

Prof. dr hab. Barbara Będowska-Sójka  
Katedra Ekonometrii  
Instytut Informatyki i Ekonomii Ilościowej  
Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Jakuba Michańkowa** *Metody uczenia głębokiego w prognozowaniu* *finansowych szeregów czasowych*

Niniejsza recenzja została sporządzona na zlecenie Dyrektora Szkoły Doktorskiej Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, prof. dr hab. Stanisława Popka. Recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana pod kierunkiem naukowym dr hab. inż. Janusza Morajdy, prof. UEK, zaś promotorem pomocniczym był dr Łukasz Kwiatkowski.

### **1 Opis zagadnienia naukowego - tematyka rozprawy, ocena celu rozprawy**

Współcześnie w świecie finansów obserwujemy gwałtowny wzrost zainteresowania sztuczną inteligencją, wykorzystaniem na niespotykaną dotąd skalę danych wysokiej częstotliwości, czy zastosowaniem uczenia maszynowego w odniesieniu do modelowania szeregów finansowych. Niniejsza rozprawa wpisuje się w ten nurt - Autor podejmuje się badania wykorzystania sieci uczenia głębokiego (ang. *deep learning*) w połączeniu z metodami ekonometrii finansowej do predykcji szeregów finansowych. Dobór problematyki badawczej uważam za właściwy i uzasadniony. W środowisku akademickim toczy się spór o wyższość jednego z kierunków. Rozprawa jest próbą dość oryginalnego zharmonizowania obu podejść.

Głównym celem pracy jest "*opracowanie modeli predykcyjnych, opartych na metodach uczenia głębokiego, oraz wskazanie możliwości i potencjalnych kierunków ich wykorzystania, a także przeprowadzenie analizy ich efektywności rozumianej jako trafność predykcji w prognozowaniu szeregów czasowych (logarytmicznych) stóp zwrotu aktywów finansowych oraz ich zmienności*". Uważam, że tak sformułowany cel pracy ma znaczenie przede wszystkim w wymiarze empirycznym. W pracy znalazły się opisy metod konstrukcji modeli hybrydowych, doboru hiperparametrów w sieciach neuronowych, wyboru funkcji straty, sposobów porównania prognoz i określenie mierników trafności predykcji. Wszystkie te elementy mają znaczenie w kontekście prognozowania zwrotów i zmienności, a ich rezultat jest istotny w procesie zarządzania portfelem inwestycji czy zarządzania ryzykiem. W rozprawie wykorzystano podejście dynamiczne, co jest bez wątpienia wskazane uzasadnione w szybko zmieniającym się otoczeniu rynkowym.

Podstawowym wkładem Doktoranta jest przeprowadzenie rozbudowanych badań empirycznych, w ramach których porównano prognozy z modeli "tradycyjnych", prognozy z wykorzystaniem uczenia głębokiego i podejścia hybrydowe. Prognozowaniu podlegały zarówno zwroty, jak i zmienność. Uwzględniono zarówno prognozy punktowe, jak i prognozy probabilistyczne. Rozprawa zawiera pewne elementy nowatorskie - w toku pracy przedstawiono autorską propozycję modeli hybrydowych wykorzystujących uczenie głębokie i metody ekonometrii finansowej (ARMA-GARCH-LSTM) w prognozowaniu punktowym oraz propozycję wykorzystania uczenia głębokiego w prognozowaniu probabilistycznym. Tym samym rozprawa wpisuje się w aktualny nurt badań w zakresie finansów empirycznych.

## 2 Charakterystyka zawartości rozprawy

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, wstępu, zakończenia i aneksu. Cały tekst mieści się na 230 stronach. Rozprawa jest uzupełniona obszerną bibliografią, spisem rysunków i spisem tabel. Pierwsze trzy rozdziały mają charakter teoretyczny, czwarty teoretyczno-empiryczny, a ostatnie dwa są rozdziałami empirycznymi. Struktura pracy w mojej ocenie jest prawidłowa.

W rozdziale pierwszym krótko opisano podział rynków finansowych oraz przedstawiono stan badań w zakresie prognozowania finansowych szeregów czasowych w nurcie ekonometrii finansowej i nurcie sieci neuronowych (uczenia głębokiego).

