

dr hab. inż. Bożena Kaczmarska prof. PŚk.
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego
Katedra Zarządzania Jakością i Własnością Intelektualną

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Szajny

p.t. *Wykorzystanie narzędzi rzeczywistości rozszerzonej do usprawnienia zarządzania procesami produkcyjnymi*

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Roman Stryjski, prof. UZ

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania recenzji jest pismo Pani prof. dr hab. inż. Justyny Patalas-Maliszewskiej, Dyrektora Instytutu Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Zielonogórskiego (nr IIM-D.51.511.15.2023.JG. z dnia 6 lipca 2023 r.) informujące o powołaniu mnie przez Senat Uniwersytetu Zielonogórskiego Uchwałą z dnia 28.06.2023 r., na recenzenta pracy doktorskiej Pana mgr inż. Andrzeja Szajny w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Podstawą prawną opracowania recenzji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora są Ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1668 z późniejszymi zmianami), Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz stopniach i tytułach w zakresie sztuki.

Mgr inż. Andrzej Szajna przygotował rozprawę doktorską zgodnie z wymaganiami formalnymi, przedstawionymi w przytoczonych aktach prawnych. Przedłożona do recenzji praca obejmuje problematykę i metodologię właściwą dla nauk inżynierijno-technicznych, w szczególności inżynierii mechanicznej.

2. Tematyka i charakterystyka zawartości rozprawy

We współczesnych warunkach gospodarowania o efektach i przyszłych możliwościach rozwoju każdego przedsiębiorstwa decydują w znacznej mierze charakter i intensywność różnorodnych przedsięwzięć innowacyjnych, dostosowujących działalność przedsiębiorstw do wymogów gospodarki rynkowej, złożoności i dynamiki ich otoczenia, w tym wyzwań technologicznych i informacyjnych. Istnieje tym samym potrzeba stałego poszukiwania skutecznych instrumentów zapewniających poprawę efektywności przedsiębiorstw oraz ich zdolności do szybkiego reagowania na zachodzące zmiany. Jednocześnie wielowymiarowość zarządzania przedsiębiorstwem oraz liczba aspektów, która składa się na efektywne funkcjonowanie organizacji na rynku wskazuje na złożoność rozważanej problematyki, stanowiącej przedmiot rozprawy, w której przedstawiono model koncepcyjny i informatyczne narzędzie wsparcia działalności współczesnych przedsiębiorstw *Narzędzie AR-AI*, w szczególności zarządzania wybranymi procesami produkcji.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska to opracowanie naukowe liczące 246 stron, w tym: spis treści; siedem rozdziałów merytorycznych, wykaz ważniejszych oznaczeń wykorzystywanych w treści pracy, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisy rysunków i tabel, bibliografia, wykaz publikacji Autora oraz jedenaście załączników, wśród których znajdują się m.in.: kwestionariusz ankiety badawczej, szczegółowe wyniki przeprowadzonych badań, krytyczna ocena wybranych publikacji dotyczących rozszerzonej rzeczywistości (AR), wyniki

badania stanu techniki obejmujące: wsparcie manualnego montażu przewodów i kabli szafy sterowniczej, monitorowania maszyn linii produkcyjnej, kontroli jakości produktów oraz treści uzupełniające. Układ pracy oraz sposób omówienia obszarów badawczych w poszczególnych rozdziałach jest odpowiedni.

