

Dr hab. inż. Grzegorz Dudek, prof. PCz  
Instytut Informatyki, Wydział Elektryczny,  
Politechnika Częstochowska  
Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa

Częstochowa, 12.01.2017 r.

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

Tytuł: Predykcja cen akcji na giełdzie z zastosowaniem modeli analityczno-neuronowych

Autor: mgr inż. Michał Paluch

Promotor: dr hab. inż. Lidia Jackowska-Strumiłło, prof. PŁ

#### ***Charakterystyka rozprawy***

Celem przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej jest zaprojektowanie, implementacja i przetestowanie modeli neuronowych do predykcji cen giełdowych akcji. Praca ma charakter teoretyczny jak i doświadczalny - proponowane metody są weryfikowane eksperymentalnie. W części teoretycznej Autor opisał podstawowe pojęcia, dokonał przeglądu literatury, zaproponował autorski model neuronowy do predykcji cen akcji na bazie wskaźników analizy technicznej, zdefiniowanych przez siebie wskaźników analizy fraktalnej oraz cen historycznych. Opisał również autorski system wspomagający podejmowanie decyzji inwestycyjnych, który wykorzystuje opracowane modele neuronowe. W części doświadczalnej przeprowadził badania eksperymentalne modeli prognostycznych oraz opisał i ocenił wyniki badań.

Rozprawa liczy 130 stron. Składa się z wykazów skrótów i symboli, dziewięciu rozdziałów, w tym wstępu i podsumowania, bibliografii, wykazów rysunków i tabel oraz dwóch dodatków. We wstępie uzasadniono podjęcie tematu i opisano zawartość pracy. Cele, tezę i zakres pracy podano w rozdziale 2. Rozdział 3 dotyczy analizy danych giełdowych. Scharakteryzowano funkcjonowanie giełdy papierów wartościowych, opisano wybrane wskaźniki analizy technicznej i wprowadzono czytelnika w zagadnienia analizy fraktalnej. W rozdziale 4 opisano sztuczne sieci neuronowe - architektury wielowarstwowego perceptronu i sieci Hopfielda. Opisano trzy metody uczenia perceptronu. Rozdział 5 zawiera przegląd literatury w zakresie modelowania szeregów czasowych. Przedstawiono problem dekompozycji szeregów czasowych, modele klasyczne (ARIMA, wygładzanie wykładnicze), neuronowe i hybrydowe. W rozdziale 6 zaprezentowano modele neuronowe z danymi wejściowymi o różnym charakterze: historyczne ceny akcji, wskaźniki analizy technicznej i wskaźniki analizy fraktalnej. Te ostatnie zdefiniowano w podrozdz. 6.3. Opisano badania eksperymentalne mające na celu wyłonić optymalną architekturę modelu i zestaw zmiennych wejściowych. Porównano wyniki działania modeli. W rozdziale 7 przedstawiono system wspomagający podejmowanie decyzji inwestycyjnych zbudowany z wykorzystaniem najlepszych modeli neuronowych. Opisano algorytmy zaimplementowane w systemie.

Rozdział 8 zawiera opis badań eksperymentalnych systemu. Wyniki zestawiono w tabelach i zobrazowano wykresami. Przeprowadzono dyskusję wyników. W podsumowaniu rozprawy (rozdział 9) dokonano pozytywnej weryfikacji tezy. Końcowa część pracy zawiera bibliografię liczącą ok. 110 pozycji, spisy rysunków i tabel oraz dwa dodatki. Pierwszy z nich zawiera tabele ze szczegółowymi wynikami prognoz modeli neuronowych, drugi - definicje dodatkowych wskaźników analizy technicznej wykorzystywanych w badaniach.

