspekcie metod reprezentacji wiedzy, doktorant skoncentrował się na indukcji drzew decyzyjnych oraz regułowej reprezentacji wiedzy. Ponadto, analiza literatury obejmowała zagadnienia dotyczące teorii Dempstera-Shafera, wykorzystania systemów szkieletowych do zarządzania wiedzą oraz metod oceny efektywności procesów produkcyjnych.



W rozdziale 2 sformułowano cel i zakres pracy. W pracy nie sformułowano tez lub hipotez badawczych, autor ograniczył się do sformułowania problemu badawczego i naukowego. Głównym celem rozprawy była: „budowa baz wiedzy z wykorzystaniem autorskiego algorytmu uwzględniającego indukcję drzew decyzyjnych oraz matematyczną teorię ewidencji”. Cel szczegółowy pracy polegał na opracowaniu systemów doradczych w środowisku Sphinx. Jako problem badawczy, autor rozprawy postawił następujące pytanie: „Jakie narzędzia do redukcji danych niepewnych, techniki pozyskiwania wiedzy i metody reprezentacji wiedzy są odpowiednie do zastosowania w procesie budowy baz wiedzy dla procesów produkcyjnych, umożliwiając zwiększenie efektywności tych procesów?” W celu odpowiedzi na postawiony problem badawczy, autor zaproponował opracowanie algorytmu budowy baz wiedzy, obejmujący redukcję danych niepewnych i niepełnych, pochodzących z procesów produkcyjnych dla poprawy efektywności procesów produkcyjnych, na etapie konstrukcyjno-technologicznego przygotowania produkcji części maszyn. Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter badawczy oraz analityczny. Analiza literatury i stanu wiedzy dotyczącej sformułowanego problemu badawczego, służy uzasadnieniu jego oryginalności z jednej strony, z drugiej strony badania te powinny podkreślać wagę problemu badawczego podejmowanego przez doktoranta. W podsumowaniu rozdziału dotyczącego analizy literatury autor uzasadnia, że „...tematyka w niniejszej pracy jest obszarem ważnym naukowo i aktualnym z punktu widzenia opracowań analiz teoretycznych, jak i badań stosowanych prezentowanych przez naukowców na polskich i zagranicznych konferencjach naukowych.” Należy podkreślić, że analiza źródeł literaturowych, została wykonana bardzo rzetelnie i odnosi się do kluczowych zagadnień zawartych w dysertacji.

Druga część recenzowanej pracy doktorskiej obejmuje badania własne oraz podsumowanie i wnioski. Jednym z kluczowych elementów pracy jest algorytm pozyskiwania wiedzy dotyczącej procesów produkcyjnych. Zaproponowany algorytm stanowi sekwencję 8 kroków, bez nawrotów i warunków decyzyjnych. Należałoby się zastanowić, czy zaproponowana sekwencja kroków to nie jest bardziej metodologia postępowania (co należy zrobić i jakie metody można wykorzystać, żeby zbudować bazę wiedzy dotyczącą procesów produkcyjnych) niż algorytm (zestaw instrukcji do wykonania określonego działania).

Pierwszy krok obejmuje dobór czynników (parametrów), które mają wpływ na podjęcie decyzji dotyczących realizacji procesu produkcyjnego. W pracy brakuje specyfikacji parametrów dla różnych procesów wytwórczych. Algorytm powinien jednak precyzyjnie

określać sposób postępowania. W przypadku dwóch wybranych procesów obróbki skrawaniem i wytwarzania przyrostowego zaproponowano odpowiednio dobór półfabrykatu i filamentu. Wydaje się, że pierwszy krok w proponowanym algorytmie może stanowić najłabsze ogniwo jego realizacji w praktyce przemysłowej. Wymaga on bowiem „...konsultacji z ekspertami i pracownikami ponieważ nie każda wartość odnotowanego parametru będzie miała istotny wpływ na podjęcie decyzji”. Autor pracy nie określa sposobu wyboru ekspertów i niejasne jest również określenie „istotny wpływ na podjęcie decyzji”.

