

prof. dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak
Politechnika Warszawska
Zakład Automatykacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem
ul. Narbutta 86, 02-524 Warszawa

Warszawa, 22 kwietnia 2016

Recenzja osiągnięcia naukowego (cyklu publikacji):

Rozwiązania mechatroniczne w nadzorowaniu drgań w procesie frezowania smukłymi narzędziami

oraz dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego
dr inż. Marka Adama Galewskiego,
kandydata do stopnia naukowego doktora habilitowanego

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawę formalną do opracowania recenzji stanowi decyzja Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów z dnia 11 marca 2016 r. powołująca mnie na recenzenta w postępowaniu habilitacyjnym dr inż. Marka Adama Galewskiego, oraz pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej prof. dr. hab. inż. Jana Stąsiewicza z dnia 30 marca 2016 zlecające mi wykonanie tej recenzji. Recenzja została opracowana na podstawie:

- Osiągnięcia naukowego przedstawionego w postaci jednolitego cyklu publikacji pt. „Rozwiązania mechatroniczne w nadzorowaniu drgań w procesie frezowania smukłymi narzędziami”
- Wybranych dziewięciu publikacji stanowiących podstawę oceny istotnej aktywności naukowej
- Autoreferatu habilitanta zawierającego obszerne omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników zawartych w rozprawie, oraz omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych
- Informacji o osiągnięciach dydaktycznych i popularyzatorskich
- Listy publikacji wraz z analizą cytowań wg Web of Science i Google Scholar.

2. Ocena osiągnięcia naukowego (jednolitego cyklu publikacji)

Na osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego składa się dziewięć artykułów, w tym czterech o wysokim wskaźniku Impact Factor (1,7-3) i punktacji ministerialnej (30-45 punktów). Dotyczą one ważnego i aktualnego zagadnienia przeciwdziałania drganiom samowzbudnym

przy frezowaniu, lecz tylko niektóre z nich częściowo pokrywają się z deklarowanym tematem „Rozwiązania mechatroniczne w nadzorowaniu drgań w procesie frezowania smukłymi narzędziami”. Rozwiązanie mechatroniczne występuje w czterech z nich, we wszystkich natomiast główną podatnością układu mechanicznego (OUPN) jest wiotki przedmiot. O ile zatem tematyka jest spójna, dobrze dobrana, ważna, o tyle tytuł osiągnięcia bardzo nietrafnie ją opisuje. Współautorem sześciu publikacji jest prof. dr hab. inż. Krzysztof Kaliński, w tym w trzech dodatkowo dr inż. Michał Mazur. Trzy publikacje w tym jedna wysokiej rangi są samodzielne. Udział współautorów został dokładnie podany tak ilościowo jak jakościowo.

W pierwszej z prac cyklu [C1] habilitant i jego współautorzy poszukując metody wyznaczania prędkości obrotowej wrzeciona umożliwiającej stabilną obróbkę, wyszli od kryterium zaproponowanego przez Liao i Younga¹ w 1996r. Ponieważ kryterium to przewija się przez cały cykl publikacji habilitanta, wymaga to obszerniejszego komentarza. Postawy metodyki poszukiwania stabilnych prędkości obrotowych podali Smith i Tlusty² w 1992 roku. Jej istota wynika z analizy częstości drgań samowzbudnych i odpowiadających im przesunięć fazowych między falą naciętą na powierzchni skrawania w czasie przejścia poprzedniego ostrza, a nacinaną aktualnie (aktualnymi drganiami). Regeneracyjne drgania samowzbudne można formalnie rozpatrywać jak drgania wymuszone tą naciętą falą. Jak wiadomo, przesunięcie fazowe drgań względem siły wymuszającej (tu naciętej fali) wynosi od 0 do -180° zależnie od częstości wymuszenia – w rezonansie ok -90° . Z drugiej strony wynikające stąd przesunięcie fazowe między drganiami w kolejnych przejściach jest związane prostą zależnością geometryczno-czasową – między przejściami mieści się określona, niecałkowita liczba naciętych fal dla danej częstości. Oba te przesunięcia fazowe są tożsamościowo równe, a z równości tej wynika klasyczna krzywa workowa, czyli zależność granicy stabilności od prędkości obrotowej wrzeciona. Kolejne worki odpowiadają kolejnym liczbom fal naciętych między przejściami ostrzy. Minimum stabilności odpowiada prędkości obrotowej, dla której przesunięcie fazowe wynosi ok. -90° . Wyższe prędkości obrotowe wymuszają podwyższenie częstości drgań i zwiększenie przesunięcia fazowego. Niższe prędkości obrotowe (w ramach tego samego worka) wymuszają obniżenie częstości drgań w kierunku częstości drgań własnych układu OUPN (częstość drgań samowzbudnych jest nieco wyższa) i zmniejszenie tego przesunięcia. Odległość między poszczególnymi workami jest tym mniejsza, im wyższa liczba naciętych fal między przejściami. Towarzyszy temu zawężanie się zakresu możliwych częstości i przesunięć fazowych odpowiadających poszczególnym workom. Praktycznie rzecz biorąc przestrzenie stabilnej obróbki między workami występują jedynie przy kilku falach. Istotą metody Smitha-Tlustego jest taki

