

Dr hab. inż. Krzysztof Mendrok, prof. AGH
Katedra Robotyki i Mechatroniki
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków

Kraków, 19.08.2019

Recenzja rozprawy doktorskiej
Mgra inż. Pawła Dunaja
pt. „Modelowanie właściwości dynamicznych stalowo-
polimerobetonowych korpusów maszyn technologicznych”

1. Wstęp

Podstawą do wykonania recenzji było zlecenie Szanownego Pana dr hab. inż. Krzysztofa Danileckiego prodziekana ds. nauki, zgodne z uchwałą Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego.

Recenzowana rozprawa doktorska powstała w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych, Instytutu Technologii Mechanicznej ZUT. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Marcin Chodźko, prof. ZUT, promotorem pomocniczym jest dr inż. Michał Dolata.

Głównym celem pracy jest utworzenie metodyki budowy fizycznych i matematycznych modeli stalowo-polimerobetonowych korpusów maszyn technologicznych. W ramach tworzenia pracy Doktorant zrealizował następujące zadania badawcze: utworzenie modeli fizycznych i matematycznych elementarnych składowych korpusów – belek pustych i wypełnionych oraz połączeń spawanych, opracowanie procedury dostrajania utworzonych modeli do wyników eksperymentalnych, sformułowanie metodyki modelowania korpusów maszyn technologicznych.

2. Zakres i treść rozprawy

Praca zawarta jest na 94 stronach. Składa się z 7 rozdziałów, zawiera spis ilustracji, tabel i ważniejszych oznaczeń oraz 5 załączników. Bibliografia obejmuje 116 pozycji literaturowych.

W rozdziale pierwszym Doktorant dokonuje wprowadzenia w zagadnienie projektowania korpusów obrabiarek. Opracowuje przegląd stosowanych rozwiązań, punktuje ich wady i zalety. Na tym tle uzasadnia stosowanie korpusów hybrydowych oraz przedstawia trudności

związane z ich konstruowaniem i modelowaniem, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień dynamicznych.

Rozdział drugi zawiera przegląd literatury światowej dokonany przez Autora pod kątem modelowania z zastosowaniem metody elementów skończonych korpusów hybrydowych obrabiarek technologicznych. Przy tej okazji wprowadza Kandydat szereg pojęć związanych z oceną dynamicznego stanu korpusu, a zwłaszcza jego zdolności do tłumienia drgań. Podobnie jak w rozdziale pierwszym Doktorant krytycznie ocenia każdą cytowaną pracę, wskazując jej silne i słabe strony.

Na podstawie stanu wiedzy, opisanego w rozdziałach pierwszym i drugim, formułuje Autor w rozdziale trzecim cel pracy. Poprzedza to logicznym uzasadnieniem stanowiącym syntetyczne wnioski wyciągnięte z przeprowadzonej w dwóch poprzednich częściach pracy analizy istniejących rozwiązań. Także w tym rozdziale postawiona zostaje teza pracy. W ostatnim akapicie tej części dysertacji, kreśli Doktorant zakres prac jakie należy wykonać w celu osiągnięcia celu i udowodnienia tezy.

Rozdział czwarty pracy został poświęcony przedstawieniu metodyki badań przyjętej przez Autora. Na wstępie zapoznaje on czytelnika z typem korpusu hybrydowego, jakiego modelowaniem będzie się dalej zajmował. Jest to konstrukcja spawana z handlowych profili stalowych zamkniętych, które lokalnie mogą być wypełnione polimerobetonem, składającym się z żywicy epoksydowej oraz mineralnego wypełnienia różnej wielkości. Jest to koncepcja opracowana w macierzystym ośrodku badawczym Kandydata. Następnie formułuje metodykę badawczą składającą się z dwóch etapów, która ma doprowadzić do osiągnięcia celu i udowodnienia postawionej tezy. W pierwszym etapie, planuje Doktorant utworzyć procedurę modelowania metodą elementów skończonych podstawowych składowych korpusu, to jest belek stalowych o przekroju kwadratowym z wypełnieniem polimerowym i bez. Także na tym etapie ma powstać procedura dostrajania modelu do wyników uzyskanych na drodze doświadczalnej. Drugi etap to opracowanie metodyki modelowania połączeń spawanych oraz tworzenie modeli fizycznych i matematycznych całych hybrydowych korpusów maszyn. Przy formułowaniu planu działania, nie zapomina Autor o weryfikacji i walidacji przyjętych rozwiązań. Kolejne rozdziały stanowią realizację przyjętej tutaj metodyki.

