

Warszawa, 01.08.2019 r.

Dr hab. inż. Robert Zalewski, prof. uczelni  
Zakład Techniki Komputerowych  
Instytutu Podstaw Budowy Maszyn  
Politechniki Warszawskiej  
ul. Narbutta 84  
02-524 Warszawa

## **OPINIA**

### **o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Macieja Byszewskiego pt. „Adaptacyjne mocowanie elementów niesztynnych w pomiarach współrzędnościowych”**

**Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Adam Woźniak**

#### **Podstawa formalna wykonania opinii:**

- pismo Pani prof. dr. hab. Natalii Golnik, Dziekan Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, z dnia 30.05.2019 r., znak WMt.521.19.2019,
- umowa o dzieło polegająca na opracowaniu opinii rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Byszewskiego pt. „Adaptacyjne mocowanie elementów niesztynnych w pomiarach współrzędnościowych”

#### **1. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY**

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Byszewskiego została udokumentowana na 124 stronach. Rozprawa została podzielona na 4 rozdziały poprzedzone:

- podziękowaniami,
- streszczeniem,
- streszczeniem w jęz. angielskim (Abstract),
- spisem treści.

Ponadto po ostatnim, rozdziale w rozprawie zamieszczono bibliografię (117 pozycji, w tym 8 prac doktoranta, w których występował w roli współautora), spis specyfikacji technicznych oraz raportów ze zrealizowanych projektów badawczych.

#### **2. OCENA ROZPRAWY**

Rozważane w opiniowanej rozprawie problemy naukowe to sposoby adaptacyjnego mocowania elementów o niskiej sztywności w pomiarach współrzędnościowych. Problemy te są w sposób prawidłowy i jednoznaczny ujęte, a sama rozprawa stanowi

oryginalne ich rozwiązanie. Doktorant realizując kolejne etapy dokładnie zdefiniowanego i ambitnego programu badań konsekwentnie zmierzał do postawionego celu. Prawidłowo zdefiniował obszar badawczy, dokonał właściwej syntezy funkcjonujących w literaturze metod rozwiązywania problemów związanych z pomiarami elementów o dużej podatności oraz zaproponował oryginalną, autorską strategię adaptacyjnego mocowania w/w elementów. Realizacja tych prac świadczy o poziomie wiedzy Doktoranta, dobrej znajomości problematyki, wysokich umiejętnościach organizacyjnych, co wymaga specjalnego podkreślenia przy realizacji obszernego programu badań. W opiniowanej pracy doktorskiej Doktorant zaproponował innowacyjną metodę kompensacji wpływu sił grawitacji na pomiary wybranej grupy części maszynowych, zaimplementował ją w sposób praktyczny, przygotowując złożony system pomiarowy, w skład którego wchodziła także, specjalnie zbudowana, autorska aplikacja numeryczna, wspomagająca zaproponowaną w rozprawie strategię pomiarową.

W podejmowanej w rozprawie tematyce Doktorant wykazał się trafnością postępowania badawczego i poprawnością wnioskowania, co świadczy o jego wiedzy i umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

