

dnia 15.12.2020. PK/UM 13017/713/2020

Prof. dr hab. inż. Józef Gawlik

Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny

Katedra Inżynierii Procesów Produkcyjnych

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Andrzeja Tuchołki nt.: „**Metodyka oceny konstrukcji elementów maszyn z użyciem modeli neuronowych i antywzorców**”

Promotor: dr hab. inż. Maciej Majewski, prof. PK

Podstawa opracowania: pismo z dnia 13 listopada 2020 r.

Pani Rektor dr. hab. inż. Danuty Zawadzkiej, prof. Politechniki Koszalińskiej

**1. Zakres i charakterystyka rozprawy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 185 stron numerowanych oraz na początku bez numeracji – w tym: 3 str. spisu treści, 2 str. spisu rysunków, 1 str. wykazu listingów, 1 str. spisu tabel, 3 str. wprowadzenia. W zakresie stron numerowanych praca składa się z 8 rozdziałów (171 str.), 141 pozycji bibliografii (s.172 – s.181), streszczenia w j. polskim (s.182 – s.183) i streszczenia w j. angielskim (s.184 – s.185).

**We wprowadzeniu** Autor przedstawia w skrócie charakterystykę pracy zwracając uwagę na istotne czynniki, które powinny być brane pod uwagę przy opisie konstrukcji. W szczególności stwierdza, że: „... opis konstrukcji mechanicznych z użyciem jedynie technik wektorowych pomija informacje o funkcji poszczególnych części konstrukcji oraz tworzy abstrakcyjną i często niepraktyczną strukturę i format zapisu. Wywodzące się z technik rysunku technicznego metody symbolicznej reprezentacji cech konstrukcyjnych w formie zapisów wektorowych nie pozwalają na zautomatyzowaną analizę cech konstrukcji”. Te sformułowania to w istocie **myśl przewodnia** tematu rozprawy doktorskiej.

Doktorant zauważa też, że: „... wydaje się zasadnym oczekiwanie wystąpienia znacznych optymalizacji w procesie projektowania maszyn: redukcji czasu, kosztu oraz zwiększenia jakości projektowanych elementów maszyn”.

Uwagi:

- o optymalizacji mówimy w odniesieniu do przyjętych kryteriów, a pojęcie „znacznych optymalizacji” jest nieprecyzyjne, potoczne;
- zamiast „... adopcji nowatorskich rozwiązań...” powinno być: adaptacji nowatorskich rozwiązań.

Autor rozprawy stwierdza także, że „... główną zaletą płynącą z użycia antywzorców... jest redukcja ograniczeń przestrzeni możliwych rozwiązań konstrukcyjnych oraz możliwość pracy w oparciu o niekompletne dane”.

Biorąc pod uwagę analizę problemu przedstawioną we wstępie, sformułowany temat rozprawy doktorskiej uznaję za ważny dla rozwoju zautomatyzowania procesów projektowania elementów maszyn i urządzeń technologicznych, z uwzględnieniem norm oraz przyjętych kryteriów optymalizacyjnych.

**W analizie literatury** – rozdział 1 (s.1 – s.14) Doktorant dokonał w sposób usystematyzowany przedstawienia zagadnień dotyczących:

- pierwszych prac z zakresu komunikacji człowiek – maszyna i zastosowania antywzorców do oceny bezpieczeństwa technologicznego poleceń (przykład - rys.1.1);
- analizy zasadności i możliwości zastosowania antywzorców do wspomagania projektowania konstrukcji mechanicznych uznając, że głównym czynnikiem uzasadniającym ich wprowadzenie „... jest ich błędny charakter oraz wpływ na jakość konstrukcji”;



- rozwoju wielofunkcyjnej oceny jakości urządzeń technologicznych z zastosowaniem modeli numerycznych i wciąż niedostatecznego rozwoju nowatorskich procesów projektowania maszyn.

Uwaga: w podpisie pod rys.1.1.-pkt b. powinno być górne ograniczenia siły skrawania zamiast „...siły obróbki”.

Doktorant przedstawił zwięzłą charakterystykę komputerowych systemów CAD/CAM wspomagania projektowania konstrukcji mechanicznych i procesów wytwórczych oraz stosowane formaty zapisu danych (np. *Constructive Solid Geometry – CSG; Data eXchange Format – DXF; Standard for the Exchange of Product – STEP; Initial Graphics Exchange Specification – IGES*).

