

prof. dr hab. Grzegorz Marcin Wójcik
Kierownik Katedry Neuroinformatyki i Inżynierii Biomedycznej
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie
ul. Akademicka 9, 20-033 Lublin
gmwojcik@umcs.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Salamy Hassony

Tytuł rozprawy: Application of machine learning for analysis of nonlinear dynamical systems with the classification of chaotic and periodic time series

Promotor w przewodzie: dr hab. inż. Wiesław Marszałek

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Ryszard Bieniak

Przedłożona do oceny rozprawa p. mgr. inż. Salamy Hassony została zrealizowana w ramach przewodu doktorskiego prowadzonego w Instytucie Informatyki Politechniki Opolskiej i dotyczy analizy szeregów czasowych wykazujących zachowania nieliniowe, chaotyczne i periodyczne z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego.

Analizie układów dynamicznych wykazujących takie właściwości poświęcono w literaturze mnóstwo uwagi, jednak dający się zaobserwować wzrost zainteresowania tą problematyką w ostatniej dekadzie niewątpliwie związany jest z rozwojem szeroko rozumianych metod klasycznej sztucznej inteligencji, analizy statystycznej i szeroko rozumianej nauki o danych, w szczególności uczenia maszynowego, sieci neuronowych klasycznych i konwolucyjnych, które w połączeniu z narzędziami inżynierii dużych zbiorów danych stwarzają nowe, nieznane dotąd możliwości doskonalenia istniejących rozwiązań.

Pan mgr inż. Salama Hassona jest doświadczonym badaczem z zaczynającym być zauważalnym dorobkiem publikacyjnym. W jego bibliografii można znaleźć artykuły naukowe potwierdzające jej znajomość tematu i wysoki poziom wiedzy eksperckiej z zakresu podejmowanego zagadnienia. Do najważniejszych prac autora mógłbym zaliczyć:

1. Hassona, Salama, Wiesław Marszałek, and Jan Sadecki. "Time series classification and creation of 2D bifurcation diagrams in nonlinear dynamical systems using supervised machine learning methods." *Applied Soft Computing* 113 (2021): 107874.

2. Marszalek, Wieslaw, and Salama Hassona. "New bifurcation diagrams based on hypothesis testing: Pseudo-periodic surrogates with correlation dimension as discriminating statistic." *Mechanical Systems and Signal Processing* 186 (2023): 109879.
3. Hassona, Salama, and Wieslaw Marszalek. "Self-supervised Contrastive Learning for Chaotic Time-Series Classification." *International Conference on Nonlinear Dynamics and Applications*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023.

W dniu pisania recenzji p. mgr inż. Salama Hassona ma 26 cytowań i indeks Hirscha $h=2$ według Google Scholar.

Cele i struktura pracy

Praca została napisana w języku angielskim, obejmuje 197 stron. Główna jej część składa się z dziewięciu ponumerowanych rozdziałów. Pracę opatrzono również streszczeniem w językach polskim oraz angielskim, spisem treści, spisem tabel, spisem rysunków. Bibliografia obejmuje 201 dobrze dobranych i nieponumerowanych pozycji. Praca została bardzo dobrze złożona w środowisku $\text{\LaTeX}$ co nadaje jej dodatkowe walory.

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest zastosowanie nowoczesnych metod analizy danych do identyfikacji i klasyfikacji sygnałów pochodzących z nieliniowych układów dynamicznych, zwłaszcza takich, które wykazują zachowania chaotyczne i periodyczne. Praca koncentruje się na problemie zmienności danych w czasie oraz ich wrażliwości na warunki początkowe, co utrudnia ich jednoznaczne rozpoznanie i modelowanie. Autor proponuje szereg podejść mających na celu poprawę odporności modeli na zmiany w strukturze danych oraz ograniczenie zależności od dużych, ręcznie etykietowanych zbiorów. Przeprowadzone badania obejmują zarówno techniki wymagające nadzoru, jak i te działające bez potrzeby dostępu do pełnych informacji uczących, a także metody hybrydowe, które łączą zalety obu podejść. Szczególny nacisk położono na analizę jakościową i ilościową wyników oraz możliwość zastosowania zaproponowanych rozwiązań w różnych dziedzinach, takich jak analiza sygnałów, wizja komputerowa czy przetwarzanie języka naturalnego.

Głównym celem niniejszej rozprawy jest analiza istniejących oraz opracowanie nowych modeli uczenia maszynowego służących do identyfikacji szeregów czasowych o charakterze chaotycznym i okresowym, a także rekonstrukcja dwuwymiarowych diagramów bifurkacyjnych w nieliniowych układach dynamicznych. Chociaż problem ten można początkowo uprościć do klasyfikacji binarnej, to właściwości układów dynamicznych – w szczególności ich wrażliwość na warunki początkowe oraz zmienność parametrów sterujących – prowadzą do zjawiska *concept drift*, co stanowi poważne wyzwanie dla standardowych metod uczenia z nadzorem. Rozprawa podejmuje próbę rozwiązania tych problemów, jednocześnie utrzymując konkurencyjność opracowanych modeli względem klasycznych podejść nienależących do nurtu uczenia maszynowego. Praca ma charakter interdyscyplinarny – łączy teorię układów dynamicznych z technikami

sztucznej inteligencji – i obejmuje zarówno przegląd podstaw teoretycznych, jak i prezentację autorskich rozwiązań oraz wyników eksperymentalnych.