¹ Y.S. Liao, Y.C. Young, A new on-line spindle speed regulation strategy for chatter control, International Journal of Machine Tools and Manufacture 36 (5) (1996) 651–660.

² S. Smith, J. Tlusty, Stabilizing chatter by automatic spindle speed regulation, CIRP Annals-Manufacturing Technology 41 (1) (1992) 433–436

dobór prędkości obrotowej, by znaleźć się jak najbardziej na lewo od minimum stabilności (jak najbliższej częstości drgań własnych), nie wchodząc jednak w kolejny worek, odpowiadający większej liczbie fal. Dodatkowym ważnym założeniem tej metody jest nieznanie charakterystyki modalnej układu OUPN (FRF) i zastąpienie nieznannej częstości drgań własnych, zmierzoną (mikrofonem, siłomierzem lub akcelerometrem) częstością drgań samowzbudnych. Prędkość obrotową oblicza się zatem z zależności $n = 60 f_c / (z k)$, gdzie f_c – częstość drgań samowzbudnych, z – liczba ostrzy, $k=1,2,\dots$. Metoda jest szeroko znana, np.³, wielokrotnie wykorzystana praktycznie w rozwiązaniach komercyjnych (tzw. Harmonizer, BestSpeed itd.). Liao i Young wyszli od pracy Smitha i Tlustego² jednakże nie zauważyli najwyraźniej, że kąty przesunięcia fazowego wynikające z właściwości układu i relacji częstości drgań do prędkości obrotowej wrzeczona są tożsamościowo równe i uznali, że tym ostatnim można niezależnie sterować. Przeprowadzili oczywistą analizę energii przekazywanej przez proces skrawania do układu OUPN zakładając, że przesunięcie fazowe między falą naciętą na powierzchni skrawania, a nacinaną aktualnie (aktualnymi drganiami) może być dowolne – od 0 do 360°. Największa ilość energii jest przekazywana do układu, gdy drgania aktualne są opóźnione o 90° (przesunięcie fazowe wynosi ok. $-90^\circ=270^\circ$), zaś najwięcej energii proces skrawania odbiera z układu (tłumi drgania), gdy aktualne drgania wyprzedzają wymuszenie naciętą falą o 90° (przesunięcie fazowe $+90^\circ$). Liao i Young postulują zatem zastosowanie prędkości obrotowej, która spowoduje, że drgania będą wyprzedzały naciętą falę $n = 60 f_c / [z (0,25+k)]$. Założenie to jest błędne – tak jak drgania wymuszone nie mogą wyprzedzać wymuszenia, tak drgania samowzbudne regenerowane zawsze są opóźnione względem fali naciętej (przesunięcie fazowe $180^\circ \div 360^\circ$ lub $0 \div -180^\circ$). Praktycznie zakres jest węższy: tym węższy im większa liczba naciętych fal między przejściami ostrzy. Dokładną analizę i fundamentalną krytykę kryterium Liao-Younga podali Tarng i Lee⁴ w 1997r.

