

dr hab. inż. Jerzy Tchórzewski, prof. uczelni
Uniwersytet w Siedlcach
Wydział Nauk Ścisłych i Przyrodniczych
Instytut Informatyki, 08-110 Siedlce, ul. 3-Maja 54
Adres do korespondencji: 08-110 Siedlce, ul. Starowiejska 47a

Siedlce, 18.07.2025 r.

Dotyczy:

Umowa o dzieło nr 37/DN/25 z dnia 03.06.2025 r.
na opracowanie recenzji

**Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Naukowej
Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Opolskiej**

Tytuł rozprawy: Wykorzystanie programowania równoległego do analizy nieliniowych układów dynamicznych z identyfikacją chaotycznych i periodycznych szeregów czasowych

Autor rozprawy: **mgr inż. Maciej Walczak**
Promotor: **dr hab. inż. Wiesław Marszałek, prof. PO**
Promotor pomocniczy: **dr hab. inż. Ryszard Beniak, prof. PO**
Miejsce wydania rozprawy: **Katedra Informatyki Politechniki Opolskiej, Opole**
Rok wydania rozprawy: **2024 r.**

1. Oryginalność rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska, opracowana w formie zwartej, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego wykonane przez p. mgr inż. Macieja Walczaka w sposób merytorycznie poprawny i wyczerpujący, w której Doktorant wykazał, że został zrealizowany cel pracy sformułowany następująco:

„Badania przeprowadzone w ramach tej pracy mają **na celu zaproponowanie narzędzia wykorzystującego przetwarzanie równoległe, dając możliwość efektywnego badania przestrzeni parametrów układów dynamicznych pod kątem występowania chaosu deterministycznego**. Narzędzie powinno uwzględniać **implementację metody testu 0-1 na chaos**, która zostanie wykorzystana do identyfikacji periodycznych i chaotycznych szeregów czasowych. **Badaniu poddana zostanie parametryzacja metody, jak również jej wpływ na uzyskiwane wyniki**. W celach porównawczych, w **implementacji powinna zostać uwzględniona również metoda wykładników Lapunowa oraz metoda entropii próbek**”.

Autor przyjął przy tym, iż „**pomimo, iż są to metody różniące się na poziomie koncepcyjnym i dostarczające innych informacji o badanym systemie niż test 0-1 na chaos, należy podjąć próbę jakościowego porównania wyników uzyskanych z ich**



zastosowaniem. Niezbędne jest określenie sposobu zrównoleglenia zadania oraz jego dekompozycji, które następnie powinny zostać poddane ocenie pod kątem ich efektywności w różnych środowiskach obliczeniowych. Z wykorzystaniem przygotowanej implementacji równoległej przebadać należy przestrzenie parametrów dwóch nieliniowych układów dynamicznych a uzyskane wyniki poddać analizie i ocenie”.

Wskazał dalej, że badaniu poddane zostaną dwa obiekty, to jest **model łuku elektrycznego oraz model oscylacji wapnia**. Zauważył dalej, że ze względu na zakres realizowanych obliczeń niezbędne jest opracowanie: „**adaptacyjnych procedur parametryzacji metod, co zostanie przeprowadzone dla metody testu 0-1 na chaos oraz wykładników Lapunowa**. W przypadku metody entropii próbki zaproponowana zostanie równoległa procedura doboru parametrów. Aby umożliwić prezentację wyników obliczeń opracowane zostanie narzędzie pozwalające na wizualizację wygenerowanych diagramów”.

a tym samym p. mgr inż. M. Walczak pozytywnie zweryfikował hipotezę rozprawy sformułowaną jako następujące założenie:

„Zastosowanie programowania równoległego przyczynia się do wyraźnej poprawy efektywności analizy nieliniowych układów dynamicznych z identyfikacją periodycznych i chaotycznych szeregów czasowych”,

co wiązało się m.in. z wykonaniem następujących zadań naukowych:

