

Prof. dr hab. inż. Anna Burduk

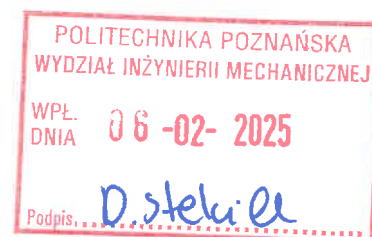
Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczny

Katedra Technologii Laserowych, Automatyzacji i Organizacji Produkcji

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

Wrocław 02.02.2025



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Mellera pt. „System adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji z zastosowaniem technologii cyfrowych w średniej wielkości przedsiębiorstwie metalowym”

Promotor: prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko, dr h.c., prof. h.c., Politechnika Poznańska

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Marcin Suszyński, Politechnika Poznańska

Recenzję sporządzono na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, dr. hab. inż. Bartosza Gapińskiego, prof. PP: pismo z dnia 03.12.2024 r. (Uchwała Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej z dnia 2 grudnia 2024 nr 3/III/11/2024)

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 liczy 164 strony maszynopisu, w tym 33 strony załączników (zawierających głównie graficzne opisy procesu produkcyjnego oraz tabelaryczne zestawienia jego parametrów) i składa się ze spisu treści, streszczeń w języku polskim i angielskim, wstępu, 5-ciu rozdziałów merytorycznych, podsumowania i planu dalszych działań, spisów rysunków, tabel i załączników oraz bibliografii (156 pozycji). Praca napisana została w języku polskim w sposób bardzo staranny i poprawny. W pracy nie znaleziono błędów ortograficznych, gramatycznych i stylistycznych. Występują jedynie pojedyncze błędy literowe, co jednak nie wpływa na jej jakość. Układ pracy jest poprawny i odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim. Tytuły poszczególnych rozdziałów odpowiadają ich zawartości. Wybór pozycji literatury jest odpowiedni, aktualny i adekwatny do podjętej tematyki rozprawy doktorskiej.

Rozprawa doktorska podejmuje jedną z kluczowych dla współczesnych przedsiębiorstw produkcyjnych problematykę adaptacyjnego sterowania procesem produkcji z wykorzystaniem technologii cyfrowych. Autor pracy, zgodnie z najnowszymi trendami rozwojowymi, rozpatruje to zagadnienie na tle znanych systemów zarządzania i metod wspomagających sterowanie procesem uwzględniając również osiągnięcia naukowe z zakresu sztucznej inteligencji. Na szczególną uwagę zasługuje holistyczne podejście do problematyki badawczej, przejawiające się w kompleksowej analizie czynników wpływających na efektywność i jakość procesu produkcyjnego. Praca obejmuje nie tylko aspekty technologiczne i organizacyjne procesu produkcyjnego, lecz także problematykę przepływu danych i informacji, procesy decyzyjne oraz bariery i ograniczenia związane z implementacją

haki

technologii cyfrowych. Wpisuje się tym samym w aktualne nurty badawcze oraz potrzeby praktyki przemysłowej, dostarczając cennych wniosków dla rozwoju inteligentnych systemów sterowania produkcją.

Zaproponowana w rozprawie koncepcja modelu hierarchicznej struktury wskaźników wspomagających proces sterowania produkcją oraz koncepcja modelu decyzyjnego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji i oceny jakości procesu oraz wyrobu stanowi istotny wkład w rozwój nowoczesnych metod zarządzania produkcją. Jednym z kluczowych atutów przedstawionej koncepcji jest możliwość wielopoziomowego podejścia do monitorowania i oceny procesu produkcyjnego. Zastosowanie podejścia opartego na analizie danych oraz metodach sztucznej inteligencji umożliwia bieżącą optymalizację procesu, a także skuteczniejsze wykrywanie i eliminowanie nieprawidłowości w jakości wyrobów. Dzięki temu wyniki rozprawy mają zarówno znaczenie teoretyczne, jak i aplikacyjne, a opracowane modele mogą stanowić podstawę do dalszych badań oraz wdrożeń w środowisku przemysłowym. Dlatego uważam, że tematyka podjęta przez Doktoranta jest ważna i w pełni uzasadniona z naukowego punktu widzenia oraz odpowiada na potrzeby współczesnych przedsiębiorstw produkcyjnych. Recenzowana rozprawa bez wątpienia podejmuje bardzo istotny wątek badawczy mieszczący się w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna (dawniej inżynieria produkcji).

