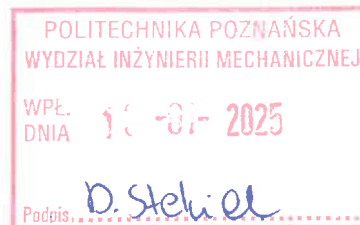


dr hab. inż. Sławomir Kłos, prof. UZ
Instytut Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytet Zielonogórski
Ul. Szafrana 4
65-516 Zielona Góra

Zielona Góra, 07.01.2026 r.



Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Huberta Kędziory pt.:

” Inteligentny system nadzorowania zautomatyzowanego procesu technologicznego konfekcjonowania wyrobów”

Dyscyplina naukowa: Inżynieria mechaniczna.

Recenzja została wykonana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej z dnia 01.12.2025 nr 9/III/11/2025.

1. Obszar problemowy rozprawy

Problematyka pracy obejmuje zagadnienia dotyczące budowy systemu nadzorowania procesu technologicznego konfekcjonowania wyrobów w wybranym przedsiębiorstwie produkcyjnym branży spożywczej. Głównym celem recenzowanej rozprawy było zaprojektowanie i implementacja inteligentnego systemu nadzorowania procesu konfekcjonowania w oparciu o analizę danych zbieranych z czujników wykorzystując metody sztucznej inteligencji dla potrzeb poprawy wskaźników jakościowych i wydajnościowych i wsparcia operatorów w podejmowaniu decyzji operacyjnych. Monitorowanie przebiegu procesów produkcyjnych jest kluczowym czynnikiem umożliwiającym nadzór i kontrolę jakości w przypadku produkcji powtarzalnej. Problematyka związana z automatyzacją identyfikacji odchyleń od zakładanych parametrów jakościowych w procesie wytwarzania jest bardzo istotna zarówno w kontekście zdobywania nowej wiedzy dotyczącej metod zbierania i przetwarzania danych produkcyjnych, jak również ze względów praktycznych ze względu na efektywność procesów wytwarzania. Zaproponowany przez Doktoranta system inteligentnego monitorowania procesu konfekcjonowania, umożliwia efektywne wspomaganie decyzji operacyjnych w celu poprawy jego wskaźników jakościowych i wydajnościowych. 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 metod sztucznej

inteligencji do wspomagania nadzoru procesów konfekcjonowania w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Badania przedstawione w recenzowanej pracy są istotne dla rozwoju metod i narzędzi związanych z analizą przebiegu procesów produkcyjnych w celu poprawy efektywności, jakości i redukcji kosztów wytwarzania szczególnie w kontekście rozwoju koncepcji Przemysł 4.0 i 5.0.

2. Kompozycja i treść rozprawy

Opiniowana praca liczy 162 strony i składa się ze spisu treści, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz 6 rozdziałów. Tekst pracy został poprzedzony spisem najważniejszych skrótów i oznaczeń co ułatwiło analizę treści pracy. Do pracy dołączono załączniki (głównie dokumentację techniczną i świadectwa legalizacji narzędzi i przyrządów pomiarowych). Ponadto na końcu pracy zamieszczono spis rysunków, tabel załączników oraz bibliografię. Załączony spis cytowanej literatury obejmuje 149 pozycji. Spis literatury nie zawiera publikacji Doktoranta. Literatura została dobrana właściwie i poprawnie zacytowana w treści pracy. Należy stwierdzić, że przytoczona literatura jest bardzo aktualna i ściśle związana z obszarem badań, który obejmuje dysertacja.

We wstępie Doktorant przedstawia genezę pracy oraz formułuje problem badawczy i cel pracy. Problem badawczy został sformułowany w następujący sposób:

„... jak zaprojektować i wdrożyć inteligentny system nadzorowania procesu konfekcjonowania, który integruje różne źródła danych, wykorzystuje metody analityczne i sztucznej inteligencji oraz wspiera operatorów w podejmowaniu decyzji w czasie rzeczywistym?”