W rozdziale drugim zaprezentowano narzędzia ekonometryczne służące do modelowania i prognozowania finansowych szeregów czasowych. Omówiono empiryczne własności tychże szeregów. Następnie przedstawiono różne podejścia w szacowaniu zmienności, uwzględniając miary nieparametryczne. Przedstawiono i opisano modele wykorzystywane do prognozowania zwrotów i zmienności, przy czym szczególny nacisk położono na modele ARMA-GARCH. Omówiono różne specyfikacje tychże modeli, jak również prognozowanie w ramach modeli ARMA-GARCH. Rozdział zakończono punktem poświęconym ocenie zdolności predykcyjnych modeli w kontekście szacowania ryzyka rynkowego.

Rozdział trzeci poświęcony jest sieciom neuronowym z wykorzystaniem uczenia głębokiego. Przedstawiono w nim podstawowe architektury sieci neuronowych, kwestie związane z uczeniem sieci, omówiono stosowane algorytmy, a także problematykę dostrajania hiperparametrów sieci. W rozdziale zawarto też omówienie wybranych publikacji naukowych z zakresu wykorzystania uczenia głębokiego w prognozowaniu finansowych szeregów czasowych.

W rozdziale czwartym przedstawiono autorskie propozycje modeli, w których obok metod ekonometrycznych wykorzystano elementy sieci neuronowych. Na wstępie omówiono modele hybrydowe znane w literaturze, a następnie przedstawiono propozycje modeli hybrydowych stosowanych w modelach punktowych prognoz zmienności i prognozowaniu rozkładów prawdopodobieństwa wybranych szeregów czasowych.

Rozdział piąty, w całości empiryczny, dotyczy oceny omawianych specyfikacji. Najpierw porównywano modele zbudowane z wykorzystaniem sieci neuronowych, biorąc pod uwagę prognozy punktowe i strategie inwestycyjne wykorzystujące prognozy z tychże modeli, a następnie podobne procedurę przeprowadzono w odniesieniu do modeli ekonometrycznych i hybrydowych. W ostatniej części zaprezentowano wyniki uzyskane przez modele prognoz probabilistycznych.

W rozdziale szóstym przeprowadzono analizę porównawczą wyników uzyskanych z najlepszych modeli. Omówiono realizację celów badawczych i poszczególne hipotezy. Przedstawiono zalety i ograniczenia wynikające ze stosowania metod uczenia głębokiego i zaproponowano dalsze kierunki badań.

Strona formalna pracy nie budzi większych zastrzeżeń. Praca jest napisana w sposób dość jasny i zrozumiały dla czytelnika.

We wstępie pracy sformułowano następującą hipotezę główną: *modele predykcyjne oparte na metodach uczenia głębokiego można efektywnie wykorzystywać do prognozowania finansowych szeregów czasowych w postaci logarytmicznych stóp zwrotu, oraz ich zmienności*. Ponadto w pracy sformułowano siedem hipotez badawczych. Realizację celów badawczych i odniesienie do hipotez badawczych omówiono w podsumowaniu wyników w rozprawie (punkt 6.2).

## 3 Uwagi ogólne

Zidentyfikowany przez Autora problem badawczy, określony cel pracy oraz sformułowane hipotezy, główna i pomocnicze, uznaję za ważne z naukowego punktu widzenia i oceniam pozytywnie. Problematyka poruszana w pracy jest bardzo wymagająca, sam opis przeprowadzonych badań powinien być logiczny i konsekwentny. Doktorant - pomimo pewnych nieścisłości wymienionych poniżej - poradził sobie z bardzo ambitnym zadaniem. Poniżej zamieszczam uwagi, które nasunęły mi się w trakcie lektury.

W mojej ocenie zawartość rozdziału pierwszego mieszczącego się na stronach 9-17 nie do końca odpowiada tytułowi rozdziału. Podrozdział 1.1.1. jest bardzo ogólny i nie przystaje do reszty pracy. Z racji, że w dalszej części pracy w badaniach empirycznych wykorzystywane są zróżnicowane indeksy

giełdowe, warto byłoby nieco szerzej omówić sposób tworzenia indeksów na rynkach, biorąc pod uwagę podział na indeksy dochodowe i indeksy cenowe, czy też indeksy typu *blue chip* i indeksy szerokiego rynku. Dyskusyjne jest także to, czy ETFy są instrumentami pochodnymi (s. 11 rozprawy). Stan badań w obu nurtach, ekonometrii finansowej i sieci neuronowych, jest potraktowany dość skrótowo i pytanie, czy jest on potrzebny, mając na uwadze fakt, iż w późniejszych rozdziałach, drugim i trzecim, pojawia się omówienie publikacji z tych dwóch nurtów.