II. OCENA MERYTORYCZNA I UWAGI KRYTYCZNE

We **wstępie**, stanowiącym pierwszy rozdział rozprawy, Autor w sposób kompetentny i przejrzysty przedstawił problematykę poprawy efektywności oraz kierunki rozwoju współczesnych przedsiębiorstw produkcyjnych w kontekście rozwoju technologii informatycznych i powszechnej cyfryzacji. Na tym tle wykazał zasadność opracowania dedykowanej strategii zarządzania przedsiębiorstwem, obejmującej sterowanie procesem produkcji dla Poznańskiej Fabryki Armatur „Swarzędz” sp. z o.o. (FAS). Strategia ta opiera się na nowoczesnych metodach zarządzania, uwzględniających wykorzystanie szybkiego dostępu do dużych zbiorów danych, w tym danych pozyskiwanych w czasie rzeczywistym, co stanowi kluczowy element cyfrowej transformacji przedsiębiorstwa.

Uwaga 1. Nieuzasadnione jest wyróżnienie podrozdziału 1.1 Geneza problemu, ponieważ występuje on bezpośrednio po tytule rozdziału i stanowi jego jedyną część. W takiej sytuacji zasadne byłoby włączenie jego treści bezpośrednio do głównej struktury rozdziału, eliminując zbędne podziały.

Rozdział **drugi** zatytułowany „Analiza literatury związanej z tematem pracy” stanowi przegląd literatury w obszarach tematycznych rozprawy doktorskiej. Dokonano m.in. charakterystyki sterowania procesem produkcji, ze szczególnym uwzględnieniem aktualnych trendów oraz innowacyjnych rozwiązań w tej dziedzinie. Przedstawiono definicję i cele adaptacyjnego sterowania procesem produkcji, a także omówiono metody, techniki oraz systemy wspomagające jego realizację. Ponadto przeanalizowano metody walidacji systemu adaptacyjnego sterowania procesem produkcji, wykorzystując kluczowe wskaźniki efektywności (KPI).

Uwaga 2. Wskazane byłoby rozszerzenie opisu metod i technik sterowania o porównanie ich zalet i ograniczeń, co pozwoliłoby na bardziej krytyczną ocenę ich przydatności w różnych kontekstach produkcyjnych.

Uwaga 3. W niektórych fragmentach rozdziału 2, w tym również w obszerniejszych partiach tekstu, Autor nie odwołuje się do literatury przedmiotu. Przykładem jest punkt 2.4.1 Cechy wskaźników efektywności (s. 34–35), gdzie opis cech związanych z zakresem oddziaływania wskaźników,

dokładnością i precyzją odwzorowania stanu procesu oraz kompletności elementów składających się na wskaźnik nie został poparty odniesieniami do źródeł literaturowych. Zasadne byłoby uzupełnienie tych treści o odpowiednie cytowania, co zwiększyłoby wiarygodność przedstawionych twierdzeń oraz osadziło je w kontekście istniejących badań i opracowań.

Uwaga 4. Zasadne byłoby uzupełnienie rozdziału o ocenę stopnia implementacji omawianych metod i technik w praktyce przemysłowej oraz o przykłady ich wdrożeń.

Uwaga 5. Czytelność rozdziału mogłaby zostać zwiększona poprzez wyraźne wyodrębnienie kluczowych zagadnień, np. poprzez tabelaryczne zestawienie metod, technik i systemów wspomagających sterowanie procesem produkcji.