W celu doprecyzowania problematyki badań, w pracy sformułowano 3 pytania badawcze:

1. *„Jakie czynniki determinują efektywność i stabilność procesu konfekcjonowania oraz charakterystyki jakościowe wyrobów?”*
2. *Jakie dane procesowe są kluczowe dla skutecznego identyfikowania niezgodności w zautomatyzowanym procesie konfekcjonowania?*
3. *Jakie narzędzia i metody będą w sposób skuteczny wspierać nadzorowanie parametrów procesu konfekcjonowania?”*

Problem badawczy został sformułowany w przejrzysty sposób, a dodatkowe pytania badawcze pozwalają na wstępną ocenę zakresu badań, które powinny zostać przeprowadzone. Pewną wątpliwość może nasuwać ogólny charakter sformułowanego problemu badawczego. Cała praca dotyczy procesów konfekcjonowania w przedsiębiorstwie produkcyjnym branży spożywczej. Jednak w innych branżach, procesy

konfekcjonowania mają swoją specyfikę. Doktorant sam zauważa w rozdziale 2 opisując konfekcjonowanie w branży farmaceutycznej, że kwestia dawkowania jest kluczowa. Dochodzą do tego operacje: kompletacja z ulotką, polegająca na maszynowym wkładaniu blistrów oraz ulotki informacyjnej do każdego kartonika jednostkowego lub serializacja polegająca na nadawaniu unikalnych numerów seryjnych na każdym opakowaniu leku (wymóg prawny w UE) w celu zabezpieczenia przed fałszowaniem i dla potrzeb identyfikowalności każdej partii wyrobów. W branży technicznej i przemysłowej konfekcjonowanie wiązek okablowania dla branży samochodowej wymaga specyficznej kontroli i zabezpieczania każdej wiązki. Można zatem sformułować następujące pierwsze pytanie do opiniowanej pracy doktorskiej:

1. Czy zaproponowany w pracy doktorskiej inteligentny system nadzorowania zautomatyzowanego procesu technologicznego konfekcjonowania wyrobów można zaimplementować w dowolnej branży, czy też ze względu na pewne ograniczenia może być stosowany tylko w wybranych branżach?

W rozdziale pierwszym Doktorant sformułował również cel pracy jako:

„... opracowanie koncepcji oraz weryfikacja w warunkach przemysłowych inteligentnego systemu nadzorowania zautomatyzowanego procesu konfekcjonowania wyrobów, który wykorzystuje metody zaawansowanej analityki danych i sztucznej inteligencji do:

- *wczesnego wykrywania nieprawidłowości w przebiegu procesu,*
- *bieżącej oceny krytycznych charakterystyk jakościowych wyrobu,*
- *wspierania procesu decyzyjnego operatorów i personelu technicznego. „*

Ponadto sformułowano 6 celów szczegółowych, które w dobrze odzwierciedlają zarówno metodologię prowadzonych badań jak i zadania rozwojowe.

Rozdział drugi obejmuje wyniki badań literaturowych. Analiza literatury obejmuje: architekturę, funkcje, systemy i technologie nadzorowania procesów produkcyjnych. Ta część analizy literaturowej jest z pewnością istotna z punktu widzenia identyfikacji źródeł danych potrzebnych do funkcjonowania systemu nadzoru. Ponadto analiza literatury umożliwiła specyfikację kluczowych wskaźników efektywności (Tabela 2.3) dla inteligentnego nadzorowania procesów. Doktorant dokonał również charakterystyki systemów konfekcjonowania ze względu na charakter i zastosowanie oraz dla branży: spożywczej, farmaceutycznej, e-commerce oraz przemysłu ciężkiego. Na podstawie analizy literaturowej dokonano oceny stanu wiedzy i określono kluczowe wyzwania dotyczące przepływu produkcji i wymagań jakościowych w procesie konfekcjonowania.

Dokonano również przeglądu metod oraz narzędzi stosowanych w nadzorowaniu procesów konfekcjonowania.

