



Instytut Telekomunikacji i Cyberbezpieczeństwa

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska

Warszawa, 04.06.2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. **SALAMY HASSONY**

pt. „Zastosowanie uczenia maszynowego do analizy nieliniowych systemów dynamicznych z klasyfikacją chaotycznych i periodycznych szeregów czasowych”,
przedłożonej Radzie Naukowej Informatyki Technicznej i Telekomunikacji Politechniki Opolskiej

PRZEDMIOT ROZPRAWY, GŁÓWNE CELE PRACY

Praca Pana **mgr. inż. Salamy Hassony** pt. „Zastosowanie uczenia maszynowego do analizy nieliniowych systemów dynamicznych z klasyfikacją chaotycznych i periodycznych szeregów czasowych” (tytuł angielski: *Application of machine learning for analysis of nonlinear dynamical systems with the classification of chaotic and periodic time series*), dotyczy zagadnienia teorii nieliniowych systemów dynamicznych i klasyfikacji generowanych przez nie szeregów czasowych z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego.

Przedstawiona rozprawa jest pracą o charakterze teoretycznym. Doktorant nie prezentuje konkretnej tezy. Jako cel badawczy stawia sobie badanie możliwości wykorzystania uczenia maszynowego do celów analizy działania nieliniowych systemów dynamicznych. W szczególności Doktorant badał możliwość wykorzystania metod uczenia maszynowego w zadaniu binarnej klasyfikacji szeregów czasowych (w podziale na klasę szeregów periodycznych oraz klasę szeregów chaotycznych/quasiperiodycznych). Jako cel szczegółowy Doktorant wybrał rekonstrukcję dwuwymiarowych diagramów bifurkacyjnych dla badanych systemów dynamicznych.

Rozprawa została napisana w języku angielskim, składa się z 9 rozdziałów oraz bibliografii. Rozprawa zajmuje łącznie aż 197 stron.

Rozdział 1. wprowadza w tematykę rozprawy i prezentuje cele badawcze.

Rozdział 2. prezentuje stan wiedzy w obszarze analizy systemów dynamicznych.

Rozdział 3. prezentuje klasyczne metody numeryczne stosowane w analizie systemów dynamicznych.

Rozdział 4. przedstawia matematyczny model Pentegova-Sydoretsa łuku elektrycznego jako przykładu układu dynamicznego.

Rozdział 5. prezentuje zastosowanie metod uczenia nadzorowanego do klasyfikacji szeregów czasowych.

W rozdziale 6. Doktorant prezentuje propozycję dekompozycji szeregów czasowych w celu podniesienia generalizacji uczonych modeli.

Rozdział 7. skupia się na zastosowaniu metod nienadzorowanych oraz częściowo nadzorowanych, w tym dla szeregów generowanych przez systemy Lorenza i Rösslera.

W rozdziale 8. Doktorant proponuje własne usprawnienia metod uczenia maszynowego stosowanych w analizie nieliniowych systemów dynamicznych.

Rozdział 9. podsumowuje osiągnięte wyniki, przedstawia wnioski i perspektywy rozwoju.

MOCNE STRONY ROZPRAWY

Za mocną stroną rozprawy Doktoranta uważam gruntowne zbadanie możliwości wykorzystania uczenia maszynowego do celów analizy działania nieliniowych systemów dynamicznych. Doktorant właściwie dobrał metodykę badawczą, użył właściwych narzędzi, w tym aparatu matematycznego, zaplanował i zrealizował logiczny ciąg eksperymentów, badając istniejące metody i metody zaproponowane przez siebie. Jako trzy przypadki dynamicznych systemów nieliniowych wykorzystał przypadek łuku elektrycznego (model Pentegova-Sydoretsa), chaotyczny system Lorenza 3D oraz system Rösslera 3D. Dodatkowo stosował augmentację danych, a także badał sygnały resztkowe (rezydualne).