- **scharakteryzowaniem podstawowych rodzajów architektury maszyn równoległych, w tym wybranych zagadnień dotyczących narzędzi programistycznych OpenMP oraz MPI**, a także omówieniem kluczowych mechanizmów komunikacji, podziału zadań oraz synchronizacji, przedstawieniem modeli programowania z wykorzystaniem obu ww. narzędzi, spójnym przedstawieniu zjawiska overlapping-u, a także zaprezentowaniem problemu równoważenia obciążenia w programowaniu równoległym, a **w szczególności w modelu hybrydowym MPI+OpenMP**,
- **przedstawieniem metody testu 0-1 na chaos, entropii próbki oraz wykładników Lapunowa** wraz ze zwróceniem uwagi na parametry tych metod oraz wskazaniem podstawowych kroków algorytmów obliczeniowych, co wiązało się m.in. z uwzględnieniem w przypadku:
 - testu 0-1 na chaos - zjawiska nadpróbkiowania,
 - metody wykładników Lapunowa - pojęcia wymiaru Lapunowa,a także pokazaniem przykładowych diagramów jednoparametrowych dla znanych układów Lorenza i Rösslera oraz scharakteryzowaniem dwóch modeli obiektów będących nieliniowymi układami dynamicznymi, to jest: **modelu łuku elektrycznego oraz modelu oscylacji wapnia**,
- **przygotowaniem do badań i opisaniem środowiska obliczeniowego** wraz ze sformułowaniem zadania obliczeniowego oraz oszacowaniem złożoności obliczeniowej implementacji, którą zestawiono z wynikami pomiarów na docelowej platformie obliczeniowej, a następnie przeprowadzeniem **porównania efektywności ww. trzech metod z wykazaniem ich**

newralgicznych punktów, a także opisaniem implementacji ze podziałem zadań działających w środowisku homogenicznym oraz ujęciem dynamicznym dystrybucji zadań dedykowanych dla środowisk heterogenicznych, a ponadto z rozszerzeniem adaptacyjnego podejścia do podziału zadania i przeanalizowaniem jego efektywności oraz przeprowadzeniem badania efektywności zrównoleglenia w środowisku heterogenicznym wraz z pokazaniem sposobu wykorzystania narzędzi do wizualizacji wyników obliczeń,

- **wizualizacją wyników badań metodą testu 0-1 na chaos w postaci jedno-, dwu- i trójparametrowych diagramów dla ww. dwóch układów dynamicznych**, a w przypadku diagramów jednoparametrowych przeanalizowaniem i odniesieniem do diagramów maksimów lokalnych, a także poddaniu badaniom parametryzacji metod i przedstawieniem w tym kontekście wyników fałszywie pozytywnych oraz fałszywie negatywnych, przy czym w celu wyeliminowania błędów fałszywie negatywnych z zastosowaniem kryterium częstotliwościowego, a w przypadku fałszywie pozytywnych z zaproponowaniem podejścia adaptacyjnego, wraz z potwierdzeniem wyników odpowiednimi diagramami,
- **przeprowadzeniem badania przestrzeni parametrów dwóch układów dynamicznych przy użyciu metody entropii próbki wraz z odniesieniem wyników badań do wyników uzyskanych metodą testu 0-1 na chaos** wraz ze zwróceniem uwagi, na bazie charakterystycznych szeregów czasowych, na silniejsze oraz słabsze strony stosowanych metod, a także podjęciem próby analizy wpływu parametryzacji metody na uzyskiwane wyników z zaproponowaniem dodatkowej procedury równoległej w celu korzystniejszego doboru parametrów,
- **wykonaniem badania przestrzeni parametrów ww. dwóch układów dynamicznych z wykorzystaniem metody wykładników Lapunowa** wraz ze wskazaniem problemów związanych z procesem ortogonalizacji oraz zaproponowaniem metody adaptacyjnej pozwalającej znacząco zredukować ten problem, a także podkreśleniem istotności parametrów metody mających największy wpływ na uzyskiwane wyniki, a ponadto ze zidentyfikowaniem problemów dotyczących sytuacji, gdy rozwiązaniem układu jest punkt w przestrzeni fazowej oraz zaimplementowaniem rozwiązania umożliwiającego uzyskanie zbieżności algorytmu oraz zwiększeniem jego efektywności, jak też z przedstawieniem diagramów największego wykładnika Lapunowa i wymiaru Lapunowa wraz z odniesieniem do diagramów uzyskanych z wykorzystaniem metody testu 0-1 na chaos oraz entropii próbki,
- **przeprowadzeniem merytorycznie ukierunkowanej dyskusji** wraz ze wskazaniem syntetycznych autorskich osiągnięć rozprawy.
- **wskazaniem w treści rozprawy istotnych kierunków dalszych badań.**

1. Ocena ogólna rozprawy

Już na wstępie należy podkreślić, że tematyka rozprawy jest bardzo aktualna i merytorycznie poprawna oraz wpisuje się w **lukę rozbieżności pomiędzy możliwościami dostępnych metod, narzędzi i technologii przetwarzania równoległego oraz poszerzającego się obszaru ich komercyjnych zastosowań**, a generowanym zapotrzebowaniem na obliczenia równoległe, w tak bardzo ważnych zagadnieniach jak **potrzeba poprawy oceny efektywności systemów i układów dynamicznych tego typu jak ww. oba obiekty badań wskazane w rozprawie, to jest luk elektryczny oraz oscylacja wapnia w cytozolu.**

