

Dr hab. inż. **Tomasz Domański**, prof. PCz
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Olafa Popczyka** pt.: „**Modelling of thermal fields in metamaterials using radial basis function-based meshless methods**”

Promotor: dr hab. inż. **Grzegorz Działkiewicz**, prof. PŚ

Podstawa opracowania: pismo RDIME.512.21.2022 z dnia 29.06.2022 r. Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, Prof. dr hab. inż. Ewy Majrzhak

1. Zakres i ogólna charakterystyka pracy

Podstawowym osiągnięciem naukowym jest przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska, która obejmuje 164 strony, oraz: 1 strona streszczenia, 2 strony spisu treści, 5 stron spisu rysunków, 4 strony wykazu ważniejszych oznaczeń, 8 stron wstępu, 13 stron spisu literatury, 4 stron dodatku. Sama praca składa się z 5 rozdziałów i napisana jest w języku angielskim.

Rozdział 1 - stanowi wprowadzenie do problematyki i uzasadnienie podjęcia tematyki rozprawy. Autor jasno i wyczerpująco uzasadnił wybór do rozważań równania Cattaneo-Vernotte oraz obszernie opisał szerokie spektrum możliwości stosowania metody Kansa - przybliżonego rozwiązywania problemów równań różniczkowych cząstkowych opartej na tzw. radialnych funkcjach bazowych. Ponadto, nakreślił rozważane problemy, przedstawił cele i hipotezy pracy, a także dokonał przeglądu literatury potwierdzając, że tematyka pracy doskonale wpisuje się w aktualne trendy naukowe.

Rozdział 2 - w rozdziale tym przedstawiono równania bazowe i metody obliczeniowe zastosowane w pracy. Pokazano w nim zastosowanie metod kolokacji w połączeniu z metodą Kansa do rozwiązania problemu początkowej wartości granicznej. Ważnym elementem tego rozdziału jest dyskusja algorytmów poszukiwania dobrej wartości parametru kształtu.

Rozdział 3 - w tym rozdziale zbadano, czy opracowany solver został poprawnie zaimplementowany. Autor dokonał weryfikacji implementacji solvera oraz przeprowadził walidację, czy metoda Kansa w przedstawionych sformułowaniach jest odpowiednia dla rozważanej klasy problemów i czy zaproponowane algorytmy znajdowania dobrej wartości parametru kształtu są skuteczne. Dokonano tego poprzez porównanie rozwiązania uzyskanego metodą Kansa z rozwiązaniami referencyjnymi uzyskanymi innymi metodami. Implementacja algorytmu do rozwiązania rozważanego problemu wartości początkowej-granicznej została wykonana przez autora z wykorzystaniem środowiska obliczeń numerycznych MATLAB. Dla wielu rozważanych problemów rozwiązaniem referencyjnym było rozwiązanie uzyskane za pomocą solvera metody różnic skończonych, którego implementacja również została wykonana przez autora w tym samym środowisku co solver metody Kansa. Opis metody różnic skończonych zastosowanej w tej pracy znajduje się w załączniku.

Rozdział 4 - w tym rozdziale problem projektowania urządzenia metamateriałowego został sformułowany w postaci procesu optymalizacyjnego. Dla zapewnienia stabilności procesu zastosowano podwójną filtrację: wektora zmiennych projektowych oraz wektora gradientu. Przepływ ciepła jest procesem silnie dyfuzyjnym, co sprawia, że kontrolowanie kierunku przepływu ciepła jest niezwykle trudne. Rozważono kilka typów zagadnienia sterowania strumieniem ciepła za pomocą metamateriału w postaci:

- inwersji, w której przepływ ciepła w obiekcie ma takie samo natężenie, ale przeciwny kierunek niż przepływ w płaszczu,
- koncentracji, w której przepływ ciepła w obiekcie ma ten sam kierunek, ale znacznie większą intensywność niż przepływ w płaszczu,
- ekranowania, w którym intensywność przepływu ciepła w obiekcie dąży do zera,
- maskowania, w którym przepływ ciepła w obiekcie ma taką samą intensywność i kierunek jak przepływ w płaszczu.

W pracy rozważany jest układ, którego idea została zaproponowana przez Narayana's, która to jest koncepcją i nie ma ściśle określonych parametrów. Dlatego też istnieje wiele specyficznych implementacji tego układu. W niniejszej pracy zdecydowano się na wykorzystanie układu Fachinottiego. Przeprowadzono badania wpływu gęstości punktów kolokacji, parametru filtrów i punktu startowego algorytmu optymalizacji na wyniki wyrażone wartością funkcji celu i otrzymaną postacią metamateriału.

Rozdział 5 - w tym rozdziale pracy autor przedstawił wszystkie wnioski wyciągnięte na podstawie przeprowadzonych badań oraz zalecenia dla przyszłych badań.

Podsumowując całość badań i uzyskanych wyników stwierdzam, że zostały one wykonane i opracowane na bardzo wysokim poziomie. Istotną wartością tej rozprawy jest sformułowanie i zaimplementowanie kilku metod obliczeniowych stanowiących warianty bazujące na klasycznej bezsiatkowej niesymetrycznej metodzie Kansy opartej na radialnych funkcjach bazowych. Na podkreślenie zasługuje aplikacyjny charakter rozwiązań analitycznych dla pewnych typów zmienności parametrów termofizycznych i geometrii zadań brzegowych i brzegowo-początkowych, które posłużyły do weryfikacji i walidacji zaimplementowanych metod i algorytmów. W mojej ocenie Pan mgr inż. Olaf Popczyk potwierdził, że jest bardzo dobrze przygotowany do prowadzenia prac badawczych.

