prof. dr hab. inż. Jerzy Świder
Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Automatyzacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, tel.: (032)237-24-60

SEKRETARIAT WYDZIAŁU
Wpłynęło dnia: 27.05.2022
L. dz. .....
podpis .....

Gliwice, 20.05.2022 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Stawickiej - Morawskiej
pt. „Metoda doboru sztywności zamocowania przedmiotu wielkogabarytowego w zastosowaniu do redukcji drgań podczas frezowania narzędziami wieloostrzowymi"

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Gdańskiej,
prof. dr. hab. inż. Michała Wasilczuka,
z dnia 13.04.2022 r.,
wynikające z uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej

1. Uwagi ogólne

Drgania mechaniczne w budowie i eksploatacji maszyn są bardzo ważnym zagadnieniem badawczym, o istotnej warstwie naukowej i szerokich aspektach utylitarnych. Procesy drganiowe towarzyszą praktycznie wszystkim działaniom maszyn technologicznych, transportowych czy przetwarzających energię, na wszystkich etapach przekazywania i przekształcania strumienia mocy. Drgania powstają w maszynach w wyniku działania ich wszystkich podukładów, a w szczególności układów napędowych, przekładni, podukładów wykonawczych, a także w wyniku wzajemnego oddziaływania maszyny z otoczeniem. Zjawiska związane z drganiami albo stanowią użyteczną podstawę ich funkcjonowania, albo są niepożądane, powodując zagrożenie dla samych maszyn, jakości realizowanego procesu oraz obsługi i otoczenia. Konieczność ingerowania przez człowieka w układ techniczny oraz sam proces, w celu obniżania poziomu drgań, zarówno na etapie projektowania maszyn, jak i na etapie ich eksploatacji, jest dawno rozpoznana i stanowi ważny obszar naukowo-badawczy, mieszczący się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Szczególną grupą maszyn technologicznych narażonych na powstawanie drgań mechanicznych, powodujących zagrożenie dla jakości realizowanego procesu, są obrabiarki. Cechy obrabianego tworzywa, parametry procesu obróbki ubytkowej, cechy geometryczne obrabianych przedmiotów, sposoby ich mocowania, a także rodzaje użytych narzędzi i ich stan mają istotny wpływ na poziom generowanych drgań przez te układy techniczne, a przez to na jakość powierzchni obrabianych przedmiotów.

Dobór skutecznych środków redukcji drgań maszyn wymaga równoległego prowadzenia badań doświadczalnych maszyny i procesu, jak również badań teoretycznych w obszarze tworzenia ich modeli matematycznych, rozwiązywania tych modeli oraz prowadzenia zaawansowanych symulacji numerycznych. Te działania muszą być w stałej interakcji niemal na każdym etapie procesu projektowo-konstrukcyjnego oraz procesu eksploatacyjnego i wymagają rozwiązywania problemów badawczych, jak i zagadnień trudnej sztuki modelowania układów i procesów oraz komputerowych symulacji tworzonych modeli.

Doktorantka wnikliwie zapoznała się z obecnym stanem wiedzy w tym zakresie i uznała, że wśród istniejących i stosowanych metod w tym obszarze bark jest metody opartej na zaletach projektowania mechatronicznego, związanej z wirtualnym prototypowaniem wspomaganym eksperymentem. Na tej podstawie Doktorantka sformułował ważny naukowo i praktycznie cel i zakres swoich badań, jako *„opracowanie nowej metody redukcji drgań narzędzie – przedmiot obrabiany podczas frezowania przedmiotów wielkogabarytowych narzędziami wieloostrzowymi"*.

2. Ocena rozprawy

Autorka zawarł swoją pracę na 144 stronicach i podzielił ją na 9 głównych rozdziałów i 34 podrozdziały, uzupełnione wykazem 126 pozycji literatury. Najstarsza cytowana publikacja była wydana w 1975 roku, natomiast najnowsze publikacje - w roku 2021. Ponad 70 % cytowanych pozycji literatury to pozycje angielskojęzyczne. Dziewięć z cytowanych pozycji to pozycje współautorstwa Doktorantki. Na końcu pracy Doktorantka zamieścił spis 18 tablic oraz 45 rysunków, natomiast spis treści poprzedziła wykazem ważniejszych skrótów i oznaczeń.

