



## KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

**Dr hab. inż. Łukasz Rauch**

Kraków, 2019.02.10

### Recenzja

pracy doktorskiej mgra inż. Waldemara Muchy pt. "Zastosowanie Metody Elementów Skończonych Czasu Rzeczywistego w symulacji hybrydowej".

Zlecenie na opracowanie recenzji otrzymałem od Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej pismem nr. RMT0-349/D/006/18/19 z dnia 12 grudnia 2018 roku. Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgra inż. Waldemara Muchy przedstawiam poniższą opinię.

#### 1. PRZEDMIOT OCENY

Przedmiotem oceny jest praca doktorska składająca się ze wstępu, 6 rozdziałów zasadniczych oraz podsumowania z wnioskami i spisu literatury. Spis literatury obejmuje 177 pozycji. W spisie literatury zawarto ważne publikacje związane z tematyką rozprawy, w przeważającej większości opublikowane w ostatnim dziesięcioleciu. Pracę uzupełniają streszczenia w języku polskim i angielskim. Sześć rozdziałów, które można uznać za merytorycznie kluczowe wnoszą następującą treść:

- W rozdziale drugim scharakteryzowano zagadnienia związane z przedmiotem badań. Opisano systemy czasu rzeczywistego, w tym ich istotę, podział, zastosowanie, podstawowe pojęcia oraz algorytmy szeregowania zadań. Scharakteryzowano Metodę Elementów Skończonych, a także przedstawiono wybrane techniki redukcji modeli MES. Zamieszczono przegląd literatury dotyczący zastosowania MES w obliczeniach czasu rzeczywistego.
- Rozdział trzeci zawiera omówienia zagadnień związanych z symulacją hybrydową, gdzie Autor przedstawił istotę symulacji hybrydowej, a następnie scharakteryzował podział na podukłady z uwzględnieniem dwóch form równania ruchu tj. dla symulacji hybrydowych dynamicznych oraz pseudodynamicznych. Opisane zostały stosowane algorytmy symulacji hybrydowej wykorzystujące jawne oraz niejawne schematy całkowania. Przedstawiony został przykład wykonanej symulacji hybrydowej kratownicy płaskiej, gdzie jeden z prętów stanowił podukład fizyczny. Do przeprowadzenia eksperymentu wykorzystano dynamiczną

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie | Wydział inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej | Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska  
tel. +48 12 617 38 75, fax +48 12 617 28 89  
e-mail: isim@agh.edu.pl, www.isim.agh.edu.pl

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 18.02.2019

nr 654/D/006 zat. 2018/19



## **KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA**

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

maszynę wytrzymałościową Instron ElectroPuls E10000. Obliczenia przeprowadzono na mikrokontrolerze National Instruments myRIO z systemem czasu rzeczywistego.