Następnie dokonał przeglądu i analizy metod numerycznych rozbudowanych o wnioskowanie rozmyte i sztuczne sieci neuronowe. Postęp w tym zakresie znacząco wpłynął na ilość dostępnych modeli obliczeniowych – w tym także modeli opartych o niekompletne dane, co w efekcie umożliwia bardziej precyzyjne rozpoznawanie struktur za pomocą programów komputerowych. Podobnie zostało opracowanych szereg modeli do identyfikacji czynników wpływających na jakość funkcjonowania elementów maszyn w trakcie ich eksploatacji.

Doktorant zwraca także uwagę na problematykę i znaczenie wnioskowania nt. przyczyn zachowania urządzeń mechanicznych oraz na „... symboliczne modele arytmetyczne oraz algorytmiczne pozwalające na zautomatyzowaną analizę geometrii i właściwości kinetycznych obiektów fizycznych”.

W świetle tej analizy odnosi się również do tematyki związanej z zastosowaniem antywzorców, jako uniwersalnej, interdyscyplinarnej koncepcji do wprowadzenia w różnych dziedzinach wiedzy. Badania nad antywzorcami prowadzone na Politechnice Koszalińskiej w Katedrze Systemów Technicznych i Informatycznych wskazują na duże możliwości ich zastosowania między innymi do eliminacji błędnych rozwiązań projektowych w konstrukcjach maszyn i urządzeń mechanicznych.

**Zaprezentowana przez Doktoranta analiza literatury została przedstawiona w sposób merytoryczny, zwięzły i konsekwentny w odniesieniu do tematu rozprawy. Potwierdza to bardzo dobre przygotowanie i profesjonalizm mgr inż. Andrzeja Tuchołki do realizacji badań i pracy naukowej.**

**W rozdziale 2 (s.15 – s.28) zostały określone hipotezy badawcze oraz cel, tezy i zakres pracy, wywodzące się z badań w Katedrze Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych w ramach projektu NCN – UMO-2012/05/BST8/02802. Oryginalną, nowatorską cechą rozwiązań zaproponowanych przez Autora rozprawy jest uwzględnienie w realizacji procesu projektowego niepewności i niepowtarzalności zadań i informacji.**

Praca doktorska mgr. A. Tuchołki lokuje się w obszarze inteligentnych metod wspomagania procesów projektowania. Doktorant bazując na analizie dostępnych publikacji i rozwiązań projektowych stwierdził, że: „... widoczna staje się potrzeba rozszerzenia możliwości analizy struktury konstrukcji mechanicznych z wykorzystaniem nowatorskich technik informacyjnych (np. uczenia maszynowego), a jednym z kluczowych problemów jest przewyższenie braków modeli symulacyjnych pozwalających na pracę z niekompletnymi informacjami”. Jako przykład przedstawił niekompletne wizualizacje oraz zwymiarowania korpusu przekładni ślimakowej (rys.2.1 i rys.2.2).

Przytoczone stwierdzenie Doktoranta w pełni uzasadnia ważność podjętej rozprawy, a wzmacnia je również fakt, że: „ temat pracy został dobrany tak, aby wyniki prowadzonych badań mogły być wykorzystane w możliwie szerokim zakresie zastosowań naukowych, jak



i przemysłowych”. Schemat podjętej pracy badawczej został przedstawiony na rys.2.3 oraz schemat oceny konstrukcji mechanicznych - rys.2.4.

Zaproponowane tezy rozprawy (s.22) są jednoznacznie sprecyzowane. Zakres pracy, zastosowane rozwiązania i oczekiwane rezultaty zostały zwięźle skomentowane wraz z przykładem uproszczonego zapisu symbolicznego struktury i cech referencyjnego wału wielowypustowego (rys.2.5 i listing 2.1).

**W rozdziale 3 (s.29 - s.62) – analiza teoretyczna,** Doktorant przedstawił podejmowane dotychczas działania projektantów (rys.3.1), które w efekcie prowadzą do stworzenia rysunku projektowanego elementu, wskazując na ich uwarunkowania i niedogodności (słabe strony).