Ponadto warto już w tym miejscu zauważyć, że p. mgr inż. Maciej Walczak podjął się badania bardzo złożonego zagadnienia m.in. z wykorzystaniem metody przeszukiwania dużych

przestrzeni parametrów **z wykorzystaniem metody testu 0-1 na chaos** oraz **programowania równoległego**, które dotychczas nie były jeszcze kompleksowo przeprowadzone we wskazanym w rozprawie obszarze badań. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na wysoką skuteczność badanych ww. trzech metod jak też ww. narzędzi, które mogą zostać wykorzystane także w innych podobnych badaniach obiektów z chaosem, jak np. we wskazanych w rozprawie systemach kryptograficznych, gdzie analiza przestrzeni parametrów w celu detekcji chaosu jest niezbędna do zapewnienia prawidłowego działania. Wreszcie należy wyraźnie zauważyć, że p. mgr inż. Maciej Walczak w sposób uzasadniony odniósł uzyskane wyniki swoich badań do wyników będących rezultatem dobrze sprawdzonej i szeroko dotychczas stosowanej metody wykładników Lapunowa, które potwierdziły jej wysoką ocenę.

Autor rozprawy osiągnął założone cele, pozytywnie zweryfikował hipotezę badawczą, w tym wykazał m.in., że zaprojektowanie aplikacji równoległej, dedykowanej dla określonego zadania obliczeniowego, wymaga jego szczegółowej wstępnej analizy, na podstawie której można określić rodzaj i sposób dekompozycji zadania, wskazać mechanizmy komunikacji i synchronizacji zapewniające wysoką wydajność oraz skalowalność jak też wysoką efektywność systemu. Uzyskanych wyników szczegółowych jest przy tym tak dużo, że nie sposób je wszystkie wymienić w ocenie ogólnej rozprawy.

2. Tło badań programowania równoległego w analizie nieliniowych systemów dynamicznych

Doktorant dokonał wystarczającego rozpoznania stanu literatury przedmiotu, w tym m.in. w zakresie charakterystyki podstawowych rodzajów architektury maszyn równoległych, a w szczególności dotyczących narzędzi programistycznych OpenMP oraz MPI oraz w zakresie istotnych z punktu widzenia rozprawy: mechanizmów komunikacji, podziału zadań oraz ich synchronizacji. W sposób jakościowo poprawny przedstawił m.in. modele programowania z wykorzystaniem obu ww. narzędzi, a także zaprezentował problem równoważenia obciążenia obliczeń w programowaniu równoległym, a w szczególności z wykorzystaniem **modelu hybrydowego MPI+OpenMP**.

Tło badań z punktu widzenia przynajmniej pięciu głównych wyróżników wykorzystanych w rozprawie, a więc: **obiekty badań, metody badania, narzędzia badań, środowiska programowania, danych przyjętych do przeprowadzenia obliczeń** sprowadza się do wykorzystania w rozprawie:

- nieliniowych złożonych układów dynamicznych na przykładzie **dwóch obiektów**, to jest **procesu łuku elektrycznego** oraz **procesu oscylacji wapnia w cytozolu**,
- metody badania przestrzeni parametrów układu za pomocą **testu 0-1 na chaos, entropii próbki oraz metody wykładników Lapunowa**, do której odniesione zostały uzyskane wyniki badań,
- **programowania równoległego** jako narzędzia badań **z wykorzystaniem** zwłaszcza **metody hybrydowej MPI+OpenMP**, w którym Doktorant w poprawny sposób zapewnił wysoką wydajność oraz skalowalność systemu, poprzedzając programowanie odpowiednią analizą w celu uzyskania informacji dotyczącej m.in.: rodzaju i sposobu dekompozycji zadania, mechanizmów komunikacji i synchronizacji,
- **środowiska programowania wykorzystanego w rozprawie to jest: j. C oraz j. C++**, na bazie których zbudowany został **Standard OpenMP** (ostatnia wersja 6.0 z 2024 r.) oraz **Standard MPI** (ostatnia wersja 4.0 z 2021 r. i jej ulepszenie wersja 4.1 z 2023 r.), w którym OpenMP organizuje pracę wątków na poziomie węzłów, a MPI zapewnia



wymianę komunikatów, przy czym interfejs programistyczny posiada trzy komponenty: **polecenia kompilatora, funkcje biblioteczne oraz zmienne środowiskowe**, które Autor wykorzystał do zrównoleżenia programu z wykorzystaniem modelu fork-join, przy zapewnieniu równoczesnej realizacji obliczeń i komunikacji (tzw. overlapping-u).

