

PAO
dr hab. inż. Tadeusz Burczyński
prof. nadzw. Pol. Śl.
10 1117 2013

Prof. dr hab. inż. Tadeusz BURCZYŃSKI, czł. koresp. PAN

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

ul. A. Pawińskiego 5B

02-106 Warszawa

e-mail: tburczynski@ippt.pan.pl

Warszawa, 11.02.2019

Recenzja
rozprawy doktorskiej
mgra inż. Waldemara Muchy

*Zastosowanie Metody Elementów Skończonych
Czasu Rzeczywistego w symulacji hybrydowej*

1. Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska mgra inż. Waldemara Muchy jest poświęcona zagadnieniom symulacji hybrydowej układów mechanicznych przy zastosowaniu redukcji numerycznego modelu, opartego na dyskretyzacji za pomocą metody elementów skończonych (MES) w czasie rzeczywistym.

Podjęcie tej tematyki badawczej należy uznać za niezwykle trafne z uwagi na prowadzone badania nad opracowaniem nowych efektywnych metod hybrydowych badania układów mechanicznych.

Praca powstała na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej, a jej promotorem jest dr hab. inż. Waław Kuś, prof. Pol. Śl.

Biorąc pod uwagę cel i zakres rozprawy, można ją z całą pewnością zakwalifikować do dyscypliny mechanika.

2. Zakres rozprawy

Rozprawa zawiera 131 stron. Składa się ze spisu treści, ośmiu rozdziałów, bibliografii oraz streszczeń w j. polskim i angielskim.

W rozdziale 1., mającym charakter wstępu, sformułowano cel i tezę rozprawy oraz dokonano przeglądu treści rozprawy.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 11 1117 2019

nr 046101006/10811P

Rozdział 2. poświęcony jest zagadnieniom związanym z systemami czasu rzeczywistego. Przedstawiono w nim istotę, podział, zastosowanie, podstawowe pojęcia oraz algorytmy szeregowania zadań. Przypomniano podstawowe wiadomości z zakresu MES oraz przedstawiono wybrane techniki redukcji modeli opartych na MES.

W rozdziale 3. omówiono zagadnienia związane z symulacją hybrydową. Przedstawiono istotę symulacji hybrydowej, podział na podukłady oraz sformułowano równania ruchu dla symulacji hybrydowych dynamicznych oraz pseudodynamicznych. Przedstawione zostały algorytmy symulacji hybrydowej wykorzystujące jawne oraz niejawne schematy całkowania.

W rozdziale 4. przedstawiono ideę tzw. układów FPGA (ang. *Field-Programmable Gate Array*) oraz ich zastosowanie do przyspieszenia obliczeń w czasie rzeczywistym.

Rozdział 5. zawiera opis autorskich algorytmów MES w symulacjach hybrydowych z wykorzystaniem superpozycji modalnej dla jawnych i niejawnych schematów całkowania.

W rozdziale 6. Doktorant przedstawił autorską modyfikację algorytmu redukcji dyskretnego modelu bazującego na MES do zastosowań w symulacji hybrydowej.

Rozdział 7. poświęcony jest koncepcji metamodeli, opartych na sztucznych sieciach neuronowych w obliczeniach czasu rzeczywistego w symulacji hybrydowej.

Podsumowanie uzyskanych wyników oraz wnioski znajdują się w rozdziale 8.

Bibliografia zawiera 177 pozycje literaturowe, w tym 10 pozycji jest autorstwa lub współautorstwa Doktoranta.

3. Ocena merytoryczna

Oceniana rozprawa doktorska poświęcona jest ważnej i aktualnej problematyce badawczej związanej z opracowaniem metod z hybrydyzacją obliczeń komputerowych, które mogą być użyteczne w badaniach różnych układów fizycznych przy jednoczesnym wykorzystaniu wyników badań eksperymentalnych i symulacji komputerowej. Badania takie opierają się na szerszej koncepcji tzw. mechaniki obliczeniowej w czasie rzeczywistym (*Real Time Computational Mechanics - RTCM*).

Tradycyjne podejście do obliczeń komputerowych polega na tym, że potrzebujemy rozwiązać problem z zadaną dokładnością i rozwiązanie to otrzymujemy po n sekundach. W podejściu bazującym na koncepcji mechaniki obliczeniowej w czasie rzeczywistym zakładamy, że poszukujemy rozwiązania problemu w ciągu n sekund, a istotna jest odpowiedź na pytanie jakie najlepsze rozwiązanie otrzymamy po n sekundach.

Doktorant stawia tezę, że:

„Zastosowanie metod redukcji modelu oraz obliczeń z użyciem układów FPGA pozwala na efektywną i wydajną symulację układu mechanicznego w czasie rzeczywistym”

Realizacja tej koncepcji, przedstawiona w rozprawie, wymagała użycia metod redukcji modelu oraz zastosowania mikrokontrolera z systemem czasu rzeczywistego, którego zadaniem było sterowanie pracą siłowników w eksperymencie w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego.

W pracy rozpatrywane są metody redukcji wykorzystujące: (i) techniki superpozycji modalnej, (ii) dynamiczną kondensację oraz (iii) metamodele.