Biorąc pod uwagę obecny rozwój technologii informacyjnych Doktorant wydzielił cztery grupy procesów kluczowych (rys.3.3), wpływających na jakość projektowanego elementu, obejmujące.:

- koncepcyjną pracę projektanta;
- komputerowe techniki komunikacji głosowej;
- wspieranie komputerowego projektowania maszyn;
- komputerowe techniki analityczne i audiowizualne.

Pierwszym, istotnym problemem jest zidentyfikowanie i analiza antywzorców projektowanego elementu. Przykładem są połączenia śrubowe (rys.3.4 i rys.3.5).

Uwaga: określenie „zbyt wąski lub zbyt szeroki stożek” jest raczej potoczne; powinno być: „stożek o zbyt małej lub zbyt dużej zbieżności”.

Identyfikacja kluczowych cech antywzorców zawiera kilka etapów, tj.:

- identyfikację antywzorcowych cech konstrukcji (listing 3.1);
- zdefiniowanie zakresów oraz wartości dla wielkości użytych w obliczeniach stałych i zmiennych (listing 3.2);
- opis struktury węzłów konstrukcji z antywzorcowymi cechami (listing 3.3);
- przypisanie konkretnych wartości i stworzenie antywzorca (listing 3.4).

Przykłady antywzorcowych cech wałka wielostopniowego zostały przedstawione na rys.3.6 i rys.3.7. Porównując je z poprawnie skonstruowanym wałkiem wielostopniowym można wnioskować o bezpośrednich przyczynach powstawania błędów konstrukcyjnych, wynikających np. z braku informacji o przeznaczeniu części jako elementu składowego konstrukcji.

Analizując ten aspekt Doktorant wskazał dziewięć potencjalnych przyczyn błędów konstrukcyjnych (s.39). Na przykładzie złożonej konstrukcji korpusu przekładni ślimakowej (rys.3.9) wykazał, że: „*nietrywialne formy opisu w formie rysunkowej znacznie utrudniają manualne wykrycie błędów w konstrukcji poprzez analizę jej rysunkowego opisu*” (s.40).

Uwaga: to zdanie, zawierające trafne spostrzeżenie, ma jednak cechy wyrażenia tautologicznego.

Można by się tego ustrzec formułując je: „*nietrywialne formy opisu rysunku znacznie utrudniają manualne wykrycie błędów w analizowanej konstrukcji.*”

Mgr A. Tuchołka podjął dyskusję zakresu znaczeniowego pojęcia antywzorca (s.40 – s.42) wykazując między innymi, że:

- „*...antywzorze przy zmieniającej się dokładności analizy ich efektów dają mieszane rezultaty*”, a z kolei „*...elementy wzorcowe charakteryzują się dominacją czynników pozytywnych i minimalną ilością negatywnych, wynikających z zastosowanego rozwiązania*”;
- „*...w ograniczonych zakresach oceny jakości antywzorze mogą wydawać się rozwiązaniami jednoznacznie prawidłowymi*”.



Sformułowanie, że: „...antywzorce jako powtarzalne procesy, struktury, modele, szablony, lub schematy, które pomimo powierzchownej prawidłowości, powodują istotne negatywne konsekwencje, niewystępujące w adekwatnym, w pełni poprawnym rozwiązaniu” oddaje, wg mnie, istotę i celowość ich wprowadzenia.

Zasadniczym problemem dla uogólnionego rozwiązania tego zagadnienia jest znalezienie pewnych wspólnych cech konstrukcji. Ten problem podjął Autor rozprawy analizując modele klasyfikacyjne i zapisy struktury konstrukcji mechanicznych. Zaproponował model klasyfikacji „...oparty o funkcję elementu reprezentowaną przez jego leksykalną formę: konstruktorską nazwę części mechanicznej, matematyczną nazwę obiektu geometrycznego oraz fizyczną nazwę cechy obiektu elementarnego” oraz uzupełnił model klasyfikacji o cechę „...dziedziczenia kontekstu”. Interpretację tych cech rozważał na przykładach części klasy korpus i wał (korpus przekładni ślimakowej, wałek wielostopniowy).

**Analiza i wieloaspektowa dyskusja tych zagadnień oraz zaproponowane formuły porządkujące klasyfikację i opis konstrukcji potwierdzają i uzasadniają opinię o bardzo dobrym przygotowaniu przez mgr. Andrzeja Tuchołkę metodologicznej koncepcji rozprawy doktorskiej.**

Syntezę tych rozważań jest podział zaproponowanych relacji pomiędzy elementami konstrukcji (s. 56), a przykładem schematu zidentyfikowanych relacji geometrycznych (rys.3.18).