Drugi krok proponowanego algorytmu obejmuje zbieranie danych dotyczących procesów produkcyjnych. Jako źródła dostępnej wiedzy autor definiuje: wiedzę ekspercką (dziedzinową), literaturę specjalistyczną i dane z systemów informatycznych przedsiębiorstwa oraz dane z badań eksperymentalnych. Ten krok nie został również precyzyjnie określony, np. pod kątem sposobu przeszukiwania zaproponowanych repozytoriów wiedzy i weryfikacji uzyskanych wyników przeszukiwań. Na podstawie analizy przykładowych danych pokazanych w tabeli 9 można przyjąć, że wystarczającym repozytorium danych dla wybranego przykładu może być system ERP. Część danych została opisanych w sposób bardzo ogólny (np. metale i ich stopy, wymiary standardowe/niestandardowe). Kolejny krok proponowanego algorytmu obejmuje „opracowanie zbioru treningowego dla danych pochodzących z procesów produkcyjnych”. Dla przedstawionego w pracy przykładu, zbiór treningowy obejmował 141 rekordów. Autor nie określił wielkości zbioru treningowego, który gwarantuje poprawność działania proponowanego algorytmu. Dla studium przypadku związanego z obróbką skrawaniem autor pisze, że „Z uwagi na niski przyrost informacji dla parametru dotyczącego dostępności i dostawcy, zredukowano dane i zapisano je w postaci zbioru treningowego zawierającego łącznie 141 rekordów”, jednak nie przedstawił w tym miejscu, wyników pomiaru przyrostu informacji dla tych parametrów co utrudnia analizę poprawności działania algorytmu.

W czwartym kroku analizowanego algorytmu następuje identyfikacja przypadków niepewnych. W tym celu przeprowadzono badanie panelowe z udziałem pracowników firmy Mikro 3D. Dla potrzeb prowadzonych badań wybrano 10 pracowników firmy, „ze względu na wielkość przedsiębiorstwa”. W pracy nie określono jednak wielkości przedsiębiorstwa Mikro 3D oraz nie określono jak liczba pracowników przedsiębiorstwa wpływa na liczbę ekspertów, którzy powinni brać udział w badaniach panelowych. Kolejne cztery kroki zaproponowane w algorytmie do pozyskania wiedzy dotyczącej procesów produkcyjnych obejmują:

- zastosowanie teorii Dempstera-Shafera do redukcji wcześniej zidentyfikowanych przypadków niepewnych,
- opracowanie zbioru treningowego po redukcji przypadków niepewnych,
- indukcja drzew decyzyjnych,
- zapis pozyskanej wiedzy produkcyjnej za pomocą regułowej reprezentacji wiedzy.

Dla potrzeb oceny decyzji dotyczących oceny wyboru parametrów procesów obróbki skrawaniem i druku przyrostowego, opracowano arkusze oceny. W przypadku dużych przedsiębiorstw, które wykonują tysiące różnych części w oparciu o różne, alternatywne technologie (np. branża automotive), może się okazać, że budowa i wypełnienie takiego formularza będzie bardzo pracochłonne. Ostatnie trzy kroki, proponowanego algorytmu nie budzą zastrzeżeń. Wybór metody indukcji drzew decyzyjnych dokonano w oparciu o analizę porównawczą trzech narzędzi:

- algorytm ID4,
- oprogramowanie DeTreeX 4.0 wchodzące w skład pakietu AI SPHINX,
- oprogramowanie R Studio.