W rozdziale 3 przedstawiono projekt inteligentnego systemu nadzorowania procesu konfekcjonowania, który został zaimplementowany w zakładzie produkcyjnym Foodmakers Sp. z o.o. Podstawą projektu systemu był schemat przebiegu procesu produkcyjno-logistycznego w przedsiębiorstwie oraz schemat organizacji przepływu produkcji w hali produkcyjnej. Dla potrzeb oceny stanu wyjściowego linii produkcyjnej wybrano trzy kluczowe operacje technologiczne o szczególnym znaczeniu dla jakości i stabilności procesu konfekcjonowania: naważanie składników produktu, etykietowanie i pakowanie. Ocena obejmowała czynniki techniczne, organizacyjne i jakościowe, gdzie Doktorant posłużył się wskaźnikiem DPMO analizując lata 2021 i 2022 oraz wskaźnikiem OEE (jednak ze względu na brak danych pełna ocena przy użyciu wskaźnika OEE była niemożliwa). Na podstawie identyfikacji niezgodności zaproponowano koncepcję systemu nadzoru. Koncepcja obejmuje system złożony z pięciu modułów: nadzorowania masy porcji, nadzorowania „nieszczelności I” i „nieszczelności II”, nadzorowania etykiet i ich treści, nadzorowania odrzutu wyrobów niezgodnych. Koncepcja systemu została opisana w dosyć ogólny sposób. Nie przedstawiono charakterystyki technicznej docelowego systemu konfekcjonowania (np. prędkość pracy linii, wydajność na godzinę, liczba przebrojeń, etc.). Uzasadnienie wyboru systemów kontrolno-pomiarowych zaproponowano w sposób arbitralny nie poparty analizą porównawczą różnych systemów lub konkretnych urządzeń (np. wybór wag platformowych, brak parametrów technicznych, zakresów pomiarowych, wymaganej dokładności, etc.). Dla potrzeb wykrywania nieszczelności opakowań „...za najlepsze rozwiązanie, przyjęte do wdrożenia, uznano system wizyjny oparty na metodach głębokiego uczenia ...”, ze względu na przewagę nad tradycyjnymi metodami wykrywania nieszczelności. Predykcja „nieszczelności II” oparta została na analizie parametrów procesowych. Analiza zgodności operacji etykietowania nie została opisana. Z przedstawionego schematu przedstawiającego warstwową architekturę inteligentnego systemu nadzorowania procesu konfekcjonowania wyrobów wynika, że analiza zgodności operacji etykietowania będzie oparta również na analizie obrazu. W przedstawionej koncepcji zabrakło jednak szczegółów technicznych takich jak: specyfikacja parametrów kamer przemysłowych, zakres pracy czujników planowanych do instalacji na linii do konfekcjonowania i charakterystyki systemu sterowania linią produkcyjną.

W rozdziale 4 opisano budowę inteligentnego systemu nadzorowania procesu konfekcjonowania. Jako pierwszy opisany został moduł nadzorowania masy porcji. Na rysunku 4.1 przedstawiono stanowisko do pomiaru wagi z panelem operatorskim HMI. Z analizy danych pokazanych na rysunku 4.5 wynika, że system pomiaru masy poszczególnych wyrobów obejmuje kontrolę 100% produkcji (niestety nigdzie w pracy nie zostało to wyraźnie zaznaczone). Pomiary wykonywane były z różną częstotliwością od 3 do nawet 40 sekund. Jednym z istotnych parametrów w procesie ważenia jest czas stabilizacji wagi elektronicznej, czyli okres, jaki upływa od momentu położenia ładunku na szalce do momentu, w którym wynik pomiaru przestaje się wahać i zostaje uznany przez urządzenie za wiarygodny. W zależności od precyzji pomiaru masy, czas ten może wahać się od dziesiątych części sekundy nawet do kilku sekund. System naważania opisany w pracy działa z dokładnością do 1g (nie jest to duża dokładność). Można zadać następujące pytanie dotyczące parametrów technicznych modułu nadzorowania masy porcji:

2. Jaki jest czas stabilizacji platformy do pomiaru masy wyrobów w zastosowanym module nadzoru naważania?

Jest to istotne ponieważ, długi czas stabilizacji systemu naważania może determinować wydajność systemu.

