

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Macieja Walczaka

zatytułowanej:

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

1. Problem badawczy i jego znaczenie

Nieliniowe układy dynamiczne znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach nauki. Są one przedmiotem badań m.in. w teorii sterowania, ekonomii, fizyce, kryptografii. Pozwalają też modelować wiele procesów w biologii czy medycynie. Ich analiza stanowi jednak często wyzwanie ze względu na niespełnienie zasady superpozycji czy takie własności jak chaos, bifurkacje i cykle graniczne. Skomplikowana dynamika i wrażliwość na warunki początkowe wymaga rozwijania efektywnych narzędzi, które podołają złożonym obliczeniowo analizom nieliniowych układów dynamicznych. Opiniowana rozprawa doktorska stanowi udaną próbę opracowania takich narzędzi ze szczególnym naciskiem na analizę dużych przestrzeni parametrów. Kluczowym krokiem w tym kierunku przeprowadzenia masywnych analiz jest wykorzystanie technik wspomaganie obliczeń np. poprzez zastosowanie programowania równoległego i zaawansowanych środowisk obliczeniowych. Zdefiniowana w rozdziale 1.3 hipoteza badawcza podkreśla znaczenie programowania równoległego dla zadania poprawy efektywności analizy nieliniowych układów dynamicznych w kontekście identyfikacji periodycznych i chaotycznych szeregów czasowych. Hipoteza jest poprawnie i trafnie sformułowana.

Rozprawa ma charakter naukowy i stanowi bardzo obszerne studium wykorzystania wybranych metod analizy układów nieliniowych. Wyniki zaprezentowane w rozprawie nie były do tej pory publikowane w literaturze. O praktycznym charakterze rozprawy świadczą eksperymenty przeprowadzone z wykorzystaniem opracowanej aplikacji równoległej pracującej w modelu hybrydowym.

2. Koncepcja rozprawy i jej realizacja

Rozprawa licząca 209 stron napisana została w języku polskim i składa się z łącznie 8 rozdziałów oraz bibliografii. Wstęp poprzedzony został spisem rysunków oraz tabel. Bibliografia liczy 132 pozycje, na które składają się głównie artykuły w czasopismach naukowych, materiały z międzynarodowych konferencji oraz pozycje książkowe. Bibliografia jest aktualna, dominują w niej pozycje opublikowane w ostatnich kilku latach. Pojedyncze pozycje są znacznie starsze jak np. pozycja [94] z 1887 r. odnosząca się do zjawiska łuku elektrycznego. Odwołania te należy uznać za pewien atut rozprawy, świadczący o dociekliwości jej autora. W bibliografii odnaleźć można dwie współautorskie prace autora rozprawy: opublikowaną w czasopiśmie naukowym – której autor rozprawy jest pierwszym autorem, oraz pracę konferencyjną. W liczącym 9 stron wstępie zdefiniowano zakres przeprowadzonych badań ze szczególnym uwzględnieniem dwóch obszarów: przetwarzania równoległego oraz analizy nieliniowych układów dynamicznych. We wstępie podano też główne uzasadnienie podjęcia tematu badawczego tj. brak badań dużych przestrzeni parametrów nieliniowych układów dynamicznych w celu identyfikacji dynamiki chaotycznej z zastosowaniem

przetwarzania równoległego. Autor zdefiniował wyraźnie cel pracy, którym jest zaproponowanie narzędzia wykorzystującego przetwarzanie równoległe do efektywnego badania przestrzeni parametrów układów dynamicznych pod kątem występowania chaosu deterministycznego. Wstęp zawiera również kilkuzdaniowe streszczenia kolejnych siedmiu rozdziałów.

Rozdział 2. liczy 32 strony i poświęcony jest przedstawieniu zagadnienia przetwarzania równoległego. Opisano w nim różne architektury komputerów równoległych i dwa kluczowe dla hybrydowego modelu standardy interfejsu programowania: OpenMP i MPI. Dalsza część rozdziału zawiera opis metod programowania z ich wykorzystaniem, mechanizmu overlappingu i problemu redukcji czasu bezczynności jednostek obliczeniowych. W opisach standardów posłużono się przykładowymi fragmentami kodu implementującego komunikację, synchronizację operacji czy technikę overlappingu.