I tak w rozdziale piątym zajmuje się mgr Dunaj modelowaniem podstawowego komponentu konstrukcyjnego hybrydowego korpusu z użyciem metody elementów skończonych. Na początku, krótko przypomina podstawowe założenia samej metody modelowania i oprogramowanie, w którym będzie realizował dalsze badania. Uzasadnia przyjęte parametry modelu takie jak sposób utwierdzenia i zastosowane typy elementów skończonych. Następnie opisuje przeprowadzony eksperyment, ponownie poprzedzając go krótkim wprowadzeniem do eksperymentalnej analizy modalnej. Najważniejszą częścią rozdziału jest sformułowanie procedury dostrajania utworzonego modelu do wyników badań doświadczalnych. Służy do tego autorski program utworzony w pakiecie Matlab. Uzyskane wyniki są szczegółowo podsumowane i przedyskutowane.

Drugi najważniejszy rozdział dystrakcji, szósty w kolejności, poświęcony jest modelowaniu właściwości dynamicznych korpusów hybrydowych. Rozpoczynają go badania nad modelowaniem połączeń spawanych, gdzie w wyniku odpowiednio dobranego sposobu modelowania i przeprowadzonych eksperymentów uzyskuje Autor odpowiednią procedurę, gwarantującą zgodność strukturalną modeli z rzeczywistością. Następnie mając przygotowane narzędzia w postaci procedur do modelowania: belek pustych i wypełnionych polimerobetonem oraz spoin, tworzy finalny algorytm modelowania korpusów hybrydowych. Algorytm jest następnie sprawdzany dla kilku przypadków, a wyniki tej walidacji są ztabelaryzowane i podsumowane.

Ostatni rozdział pracy, siódmy, to wnioski końcowe, gdzie Autor podsumowuje uzyskane wyniki, stwierdza iż cel pracy został osiągnięty a teza udowodniona. Dodatkowo formułuje kierunki dalszych badań, w tym bardzo ciekawą propozycję zastosowania techniki substructuring'u do modelowania korpusów.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Głównym celem pracy jest opracowanie metodyki tworzenia fizycznych i matematycznych modeli stalowo-polimerobetonowych korpusów maszyn technologicznych. Cel podjęty przez mgra Dunaja jest bardzo aktualny i praktycznie uzasadniony. Zarówno jeżeli chodzi o zastosowanie korpusów hybrydowych o kształtowanej sztywności jak i o aplikację modelowania komputerowego znacznie obniżającego koszty powstania nowego produktu. Wzrost zapotrzebowania na produkty o wysokiej dokładności wykonania i niskiej wartości chropowatości powierzchni oraz kluczowe znaczenie kryteriów ekonomicznych w przemyśle, wymusza na producentach obrabiarek tworzenie maszyn o dużych prędkościach obrotowych wrzecion i szybkich posuwach przy jednoczesnym zachowaniu wysokich standardów dotyczących jakości obrabianej powierzchni. Jednym z czynników decydujących o wartości współczynników chropowatości uzyskiwanych w efekcie obróbki skrawaniem jest stan dynamiczny maszyny. Zmienne w czasie obciążenia, takie jak siły skrawania lub siły bezwładności generowane przez elementy wirujące maszyny, powodują powstawanie drgań, które wpływają na wzrost chropowatości powierzchni obrabianej, pogorszenie dokładności wymiarowo-kształtowej, a także przyspieszenie zużycia samej obrabiarki i jej narzędzi. Zatem kształtowanie parametrów dynamicznych korpusów maszyn, a zwłaszcza ich własności tłumiących jest kluczowym zagadnieniem w procesie projektowania. Jednocześnie wirtualizacja prototypowania rozwiązań pozwala na znaczną redukcję kosztów powstawania nowej maszyny. W tym kontekście uważam cel podjęty w pracy za aktualny i praktycznie uzasadniony. Jest on zgodny z współczesnymi trendami badawczymi w zakresie technologii urządzeń mechanicznych oraz z interesami gospodarki narodowej.