W dalszej części tego rozdziału Doktorant opisał budowę systemu identyfikacji nieszczelności I i II. Dla potrzeb klasyfikacji obrazów wykorzystano algorytmy oparte na konwolucyjnych sieciach neuronowych. W procesie uczenia sztucznych sieci neuronowych wykorzystano środowisko dostarczone przez firmę SICK AG. Opisano stanowisko do analizy obrazów oraz proces uczenia systemu. Doktorant nie określił jednak hiperparametrów warstwy konwolucyjnej (architektura: liczba filtrów, kroki i wypełnienie) i warstwy łączącej (rozmiar i typ poolingu oraz stride). Nasuwa się więc następujące pytanie do tego obszaru dysertacji:

3. W jaki sposób dobrano parametry konfiguracyjne (hiperparametry) dla konwolucyjnej sieci neuronowej, zastosowanej do klasyfikacji obrazów w module identyfikacji „nieszczelności I”?

Przedstawiony w dalszej części tego rozdziału proces uczenia konwolucyjnych sieci neuronowych i implementacji systemu identyfikacji „nieszczelności I” został bardzo dobrze opisany.

Metoda predykcji występowania nieszczelności przy określonych parametrach technologicznych procesu została opracowana w oparciu o badania eksperymentalne

polegające na analizie jakości wykonania wyrobów przy różnych wartościach: temperatury zgrzewania, ciśnienia w komorze pakującej, czasu cyklu, wydajności linii, siły docisku elementów zgrzewających oraz naciągu folii. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych wyznaczono zakresy parametrów krytycznych, określające obszar stabilnej pracy dla operacji pakowania: temperatura zgrzewania od 162,8 do 163,2 °C, ciśnienie bezwzględne w komorze pakującej od 30 do 60 mbar, wydajność linii od 0 do 30 szt./min. Na podstawie prowadzonych badań Doktorant opracował dodatkowy moduł wsparcia diagnostycznego. Algorytm działania tego modułu bazuje na wykryciu bezpośredniego wpływu niestabilności temperaturowej (wynikającej np. z uszkodzenia elementów grzejnych) na szczelność opakowań.

Ostatni moduł opisany w tej części dysertacji obejmował nadzór nad procesem etykietowaniem wyrobów. Do analizy napisów na etykiecie moduł wykorzystuje system OCR, poprawność QR-kodów jest analizowana przez narzędzie 2D Code Analysis natomiast obecności i poprawności położenia nadrukowanej treści jest identyfikowane przez algorytm Blob Finder. Doktorant jasno opisał zasadę działania systemu nadzorowania jakości etykiet. Brakuje jednak określenia parametrów konfiguracyjnych dla systemu akwizycji danych.

4. W jaki sposób dobrano metryki jakości i parametry konfiguracyjne dla systemu OCR zastosowanego w module nadzoru operacji etykietowania?

W rozdziale piątym przeprowadzono walidację i ocenę działania opracowanego systemu. Analiza obejmowała ocenę wskaźników DPMO, OEE oraz wydajności linii do konfekcjonowania, przed i po wdrożeniu systemu nadzoru. Wartości rocznych wskaźników DPMO dla masy, opakowania oraz ogólne przedstawiono w tabeli 5.2 dla okresu 2021-2024. Odnotowano wyraźny spadek wartości wskaźników DPMO po implementacji systemu inteligentnego nadzoru, szczególnie w odniesieniu do roku 2022. Wyniki walidacji wykazały, że w wyniku wdrożenia systemu sumaryczna wartość przeważeń spadła o 50% w latach 2023-2024 w porównaniu z okresem 2021-2022. W wyniku wdrożenia systemu predykcji nieszczelności opakowań firma uzyskała duże oszczędności redukując liczbę badań niszczących. W rozdziale tym przedstawiono również analizę SWOT wdrożonego systemu nadzorowania procesu konfekcjonowania. Z treści rozdziału dotyczącego walidacji wynika, że wdrożenie inteligentnego systemu nadzoru systemu konfekcjonowania w wybranym przedsiębiorstwie zakończyło się sukcesem. Ponieważ opiniowana praca doktorska ma charakter wdrożeniowy brakuje w