W tym miejscu warto pokazać, że Doktorant w sposób umiętny posadził swoje obliczenia na systemie obliczeniowym skrupulatnie zaprojektowanym i dobranym do charakteru badanego zjawiska. Wystarczy podać m.in., że w jego skład wchodziły trzy karty (PCI) Intel Xeon Phi Coprocessor 7120 oparte na architekturze MIC (ang. Many Integrated Core) oraz dwa procesory Intel Xeon CPU E5-2650 v3 2.30GHz, przy czym każda z kart wyposażona była w 61 rdzeni taktowanych częstotliwością 1,238 GHz, z których każdy umożliwiał uruchomienie czterech wątków, co w konsekwencji pozwalało na wykonanie aplikacji na 244 wątkach w ramach jednej karty.

A zatem aplikacja została napisana w j. C oraz j. C++, a do zrównoleżenia zastosowane zostały narzędzia Intel MPI Library oraz OpenMP, przy czym do kompilacji wykorzystywany został kompilator Intel C++ Compiler wspierający architekturę MIC, a w procesie implementacji istniała możliwość wykorzystania bardzo bogatego zbioru bibliotek matematycznych Intel MKL (Math Kernel Library), przygotowanych do współpracy z platformą producenta, co potwierdza wysoką samodzielność i bardzo duże umiejętności projektowe i programistyczne posiadane przez p. mgr inż. Macieja Walczaka.

- **szeregów czasowych z różnym doбором sposobu próbkowania**, w tym zwłaszcza częstotliwości, **jako danych wykorzystanych w projektowaniu i implementacji ww. trzech metod i związanych z nimi procedur obliczeniowych**, przy czym na uwagę zasługuje **charakter zjawiska nieliniowości szeregów czasowych**, które są chaotyczne i periodyczne przy zmianie dwóch oraz trzech parametrów układu i charakteryzują się bardzo złożonym zachowaniem, jak też wrażliwością na warunki początkowe, co wskazuje na trafne przyjęcie przez Autora rozprawy programowania równoległego, które dzięki swojej zdolności do jednoczesnego wykonywania wielu operacji i przetwarzania dużych ilości danych, otwiera nowe możliwości w analizie nieliniowych układów dynamicznych, które p. mgr inż. Maciej Walczak wykorzystał w sposób umiętny do przyspieszenia obliczeń, co łącznie okazało się istotne w analizie zaproponowanych przez niego, szeregów czasowych i związanych z nimi badań, wymagających przeprowadzenia dużej ilości złożonych operacji.

Dodać należy, że **Doktorant zadbał także o ilustrację i interpretację uzyskiwanych wyników badań**, w tym np. w zakresie efektywnego przedstawienia diagramów dla trzech zmieniających się parametrów na płaszczyźnie opracowując z wykorzystaniem technologii webowych dedykowane narzędzie do wizualizacji wyników badań, które **zostało zaimplementowane w j. Python jako samodzielna aplikacja** z wykorzystaniem do obsługi grafiki takich bibliotek jak m.in. plotly oraz matplotlib.

Ponadto Autor wygenerował kod HTML z wykorzystaniem narzędzia JupyterLab oraz voilà.

3. Ocena szczegółowa przeprowadzonych badań

Doktorant przede wszystkim bardzo dobrze dokonał doboru wszystkich wymienionych w p. 2 wyróżników porządkujących proces badawczy, a następnie z ich wykorzystaniem przeprowadził bardzo szczegółowe badania, **które wnoszą istotny wkład w rozwój zastosowania przetwarzania równoległego do analizy nieliniowych układów**

dynamicznych z wprowadzeniem badania zmian w ślad za zmianami parametrów oraz optymalizacją zastosowanych metod, **stąd moja ocena przeprowadzonych badań jest bardzo wysoka.**

Ocenę przeprowadzonych badań warto odnieść do trzech najbardziej istotnych zagadnień, to jest:

- efektywności zrównoleglenia zadania generowania diagramów w modelu hybrydowym MPI+OpenMP,
- uzyskanych wyników analizy diagramów testu 0-1 na chaos, entropii próbki oraz wykładników Lapunowa,
- zaproponowanej procedury eliminacji błędów oraz metody parametryzacji.