Z drugiej strony, ponieważ drgania samowzbudne mają częstość wyższą niż drgania własne, wyniki uzyskane z równania Liao-Younga mogą łatwiej trafiać w optymalne prędkości obrotowe niż uzyskane z równania Smitha-Tlustego. Ponadto habilitant i jego współautorzy podjęli próbę uwzględnienia jednoczesnego oddziaływania reprodukcji drgań (tu obowiązuje omówione ograniczenie

³ I. Bediaga et al., An automatic spindle speed selection strategy to obtain stability in high-speed milling, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) 384–394

Hiromitsu Morita, Toru Yamashita, Tracing and Visualizing Variation of Chatter for In-Process Identification of Preferred Spindle Speeds, Procedia CIRP 4 (2012) 11 – 16

⁴ Y. S. Tarng, E. C. Lee, A critical investigation of the phase shift between the inner and outer modulation for the control of machine tool Chatter, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 37, No. 12, pp. 1661-1672, 1997.

Tamże czytamy: “Based on the above discussion, it is clearly shown that the largest stability limit of the cut width b_{lim} is located at the place where the phase shift is close to 2π and the chatter frequency f_c is equal to the natural frequency of the machine tool structure, In other words, the largest stability limit of the cut width b_{lim} corresponding to the phase shift of $\pi/2$ is incorrect”

przesunięć fazowych) i sprzężenia przez przemieszczenie występujące w układach o wielu stopniach swobody, kiedy to drgania przedmiotu mogą mieć inne przesunięcie fazowe niż narzędzia. Dokonali oni także ciekawej modyfikacji kryterium Liao-Younga odnoszącego się do jednej dominującej częstotliwości drgań samowzbudnych, rozszerzając je na kilka częstotliwości przez wyznaczenie takiej prędkości obrotowej, dla której reszta z dzielenia całkowitego wszystkich występujących częstotliwości drgań przez częstotliwość wchodzenia ostrzy w materiał dąży do 0,25. W kolejnej pracy [C2] uwzględniono ważny problem w zapobieganiu drganiom samowzbudnym, jakim jest brak jednolitości właściwości przedmiotu obrabianego na jego powierzchni. Zaproponowano utworzenie mapy parametrów modalnych przedmiotu umożliwiającej stworzenie mapy optymalnych prędkości obrotowych wyznaczonych zgodnie z kryterium Liao-Younga. Tym razem jednak zamiast częstości drgań samowzbudnych podstawiano częstości drgań własnych, a to prowadzi do wyznaczania prędkości obrotowych bliskich minimum stabilności. Również w [C3] posłużono się częstością drgań własnych. Niestety kryterium Liao-Younga było bezkrytycznie stosowane we wszystkich publikacjach habilitanta. Przedstawiane metody można dość łatwo poprawić, zastępując kryterium Liao-Younga równaniem Smitha-Tlustego (reszta z ww. dzielenia powinna dążyć do zera). W pracach [C1-C3] stosowano ciekawie zaplanowane i zrealizowane eksperymenty, co było głównym wkładem habilitanta.

W kolejnych pracach [C4 i C5] postanowiono zająć się aktywnym tłumieniem drgań po ich wystąpieniu z wykorzystaniem elementu realizującego zadane wymuszenie zależne od sygnału sterującego. Mamy tu jednostronnie podpartą, płaską, cienkościenną płytę z brązu pobudzaną impulsowo do drgań. Na swobodnym końcu płyty mocowano wzbudnik piezoelektryczny wraz z masą sejsmiczną. Postawionym zadaniem było stworzenie algorytmu wyznaczania sygnału sterującego wzbudnikiem, powodującego redukcję drgań. Przedstawione analizy są złożone i wyrafinowane matematycznie. Wykazano uzyskanie znacznego obniżenia bezwymiarowego współczynnika tłumienia. Kolejnym krokiem było zastosowanie opracowanej metodyki przy obróbce podatnego przedmiotu [C6]. Zdecydowano się jednakże jedynie na podawanie na wzbudnik kilka rodzajów sygnałów, np. różne rodzaje szumu i sygnały złożone z sygnałów sinusoidalnych odwzorowujących dominujące pobudzenia w czasie obróbki skrawaniem. Jednocześnie, od tego sygnału odejmowany był sygnał wyznaczony przez algorytm sterowania. Szkoda, że nie zastosowano dwóch wzbudników, by odseparować symulację procesu skrawania od aktywnego tłumienia drgań. W zastosowanej konfiguracji tłumione było już samo wymuszenie. Warto podkreślić, że habilitant stworzył całe stanowisko badawcze, a także oryginalne oprogramowanie autorskie dostosowane do specyfiki prowadzonych badań.

