Dr hab. inż. Szymon WOJCIECHOWSKI, prof. PP
Zakład Obróbki Skrawaniem
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Poznańska

Poznań, dnia 21.09.2023

Recenzja nr 04/dr/SJW

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jana Tomaszewskiego pt. *Projekt i budowa inteligentnego wrzeciona tokarskiego*

Podstawa opracowania recenzji: pismo WIMiM/403/2023 Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego prof. dr. hab. inż. Mirosława Pajora z dnia 14.09.2023 r. i stosowna umowa o dzieło.

1. Tematyka rozprawy

W ujęciu ogólnym, tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy opracowania projektu i budowy Inteligentnego Wrzeciona Tokarskiego umożliwiającego wykrywanie i przeciwdziałanie występowaniu drgań samowzbudnych w procesie toczenia. Pomimo faktu, iż tematyka dotycząca dynamiki procesów skrawania była na przełomie kilkudziesięciu ostatnich lat przedmiotem licznych badań i publikacji, aktualność i oryginalność tematu podjętego przez mgr. inż. Jana Tomaszewskiego nie budzi wątpliwości. W tym miejscu należy podkreślić, że zdecydowana większość badań dotyczących dynamiki procesu skrawania skupia się głównie na rozwijaniu dynamicznych modeli składowych siły całkowitej oraz predykcji stabilności dynamicznej różnych sposobów skrawania z uwzględnieniem zróżnicowanych parametrów i metod. W związku z tym, podjęta przez mgr. inż. Jana Tomaszewskiego tematyka wypełnia istotną lukę w obszarze dynamiki skrawania, skupiając się na opracowaniu praktycznej metody wykrywania i przeciwdziałania drganiom samowzbudnym, wdrożonej na tokarce.

W związku z tym podjętą tematykę rozprawy oceniam bardzo pozytywnie. Niewielkie moje zastrzeżenie dotyczy natomiast nadmiernego uogólnienia sformułowanego tematu, który w pełni nie odzwierciedla podjętej tematyki. W mojej opinii temat mógłby brzmieć następująco: ***Projekt i budowa inteligentnego wrzeciona tokarskiego do wykrywania i przeciwdziałania występowaniu drgań samowzbudnych podczas toczenia.***

2. Ogólna ocena treści, układu i zakresu rozprawy

Rozprawa liczy 111 stron i składa się z 8 zasadniczych rozdziałów oraz wykazu ważniejszych skrótów i oznaczeń, spisu treści w języku polskim, streszczeń w języku polskim i angielskim, spisu ilustracji i tabel oraz spisu literatury obejmującego 81 pozycji.

W rozdziale pierwszym rozprawy, Autor przedstawia aktualny stan zagadnienia w oparciu o wyniki prac różnych badaczy. W pierwszej części tego rozdziału omówiono podstawowe definicje dotyczące toczenia oraz podziału drgań mechanicznych w procesie skrawania. W mojej opinii charakterystyka ta została przeprowadzona w sposób prawidłowy, jednakże mogłaby być uzupełniona o omówienie drgań rezonansowych oraz parametrycznych, które

są również spotykane w procesach skrawania. W kolejnym podrozdziale przedstawiono charakterystykę drgań samowzbudnych w procesach skrawania, skupiając się głównie na zarysie historycznym i ewolucji metod naukowych dotyczących badania tej odmiany drgań. W podrozdziałach 1.3 i 1.4 Autor poddaje charakterystyce odmiany drgań samowzbudnych i opisuje mechanizmy ich powstawania, stosując w tym celu schematy graficzne i równania matematyczne. W mojej opinii podrozdziały te mają bardzo dużą wartość merytoryczną i pozwalają w przystępny sposób zapoznać się czytelnikowi ze złożonym problemem badania i modelowania drgań samowzbudnych, na bazie najważniejszych prac naukowych z tej tematyki.

W rozdziale 2 rozprawy Autor opisuje – w oparciu o przegląd literatury – sposoby przeciwdziałania drganiom samowzbudnym, ujmując stosowane w tym celu: modyfikacje strukturalne oraz technologiczne, a także omawiając strategie off-line i on-line. Treść tego rozdziału (przedstawiającego przegląd literatury) koresponduje bezpośrednio z tematyką pracy, a w ten sposób dostarcza bardzo istotnej oraz aktualnej wiedzy o problemie przeciwdziałania drganiom samowzbudnym, wskazując również na aktualne luki badawcze.