### **3. ANALIZA ROZPRAWY**

Autor rozprawy w rozdziale pierwszym przybliżył zagadnienie źródeł błędów współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Doktorant zaznacza, że istnieją skuteczne metody identyfikacji i kompensacji pewnej grupy błędów, które związane są z urządzeniami pomiarowymi. W dalszej części swoją uwagę koncentruje na źródłach błędów pomiaru, związanych bezpośrednio z elementem mierzonym, a w szczególności na siłach zewnętrznych występujących podczas pomiaru współrzędnościowego. Wskazuje, że siły nacisku pomiarowego, mocowania oraz grawitacji mogą wprowadzać istotne błędy pomiaru. W dalszej części rozdziału (podrozdział 1.4) omówione zostały stanowiska badawcze, służące badaniom sił nacisku pomiarowego sond stykowych stosowanych w maszynach współrzędnościowych oraz obrabiarkach CNC, których autor rozprawy był współwykonawcą. W podrozdziale 1.5 wprowadzone zostało pojęcie "elementu niesztynnego", który zdefiniowano jako element podatny mechanicznie, podlegający deformacji w wyniku oddziaływania sił zewnętrznych. Autor dysertacji pomija w dalszej części "stykowe" metody pomiarowe wskazując, że metody bezstykowe mogą być konkurencyjne w stosunku do wcześniej wspomnianych, dodatkowo pozbawiając "budżet niepewności" czynnika związanego z naciskiem pomiarowym. Począwszy od podrozdziału 1.6 Doktorant przeprowadził szczegółową analizę literatury dotyczącej metod mocowania "elementów niesztynnych". Metody mocowania takich obiektów podzielono na mechaniczne i wirtualne. Zarówno te należące do grupy pierwszej jak i drugiej zakładają pomiar części o niskiej sztywności w stanie naprężonym. W przypadku metod mechanicznych wprowadzane są niepożądane naprężenia poprzez kształtowy system mocowania, który odwzorowuje nominalny kształt elementu mierzony. Metody wirtualne z kolei zakładają pomiar elementu w stanie swobodnym (zdeformowanym), a kompensacja ugięć grawitacyjnych lub określenie kształtu wyrobu zamocowanego w zespole mechanicznym odbywa się z wykorzystaniem narzędzi MES lub przekształceń nieliniowych chmur punktów. Autor

rozprawy wskazuje istotne mankamenty funkcjonujących podejść (pomiaru przeprowadzane w stanie naprężonym) wskazując niszę w rozpatrywanym w dysertacji obszarze badawczym. Zakończeniem rozdziału pierwszego jest postawienie tezy rozprawy:

„Możliwe jest opracowanie metody mocowania elementów niesztynnych w stanie quasi-swobodnym, umożliwiającej pomiaru współrzędnościowe z dokładnością większą niż w przypadku klasycznych metod mocowania”.

Drugi rozdział rozprawy Doktorant rozpoczyna od opisu proponowanej koncepcji metody mocowania adaptacyjnego, która m.in. zakłada wyznaczenie wartości reakcji podporowych i podparcie elementu o dużej podatności w taki sposób, aby kompensować ugięcia statyczne mierzonego elementu. W podrozdziałach 2.2 oraz 2.3 Autor pracy przedstawił ogólną ideę proponowanych aktywnych podpór oraz ich przykładowe rozwiązania konstrukcyjne. Aktywne podpory, zgodnie z autorską propozycją, mogą występować jako niezależne mechanicznie elementy umożliwiające ich zastosowanie w różnorodnych aplikacjach. Fundamentalnym, z punktu widzenia przyjętej koncepcji, jest właściwe wyznaczenie wartości reakcji podporowych oraz lokalizacji podpór pod mierzonym elementem. Autor rozprawy wykorzystuje analizy prowadzone z wykorzystaniem MES jako metodę wyznaczenia wartości "reakcji węzłowych" oraz położenia "punktów podparcia" elementów poddanych pomiarom. Po części zawierającej opis idei metody elementów skończonych, w podrozdziale 2.5, szczegółowo opisano istotę opracowanego algorytmu optymalnego lokowania podpór oraz wyznaczania wartości reakcji podporowych. W dalszej części rozdziału drugiego przedstawiono opracowane przez autora oryginalne oprogramowanie wspomagające zadawanie i monitorowanie wartości reakcji podporowych. Oprogramowanie to jest również wyposażone w moduł kalibracji tensometrów. Po opisie elementów wchodzących w skład proponowanego mocowania adaptacyjnego, Autor pracy omówił i zaprezentował specjalistyczne stanowisko badawcze oraz procedurę przygotowania pomiaru.