W drugim rozdziale jednym tchem wymienia się zmienność historyczną i zmienność zrealizowaną. W kontekście dalszych badań nie ma potrzeby omawiania zmienności zrealizowanej, ale jeżeli jest ona wspomniana, to wypadałoby poruszyć kwestię zwrotu nocnego w szacowaniu wariancji zrealizowanej, dodatkowej miary zmienności jaką jest zmienność zrealizowana dzienna, i dopiero wtedy przedstawić korektę Martensa. Byłoby to zresztą uzasadnione w kontekście estymatora Garmana i Klasa z rozszerzeniem Yanga i Zhanga. Aktualna nazwa tego estymatora w pracy (estymator zmodyfikowany o skoki między cenami otwarcia i zamknięcia), jak również ostatnie zdanie s 2.3.2, nie oddają sedna sprawy - chodzi o skoki między ceną zamknięcia w dniu  $t - 1$  i ceną otwarcia w dniu  $t$ . Skoro w dalszej pracy wykorzystywany jest estymator Garmana i Klasa, to byłoby wskazane trochę szerzej przedstawić te estymatory (bo jest ich kilka) i wyjaśnić, dlaczego wybrano akurat ten.

Wykres 3.12 prezentujący schemat działania funkcji wczesnego zatrzymania dla zbioru uczącego i walidacyjnego pojawia się przed podpunktem 3.2.4. poświęconym podziałowi zbioru danych w procesie uczenia i testowania. Kolejność powinna być odwrotna - najpierw opis zbiorów, później wykres.

Warto byłoby nieco szerzej uzasadnić dobór szeregów do badania empirycznego - spośród wybranych indeksów jeden (DAX) był indeksem 30 największych spółek (od końca września 2021 w skład DAX wchodzi 40 spółek), w skład BOVESPA wchodzi nieco poniżej 100 akcji, zaś pozostałe indeksy są tzw. indeksami szerokimi. W badaniach empirycznych DAX często jest zastępowany indeksem STOXX 600 dla Europy.

Dobór funkcji straty jest faktycznie jednym z istotnych czynników w procesie budowy sieci, ale w pracy brakuje uzasadnienia dla wyboru MADL. Podobnie też nie wyjaśniono wystarczająco, w jaki sposób powstały krzywe kapitałowe. Wykresy tych krzywych byłyby bardziej czytelne, gdyby w opisie uwzględniono informację, że strategia B&H jest tą strategią z której wynikami porównuje się wyniki strategii LS i LO.

W odniesieniu do prognozowania zmienności stosowane są dwa podejścia - w jednym Doktorant porównuje rezultaty z nieparametryczną miarą Garmana i Klasa, GKYZ (5.5.1 Ocena trafności prognoz punktowych zmienności), a w drugiej odnosi się do pomiaru ryzyka rynkowego (nazywanego w pracy kapitałowym) (5.5.2 Ocena trafności prognoz ryzyka uzyskanych przy pomocy modeli hybrydowych). W jednym i drugim przypadku chodzi o prognozy punktowe zmienności, jak również w obu przypadkach porównane są modele hybrydowe i modele klasy GARCH. Zbieżność tytułów jest nieco myląca.

W rozdziale szóstym zestawiono wyniki przeprowadzonych obliczeń. Szkoda, że zrezygnowano z porównania tych samych modeli w tabeli 6.1. W trakcie lektury tego rozdziału nasuwa się pytanie, jakie znaczenie dla uzyskanych wyników ma to, że w okresie testowym dominuje tendencja wzrostowa - Autor rozprawy zwraca na to uwagę, ale nie przedstawia szerszej interpretacji. Kolejne pytanie dotyczy tego, na ile można polegać na prognozach zmienności, które nie spełniają założeń w obszarze wartości zagrożonej (tak jest np. dla NIKKEI225, tabela 6.3, czy DAX - 6.4).