Uwaga 6. W rozprawie doktorskiej cel pracy został sformułowany w dwóch różnych rozdziałach w odmienny sposób, co może prowadzić do niejednoznacznej interpretacji założeń badawczych. W podsumowaniu rozdziału 2 „Wnioski z badań literaturowych” zdefiniowano cel pracy jako „wykazanie, że dzięki adaptacyjnemu systemowi sterowania procesem produkcji, integrującemu hierarchiczną strukturę wskaźników z modelami wspomagania decyzji w zintegrowanym systemie informatycznym, przedsiębiorstwa mogą osiągnąć znaczną poprawę zarówno efektywności jak i jakości”, natomiast w rozdziale 3 „Cel i zakres pracy”, cel pracy zdefiniowano jako „opracowanie koncepcji oraz wdrożenie adaptacyjnego systemu sterowania procesem produkcji opartego na autonomicznych metodach wspomagania decyzji”. Wskazane byłoby ujednolicenie celu pracy oraz jednoznaczne określenie, czy głównym założeniem rozprawy jest analiza i ocena wpływu proponowanego rozwiązania, czy jego opracowanie i implementacja. Ponadto cel pracy powinien być przedstawiony wyłącznie w dedykowanym rozdziale metodologicznym nr 3 „Cel i zakres pracy”, a nie w przeglądzie literatury.

Pytanie 1. Jakie kryteria przyjęto przy wyborze analizowanych trendów i innowacyjnych rozwiązań w sterowaniu procesem produkcji? Czy uwzględniono zarówno rozwiązania akademickie, jak i praktyczne wdrożenia przemysłowe?

Pytanie 2. W jaki sposób przedsiębiorstwa radzą sobie z integracją systemów AI w istniejące środowiska produkcyjne i systemy ERP/MES?

Pytanie 3. Czy analizowano problem doboru metody sterowania procesem produkcyjnym w kontekście przyjętej strategii zarządzania?

W rozdziale **trzecim** przedstawiono naukowe założenia pracy, w tym cel badawczy oraz przyjęte podstawy teoretyczne i metodologiczne opracowania systemu adaptacyjnego sterowania produkcją. Określono również cele poznawcze oraz cel użytkowy, który został sformułowany jako „opracowanie prototypu zintegrowanego systemu informatycznego wspomagającego adaptacyjne sterowanie produkcją oraz usprawnienie obiegu informacji w procesie produkcyjnym”. Ponadto, w rozdziale zawarto kluczową tezę pracy: „adaptacyjne sterowanie procesem produkcji zwiększa efektywność procesu produkcji oraz poziom jakości produkowanych wyrobów”, a także sformułowano szczegółowe problemy badawcze. Przedstawiono ponadto ogólny i szczegółowy schemat badań oraz strukturę pracy, co stanowi istotny element uzasadnienia spójności podejścia badawczego i przyjętej metodologii. Sposób sformułowania celu naukowego i użytkowego nie budzi zastrzeżeń.

Uwaga 7. Teza rozprawy doktorskiej powinna być precyzyjnie powiązana z celem pracy i jednoznacznie wynikać z przeprowadzonych badań. W przedstawionej formie teza pracy jest dość ogólna.

Rozdział **czwarty** zawiera charakterystykę i diagnozę wybranego procesu produkcji – korpusu wodomierza w przedsiębiorstwie FAS. W rozdziale przedstawiono również koncepcję modelu hierarchicznej struktury wskaźników wspomagających proces sterowania produkcją oraz koncepcję

modelu decyzyjnego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji i oceny jakości procesu oraz wyrobu.

Uwaga 7. Na rysunku 4.7 przedstawiono wyniki diagnozy przepływu informacji w procesie produkcji korpusu wodomierza, jednak brakuje szczegółowego opisu metodologii przeprowadzenia badania. Dodatkowo, opis i interpretacja wyników diagnozy pozostają na poziomie ogólnym. Na przykład, Autor stwierdza, że "diagnoza jednoznacznie wskazała, iż w przebiegu procesu produkcji korpusu wodomierza, występował szereg miejsc, gdzie nie pozyskiwano informacji istotnych dla efektywnego przeprowadzenia procesu technologicznego, a tym samym minimalizujących ryzyko powstawania wyrobów niezgodnych". Stwierdzenie to wymagałoby bardziej precyzyjnej analizy i uzasadnienia.