W rozdziale 1 (s. 13-21), *Wprowadzenie*, Doktorant wskazał na istotność poruszanych w pracy zagadnień, genezę podjęcia tematu rozprawy, jej przedmiot oraz strukturę. Zwrócił uwagę na potrzebę ciągłego doskonalenia procesów produkcyjnych, „...usprawnienie zarządzania i zwiększanie produktywności poprzez wzrost automatyzacji i cyfryzacji ...”, jednocześnie występuje konieczność wyposażenia pracowników produkcyjnych w innowacyjne i efektywne narzędzia pracy. Autor rozprawy rozważania skoncentrował na modelu koncepcyjnym i zaawansowanym technologicznie narzędziu - *Narzędzie AR-AI*, wspierającym operacje manualne wykonywane przez pracowników, których „... nie da się zrobotyzować przy zachowaniu rozsądnego i racjonalnego budżetu ...”. *Narzędzie AR-AI* wykorzystuje rozszerzoną rzeczywistość (AR), zaawansowane rozpoznawanie obrazu i sztuczną inteligencję (AI). Ma ono m.in. ułatwić pracę, skrócić czas realizacji wykonywanych zadań, ograniczyć liczbę błędów, zapewnić automatyczny dostęp do odpowiednich, uporządkowanych informacji, zlokalizowanych w wybranym miejscu przestrzeni 3D, przy jednoczesnym braku ograniczania ruchów pracownika i działaniu w czasie rzeczywistym. Do szczegółowych analiz wybrano trzy procesy:

1. technologiczny - montaż przewodów w szafie sterowniczej,
2. pomocniczy – inspekcja linii produkcyjnej w ramach utrzymania ruchu,
3. kontrolny – kontrola jakości wyłoczek motoryzacyjnych.

Doktorant sformułował pytania poznawcze: „Czy i w jaki sposób można wykorzystać w środowisku przemysłowym urządzenie AR tak, żeby dostarczać użytkownikowi potrzebnych informacji w sposób automatyczny? i Jakie korzyści (lub straty) powstają w wyniku używania takich urządzeń AR?” oraz tezę roboczą: „Narzędzia wsparcia z wykorzystaniem technologii AR mogą ułatwić pracę, skrócić czas wykonywania danego zadania, a dodatkowo kontrolować poprawność prowadzonych czynności i zredukować liczbę błędów.”

Biorąc pod uwagę znaczenie problematyki doskonalenia i wspierania procesów produkcji zaawansowanymi technologiami, podjęty temat rozprawy doktorskiej uznaję za w pełni aktualny i ważny dla innowacyjnego oraz opartego na wiedzy rozwoju przedsiębiorstw.

W rozdziale 2 (s. 22-56), *Zdefiniowanie i charakterystyka problemu badawczego – przegląd literatury*, Doktorant na podstawie analizy literatury przedmiotu omówił teoretyczne aspekty problematyki informatycznego wsparcia działalności współczesnych przedsiębiorstw i wybranych zagadnień zarządzania produkcją, w szczególności: digitalizacja produkcji, komputerowe systemy wsparcia, duże ilości danych, chmura obliczeniowa i komputery brzegowe, interfejs użytkownika, rozszerzona rzeczywistość, sztuczna inteligencja i zaawansowane rozpoznawanie obrazu oraz zarządzanie wybranymi procesami w zakładzie produkcyjnym z wykorzystaniem narzędzi wsparcia. Ponadto dokonał przeglądu dostępnych rozwiązań w zakresie technologii AR. Ważnym obszarem analizy są również zagadnienia zarządzania produkcją we współczesnych przedsiębiorstwach, wykorzystujących nowe technologie w realizowanych procesach i zwrócenie uwagi nie tylko na rozwiązania techniczne, ale również na aspekty zarządzania zasobami ludzkimi i wpływu nowych rozwiązań technicznych na warunki pracy.

Przeprowadzona analiza: literatury, prac badawczych prowadzonych w jednostkach naukowych, aplikacji AR wykorzystywanych w przemyśle pozwoliła Autorowi na ocenę stanu wiedzy dotyczącej technologii oraz zidentyfikowanie luk badawczych.

W rozdziale 3 (s. 57-67), *Cele prac badawczych, pytania badawcze oraz teza badawcza*, Autor zidentyfikował luki badawczą i teoretyczną: „... brak narzędzi wsparcia pracownika

produkcji przekazujących mu odpowiednie dane w sposób automatyczny, opartych na AR, AI i zaawansowanym rozpoznawaniu obrazu oraz brak badań w zakresie skuteczności takich narzędzi ...”, które są podstawą sformułowania: trzech pytań badawczych, celu pracy, tezy badawczej, wyznaczonych do realizacji zadań oraz przyjętej metodyki badań. W podsumowaniu tego rozdziału, w nawiązaniu do dyscypliny inżynieria mechaniczna, Doktorant zaznaczył, że zostały złożone cztery wnioski patentowe (szkoda, że szczegóły wniosków są dopiero w załączniku) oraz, że „przedmiotem niniejszej pracy jest analiza i sposoby wykorzystania *Narzędzia AR-AI* w zarządzaniu wybranymi procesami produkcyjnymi, nie zaś *Narzędzie AR-AI* z informatycznego punktu widzenia”.