Do najważniejszych osiągnięć ocenianej rozprawy zaliczyć należy:

- Opracowanie metodyki modelowania korpusów hybrydowych stalowo-polimerobetonowych. Autor, dysponując zidentyfikowanym i dostrojonym modelem komponentu podstawowego rozpatrywanego korpusu oraz modelami połączeń spawanych występujących pomiędzy tymi komponentami, uzyskał model złożonej konstrukcji o zgodności strukturalnej i wysokiej zbieżności parametrów modalnych.

Co ważne, otrzymany dzięki metodyce model całej konstrukcji korpusu, nie wymaga dodatkowego dostrajania, co przyspiesza proces projektowania i obniża jego koszty.

- Na wysoką ocenę zasługuje krytyczne podejście do wyników analizy modelu elementów skończonych. Doktorant poszukiwał przyczyn różnic między wynikami numerycznymi, a eksperymentalnymi. Utworzył narzędzia służące osiągnięciu założonej zgodności modelu nie tylko w zakresie wartości parametrów modalnych, ale także kształtów postaci drgań własnych i przebiegów charakterystyk częstotliwościowych. Podczas prowadzonych badań wykazał się Kandydat znajomością fizyki modelowanych zjawisk oraz umiejętnością ich reprezentacji w modelach MES.
- Autor na każdym etapie badań, przy opracowywaniu modeli belki pustej i wypełnionej kompozytem, spoin, czy całych korpusów, uzyskiwane wyniki obliczeniowe weryfikował i walidował doświadczalnie. Wykazał przy tym duże doświadczenie w prowadzeniu badań eksperymentalnych. Na wyróżnienie zasługuje jego podejście do prowadzonych pomiarów, gdzie, żaden etap planowania i doboru parametrów nie został pozostawiony przypadkowi. Wszystkie wybory Doktoranta były sprawdzane i uzasadniane. Wystawił tym samym Kandydat bardzo dobre świadectwo swoim opiekunom naukowym i ośrodkowi, w którym pracuje.
- Opracowana metodyka modelowania pozwoliła mgrowi Dunajowi na uzyskanie wiarygodnych modeli numerycznych, które umożliwiają ocenę parametrów dynamicznych korpusów maszyn technologicznych. Stanowi ona realizację celu pracy oraz dowodzi słuszności postawionej tezy.
- Na uznanie zasługują też trafnie nakreślone kierunki dalszych badań, świadczące o gotowości Kandydata do podjęcia samodzielnej pracy naukowej.

Przegląd literatury wykonany przez Autora jest szeroki – bibliografia obejmuje 116 pozycji. W większości są to prace związane z modelowaniem korpusów maszyn technologicznych. Pewien niedosyt budzi stosunkowo skromna reprezentacja publikacji poświęconych analizie modalnej, a zwłaszcza jej eksperymentalnej odmianie. Recenzent znalazł w tym zakresie jedynie podręcznik z 1997 roku i dwa artykuły dotyczące wybranej metody estymacyjnej. To nieco mało z uwagi na fakt, iż analiza ta jest podstawowym narzędziem eksperymentalnej weryfikacji wyników, a także służy Kandydatowi do dostrajania modeli. Zresztą ten brak wychodzi później w kilku miejscach pracy.

Jeżeli chodzi o stronę redakcyjną, praca ma klasyczny układ typowy dla tego typu opracowań. Język pracy nie budzi zastrzeżeń, choć można znaleźć kilka drobnych niedociągnięć, czy pomyłek. Niektóre notki bibliograficzne w spisie literatury zawierają braki. Jest to jednak nieuniknione przy tworzeniu dzieła jakim jest dysertacja doktorska. Recenzent, na życzenie, może przekazać te uwagi Kandydatowi. Jakość materiałów ilustracyjnych zasługuje na wysoką ocenę. Wszelkie potrzebne dane są stabelaryzowane. Praca zawiera zarówno spis tabel jak i ilustracji i ważniejszych oznaczeń, co znacznie ułatwia jej lekturę. Dodatkowo interesujące z punktu widzenia odtworzenia badań rysunki i pewną część wyników zawarł Autor w załącznikach. Jest to zabieg bardzo wskazany, aby nie rozbudowywać pracy w niepotrzebny sposób. Natomiast wyników w załącznikach D i E

mogło być znacznie więcej, zwłaszcza jeżeli chodzi o prezentację charakterystyk częstotliwościowych.

