

Prof. dr hab. inż. Ryszard Tadeusiewicz

rtad@agh.edu.pl; www.tadeusiewicz.pl; 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30
Katedra Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej wydziału EAIiB AGH
Doktor Honoris Causa czternastu uczelni krajowych i zagranicznych
Członek Polskiej Akademii Nauk; Członek Polskiej Akademii Umiejętności;
Były Rektor AGH; Były Prezes Krakowskiego Oddziału PAN; Były członek CK
Członek Akademii Inżynierskiej, член Российской Академии Естественных Наук
Participe Pleno Jure Academiae Europensis Scientiarum Artium Litterarumque
Fellow of World Academy of Art and Science; Euro-engineer FEANI
Senior Member of IEEE; professional member of ACM; member of SPIE

Kraków, 12.08.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Bednarskiego

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska **mgr inż. Piotra Bednarskiego** zatytułowana „Wykorzystanie algorytmów NLP do automatycznej analizy treści informacji finansowych w procesach prognozowania notowań giełdowych”. Promotorem rozprawy jest prof. UEK dr hab. inż. Janusz Morajda, a promotorem pomocniczym dr Roman Huptas. Praca została ulokowana w Dziedzinie Nauki Społeczne, w dyscyplinie Ekonomia i Finanse. Formalną podstawą do sporządzenia tej recenzji jest Uchwała z dnia 8.07.2024 Rady Dyscypliny Ekonomia i Finanse Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, powierzająca między innymi mnie funkcję recenzenta w tym przewodzie, o czym powiadomił mnie Dyrektor Szkoły Doktorskiej UEK prof. dr hab. Stanisław Popek, pismem nr RDC.600.38P. 2.2023 datowanym 10.07.2024.

Ogólne komentarze dotyczące zawartości rozprawy

Oceniana rozprawa doktorska wyróżnia się swoją objętością. Jeszcze nigdy nie dostałem do zaopiniowania pracy liczącej 315 stronic! Jej czytaniu i opiniowaniu towarzyszył w efekcie wysiłek nie tylko intelektualny, ale także fizyczny. Jednak zawartość pracy wynagradzała ten wysiłek, ale później na moją prośbę Promotor rozprawy udostępnił mi także jej wersję w postaci elektronicznej i wtedy stwierdziłem, że praca (w wersji elektronicznej) jest skonstruowana z użyciem wielu bardzo przydatnych linków hipertekstowych. Taka nowoczesna konstrukcja bardzo znacząco ułatwia percepcję treści zawartych w pracy, dlatego sugeruję, żeby udostępnić publicznie ową elektroniczną wersję pracy – jako powodu do chwały Szkoły Doktorskiej UEK a także jako zachęty dla innych doktorantów. Pionierskie dokonania warto popularyzować!

Oprócz rozprawy otrzymałem także (w osobnych plikach) krótkie streszczenie w języku polskim i w języku angielskim, co spełnia wymaganie zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku z późniejszymi zmianami.

Struktura pracy jest typowa: Po spisie treści czytelnik otrzymuje bardzo dobrze sporządzony wykaz użytych skrótów i listę symboli, co ułatwia czytanie treści rozprawy. Potem przedstawiony jest Wstęp i 7 merytorycznych rozdziałów, dalej Bibliografia i obszerny, blisko stustronicowy aneks.

Ocena celu i zakresu badań

Cel badań jest czytelnie i jednoznacznie zapisany w tytule rozprawy, jest więc podczas czytania rozprawy od początku wiadomo, do czego mgr Bednarski dąży. Postawiony cel jest interesujący naukowo i może być wysoce przydatny z punktu widzenia praktyki, więc cel ten przyjmuję ze zdecydowaną aprobatą.

Niemniej zwykle w rozprawach doktorskich formułowana jest **teza** pracy, zaś treść dysertacji traktowany jest wtedy jak dowód prawdziwości owej tezy - czego w ocenianej pracy w sensie formalnym nie ma.

Dla domknięcia tego tematu odnotowuję, że na stronie 11 rozprawy Autor pisze:

Głównym i nadrzędnym celem niniejszej pracy jest zbadanie możliwości zastosowania najnowszych rozwiązań z dziedziny NLP do zautomatyzowanej analizy wiadomości oraz postów o tematyce finansowej, gospodarczej i politycznej wraz z uwzględnieniem ich w finansowych modelach predykcyjnych, a także stworzenie narzędzi (oprogramowania), które wspomagają wyliczanie takich prognoz.