Dla potrzeb analizy porównawczej autor pracy posłużył się zbiorami testowymi dla obróbki skrawaniem i wytwarzania przyrostowego, które obejmowały po 100 przypadków. Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej, wybrano metodę wykorzystującą oprogramowanie AI SPHINX z uwagi na największą wartość trafności klasyfikacji (0,99 dla procesu obróbki skrawaniem i 0,98 dla procesu wytwarzania przyrostowego). W ostatnim kroku pozyskana wiedza produkcyjna została zapisana za pomocą regułowej reprezentacji wiedzy. Reguły klasyfikacyjne wygenerowano przy użyciu oprogramowania SPHINX, osobno dla procesu obróbki skrawaniem (przedstawiono 29 reguł) oraz procesu wytwarzania przyrostowego (18 reguł). Wygenerowane reguły były podstawą do opracowania systemu doradczego dla analizowanych procesów. Skuteczność działania systemu doradczego została zweryfikowana na podstawie oceny efektywności wspomaganych procesów. Ocena efektywności została przedstawiona w tabelach 36 i 37 przedstawionych w pracy, w oparciu o wskaźniki NPV i IRR dla czterech lat. Wątpliwość może budzić przyjęty do obliczeń współczynnik dyskontowy 8% (średnia inflacja w 2023 roku wyniosła 11%), ale wyniki pokazują, że inwestycja w proponowany system doradczy zwróci się w krótkim czasie. Ponadto autor przedstawił wpływ implementacji systemów doradczych na redukcję kosztu własnego wyrobu o ok. 5%. W celu poprawy efektywności procesu obróbki skrawaniem w przedsiębiorstwie Mikro 3D, autor zaproponował schemat

projektowania technologicznego w notacji BPML z zastosowaniem systemu doradczego. Weryfikacja skuteczności wdrożenia systemu doradczego, została zweryfikowana przy użyciu oprogramowania Flexsim, które posłużyło do budowy modelu symulacyjnego dla procesu obróbki skrawaniem. Średni czas obsługi procesów (zarówno dla obróbki skrawaniem, jak i wytwarzania przyrostowego) zmniejszył się o ok. 10%.

W ostatnim rozdziale pracy autor zawarł podsumowanie, które podzielił na wnioski poznawcze, utylitarne i kierunki dalszych badań. Wnioski poznawcze zawarte w ostatnim rozdziale pracy nie budzą zastrzeżeń, jednak analiza wniosków utylitarnych sformułowanych przez autora pozostawia pewien niedosyt i skłania do zadania kilku pytań związanych z potencjałem implementacyjnym zaproponowanego systemu. Kluczową kwestią związaną z tworzeniem aplikacji dla przedsiębiorstw produkcyjnych jest określenie grupy docelowych użytkowników takiego systemu. Zatem w odniesieniu do proponowanego rozwiązania można sformułować następujące pytanie 1:

- 1. Dla jakiego rodzaju firm produkcyjnych można dedykować proponowane rozwiązanie (małe, duże, średnie) i dla jakiego rodzaju produkcji proponowane rozwiązanie najlepiej się nadaje (MTS, MTO, ATO, ETO)?**

Podsumowując, praca została napisana poprawnie. Większość przedstawionych schematów, tabel i rysunków jest czytelna. Analiza literatury odnosi się do problematyki pracy i została przeprowadzona bardzo rzetelnie.

Pewne zastrzeżenia można mieć do struktury pracy, szczególnie do części obejmującej badania własne. Kluczową wartość recenzowanej dysertacji ma zaproponowany algorytm do pozyskania wiedzy dotyczącej procesów produkcyjnych, który składa się z ośmiu kroków. Uważam, że praca byłaby bardziej przejrzysta, gdyby każdy z kroków proponowanego algorytmu został opisany w osobnym podrozdziale, z podziałem na przypadek dotyczący obróbki skrawaniem i wytwarzania przyrostowego. Obecna struktura pracy uwzględnia opis poszczególnych kroków proponowanego algorytmu, ale ich analiza i zrozumienie jest utrudnione przez brak jasnego podziału.