Za najważniejsze osiągnięcie Doktoranta uważam zaproponowanie metody Confidence Semi-Supervised Retraining (CSSR), czyli zmodyfikowanej wersji uczenia częściowo nadzorowanego, która umożliwia douczanie modelu tylko na podstawie próbek wybranych adaptacyjnie z odpowiednio wysoką pewnością predykcji. Doktorant wykazał, że zaproponowana metoda zwraca lepsze wyniki klasyfikacji (mierzone poprzez dokładność, precyzję, czułość i F1-score), zwłaszcza w sytuacji obecności małego odsetka danych z etykietami (np. 1%) oraz dryftu modelu (tak jak dla zbioru Arc L=1,1).

Warte docenienia jest też zaproponowanie przez Doktoranta wykorzystania dekompozycji sygnałów różnymi metodami (np. metoda EMD, EEMD, algorytm Welcha). Algorytmy uczone z wykorzystaniem sygnałów zdekomponowanych (m.in. resztkowych) zapewniały lepszą generalizację wyuczonych modeli.

Ciekawym i wartym zauważenia jest też propozycja wykorzystania modułu kontrastu czasowego (*Temporal Contrastive*, TC) w algorytmach uczenia częściowo nadzorowanego. Eksperymenty przeprowadzone przed Doktoranta pokazały, że dodanie modułu TC do klasycznych algorytmów uczenia częściowo nadzorowanego, takich jak SimCLR, VICReg i SimSiam poprawiło dokładność klasyfikacji o 4 p.p.

Potwierdzeniem osiągnięć Doktoranta są jego 2 publikacje: 2 w czasopismach z listy JCR (Applied Soft Computing, Mechanical Systems and Signal Processing, każde aż 200 pkt. MNiSW) oraz jedna publikacja na międzynarodowej konferencji NODYCON 2023 w Rzymie. W dwóch publikacjach Doktorant występuje w tych publikacjach jako pierwszy autor, jego udział w tych publikacjach jest zapewne znaczący.

Uważam, że rozprawa doktorska prezentuje oryginalne rozwiązania w zakresie teorii nieliniowych systemów dynamicznych i klasyfikacji szeregów czasowych, które mogą znaleźć zastosowania w różnych obszarach informatyki i telekomunikacji.

Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, sprawnym posługiwaniem warsztatem badawczym, wykazał też biegłą znajomość teoretyczną z dziedziny informatyki technicznej i telekomunikacji.

SŁABE STRONY ROZPRAWY

Do słabych stron rozprawy zaliczam pewnie niedoskonałości związane z prezentacją wyników. Generalnie narracja rozprawy jest bardzo logiczna, wartka i spójna. Jest ona jednak kilkakrotnie zaburzana przez umieszczanie np. bloku 72 wykresów rekonstrukcji bifurkacji (str. 76-87), a następnie kolejnego bloku 48 wykresów (str. 99-110) oraz jeszcze kolejnego bloku z 72 wykresami (str. 119-136). W sumie daje to 42 strony samych wykresów bifurkacji. Tymczasem, moim zdaniem, można było umieścić te wykresy w załączniku (o ile są one wszystkie potrzebne – bo są też przecież wyniki metryk). Natomiast w głównym tekście można było umieścić tylko przykładowe, najważniejsze wykresy bifurkacji, ze szczegółowym opisem.

Trochę lepiej sprawa wygląda z tabelami z wynikami (np. Tab. 8-25 w rozdz. 8), które są bardziej czytelne, bo zawierają wartości metryk, których interpretacja jest bardzo intuicyjna, poza tym najlepsze wartości zostały wyróżnione. Jednak tutaj także można by było pokusić się o pewną syntezę tych wyników, bo to jest jednak kilka tysięcy wartości rozmieszczonych w 18 tabelach. Dlaczego Doktorant nie pokusił się o wizualizację pokazującą porównanie wybranych wartości? Na pewno dałoby się to zrobić, stosując np. wykresy liniowe lub kolumnowe. Przekaz o przewadze proponowanych przez Doktoranta rozwiązań byłby wtedy mocniejszy.