4. Uwagi dyskusyjne

W swoich badaniach skupił się Autor na modelowaniu korpusów z zastosowaniem metody elementów skończonych. Dla uzasadnienia tego wyboru byłoby korzystnie, aby przedstawić także inne techniki modelowania, porównać je i wykazać ewentualną wyższość MES (w zastosowaniu do modelowania korpusów hybrydowych) nad innymi.

W czasie tworzenia przeglądu stanu wiedzy z zakresu modelowania korpusów maszyn, zauważyć można pewien brak ścisłości Autora w opisie prezentowanych prac. Dla przykładu na stronie 6 przedstawiając pracę Junga i innych z 2004 pisze, że uzyskano zmniejszenie bezwładności bez podania miary i wartości tej zmiany. Podobnie, również na stronie 6, w streszczeniu artykułu Do Suh i innych z 2004 mówi o zmniejszeniu własności tłumiących o 570%, także tutaj przydałaby się miara tłumienia.

Podczas opracowywania metodyki badań, prace podzielono na dwa etapy. W pierwszym sformułowano procedurę modelowania belek stanowiących podstawowy element korpusu, a w drugim utworzono procedurę modelowania spoin oraz całych korpusów. Czym podyktowany był taki podział? Zdaniem recenzenta bardziej logiczne byłoby przetransferowanie procedury dotyczącej połączeń spawanych do etapu pierwszego, jako drugiego elementu podstawowego, a pozostawienie w etapie drugim jedynie modelowanie całościowe korpusów. Taki podział wydaje się być bardziej logiczny. W pierwszym etapie przygotowujemy narzędzia dla elementów składowych – belki, spoiny, w drugim łączymy opracowane wcześniej modele w całość na potrzeby prototypowania korpusów.

Na stronie 6 Autor wypisuje etapy tworzenia modelu MES w typowym pakiecie CAE. W pierwszym etapie, preprocessingu brakuje ewidentnie przypisania własności materiałowych do obszarów modelu. Jest to później wspomniane w tekście przez Doktoranta, ale w liście punktowej nie ma tego istotnego etapu.

W podrozdziale 5.1.1 opisuje Autor przeprowadzone badania materiałowe dla polimerobetonu i dla stali. O ile wyznaczenia stałych materiałowych dla kompozytu jest bardzo istotne o tyle prowadzenie tych badań dla stali wydaje się być niepotrzebne. Każda stal posiada stabelaryzowane własności gwarantowane przez producenta. Brak zasadności prowadzenia tych badań potwierdzają uzyskane wyniki, nie odbiegające od średnich wartości dostępnych w poradnikach. Dodatkowo, nie znalazł recenzent informacji dla jakiej stali prowadzone były rzeczne badania.

Podrozdział 5.1.2 rozpoczyna się od krótkiego wprowadzenia do teorii eksperymentalnej analizy modalnej. Widoczne są tu pewne braki, których można by uniknąć, gdyby Autor zapoznał się z większą ilością publikacji dotyczących tej techniki badań doświadczalnych – jak już wcześniej napisano w spisie literatury znalazły się tylko trzy pozycje. I tak:

- polskim określeniem na badania modalne prowadzone przy wymuszeniu eksploatacyjnym jest eksploatacyjna analiza modalna, a nie operacyjna (choć potocznie bardzo często używa się tej kalki z języka angielskiego, to w pracy pisanej powinno stosować się poprawne określenia),
- termin badania wibracyjne w stosunku do eksperymentu modalnego z zastosowaniem wzbudnika drgań, nie wydaje się być właściwy. Przecież test impulsowy to też badania wibracyjne,
- przy wymienianiu założeń stosowalności analizy modalnej nie wspomina Autor o istotnym wymogu, aby obiekt miał małe lub proporcjonalne do prędkości tłumienie.