W rozdziale 4 (s. 68-87), *Narzędzie AR-AI i metoda zarządzania wybranymi podprocesami z jego wykorzystaniem*, Doktorant przedstawił wyniki badań przygotowawczo-weryfikacyjnych dla *Narzędzia AR-AI*, model koncepcyjny wspomagania procesów produkcyjnych i wybranych funkcji zarządzania na poziomie operacyjnym z wykorzystaniem AR-AI, funkcjonalność *Narzędzia AR-AI* z wyróżnieniem jego zasadniczych elementów składowych, algorytm funkcjonowania systemu operacyjnego *Narzędzia AR-AI*, zapisany w notacji BPMN oraz metodę zarządzania wybranymi procesami produkcyjnymi, przy wsparciu opracowanego *Narzędzia AR-AI*, opartego na mobilnym urządzeniu rozszerzonej rzeczywistości, zaawansowanym rozpoznawaniu obrazu oraz sztucznej inteligencji.

W rozdziale 5 (s. 88-114), *Zastosowanie Narzędzie AR-AI w wybranych podprocesach produkcyjnych*, Autor wskazał na uniwersalność proponowanej koncepcji wspierania procesów produkcyjnych z wykorzystaniem technologii AR i AI oraz metody zarządzania z wykorzystaniem opracowanego *Narzędzia AR-AI*, dedykowanego wsparciu pracowników wykonujących prace manualne. Stąd szczegółowo przedstawił: koncepcję zarządzania wybranymi procesami z użyciem prototypu (montażu przewodów w produkcji szaf sterowniczych, inspekcji linii produkcyjnej przez służby utrzymania ruchu, kontroli jakości wyrobów), wizualizację obrazu i informacji wyświetlanych na okularach *Narzędzia AR-AI*, kluczowe komponenty, funkcjonalności i sposób zarządzania danym procesem. Opiswane procesy produkcyjne mają różny charakter. „... montaż zajmuje cały czas pracy operatora. Proces inspekcji linii produkcyjnej jest jednym z wielu procesów wykonywanych przez pracownika utrzymania ruchu w ciągu czasu pracy. Kontrola jakości również nie zajmuje całego dnia pracy operatora, jednak rekonfiguracja procesu, dająca odciążenie operatora produkcji od wykonywania kontroli jakości, umożliwia obliczenie czasu przestoju, który można zaoszczędzić w przypadku danego operatora. ...”.

W rozdziale 6 (s. 89-152), *Badania wpływu wdrożenia Narzędzia AR-AI na zarządzanie wybranymi podprocesami produkcyjnymi*, Autor przedstawił przebieg i wyniki przeprowadzonych badań wybranych procesów, zgodnie z przyjętą metodologią. W pierwszym etapie procedury badawczej określił model danego procesu, wykorzystując metodę obserwacji, a następnie przeprowadził eksperymenty w rzeczywistych warunkach przemysłowych dla procesu montażu i inspekcji linii produkcyjnej. Celem badań było pokazanie różnicy pomiędzy obecnym procesem produkcyjnym (bez *Narzędzia AR-AI*) i procesem z użyciem opracowanego narzędzia, opierającego się na technologii rozszerzonej rzeczywistości (z AR). Porównywał czas trwania procesu bez *Narzędzia AR-AI* z tym samym procesem z wykorzystaniem prototypu *Narzędzia AR-AI*. Dla procesów montażu i inspekcji zmierzył czasy trwania operacji: czynności elementarnych (dla montażu np.: czas selekcji przewodu, czas montażu; dla inspekcji np.: czas badania siły zacisku kleszczy zgrzewalniczych), uzyskania informacji, wykonania wybranych czynności procesu. Dla procesu kontroli jakości przeprowadził badania empiryczne oparte na metodzie obserwacyjno-instrumentalnej z wykorzystaniem chronometrażu – badał wyłącznie proces bez *Narzędzia AR-AI*, by ustalić czas przestoju, który zostanie wyeliminowany po zastosowaniu *Narzędzia AR-AI*. Do analizy uzyskanych czasów pomiaru zastosował analizę statystyczną. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na skrócenie czasu realizacji procesu