Pytanie 4. W jaki sposób i przy pomocy jakich narzędzi przeprowadzono diagnozę przepływu informacji w procesie produkcji korpusu wodomierza? Które miejsca (etapy) procesu uznano za najbardziej istotne z punktu widzenia dalszych badań i dlaczego?

Uwaga 8. W punkcie 4.2.1 Autor przedstawia badania ankietowe dotyczące gotowości i potencjału MŚP branży metalowej do wdrożenia elementów koncepcji Przemysłu 4.0. Celem ankiety była ocena poziomu znajomości tej koncepcji, zaawansowania technologicznego oraz identyfikacja barier we wdrażaniu nowoczesnych rozwiązań. Niestety, w pracy zaprezentowano jedynie wyniki jednego z siedmiu pytań dotyczących potencjalnych barier, a na wykresie zabrakło podpisu osi X. Czy pozostałe odpowiedzi zostały uwzględnione w analizie na potrzeby realizacji celu pracy?

Pytanie 5. Proszę o bardziej szczegółowe uzasadnienie lub podanie kryteriów wyboru trzech wskaźników (LT, SC, OEE) do monitorowania w adaptacyjnym systemie sterowania produkcją? Czy analiza obejmowała również inne potencjalne wskaźniki, które mogłyby lepiej odzwierciedlać efektywność procesu w kontekście transformacji cyfrowej badanej firmy?

Pytanie 6. Jaki był cel wyznaczenia zarówno ścieżki optymistycznej, jak i pesymistycznej realizacji procesu? W jaki sposób analiza tych dwóch skrajnych wariantów przyczynia się do lepszego zrozumienia wpływu zmienności procesowej na jakość oraz do skuteczniejszego wspomagania decyzji zarządczych?

Uwaga 9. W opisie budowy modelu decyzyjnego (punkt 4.2.5, krok IV, s. 75) brakuje jednoznacznego uzasadnienia wyboru konkretnych metod regresyjnych i heurystycznych do jego konstrukcji. Nie wskazano także, dlaczego spośród wielu dostępnych technik regresyjnych wybrano właśnie regresję liniową, wieloraką oraz drzewa CART. Ponadto, opis bazy wiedzy sugeruje jej istotną rolę w modelu, jednak nie podano, w jaki sposób została ona zweryfikowana, aktualizowana oraz czy przewidziano mechanizmy jej adaptacji do zmieniających się warunków produkcyjnych.

W rozdziale **piątym** opisano sposób wdrożenia systemu do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusów wodomierza w przedsiębiorstwie FAS. Rozdział podzielono na dwa podrozdziały. W pierwszym z nich przedstawiono sposób rozbudowy infrastruktury linii produkcji korpusu wodomierza o elementy umożliwiające jej cyfryzację, natomiast w drugim podrozdziale przedstawiono oprogramowanie modelu decyzyjnego do adaptacyjnego sterowania produkcją korpusu wodomierza.

Uwaga 10. Cały rozdział charakteryzuje się dość ogólnym ujęciem tematu. Autor przedstawia kolejne etapy rozbudowy infrastruktury o elementy umożliwiające cyfryzację analizowanego projektu, jednakże opis ten pozostaje na wysokim poziomie ogólności, bez uwzględnienia kluczowych szczegółów technicznych. Opisane zostały komponenty systemu, ale brakuje informacji o przeprowadzonych testach, wynikach wdrożenia oraz ewentualnych problemach napotkanych podczas integracji i ich rozwiązaniach. Wskazano, że w systemie wykorzystywane są „zaawansowane metody wspomagania

decyzji, w tym sztuczna inteligencja”, ale nie sprecyzowano, jakie konkretne algorytmy czy modele AI zostały użyte oraz w jakich aspektach procesu produkcji przynoszą one korzyści. Kilukrotnie wspomniano o integracji MES z systemem sterowania produkcją oraz integracji MES z maszynami, ale brakuje bardziej strukturalnego ujęcia, jakie konkretne moduły zostały połączone i w jaki sposób poprawia to działanie całego procesu.