W kolejnych pracach habilitant doszedł do słusznego wniosku, że poza dużą kłopotliwością badań z aktywnym tłumieniem drgań, mają one nikłe szanse na praktyczne zastosowanie w warunkach

przemysłowych ze względu na konieczność mocowania wzbudników i czujników do obrabianych elementów. Postanowił zatem wrócić do wykorzystania kryterium Liao-Younga przy wyznaczaniu optymalnej prędkości obrotowej wrzeciona. Odległość obszarów stabilnej pracy (przestrzeni między workami krzywej stabilności) jest proporcjonalna do odwrotności liczby naciętych fali (k we wzorach Smitda-Tlustego czy Liao-Younga), co oznacza, że zwłaszcza gdy jest ona mała, a obszary stabilnej pracy duże, są one dalekie od siebie. Ograniczenia dopuszczalnej prędkości obrotowej obrabiarki lub trwałości ostrza mogą powodować, że największy obszar (tzw. „sweet spot”) znajduje się znacznie poniżej tych ograniczeń lub znacznie powyżej nich, będąc nieosiągalnym. Obniżenie sztywności narzędzia powoduje przesunięcie poziome obszarów stabilnej pracy, co może być korzystne mimo obniżenia bezwzględnej granicy stabilności. Zjawisko to jest dobrze znane⁵. Habilitant postanowił je wykorzystać konstruując uchwyt podatny o regulowanej sztywności mocowania przedmiotu [C7]. Dzięki temu możliwe jest takie dopasowanie tej sztywności, a co za tym idzie częstotliwości drgań własnych układu, aby dowolna (w zakresie ograniczonym możliwościami regulacji uchwytu) prędkość obrotowa była optymalna z punktu widzenia kryterium Liao-Younga. Niestety autorzy [C7] ograniczyli się do zamodelowania płaskiej, wiotkiej płyty zamocowanej w uchwycie o jednym stopniu swobody, nawet bez próby zbudowania takiego uchwytu. Koncepcja przedstawiona na rys. 1 [C7] jest bardzo uproszczona, laboratoryjna, daleka od praktycznego zastosowania.

Podstawą większości metod przeciwdziałania drganiom samowzbudnym jest identyfikacja właściwości układu masowo-sprężysto-tłumiącego (OUPN). W pracach habilitanta dotyczyło to właściwości podatnego przedmiotu obrabianego. W swoich wyżej omówionych pracach wykorzystywał on szereg znanych metod analizy modalnej, które wykazywały istotne niedostatki. W ostatnich dwóch pracach wchodzących w skład cyklu publikacji [C8, C9] habilitant podjął próbę stworzenia alternatywnej metodyki identyfikacji częstotliwości drgań własnych i współczynników tłumienia. Polega ona na twórczym wykorzystaniu jednej z metod sztucznej inteligencji – algorytmie optymalizacji roju cząstek (Particle Swarm Optimization – PSO). Habilitant zastosował dwuetapową identyfikację – w pierwszym etapie określa się dokładnie częstotliwości drgań, zaś w drugim współczynniki tłumienia. Procedura jest powtarzana dla kolejnych częstotliwości drgań, a uzyskiwane wyniki znacznie dokładniejsze niż otrzymywane znanymi metodami. Opracowana metodyka jest moim zdaniem najistotniejszym osiągnięciem habilitanta spośród przedstawionych w cyklu publikacji, tym bardziej cennym, że jedynym, w którym jest on wyłącznym autorem.