z wykorzystaniem opracowanego narzędzia, a zatem „... pozytywnie zweryfikowano i potwierdzono słuszność sformułowanej tezy i odpowiedziano na pytania badawcze. Prototyp AR-AI jest jednym z lepszych narzędzi wpływających na: 1) redukcję czasu trwania wybranych czynności w obrębie operacji i w procesach produkcyjnych, lub 2) eliminację wybranych czynności oraz redukcję czasu przestoju, poprzez usprawnienie zarządzania danym podprocesem w opracowany i zaprezentowany sposób ...”. Z merytorycznego punktu widzenia ten rozdział oceniam wysoko.

W rozdziale 7 (s. 153-179), *Wnioski, aspekty teoretyczne i użytkarne - podsumowanie rozprawy doktorskiej*, Autor ocenił i omówił rezultaty przeprowadzonych badań, sformułował wnioski w odniesieniu do aspektów teoretycznych i użytkarnych, dotyczących niedoskonałości technologii i wynikających ograniczeń, potencjalnych kierunków badań i rozwoju oraz badania stanu techniki w zakresie zgłoszeń: 1) metody i systemu zautomatyzowanej obsługi procesu montażu, w szczególności w przypadku komponentów w szafie sterowniczej lub na panelu montażowym, oraz 2) i 3) urządzenia do identyfikacji oznaczeń przewodów i metody identyfikacji oznaczeń przewodów. Twórcy rozwiązań już uzyskali ochronę patentową w ramach patentu europejskiego (zgłoszenie 1) i patentu Stanów Zjednoczonych (zgłoszenie 2). W podsumowaniu Autor stwierdził „... Zweryfikowano i potwierdzono słuszność sformułowanej tezy badawczej i odpowiedziano na pytania badawcze ...”.

W bibliografii (s. 181-206) Autor przedstawił 418 pozycji obejmujących publikacje zwarte i ciągłe, tj. prace naukowe oraz raporty, doniesienia medialne i inne źródła w wersji drukowanej i elektronicznej w języku polskim i angielskim.

W spisie publikacji Autora (s.214-215) wykazanych jest 15 pozycji opublikowanych w monografiach, czasopiśmie i materiałach konferencyjnych, gdzie Doktorant występuje jako współautor publikacji.

W Załącznikach (s.216-246) Autor przedstawił: Badania ankietowe, Wstępne badanie montażu na 40 ochotnikach oraz Pełne dane badania *Narzędzia AR-AI*: montaż przewodów, procesy utrzymania ruchu, inspekcji starszej linii produkcyjnej, Wyniki pomiarów i treści uzupełniające dot. podprocesu kontroli jakości, Dodatkowe rozpoznanie własne dot. AR i AI, Badanie dot. opatentowanego czytnika napisów na przewodach, Przykłady publikacji nt. AR, które wprowadzają w błąd, Treści uzupełniające, Szczegóły informatyczne dot. *Narzędzia AR-AI*.