Po krótkim wstępie Doktorantka sformułowała cel i zakres pracy, uzasadniła celowość podjęcia tematu, a następnie postawiła dwie tezy rozprawy:

1) *„Dopasowanie wartości współczynników sztywności zamocowania przedmiotu wielkogabarytowego prowadzi do redukcji drgań narzędzie – przedmiot obrabiany w procesie frezowania powierzchni płaskich narzędziem wieloostrzowym".*
2) *„Minimalizacja pracy sił skrawania na kierunku szerokości warstwy podczas frezowania powierzchni płaskich narzędziami wieloostrzowymi, z uwzględnieniem wielu ostrzy będących w kontakcie z przedmiotem wielkogabarytowym, skutkuje redukcją drgań przedmiotu".*

Dowód postawionych tez Doktorantka postanowiła przeprowadzić poprzez realizację trzech celów szczegółowych, związanych z opracowaniem sposobu nadzorowania drgań podczas frezowania wielkogabarytowych przedmiotów za pomocą technik projektowania mechatronicznego, z uwagi na minimalizację pracy sił skrawania na kierunku szerokości warstwy skrawanej, a także poprzez weryfikację opracowanej metodyki redukcji drgań z zastosowaniem symulacji komputerowych i badań doświadczalnych na rzeczywistym obiekcie w postaci nowoczesnego centrum obróbczego.

Drugi rozdział pracy to osiemnastostronicowy przegląd literatury, obejmujący: krótkie omówienie stosowanej terminologii, podstawy zagadnień frezowania czołowego, zagadnienie drgań samowzbudnych w procesie frezowania, współczesne tendencje prowadzenia procesu obróbki frezowaniem, szczególnie obiektów wielkogabarytowych na obrabiarkach ciężkich oraz omówienie stosowanych metod nadzorowania drgań mechanicznych podczas frezowania. W podsumowaniu rozdziału drugiego Doktorantka stwierdziła, że brak jest w dostępnej literaturze rozwiązań w zakresie nadzorowania drgań układu narzędzie – obrabiany przedmiot, poprzez dobór odpowiedniej sztywności zamocowania przedmiotu w procesie obróbki elementów wielkogabarytowych na współczesnych centrach obróbczych, decydującej o poziomie drgań wzbudzanych siłami o harmonicznie zmiennych składowych.

Rozdział trzeci Doktorantka poświęciła opisowi modelu dynamiki niestacjonarnego procesu frezowania czołowego przedmiotów wielkogabarytowych, z uwzględnieniem ich podatności. Niestacjonarność modelu tego procesu wynika z założonej zmiennej w czasie konfiguracji układu oraz zmieniających się w czasie wartości parametrów układu. Doktorantka przyjęła, że dominującym kierunkiem powstających drgań mechanicznych podczas czołowego frezowania

wielkogabarytowych przedmiotów jest kierunek szerokości warstwy skrawanej. Uwzględniła w modelu zadaną prędkość obrotową wieloostrzowego freza oraz zadaną prędkość posuwu stołu z zamocowanym przedmiotem, podatność obrabianego przedmiotu, elementy sprzęgające w punktach kontaktu ostrzy freza z obrabianym przedmiotem, zależne od chwilowej grubości i szerokości warstwy skrawanej, a także siły skrawania w elementach sprzęgających, uwzględniając efekt wielokrotnej regeneracji śladu. W zaproponowanym przez Doktorantkę modelu procesu frezowania zostały uwzględnione nieliniowe związki pomiędzy wielkościami opisującymi geometrię warstwy skrawanej oraz powstającymi w tym procesie siłami skrawania. Autorka utworzyła hybrydowy model procesu frezowania czołowego, zawierający podukład strukturalny (zbudowany z elementów SES połączonych elementami EST), opisany macierzami bezwładności, tłumienia lepkiego i sztywności, a także układ modalny, jako stacjonarny model MES obrabianego przedmiotu, z więzami w postaci elementów EST, opisany we współrzędnych modalnych. Wobec tak przyjętego modelu Doktorantka zbudowała macierzowe, niestacjonarne, niejednorodne równanie różniczkowe dynamiki procesu frezowania we współrzędnych hybrydowych, ograniczając liczbę uwzględnianych pierwszych postaci drgań do kilkunastu.