Podsumowując rozdziały 1 i 2 rozprawy – przedstawiające aktualny stan zagadnienia – mogę stwierdzić, iż Autor w sposób interesujący dla czytelnika i merytoryczny przedstawił odmiany drgań samowzbudnych, mechanizmy ich powstawania oraz sposoby przeciwdziałania powstawaniu tych drgań. Niemniej jednak celem dalszego zwiększenia aktualności przedstawionego przeglądu literatury można byłoby omówić większą liczbę najnowszych badań dotyczących badania/modelowania dynamiki skrawania. W tym miejscu warto podkreślić, iż spośród wszystkich zacytowanych w rozprawie publikacji jedynie około 30% stanowią prace opublikowane w ostatnim dziesięcioleciu.

W rozdziale 3 pracy, Autor sformułował cel pracy. Przytaczając za Autorem:
„Celem niniejszej pracy jest zbudowanie Inteligentnego Wrzeciona Tokarskiego. Inteligentne Wrzeciono Tokarskie powinno pozwolić na wykrywanie drgań samowzbudnych w czasie quasi-rzeczywistym (ok. 1 s),, a następnie na autonomiczną korekcję wybranych parametrów obróbki w celu zwiększenia stabilności procesu. Z tytułu realizacji pracy w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy", opracowane rozwiązanie techniczne powinno cechować się łatwością implementacji w warunkach przemysłowych oraz prostotą obsługi z punktu widzenia operatora maszyny."

W pracy nie sformułowano natomiast hipotezy badawczej, lecz zdefiniowano 6 zadań cząstkowych, których wykonanie umożliwi osiągnięcie założonego, głównego celu. Sformułowany przez Autora cel rozprawy jest jednoznaczny i wykazuje istotne znamiona poznawcze oraz pragmatyczne. Należy również podkreślić, iż założony cel jest ambitny i wskazuje na kompleksowość badań własnych, obejmujących: doświadczalne analizy modalne, budowę modelu matematycznego i symulacje MES wrzeciennika, projekt modyfikacji wrzeciennika, pomiary wielkości fizycznych w procesach skrawania, a także opracowanie i wdrożenie algorytmu decyzyjnego w maszynie.

W rozdziale 4 Autor charakteryzuje obiekt badań, czyli poziomą tokarkę CNC o oznaczeniu TAE-35N produkcji AFM DEFUM. S.A. W niniejszym rozdziale przedstawiono najważniejsze parametry techniczne i geometryczne obrabiarki, budowę standardowego wrzeciennika, a także strukturę geometryczno-ruchową tokarki.

Rozdział 5 rozprawy dotyczy projektu Inteligentnego Wrzeciona Tokarskiego i stanowi jeden z najbardziej obszernych i najważniejszych merytorycznie rozdziałów pracy.

W pierwszej części tego rozdziału opisano eksperymentalną analizę modalną modyfikowanego wrzeciennika, obejmującą opis przeprowadzonego testu impulsowego wraz z prezentacją (tabelaryczną i graficzną) uzyskanych wyników. W kolejnym podrozdziale opisano szczegółowo oryginalny i autorski model matematyczny wrzeciennika, uwzględniający zastępczy model węzłów łożyskowych oraz ortotropowy model materiału. W efekcie modelowania stworzono globalny model MES wrzeciennika tokarki. W dalszej części tego rozdziału porównano postaci drgań własnych oraz funkcje receptancji uzyskane z symulacji MES oraz z eksperymentu. Wartym podkreślenia jest fakt, iż otrzymane wartości parametrów dynamicznych modelu MES są bardzo zbliżone do wartości zmierzonych doświadczalnie, co podkreśla prawidłowość przyjętych przez Autora modeli matematycznych/procedur oraz stanowi bardzo istotną wartość naukową pracy. [redacted]

W rozdziale 6 pracy, Autor przedstawił projekt Inteligentnego Wrzeciona Tokarskiego. [redacted]

[redacted]

Podsumowując treść rozdziałów 5 i 6 należy stwierdzić, iż stanowią one najważniejsze merytorycznie rozdziały pracy i posiadają istotne walory naukowe oraz pragmatyczne, stanowiące niewątpliwie wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna.

W rozdziale 7 Autor przedstawił testy weryfikujące działanie Inteligentnego Wrzeciona Tokarskiego. [redacted].