W rozdziale 3., który liczy 26 stron, przybliżono wybrane metody badania chaosu i złożoności, które są przedmiotem badań w dalszej części pracy: metodę testu 0-1 na chaos, metodę entropii próbki z podaniem procedury obliczeniowej oraz metodę wykładników Lapunowa. Jako przykłady nieliniowych układów dynamicznych wykorzystanych w badaniach opisane zostały z kolei model łuku elektrycznego oraz model opisujący oscylacje stężenia wapnia w cytozolu. Przedstawione zostały problemy właściwego doboru parametrów testu 0-1 na chaos oraz konsekwencje niepoprawnego doboru na przykładzie szeregu czasowego układu Lorenza. Ponadto jako przykłady zastosowania powyższych podejść zamieszczono diagramy testu 0-1 na chaos oraz diagramy maksimów dla układu Lorenza i Rösslera.

Rozdział 4. liczy 46 stron i jest najobszerniejszy. Przedstawiono w nim implementację narzędzia do badania układów dynamicznych z dokładnym podaniem parametrów warstwy sprzętowej. Przeprowadzone zostało szacowanie z dokładnością do klas funkcji złożoności obliczeniowej i pamięciowej implementowanych algorytmów. Opisana została złożoność obliczeniowa kolejnych procedur algorytmu testu 0-1 na chaos oraz metody wykładników Lapunowa. Czas realizacji procedury testu 0-1 na chaos, czas obliczeń entropii próbki i czas realizacji głównej pętli metody wykładników Lapunowa zostały zobrazowane na wykresach, na podstawie których wyciągnięto właściwe wnioski dotyczące różnic w czasie wykonania testów poszczególnymi metodami zależnie od długości szeregu czy parametrów metody. Podobnie porównana została złożoność pamięciowa. Następnie przeanalizowano zadanie zrównoleglenia obliczeń w dwóch środowiskach – homogenicznym i heterogenicznym. Dla pierwszego z podejść (homogenicznego) wyznaczony został współczynnik efektywności zrównoleglenia w zależności od liczby wątków oraz rozmiaru zadania, a także w zależności od przyjętego wariantu: statyczny podział MPI, statyczny podział OpenMP, dynamiczny podział OpenMP. Na koniec zobrazowane zostało przyspieszenie dla różnej liczby wątków i wielkości zadania, co pozwoliło zilustrować skalowalność algorytmu. W tym podejściu wykorzystany został model hybrydowy oparty na trzech koprocessorach. Dla drugiego z podejść (heterogenicznego) zaproponowane zostało bardziej zróżnicowane środowisko oparte na trzech koprocessorach i dodatkowo dwóch procesorach. Zaproponowana została adaptacyjna metoda dystrybucji zadań (ADZ) oparta na predykcji harmonogramu realizacji zadania dla wszystkich węzłów obliczeniowych, a następnie porównano czas realizacji zadań dla obu scenariuszy (tj. z i bez ADZ) z użyciem wykresów Gantta oraz w tabeli porównawczej. Na szczególną uwagę zasługuje sekcja 4.5.2, która stanowi dokładną analizę efektywności zrównoleglenia zadań, w której opisano wpływ różnych czynników na rezultat procesu zrównoleglenia: czasu komunikacji pomiędzy węzłami obliczeniowymi a zarządzającym, sposobu pomiaru czasu, sposobu uszeregowania zadań. Autor wykonał w środowisku heterogenicznym pomiary czasu generowania diagramu z wykorzystaniem metody testu 0-1 na chaos, entropii próbki oraz algorytmu Parkera i Chua. W analizach wzięto pod uwagę różne rozmiary zadania oraz wpływ ilości węzłów obliczeniowych na czas obliczeń. Na podstawie badań wyciągnięto wniosek, że dla wspomnianych trzech metod (test 0-1 na chaos, entropia próbki, algorytm Parkera i Chua) zależność czasu obliczeń od wielkości zadania jest liniowa. W analizach dodatkowo wyznaczano przyspieszenie liczone względem typów rdzeni (Phi i Xeon) oraz w funkcji ilości jednostek obliczeniowych. W tym ostatnim przypadku posłużono się referencyjną jednostką bazową BCE z pracy [120]. Zależność przyspieszenia od ilości jednostek BCE okazała się również liniowa, co potwierdza efektywność skalowania algorytmu tj. brak podatności algorytmu na koszty komunikacji

czy synchronizacji. Na koniec opisana została autorska aplikacja do wizualizacji złożonych dwu i trójwymiarowych diagramów.