### ***Opinia na temat rozprawy i uwagi krytyczne***

Predykcja cen akcji spółek giełdowych jest podstawowym elementem strategii inwestycyjnej na giełdzie papierów wartościowych. Inwestycje długoterminowe poparte są analizą fundamentalną dotyczącą kondycji ekonomicznej spółek i sektorów, w których działają oraz ich szerszego makrootoczenia. Inwestycje krótkoterminowe bazują na analizie technicznej, która prognozuje ceny akcji na podstawie licznych wskaźników technicznych i analizy statystycznej kształtowania się cen w przeszłości. Modele analizy technicznej opierają się na założeniu, że ceny akcji zmieniają się według możliwych do zaobserwowania, powtarzalnych schematów. Jednak prognozowanie kursów giełdowych jest bardzo trudne, ponieważ czynniki wpływające na kursy są trudne do ustalenia i często niedostępne. Zidentyfikowanie wszystkich istotnych czynników wpływających na cenę akcji i charakteru tego wpływu wydaje się niewykonalne. Sytuację komplikuje obecność czynników losowych i czynników o trudno przewidywalnym oddziaływaniu, jak np. decyzje polityczne. W ramach rozprawy doktorskiej Autor podjął się bardzo trudnego i ambitnego zadania. Do modelowania zależności cen akcji od wskaźników technicznych Autor użył sieci neuronowych, które jako uniwersalne aproksymatory pozwalają tworzyć nieliniowe modele nieznanych zależności pozyskując wiedzę z danych. Tematyka rozprawy jest trafna, istotna i aktualna w aspekcie jej walorów poznawczych i utylitarnych.

Tytuł rozprawy jest odpowiednio zwarty i komunikatywny. W pełni oddaje najistotniejsze elementy treściowe rozprawy. Teza podana w rozdz. 2 ma postać dwuczłonową. Pierwsza część dotyczy poprawy dokładności prognoz po połączeniu w jednym modelu analizy technicznej, analizy fraktalnej i obliczeń neuronowych w stosunku do rozdzielnie stosowanych modeli analitycznych i neuronowych. Druga część tezy mówi o możliwości zaplanowania strategii inwestycyjnej przy wykorzystaniu opracowanych modeli analityczno-neuronowych i osiągnięciu zysków na poziomie wyższym od indeksów giełdowych. Teza jest poprawna, chociaż trudno będzie wykazać jedynie na podstawie badań eksperymentalnych na ograniczonej próbie danych, że zaproponowane modele rzeczywiście poprawiają dokładność i zapewniają osiągnięcie zysków. Oprócz tezy w rozdz. 2 Autor uzasadnia podjęcie tematu, przedstawia cele pracy i zadania rozwiązywane w ramach pracy. Brakuje tu jednak opisu zakresu i układu rozprawy.

W rozdz. 3 Autor skupił się na analizie technicznej i fraktalnej. Opisał przesłanki, na których opiera się analiza techniczna, podał zalety i wady analizy technicznej i scharakteryzował wybrane wskaźniki analizy technicznej. Opis wskaźników obejmuje ich definicję oraz sposób ich interpretacji. Niedostatek budzi skąpy opis metod analizy technicznej. Autor nie wspomina o analizie wykresów, która jest podstawą analizy technicznej. Spośród wielu metod i podejść (np. teoria fal Elliotta, analiza formacji świecowych, poziomy Fibonacciego) w pracy opisano jedynie technikę Ichimoku. W dalszej części rozdz. 3 opisano analizę fraktalną, a właściwie podstawowe pojęcia z teorii chaosu i fraktali (m.in. wymiar fraktalny i

średnią fraktalną) w zastosowaniu do rynków kapitałowych. Średniej fraktalnej Autor użyje do modyfikacji definicji wskaźników analizy technicznej. Zmodyfikowane wskaźniki stanowią będą dodatkowe wejścia w modelach prognostycznych. Rozdział 3 na pewno wzbogaci krótki opis hipotezy rynku fraktalnego zaproponowanej przez Edgara Petersa (o której Autor wspomina w podrozdz. 3.3.1) jako alternatywy hipotezy rynku efektywnego.

W rozdz. 4 Autor opisuje sztuczne sieci neuronowe, koncentrując się na modelach użytych w badaniach eksperymentalnych, t.j. sieci jednokierunkowej (wielowarstwowy perceptron, MLP) i sieci rekurencyjnej (model Hopfieldda). Podano architektury sieci i opisano szczegółowo trzy algorytmy uczenia wielowarstwowego perceptronu. Kilka wzorów w tym opisie zawiera błędy: (4.5) i (4.8) - w zapisie szeregu Taylora pomiędzy  $E(W)$  i  $[g(W)]^T$  powinien być znak dodawania a nie mnożenia, (4.11) i (4.12) - pochodne cząstkowe powinny być liczone dla funkcji błędu  $E(W)$ .