3.1. Efektywność zrównoleglenia zadania generowania diagramów w modelu hybrydowym MPI+OpenMP

Doktorant słusznie przyjął m.in., że projektowanie aplikacji równoległej powinno uwzględniać charakterystykę zadania obliczeniowego w taki sposób, aby wykorzystać dostępne zasoby sprzętowe w sposób efektywny. W tym duchu zaproponował równoległe implementacje narzędzia do badania układów dynamicznych **z wykorzystaniem trzech metod, to jest: metody testu 0-1 na chaos, metody entropii próbki oraz metody wykładników Lapunowa z wykorzystaniem hybrydowego modelu MPI+OpenMP.**

Na tej bazie przeprowadził przede wszystkim **porównanie efektywności ww. trzech metod w odniesieniu do ich głównych parametrów**, przy założeniu uzyskania podstawy przy opracowywaniu narzędzia, które dla konkretnych parametrów umożliwiło wyznaczenie czasu obliczeń dla każdej z trzech metod.

Przeprowadził przy tym badanie efektywności zrównoleglenia, uwzględniające różne strategie wykorzystania dostępnej architektury, jak i wybrane sposoby zastosowania technologii MPI i OpenMP.

Przeprowadzone badania wykazały m.in., że **czas realizacji zadania przy jego użyciu można zredukować o około 7%.** Wyniki badań nad efektywnością zrównoleglenia potwierdziły Autorowi też dobrą skalowalność algorytmów. Wykazany został liniowy wzrost czasu obliczeń wraz ze wzrostem rozmiaru zadania w przypadku wszystkich badanych metod.

Przeprowadzone analizy oparte na jednostkach *BCE* wykazały ponadto, że system jest w stanie efektywnie obsłużyć zwiększoną liczbę jednostek obliczeniowych bez zauważalnych strat wydajności.

Wprowadzenie adaptacyjnej dystrybucji zadań okazało się kluczowym czynnikiem optymalizacyjnym, który przełożył się na wzrost przyspieszenia obliczeń, dla metod o równomiernym rozkładzie obciążeń.

Przeprowadzono przy tym również badania algorytmu Parkera i Chua, w których **zwiększenie liczby węzłów obliczeniowych umożliwiło istotne przyspieszenie obliczeń**, mimo specyficznych wymagań algorytmu.

Badania wykazały, że odpowiednio zaprojektowane algorytmy, w połączeniu z adaptacyjną dystrybucją zadań, mogą skutecznie zwiększyć wydajność heterogenicznych systemów obliczeniowych, zapewniając efektywne wykorzystanie zasobów.

Uzyskane wyniki potwierdziły, że postawiona w rozprawie hipoteza badawcza została pozytywnie zweryfikowana.



3.2. Wyniki analizy diagramów testu 0-1 na chaos, entropii próbki oraz wykładników Lapunowa

Doktorant przeprowadził szereg badań i uzyskał wiele istotnych wyników dotyczących przestrzeni parametrów **dwóch nieliniowych układów dynamicznych, tj. procesu łuku elektrycznego oraz procesu oscylacji wapnia w cytozolu z wykorzystaniem trzech metod: metody testu 0-1 na chaos, metody entropii próbki oraz metody wykładników Lapunowa.**

Uzyskane przez p. mgr Macieja Walczaka diagramy, w wyniku zastosowania metody testu 0-1 na chaos, pokazały m.in., że **można identyfikować chaotyczne i periodyczne szeregi czasowe przy zmianie dwóch oraz trzech parametrów układu i w takim zakresie wykorzystane narzędzie może zostać zaliczone do stosunkowo nowych narzędzi**, które do tej pory szerzej nie było wykorzystywane w typu badaniach oraz do tej pory niepublikowane.

Podobnie zastosowanie metody entropii próbki, jak również jakościowe jej porównanie z metodą testu 0-1 na chaos, nie było do tej pory przedmiotem publikacji. **Także w tym zakresie wygenerowane dwuparametrowe diagramy największego wykładnika Lapunowa zestawione w kontekście wyników uzyskanych z wykorzystaniem metody testu 0-1 na chaos oraz entropii próbki potwierdzają sens prowadzenia tego typu badań**, pomimo różnic koncepcyjnych ww. trzech metod.

Dodać też należy m.in., że Autor opracował też i **przedstawił diagramy wymiaru Lapunowa, jak również zależność czasu ewolucji od dynamiki układu uzyskując szereg bardzo pożytecznych wyników.**

Warto wreszcie podkreślić, że przeprowadzenie badań charakteryzujących się tak dużym obszarem byłoby niezwykle trudne lub wręcz niemożliwe bez zastosowania przetwarzania równoległego. Zauważyć też warto, że m.in. **analiza dynamiki, zarówno modelu łuku elektrycznego, jak i modelu oscylacji wapnia, w odniesieniu do zmieniającego się w takim zakresie zestawu parametrów, nie była dotychczas opisana w literaturze naukowej.**

3.3. Procedury eliminacji błędów oraz metody parametryzacji

Ze względu na potrzebę eliminacji błędów i potrzebę parametryzacji metody, w tym m.in. **błędnych wyników fałszywie negatywnych testu 0-1 na chaos** jako efektu zjawiska nadpróbkowania sygnałów ciągłych Autor słusznie podjął próbę ich eliminacji. W tym względzie wykorzystał dwuparametrowe diagramy, w kontekście których zaproponował procedurę doboru częstotliwości próbkowania. Błędy te wyeliminował z wykorzystaniem procedury przybliżenia długości okresu próbkowanego sygnału.

