

Bydgoszcz, 9.10.2020 r.

prof. dr hab. inż. Dariusz Boroński
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Inżynierii Biomedycznej
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy
w Bydgoszczy

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dawida Machalicy

nt.: „A Method for Automatic Creation of Model Based Definition with the Use of Knowledge Based Engineering and Machine Learning”

Podstawą formalną opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 30 czerwca 2020 roku i pismo Przewodniczącego Rady z dnia 30.06.2020 roku.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Tematyka opiniowanej pracy doktorskiej związana jest z rozwojem komputerowych narzędzi wspomagających prace inżynierskie (CAE), w tym głównie proces konstruowania. O ile w początkowej fazie rozwoju programy wspomagające proces konstruowania (CAD) zastępowały tradycyjne formy opracowywania dokumentacji konstrukcyjnej, tak dzisiaj są one niezwykle rozbudowanymi narzędziami, pozwalającymi na trójwymiarowe modelowanie geometryczne obiektów technicznych z jednoczesnym opisem ich cech materiałowych oraz innych informacji wykorzystywanych np. w procesach wytwarzania. Takie podejście umożliwia z kolei integrowanie systemów CAD i ERP (enterprise resource planning), co w efekcie zwiększa wydajność wytwarzania oraz pozwala na znaczne uelastyczenie firm. Odpowiada to w pełni założeniom czwartej rewolucji przemysłowej - Przemysł 4.0, której celem jest zwiększenie efektywności projektowania i produkcji.

Wśród tradycyjnych umiejętności konstruktorów, poza zdolnością do kreowania, modyfikowania lub odtwarzania konstrukcji, jest także bardzo absorbująca i czasochłonna umiejętność prawidłowego opisywania dokumentacji konstrukcyjnej, w tym wymiarowania elementów konstrukcyjnych zgodnie z właściwymi normami i wytycznymi stosowanymi w konkretnych przedsiębiorstwach lub ich większych grupach związanych np. kooperacją w szeroko rozumianym łańcuchu dostaw. Istotnym problemem jest zatem możliwość „uwolnienia” deficytowej kadry konstruktorskiej od konieczności tzw. „detałowania” konstrukcji i tworzenia dokumentacji rysunkowej wraz z przypisanymi do niej metadanymi wykorzystywanymi w kolejnych fazach cyklu życia produktu.

W zintegrowanych systemach zgodnych z ideą Przemysłu 4.0 można wyobrazić sobie możliwość rezygnacji z tradycyjnego opisywania wymiarów nominalnych elementów konstrukcyjnych w postaci tzw. „płaskiej” dokumentacji (rysunków wykonawczych 2D), gdyż posiadają one swoją reprezentację cyfrową w modelach numerycznych, która może być przenoszona z poziomu konstruowania do

systemów wspomagających wytwarzanie CAM. Jednak w dalszym ciągu pozostaje konieczność wprowadzenia innych niezwykle istotnych informacji, takich jak tolerancje wymiarowe, błędy kształtu i położenia, chropowatości powierzchni, wymagane obróbki cieplne i cieplno-chemiczne, opisy spoin, itp., które określane są jako „product manufacturing information” (PMI).

Pośrednią formą tworzenia opisu elementów konstrukcyjnych, polegającą na pominięciu konieczności generowania dwuwymiarowych rzutów (w tym przekrojów) jest bezpośrednie nanoszenie informacji o ich wymiarach i innych cechach na modelu 3D. Taki sposób opisu konstrukcji nosi nazwę MBD (model based definition) i jest stosunkowo nowym rozwiązaniem, które nie jest jeszcze szeroko stosowane w przemyśle. Umożliwia ono znaczne ograniczenie liczby dokumentów powiązanych z konstrukcją, co wpływa na usprawnienie zarządzania projektem i zmniejszenie ryzyka wystąpienia błędów. Tworzenie dokumentacji 2D pomimo powszechnego stosowania systemów PDM (product data management) obciążone jest możliwością występowania niezgodności pomiędzy modelem a dokumentacją 2D.