**Rozdział 4** (s.61 – s.104) zawiera opracowaną przez Doktoranta **metodę identyfikacji antywzorców** na przykładzie złożonej konstrukcji korpusu przekładni ślimakowej. Mgr A. Tuchołka skoncentrował się na określeniu kluczowych czynników, których analiza doprowadza do odnalezienia błędu i zidentyfikowania antywzorca (rys. 4.1 – rys.4.3). Metoda obejmuje 3 etapy:

- *zdefiniowanie koncepcji nieprawidłowości* – istotnym elementem jest tu wiedza konstruktorska;
- *nadpsucia poprawnego korpusu* - modyfikacja zadanej korpusowi funkcji i świadome obniżenie efektywności konstrukcji;
- *symboliczny opis antywzorcowej cechy* – stworzenie zorientowanej obiektowo reprezentacji fragmentu części mechanicznej w celu wskazania konkretnego błędu konstrukcyjnego.

Analizując metodę tworzenia antywzorców Doktorant zwraca uwagę na, moim zdaniem, bardzo istotny problem jednoznaczności opisu antywzorca dotyczącego jakości syntezy błędu, powtarzalności i jego stosowalności w różnorodnych konstrukcjach. Z tym zagadnieniem wiąże się także redukcja złożoności opisu antywzorca. Przykłady cech referencyjnych antywzorców zostały przedstawione w tab.4.1, a ich rozwinięcie i symboliczne opisy są ujęte na rys.4.4 – rys.4.20 oraz na listingu 4.1 – listingu 4.17.

Fundamentalnym problemem jest symboliczny zapis cech konstrukcji - **rozdział 5** (s.105 – s.134). Doktorant wskazał na potrzebę opracowania spójnych, rozszerzalnych struktur językowych do zapisu cech konstrukcji mechanicznych – w tym antywzorców. W tym celu opracował symboliczny, zorientowany obiektowo język KXML (jako wyjściową notację przyjął język XML), który pozwala na dekompozycję struktury konstrukcji „... w sposób ułatwiający proces normalizacji danych na potrzeby dalszych obliczeń”. Przykłady analizy konstrukcji przekładni ślimakowej są przedstawione na rys.5.1 – rys.5.3, a przykład zapisu języka KXML na listingu 5.1.

Kolejne analizy i proponowane rozwiązania dotyczą składni języka zapisu cech konstrukcji KXML. Syntetycznie schemat struktury symbolicznego zapisu konstrukcji został przedstawiony na rys.5.4, a schemat symbolicznego zapisu cech konstrukcji na rys.5.5. Te schematy wskazują na cztery główne elementy opisu, tj.:

- modele klasyfikacyjne, będące podstawą do analizy i interpretacji cech i węzłów strukturalnych konstrukcji;



- definicje cech konstrukcyjnych, będące podstawą opisu właściwości konstrukcji;
- instancje węzłów i struktury, reprezentujące dekompozycję konstrukcji na podstawie funkcji obiektu;
- instancje cech konstrukcyjnych, zawierające wartości tych cech, umożliwiające ocenę podobieństwa konstrukcji (w kontekście struktury węzłów).

Każdy z tych elementów został scharakteryzowany z podaniem przykłady zapisów w postaci listingów (listing 5.2 – listing5.13).

W syntezie rozdziału 5 Autor rozprawy przedstawił przykład możliwych zastosowań opracowanego języka symbolicznej reprezentacji cech konstrukcji w procesie interaktywnego projektowania konstrukcji mechanicznych (ry.5.9). W tej propozycji wprowadził oryginalne moduły, wykorzystujące możliwości symbolicznej reprezentacji wiedzy konstruktora, usprawniające jego pracę i dające możliwość redukcji ilości błędów, które mogą wystąpić w projekcie. Zalety opracowanego przez Doktoranta języka KXML to:

- automatyczne sugerowanie zmian w projekcie poprzez eliminowanie zidentyfikowanych błędów konstrukcyjnych;
- automatyczne proponowanie użycia wzorcowych wartości cech konstrukcyjnych obiektów elementarnych;
- rozszerzenie możliwości komputerowej analizy cech konstrukcji mechanicznych, bez eliminowania, czy też ograniczania oceny wykonywanej przez projektanta.