- W rozdziale czwartym omówiono istotę oraz cechy układów FPGA. Układ ten nie potrzebuje systemu operacyjnego do wykonywania operacji arytmetycznych i logicznych, potrafi je wykonywać w sposób silnie równoległy. Układy takie cechują się wysoką wydajnością i niezawodnością, co Autor trafnie podkreśla. Przedstawiony został autorski algorytm pozwalający na przyspieszenie obliczeń MES czasu rzeczywistego z wykorzystaniem wsparcia FPGA. Algorytm polega na rozwiązywaniu układu równań algebraicznych w każdym kroku czasowym w układzie FPGA i przesyłaniu rozwiązania (wektora przemieszczeń) do mikroprocesora. Opisane zostały zalety stosowania arytmetyki stałoprzecinkowej w układach FPGA. Przedstawiono przykład numeryczny potwierdzający prawidłowe działanie zaproponowanego algorytmu oraz osiągniętą redukcję czasu obliczeń.
- Rozdział piąty zawiera opis autorskich algorytmów modelu MES w symulacji hybrydowej z wykorzystaniem superpozycji modalnej dla jawnych i niejawnych schematów całkowania. Poprawność działania przedstawionych w rozdziale algorytmów została zweryfikowana numerycznie (eksperyment w symulacji hybrydowej symulowany za pomocą nieliniowej funkcji) dla przykładu kratownicy płaskiej o 49 stopniach swobody oraz numerycznie i eksperymentalnie dla ramy rowerowej z nieliniowym amortyzatorem o 73 stopniach swobody. Wykazano, że pomimo zastosowania aproksymacji sztywności podukładu fizycznego w zagadnieniu własnym, znaczne nieliniowości wykazywane podczas symulacji przez podukład fizyczny nie wpływały na poprawność wyników.
- W rozdziale szóstym przedstawiono autorską modyfikację algorytmu redukcji modelu MES do zastosowań w symulacji hybrydowej. Modyfikacji poddano znaną technikę dynamicznej kondensacji. Zaproponowana technika redukcji posiada te same wymagania odnośnie własności badanego układu, co przedstawiona wcześniej metoda redukcji z wykorzystaniem superpozycji modalnej. Dokonano przeglądu literatury znanych jakościowych i ilościowych technik wyboru głównych stopni swobody. Przedstawiono autorski algorytm wyboru głównych stopni swobody oparty na optymalizacji ewolucyjnej, w której minimalizowane są dwa kryteria: liczba stopni swobody oraz funkcja błędów zredukowanego modelu.
- Rozdział siódmy omawia możliwości stosowania metamodeli do zastąpienia modelu MES w obliczeniach czasu rzeczywistego w symulacji hybrydowej. Zaproponowany w rozdziale algorytm zweryfikowano dla dwóch przykładów numerycznych: belki z nieliniową sprężyną oraz ramy rowerowej z nieliniowym amortyzatorem.



## **KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA**

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

### **2. OGÓLNA OCENA PRACY**

Praca porusza bardzo trudny temat dostosowania symulacji numerycznych MES do postaci umożliwiającej realizację obliczeń w czasie rzeczywistym. Autor zdecydował się rozwiązać ten problem poprzez analizę wielu aspektów takich jak zastosowanie układów FPGA, redukcję modelu MES oraz wykorzystanie technik metamodelowania. Podejście to pokazało, iż każde z tych podejść z osobna może przynieść oczekiwany efekt poprawy efektywności numerycznej. Po przeczytaniu rozprawy należy zatem z całą pewnością stwierdzić, iż cele, które Autor postawił w pierwszym z rozdziałów zostały, osiągnięte, a teza udowodniona. Ciężko natomiast doszukać się analizy efektu synergii np.: jaki efekt przyniosłoby zbudowanie metamodelu na modelu zredukowanym w implementacji na FPGA? Odpowiedź na takie pytanie byłaby na pewno dopełnieniem ogromu prac, które Autor zrealizował przygotowując rozprawę.

Tytuł rozprawy jest zbyt ogólny, powinien być nieco dłuższy i precyzować, jakie konkretnie zagadnienia są w pracy rozwiązywane. W przypadku niniejszej pracy z tytułu wiadomo jedynie, że Autor chce zastosować metodę elementów skończonych czasu rzeczywistego w symulacji hybrydowej, natomiast rozszerzone zdanie o wyzwaniach w pracy znajduje się dopiero w celach na stronie 7. Z drugiej strony trzeba jednak przyznać, że zakres wykonanych przez Autora prac jest zaskakująco obszerny i mógłby stanowić tematykę przynajmniej dwóch rozpraw doktorskich ukierunkowanych na redukcję modeli MES i zastosowanie obliczeń z wykorzystaniem układów FPGA.

W rozprawie zawarto obszerny, uzyskany na drodze dużego nakładu pracy, materiał doświadczalny. Autor zaplanował i konsekwentnie zrealizował sekwencję badań doświadczalnych umożliwiających weryfikację opracowanych algorytmów numerycznych. Na szczególną uwagę zasługuje opracowane przez Autora stanowisko badawcze z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej Instron ElectroPlus E10000 oraz kontrolera National Instruments myRIO, które dostarczyło wyników badań do kilku rozdziałów.