3. Oryginalne osiągnięcia

Celem opiniowanej pracy była: „ ... budowa baz wiedzy z wykorzystaniem autorskiego algorytmu uwzględniającego indukcję drzew decyzyjnych oraz matematyczną teorię ewidencji”. Analiza treści pracy i wyników przeprowadzonych badań pozwala stwierdzić, że



postawiony cel został zrealizowany. W wyniku przeprowadzonych badań, Doktorant uzyskał szereg nowych rezultatów, do których należy zaliczyć:

- zastosowanie badań panelowych do zbierania danych dotyczących procesów produkcyjnych,
- zastosowanie teorii Dempstera-Shafera do redukcji przypadków niepewnych w zbiorach danych pochodzących z procesów produkcyjnych,
- dokonano indukcji drzew decyzyjnych w oparciu o trzy różne narzędzia oraz przeprowadzono analizę porównawczą tych narzędzi w oparciu o na największą wartość trafności klasyfikacji,
- wygenerowanie regułowej reprezentacji wiedzy dla procesów produkcyjnych związanych z obróbką skrawaniem i wytwarzaniem przyrostowym,
- opracowanie systemów doradczych w oparciu o zbudowane bazy wiedzy,
- opracowanie metody projektowania technologicznego z zastosowaniem opracowanego systemu doradczego,
- weryfikacja efektywności wybranych procesów produkcyjnych przy wspomaganii systemami doradczymi w oparciu o badanie modeli symulacyjnych przy użyciu oprogramowania Flexsim i analizy opłacalności.

Głównym osiągnięciem naukowym Doktoranta, było opracowanie algorytmu budowy baz wiedzy z uwzględnieniem redukcji danych niepewnych i niepełnych pojawiających się w danych pochodzących z procesów produkcyjnych, w taki sposób by wpłynąć na poprawę efektywności procesów produkcyjnych na etapie konstrukcyjno-technologicznego przygotowania produkcji części maszyn. Skuteczność algorytmu została zweryfikowana w oparciu o badania symulacyjne w oprogramowaniu Flexsim, a jego przydatność pokazano w oparciu o prostą analizę opłacalności wdrożenia, poprzez oszacowanie wskaźników NPV i IRR dla okresu 4 lat użytkowania systemu. Autor dysertacji przedstawił również wpływ wdrożenia systemów doradczych w przedsiębiorstwie, w którym analizowano procesy produkcyjne, na redukcję kosztu własnego wytwarzanych wyrobów.

Podsumowując uważam, że uzyskane rezultaty potwierdzają wiedzę i wysokie kompetencje Doktoranta w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz umiejętność właściwego stosowania metod i narzędzi badawczych w zakresie analizy procesów produkcyjnych oraz budowy narzędzi do wspomaganie procesów produkcyjnych na etapie konstrukcyjno-technologicznego przygotowania produkcji części maszyn. Przedstawione rezultaty

potwierdzają realizację postawionego w rozprawie celu badawczego i wskazują, że Doktorant potrafi definiować i samodzielnie realizować zaplanowane cele badawcze.

4. Uwagi do pracy doktorskiej

Analiza opiniowanej pracy doktorskiej skłania do uwag natury ogólnej i szczegółowej.

Uwagi ogólne:

W pierwszym kroku algorytmu kluczowy jest dobór czynników mających wpływ na podjęcie decyzji, który wymaga konsultacji z ekspertami i pracownikami, ponieważ nie każda wartość odnotowanego parametru będzie miała istotny wpływ na podjęcie decyzji. Zatem można zadać następujące pytanie:

2. Jaki powinna przebiegać procedura wyboru i weryfikacji ekspertów, w przedsiębiorstwie produkcyjnym, odpowiedzialnych za dobór czynników mających decydujący wpływ na podjęcie decyzji?

Autor nie określił rodzaju i wielości przedsiębiorstw produkcyjnych, dla których proponowane rozwiązanie jest najbardziej korzystne, można zadać następujące pytanie.