Słusznie Autor zauważył, że przeprowadzone badania uwiaryściły wrażliwość metody na widmo sygnału, co uzasadniło konieczność stosowania dodatkowych procedur obliczeniowych. Podobna sytuacja wystąpiła też w przypadku procedury doboru parametrów metody entropii próbki. Autor pokazał m.in., że z wykorzystaniem przetwarzania równoległego procedura ta staje się efektywna i może stanowić punkt wyjścia do dalszej parametryzacji.

Doktorant zaproponował ponadto dodatkowe procedury obliczeniowe, a ich efektywność potwierdził przeprowadzonymi badaniami. **W ten sposób uzyskał zmodyfikowaną wersję algorytmu.**

A zatem przeprowadzone przez Doktoranta badania potwierdziły istotę parametryzacji metod w odniesieniu do tak dużych rozmiarów masowego zadania przeprowadzonego z wykorzystaniem przetwarzania równoległego.



4. Dorobek publikacyjny Doktoranta

Dorobek publikacyjny Doktoranta obejmuje 8 artykułów¹ (wszystkie w dyscyplinach: **informatyka techniczna i telekomunikacja oraz informatyka**), w których był pierwszym autorem w trzech artykułach lub kolejnym autorem w czterech artykułach oraz w jednej publikacji konferencyjnej wysokopunktowanej,

z tego odpowiednio opublikowane zostały w czasopiśmie:

Entropy (100p) – 2 artykuły,

IEEE Access (100p) – 4 artykuły;

Biosysystem (70p) – jeden artykuł

oraz w IEEE Xplore Digital Library pn. IEEE Conference on Decision and Control (w dyscyplinach: **informatyka techniczna i telekomunikacja oraz informatyka**, 140p) – jedna publikacja traktowana jako rozdział książki.

Wszystkie ww. publikacje naukowe dotyczą wykorzystania programowania równoległego do analizy nieliniowych układów dynamicznych z identyfikacją chaotycznych i periodycznych szeregów czasowych i są bezpośrednio związane z rozprawą doktorską zawierając autorskie wyniki badań Autora rozprawy.

Doktorant posiada rzetelne przygotowanie naukowe, które uzyskał w pracy samodzielnej, a przede wszystkim podczas uczestniczenia w Szkole Doktorskiej Politechniki Opolskiej w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, którą ukończył z sukcesem, co potwierdza jego możliwości prowadzenia badań transdyscyplinarnych z wykorzystaniem wiedzy z zakresu dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja oraz z dyscypliny informatyka, a także dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

5. Ocena końcowa monografii naukowej

Przedstawiony mi do recenzji tekst rozprawy nosi charakter samodzielnej monografii naukowej, która dotyczy wykorzystania programowania równoległego do analizy nieliniowych układów dynamicznych z identyfikacją chaotycznych i periodycznych szeregów czasowych.

Została napisana w sposób poprawny merytorycznie i bardzo czytelny. Uzupełniona jest o rozwiązania aplikacyjne w zakresie przygotowania i równoległej implementacji narzędzia do analizy nieliniowych układów dynamicznych opartej o model hybrydowy MPI+OpenMP.

Z wykorzystaniem ww. modelu hybrydowego przeprowadzone zostały przez Doktoranta badania modelu łuku elektrycznego oraz oscylacji wapnia przy użyciu metod testu 0-1 na chaos, entropii próbki oraz wykładników Lapunowa. Zauważone niedociągnięcia rozprawy mają charakter marginalny, stąd je pomijam oraz pragnę podkreślić, że rozprawa zasługuje na bardzo wysoką ocenę.

Rozprawa została napisana na 209 stronach kart formatu A4 wypełnionych dwustronnie o strukturze 9 rozdziałów z podrozdziałami, w tym wstępu z uzasadnieniem, celem i hipotezą rozprawy, podsumowania rezultatów pracy oraz wnioskami końcowymi. Praca zawiera ponadto 132 pozycje bibliografii.

Na rozdziały merytoryczne ponumerowane (a w nich podrozdziały) składają się kolejno:

Rozdział 1. Wstęp

Rozdział 2. Wybrane zagadnienia programowania równoległego z wykorzystaniem MPI oraz OpenMP

¹ Wykazanych w bazie Google Scholar [dostęp: czerwiec – lipiec 2025 r.]