3. Ocena ogólna rozprawy i uwagi krytyczne

Rozprawa dotyczy zagadnień usprawniania zarządzania procesami produkcyjnymi z wykorzystaniem narzędzi rozszerzonej rzeczywistości, zaawansowanego rozpoznawania obrazu i sztucznej inteligencji. Doktorant opracował model koncepcyjny i *Narzędzie AR-AI* oraz sposoby jego wykorzystania w podprocesach montażu, utrzymania ruchu i kontroli jakości, zwracając uwagę na ergonomiczność narzędzia wsparcia pracowników produkcji. W celu pokazania uniwersalności zaprojektowanej koncepcji i opracowanego narzędzia wsparcia zbadał funkcjonalność narzędzia i przeprowadził analizę korzyści dla trzech wybranych procesów w przedsiębiorstwie produkcyjnym. Przeprowadzona w pracy analiza literatury przedmiotu oraz wyniki badań własnych Doktoranta wskazują na trzy aktualne obszary badań w inżynierii mechanicznej ukierunkowane na: doskonalenie procesów produkcji, wdrażanie innowacyjnych rozwiązań, ergonomiczność stanowisk pracy pracowników produkcji. Zatem stwierdzam, że przedstawiona w pracy tematyka jest aktualna, ważna dla rozwoju współczesnych przedsiębiorstw i zgodna z kierunkami badawczymi realizowanymi w inżynierii mechanicznej, w szczególności z badaniami dotyczącymi zarządzania procesami produkcyjnymi z uwzględnieniem aspektów technicznych, organizacyjnych i społecznych.

Merytorycznie przedstawioną pracę oceniam pozytywnie. Zagadnienia badawcze zostały przeanalizowane wieloaspektowo, szeroko w uporządkowanym metodycznie układzie.

Przedstawiony przegląd literatury dotyczącej problematyki rozprawy, pozwolił Doktorantowi na identyfikację problemu badawczego. Oryginalnym podejściem Autora jest zwrócenie szczególnej uwagi na publikacje i prace doktorskie powstałe na wiodących światowych uczelniach, m.in.: w Instytucie Technologicznym Massachusetts, Uniwersytecie Stanforda, Uniwersytecie w Oksfordzie, Kalifornijskim Instytucie Technologicznym, Politechnice Federalnej w Zurychu, Politechnice w Dreźnie oraz polskich uczelniach. W bibliografii (s. 181-206) Autor przedstawił 418 pozycji. Jest to duża liczba i trudno to jednoznacznie ocenić, jednak wydaje się, że z części pozycji można zrezygnować. Prawdopodobnie występują powtórzenia zawartych tam treści, na co Autor wskazuje w załączniku nr 9. Ponadto, niektóre pozycje trudno zaliczyć do bibliografii, przykładem pozycje 96 i 97 – .Encyklopedia PWN w wersji on-line oraz tradycyjnej papierowej. Mieszane odczucia budzi także załącznik nr 9, *Przykłady publikacji nt. AR, które wprowadzają w błąd*. Wskazane są tam pewne nieścisłości, ale trudno jednoznacznie stwierdzić, że wprowadzają w błąd. Uwaga Autora, że często przedstawiane tam są wizje, a nie praktyczne rozwiązania nie wydaje się uzasadniona. Innowacyjne rozwiązania zaczynają się od wizji, z których później jedynie niewielka część staje się rzeczywistością. Bez wizji nie ma rozwoju.

Istotnym podsumowaniem analizy literatury przedmiotu powinno być zestawienie przyjętych przez Doktoranta definicji pojęć wykorzystywanych w dalszej części pracy doktorskiej. Zważywszy, że Autor słusznie wskazał na błędy i różne interpretacje przedstawiane w publikacjach. Również prowadzone przez Doktoranta rozważania byłyby ujęte w prawidłowy, bardziej jednoznaczny i precyzyjny sposób, np. „sztuczna inteligencja” jest szeroko interpretowana i w wielu miejscach pracy nie jest jasno określone do jakich narzędzi sztucznej inteligencji Autor się odwołuje; następnie pojęcie „innowacje” jest zdefiniowane w dokumentach OECD z 2018 roku i wykorzystanie tej definicji pozwoliłoby Autorowi na poprawne jego użycie w tekście. Kolejna uwaga dotyczy zbyt ogólnych opisów badań, do których odwołuje się Autor, np. „... badanie opisane przez badaczy z Politechniki w Grazu ...” (s. 35-36); badania prowadzone w Politechnice Poznańskiej, Politechnice Wrocławskiej (s. 39), powstają pytania jakie są wyniki tych badań, jakie wnioski.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy Autor określił cel pracy, tezę badawczą oraz zadania do wykonania. Cel pracy i badań „... analiza narzędzi służących wsparciu pracowników, realizujących wybrane manualne podprocesy produkcyjne, opartych na technologiach AR i AI oraz możliwości ich wykorzystania w zarządzaniu wybranymi podprocesami produkcyjnymi w celu ich usprawnienia ...” jest sformułowany zbyt ogólnie, bez wyznaczenia celu naukowego i użytecznego. Zwłaszcza, że w zadaniu dotyczącym opracowania wniosków Autor odnosi się do „... nowej wiedzy, popartej badaniami naukowymi ...” (s. 63).