3. Jakie czynniki wpływają na liczbę ekspertów potrzebnych do przeprowadzenia badań panelowych w proponowanym algorytmie?

We fragmencie pracy związanym ze zbieraniem danych dotyczących doboru półfabrykatu dla procesu obróbki skrawaniem w przedsiębiorstwie produkcyjnym Mikro 3D, Doktorant pisze: „... z uwagi na niski przyrost informacji dla parametru dotyczącego dostępności i dostawcy, zredukowano dane i zapisano je w postaci zbioru treningowego zawierającego łącznie 141 rekordów.” Nasuwa się zatem pytanie:

4. Jaka powinna być minimalna wielkość zbioru treningowego, żeby proponowany algorytm działał prawidłowo?

Ostatnie pytanie do pracy dotyczy praktycznego zastosowania wyników badań.

5. Czy możliwa jest automatyzacja procesu pozyskiwania danych dotyczących procesów produkcyjnych i czy możliwe jest zastąpienie ekspertów np. poprzez wykorzystanie metod sztucznej inteligencji?

Uwagi szczegółowe

1. Tabele przedstawione w tekście pracy nie mają jednolitej struktury (nagłówki są w niektórych tabelach pogrubione w innych nie) np. tab. 3, tab. 7 i tab. 16.
2. Rysunki: 13, 15, 63, 64 są dość niskiej jakości.
3. Rysunki: 39, 40, 44, 49 są nieczytelne.
4. Opis rysunku 43 i 45 są niejasne, przedstawione zrzuty ekranów są niezrozumiałe.
5. Modele symulacyjne pokazane na rysunkach 68, 69, 73, 74 są trudne do interpretacji (np. pod względem kierunku przepływu produkcji).

5. Konkluzja

Przytoczone uwagi krytyczne nie podważają ogólnie pozytywnej oceny opiniowanej pracy doktorskiej. Stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie mgr inż. Marcina Matuszkiego zostały zrealizowany oryginalny cel badawczy, polegający na zbudowaniu baz wiedzy z wykorzystaniem autorskiego algorytmu uwzględniającego indukcję drzew decyzyjnych oraz matematyczną teorię ewidencji, który został zrealizowany w oparciu o praktyczne przykłady dla wybranych procesów produkcyjnych – obróbki skrawaniem i wytwarzania przyrostowego. Doktorant opracował nowatorski algorytm budowy baz wiedzy z uwzględnieniem redukcji danych niepewnych i niepełnych pojawiających się w danych pochodzących z procesów produkcyjnych, w taki sposób by wpłynąć na poprawę efektywności procesów produkcyjnych na etapie konstrukcyjno-technologicznego przygotowania produkcji części maszyn.

Stwierdzam tym samym, że przedstawiona do recenzji rozprawa wnosi nowy wkład w rozwój metod i modeli umożliwiających zarządzania wiedzą i wspomaganie decyzji dotyczących efektywności procesów produkcyjnych. Doktorant wykazał się dobrą znajomością metod i narzędzi związanych analizą efektywności procesów produkcyjnych i budową bazy wiedzy w tym obszarze, a w szczególności bardzo dobrą znajomością narzędzi do budowy systemów wspomagania decyzji dotyczących efektywności procesów produkcyjnych i wykazał, że potrafi prowadzić samodzielnie, odpowiedzialne badania naukowe.

Przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. mgr inż. Marcina Matuszkiego pt.: *"Budowa baz wiedzy w celu poprawy efektywności procesów produkcyjnych części maszyn"* **spełnia warunki** Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz. U. z 2016 r. poz. 882 ze zmianą:

Dz. U. z 2016 r. poz. 1311) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim w postępowaniu habilitacyjnym oraz postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2016 r. poz. 1586) **w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i może być dopuszczona do publicznej obrony.**

Stawowi 