Pracę uzupełnia aneks, w którym znalazła się część wyników. Niewątpliwie warto byłoby także dołączyć kod źródłowy - pozwoliłoby to na głębszą ocenę oryginalności przyjętych rozwiązań.

## 4 Uwagi dodatkowe

- Struktura pracy: Podpunkt 1.1.2 zatytułowanych jest Prognozowanie instrumentów finansowych - lepiej byłoby zastosować Prognozowanie finansowych szeregów czasowych (zresztą takie sformułowanie pojawia się potem w tekście), Podpunkt 2.2.2. Stopy zwrotu są niepotrzebnie z dużej litery - w praktyce można mówić krócej o zwrotach (tłumacząc bezpośrednio z angielskiego *returns*), Podpunkt 2.3.3. Transformacje estymatorów zmienności nie przystaje do pozostałych podpunktów (jest rozszerzeniem 2.3.1).

- Współautorką pracy Waldemara Tarczyńskiego była Magdalena Mojsiewicz (w rozprawie niewłaściwa odmiana nazwiska). Pisownia nazwiska Janusza Brzeszczyńskiego jest niewłaściwa (ń zamiast n).
- Nie ma czegoś takiego jak *najbardziej optymalny moment* - s. 85 .... *funkcja wczesnego zatrzymania umożliwiająca zatrzymanie procesu uczenia się w najbardziej optymalnym momencie*.
- KOSPI jest nazwą indeksu, a nie nazwą giełdy w Korei (s. 96).
- W pracy jest **sporo** błędów, zarówno językowych (literówki, nieprawidłowe formy), jak i interpunkcyjnych. Nie sposób ich wszystkich przytoczyć, wymienię kilka: s. 11 *za* zamiast *z*, s. 13 *niżą* zamiast *niższą*, s. 14 *animalizowane* zamiast *analizowane*, s. 14 *niepotrzebne zużycie cen energii* - chyba *zużycie energii*, s. 14 *znaczenie* zamiast *znacznie*, s. 16 *metodami* zamiast *metod*, s. 32 *praz* zamiast *oraz*, s. 53 *niepewności* zamiast *niepewność*, s. 71 *za ilość* zamiast *ilość*, s. 74 *niewielką* zamiast *niewielka*, s. 75 w podtytule *uczenie niedazorowane* zamiast *nienadzorowane*, s. 77 *łańcuchy Markowa* są z małej litery zamiast z dużej, s. 85, 7. linijka od dołu - niepotrzebne słowo *są*. s. 142 w tytule *prognoz punkowych* zamiast *punktowych*, s. 160 *konturowanych* zamiast *konstruowanych*.
- Co to jest analiza wykresowa? (s.117, s.147),
- Zanikający gradient pojawia się dwukrotnie, na stronie 66 i 82 z tym samym cytowaniem.
- Co oznacza sformułowanie, że *wyniki uzyskane przez poszczególne specyfikacje modelowe mogą nie być optymalne*?
- Skrót ANN nie jest wyjaśniony.
- Warto byłoby powoływać się na bardziej precyzyjne cytowania niż wikimedia.com (rys. 3.7).

## 5 Konkluzja

Moja ocena rozprawy doktorskiej jest pozytywna. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, prezentując oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Podjęta tematyka badawcza wpisuje się w nurt dociekań prowadzonych w ramach finansów empirycznych w wielu znaczących ośrodkach akademickich. Wymagała ona od Doktoranta wiedzy teoretycznej w kilku obszarach, ekonometrii finansowej, sieci neuronowych, czy zarządzania portfelem inwestycji. Nie sposób też pominąć nakładu czasu na wykonanie obliczeń w R i Pythonie oraz interpretację uzyskanych wyników.

O jakości i poziomie badań Doktoranta świadczy także praca opublikowana w czasopiśmie *Sensors*, o zbliżonej problematyce (Michałków, J., Sakowski, P., & Ślepaczuk, R. (2022). LSTM in algorithmic investment strategies on BTC and S&P500 index. *Sensors*, 22(3) doi:10.3390/s22030917).

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że recenzowana praca doktorska Pana mgr. Jakuba Michańkowskiego zatytułowana *Metody uczenia głębokiego w prognozowaniu finansowych szeregów czasowych* spełnia należycie wymogi Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

*Barbara Bzdowska - WJ*