Dopełnieniem badań literaturowych jest rozdz. 5, w którym opisano problematykę modelowania szeregów czasowych. Scharakteryzowano najpopularniejsze modele: ARIMA, wygładzania wykładniczego, modele oparte na sztucznych sieciach neuronowych oraz modele hybrydowe. Rozdział 5 Autor kończy konkluzją uzasadniającą użycie sieci neuronowych w swoich badaniach: modele oparte na sieciach neuronowych i podejścia hybrydowe, według danych literaturowych, zapewniają większą dokładność prognozowania danych finansowych na giełdzie od modeli klasycznych.

Obszerny rozdz. 6 jest kluczowy dla rozprawy. Przedstawiono w nim koncepcję Autora, która ma zrealizować postawione cele i wykazać prawdziwość przyjętych tez. W początkowej części rozdziału analizuje się działanie sieci MLP w prognozowaniu giełdowych cen akcji, gdy predyktorami są ceny zamknięcia z ostatnich czterech dni. Przedstawiono wyniki predykcji dla kilku spółek giełdowych. Nie są one satysfakcjonujące, co słusznie skłania Autora do rozszerzenia informacji wejściowej o dodatkowe predyktory - wybrane wskaźniki analizy technicznej. Po wstępnej selekcji spośród ponad 200 wybrano 40 wskaźników. Do generowania zestawów danych treningowych i testowych opracowano algorytm nauczyciela. Niestety nie opisano w jaki sposób dane zostały podzielone na części treningową i testową. W przypadku szeregów czasowych podział ten powinien uwzględniać chronologię. Liczbę neuronów ukrytych ustalono na  $n+1$ ,  $1,5n$ ,  $2n-1$  i  $2n+1$  ( $n$  - liczba wejść), ale bez uzasadnienia. Dyskusyjne wydaje się testowanie sieci dla zbliżonej liczby neuronów ukrytych  $2n-1$  i  $2n+1$ . W ocenie wyników zamieszczonych w tab. 6.3 Autor napisał, że model AT-SSN uzyskał mniejsze błędy testowe niż model C-SSN i miał mniej skomplikowaną strukturę. Tymczasem spośród czterech przypadków zamieszczonych w tej tabeli w jednym model C-SSN uzyskał niższy błąd i zawierał mniej neuronów. Wyniki zamieszczone w tab. 6.3 są nadszpiewane dobre. Błędy testowe MSE na poziomie  $2E-4$  oznaczają, że ceny prognozowane są z błędem nie większym od 1 grosza! Dla spółki CD Projekt S.A. uzyskano nawet MSE na poziomie  $77E-8$ . Wyniki te nie korespondują z wykresami 6.2-6.4 i 6.6-6.11, gdzie obserwuje się znacznie większe błędy.

W dalszej części badań Autor definiuje dziesięć wskaźników fraktalnych modyfikując wskaźniki analizy technicznej. Modyfikacja polega na wprowadzeniu we wzorach średniej fraktalnej zamiast np. wykładniczej średniej ruchomej. Na uwagę zasługuje szeroki plan badań eksperymentalnych modeli neuronowych ze wskaźnikami analizy technicznej i fraktalnej jaki Autor nakreślił w podrozdz. 6.4. Celem tych badań było wyłonienie najlepszych modeli neuronowych z optymalną kombinacją wskaźników jako predyktorów. Najlepsze

modele wybierane były na drodze kolejnych eliminacji: z początkowego zbioru ponad 300 tyś. modeli wybierano modele najdokładniejsze w prognozowaniu dla wybranych spółek. Testowano różne zestawy predyktorów, trzy metody uczenia, cztery warianty liczby neuronów ukrytych, trzy funkcje aktywacji. Jedną z funkcji aktywacji Autor nazywa logarytmiczną - wymaga to komentarza, ponieważ wśród typowych funkcji aktywacji nie ma funkcji o takiej nazwie. Drugą funkcję Autor nazywa sigmoidalną, a trzecią - tangens hiperboliczny. Jednak tangens hiperboliczny to również funkcją sigmoidalną. Najlepsze modele neuronowe dla badanych spółek zestawiono w czytelnej formie tabelarycznej (tab. 6.8 i 6.9) i skomentowano. W dwóch na pięć przypadków pokazanych w tab. 6.9 najniższe błędy MSE uzyskano dla modelu C-SSN, który jako predyktorów używał jedynie cen zamknięcia z poprzednich dni. Dziwi wobec tego wniosek Autora: "Największe błędy uzyskano dla sztucznych sieci neuronowych typu C-SSN". Podobnie wątpliwości budzi wniosek "Na podstawie rysunku 6.22 można stwierdzić, iż w przypadku wszystkich firm najmniejsze błędy zostały osiągnięte dla modelu AF-C-SSN". Z rysunku tego jasno widać, że w dwóch na pięć zaprezentowanych przypadków najniższe błędy osiągnął model AF-AT-SSN. Cenne z praktycznego punktu widzenia (dla inwestora szacującego ryzyko finansowe związane z niepewnością predykcji) jest porównanie maksymalnych miesięcznych błędów predykcji osiąganych przez poszczególne modele (rys. 6.23 i 6.26) oraz maksymalnych błędów dla okresów trendu wzrostowego i spadkowego (rys. 6.24, 6.25, 6.27 i 6.28).