Trzeci rozdział rozprawy stanowi prezentacja uzyskanych wyników doświadczalnych. Opisano w nim m.in. zastosowane w badaniach elementy o niskiej sztywności w postaci wahacza poziomego, stosowanego w precyzyjnych wagach laboratoryjnych oraz opracowanego na potrzeby badań wzorca płytkowego. W celu potwierdzenia poprawności opracowanej metody mocowania adaptacyjnego, Autor wykonał pomiary wybranych charakterystyk, w takim położeniu mierzonego elementu, w którym wpływ sił grawitacji na geometrię mierzonego wyrobu jest pomijalny. Uzyskany w ten sposób wynik uznawano za wartość referencyjną, do której odnoszono wyniki pomiaru tej samej cechy mierzonej w podatnej na deformację statyczną orientacji elementu. Przeprowadzono dodatkową analizę MES, dzięki której określono przemieszczenia wynikające z działania sił ciężkości, a uzyskane wyniki porównano z wynikami doświadczalnymi. Weryfikacja opracowanej metody polegała na porównaniu wyników pomiarów tej samej cechy zmierzonej w orientacji "podatnej" i referencyjnej, przy czym w orientacji "podatnej" element podparty był na tytułowych aktywnych podporach adaptacyjnych. Porównano także przemieszczenia doświadczalne z symulacyjnymi. Wyniki pomiarów przedstawiono w postaci czytelnych wykresów słupkowych. Zgodnie z przeprowadzoną analizą wyników można stwierdzić, że opracowana metoda mocowania adaptacyjnego umożliwia pomiar "elementów niesztynnych" w stanie "quasi swobodnym" z dokładnością większą od metod klasycznych.

#### 4. UWAGI, SUGESTIE I SPOSTRZEŻENIA

Autorowi nie udało się niestety uniknąć pewnych niedociągnięć i błędów edycyjnych. W pracy wystąpiły także nieliczne błędy językowe, m.in. błędy interpunkcyjne, kolokwializmy, neologizmy i tzw. "literówki". Nie uważam za konieczne wyszczególnianie wspomnianych błędów w niniejszej recenzji rozprawy doktorskiej. Spostrzeżone usterki językowe zostały przekazane Autorowi pracy w formie odręcznych notatek w manuskrypcie i do jego decyzji pozostawiam rozważenie dołączenia do rozprawy erraty. Należy jednakże zaznaczyć, że wspomniane niedociągnięcia nie rzutują na całościową, wysoką ocenę opiniowanej pracy.

Uwagi, sugestie i spostrzeżenia, które nasuwają się podczas czytania rozprawy mają raczej charakter polemiczny. Najważniejsze z nich to:

1) W pracy pominięto rozdział piąty.

2) W świetle przeglądu literaturowego, zaprezentowanego na pierwszych 48 stronach dysertacji, biorąc pod uwagę atrakcyjność naukową podejmowanego problemu badawczego oraz jego aktualność, potwierdzoną licznymi publikacjami z tego zakresu, można odnieść wrażenie, że zaproponowana teza pracy:

"Możliwe jest opracowanie metody mocowania elementów niesztynnych w stanie quasi-swobodnym, umożliwiające pomiary współrzędnościowe z dokładnością większą niż w przypadku klasycznych metod mocowania" jest zbyt ogólna, będąc de facto truizmem...

3) Podrozdział 2.4, będący opisem znanej od dekad metody elementów skończonych, można było pominąć w dysertacji bez uszczerbku dla jej poziomu merytorycznego.

4) Czy w obliczeniach MES rozpatrywano wpływ rodzaju elementów i funkcji kształtu na wyniki działania algorytmu optymalizującego miejsce rozstawu podpór adaptacyjnych?

5) Zastosowany w rozprawie algorytm lokowania podpór jest elementarny...nie trudno sobie wyobrazić sytuacje, w których jego działanie uniemożliwi uzyskanie rozwiązania "optymalnego"... Czy podejmowano próby zaproponowania innego algorytmu, bardziej zaawansowanego, umożliwiającego otrzymanie rozwiązania różnego od "minimum lokalnego", będącego każdorazowym rezultatem działania strategii optymalizacyjnej zaproponowanej w recenzowanej pracy?

6) ...kontynuacja uwagi 5...Na stronie 105 Doktorant stwierdza, że"...nie było konieczności stosowania algorytmu optymalnego lokowania podpór i wykorzystano model masy odsprężynowanej...", szkoda, że Autor nie zaprezentował próby zastosowania w/w algorytmu do rozpatrywanego wzorca płytkowego... W opinii recenzenta zaproponowany w pracy algorytm mógłby napotkać "pewne trudności" w wyznaczeniu odpowiedzi zbliżonej do tej zaprezentowanej w dalszej części rozprawy...