Przeformułowując ten zapis do częściowej stosowanej formy naukowego twierdzenia wymagającego dowodu można przyjąć, że dr Bednarski postawił sobie zadanie wykazania, że stworzone przez Niego narzędzia NLP umożliwią formułowanie (wyliczanie) potrzebnych prognoz. Uważam, że ta implícite sformułowana teza spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania związane z tematami prac doktorskich, więc w pełni ją aprobuję.

Wskazawszy generalny cel swojej pracy mgr Bednarski wyszczególnił na stronicach 11 i 12 sześć celów szczegółowych, które mogą być traktowane jak swoisty przewodnik po dalszej treści rozprawy. Ową dekompozycję celu głównego na cele szczegółowe także bez zastrzeżeń akceptuję.

Na stronicach 13 i 14 mgr Bednarski przedstawił – jak to określił - hipotezy badawcze. Nie są one numerowane, ale jest ich sześć, tak jak wcześniej podano sześć celów szczegółowych. Hipotezy konkretyzują owe cele szczegółowe, o których była wcześniej mowa, natomiast wydają się w tym miejscu nieco nadmiarowe.

Ocena zawartości rozprawy

Przejdę teraz kolejno przez wszystkie rozdziały rozprawy, omawiając skrótowo ich treść i wskazując, co uważam za ich istotną wartość naukową.

- **Wstęp** stanowi uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy, zawiera wstępną definicję wykorzystywanych pojęć (ML, NLP, ARMA-GARCH, MAE, MAPE oraz będący esencją rozprawy autorski program FENE), jest miejscem prezentacji wyżej omówionego celu pracy i celów szczegółowych, a także skrótowego omówienia struktury pracy i zawartości poszczególnych rozdziałów oraz Aneksu. Zawartość Wstępu zdecydowanie zaliczam po stronie pozytywów uzasadniających moją końcową pozytywną ocenę opiniowanej rozprawy.
- **Rozdział 1** ma tytuł: *Informacja na rynkach finansowych oraz jej wykorzystanie w procesach prognozowania*. W kontekście wskazanego w tytule we Wstępie celu rozprawy rozdział ten jest bardzo potrzebny, porządkuje bowiem pojęcia i pokazuje tło, na którym budowane będą własne koncepcje i własne badania Doktoranta. Przedmiotem rozważań w ocenianym rozdziale są kolejno: charakterystyka rynków finansowych, źródła informacji rynkowej, wpływ informacji na decyzje inwestorów i ekonometria finansowa a informacje na rynkach finansowych. Wszystkie wymienione zagadnienia zostały przedstawione i omówione w sposób bardzo kompetentny, wskazujący na znakomite przygotowanie merytoryczne Pana mgra Bednarskiego oraz jego wysoką erudycję. Niemniej w kontekście oceny dysertacji jako rozprawy doktorskiej muszę stwierdzić, że rozdział ten nie dostarcza argumentów przemawiających za nadaniem Kandydatowi stopni doktora, ponieważ ma on w dużej mierze charakter literaturowy, a stopień naukowy otrzymuje się za to, co stanowi nowy i oryginalny wkład Autora do uprawianej dyscypliny naukowej. Niemniej o zawartości rozważanego rozdziału mogę mówić tylko z największym uznaniem.
- **Rozdział 2** ma tytuł *Modelowanie i prognozowanie jednowymiarowych finansowych szeregów czasowych*. W rozdziale tym opisane zostały istniejące i stosowane metody modelowania finansowych szeregów czasowych. Omówione zostały klasyczne modele ARMA-GARCH i modele uczenia maszynowego. Do rozdziału tego w pełni stosują się uwagi, jakie wyżej zamieściłem dla rozdziału 1. Jest to rozdział świetnie zbudowany, dowodzący rozległej i bardzo aktualnej wiedzy mgra Bednarskiego, ale niestety – literaturowy, więc do „punktacji” związanej z nadaniem stopnia doktora – niestety się nie nadaje.
- **Rozdział 3** opisuje systemy NLP i ich zastosowania do analizy informacji finansowych. Na początku interesująco zarysowano historię rozwoju NLP. Jednak sięgając do najdalszych korzeni Autor popełnił chyba błąd nadinterpretacji. Owszem, prace arabskiego uczonego al-Kindiego mogły dotyczyć, jak pisze mgr Bednarski, kryptografii, kryptoanalizy i analizy statystycznej oraz częstotliwościowej tekstów pisanych. Jednak w żaden sposób nie mogę się zgodzić, że dotyczyły

one także *tłumaczenia maszynowego*. Jakiej bowiem **maszyny** mógł używać ten średniowieczny arabski uczonec?