Teza badawcza jest zbyt ograniczona, odnosi się tylko do skrócenia czasu trwania wybranych podprocesów. Czy zatem w tytule pracy doktorskiej „... usprawnienie zarządzania procesami produkcyjnymi ...” Doktorant ogranicza się tylko do czasu trwania procesu? W planie badawczym wskazuje także na inne działania „... badane będą korzyści i straty dostarczane przez *Narzędzie AR-AI*, użyteczność, przydatność i szanse rynkowe ...”.

Doktorant nie przedstawił hipotezy badawczej, co wydaje się konieczne, zwłaszcza przy realizacji badań weryfikacyjnych, które są jednym z wyznaczonych zadań (s. 61-63).

Metodyka badań jest dobrana prawidłowo. Doktorant przeprowadził trzy badania właściwe dla trzech wybranych procesów: montażu przewodów w szafach sterowniczych, inspekcji linii produkcyjnej w ramach harmonogramu służb utrzymania ruchu, kontroli jakości wybranych wyrobów, tj. wytłoczek motoryzacyjnych. Wykorzystał metodę analizy i krytyki literatury

przedmiotu, metodykę badań eksperymentalnych, metody statystyczne oraz metodę obserwacji i chronometraż. Właściwie zostały wybrane procesy produkcyjne, przedmiot badań, grupa badawcza, zmienne i wskaźniki dla badanych procesów, gdzie kluczowym wskaźnikiem efektywności jest wydajność związana z czasem pracy danego pracownika. Warto podkreślić, że Autor zrealizował również badania przygotowawczo-weryfikacyjne, w ramach których zgromadził dane empiryczne dotyczące wyboru mobilnego urządzenia AR i czynników wpływających na akceptację technologii w środowisku produkcyjnym wykorzystując metodę pogłębionego wywiadu z przedstawicielami przedsiębiorstw, zajmującymi różne stanowiska w organizacji (głównie z menedżerami i pracownikami produkcji) oraz metodę badania dokumentów. Wartościowe są wyniki badania porównawczego: realizacji wybranych procesów bez wykorzystania *Narzędzia AR-AI* oraz z jego wykorzystaniem.