Dopełnieniem pracy jest rozdz. 7, w którym przedstawiono autorski system wspomagający podejmowanie decyzji inwestycyjnych oraz rozdz. 8, w którym opisano budowę strategii inwestycyjnej na podstawie portfela akcji. Należy docenić wysiłek Autora związany z budową systemu Predyktor implementującego w technologii Java i Spring Framework opracowane modele neuronowe i algorytmy decyzyjne. System przewiduje ceny akcji i oblicza optymalne ilości akcji do zakupu. Wizualizuje dane (szeregi czasowe cen, wskaźniki analizy technicznej i fraktalnej, historie operacji), porównuje ceny spółek, analizuje dokładność modeli. Dodatkowo w systemie zaimplementowana jest sieć Hopfielda do przewidywania wzrostu cen akcji w kolejnym dniu. Wariant i struktura modelu neuronowego kodowane są w algorytmie nauczyciela i przekazywane w postaci symbolu do modułu uczenia sieci. Wynik uczenia zapisywany jest na serwerze. Algorytm komparatora analizując wyniki predykcji przygotowuje dane dla sieci Hopfielda i prezentuje listę spółek posortowaną względem przewidywanych zysków. Opis sieci Hopfielda jest jednak niewystarczający. Trudno zrozumieć jej działanie i interpretacje jej wyników przez algorytm przedstawiony na rys. 7.7. Ta część pracy wymaga szerszego opisu i przedstawienia przykładu. W rozdz. 8 porównano modele neuronowe na przykładzie budowy strategii inwestycyjnej na kolejny dzień dla kilku wersji portfela inwestycyjnego, różniących się liczbą spółek, w które inwestowano. Wyniki potwierdziły skuteczność opracowanych modeli. Najwyższą stopę zwrotu osiągnął model z siecią Hopfielda.

Zaproponowane przez siebie modele neuronowe Autor nazywa hybrydowymi. Model hybrydowy łączy w sobie przynajmniej dwa różne modele. W pracy mają to być sieci neuronowe i metody analizy technicznej i/lub metody analizy fraktalnej. Jednak z analizy technicznej i fraktalnej wykorzystywane są jedynie wskaźniki jako dodatkowe zmienne wejściowe dla sieci neuronowej. Wskaźniki te jako nośniki dodatkowych informacji na temat stanu rynku i jego dynamiki (trendów, zmienności, impetu) mają poprawić dokładność predykcji cen akcji. Metody analizy technicznej, takie jak japońskie techniki analizy wykresów, metody oparte na proporcjach Fibonacciego, metody fal Elliotta, czy metody

analizy trendów oparte na formacjach, nie są w żaden sposób wykorzystywane w proponowanym podejściu. Nazwanie go hybrydowym jest więc dyskusyjne. Niefortunne wydaje się również nazwanie systemu wspomagającego podejmowanie decyzji inwestycyjnych systemem ekspertowym. Nazwa ta jest zarezerwowana dla systemów, które złożone są z maszyny wnioskującej i bazy wiedzy. Baza wiedzy najczęściej ma postać bazy faktów i bazy reguł postaci Jeśli-To i tworzona jest przez ekspertów dziedzinowych. Taka baza wiedzy, ani maszyna wnioskująca nie występują w proponowanym modelu.

Układ pracy i podział na rozdziały jest poprawny i czytelny. Pozytywnie oceniam kompletność rozprawy (z uwagami przedstawionymi powyżej) - w kolejnych rozdziałach przedstawiono podstawy teoretyczne w odniesieniu do aktualnych osiągnięć w obszarach związanych z tematyką pracy, opisano autorskie rozwiązania Doktoranta i przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych ze szczegółową ich dyskusją. Autor korzysta z bogatej bibliografii obejmującej ponad 100 pozycji, do której często odnosi się w treści rozprawy. Bibliografia obejmuje także najnowsze pozycje z ostatnich lat.