2. Ocena tematu, celu i zakresu pracy

Głównym celem pracy jest zastosowanie metody Kansa do rozwiązywania eliptycznych, parabolicznych i hiperbolicznych problemów przepływu ciepła w materiale o przestrzennie zmiennych parametrach termofizycznych. Oprócz celu głównego istotne było również sformułowanie algorytmów poszukiwania dobrej wartości parametru kształtu, które są efektywne z obliczeniowego punktu widzenia. Kolejnym, ważnym aspektem pracy było zastosowanie metody Kansa do zaprojektowania termicznego elementu metamateriału do manipulacji strumieniem ciepła z wykorzystaniem optymalizacji gradientowej.

3. Ocena rozprawy

Przedstawiona przez doktoranta praca jest interesującym i istotnym dla rozwoju dyscypliny Inżynieria Mechaniczna wkładem w postaci wartościowego procesu badawczego wraz z przedstawionym podejściem analitycznym oraz weryfikacją uzyskanych wyników. W przygotowanej pracy zawarte są więc wszystkie elementy procesu badawczego charakteryzującego podejście do samodzielnej pracy badawczej. Jest w niej proces przygotowawczy w postaci sformułowania problemu, przygotowanie i wykonanie symulacji obliczeniowych, jak również proces analizy uzyskanych wyników na podstawie porównania różnych metod. Przedstawiona praca w mojej ocenie spełnia wymagania związane z wniesieniem oryginalnego wkładu w obszar nauki. Ponadto ma charakter użyteczny i wynikające z niej wnioski mogą zostać wykorzystane do dalszego rozwoju technik obliczeniowych w zakresie przepływu ciepła.

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem opisu przedstawionego problemu, wyboru metod i zakresu badań oraz sposobu jego rozwiązania zaliczam:

- a) ciekawą i istotną tematykę rozprawy mającą zastosowanie w modelowaniu przepływu ciepła dla metamateriału o przestrzennie zmiennym rozkładzie parametrów fizycznych,
- b) walidację i weryfikację opracowanych metod i algorytmów,
- c) szeroki zakres przedstawionych symulacji, pozwalający na uzyskanie znaczącej bazy wyników,
- d) dobrze przeprowadzone rozpoznanie literaturowe w zakresie poruszanej problematyki badawczej,
- e) logiczny podział pracy, dobre opracowanie edycyjne i czytelne zaprezentowanie wyników w postaci rysunków.

Analizując pracę autora nasuwają się pewne spostrzeżenia i pytania:

1. Czy zaproponowana grupa algorytmów do znalezienia dobrej wartości parametru kształtu okazała się na tyle skuteczna, że można uznać, iż daje zadowalające i dokładne wyniki dla dowolnych obiektów obliczeniowych?
2. W przypadku inwersji strumienia ciepła, czy tylko niewystarczająca liczba punktów kolokacji jest jedynym powodem uzyskania niepoprawnych wyników?
3. Możliwe jest zastosowanie algorytmów rozwiązania do obszarów rzeczywistych o bardziej złożonej geometrii?
4. Czy testowane były układy z gęstszymi chmurami punktów kolokacyjnych dla analizowanego obiektu?
5. Czy zastosowane metody rozwiązania dają równie zbliżone wyniki dla układów o bardziej dynamicznych procesach termicznych?

4. Wniosek końcowy

Praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Olafa Popczyka, jej zawartość i forma wskazuje na jego wiedzę w zakresie modelowania pól termicznych w ośrodkach niejednorodnych. Sposób realizacji pracy wskazuje na dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna” w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Autor rozprawy doktorskiej podjął się bardzo trudnego i ambitnego zadania, które dostarcza ważnych i przydatnych wniosków w zakresie rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych metodami bezsiatkowymi, konkretnie metodą Kansa, która opiera się na tzw. radialnych funkcjach bazowych. Należy podkreślić, że z tak trudnego zadania Doktorant wywiązał się w sposób bardzo dobry. Wykazał się umiejętnością prowadzenia trudnych obliczeń matematycznych oraz adekwatnym formułowaniem problemów naukowych. Metodologię realizacji obliczeń i symulacji oraz uzyskane wyniki uważam za właściwe i ciekawe. Wnioski wynikające z realizacji przyjętego zakresu badań mają dużą wartość poznawczą i użyteczną. Z przekonaniem stwierdzam, że zasadnicze cele pracy zostały osiągnięte. Podsumowując wyrażam opinię, że:

1. Rozprawa doktorska mgra inż. Olafa Popczyka spełnia wymagania art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, stan prawny na dzień 30 września 2011 r.) i w związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.) i **wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie **Inżynieria Mechaniczna** według nowej klasyfikacji dziedzin i dyscyplin określonej w rozporządzeniu z dnia 20 września 2018 r. (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).
3. Przedstawiona dysertacja jest wartościowym dziełem naukowym. Mając na uwadze oryginalność metodyki przedstawionej w pracy, jak i szerokie zainteresowania naukowe mgra inż. Olafa Popczyka potwierdzone licznymi publikacjami **wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**