Oryginalne propozycje przedstawił mgr A. Tuchołka w **rozdziale 6** (s.135 – s.150) – **metoda oceny konstrukcji elementów maszyn**. Opracowana metoda bazuje na wskazaniu braku podobieństwa projektu konstrukcji do zdefiniowanej uprzednio biblioteki antywzorców. Pierwszym krokiem jest „*normalizacja struktury danych*”. Obejmuje ona cztery etapy (rys.6.1):

- normalizację opisu cech konstrukcji – format normalizacji (KXML) powinien odpowiadać formatowi bazy antywzorców;
- normalizację danych – dostosowanie formatów cech konstrukcji i metody numerycznej;
- obliczenie podobieństwa do antywzorców – określenie liczbowej wartości podobieństwa testowanej części w odniesieniu do bazy wiedzy w formie antywzorców;
- interpretację wartości podobieństwa – translacja wynikowej wartości w formę decyzyjną wskazującą istnienie nadmiernego podobieństwa do antywzorców.

Interesującą propozycją jest zastosowanie sieci neuronowych do analizy konstrukcji (rys.6.2). Ograniczenie obliczeń podobieństwa jedynie do antywzorcowego opisu konstrukcji jest podstawą wyboru cech istotnych dla analizy i optymalizacji obliczeń. Przykładami są: schemat sieci neuronowej klasyfikującej cechy konstrukcji (rys.6.3) oraz schemat sieci neuronowej klasyfikującej cechy produkcyjne.(rys.6.4).

**Należy podkreślić, że Autor rozprawy podjął dość gruntowną analizę i dyskusję możliwości klasyfikacji cech konstrukcji z użyciem wybranych modeli sieci neuronowych, proponując własne, dodatkowe rozwiązania algorytmiczne.**

W **rozdziale 7** (s.151 – s.162) przedstawił efekty zastosowania opracowanej metody inteligentnej oceny części mechanicznych w wykrywaniu podobieństwa testowanych elementów do zbioru antywzorców, które określają negatywną referencję jakości. Aby skutecznie wykryć podobieństwa cech konstrukcyjnych, proponowany model numeryczny powinien:

- spójnie przetwarzać wartości cech konstrukcyjnych w znormalizowanych, symbolicznych opisach konstrukcji;
- umożliwiać dekompozycję zapisu i wnioskowania w odniesieniu do jego części;
- unikać problemów dotyczących wielowymiarowości i zmienności pozycji danych bez nadmiernej utraty precyzji;
- uwzględniać odpowiednio duże zbiory antywzorców do porównania.



Kluczowe możliwości wybranych modeli numerycznych zostały zestawione w tabeli 7.1. Autor rozprawy zaproponował także miary jakości oceny w postaci algebraicznej (odległości Euklidesa) z wykorzystaniem współczynników zgodności z antywzorcem w formie:

- modelu sumacyjnego (wzór 7.1), który określa różnicę pomiędzy wartością cechy antywzorcowej i odpowiadającej jej cechy, przypisanej do testowanego elementu;
- sumacyjnego modelu względnej jakości dla ważonego zbioru antywzorców (wzór 7.2);
- modelu multiplikacyjnego (wzór 7.3), gdzie wartość wynikowa będzie zawierać się w ramach jednej skali wartości, dzięki czemu będzie wyeliminowany błąd obserwowany w modelu sumacyjnym.

Przykłady wyznaczonych wartości współczynników zgodności z antywzorcem zostały przedstawione na rys. 7.1.

W celu eliminacji wpływu efektu skali na wartość współczynnika zgodności Autor rozprawy zaproponował model obliczeniowy z użyciem *odległości Hamminga*, wyznaczanej za pomocą zaprojektowanej sieci neuronowej. Schemat sieci Hamminga klasyfikującej cechy konstrukcji przedstawił na rys.7.2. Wskazał też w tym przypadku na problemy normalizacji wartości i brak wnioskowania opartego o relacje strukturalne.