podsumowaniu analizy opłacalności wdrożenia tego projektu. Można więc sformułować następujące pytanie:

5. Czy możliwe jest oszacowanie opłacalności realizacji projektu zaprojektowania i wdrożenia inteligentnego systemu nadzoru konfekcjonowania w wybranym przedsiębiorstwie produkcyjnym branży spożywczej: ROI, NPV, okres zwrotu.

W ostatnim rozdziale podsumowano wyniki badań i przedstawiono najważniejsze wyniki badań oraz uzyskane rezultaty zarówno w obszarze poznawczym jak i utylitarnym. Opisano możliwe kierunki dalszych badań.

Podsumowując kompozycję i treść ocenianej dysertacji należy podkreślić, że praca została napisana w bardzo zrozumiały sposób, a załączone zdjęcia, rysunki i tabele były pomocne w analizie i weryfikacji prowadzonych badań. Struktura pracy oraz język są generalnie bez zarzutu.

3. Oryginalne osiągnięcia

Głównym celem opiniowanej pracy było” „...opracowanie koncepcji oraz weryfikacja w warunkach przemysłowych inteligentnego systemu nadzorowania zautomatyzowanego procesu konfekcjonowania wyrobów, który wykorzystuje metody zaawansowanej analityki danych i sztucznej inteligencji do: wczesnego wykrywania nieprawidłowości w przebiegu procesu, bieżącej oceny krytycznych charakterystyk jakościowych wyrobu, wspierania procesu decyzyjnego operatorów i personelu technicznego ...” 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:

- opracowanie koncepcji modułowego systemu nadzorowania procesu konfekcjonowania wyrobów (rysunek 3.6) obejmującą cztery warstwy: akwizycji danych, analityczną, decyzyjną i wizualizacyjną,
- opracowanie modelu inspekcji wizyjnej bazującego na konwolucyjnych sieciach neuronowych,
- opracowania modelu predykcyjnego analizy nieszczelności opakowań opartego na regresji logistycznej,

- weryfikacja modelu predykcji w oparciu o badania eksperymentalne dla zidentyfikowanych parametrów krytycznych: temperatura zgrzewania, ciśnienie w komorze pakującej i wydajność linii,
- weryfikacja modelu regresji logistycznej (dokładność klasyfikacji na poziomie 81,5%, czułość 75%, swoistość 86,7%, precyzja 81,8%, wartość pola pod krzywą ROC (AUC) 0,85),
- weryfikacja i walidacja klasyfikatora wizyjnego opartego na konwolucyjnych sieciach neuronowych,
- wdrożenie systemu do praktyki produkcyjnej, potwierdzające wdrożeniowy charakter opiniowanej pracy doktorskiej.

Doktorant na podstawie wyników prowadzonych badań uzyskał pozytywne odpowiedzi na wszystkie trzy sformułowane pytania badawcze.

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 wspomagania decyzji dotyczących sterowania przepływem produkcji. Przedstawione rezultaty potwierdzają realizację postawionego w rozprawie celu badawczego i wskazują, że Doktorant potrafi definiować i samodzielnie realizować zaplanowany program badań.

4. Uwagi do pracy doktorskiej

Analiza opiniowanej pracy doktorskiej skłania do uwag natury ogólnej i szczegółowej. Część pytań do pracy doktorskiej zostało sformułowane już we wcześniejszej części recenzji, dotyczącej kompozycji i treści opiniowanej rozprawy doktorskiej.