Rozdział 3. Wybrane metody badania chaosu i złożoności w nieliniowych układach dynamicznych
Rozdział 4. Równoległa implementacja narzędzia do badania układów dynamicznych
Rozdział 5. Identyfikacja szeregów czasowych metodą testu 0-1 na chaos
Rozdział 6. Badanie złożoności szeregów czasowych metodą entropii próbki
Rozdział 7. Badanie stabilności układu metodą wykładników Lapunowa
Rozdział 8. Podsumowania
Rozdział 9. Bibliografia

Ponadto rozprawa zawiera: stronę tytułową, spis treści, spis rysunków oraz spis tabel. Do literatury przedmiotu stosowano poprawne odwołania w tekście, przy wystraszającym ich omówieniu w rozprawie. Praca została zilustrowana licznymi rysunkami oraz tabelami, a wzory zostały ponumerowane, przy czym nie stosowano w oznaczeniach wyjaśniania pojęć wprowadzanych zwłaszcza na rysunkach w j. angielskim, które na poziomie prac doktorskich nie mają wpływu na czytelność rozprawy, stąd nie dokonuję ich wykazu i pomijam w ocenie.

6. Uwagi końcowe

Pan mgr inż. Maciej Walczak rozwiązał sformułowane zagadnienie na wysokim poziomie naukowym, cele osiągnął, a postawioną hipotezę badawczą pozytywnie zweryfikował. Wykazał m.in., że przeprowadzone badania wnoszą wymierny wkład w rozwój zastosowania przetwarzania równoległego do analizy nieliniowych układów dynamicznych z identyfikacją chaotycznych i periodycznych szeregów czasowych, co wyznacza tym samym punkt wyjścia, zarówno do dalszych prac w tej dziedzinie, jak i do kontynuacji wskazanych w rozprawie badań nad parametryzacją i optymalizacją zastosowanych metod.

Do wymiernych autorskich rozwiązań rozprawy można zaliczyć m.in.:

- wyznaczenie efektywności zrównoleglenia zadania generowania diagramów w modelu hybrydowym MPI+OpenMP,
- przeprowadzenie szczegółowej analizy diagramów testu 0-1 na chaos, entropii próbki oraz wykładników Lapunowa,
- zaproponowanie adaptacyjnych procedur eliminacji błędów oraz metod parametryzacji.

Rozprawa jest zredagowana bardzo starannie, treść rozprawy jest wzbogacona graficznie za pomocą rysunków i tabel, a uzyskane wyniki przedstawione także w sposób przejrzysty w tabelach je porównujących. Autor podał w sposób przystępny i prawidłowy wzory i opisy oraz objaśnienia zmiennych, a także w sposób poprawny stosował odwołania do literatury przedmiotu w tekście rozprawy.

Zachował przy tym odpowiednią proporcję pomiędzy częścią teoretyczną i praktyczną rozprawy. Występujące nieliczne niedociągnięcia tego typu jak brak wyjaśnienia niektórych zmiennych, np. brak wyjaśnienia co oznacza zmienna θ występująca w układzie równań różniczkowych (3.21) na str. 77, czy też brak podania przy rysunkach i tabelach źródła nie mają większego wpływu na czytelność rozprawy, stąd szczegółowo ich nie wykazuję.

Ponadto Doktorant przeprowadził interpretację i dyskusję uzyskanych wyników badań w sposób bardzo syntetyczny, brak jest natomiast bardziej szczegółowej dyskusji oraz bardziej szczegółowej interpretacji uzyskanych niektórych wyników badań, czy też podsumowania wyspecyfikowanych w treści rozprawy dalszych kierunków badań, które generalnie rzecz ujmując nie mają większego wpływu na jej merytoryczną poprawność.



Podsumowanie

W podsumowaniu jednoznacznie stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska p. mgr inż. Macieja Walczaka stanowi autorskie rozwiązania zarówno w zakresie teoretycznym polegające na przeprowadzeniu badań polegających na zaproponowaniu narzędzia wykorzystującego przetwarzanie równoległe, za pomocą którego istnieje możliwość efektywnego badania przestrzeni parametrów układów dynamicznych pod kątem występowania chaosu deterministycznego, jak też w zakresie praktycznym, gdyż rozwiązanie postawionego celu wiązało się z przygotowaniem odpowiednich obiektów i metod do implementacji jak też z praktyczną ich implementacją i przeprowadzeniem obszernych badań, w tym m.in. opracowaniem narzędzi umożliwiających implementację **metody testu 0-1 na chaos**, która została wykorzystana do identyfikacji periodycznych i chaotycznych szeregów czasowych na dwóch obiektach badań, to jest na **modelu łuku elektrycznego oraz na modelu oscylacji wapnia**.