Autor opiniowanej rozprawy podjął się realizacji bardzo interesującego zagadnienia jakim jest automatyzacja wymiarowania elementów konstrukcyjnych w trybie MBD na bazie wcześniej opracowanych dokumentacji konstrukcyjnych podobnych elementów.

Jest to innowacyjne podejście do problemu automatyzacji wymiarowania, które wpisuje się w założenia koncepcji Przemysłu 4.0, poprzez lepsze wykorzystanie czasu pracy i umiejętności kadry konstruktorów i uwolnienie ich od czasochłonnej i powtarzalnej pracy.

Tym samym, w świetle powyższych stwierdzeń można uznać podjęcie tematu rozprawy za celowe i uzasadnione, a podejmowaną tematykę aktualną zarówno pod względem poznawczym, jak i praktycznym.

Rozwiązanie postawionego w pracy problemu wymagało zastosowania wiedzy i umiejętności mieszczących się w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych, w tym automatyki, informatyki i budowy maszyn. Można jednak zauważyć, że podstawowym problemem naukowym było opracowanie metody automatyzacji wymiarowania dedykowanej zastosowaniom z zakres inżynierii mechanicznej przy użyciu narzędzi informatycznych, co lokuje pracę głównie w zakresie automatyki.

W efekcie, biorąc pod uwagę zakres tematyczny pracy, w tym jej cele i uzyskane rezultaty, ocenianą rozprawę można zakwalifikować do dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Rozprawa została napisana w języku angielskim i była realizowana w ramach programu "Doktorat wdrożeniowy" Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego we współpracy z General Electric Company Polska Sp. z o. o.

Treść pracy została podzielona na 6 rozdziałów o łącznej objętości 126 stron (131 z załącznikami). Numerowane rozdziały pracy zostały poprzedzone podziękowaniami, streszczeniami w języku angielskim i polskim oraz spisem treści, a także wykazem skrótów użytych w pracy. Na końcu pracy zamieszczono bibliografię załącznikową zawierającą 183 pozycje literatury, w tym jedną współautorską pracę Autora rozprawy. W pracy zamieszczono 88 rysunków i 7 tabel oraz 6 algorytmów.

W pierwszym rozdziale pracy Autor omówił problematykę podjętą w pracy oraz krótko scharakteryzował jej zakres.

Drugi rozdział został poświęcony przeglądowi stanu wiedzy w zakresie głównych kwestii rozpatrywanych w ramach tematu pracy, w tym:

- automatycznemu wymiarowaniu elementów konstrukcyjnych w systemach CAD,
- definiowaniu i wykrywaniu podobieństwa modeli CAD na poziomie globalnym i lokalnym,
- sposobom lokalizacji i rozmieszczenia wymiarów i oznaczeń PMI na modelach CAD,
- narzędzi informatycznych znajdujących zastosowanie w zakresie wykrywania podobieństwa modeli CAD i sposobów ich automatycznego wymiarowania.

W trzecim rozdziale zatytułowanym „Thesis and objectives” Autor zwrócił uwagę na problemy towarzyszące automatycznemu wymiarowaniu w trybie MBD oraz wskazał podejście, które w jego opinii stanowi podstawę do opracowania nowej innowacyjnej metody wymiarowania i nanoszenia

adnotacji PMI w nowych modelach CAD o określonym poziomie podobieństwa do innych modeli o zweryfikowanej i zaakceptowanej postaci.

Na tej podstawie sformułował tezę pracy: „Engineering drawing in the form of Model Based Definition can be automatically generated, without necessity, to explicitly define all the rules, being required by both international standards and internal requirements of the specific company”.

Tak sformułowana teza może budzić pewne uwagi. Można zapytać, czy na pewno zamiarem Autora było automatyczne generowanie rysunku technicznego, czy wyłącznie opisu modelu 3D w formie MBD? Ogólny charakter tezy powoduje też, że nie odnosi się ona do wskazanego wcześniej założenia o skuteczności automatyzacji wymiarowania na bazie zwymiarowanych wcześniej modeli CAD.