W rozdziale 8 pod tytułem *Podsumowanie*, Autor przedstawił w syntetyczny sposób najważniejsze konkluzje z przeprowadzonych badań, a także sformułował wniosek, że cel pracy został osiągnięty. Moim zdaniem osiągnięte wyniki badań można byłoby ukazać w bardziej przejrzystej formie gdyby zostały podzielone na: wnioski poznawcze, utylitarne oraz do dalszych badań.

Ogólna kompozycja rozprawy zasługuje na ocenę pozytywną. Autor poprawnie przyjął kolejność rozdziałów i w większości przypadków dokonał prawidłowego podziału treści na rozdziały i podrozdziały. Praca zrealizowana jest również na wysokim poziomie językowym i edycyjnym (jedynie nieliczne błędy), co wpływa pozytywnie na poczytność rozprawy i zrozumienie treści. W pracy występują pewne drobne nieścisłości dotyczące terminologii stosowanej w obróbce skrawaniem. Niemniej, niedoskonałości te mają znaczenie drugorzędne, i nie umniejszają znaczących walorów naukowych pracy.

Podsumowując ogólną ocenę treści rozprawy chciałbym przedstawić jej najważniejsze zalety naukowe, wskazujące jednocześnie na osiągnięcia o charakterze naukowym oraz wdrożeniowym Autora:

- kompleksowe podejście do problemu badawczego obejmujące szerokie badania doświadczalne (np. wyznaczanie właściwości dynamicznych badanych układów, dobór lokalizacji i typu czujników, pomiary drgań w trakcie obróbki, walidacja systemu, itd.), modelowanie analityczne i numeryczne w oparciu o oryginalne i autorskie modele (np. model drgań samowzbudnych, model MES wrzeciennika, [redacted]), a także działania projektowe i konstrukcyjne ([redacted], opracowanie – wraz z oprogramowaniem – systemu inteligentnego wrzeciona tokarskiego),

[redacted]
- bardzo duża wartość pragmatyczna opracowanego oryginalnego systemu inteligentnego wrzeciona tokarskiego [redacted]. Wartym podkreślenia jest fakt, iż opracowany system ma bardzo istotne znaczenie praktyczne i szansę na wdrożenie w produkowanych obrabiarkach.

3. Uwagi do rozprawy doktorskiej

W niniejszej części recenzji zaprezentuję pewne uwagi, a także fragmenty rozprawy wymagające dodatkowych komentarzy i wyjaśnień ze strony Autora. Chciałbym zaznaczyć, iż w większości przypadków uwagi te mają charakter dyskusyjny, a nie stanowią bezpośredniego stwierdzenia niedociągnięć lub błędów.

Rozdział „Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń", str. 2. Następujące wielkości zostały nieprawidłowo zdefiniowane: „f_z – posuw na ząb", powinno być „f_z – posuw na ostrze", „A_p – pole skrawania", powinno być „A_D – nominalne pole przekroju poprzecznego warstwy skrawanej" (w terminologii skrawania precyzyjnego wielkość A_p definiowana jest zazwyczaj jako pole bruzdowania), „ω_c – częstotliwość drgań samowzbudnych", powinno być „ω_c – częstość drgań samowzbudnych", „ω_n – częstotliwość drgań własnych", powinno być „ω_n - częstość drgań własnych", „r_e – promień naroża narzędzia", powinno być „r_ε– promień naroża narzędzia".

Rozdział „1.1. Podstawowe definicje", str. 3. Zdanie: „Toczenie jest procesem technologicznym zaliczanym do obróbki wiórowej, będącej odmianą obróbki skrawaniem, (…)" zawiera pewne nieścisłości terminologiczne związane z obróbką skrawaniem. Proponowana poprawna forma zdania to: „Toczenie jest sposobem skrawania narzędziami o zdefiniowanej geometrii (…)".

Rozdział „1.1. Podstawowe definicje", str. 3. Prędkość obrotową w obróbce skrawaniem definiuje się zazwyczaj jako „*n*", a nie „*N*".

Rozdział „1.1. Podstawowe definicje", str. 3. zwrot**:** „ruchem posuwowym fz" nie jest prawidłowy. Prawidłowa forma to „ruchem posuwowym v_f".

Rozdział „1.2. Problematyka drgań samowzbudnych w procesach obróbki skrawaniem", str. 8. w terminologii obróbki skrawaniem powierzchnię natarcia narzędzia oznacza się symbolem A_γ, natomiast powierzchnię przyłożenia symbolem A_α (a nie symbolami *A* oraz *B*, które zastosował Autor).