Więcej uwag nt. słabych stron rozprawy i różnych niejasności zamieszczam poniżej.

UWAGI SZCZEGÓŁOWE

- Nie jest dla mnie jasne, dlaczego zbiór „Data set” ma inny rozmiar na rysunkach a) oraz b) (Fig. 16, str. 68) – dane augmentowane oraz generowane są przecież pokazane oddzielnie.
- Czy dodanie wykresów „precyzja-czułość” (np. Fig. 20, prawa kolumna, str. 75) wniosło coś nowego? Czy wykresy krzywych ROC nie wystarczyłyby do prezentacji jakości klasyfikacji?
- „Freedom of degrees” w Tab. 16 i kolejnych: czy nie powinno być „degrees of freedom”? Czy chodzi jednak o coś innego? Wyjaśnienie, że jest to odsetek danych, dla których poziom ufności jest niższy od 90%, rzeczywiście odbiega od definicji stopni swobody używanej np. w statystyce lub fizyce.

STRONA EDYCJNA PRACY

Rozprawa doktorska **mgr. inż. Salamy Hassony** jest napisana bardzo poprawnym językiem angielskim. Autor sprawnie posługuje się stylem naukowym. Edycja rozprawy jest zazwyczaj staranna.

Doktorant nie ustrzegł się jednak pewnych niedociągnięć natury językowej i typograficznej, m.in.:

- Często cytowania są błędnie umieszczone w tekście, bez oddzielającego nawiasu, np. na str. 38: „(...) *reliability has been questioned in various scenarios Walczak et al. (2022)*”, zamiast „(...) *reliability has been questioned in various scenarios (Walczak et al. , 2022)*”. Utrudnia to czytanie, gdyż nazwiska autorów zlewają się z treścią zdania.
- Występują zagnieżdżenia nawiasów, np. str. 39: „RLC circuits designed by V. M. Sydorets and I. Pentegov (Pentegov and Sydorets (2013))”. Wystarczyłoby: „RLC circuits designed by Pentegov and Sydorets (2013).”.
- Brakuje spacji między etykietami a numerami, np. Figs.29-32 zamiast Figs. 29-32 (str. 73).
- Niespójna pisownia niektórych akronimów (np. VicReg/VICReg).
- Regularnie występują prawe znaki cudzysłowu zamiast lewych (np. str. 34: *'random walk'* zamiast *'random walk'*). Znaki cudzysłowu są też niespójne: czasem są używane proste, czasem drukarskie.

- Dlaczego „TSF Entropy” w tabelach 3-5 (str. 74) jest wyróżnione wytłuszczonym drukiem? Jeśli wartości metryk dla TSF Entropy były najlepsze, to powinno się wyróżnić właśnie te wartości.
- Występują błędy literowe (np. str. 95, Fig. 35: Detredning => Detrending, str. 179: respectievly => respectively).
- W naukowych tekstach w języku angielskim powinno się unikać skrótów w rodzaju „aren’t”, „I’m”.
- Niektóre pozycje literatury są niekompletne – np. DeVries, Taylor (2017) – brakuje wydawcy, Donnelly (2006) – nazwy transformat są małymi literami.

Wyżej wymienione, zwykle drobne uchybienia edycyjne nie umniejszają jednak w żadnym stopniu osiągnięć Doktoranta.

WNIOSKI KOŃCOWE

W podsumowaniu stwierdzam, że cele badawcze postawione w rozprawie **mgr. inż. Salamy Hassony** zostały osiągnięte. Doktorant opracował oryginalne rozwiązania w zakresie teorii nieliniowych systemów dynamicznych i klasyfikacji szeregów czasowych z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego.

Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 187 ustawy z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.), dlatego niniejszym wnioskuje o **dopuszczenie** Doktoranta, Pana **mgr. inż. Salamy Hassony**, do publicznej obrony jego rozprawy doktorskiej.

dr hab. inż. Artur Janicki, prof. uczelni
Politechnika Warszawska