Sumarycznie oceniam pracę pozytywnie. Przede wszystkim nie mam zastrzeżeń do sposobu przeprowadzenia badań doświadczalnych oraz do ich interpretacji. Szczegółowa analiza poszczególnych badań opisanych w pracy budzi jednak pewne wątpliwości i oczekiwałbym szerszych wyjaśnień od Autora dotyczących kilku aspektów. Moje główne krytyczne lub dyskusyjne uwagi są następujące:

1. Układ pracy budzi pewne zastrzeżenia – Autor odszedł od klasycznego układu pracy, w którym najpierw przeprowadzany jest przegląd literaturowy. Z przeglądu zwykle wynika, jakie są „białe plamy” w badanej przez Niego problematyce, których rozwiązanie staje się motywacją do sformułowania tezy i celów pracy, a następnie podjęcia konkretnych badań. W niniejszej pracy Autor najpierw przedstawia motywację, która bardziej wynika z coraz większej popularności MES czasu rzeczywistego niż z przeglądu literatury, a następnie formułuje cele i tezę pracy. Właściwy przegląd literatury sformułowany jest w każdym z

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie | Wydział inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej | Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska  
tel. +48 12 617 38 75, fax +48 12 617 28 89  
e-mail: isim@agh.edu.pl, www.isim.agh.edu.pl



## KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

rozdziałów z osobna, co powoduje, że ciężko czyta się kolejne części pracy jako spójną całość.

2. Konsekwencją poprzedniego punktu jest fakt, iż trudno jest oddzielić w pracy przegląd literatury od osiągnięć własnych Doktoranta. Przegląd literatury powinien zawierać opis stanu zagadnienia oraz pokazać nierozwiązane problemy, co powinno doprowadzić Doktoranta do sformułowania tezy i celów. Jak już wspomniałem, praca ma trochę nietypowy charakter ze względu na sam układ, jednakże skoro Autor przyjął już taki schemat działania, to w każdym z rozdziałów spodziewałbym się opisu wprost uwypuklającego wkład własny.
3. Kolejność celów pracy i tezy powinna być odwrotna. Cele powinny być wytyczone, aby udowodnić tezę. Zatem spodziewałbym się, iż teza sformułowana zostanie jako pierwsza i wynikająca z przeglądu literatury, a następnie opisane będą cele i zadania z nich wynikające. W pracy mamy jednak sytuację odwrotną, co sugerowałoby, że Autor wie, co chciałby zrobić, a następnie dopasowuje tezę do zawartości swoich prac. Jest to tym istotniejsze, że tytuł pracy jest bardzo ogólny i nie ogranicza się tylko do jednego zagadnienia.
4. W rozdziale czwartym dotyczącym zastosowania układu FPGA Autor przedstawia dwa rozwiązania, które można uznać za ciekawy wkład w tym obszarze nauki tj. modyfikacja algorytmu kompresji macierzy rzadkich oraz zastąpienie zmiennoprzecinkowej reprezentacji liczb reprezentacją stałoprzecinkową. Pierwszy z rozdziałów opisany jest dość precyzyjnie, jednak w przypadku drugiego pojawiają się pewne wątpliwości. Doktorant pisze, na co należy zwrócić uwagę przy zamianie reprezentacji np.: dobór długości słów lub długości całych zmiennych, ale nie pisze jak należy to zrobić w odniesieniu do ograniczonych zasobów sprzętowych FPGA (strona 63). Taka metodyka niewątpliwie byłaby cenna z punktu widzenia osiągnięć pracy.
5. W weryfikacji numerycznej powyższego rozwiązania (rozdział 4.4) można już znaleźć trochę więcej szczegółów na temat ilości bitów w reprezentacji słów dla kolejnych wektorów. Doktorant podaje, iż doszedł do opisanego rozwiązania metodą podobną do podejścia *brute force*, dodając bity aż do osiągnięcia wymaganej dokładności rozwiązania. Pokazuje to jednak na przykładzie konkretnej kratownicy. Nasuwa się zatem pytanie czy takie podejście należy stosować w każdym przypadku, czy też opisane reprezentacje wektorów i słów są na tyle uniwersalne, że można je przyjąć również dla innych obliczeń i będą dawały gwarancję satysfakcjonujących wyników. Bardzo ciekawy byłby wykres pokazujący zależność czasu obliczeń od ilości bitów przyjętych do reprezentacji słów oraz weryfikacja otrzymanych wyników dla innych niż zaprezentowany w pracy przypadków pod warunkiem osiągnięcia przyspieszenia w stosunku do obliczeń z arytmetyką zmiennoprzecinkową.