Rozdział „1.2. Problematyka drgań samowzbudnych w procesach obróbki skrawaniem", str. 8. Według Autora: *W większości uproszczonych modeli teoretycznych o idealnie ostrym narożu, powierzchnia styku przedmiotu i powierzchni przyłożenia narzędzia nie występuje. Jednak w rzeczywistości, zawsze istnieje jakaś powierzchnia styku na wymienionych wyżej powierzchniach, powiększająca się w miarę zużycia ostrza.* Należy

jednak zwrócić uwagę, iż zużycie ostrza na powierzchni przyłożenia nie jest głównym źródłem styku powierzchni przyłożenia narzędzia z obrobionym przedmiotem, lecz: odkształcenia sprężysto-plastyczne obrabianego materiału i tzw. zjawisko powrotu sprężystego materiału obrabianego, a także pierwotne mikronierówności obrabianego materiału (np. w formie falistości) wywołujące wcinanie się powierzchni przyłożenia w obrobiony przedmiot.

Rozdział „1.2. Problematyka drgań samowzbudnych w procesach obróbki skrawaniem", str. 10. Zastosowana przez Autora nazwa odmiany drgań „mode coupling", ma swoje polskie tłumaczenie: „drgania ze sprzężeniem przez przemieszczenie" (wg prof. K. Jemielniaka).

Rozdział „1.2. Problematyka drgań samowzbudnych w procesach obróbki skrawaniem", str. 11. Zastosowany przez Autora zwrot: „końcówka narzędzia" to kolokwializm, proponowałbym stosować np. ostrze skrawające.

Rozdział „1.2. Problematyka drgań samowzbudnych w procesach obróbki skrawaniem", str. 11. Zastosowany przez Autora zwrot: „miejsce wcięcia" to kolokwializm, proponowałbym stosować np. obszar inicjacji skrawania.

Rozdział „1.2. Problematyka drgań samowzbudnych w procesach obróbki skrawaniem", str. 12. Zdanie: „*Zmienność ta wywołana jest poprzez różnicę w przemieszczeniu pomiędzy obecnym obrotem* $x(t)$ *w stosunku do obrotu poprzedniego* $x(t-\tau)$" nie jest sformułowane precyzyjnie. Na dodatek nie została podana definicja symbolu τ.

Rozdział „1.2. Problematyka drgań samowzbudnych w procesach obróbki skrawaniem", str. 13. Na rys. 1.7 nie oznaczono wektora v_c**.**

Rozdział „1.2. Problematyka drgań samowzbudnych w procesach obróbki skrawaniem", str. 13. Nie wyjaśniono skrótu SDOF?

Rozdział „1.2. Problematyka drgań samowzbudnych w procesach obróbki skrawaniem", str. 14. Zwrot: „głębokość zanurzania się ostrza w materiał" nie jest poprawny terminologicznie.

Rozdział „1.2. Problematyka drgań samowzbudnych w procesach obróbki skrawaniem", str. 14. Zwrot: „zmienna głębokość posuwu $fz(t)$" nie jest poprawny terminologicznie. Powinno być raczej: „zmienna wartość posuwu na obrót *f*".

Rozdział „1.2. Problematyka drgań samowzbudnych w procesach obróbki skrawaniem", str. 14. Równanie 1.12: zmienna α nie została zdefiniowana w treści rozprawy.

Rozdział 2.1.2. Strategie on-line, s. 22. Zdanie: „*Dzięki odpowiedniemu sterowaniu aktuatora udało się im zwiększyć granicę stabilności skrawania nawet o 200% przy posuwie*

f_z = 0,2mm/z, zaś dla niższych wartości posuwu, drgania samowzbudne zostały wyeliminowane całkowicie, a jedynym ograniczaniem głębokości skrawania była płytka skrawająca i moc maszyny." Końcowa część zdania została sformułowana kolokwialnie. Z jej treści literalnie wynika, że płytka skrawająca i moc maszyny ograniczają głębokość skrawania. Należałoby wyjaśnić merytorycznie w jaki sposób płytka skrawająca i moc maszyny przyczyniają się do redukcji możliwej do dobrania wartości głębokości skrawania?

Rozdział 2.2.1. Wykres krzywych workowych – strategia off-line s. 24. Zwrot: „oporów skrawania materiału k_c" nie jest poprawny terminologicznie. Poprawna forma to: „oporów właściwych skrawania k_c".