⁵ <http://www.mmsonline.com/articles/the-overhang-effect>

3. Ocena istotnej aktywności naukowej

Dr M. A. Galewski rozpoczął swoje badania naukowe bezpośrednio po studiach w 2003 roku. Od początku zajmował się zagadnieniami związanymi z nadzorowaniem drgań podczas procesu frezowania smukłymi narzędziami. Przed doktoratem opublikował 15 artykułów, miał też 15 wystąpień na konferencjach. Pracę doktorską obronił w 2007 z wyróżnieniem. Był współautorem rozdziałów w sześciu monografiach wydawanych przez Katedrę Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH.

Przez wiele lat, wraz z współpracownikami kontynuował swoje zainteresowania związane z nadzorowaniem drgań samowzbudnych, czego wynikiem jest omówiony wyżej dorobek habilitacyjny. Wyniki prac prezentowane były w 29 referatach, w tym 10 wygłoszonych osobiście. Był współautorem dwóch wartościowych publikacji z bazy JCR (poza habilitacyjnymi), oraz dziesięciu innych publikacji, a także monografii na temat nadzorowania drgań przy frezowaniu ze zmienną prędkością obrotową, oraz rozdziałów w dwunastu monografiach wydawanych przez Katedrę Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH. Na szczególną uwagę zasługuje artykuł "Chatter vibration surveillance by the optimal-linear spindle speed control" Mechanical Systems and Signal Processing 25 (2011) 383–399, w którym habilitant wraz ze współautorami zajęli się tłumieniem drgań samowzbudnych metodą ciągłych zmian prędkości obrotowej wrzeciona, a więc tematyką wychodzącą poza zakres objęty w cyklu habilitacyjnym.

Sumaryczny Impact Factor według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania wynosi 10,832, w tym dla cyklu będącego podstawą habilitacji 8,745. Liczba cytowań wg Google Scholar to 52, wg WoS 27. Indeks Hirsha wg Google Scholar to 4, wg WoS 3. Nie są to wyniki imponujące, zwłaszcza jeśli chodzi o dorobek poza cyklem publikacji przedstawionym jako osiągnięcie naukowe, ale wystarczający do wypełnienia niezbędnego minimum.

Ponadto dr M. A. Galewski kierował kilkoma grantami, otrzymał dwie nagrody Rektora PG za działalność naukową, opracował szereg programów komputerowych w LabVIEW. Wyrazem uznania dla poziomu naukowego habilitanta jest zapraszanie go do recenzowania artykułów w czasopismach krajowych, a zwłaszcza zagranicznych z listy JCR – 3 artykuły.

Całokształt dorobku naukowego Kandydata oceniam pozytywnie.

4. Ocena dorobku dydaktycznego i organizacyjnego

Dr M. A. Galewski przed doktoratem nie prowadził zajęć dydaktycznych, zajmował się opieką nad laboratoriami oraz stroną www Wydziału. Po doktoracie brał udział w organizacji pięciu konferencji naukowych. Pełni również różne funkcje organizacyjne na wydziale. Na wyróżnienie zasługuje duża aktywność dydaktyczna - przygotował od podstaw, a następnie prowadził dziewięć nowych przedmiotów dla Mechatroniki oraz Inżynierii Mechaniczno-Medycznej. Opracował koncepcje i zorganizował kilka

pracowni dydaktycznych. Jest autorem podręcznika dotyczącego programowania systemów wbudowanych. Był promotorem 42 prac inżynierskich i 19 magisterskich. Otrzymał cztery nagrody Rektora PG za działalność dydaktyczną.

Całokształt dorobku dydaktycznego i organizacyjnego Kandydata oceniam bardzo pozytywnie.

5. Wniosek końcowy

W oparciu o dokonaną ocenę przedłożonego jednolitego cyklu publikacji, całokształtu dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego Kandydata stwierdzam, iż aktywność naukowa oraz wkład dr M. A. Galewskiego w rozwój budowy i eksploatacji maszyn są wystarczające do ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

Wnioskuje o nadanie dr inż. M. A. Galewskiemu stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych, w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jemielnicki KR', is positioned in the lower right area of the page.