W analizowanych, w kolejnych rozdziałach empirycznych, zagadnieniach Doktorant przyjął uzasadniony logicznie cykl działań. Przeprowadził badania przygotowawczo-weryfikacyjne w szkołach wyższych, instytucjach badawczych i przedsiębiorstwach (30 podmiotów), podczas targów przemysłowo-technologicznych (ok. 900 stoisk targowych) i wśród 163 osób, które pozwoliły na określenie poziomu rozpoznawalności i stosowania AR, czynników wpływających na akceptację technologii w środowisku produkcyjnym oraz na wybór urządzenia rozszerzonej rzeczywistości do zastosowania w opracowanym narzędziu. Dalej przedstawił model koncepcyjny dotyczący zarządzania wybranymi procesami produkcyjnymi na poziomie operacyjnym - wsparcia pracownika produkcji wykonującego operacje manualne, z wykorzystaniem *Narzędzia AR-AI*. Elementami narzędzia są: autorskie oprogramowanie wykorzystujące zaawansowane rozpoznawanie obrazu i sztuczną inteligencję oraz okulary AR. W założeniach narzędzie ma zapewnić wygodny, automatyczny dostęp do odpowiedniej, uporządkowanej informacji zlokalizowanej w konkretnym miejscu w przestrzeni 3D, przy jednoczesnym braku ograniczenia ruchów pracownika. Autor skupił się na procesach manualnych, wykonywanych przez człowieka, które nie mogą podlegać automatyzacji np. z uwagi na dużą zmienność, krótkoseryjność, co cechuje produkcję opartą na idei Przemysłu 4.0. Stąd do pogłębionej analizy i badań wybrał procesy: montaż przewodów w szafie sterowniczej, gdzie pojedyncze operacje nie są skomplikowane, ale ich liczba powoduje znaczną złożoność operacyjną procesu; inspekcja linii produkcyjnej w procesie utrzymania ruchu, gdzie duża komplikacja nowoczesnych maszyn powoduje trudności personelu oraz kontrolę jakości wybranego wyrobu, tj. wytłoczek motoryzacyjnych. Narzędzie ma ułatwić pracę, skrócić czas wykonywania danego zadania oraz w miarę możliwości oprogramowania, skontrolować poprawność prowadzonych operacji i przyczynić się do redukcji błędów pracownika. W razie potrzeby narzędzie powinno zapewnić działanie w czasie rzeczywistym. Następnie Autor szczegółowo opisał zastosowanie narzędzia oraz przeprowadził badania weryfikujące poprawność jego działania oraz korzyści.

W części empirycznej (rozdziały: 4, 5, 6, 7) na dużym poziomie ogólności są opisy autorskiego oprogramowania, w bardzo ograniczonym zakresie przedstawione są szczegółowe informacje dotyczące samego rozwiązania technicznego *Narzędzia AR-AI*, zakresu wykorzystanej sztucznej inteligencji. Autor wielokrotnie odnosi się do „... autorskiego oprogramowania ...”, ale brak jest precyzyjnego określenia, co jest wkładem własnym Doktoranta, jaki jest Jego wkład w rozwój nauki i opracowanie narzędzia. Dopiero w załączniku nr 10 (s. 236-238) *Treści uzupełniające*, m.in. w kalendarium zrealizowanych zadań przedstawieni są wykonawcy poszczególnych etapów prac.

Należy podkreślić trafność i duże znaczenie przeprowadzonych badań weryfikujących: studium testów w realnych warunkach przemysłowych oraz przeprowadzenie badań i prezentację wyników porównań podprocesu bez narzędzia wsparcia AR-AI, z tym samym podprocesem z użyciem rozwiązania AR-AI. W badaniu porównawczym czasy montażu bez i z *Narzędziem AR-*

AI brało udział 40 przypadkowych osób, które montowały po trzy przewody najpierw bez wsparcia, a potem ze wsparciem AR (s. 119). Z opisu wynika, że każdy z badanych montował po jednym zestawie przewodów. Można postawić pytanie, czy montując te przewody wiele razy bez AR czasy uległy by skróceniu dzięki nabytemu doświadczeniu. Jak zmniejszenie czasów, wynikające z nabytego doświadczenia, odnosi się czasu działań ze wspomaganiami AR. Jakie wyniki uczestnicy badania osiągnęli by, przy zmianie kolejności badań – najpierw ze wsparciem AR, a potem bez. Szkoda, że badań nie rozszerzono o takie przypadki, a może jest to kierunek dalszych analiz Doktoranta. Problem ten dotyczy także następnych eksperymentów. Wątpliwości budzi metoda wyznaczania zaoszczędzonego czasu w całym procesie kontroli jakości (uzyskane wartości mogą być zawyżone), gdzie uwzględniany jest czas pomiaru, a przecież to działanie musi być wykonane. Jest tylko kwestia, czy pomiar wykona operator czy pracownik kontroli jakości.

Podkreślić należy, że weryfikacja celów pracy, tezy i problemów badawczych została przeprowadzona zgodnie z planem działań obejmującym: studia literaturowe, prawidłowo wykonane badania własne, opracowany model koncepcyjny zarządzania procesem produkcyjnym z wykorzystaniem *Narzędzia AR-AI* oraz opracowany prototyp *Narzędzia AR-AI*.