Pytanie 7. Jak dokładnie moduły systemu MES zostały zintegrowane z systemem sterowania produkcją oraz z maszynami? Jak ta integracja wpływa na efektywność i optymalizację procesów?

Pytanie 8. Czy podczas integracji systemu napotkano istotne trudności? Jeśli tak to jakie działania podjęto w celu ich rozwiązania? Jakie były kluczowe wskaźniki oceny skuteczności wdrożenia systemu?

Rozdział **szósty** przedstawia opis oraz wyniki przeprowadzonej walidacji opracowanego systemu adaptacyjnego sterowania produkcją korpusu wodomierza, opartej na badaniach i analizach wykonanych w badanym systemie produkcyjnym. Zastosowanie metody mapowania strumienia wartości (VSM) umożliwiło identyfikację kluczowych obszarów wymagających optymalizacji, natomiast przeprowadzone testy funkcjonalności i użyteczności systemu potwierdziły jego pozytywny wpływ na efektywność procesów produkcyjnych. Istotna redukcja poziomu brakowości oraz zwiększenie stabilności procesu wskazują na skuteczność wdrożonych rozwiązań. Ponadto, analiza wskaźnika OEE dostarcza empirycznych dowodów na wzrost efektywności wykorzystania zasobów produkcyjnych. Całościowe podejście do walidacji oraz przedstawiona interpretacja uzyskanych wyników podkreślają znaczący wkład w rozwój nowoczesnych metod sterowania procesami produkcyjnymi.

Ostatni, **siódmy** rozdział pracy, zawiera jej podsumowanie, wnioski końcowe oraz zarys kierunków dalszych prac nad rozwojem adaptacyjnego systemu sterowania procesem produkcji opartego na autonomicznych metodach wspomagania decyzji.

III. OCENA METODOLOGICZNA I METODYCZNA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ I WNIOSEK KOŃCOWY

Na podstawie przeprowadzonej analizy w rozprawie doktorskiej i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie. W mojej ocenie rozprawa ma charakter interdyscyplinarny i nowatorski dzięki opracowaniu autorskiego modelu adaptacyjnego systemu sterowania procesem produkcji opartego na autonomicznych metodach wspomagania decyzji. Stwierdzam, że Pan mgr inż. Artur Meller potrafi definiować, realizować zaplanowane zadania badawcze oraz analizować uzyskane wyniki, co potwierdza jego właściwe przygotowanie do samodzielnego prowadzenia prac naukowych. Za oryginalne i ważne pod względem naukowym oraz użytkowym rezultaty badań uzyskane przez Doktoranta uznaję:

- Opracowanie i weryfikację metodyki adaptacyjnego sterowania procesem produkcji opartego na wskaźnikach KPI takich jak OEE, LT i S.C.
- Opracowanie i weryfikację modelu hierarchicznej struktury wskaźników wspomagających proces sterowania produkcją na różnych poziomach zarządzania;
- Opracowanie i weryfikację modelu decyzyjnego do adaptacyjnego sterowania procesem produkcji i oceny jakości procesu oraz wyrobu;
- Wdrożenie adaptacyjnego systemu sterowania wybranym procesem produkcji z zastosowaniem technologii cyfrowych w przedsiębiorstwie FAS,

Stwierdzam, że zadania badawcze, które podjął Autor rozprawy doktorskiej uzupełniają oraz poszerzają wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i inżynieria produkcji. Przytoczone przeze mnie uwagi w niniejszej recenzji mają charakter dyskusyjny i powinny stać się jedynie inspiracje i zachęcić Autora do prowadzenia dalszych badań.

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona do recenzji **praca doktorska Pana mgr inż. Artura Meller**a pt. **„System adaptacyjnego sterowania wybranym procesem produkcji z zastosowaniem technologii cyfrowych w średniej wielkości przedsiębiorstwie metalowym”** stanowi oryginalną pracę mieszczącą się w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna (dawniej Inżynieria Produkcji) i spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (ustawa z dnia 14 marca 2003 r. wraz z późniejszymi zmianami, a także ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art.185.). **Tym samym uznaję, że praca może być przedmiotem publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.**



Prof. dr hab. inż. Anna Burduk