Ta uwaga oczywiście w niczym nie umniejsza mojej zdecydowanej pozytywnej opinii na temat zarysu historii NLP naszkicowanego przez Doktoranta w rozdziale 3.1. W szczególności cenne są – dla dalszej treści pracy – informacje zebrane bardzo profesjonalnie w podrozdziale 3.1.3. Opisany tam zarys historii rozwoju podejścia do przetwarzania języka naturalnego opartego na opisanych wcześniej sieciach neuronowych LSTM i RNN.

W sumie bardzo pozytywnie oceniam ogólny ogląd zastosowań NLP przedstawiony w podrozdziale 3.2. Uważam, że doktorant wykazał się w tym miejscu ogromną wiedzą (oszałamiające listy cytowanych publikacji na każdy poruszany temat!) i bardzo dojrzałym, mądrym stosunkiem do przytaczanych informacji.

Bardzo dobrze opracowane zostały także przez mgra Bednarskiego podrozdziały 3.3.

„Współczesne osiągnięcia w przetwarzaniu języka naturalnego” oraz 3.4. „Narzędzia i modele stosowane obecnie w NLP”. Autor zebrał w nich i omówił wszystkie naprawdę ważne wątki, jakie w problematyce NLP pojawiły się w ostatnich latach.

Po dokładnym omówieniu narzędzi NLP w podrozdziale 3.5 mgr Bednarski dotarł do kluczowego w ocenianym doktoracie problemu automatycznej analizy wiadomości finansowych. Problem ten został bardzo kompetentnie omówiony – ale też na podstawie danych literaturowych.

Podsumowując – cały rozdział 3 oceniam bardzo pozytywnie, ale podobnie jak w przypadku rozdziałów 1 i 2 – nie mogę go bezpośrednio zaliczyć do argumentów uzasadniających nadanie Panu magistrowi Bednarskiemu stopnia naukowego doktora – bo to nadal są omówienia tego, co zostało zaczerpnięte z prac innych autorów.

- **Rozdział 4** rozpoczyna tę część rozprawy, która do tego wniosku (o nadanie stopnia naukowego) będzie się zdecydowanie nadawała, bo dotyczy własnych badań Doktoranta i odwołuje się do jego oryginalnych wyników naukowych. W ocenianym rozdziale 4 przedstawiona jest proponowana przez mgra Bednarskiego jego oryginalna metodologia badań wykorzystania technik NLP w analizie treści wiadomości finansowych. Opisana jest wstępnie metodyka weryfikacji postawionych na wstępie pracy hipotez badawczych – kolejno dla każdej z rozważanych hipotez. Przeanalizowałem zaplanowane przez Doktoranta metodyki badawcze i stwierdzam, że zostały mądrze zaplanowane i stanowią własny wkład naukowy Kandydata. Następnie przestudiowałem opis architektury autorskiego systemu prognozowania notowań giełdowych. Stwierdzam, że architektura ta została dobrze zaplanowana i odpowiada potrzebom wynikającym z planowanych badań. Dobrze zbudowany został algorytm przygotowujący dane, roztropnie wykorzystane zostały wzorce sezonowości, poprawnie zaplanowana została estymacja i ewaluacja modeli. Słowem kawałek dobrej informatycznej roboty.

Bardzo ciekawa jest Propozycja modelu predykcji wspomaganej analizą treści wiadomości. To jeden z ważniejszych elementów ocenianej rozprawy. Uważam ten model za swojego rodzaju koncepcyjne jądro ocenianej rozprawy i oceniam zdecydowanie pozytywnie.