Liczący 25 stron 5. rozdział przedstawia diagramy maksimów lokalnych oraz dwu i trójparametrowe diagramy testu 0-1 na chaos dla dwóch modeli: modelu łuku elektrycznego i modelu oscylacji wapnia. Czasochłonność analiz została zobrazowana porównaniem rysunku 5.4 z uzyskanym w ponad 55-godzinnej symulacji rysunkiem 5.5 różniącym się granulacją. W rozdziale tym przeprowadzono także analizę przypadków fałszywie pozytywnych i fałszywie negatywnych w analizie przebiegów dla układów dynamicznych z użyciem testu 0-1 na chaos. W celu eliminacji problematycznych przypadków np. dla zmieniającej się częstotliwości oscylacji zaproponowane zostało podejście adaptacyjne skutecznie eliminujące fałszywie pozytywne i fałszywie negatywne przypadki.

Rozdział 6. liczy 18 stron i podejmuje problem badania szeregów czasowych metodą entropii próbki. W rozprawie pokazano, że metoda entropii próbki dostarcza więcej informacji (np. o charakterze periodyczności) niż metoda testu 0-1 na chaos. W kontekście złożoności obliczeń zidentyfikowano główny czynnik wpływający na wielkość zadania oraz istotność poprawnej parametryzacji metody entropii próbki tj. przeprowadzania procedury w odniesieniu do badanego układu.

W rozdziale 7. porównano różne metody ortogonalizacji, wyliczono wykładniki Lapunowa z zastosowaniem czterech procedur ortogonalizacji: CGS, CGS2, MGS i metody Householdera, dla których wyznaczono punkty zbieżności. Przeanalizowane zostały przypadki, gdy nie jest spełnione kryterium zbieżności. Na przykład zaobserwowano problemy z ortogonalizacją w punktach, gdzie ewolucja układu dokonuje się w obrębie płaszczyzny lub gdy rozwiązanie charakteryzuje się oscylacjami o małej amplitudzie. Zaproponowano następnie pięć modyfikacji mających rozwiązać ten problem np. podejście adaptacyjne do przeprowadzenia ortogonalizacji, co znacząco poprawiło zbieżność algorytmu, czy modyfikację polegającą na przeprowadzeniu dodatkowych ortogonalizacji w czasie ewolucji w stanie przejściowym, co okazało się podejściem skutecznym względem wyjściowej procedury Parkera i Chua. Na podstawie wyników wyciągnięto trafne wnioski o wpływie poszczególnych parametrów.

Rozprawę kończy rozdział 8. będący 4-stronicowym podsumowaniem, w którym wypunktowano najistotniejsze osiągnięcia.

3. Wkład autora

Za kluczowe osiągnięcie kandydata uznać można opracowanie efektywnych i kompletnych narzędzi opartych na modelu hybrydowym i służących do analizy nieliniowych układów dynamicznych. Prace nad narzędziami zaowocowały pośrednimi wnioskami, które stanowią dodatkowy wkład w rozwój dziedziny. Szczególnie wspomnieć należy o poniższych rezultatach:

- a) Autor pokazał, że zrównoleglenie w środowisku homogenicznym zadania generowania diagramu testu 0-1 na chaos i z użyciem metody entropii cechuje się wysokim współczynnikiem efektywności, z kolei zrównoleglenie w heterogenicznym środowisku wykazuje dobrą skalowalność.
- b) W kontekście powyższych rezultatów zrównoleglenia dodatkowe zredukowanie czasu obliczeń o 7% autor osiągnął, stosując adaptacyjną dystrybucję zadań, co zapewniło lepszą ciągłość obciążenia rdzeni.
- c) Badania kandydata pokazały też, że algorytm Parkera i Chua jest trudniejszym przykładem do zrównoleglenia, ale stosując większą ilość węzłów obliczeniowych (tzn. zwiększając granulację przetwarzania) kandydat uzyskał dla niego przyspieszenie o 33%.

Podsumowując, największym osiągnięciem kandydata jest skuteczne i efektywne zrównoleglenie obliczeń, co pozwoliło mu przeprowadzić czasochłonne analizy, których rezultaty nie były do tej pory publikowane w literaturze naukowej.

Wymienione osiągnięcia naukowe zostały częściowo zaprezentowane we współautorskim artykule opublikowanym w czasopiśmie *Biosystems* (IF = 2.0) oraz na międzynarodowej konferencji *IEEE Conference on Decision and Control*. W przypadku pierwszej pracy kandydat jest pierwszym autorem.

Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki naukowe stanowiące istotny wkład w rozwój dyscypliny oraz ich częściowe opublikowanie w pracach o zasięgu międzynarodowym uważam, że mgr inż. Maciej Walczak zrealizował zamierzone cele badawcze.

4. Poprawność

Opisane w rozprawie badania przestrzeni parametrów nieliniowych przeprowadzone zostały z użyciem trzech różnych metod: testu 0-1 na chaos, entropii próbki, wykładników Lapunowa. Analizie poddano dwa modele: 3-parametrowy model łuku elektrycznego oraz 16-parametrowy model oscylacji wapnia. Implementację zadania zrównoleglenia przeprowadzono w środowisku homogenicznym i heterogenicznym. Dobór metod, wybór przykładowych układów do analizy oraz strategię podejść implementacyjnych należy uznać za poprawne i wystarczające do dowiedzenia postawionej w rozprawie tezy. Uwagę zwraca ogromna ilość wykonanych eksperymentów dla wielu różnych konfiguracji zadań oraz architektur zrównoleglających. Warto podkreślić, że są to analizy kosztowne obliczeniowo. Wnioski wyciągnięte z uzyskanych wyników są poprawne, szczegółowe i sięgające istoty analizowanych problemów. Dobór metod programistycznych nie budzi zastrzeżeń – w tym zakresie autor nie tylko sprawnie posłużył się standardami OpenMP i MPI, ale też opracował aplikację do wizualizacji złożonych dwu i trójwymiarowych diagramów, która pozwoliła przeprowadzić dodatkowe eksperymenty.

Pomimo ogólnej poprawności przyjętej metodologii oraz opisu wyników, w rozprawie można odnaleźć pewne niedociągnięcia i drobne błędy redakcyjne:

- a) W trakcie badań poddano analizie dwa przykłady nieliniowych układów dynamicznych. Ze względu na rozwiązanie kosztownego z obliczeniowego punktu widzenia problemu analizy takich układów praca ma duży potencjał praktyczny. W samej rozprawie niewiele uwagi poświęcono samemu znaczeniu zaproponowanych metod zrównoleglania obliczeń dla rozwoju różnych dziedzin, gdzie nieliniowe układy dynamiczne są wykorzystywane. Czy zaproponowane podejście jest uniwersalne i może być pomyślnie stosowane również dla innych przykładów układów nieliniowych? Czy są jakieś ograniczenia stosowania tych metod?
- b) Tytuł rozdziału 6. wydaje się być nie do końca adekwatny do jego zawartości – w rozdziale bardziej skupiono się na silnych i słabych stronach zastosowanych metod oraz parametryzacji metody entropii próbki. Aczkolwiek wnioski wyciągnięte przez autora finalnie pozwoliły odnieść się do ujętego w tytule rozdziału problemu określenia rozmiaru zadania oraz preferowanych warunków na efektywniejsze zrównoleglenie.
- c) Nie do końca klarowne jest przekształcenie układu równań (3.21) do postaci bezwymiarowej. Przykładowo po prawej stronie tego układu sumowane są wielkości rezystancji R z wielkościami bezwymiarowymi np. $(R + 1 - y - R_x)$, podczas gdy ten sam symbol rezystancji jest użyty po stronie lewej równań, gdzie każdy symbol ma swój wymiar. Ponadto na stronie 77 poniżej układu równań (3.21) pojawia się informacja o zamianie zmiennych ($u = E - u$). Wydaje się, że ta operacja powinna być oznaczona jako przypisanie a nie równość. Cały model opisany został w rozprawie na podstawie pracy [61], która jest dość trudno dostępną pozycją książkową napisaną w języku rosyjskim. Czy przejście do współrzędnych bezwymiarowych może być nieco dokładniej wyjaśnione przez kandydata?
- d) Drobne uwagi redakcyjne:

- Większość fragmentów kodów zamieszczonych w pracy zawiera nazwy zmiennych i własnych funkcji w języku polskim. W rozprawie panuje ogólnie duża konsekwencja w tym względzie, jednakże na rys. 2.11, 4.4 i 7.4 pojawiły się nazwy w języku angielskim.
- Czytanie pracy ułatwiłby wykaz symboli i oznaczeń z odniesieniem do rozdziałów, w których są one użyte. Te same symbole mają bowiem różne znaczenie w różnych rozdziałach. Przykładowo symbol N w rozdziale 2.4.3. odnosi się do liczby kombinacji parametrów i liczby zestawów wyników, w rozdziale 2.2.3 użyty jest do nazwania zbioru iteracji, w rozdziale 3.3. oznacza ilość próbek w badanym szeregu czasowym, a w rozdziale 3.4. liczbę wymiarów przestrzeni fazowej. Symbol P w rozdziale 2.5.1. jest wykorzystywany do numeracji jednostek obliczeniowych, a w rozdziale 2.2.3. oznacza liczbę wątków. Symbol p w rozdziale 2.2.4. oznacza priorytet dla zadania, w rozdziale 3.2. oznacza jedną ze zmiennych translacyjnych, a w rozdziale 4.3. oznacza kolejne współczynniki wielomianów.
- Literówka na rys. 2.13 na schemacie działania funkcji kolektywnej `MPI_Alltoall()` dla procesu P_3 – powinno być „C1 C2 C3”.

Należy podkreślić, że powyższe uwagi w żaden sposób nie podważają zaprezentowanych w rozprawie wyników, a sama dysertacja jest też bardzo starannie napisana z redakcyjnego punktu widzenia. Pomimo swojej objętości zawiera ona niewiele błędów redakcyjnych (głównie pojedyncze literówki i drobne błędy interpunkcyjne). Autor czasami stosuje wyrażenia potoczne np. „praca na pamięci”. Należy jednak podkreślić, że opisy są klarowne i wyczerpują dane zagadnienie.

5. Wiedza kandydata

Kandydat sprawnie integruje techniki z dwóch obszarów badawczych: z zakresu układów nieliniowych, posiadających własności bifurkacji i chaosu, oraz z zakresu programowania równoległego. Każdy z rozdziałów zawiera szczegółowy opis omawianych w nim zagadnień. Objętość przedłożonej rozprawy oraz obszerna bibliografia świadczą o ugruntowanej wiedzy dziedzinowej kandydata. Za duży plus uznać można fakt, że opisy użytych metod są poprzedzone rysem historycznym wykonanym na podstawie kluczowych publikacji naukowych z okresu powstania danej metody oraz jej kolejnych udoskonaleń na przestrzeni lat. Przykładowo, opisując zjawisko łuku elektrycznego autor odwołał się do wspomnianej już pozycji [94] z XIX w. Świadczy to o dużym zaangażowaniu kandydata w poznanie zagadnień dziedziny, której dotyczy rozprawa.

Spośród najważniejszych umiejętności kandydata wykazanych bezpośrednio w rozprawie wymienić można: znajomość architektur komputerów równoległych i interfejsów programowania równoległego, znajomość różnych metod badania chaosu i złożoności, umiejętność rozwijania narzędzi wspierających badanie układów nieliniowych. Wiedza kandydata ma zarówno teoretyczny jak i praktyczny charakter. O sprawnym warsztacie kandydata świadczy fakt, że często nie poprzestaje on na wygenerowaniu wyników naukowych, lecz wyciąga wnioski z uzyskanych wyników, które skutkują dalszymi pogłębionymi analizami jak np. w przypadku zidentyfikowania wpływu niepełnego wykorzystania zasobów obliczeniowych podczas analizy efektywności zrównoleglenia (rozdział 4.7), co zainspirowało kandydata do dalszych badań nad wpływem ilości węzłów obliczeniowych.

Podsumowując, kandydat bez wątpienia posiada ogólną i pogłębioną wiedzę w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja.

6. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę opinie zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania zdefiniowane przez art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami) moja ocena rozprawy pod względem trzech podstawowych kryteriów jest następująca:

A. Czy rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego? (wybierz jedną opcję stawiając znak X)

☒

Zdecydowanie
TAK

☐

Raczej TAK

☐

Trudno
powiedzieć

☐

Raczej NIE

☐

Zdecydowanie
NIE

B. Czy po przeczytaniu rozprawy zgadzasz się, że kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Informatyka techniczna i telekomunikacja?

☒

Zdecydowanie
TAK

☐

Raczej TAK

☐

Trudno
powiedzieć

☐

Raczej NIE

☐

Zdecydowanie
NIE

C. Czy kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej?

☒

Zdecydowanie
TAK

☐

Raczej TAK

☐

Trudno
powiedzieć

☐

Raczej NIE

☐

Zdecydowanie
NIE

Wnoszę zatem o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Walczaka.


Podpis