W szczególności doktorat p. mgr. inż. Salamy Hassony miał na celu systematyczne zbadanie omawianych tu procesów z wykorzystaniem metod takich jak: Perceptrony wielowarstwowe, głębokie sieci neuronowe, lasy szeregów czasowych, algorytm k-najbliższych sąsiadów, metody dekompozycji sygnału, modele mieszanin gaussowskich, algorytm k-średnic oraz, metody samonadzorowanego uczenia: SimCLR, VICReg, SimSiam, Temporal Contrastive Module i Confidence Semi-Supervised Retraining.

Struktura pracy jak i rozkład treści są w mojej ocenie poprawne.

Rozdział 1 pełni rolę wprowadzenia, w którym autor zarysowuje cel pracy, motywację badawczą oraz kontekst interdyscyplinarny łączący teorię układów dynamicznych z uczeniem maszynowym. Zawiera także przegląd problemów, które będą szczegółowo analizowane w dalszej części rozprawy.

Rozdział 2 stanowi syntetyczne wprowadzenie do podstaw teoretycznych związanych z układami dynamicznymi, w tym ich klasyfikacją, pojęciem bifurkacji oraz teorią chaosu. Autor przedstawia również praktyczne zastosowania tych układów, co pomaga w zrozumieniu znaczenia problematyki badawczej.

Rozdział 3 skupia się na przeglądzie klasycznych metod analizy układów dynamicznych, zarówno analitycznych, jak i numerycznych. Szczególna uwaga poświęcona jest podejściom umożliwiającym klasyfikację odpowiedzi systemu, co stanowi punkt odniesienia dla dalszych eksperymentów z wykorzystaniem uczenia maszynowego.

Rozdział 4 wprowadza model łuku elektrycznego Pentegova-Sydoretsa, który stanowi źródło danych w badaniach empirycznych. Autor szczegółowo omawia zarówno fizyczne podstawy modelu, jak i sposób generowania i przetwarzania danych, co nadaje rozprawie solidne podstawy aplikacyjne.

Rozdział 5 zawiera opis eksperymentów z wykorzystaniem metod uczenia z nadzorem do rekonstrukcji dwuwymiarowych diagramów bifurkacyjnych. Rozdział ten stanowi pierwszy krok w stronę zastosowań sztucznej inteligencji i prezentuje pierwsze wyniki porównawcze z podejściami klasycznymi.

Rozdział 6 porusza kluczowy problem generalizacji modeli uczonych z nadzorem w kontekście zmienności parametrów układu i wrażliwości na warunki początkowe. Autor przedstawia techniki dekompozycji sygnału, które poprawiają odporność modeli i ograniczają zjawisko concept drift, co ma istotne znaczenie praktyczne.

Rozdział 7 rozwija wątki związane z ograniczeniem potrzeby korzystania z dużych, etykietowanych zbiorów danych. Autor wykorzystuje metody bez nadzoru do analizy zdekomponowanych sygnałów, pokazując, że możliwa jest skuteczna klasyfikacja oraz rekonstrukcja diagramów bifurkacyjnych przy mniejszym nakładzie pracy ludzkiej.

Rozdział 8 stanowi rozszerzenie badań w kierunku metod samonadzorowanych i półnadzorowanych. Opisane są zarówno nowoczesne podejścia wykorzystujące augmentację danych, jak i autorskie propozycje – w tym moduł Temporal Contrastive oraz metoda Confidence Semi-Supervised Retraining. Rozdział ten ukazuje istotny wkład autora w rozwój nowszych paradygmatów uczenia

maszynowego.

Rozdział 9 to nie tylko podsumowanie przeprowadzonych badań, ale również próba ich osadzenia w szerszym kontekście naukowym. Autor wskazuje potencjalne kierunki rozwoju zaproponowanych metod, zwłaszcza w obszarach takich jak wizja komputerowa czy przetwarzanie języka naturalnego, co świadczy o uniwersalności opracowanych rozwiązań i ich interdyscyplinarnej wartości.

Na szczególną uwagę zasługuje interdyscyplinarność pracy. Oprócz dyscypliny wiodącej i nieco zapomnianych w ostatnim czasie zagadnień z zakresu klasycznej sztucznej inteligencji (głównie za sprawą mody na wielkie modele językowe LLM) mamy tu do czynienia z bardzo zaawansowaną matematyką, także z elektrotechniką i fizyką działania łuku elektrycznego. W podejściu tym widać bez wątpienia doświadczenie i ducha promotorów.