Doktorant poddał przy tym badaniu parametryzację metody, jak również jej wpływ na uzyskiwane wyniki, a także w celach porównawczych zaimplementował w tym narzędziu także metodę wykładników Lapunowa oraz metoda entropii próbki oraz przeprowadził stosowne badania. Wykazał przy tym, iż pomimo, iż są to metody różniące się na poziomie koncepcyjnym i dostarczające innych informacji o badanym systemie niż test 0-1 na chaos, dokonał udanej próby jakościowego porównania uzyskanych wyników. **W tych badaniach wykorzystał m.in. dobrze uzasadniony sposób zrównoleglenia zadania oraz jego dekompozycji, a następnie poddał ocenie pod kątem ich efektywności w różnych środowiskach obliczeniowych.**

Z wykorzystaniem przygotowanej implementacji równoległej przebadał ponadto przestrzenie parametrów dwóch nieliniowych układów dynamicznych, to jest model łuku elektrycznego oraz model oscylacji wapnia, a uzyskane wyniki poddał stosownej analizie i ocenie. Dla tych celów opracował także m.in. adaptacyjne procedury parametryzacji metod, którą wykorzystał dla metody testu 0-1 na chaos oraz wykładników Lapunowa, przy czym w przypadku metody entropii próbki zaproponował równoległą procedurę doboru parametrów. Ważnym końcowym elementem badań było też m.in. opracowanie narzędzia pozwalającego na wizualizację wygenerowanych diagramów.

A zatem Doktorant na wysokim poziomie naukowym wykazał, że istnieje możliwość zastosowania programowania równoległego, które umożliwiło jednoznaczną poprawę efektywności analizy nieliniowych układów dynamicznych z identyfikacją periodycznych i chaotycznych szeregów czasowych.

Uważam, że tak sama rozprawa jak też uzupełniający dorobek naukowy kandydata w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych wnoszą istotny wkład w rozwój problematyki wykorzystania programowania równoległego do analizy nieliniowych układów dynamicznych z identyfikacją chaotycznych i periodycznych szeregów czasowych, a także potwierdzają odpowiednio wysoką ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną Doktoranta oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że dotychczasowe osiągnięcia naukowe p. mgr inż. Macieja Walczaka jako Kandydata, w tym jego rozprawa doktorska, spełniają wymagania stawiane przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. prawo o szkolnictwie wyższym i nauce², które oceniam pozytywnie i wnioskuję

² Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 r., poz. 1668, ze zm., Dz. U. z 2024.1571, t.j.

o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony, prosząc przy tym o przedyskutowanie podczas obrony następujących dwóch kwestii:

Kwestia 1. Wymiernym efektem rozprawy doktorskiej p. mgr inż. Macieja Walczaka jest m.in. przeprowadzenie szczegółowej analizy diagramów testu 0-1 na chaos, entropii próbki oraz wykładników Lapunowa. Autor zauważył m.in., że metoda entropii próbki jest narzędziem bazującym na całkowicie innych podstawach matematycznych niż np. test 0-1 na chaos, w związku z czym może dostarczyć innych informacji o układzie, przy czym na str. 58 rozprawy poza entropią próbki, wśród metod entropii wymienił: **entropię przybliżoną, rozmytą, permutacyjną, rozrzutu, rozkładu oraz entropię wieloskalową**, co rodzi pytanie o sposób dokonał doboru metody entropii próbki do porównania badań m.in. z metodą 0-1 na chaos, a nie innej metody, spośród w.w. metod, np. **metodę rozmytą**?

Kwestia 2. Ze względu na to, iż rozprawa zawiera bardzo wiele wyników badań zestawionych w tabelach oraz zinterpretowanych na rysunkach bardzo proszę o **przedyskutowanie wyników dotyczących identyfikacji szeregów czasowych metodą testu 0-1 na chaos dla modelu łuku elektrycznego z porównaniem ich z odpowiednimi wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem metody entropii próbki oraz metody wykładników Lapunowa, zwłaszcza z punktu widzenia efektywności zrównoleglenia mierzonej czasem realizacji zadania o wielkości N w ramach P wątków**. Proszę w szczególności o interpretację wyników zamieszczonych w tabelach 4.13 i 4.14 na str. 115 oraz 4.23 na str. 124, a także przebiegów zamieszczonych na rys. 4.22 na str. 121, w tym w zakresie możliwości przyspieszenia obliczeń.

Języ T. d. n. e. r. d. l. u.