W rozdziale czwartym Doktorantka dokonała bardzo krótkiego przeglądu znanych metod redukcji drgań poprzez symulacje utworzonego modelu obliczeniowego procesu skrawania, z zastosowaniem: szybkiego, wirtualnego prototypowania (także wspomaganego eksperymentem), z użyciem uproszczonego modelu obliczeniowego; metody HiLS; symulacji sprzętowej dynamiki procesu frezowania, z zastosowaniem układów FPGA (Field Programmable Gate Array) lub elektronicznych układów analogowych; połączenie metody HiLS z układami czasu rzeczywistego FPGA.

Ważnym rozdziałem dysertacji jest rozdział piąty, w którym Autorka zaproponowała metodę minimalizacji poziomu wzbudzanych drgań w procesie frezowania poprzez minimalizację pracy sił skrawania w kierunku szerokości skrawanej warstwy obrabianego materiału. Po dokonanych założeniach upraszczających Doktorantka przyjęła postać funkcji opisującej pracę sił skrawania na kierunku szerokości warstwy skrawanej jako funkcji celu, której minimalizacja może wskazać zoptymalizowane parametry zamocowania frezowanego przedmiotu na stole frezarki.

Dziewiętnastostronicowy rozdział szósty pracy Autorka poświęciła technice wirtualnego prototypowania procesu czołowego frezowania wielkogabarytowych przedmiotów, wspomaganego eksperymentem. Doktorantka przyjęła żeliwny obiekt badań o masie 175 kg, poddawany obróbce ubytkowej na portalowym centrum obróbkowym MIKOMAT 20V, zainstalowanym w firmie PHS HYDROTOR S.A. Przyjęty obiekt został poddany badaniom doświadczalnym poziomu drgań względnych w kierunku normalnym do obrabianej powierzchni, w umownym punkcie styku narzędzia z przedmiotem, a także badaniom modalnym z użyciem standardowego młotka modalnego i 16 akcelerometrów DJB. Do modyfikacji parametrów modelu modalnego Doktorantka użyła autorskiego programu komputerowego Springs.exe oraz narzędzi MEDINA i PERMAS. Kluczowym zagadnieniem było tu poszukiwanie zoptymalizowanych wartości współczynników sztywności elementów mocujących. W efekcie Doktorantka wyznaczyła parametry modalnego modelu zamocowanego na obrabiarce elementu. Po wyznaczeniu częstości i postaci drgań własnych zidentyfikowanego modelu MES Autorka dokonała syntezy modelu modalnego elementu z elementami sprężystymi podpór. W odniesieniu do sześciu postaci drgań własnych, w przypadku których współczynniki MAC (Modal Assurance Criterion) zgodności modelu MES obiektu i obiektu rzeczywistego były bliskie jeden, Doktorantka przeprowadziła symulacje komputerowe. W tym też rozdziale Autorka opisała i zilustrowała swoje działania w zakresie zaprojektowania i wykonania specjalnych podpór elementu obrabianego, umożliwiających ustawianie, za pomocą śruby nastawnej, różnej wartości współczynnika sztywności zamocowania

w kierunku normalnym do powierzchni stołu obrabiarki, identyfikowanego doświadczalnie z użyciem maszyny wytrzymałościowej Zwick. Tak przygotowany obiekt i model zostały poddane procesowi wirtualnego prototypowania, wspomaganego eksperymentem. Wartości współczynników siły skrawania i bezwymiarowych współczynników tłumienia Autorka przyjęła arbitralnie, zakładając najmniej korzystne warunki. Doktorantka przeprowadziła 125 cykli symulacji numerycznych, zakładając trzy podpory mocujące przedmiot, o regulowanej sztywności, w postaci elementów EST. Wskaźnikami umożliwiającym ocenę rozwiązań były trzy wartości przemieszczeń drgań względnych podczas frezowania, w układzie narzędzie – przedmiot obrabiany: wartość skuteczna przemieszczeń, wartość średnia przemieszczeń, wartość maksymalna przemieszczeń. W każdym przypadku Doktorantka zidentyfikowała najkorzystniejsze parametry zamocowania obrabianego przedmiotu, prowadzące do obniżenia poziomu rejestrowanych drgań.