Ciekawym i oryginalnym pomysłem Doktoranta jest zastosowanie programowalnego układu logicznego w postaci układów FPGA, które są bezpośrednio programowalnymi macierzami bramek mogącymi być wielokrotnie przeprogramowanymi. Układy te nie potrzebują systemu operacyjnego do wykonywania operacji arytmetycznych i logicznych. Cechują się wysoką wydajnością i niezawodnością, ponieważ potrafią wykonywać operacje w sposób silnie równoległy. Doktorant przedstawił autorski algorytm pozwalający na przyspieszenie obliczeń w czasie rzeczywistym przy wykorzystaniu układów FPGA.

Doktorant jest autorem algorytmów, które zostały dostosowane do wymagań i architektury mikrokontrolerów. Wykazał, że zastosowanie metod redukcji modelu pozwala na badanie układów o większej liczbie stopni swobody przy zachowaniu wysokiej dokładności, bez zwiększania kroku czasowego. Wykazał, że przyjęcie założenia, że koszt obliczeniowy związany z redukcją modelu do symulacji hybrydowej ma drugorzędne znaczenie, ponieważ najważniejsze jest skrócenie obliczeń czasu rzeczywistego.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- adaptację i weryfikację algorytmów symulacji hybrydowej bazujących na jawnych i niejawnym schematach całkowania,
- opracowanie algorytmu przyspieszającego obliczenia przy użyciu MES w czasie rzeczywistym za pomocą mikrokontrolera i przy zastosowaniu do obliczeń układu FPGA,
- opracowanie metod i algorytmów redukcji dyskretnego modelu skończenie elementowego z użyciem metody podziału na podstruktury i zastosowanie ich w obliczeniach w czasie rzeczywistym podczas symulacji hybrydowej z użyciem mikrokontrolera,
- weryfikację opracowanych algorytmów redukcji na analizie przykładowych układów mechanicznych (np. kratownicy, belki z nieliniową sprężyną, ramy rowerowej z nieliniowym amortyzatorem).

Oryginalne wyniki swoich prac przedstawił Doktorant w opublikowanych pracach [2, 3, 134,135, 150-155, 177].

Zamieszczone w rozprawie wyniki badań świadczą o bardzo dobrej znajomości problematyki badawczej, dużej pomysłowości i profesjonalności Doktoranta.

Struktura rozprawy jest logiczna i dobrze przemyślana, Zwraca uwagę duża pieczołowitość w przygotowaniu wyników obliczeń numerycznych.

Uwagi dyskusyjne

- Zagadnienia związane z numerycznym rozwiązywaniem zagadnień w czasie rzeczywistym mają w sobie duży potencjał w przewidywaniu i sterowaniu procesami wywołanymi naturalnymi zagrożeniami lub działaniem człowieka, jak ryzyko różnych szkodliwych procesów industrialnych, rozprzestrzenianie się pożarów, krytyczne zjawiska atmosferyczne, monitorowanie pacjentów w sytuacjach, gdy bezpieczeństwo lub życie ludzkie zależy od podejmowania racjonalnych decyzji w czasie rzeczywistym. Doktorant skupia swoją uwagę za zagadnieniach z zakresu mechaniki ciała stałego, ale bardzo obiecującym kierunkiem badań, w tym kontekście, są także zagadnienia z zakresu mechaniki płynów.
- Brak jest rozprawie odniesień do prac badawczych Sergio Idelsohna nt. *Real Time Computational Mechanics* (RTCM), który realizował prestiżowy projekt badawczy Advanced Grant ERC na ten temat i opublikował prace z tego zakresu.
- Zakładając, że dokładność rozwiązania zagadnienia brzegowo-początkowego za pomocą adaptacyjnej MES mierzona jest błędem *a posteriori*, ciekawe jest poszukiwanie relacji pomiędzy dokładnością rozwiązania, krytycznym krokiem czasowym i generalnie czasem rozwiązania zagadnienia. Czy możliwe są, a jeśli tak, to jakie, ogólne relacje między tymi parametrami?
- Brak jest tytułu angielskiego rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgra inż. Waldemara Muchy jest interesującym przyczynkiem z zakresu opracowania metody symulacji hybrydowej układów mechanicznych przy zastosowaniu redukcji numerycznego modelu, opartego na dyskretyzacji za pomocą metody elementów skończonych (MES) w czasie rzeczywistym.

Zamieszczone w rozprawie badania symulacyjne świadczą o bardzo dobrym rozeznaniu Doktoranta w obszarze objętym rozprawą.

Główny cel rozprawy polegający na udowodnieniu, że zastosowanie metod redukcji modelu oraz obliczeń z użyciem układów FPGA pozwala na efektywną i wydajną symulację układu mechanicznego w czasie rzeczywistym został osiągnięty, a uzyskane wyniki badań potwierdzają tezę rozprawy.

Doktorant wykazał się bardzo dużą wiedzą i doświadczeniem oraz posiada istotny i wartościowy dorobek publikacyjny.

Biorąc pod uwagę przedstawioną opinię stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgra inż. Waldemara Muchy w pełni odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim.

Doktorant jest dobrze przygotowany do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

Dlatego uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska w pełni spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez obecnie obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej.

Jednocześnie z uwagi na znaczący dorobek publikacyjny Doktoranta (6 opublikowanych artykułów, 8 rozdziałów, 5 prac w materiałach konferencyjnych) oraz jego bardzo aktywny udział w stażach naukowych (m.in. w *Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik* w Niemczech) i udział w projektach zagranicznych, otrzymane nagrody oraz wysoki poziom naukowy rozprawy stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy.



Tadeusz Burczyński