Uwagi ogólne:

Doktorant definiując problem badawczy, zaznaczył, że opracowany system będzie wspierał pracę operatorów „... w podejmowaniu decyzji w czasie rzeczywistym ...”. Przedstawione wyniki badań pokazują, że zaprojektowany system będzie w sposób automatyczny odrzucał wyroby zakwalifikowane jako niezgodne. Czas upływający pomiędzy zejściem z linii do konfekcjonowania kolejnych wyrobów wynosi od kilku do kilkunastu sekund. Można zatem sformułować następujące pytanie:

6. Jakie decyzje operacyjne w czasie rzeczywistym i w jakim zakresie będzie wspomagał opracowany inteligentny system nadzorowania zautomatyzowanego procesu technologicznego konfekcjonowania wyrobów?

Innym problemem, który nie został poruszony w pracy jest kwestia przebrojeń linii do konfekcjonowania oraz ich wpływu na działanie systemu nadzoru”

7. Czy przezbijanie linii do konfekcjonowania różnych partii wyrobów ma wpływ na funkcjonalność inteligentnego systemu nadzoru, a jeśli tak to czy istnieje konieczność adaptacji systemu przy wprowadzaniu nowego wyrobu do produkcji?

Uwagi szczegółowe

1. Strona 28 – „ Nakład to zużyte zasoby (czas pracy, energia, materiały, koszty)” - brak kropki na końcu zdania.
2. Strona 48 – skróty BRC i IFS nie zostały wyjaśnione, nie ma ich również na wykazie skrótów i oznaczeń.
3. Strona 68 i 68 - rysunki 4.3 i 4.4 są nieczytelne.
4. Strona 71 – rysunek 4.6 – brak oznaczeń i opisu poszczególnych zdjęć.
5. Strona 92 – dane pokazane na rysunku 4.28 są nieczytelne.
6. Strona 114, wiersz 2 – powtórzenie słowa „pakującej”.
7. W pracy brakuje powołania na autorskie lub współautorskie publikacje Doktoranta.

5. Konkluzja

Przytoczone uwagi krytyczne nie podważają ogólnie pozytywnej oceny opiniowanej pracy doktorskiej. Stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie mgr inż. Huberta Kędziory zostały zrealizowany oryginalny cel badawczy, polegający na opracowaniu koncepcji oraz weryfikacji w warunkach przemysłowych inteligentnego systemu nadzorowania zautomatyzowanego procesu konfekcjonowania wyrobów, wykorzystującego metody zaawansowanej analityki danych i sztucznej inteligencji do: wczesnego wykrywania nieprawidłowości w przebiegu procesu, bieżącej oceny krytycznych charakterystyk jakościowych wyrobu, wspierania procesu decyzyjnego operatorów i personelu technicznego. Doktorant zaprojektował i przeprowadził badania umożliwiające wdrożenie nowatorskiego systemu nadzoru procesu konfekcjonowania do praktyki produkcyjnej w

przedsiębiorstwie branży spożywczej, co należy uznać za ważny wkład w prace rozwojowe.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa wnosi nowy wkład w rozwój metod i modeli umożliwiających zarządzania przepływem produkcji i wspomaganie decyzji dotyczących efektywności procesów produkcyjnych. Doktorant wykazał się dobrą znajomością metod i narzędzi związanych analizą efektywności procesów konfekcjonowania, akwizycji i analizy danych produkcyjnych w oparciu model regresji logistycznej i metody oparte na konwolucyjnych sieciach neuronowych, dobrą znajomością metod związanych z analizą obrazów oraz ich wykorzystaniem do budowy efektywnych systemów wspomaganie decyzji w obszarze zarządzania przepływem produkcji. Doktorant wykazał, że potrafi prowadzić samodzielnie, odpowiedzialne badania naukowe.

Przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Huberta Kędziory pt.: *"Inteligentny system nadzorowania zautomatyzowanego procesu technologicznego konfekcjonowania wyrobów"* **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.**