6) Czy zaproponowana metoda jest także skuteczna w przypadku elementów wykonanych z materiałów nie wykazujących reakcji na działanie pola magnetycznego (stopy aluminium czy tworzywa sztuczne)?

7) Czy w sytuacji, w której algorytm "wskazuje" konieczność umiejscowienia podpory na powierzchni mierzonego elementu, której nachylenie nie jest równoległe do bazy stołu do którego montowana jest podpora, możliwe jest kontynuowanie procesu pomiarowego?

## **5. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY**

Podsumowując recenzowaną pracę stwierdzam, że do szczególnych osiągnięć Autora można zaliczyć:

1) Opracowanie innowacyjnej koncepcji pomiarów elementów o niskiej sztywności.

Zaproponowana przez Doktoranta metodologia pozwala na mocowanie elementu nieszywnego w stanie "quasi-swobodnym". Popularne rozwiązania inżynierskie bazują na metodach pomiarów elementów o niskich sztywnościach (zarówno mechaniczne jak i wirtualne) w stanie naprężonym, zgodnie z wytycznymi normy ISO 10579 oraz AMSE Y14.5.

Jej główne zalety to:

- eliminacja wprowadzania dodatkowych sił w systemach mocujących,
- skrócenie czasu pomiarowego,
- eliminacja konieczności budowania specjalistycznego, dedykowanego do kształtu mierzonego elementu, stanowiska pomiarowego,
- zmniejszenie kosztowności procesu pomiarowego.

2) Koncepcję i budowę prototypów podpór, umożliwiających zadawanie reakcji podporowych o predefiniowanych wartościach.

3) Zaproponowanie i zbudowanie autorskiego stanowiska badawczego potwierdzającego poprawność zaproponowanej w rozprawie metodologii prowadzenia pomiarów elementów o niskiej sztywności.

Autor w ramach rozprawy podjął się wielowątkowego i dość ambitnego zadania badawczego. Przegląd literaturowy świadczy o dobrym rozeznaniu tematyki w podejmowanych obszarach. Stanowił on punkt wyjścia do formułowania celów pracy dotyczących próby eliminacji problemów pojawiających się w procesie prowadzenia pomiarów elementów o niskiej sztywności. Autor swobodnie i umiejętnie przeplata własne przemyślenia z doniesieniami literaturowymi. Materiał ilustracyjny jest na ogół dobrze dobrany. Autor przygotował wielowariantowy, szczegółowy i obszerny plan badań, który konsekwentnie realizował. Reprezentatywne wyniki badań zostały zamieszczone w tekście głównym rozprawy. W sposób syntetyczny została zaprezentowana metodyka badań empirycznych. Przyjęte metody badań świadczą o dobrym opanowaniu przez Doktoranta warsztatu badawczego. Rozprawa jest wartościowym opracowaniem zawierającym oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego o dużych walorach poznawczych i aplikacyjnych.

Całość pracy oceniam pozytywnie, a sama rozprawa stanowi wartościowe dzieło. Przedstawione w powyższych punktach pytania mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na ogólną, wysoką ocenę rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Byszewskiego. Mogą być jednakże uwzględnione przez Niego przy przygotowywaniu publikacji z zakresu objętego rozprawą oraz stanowić inspiracje przy wyznaczaniu kolejnych etapów przyszłych prac badawczych.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Byszewskiego pt. „Adaptacyjne mocowanie elementów niesztynnych w pomiarach współrzędnościowych” spełnia z nadmiarem wszystkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim, określone Ustawą o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki. Uwzględniając znaczenie aplikacyjne recenzowanej rozprawy oraz wyróżniający, na tym etapie rozwoju naukowego, dorobek publikacyjny Doktoranta, wnioskuję o wyróżnienie jego rozprawy doktorskiej.

Podsumowując niniejszą recenzję wnioskuję do Rady Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Macieja Byszewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'M.B.' followed by a long, sweeping flourish extending upwards and to the right.