Rozdział siódmy dysertacji dotyczy zagadnień, związanych z minimalizacją pracy sił skrawania w procesie frezowania czołowego. W tym przypadku kryterium minimalizacji drgań względnych podczas frezowania na portalowym centrum obróbkowym MIKOMAT 20V, w układzie narzędzie – wielkogabarytowy przedmiot obrabiany, było minimum pracy sił skrawania na kierunku szerokości skrawanej warstwy. Doktorantka przeprowadziła, na rzeczywistym układzie, testy modalne, z częstotliwością próbkowania 15 kHz, stosując standardowy młotek modalny, 15 akcelerometrów piezoelektrycznych oraz środowisko LabVIEW. Dokonując zmiany momentu dokręcenia śrub mocujących w przedziale wynikającym z praktyki produkcyjnej, Doktorantka wyznaczyła widmowe funkcje przejścia FRF (Frequency Response Function). W przypadku każdej konfiguracji zamocowania przedmiotu obrabianego, Doktorantka wyznaczyła wartości częstotliwości zidentyfikowanych maksimów lokalnych widm zarejestrowanych przebiegów przemieszczeń i przyspieszeń drgań. Następnie Doktorantka przyjęła szczegółowe parametry obróbki i przystąpiła do badań przyśpieszeń drgań punktu na środku obrabianego przedmiotu, w zależności od momentu dokręcenia śrub mocujących przedmiot, identyfikując moment o wartości 50 Nm, przy którym praca sił skrawania była najmniejsza, co pozwoliło na prognozowanie optymalnej konfiguracji zamocowania obrabianego przedmiotu.

Zawierający 21 stronic, ostatni przed podsumowaniem w postaci wniosków końcowych, ósmy rozdział pracy doktorskiej dotyczy badań, które Doktorantka przeprowadziła, w warunkach przemysłowych, podczas frezowania czołowego wielkogabarytowego przedmiotu, przy różnych wariantach sztywności jego zamocowania. Głównym celem tych badań było dokonanie oceny poprawności prognozowania optymalnych warunków mocowania przedmiotu ze względu na kryterium minimalizacji poziomu drgań. Badania te dostarczyły także Doktorantce danych, niezbędnych do zidentyfikowania parametrów modelu symulacyjnego tego procesu. Autorka przeprowadziła wiele eksperymentów frezowania dwóch powierzchni badanego elementu, zgodnie z warunkami procesu technologicznego, obowiązującymi w firmie PHS HYDROTOR, rejestrując przyspieszenia i wyznaczając przemieszczenia drgań wybranych punktów układu, przy różnych wartościach momentu dokręcenia śrub, mocujących obrabiany przedmiot. W tym też rozdziale Doktorantka oceniła opłacalność zaproponowanej przez Nią metody prognozowania optymalnych warunków mocowania przedmiotu, prowadzącej do wyeliminowania konieczności dokonywania przejść kontrolnych, a przez to do ponad osiemdziesięcioprocentowego skrócenia normy czasu jednostkowego i zmniejszenia ilości zużywanego materiału w procesie frezowania, przy jednoczesnym poprawieniu jakości produktu.

Rozdział dziewiąty dysertacji to trzy stronice wniosków końcowych Doktorantki, wynikających z prowadzonych badań.