Najważniejsze osiągnięcia rozprawy

Badania przedstawione w rozprawie wykazały, że zarówno metody uczenia maszynowego z nadzorem, jak i bez nadzoru mogą skutecznie identyfikować szeregi czasowe o charakterze chaotycznym i okresowym oraz rekonstruować dwuwymiarowe diagramy bifurkacyjne dla nieliniowych układów dynamicznych. Najważniejsze osiągnięcia rozprawy to:

- Skuteczność uczenia z nadzorem – klasyczne modele uczone w sposób nadzorowany potrafią z wysoką dokładnością odtwarzać diagramy bifurkacyjne, choć ich zdolność uogólniania jest ograniczona przez zjawisko concept drift wynikające ze zmienności parametrów układu.
- Znaczenie składowych resztkowych – zastosowanie metod dekompozycji sygnału, z naciskiem na analizę składowych resztkowych, pozwala zwiększyć odporność sieci neuronowych na zmiany parametrów, poprawiając ich ogólność i trafność klasyfikacji.
- Potencjał metod bez nadzoru – algorytmy klastrowania wykorzystujące zdekomponowane dane umożliwiają klasyfikację szeregów czasowych przy minimalnym użyciu etykietowanych danych, czyni je skutecznym i efektywnym narzędziem w analizie układów dynamicznych.
- Rozwój uczenia samonadzorowanego – zastosowanie nowoczesnych metod samonadzorowanych, w szczególności wzbogaconych o moduł kontrastu czasowego (TC) i autorską metodę Confidence Semi-Supervised Retraining (CSSR), znacząco poprawia efektywność modeli i umożliwia ich skuteczne uczenie z wykorzystaniem danych nieetykietowanych.
- Wkład metodologiczny – połączenie technik dekompozycji sygnału z uczeniem maszynowym oraz opracowanie nowych podejść, takich jak CSSR, stanowią istotny wkład zarówno w rozwój metod sztucznej inteligencji, jak i w analizę nieliniowych układów dynamicznych.

Pytania i uwagi krytyczne

Niewdzięcznym obowiązkiem recenzenta jest za to wytknięcie spostrzeżonych uchybień i uwag technicznych.

Podczas lektury rozprawy nie zauważyłem uchybień, które miałyby jakiś szczególnie istotny wpływ na jej jednoznacznie pozytywną ocenę.

Natomiast pojawiło się u mnie kilka pytań, do których chciałbym by doktorant ustosunkował się w przypadku dopuszczenia do obrony. Pytania te wynikają z ciekawości, nie zaś z zastrzeżeń do treści:

- W młodości zajmowałem się badaniem zjawisk chaotycznych oraz nieliniowych w symulowanych układach wielkich sieci neuronów biologicznych według modelu Hodgkina-Huxley'a. W tym celu jedną z metryk były tzw. przestrzenie fazowe Poincarego, w których na jednej osi odkładałem wielkość fizyczną, w tym przypadku potencjał błony komórkowej, a na drugiej jego pochodną po czasie. Takie trajektorie pozwalały na wyciąganie niekiedy daleko idących wniosków. Czy w dalszych badaniach planuje Pan pochylić się nad przestrzeniami fazowymi w ujęciu Poincaré'go?
- Podobnie, choćby w cytowanej przez Pana książce Neila Rasbanda z 1990 roku mowa jest o zastosowaniu współczynników Lyapunova do detekcji interesujących Pana zjawisk. W rozprawie czuję trochę niedosyt, bo choć wielokrotnie wspominany, to w mojej ocenie nigdy nie wykorzystane do końca. Czy planuje Pan zatem w dalszych badaniach rozszerzyć takie właśnie do nich podejście?
- Nieco brakuje mi rozdziału „Limitations” w którym zbiorczo opisane byłyby wszelkie ograniczenia podejścia zaprezentowanego w rozprawie. Autor wymienia te ograniczenia, ale w poszczególnych sekcjach i podsekcjach.
- Wzory na stronach 58–60, także 65, 72 i 90 nie zostały ponumerowane. Mając do czynienia z tak zaawansowanym aparatem matematycznym prezentowanym przez autora to niedopatrzenie trochę gryzie mnie w oczy.

Wszystkie powyższe pytania i uwagi mają charakter pytań z natury dociekliwych i nie zmieniają mojego jednoznacznie pozytywnego wrażenia z lektury pracy doktorskiej pani mgr. inż. Hassony Salamy.

Rekomendacja

Moja ocena rozprawy doktorskiej p. mgr. inż. Salamy Hassony jest zdecydowanie pozytywna.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Salamy Hassony spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668), dlatego zwracam się do Wysokiej Rady Dyscypliny Informatyki Technicznej i Telekomunikacji Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Politechniki Opolskiej o dopuszczenie mgr. inż. Salamy Hassony do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

W związku z zademonstrowanym przez autora w przedłożonej do recenzji rozprawie znakomitym aparatem matematycznym, którym sprawnie posługuje się w realizacji interdyscyplinarnego projektu wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Lublin, 2025-06-24