Wbrew tytułowi rozdziału, trudno w nim znaleźć wprost sformułowane cele pracy. Znajdujemy natomiast uwagi Autora wskazujące na zakres innowacyjności zaproponowanego rozwiązania.

W kolejnym, **czwartym, rozdziale pracy** Autor omówił szczegółowo opracowaną metodykę automatycznego wymiarowania modeli CAD oraz opracowane procedury i narzędzia pozwalające na jej praktyczną implementację.

Objęły one:

- wyszukiwanie modeli CAD o określonym poziomie podobieństwa,
- ocenę podobieństwa modeli CAD na bazie analiz powierzchni, ich krawędzi i wierzchołków,
- odtwarzanie wymiarów i opisów PMI na modelu CAD na bazie modelu bazowego,
- rozmieszczenie i orientację w trójwymiarowym układzie współrzędnych opisów PMI.

Piąty rozdział pracy został poświęcony omówieniu trzech przykładów zastosowania opracowanej metody i narzędzi do automatycznego wymiarowania modeli CAD w trybie MBD. Na ich tle Autor wskazał zarówno mocne, jak i słabsze strony opracowanych i zaimplementowanych rozwiązań.

Pracę kończy **rozdział szósty** zatytułowany „Summary i conclusions”, w którym Autor zamieścił krótkie podsumowanie pracy oraz wypunktował jej najważniejsze osiągnięcia. Wskazana zostały także kierunki dalszych badań. Trudno jednak w tym rozdziale znaleźć wnioski z przeprowadzonych badań, czego można by spodziewać się po jego tytule.

2. Ocena rozprawy

Zgodnie z wymaganiami sformułowanymi dla recenzentów rozpraw doktorskich dla Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej ocena pracy zostanie przedstawiona w sześciu podpunktach odnoszących się do następujących kwestii:

2.1. Zagadnienie naukowe/badawcze rozpatrywane w pracy

Tak jak to przedstawiono w ogólnej charakterystyce rozprawy, podstawowym zagadnieniem badawczym podjętym w pracy jest automatyzacja procesu wymiarowania elementów konstrukcyjnych tworzonych w systemach CAD operujących na trójwymiarowych modelach bryłowych i powierzchniowych. Autor podjął się ambitnego zadania polegającego na opracowaniu metody automatycznego generowania wymiarów i adnotacji PMI na modelach CAD na bazie istniejących schematów wymiarowania przyjętych i zaakceptowanych dla wcześniej utworzonych podobnych modeli CAD.

Pewnym mankamentem w tym aspekcie pracy są wskazane wcześniej: zbyt ogólnie sformułowana teza pracy i brak jasno sprecyzowanych celów pracy. Tę niedogodność kompensują w pewnym zakresie dobrze zdefiniowane założenia dla realizacji postawionego sobie zadania, oparte na wcześniejszych doświadczeniach własnych Autora i analizie literatury.

2.2. Analiza źródeł

Analiza źródeł literaturowych dotyczących podjętego zagadnienia badawczego stanowi silną stronę pracy. Autor dokonał przeglądu licznych publikacji obejmujących łącznie 183 pozycje z zakresu metod automatycznego wymiarowania stosowanych w systemach CAD w tym definiowania i wykrywania podobieństwa modeli CAD na poziomie globalnym i lokalnym, sposobów lokalizacji i rozmieszczenia wymiarów i oznaczeń PMI na modelach CAD oraz narzędzi informatycznych znajdujących zastosowanie w zakresie wykrywania podobieństwa modeli CAD i sposobów ich

automatycznego wymiarowania. Wykaz przeanalizowanych źródeł obejmuje zarówno bieżące prace (z ostatnich kilku lat), jak i wcześniejsze publikacje mające istotne znaczenie z punktu widzenia tematu pracy.