3. Uwagi krytyczne

Rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Stawickiej - Morawskiej zawiera, we właściwych proporcjach, wszystkie elementy oczekiwane w tego typu pracach, a więc: studium współczesnej literatury przedmiotu, sformułowanie na tej podstawie celu badawczego, postawienie tezy rozprawy, utworzenie laboratoryjnej bazy badawczej, opis sposobu prowadzenia badań i analizę wyników doświadczalnych, identyfikację parametrów fizykalnych obiektu, niezbędnych do zbudowania odpowiedniego modelu symulacyjnego, weryfikację doświadczalną wyników symulacji, zaproponowanie własnej metody prognozowania optymalnych, ze względu na przyjęte kryteria, warunków mocowania przedmiotu, weryfikację wyników symulacji poprzez ich potwierdzenie w badaniach doświadczalnych, właściwe wnioskowanie, w tym także w odniesieniu do dowiedzenia słuszności postawionych tez rozprawy, a także wskazanie obszarów dalszych badań, niezbędnych do znalezienia rozwiązań problemów nie objętych zakresem przeprowadzonych analiz.

Nie znalazłem w pracy żadnych uchybień merytorycznych ani formalnych. Drobne korekty edytorskie naniosłem na egzemplarzu pracy. Natomiast przedstawione w dalszej części recenzji uwagi mają charakter dyskusyjny i oczekiwałbym udzielenia przez Doktorantkę odpowiedzi na postawione pytania.

1) W rozdziale 6.2 Doktorantka opisała sposób wyznaczenia sztywności podpór przedmiotu obrabianego. Stosowane były trzy podpory o takiej samej postaci konstrukcyjnej. Czym zatem jest spowodowana zasadnicza różnica sztywności podpory nr 2 (około 9,6 kN/mm) i sztywności podpór nr 1 i nr 3 (około 15 kN/mm)?

2) Jaka była wartość obciążenia w trakcie wyznaczania sztywności podpór i czy wartość ta była zbliżona do obciążenia wynikającego z ciężaru przedmiotu obrabianego? W tym przypadku najlepiej byłoby wyznaczyć sztywność w odniesieniu do szerszego zakresu obciążenia, w celu uniknięcia błędu wynikającego z nieliniowej charakterystyki sztywności podpór.

3) W celu wykazania zasadności stosowania podpór o zmiennej sztywności, w rozdziale 6.3 oczekiwanym przeze mnie byłoby przeprowadzenie procedury wirtualnego prototypowania w odniesieniu do przedmiotu podpartego „sztywno", bez dodatkowych podpór podatnych. Wyniki takich obliczeń byłyby ciekawe, szczególnie ze względu na to, że w pracy najlepsza konfiguracja zamocowania przedmiotu obrabianego została uzyskana przez Doktorantkę przy maksymalnej sztywności dwóch z trzech zastosowanych podpór.

4) W rozdziale ósmym Doktorantka przedstawiła wyniki badań, które miały umożliwić weryfikację skuteczności metod nadzorowania drgań z wykorzystaniem różnych sztywności zamocowania przedmiotu obrabianego. Z treści rozdziału wynika natomiast, że nie zmieniano sztywności podpór, a jedynie momenty dokręcenia śrub mocujących przedmiot obrabiany. Nie zostało to w żaden sposób skomentowane. Nie znalazłem informacji o liczbie śrub mocujących ani o wyborze miejsca mocowania na obrabianym przedmiocie.

5) W rozdziale 6.3 (str. 69) Autorka podała najniższe wartości przemieszczeń (wskaźnik $RMS_{95\%}$) w μm, z dokładnością do pięciu miejsc po przecinku. Są to wartości niemierzalne. Jeżeli małe różnice wartości przemieszczeń są używane do porównania i wyboru najlepszej konfiguracji sztywności podpór, może okazać się, że z praktycznego punktu widzenia sztywność podpór nie miałaby znaczenia. Jaka zatem była największa osiągnięta wartość wskaźnika $RMS_{95\%}$?

6) W swojej pracy Doktorantka używa określenia *„podpory o regulowanej sztywności"*. Opisane podpory charakteryzują się natomiast nastawialną, zmienną sztywnością i nie jest chyba w tym przypadku uzasadnione używanie tu słowa *„regulowanej"*.