Opisany dalej trening i walidacja modeli to już praca badawcza, ważna, oryginalna, dobrze przeprowadzona, ale raczej rutynowa. Ciekawym elementem w tych rozważaniach jest uczenie transferowe, na temat którego do tej pory widziałem stosunkowo niewiele opracowań, a które bardzo dobrze pasuje do specyfiki problemów podejmowanych przez mgra Bednarskiego w jego rozprawie.

W podrozdziale 4.5 podjęto badania, jak to wszystko działa w zastosowaniu do oceny krótkookresowych prognoz stóp zwrotu i cen analizowanych instrumentów finansowych. Opisano badane instrumenty finansowe, podano schemat prognozowania i walidacja modeli i przedyskutowano metody oceny trafności prognoz.

W sumie rozdział 4 oceniam bardzo wysoko i wskazuję jego zawartość jako bardzo istotny wkład naukowy mgra Bednarskiego do dyscypliny Ekonomia i Finanse, chociaż odnotowuję także wartość przytoczonych rozważań dla dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Z całą pewnością zawartość tego rozdziału stanowi podstawę do wnioskowania dla Kandydata stopnia naukowego doktora.

- **Rozdział 5** poświęcony jest badaniu efektywności predykcji finansowych szeregów czasowych wspomaganej narzędziami NLP. Autor w sposób bardzo profesjonalny najpierw dokonał wyboru modeli referencyjnych, z którymi zamierzał porównywać swoje wyniki, potem dokonał analizy efektywności swoich modeli i ciekawie przeprowadził porównanie zachowania modeli po wystąpieniu nowych wiadomości (na bardzo wielu przykładach). Mając te wyniki mgr Bednarski przeprowadził w podrozdziale 5.3 ciekawą dyskusję rodzajów wiadomości i ich wpływu na notowania giełdowe, a w podrozdziale 5.4 zbadał zależność jakości predykcji od liczby wiadomości finansowych.

Wracając do oceny budowanych przez siebie modeli Doktorant w podrozdziale 5.5 zbadał jakość proponowanych modeli w zależności od hiperparametrów. Uważam to za bardzo ciekawy wynik badawczy.

Ciekawy, ale w innym sensie, problem podjęto w podrozdziale 5.6. Usiłowano tam ocenić możliwość wykorzystania nagłówków wiadomości finansowych zamiast ich pełnej treści. Okazało się, że owe nagłówki także wnoszą wiele cennych informacji, chociaż udało się wykazać postawioną we wstępie hipotezę: wykorzystanie treści całej wiadomości w analizie pozwala na osiągnięcie lepszych wyników prognozowania niż w przypadku wykorzystania wyłącznie treści nagłówków. Wynik ten doceniam, jako dowiedziony naukowo, chociaż prywatnie sędzę, że taki właśnie wynik był przewidywalny zdroworozsądkowo.

Ciekawy eksperyment opisał mgr Bednarski w podrozdziale 5.7. Użyto tam modelu prognostycznego w którym podane były wszystkie informacje finansowe, natomiast pominięte zostały te, których dostarczał Enkoder Wiadomości Ekonomicznych i Finansowych (FENE). Wykazano, że stworzona sieć LSTM (Długa Pamięć Krótkotrwała) nawet w tym przypadku wykazywała lepsze działanie, niż klasyczne modele ekonometryczne z bazowymi modelami ARMA-GARCH, jednak w tym przypadku przewaga była znacznie mniejsza, niż gdy stosowano Enkoder Wiadomości Ekonomicznych i Finansowych bazujący na analizie języka naturalnego. Rozdział 5 zamyka dobrze sformułowane i merytorycznie silne podsumowanie, w który Autor stwierdza, że przytoczone wyniki badań dowodzą prawdziwości (całkowitej lub częściowej) czterech pierwszych hipotez postawionych we wstępie pracy. Konfrontując te wyniki oraz owe tezy potwierdzam, że taki wniosek jest prawdziwy. Zawartość rozdziału 5 uważam więc w całości za oryginalne i ważne osiągnięcie naukowe mgra Bednarskiego i zdecydowanie zaliczam ją do argumentów uzasadniających końcowy wniosek tej recenzji, w których będę postulował nadanie Kandydatowi stopnia naukowego doktora, a także będę uzasadniał, by nadać mu ten stopień z wyróżnieniem.