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie | Wydział inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej | Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

tel. +48 12 617 38 75, fax +48 12 617 28 89

e-mail: [isim@agh.edu.pl](mailto:isim@agh.edu.pl), [www.isim.agh.edu.pl](http://www.isim.agh.edu.pl)



## KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

6. W rozdziale 5.3 podczas weryfikacji numerycznej modelu zredukowanego pojawia się również wzmianka o zastosowaniu układu FPGA do obliczeń modelu. Jest to oczekiwany kierunek badań, czyli analiza efektu synergii dwóch metod przyspieszenia obliczeń MES czasu rzeczywistego. Wyniki pomiarów czasowych mogłyby pokazać, jak wykorzystanie FPGA przyczyniło się jeszcze do przyspieszenia obliczeń modelu zredukowanego. Autor nie pokazuje wyników ilościowych, stwierdzając jedynie, że otrzymane wyniki odpowiadają pomiarom. W mojej opinii można byłoby pokazać wyniki czasowe dla  $\gamma \leq 3$ .
7. Rozdział 6.2 zawiera opis algorytmu umożliwiającego wybór głównych stopni swobody. Autor dużo miejsca poświęca algorytmice wyboru stopni swobody oraz opisowi działania algorytmów ewolucyjnych, które zastosował. Brakuje jednak wyjaśnienia, dlaczego akurat ten a nie inny algorytm optymalizacji inspirowany naturą został zastosowany, szczególnie że mamy tu do czynienia z optymalizacją wielokryterialną o dwóch przeciwstawnych kryteriach. Nasuwa się więc pytanie czy Doktorant rozważał wykorzystanie jakiejś innej metody wielokryterialnej i co było powodem, dla którego zdecydował się na taki a nie inny wybór. Ponadto, w wynikach weryfikacji numerycznej można zobaczyć pewną niekonsekwencję w postaci braku wykresu frontu Pareto w rozdziale 6.3, podczas gdy w rozdziale 6.4 stanowi on jeden z głównych elementów.
8. W rozdziale 7.1 Autor używa stwierdzenia, iż nie istnieje żadna jednoznaczna zasada określająca, jaki typ metamodelu należy dobrać do konkretnego problemu. Poniekąd jest to prawda, jednak ciężko się zgodzić z tak bezwzględnym stwierdzeniem, ponieważ w całym obszarze modeli zastępczych (ang. *surrogate models*) istnieje wiele przesłanek i zasad, na podstawie których Doktorant mógł dokonać uzasadnionego wyboru typu stosowanego metamodelu. W przypadku niniejszej pracy jest to sieć neuronowa, a zatem można było również pójść o krok dalej i wykorzystać podejścia, które pozwalają na dobór odpowiedniej architektury takiej sieci.

Podsumowując ogólną ocenę pracy stwierdzam, że Doktorant udowodnił bardzo dobre przygotowanie do prowadzenia oryginalnych badań naukowych w zakresie modelowania i metamodelowania numerycznego, a w szczególności w wykorzystaniu metody elementów skończonych czasu rzeczywistego w symulacjach hybrydowych. Potwierdził On swoją wiedzę i zrozumienie problemów w tym zakresie. Wykazał się biegłością w stosowaniu skomplikowanej aparatury badawczej i nowoczesnych metod symulacji procesów. Z drugiej strony, w pracy jest kilka aspektów wymagających wyjaśnienia, które wymieniłem wcześniej w recenzji. Te niedociągnięcia nie mają decydującego znaczenia i nie podważają faktu, że Autor samodzielnie rozwiązał istotne problemy naukowe. Stąd sumaryczna ocena pracy jest pozytywna.



## KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

### 3. UWAGI EDYTORSKIE

Praca napisana jest dość przejrzysto w aspekcie merytorycznym. Od strony edytorskiej również przygotowana jest bardzo starannie. Ciężko znaleźć potknięcia Autora lub niedomówienia, które uchybiałyby pracy w sposób znaczący. Poniżej lista niedociągnięć natury edytorskiej i raczej drobnych potknięć merytorycznych:

- Strona 22, błędna numeracja wzorów – znajdziemy tam odwołania do wzorów 2.40 i 2.41, które odnoszą się do zupełnie innych zagadnień niż wspomniane na stronie 22.
- Strona 24, odwołania do niewłaściwych prac – Doktorant odwołuje się do prac 25 i 28, które są pracami Zienkiewicza i Rakowskiego opisujące podstawy MES i jej zastosowania w mechanice, a nie wybranych metod Newmarka, Wilsona czy Houbolta. Autor powinien użyć odwołań do prac źródłowych.
- Podobne wątpliwości budzi odwołanie do pozycji literaturowej 18 na stronie 28 – pozycja 18 dotyczy harmonogramowania zadań w systemach czasu rzeczywistego, podczas gdy rozdział dotyczy redukcji modelu, a układ równań dotyczy macierzy sztywności, tłumienia i bezwładności.
- Na stronie 34 można znaleźć zdanie „... procesory graficzne mogą posiadać nawet setki tysięcy rdzeni.” – sformułowanie to nawet w odniesieniu do najnowocześniejszych obecnie dostępnych kart graficznych jest bardzo na wyrost. Autor powinien doprecyzować, jakie procesory miał na myśli, pisząc to zdanie.
- Strona 49 – w zdaniu „Przyjęto krok czasowy 5ms dla  $m=1$ .” nie wiadomo, o jakie  $m$  chodzi.
- Praca zawiera dosłownie kilka błędów gramatycznych np.: strona 40 -przecinek przed *oraz*, strona 94 *redukcją* zamiast *redukcję*.

### 4. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując opinię należy stwierdzić, że Doktorant:

- wykazał się umiejętnością prowadzenia badań naukowych obejmujących symulacje numeryczne metodą elementów skończonych w czasie rzeczywistym oraz jej wykorzystanie w symulacjach hybrydowych,
- bardzo dobrze zna warsztat metod umożliwiających przyspieszenie obliczeń symulacji numerycznych poprzez redukcję modelu czy też wykorzystanie innowacyjnych architektur sprzętowych,
- biegle porusza się w obszarze badań eksperymentalnych, co udowodnił poprzez opracowanie oryginalnego stanowiska badawczego, które dostarczyło bogatych wyników doświadczalnych do weryfikacji metod numerycznych,

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie | Wydział inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej | Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania**

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska  
tel. +48 12 617 38 75, fax +48 12 617 28 89  
e-mail: isim@agh.edu.pl, www.isim.agh.edu.pl



## **KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ I MODELOWANIA**

Wydział Inżynierii Metali  
i Informatyki Przemysłowej

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA  
STASZICA W KRAKOWIE**

- przeprowadził skrupulatną analizę uzyskanych wyników w aspekcie dokładności i wiarygodności metod numerycznych, przyczyn powstawania błędów, a także możliwości uniknięcia tych trudności i wyeliminowania błędów.

Recenzja pracy zawiera uwagi krytyczne i dyskusyjne komentarze, ale nie umniejszają one sumarycznej merytorycznej ocenie pracy. Praca, co podkreślałem kilkakrotnie w trakcie recenzji, jest bardzo obszerna, a jej zakres mógłby posłużyć więcej niż jednej rozprawie doktorskiej. Doceniam warsztat badawczy i dobór metod, którymi posłużył się Autor pracy i uważam, że pozytywne aspekty przeprowadzonych przez Autora badań oraz wykazane przez Niego umiejętności w rozwiązywaniu problemów naukowych przeważają nad krytycznymi uwagami do pracy. Sumaryczna ocena pracy jest pozytywna, a rozprawa stanowi samodzielne rozwiązanie problemu naukowego w dyscyplinie mechanika i spełnia wymagania zawarte w odpowiedniej ustawie. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Waldemara Muchy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.