7) Co rozumie Doktorantka, pod użytym na str. 22 sformułowaniem: *„drgania przedmiotu obrabianego można zredukować, wybierając właściwą prędkość wrzeciona tak, aby częstotliwość wzbudzenia odpowiadała częstotliwości drgań rezonansowych przedmiotu"*.

4. Wniosek końcowy

Podjęty przez Doktorantkę temat jest ważnym problemem badawczym w zakresie trudnego do pełnego, analitycznego ujęcia, procesu frezowania wielkogabarytowych przedmiotów. Jest to zagadnienie naukowo-badawcze o istotnym znaczeniu praktycznym i ekonomicznym, mieszczące się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Doktorantka, po analizie literaturowej obszaru zainteresowań dysertacji, sformułowała jej cel jako opracowanie nowej metody redukcji drgań narzędzie – przedmiot obrabiany podczas frezowania narzędziami wieloostrzowymi przedmiotów wielkogabarytowych. Bardzo ważnym elementem pracy jest dostrzeżenie możliwości i zastosowanie w tym przypadku metodyki projektowania mechatronicznego, w postaci wirtualnego prototypowania, wspomaganego eksperymentem.

Na podkreślenie zasługuje bardzo obszerny program badań, wykonanych przez Doktorantkę w warunkach przemysłowych, na współczesnym centrum obróbczym, z zachowaniem obowiązujących założeń i wymagań procesu technologicznego, realizowanego we współpracującej z Nią Firmie.

Stwierdzam, że mgr inż. Natalia Stawicka - Morawska udowodniła w swojej Dysertacji, że potrafi jednoznacznie sformułować cel badań, zaplanować i przeprowadzić konieczne badania doświadczalne, a także badania z zastosowaniem metod numerycznych, budując w efekcie proces wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem, a także wyciągnąć na tej podstawie użyteczne wnioski.

Biorąc pod uwagę uzyskane efekty recenzowanej pracy doktorskiej mgr inż. Natalii Stawickiej - Morawskiej pt. „Metoda doboru sztywności zamocowania przedmiotu wielkogabarytowego w zastosowaniu do redukcji drgań podczas frezowania narzędziami wieloostrzowymi" stwierdzam, że mieszczą się one w obszarze zainteresowań dyscypliny inżynieria mechaniczna, a opiniowana praca może być podstawą nadania stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych, zgodnie z ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r. (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789, z późniejszymi zmianami), i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Natalii Stawiskiej - Morawskiej pt. „Metoda doboru sztywności zamocowania przedmiotu wielkogabarytowego w zastosowaniu do redukcji drgań podczas frezowania narzędziami wieloostrzowymi"

Biorąc pod uwagę następujące elementy ocenianej rozprawy doktorskiej:

- jej wysoki poziom merytoryczny, wynikający z konieczności zintegrowania badań doświadczalnych drgań w procesie frezowania wielkogabarytowego przedmiotu na trudnym obiekcie w postaci portalowego centrum obróbkowego, z utworzonym modelem matematycznym, identyfikacją parametrów modelu obliczeniowego, weryfikacją tego modelu i symulacjami komputerowymi zidentyfikowanego modelu, w procesie wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem,
- ogromny nakład pracy badawczej Doktorantki, prowadzonej w realnych warunkach produkcyjnych,
- opracowanie oryginalnej, praktycznie użytecznej metody redukcji drgań układu narzędzie – przedmiot obrabiany, podczas frezowania przedmiotów wielkogabarytowych narzędziami wieloostrzowymi,
- przejrzyste skomponowanie treści pracy i jej bardzo staranną edycję,

a także istotny dorobek publikacyjny Autorki dysertacji, w postaci współautorstwa ośmiu publikacji (lata 2017 – 2021), z których 3 zostały opublikowane w wysoko punktowanych czasopismach z listy A MEiN (140 punktów, IF = 5,133; 140 punktów, IF = 3,623; i 100 punktów, IF = 2,258) oraz współautorstwo międzynarodowego zgłoszenia patentowego (2018 r.), świadczący o ponadprzeciętnej aktywności naukowej Doktorantki,

wnioskuję o wyróżnienie ocenianej rozprawy doktorskiej.