Rozdział 4. Obiekt badań s. 33. Zwrot: „obroty nominalne" nie jest poprawny terminologicznie. Poprawna forma to: „nominalna prędkość obrotowa wrzeciona".

Rozdział 5.1. [redacted] **s. 38.**
Zwrot: „detal" nie jest poprawny terminologicznie. Poprawna forma to: „przedmiot obrabiany".

Rozdział 5.4. [redacted] **s. 55.**
Zwrot: „wysuw" nie jest poprawny terminologicznie. Poprawna forma to: „wysięg".

Rozdział 5.4. [redacted] **s. 59.**
Zdanie: *„Obserwowany przebieg funkcji transmisyjności wynika z tego, że długi wałek zachowuje się jak belka wspornikowa, której koniec (punkt „a") ulega największym przemieszczeniom, zaś transmisyjność pomiędzy jej końcówką a „miejscem utwierdzenia*" jest zakłócana przez odkształcenia sprężyste samej belki." jest niezrozumiałe.

[redacted]

[redacted] **s. 61. Tablica 5.7:** posuw na obrót oznacza się symbolem *f*, a nie f_z.

Rozdział 5.5.2. [redacted]
s. 61. Tablica 5.10: Dlaczego w trakcie prób toczenia z głębokością skrawania 0,5 mm zastosowano inną prędkość obrotową (wynoszącą w tym przypadku 1400 obr/min) niż podczas prób z pozostałymi głębokościami skrawania (w pozostałych przypadkach prędkości obrotowe wynosiły 1700 obr/min)?

[redacted]

[redacted]

Rozdział 7. Testy weryfikujące działanie Inteligentnego Wrzeciona Tokarskiego, s. 95. Rysunek 7.7 przedstawia topografię obrobionej powierzchni, a nie jej profil.

[redacted]

Rozdział 7. Testy weryfikujące działanie Inteligentnego Wrzeciona Tokarskiego. Czy Autor przewiduje możliwość zastosowania tego systemu w procesie toczenia innych typów materiałów obrabianych (np. stopy aluminium, stopy żarowytrzymałe, itd.) oraz przy zastosowaniu innych odmian kinematycznych toczenia (np. planowanie czoła, toczenie poprzeczne rowków, wytaczanie)? Jeśli tak, to potencjalnie jakie działania należałoby podjąć aby zaadaptować ten system?

3. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując recenzję stwierdzam, że mgr inż. Jan Tomaszewski zdefiniował a następnie rozwiązał istotny i aktualny problem naukowy dotyczący detekcji i zapobiegania drganiom samowzbudnym w procesie toczenia. W ramach wykonanych prac przeprowadził szerokie badania doświadczalne (np. wyznaczanie właściwości dynamicznych badanych układów, dobór lokalizacji i typu czujników, pomiary drgań w trakcie obróbki, walidacja systemu, itd.), modelowanie analityczne i numeryczne w oparciu o oryginalne i autorskie modele (np. model drgań samowzbudnych, model MES wrzeciennika, [redacted]), a także działania projektowe i konstrukcyjne ([redacted], opracowanie – wraz z oprogramowaniem – systemu inteligentnego wrzeciona tokarskiego). Przeprowadzenie tych badań wymagało od Autora dużej wiedzy w dziedzinie obróbki skrawaniem, dynamiki, modelowania MES, a także wiedzy praktycznej dotyczącej projektowania i konstrukcji obrabiarek. Świadczy to o bardzo wysokim poziomie naukowym Doktoranta i jednocześnie potwierdza jego gotowość do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dyscyplinie inżynierii mechanicznej.

W świetle dokonanej analizy i sformułowanych ocen stwierdzam, że rozprawa mgr. inż. Jana Tomaszewskiego pt. *Projekt i budowa inteligentnego wrzeciona tokarskiego* w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy (art. 13 ust. 1 Ustawa z dnia 14.03.2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. z dnia 21.06.2016r., poz. 882 wraz z jego nowelizacjami)) i może stanowić podstawę do nadania jej Autorowi stopnia

naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Może być, zatem dopuszczona do publicznej obrony.

Dodatkowo, ze względu na bardzo wysokie walory naukowe, pragmatyczne oraz nowatorstwo rozprawy wnioskuję o wyróżnienie jej Autora mgr. inż. Jana Tomaszewskiego.

Wojciech Nowak