2.3. Sposób rozwiązania zagadnienia badawczego

W mojej ocenie mgr Dawid Machalica skutecznie rozwiązał postawione sobie zadanie badawcze. Zaproponowana metoda wymiarowania bazująca na założeniu, iż możliwe jest przeniesienie sposobu wymiarowania i nanoszenia opisów PMI z wcześniej opracowanych modeli CAD na nowo tworzone elementy konstrukcyjne o odpowiednim poziomie podobieństwa została przez Autora zaimplementowana i pozytywnie zweryfikowana.

Analiza sposobu rozwiązania postawionego zadania pozwala stwierdzić, że Autor rozprawy wykazał się odpowiednimi dla realizacji pracy kompetencjami w zakresie prowadzenia prac badawczych oraz analizy otrzymanych wyników badań. Biorąc pod uwagę jej interdyscyplinarny i wdrożeniowy charakter należy zwrócić uwagę na umiejętności zarówno kreowania rozwiązań, jaki i ich praktycznych implementacji. Metody i narzędzia badawcze użyte przez Autora są w mojej ocenie właściwe dla przyjętych celów i zakresu pracy.

Analiza pracy daje silne przekonanie o bardzo dobrym przygotowaniu Autora do realizacji zaplanowanego przedsięwzięcia. Pomocne w tym zakresie było zapewne doświadczenie zdobyte w pracy zawodowej związanej z tematyką pracy.

Niezależnie od pozytywnej oceny sposobu rozwiązania zagadnienia badawczego nasuwa się jednak kilka pytań, na które nie odnalazłem bezpośredniej odpowiedzi analizując treść pracy:

- Opracowana metoda bazuje na dostępności opracowanych wcześniej licznych elementów konstrukcyjnych z w pełni zwymiarowanymi i opisanymi modelami CAD. Stanowią one szablony wymiarowania i opisów PMI, które są następnie przenoszone na podobne do nich nowo tworzone elementy konstrukcyjne. Dzięki możliwościom współczesnych systemów CAD, w tym parametryzacji wymiarów, w praktyce inżynierskiej częstym rozwiązaniem jest nieco inne podejście, polegające na tworzeniu nowych elementów poprzez modyfikacje już istniejących. Efekt końcowy w obydwu przypadkach wydaje się być podobny. Na czym zatem polega główna przewaga zaproponowanego rozwiązania ?
- Ciekawym, aczkolwiek dyskusyjnym aspektem pracy jest kwestia podobieństwa elementów konstrukcyjnych. Zastosowane w pracy podejście do tego zagadnienia zostało zweryfikowane na stosunkowo prostych elementach konstrukcyjnych. Czy zdaniem Autora przeszłoby ono także pozytywnie próbę w przypadku bardziej złożonych elementów, np. stopniowanych wałów maszynowych lub korpusów maszyn ?
- Na rysunku 4.3 Autor użył kilku miar precyzji zestawionych z odległością euklidesową, które nie zostały objaśnione w tekście rozprawy.
- Przedstawiony w rozdziale 4.5.2 model maszynowego uczenia zastosowany do oceny nieczytelności opisów PMI bazuje na analizie znacznej liczby opisów o różnym poziomie czytelności, tj. różnej orientacji względem wybranego widoku modelu 3D. Czy proces ten jest powtarzany każdorazowo dla kolejnych nowo tworzonych elementów konstrukcyjnych, dla których następuje przeniesienie opisów PMI ?
- Czy opracowane narzędzia służące do wykrywania podobieństwa modeli CAD, transferu opisów PMI, optymalizacji ich orientacji i poszukiwania ich najkorzystniejszego rozmieszczenia mogą być stosowane wyłącznie w programie NX CAD ? Jaka jest możliwość ich aplikacji w innych systemach o podobnym stopniu złożoności ?