- **Rozdział 6** opisuje wykorzystanie modeli hybrydowych, w których opracowany przez Doktoranta Enkoder Wiadomości Ekonomicznych i Finansowych (FENE) został sprzężony z bazowymi modelami ARMA-GARCH. Uważam, że to bardzo trafnie wybrany kierunek badań, gdyż dla wielu potencjalnych użytkowników opracowanych przez mgra Bednarskiego metod ich całkowite oderwanie od podejścia ARMA-GARCH, które znają i darzą zaufanie mogłoby być nadmiernie rewolucyjne. Wyjście z sieci FENE wykorzystywane jako wielowymiarowy szereg czasowy danych egzogenicznych dla modelu ARMA-GARCH dało bardzo ciekawy naukowo i praktycznie rezultat. Autor bardzo systematycznie i solidnie podszedł do tematu. Najpierw przedyskutował architekturę hybrydowych modeli. Następnie dokonał estymacji modeli i na tej podstawie wybrał specyfikację hybrydowych modeli, na których przeprowadził badania. Wyniki tych badań posłużyły do analizy efektywności hybrydowych modeli. Na tej podstawie możliwe było częściowe potwierdzenie ostatniej z hipotez postawionych we wstępie: Wykazano, że zautomatyzowana analiza finansowych wiadomości i postów w mediach społecznościowych za pomocą algorytmów NLP, w połączeniu ze stosowanymi metodami prognozowania finansowych szeregów czasowych pozwala na poprawienie efektywności predykcji. Rozdział 6 w całości oceniam pozytywnie i dodaję jego zawartość do zbioru tych oryginalnych osiągnięć naukowych Kandydata, które przemawiają za nadaniem mu stopnia naukowego.
- **Rozdział 7** zawiera podsumowanie i wnioski z całej wcześniejszej treści rozprawy. Autor omawia zastosowaną metodologię badawczą i wyniki eksperymentów wskazując, że to, czego dokonał, pozwoliło mu przedyskutować prawdziwość wszystkich sformułowanych we wstępie hipotez

naukowych. Mgr Bednarski robi to systematycznie, biorąc pod uwagę jedną po drugiej sformułowane hipotezy i przypominając argumenty, które pozwalają uznać, że dwie pierwsze hipotezy oraz hipoteza trzecia są całkowicie potwierdzone, trzy inne zostały potwierdzone częściowo, a jedna została odrzucona.

Podrozdział 7.3. przedstawia także ograniczenia i perspektywy dalszych badań, co świadczy o dojrzałości koncepcyjnej Autora.

Generalnie rozdział 7 oceniam bardzo pozytywnie, byłbym jednak ostrożny z formułowaniem zbyt daleko idących stwierdzeń – jak na stronie 217, gdzie Doktorant pisze: „Wprowadzenie modelu LSTM-FENE do praktyki inwestycyjnej może przynieść rewolucyjne zmiany”. Bardzo cenię osiągnięcia Autora i sądzę, że wniósł on do dziedziny Ekonomii i Finansów bardzo cenny wkład. Ale o tym, czy wkład ten przyniesie rewolucyjne zmiany, orzekną ci, którzy z wyników naukowych mgra Bednarskiego skorzystają i ocenia osiągnięte wyniki.

- **Bibliografia** zamykająca podstawową część rozprawy jest bardzo obszerna (204 pozycje), nowoczesna i dobrze wykorzystana w treści dysertacji.
- **Aneks** zawierający autorskie kody źródłowe programów, omawiający wybór specyfikacji i rzędów opóźnień bazowych modeli – najpierw ARMA-GARCH, a potem ARMA-GARCH-FENE, może być bardzo cenny dla ewentualnych naśladowców i kontynuatorów eksperymentów zainicjowanych przez mgra Piotra Bednarskiego.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa doktorska zdecydowanie spełnia ustawowe i zwyczajowe warunki stawiane rozprawom doktorskim, dlatego wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Ekonomii i Finansów Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie o przyjęcie pracy jako rozprawy doktorskiej, dopuszczenie jej autora, mgr inż. Piotra Bednarskiego do jej obrony, a po jej poprawnym (w co wierzę) przebiegu – będę głosował za nadaniem Kandydatowi stopnia naukowego doktora. Ponadto biorąc pod uwagę niezwykle oryginalną zawartość dysertacji z dużą liczbą własnych wyników naukowych Doktoranta – stawiam wniosek o wyróżnienie tej rozprawy.