Wszystkie przeprowadzone badania modalne były bardzo dobrze zaplanowane i zweryfikowane. Autor nie zapomniał o sprawdzeniu założeń analizy modalnej i przeprowadził testy liniowości i wzajemności. Niestety nie znalazła się w pracy informacja na temat wykonanego testu liniowości. Nie wskazano ile było poziomów wymuszenia i jakie były ich wartości. Nie zamieszczono też wyników tego testu w postaci porównania charakterystyk. Brak też dokumentacji innych badań wstępnych np. proces doboru młotka i końcówki jego bijaka. Szkoda, gdyż praca nie jest aż tak obszerna objętościowo, żeby konieczne było oszczędzanie miejsca.

Ponownie recenzent chce zwrócić uwagę na wzorowe przeprowadzenie i opisanie badań modalnych. Uwidacznia się duże doświadczenie Autora i jego opiekunów naukowych w tej dziedzinie. Brakuje jedynie opisu lub schematu ścieżki przejścia czujników w kolejnych eksperymentach częściowych lub choć informacji iloma kanałami i czujnikami dysponowano i, co wynika z powyższych, ile było eksperymentów częściowych.

Wniosek o małej gęstości modalnej jaki postawił Autor na stronie 29 stoi w sprzeczności z wynikami zawartymi w tabeli 5.4. Występują tam bowiem dwie pary bliskich biegunów (charakterystyczne dla układów symetrycznych).

Moduły pozwalające na dostrajanie modeli MES do wyników eksperymentalnych dostępne są w wielu komercyjnych pakietach oprogramowania. Dlaczego Doktorant nie porównał wyników identyfikacji parametrów materiałowych przeprowadzonej autorską procedurą z wynikami z jednego z tych dostępnych narzędzi.

Autor stwierdza na stronie 47, że sposób modelowania spoiny zastosowany w pakiecie Midas NFX prowadzi do niezgodności strukturalnej modelu. Przydałoby się coś na poparcie tego twierdzenia – rysunek lub odnośnik do innych badań w literaturze.

Na stronie 52 opisuje Kandydat przeprowadzoną analizę wpływu kształtu i wielkości elementów skończonych na zmianę parametrów modalnych. Ponownie recenzent wyraża żal, że w pracy czy choćby w załączniku nie zamieszczono wyników tej analizy.

Z przedstawionych w tabeli 6.5 danych wynika, że model 1 (bez dostrajania) dla większości częstotliwości drgań własnych ma lepszą zgodność niż model 2 (dostrojony). Brakuje dyskusji tych wyników. Generalnie w odczuciu recenzenta nieco brak próby

interpretacji otrzymanych rezultatów. Autor generalnie uzyskał dobrą zgodność model – pomiar, ale występowały częstotliwości, które bardziej się różniły niż inne. Także pewne fragmenty widmowych funkcji przejścia wykazywały duże rozbieżności. Przydałaby się choć próba dyskusji na ten temat.

5. Wniosek końcowy

Problematyka badawcza ocenianej pracy doktorskiej magistra inżyniera Pawła Dunaja poświęcona jest modelowaniu hybrydowych stalowo-polimerobetonowych korpusów obrabiarek. Autor opracował autorską procedurę pozwalającą na tworzenie modeli o dobrej zgodności strukturalnej bez konieczności ich dostrajania.

Temat rozprawy jest aktualny i istotny z praktycznego punktu widzenia. Doktorant wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a osiągnięte oryginalne wyniki stanowią istotny wkład w rozwój projektowania korpusów obrabiarek i metod ich modelowania. Przedstawione uwagi dyskusyjne nie umniejszają wartości pracy.

Praca spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” i dlatego rekomenduję przyjęcie jej przez Radę Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego i dopuszczenie do publicznej obrony.

Z uwagi na aktualny i użyteczny temat pracy, kompletność zaproponowanego rozwiązania i obszerność przeprowadzonych badań rekomenduję dysertację do wyróżnienia.