2.4. Oryginalność i poziom naukowy osiągnięcia Autora na tle stanu wiedzy

Zaproponowane rozwiązanie jest bez wątpienia nowym podejściem do automatyzacji tworzenia dokumentacji konstrukcyjnej w trybie MBD. Analiza istniejących rozwiązań pozwala co prawda wskazać możliwości automatycznego wymiarowania modeli CAD, jednak przewaga zaproponowanej metody polega na tym, że nie są generowane wyłącznie wymiary nominalne wynikające z budowy bryłowych lub powierzchniowych elementów tworzonych w systemie CAD, ale także pełne opisy pozostałych cech geometrycznych, takich jak pola tolerancji, czy błędy kształtu i położenia.

O innowacyjności zaproponowanego podejścia może świadczyć pięć zgłoszeń patentowych, o których informuje Autor w streszczeniu rozprawy.

Dojście do zaprezentowanego w pracy rozwiązania wymagało rozwiązania szeregu problemów, spośród których jako najważniejsze należy wskazać:

- analizę podobieństwa dwóch elementów konstrukcyjnych na bazie ich modeli CAD,
- transfer wymiarów i opisów PMI pomiędzy dwoma modelami CAD o różnym stopniu podobieństwa,
- optymalizację orientacji wymiarów i opisów PMI względem przyjętego widoku 3D modelu CAD,
- rozmieszczenie wymiarów i opisów PMI w sposób zapewniający ich dobrą czytelność przy jednoczesnym zachowaniu zgodności z normami rysunkowymi.

2.5. Prezentacja wyników realizacji pracy

Pomimo pewnych uwag krytycznych dotyczących sposobu prezentacji celu i zakresu pracy oraz zgodności tytułów dwóch rozdziałów (3 i 6) z ich zawartością można stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa spełnia pod względem układu i podziału treści oraz kompletności materiału wymagania stawiane tego typu pracom. Rozprawa została zredagowana w bardzo staranny sposób, a nieliczne usterki językowe i stylistyczne nie wpływają na pozytywną ocenę formalnej strony rozprawy.

Pewne uwagi budzić może jedynie nadmierne, w mojej ocenie, rozdrobnienie treści pracy na liczne podrozdziały, w szczególności w czwartym rozdziale rozprawy. Bywa, że trzy podrozdziały mieszczą się na jednej stronie. Domyślam się, że intencją Autora było wyróżnienie poszczególnych aspektów prowadzonych prac, ale podobny efekt można było uzyskać bez rozbudowywania spisu treści.

2.6. Wartość użyteczna pracy dla nauk inżyniersko-technicznych

Przedsięwzięcie badawcze zrealizowane i omówione w ramach rozprawy doktorskiej mgra Dawida Machalicy ma niewątpliwie istotne wartości użyteczne, tym bardziej że miało charakter doktoratu wdrożeniowego, będącego odpowiedzią na realne problemy występujące w miejscu pracy Autora.

Tak jak wcześniej wspomniano, w jego realizacji konieczne było zastosowanie istniejących i opracowanie nowych rozwiązań z zakresu automatyki, informatyki i budowy maszyn, które to zagadnienia mieszczą się w kilku dyscyplinach naukowych z dziedziny nauk inżyniersko-technicznych. Opracowana metoda automatyzacji wymiarowania może znaleźć bezpośrednie zastosowanie w rozwoju systemów CAD oraz w rozwoju metod konstruowania maszyn zgodnym z ideą Przemysłu 4.0.

3. Wniosek końcowy

Na podstawie oceny przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej można stwierdzić, że podjęte w niej zamierzenie badawcze zostało osiągnięte. Rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcia poznawcze i praktyczne mogące znaleźć bezpośrednie zastosowanie w praktyce, a jej Autor wykazał się stosownymi kompetencjami w zakresie prowadzonych prac badawczych.

Można zatem stwierdzić, że rozprawa doktorska mgra inż. Dawida Machalicy spełnia wymogi określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i może być dopuszczona do dalszych czynności związanych z nadaniem stopnia doktora przez Radę Naukową dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej.