Treść rozprawy doktorskiej jednoznacznie dowodzi znajomości przedmiotu badań przez Autora. Dojrzałość naukowa i pragmatyczne myślenie znajdują swoje odzwierciedlenie w recenzowanej pracy. Doktorant posiada umiejętność prowadzenia badań w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Studia literaturowe i badania empiryczne były podstawą weryfikacji celu i tezy badawczej, sformułowanej w pracy.

Opiniowana rozprawa zawiera elementy składające się na oryginalne rozwiązanie podjętego problemu naukowego. Merytorycznie i metodologicznie oceniając wykazuje dobry poziom naukowy. Do walorów pracy zaliczam:

- określony problem badawczy, którego wybór uzasadniono analizą literatury i oceną praktyki gospodarczej występującej w tym zakresie,
- poprawność stosowanych metod badawczych,
- wyniki rozważań teoretycznych i analitycznych, które świadczą o dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia prac badawczych i działalności naukowej,
- wykorzystanie nowej technologii: rozszerzonej rzeczywistości, zaawansowanego rozpoznawania obrazu i sztucznej inteligencji do wspierania procesów produkcji,
- opracowanie modelu koncepcyjnego zarządzania procesem produkcyjnym z wykorzystaniem *Narzędzia AR-AI*,
- możliwość praktycznego wykorzystania opracowanego narzędzia w przedsiębiorstwach.

4. Ocena formalnej strony pracy

Praca napisana jest zrozumiałym i poprawnym językiem. Ilustracje graficzne przedstawianych zagadnień i wyników prowadzonych badań charakteryzują się czytelnością i starannością wykonania, są umiejętnie dobrane i opracowane.

W pracy występują jednak pewne błędy, które nie wpływają na jej ocenę, przykładowo:

- błędy literowe, interpunkcyjne i stylistyczne, np. s. 23, 36, 37, 38, 43, 46, 51, 69, 103, 116;
- bardzo częste odwołania do tekstów umieszczonych w innych miejscach pracy, co utrudnia analizę poszczególnych części tekstu, np. s. 23, 67;
- brak odniesienia do źródeł pod tabelami np. 1, 2, 3, s., 70-72;
- niepoprawne sformułowania, np.: „... ustalić czas przestoju, który zostanie całkowicie wyeliminowany po zastosowaniu *Narzędzia AR-AI* ...” s.115-116, „spory koszt” s.46, 103, „charakter prosty i stonowany” s.54, „zakłady starsze, nowsze i najnowsze” s. 134.

Pracę oceniam pozytywnie i proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do następujących zagadnień:

- Wskazanie przewagi opisanego narzędzia nad monitoringiem prowadzonym z biura utrzymania ruchu?
- Wskazanie metod badania i oceny innowacyjności przedsiębiorstw?
- Wyjaśnienie przyjętych założeń dotyczących efektywności opracowanych rozwiązań w kontekście usprawnienia zarządzania procesami produkcyjnymi?
- Czy zmiana kolejności działań w przeprowadzonych badaniach oraz wielokrotne powtarzanie działań ma wpływ na otrzymane wyniki?

5. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnego, ważnego i rozwojowego obszaru badawczego, związanego z doskonaleniem zarządzania procesami produkcyjnymi i wykorzystaniem nowych technologii informatycznych, w tym rozszerzonej rzeczywistości, zaawansowanej analizy obrazu i sztucznej inteligencji w działalności przedsiębiorstw.

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Szajny p.t. *Wykorzystanie narzędzi rzeczywistości rozszerzonej do usprawnienia zarządzania procesami produkcyjnymi*, mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, posiada oryginalne cechy nowości, a także istotne walory użyteczne. Spełnia wymogi określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz stopniach i tytułach w zakresie sztuki. Wnoszę zatem o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana mgr inż. Andrzeja Szajny do publicznej obrony.

Bożena Kaczmarska

Bożena Kaczmarska

Kielce, 31 sierpnia 2023 roku