W kolejnym etapie analizy Doktorant podjął próbę zastosowania *odległości Kohonena* z wykorzystaniem samo-organizujących map w ocenie jakości za pomocą sieci neuronowej Kohonena (rys.7.3). Ograniczeniem obliczeń podobieństwa do antywzorców z użyciem tej sieci jest ograniczona elastyczność w uwzględnieniu potencjalnie odległych elementów mapy, a także duża ilość obliczeń w sytuacji porównania znacznej ilości map.

Rozważył również wykorzystanie wielowarstwowych sieci probabilistycznych w ocenie jakości klasyfikacji danych i wykrywania w nich wzorców. Jednak i w tym przypadku występują pewne ograniczenia, wynikające głównie z konieczności tworzenia unikatowych modeli obliczeniowych, dostosowanych do cech opisujących poszczególne antywzorcowe.

Analizie została także poddana przydatność *sieci konwolucyjnych* w ocenie jakości wykrywania powtarzających się struktur danych, opisujących cechy konstrukcyjne. Doktorant wskazuje na zalety tego typu modelu, do których zalicza:

- uniezależnienie występowania wzorców od konkretnej lokalizacji w opisie, znacznie ułatwiające automatyczną analizę ustrukturalizowanych danych ;
- wykrywanie zależności występujących pomiędzy wieloma lokalizacjami w opisie, umożliwiające wykrywanie relacji strukturalnych drugiego typu.

Schemat mapowania cech konstrukcji z użyciem sieci konwolucyjnej przedstawił na rys.7.4. Zastosowanie sieci konwolucyjnych (model ConvNet), jako modelu obliczeniowego do klasyfikacji cech konstrukcji pozwala na wykrywanie wzorców danych i ich wzajemnych relacji w analizowanym pakiecie informacji. Zwraca też uwagę na pewne ograniczenia zastosowania modelu ConvNet do wykrywania antywzorców wynikające z braku możliwości analizy relacji leksykalnych oraz tworzenia kontekstów interpretacji.

Rozprawę doktorską zamyka **rozdział 8** (s.163 – s.171) – **wnioski i kierunki rozwoju**. Podobnie, jak całość opiniowanej rozprawy doktorskiej, wnioski zostały sformułowane w sposób zwięzły odzwierciedlając zakres wykonanych analiz i opracowanych, własnych rozwiązań Doktoranta.

W kierunkach dalszych badań szczególnie interesująca jest propozycja rozwoju modeli nieeuklidesowych odległości w ocenie podobieństwa, z zastosowaniem metod wnioskowania rozmytego.



Równie ważnym i rozwojowym kierunkiem jest propozycja zbadania i opracowania mapy wiedzy konstruktorskiej, pozwalającej na umożliwienie komputerom przekroczenia kolejnej bariery w interpretacji i zrozumieniu obiektów elementarnych, z których zbudowane są konstrukcje mechaniczne.

**Podsumowując całość przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników stwierdzam, że zostały one wykonane i opracowane na bardzo dobrym poziomie. Wydatnie uzupełniają one wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna w zakresie metodologii, metod identyfikacji i oceny z zastosowaniem antywzorców poprawności rozwiązań projektów konstrukcji mechanicznych. Tym samym przedstawiona praca doktorska ma również znaczące walory użytkowe.**

### **2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej**

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, **metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie.** Mgr inż. Andrzej Tuchołka przedstawił w rozprawie wieloaspektową, spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu zastosowania logicznych procedur i technik badawczych do rozwiązywania złożonych problemów rozpoznawania poprawności rozwiązań projektów konstrukcji mechanicznych. Wykazał, że dysponuje na wysokim poziomie usystematyzowanym zasobem wiedzy i umiejętności do realizacji prac badawczych i dalszego rozwoju naukowego.

### **3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej**

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do aktualnego i ważnego obszaru badawczego, związanego aktualnie z rozwojem techniki i technologii Przemysłu 4.0.

**Opiniowana rozprawa doktorska, mieszcząca się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna posiada oryginalne cechy nowości, a także istotne walory użytkowe. W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Tuchołki w pełni zasługuje na wyróżnienie.**

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Tuchołki nt.: *„Metodyka oceny konstrukcji elementów maszyn z użyciem modeli neuronowych i antywzorców”* spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki (ustawa z dnia 14 marca 2003 r., tekst ujednoczony z dnia 29 września 2014 r. wraz z rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Kraków, dnia 12 grudnia 2020 r.