Przeprowadzone badania eksperymentalne układają się w logiczną całość, mającą na celu udowodnić tezę. W konkluzji tych badań można stwierdzić, że wprowadzenie wskaźników analizy technicznej i fraktalnej jako dodatkowych predyktorów w modelach neuronowych w wielu przypadkach pozwala poprawić dokładność predykcji cen akcji. Zaproponowana strategia inwestycyjna w oparciu o wyniki modeli neuronowych pozwoliła uzyskać zyski na poziomie wyższym od indeksów giełdowych. Należy jednak zachować ostrożność w formułowaniu ogólnych konkluzji, ponieważ eksperymenty przeprowadzono na niewielkim zbiorze danych (dane pochodziły jedynie z polskiej giełdy).

Autor wykazał się znajomością literatury przedmiotu, umiejętnością krytycznej oceny istniejących rozwiązań, umiejętnością postawienia problemu naukowego i jego rozwiązania, umiejętnościami planowania i przeprowadzania badań eksperymentalnych, umiejętnościami implementacji algorytmów i tworzenia oprogramowania oraz umiejętnością oceny i analizy wyników eksperymentów. Kompetencje Autora w tematyce rozprawy podkreślają jego artykuły w czasopismach naukowych i referaty na międzynarodowych konferencjach.

Do najważniejszych, twórczych elementów rozprawy zaliczam:

- zdefiniowanie wskaźników analizy fraktalnej poprzez modyfikacje wskaźników analizy technicznej
- opracowanie modeli neuronowych do przewidywania cen akcji spółek giełdowych w oparciu o wskaźniki analizy technicznej i fraktalnej oraz ceny historyczne
- opracowanie strategii inwestycyjnej w oparciu o wyniki predykcji modeli neuronowych, algorytmy decyzyjne i sieć Hopfielda
- zbudowanie systemu wspomagającego podejmowanie decyzji inwestycyjnych implementującego opracowane rozwiązania

#### ***Błędy redakcyjne i językowe***

- str. 26: pomyłone nazwisko autora, zamiast "Ethlers" powinno być "Ehlers"
- str. 37: "Sygnał na wyjściu będzie zmieniał się aż do czasu spełnienia równania:  $y_k(t) = y(t-1)$ " - truizm

- str. 39, wzór (5.1): powinno być " $o(k) = T(k) + C(k) + S(k) + I(k)$ "
- str. 41: symbol "DAN2" nie jest objaśniony
- str. 44: "Po normalizacji dane zawierają się w przedziale (0, 1)" - według (6.1) dane zawierają się w przedziale (0,1, 0,9)
- str. 49, tab. 6.2 - n w tej tabeli reprezentuje liczbę wejść, a nie jak napisano liczbę neuronów
- str. 49, tab. 6.3 - do przedstawienia bardzo małych liczb należało użyć notacji naukowej (zamiast 0,00000077 - 77E-8) - uwaga ta dotyczy też innych tabel
- str. 54: "Modyfikacja polega na zastosowaniu we wskaźnikach średniej fraktalnej FMA, ze wzoru 3.34" - powinno być "... 3.30"
- str. 57, tab. 6.5: tabela zawiera w obu wierszach tę samą strukturę AT-SSN
- str. 59: "Spośród 10414 wyznaczonych w 4 kroku struktur modeli ..." - powinno być "... w 3 kroku ..."
- str. 67: "... w celu ustalenia najbardziej optymalnego algorytmu ..." - pleonazm, powinno być "... w celu ustalenia optymalnego algorytmu ..."
- str. 73: "W zbiorze modeli z najmniejszym błędem, pokazanym w tabelach 6.10 i 6.11 ..." - powinno być "... w tabelach 6.8 i 6.9 ..."
- str. 73: symbol "FFN" nie jest objaśniony
- str. 79: "... mają pełnić rolę funkcję narzędzia pomocniczego ..." - powinno być "... mają pełnić funkcję narzędzia pomocniczego ..."
- str. 82: rys. 7.2 jest nieczytelny
- Dodatek B, str. 119: nie podano literatury źródłowej dla wskaźników analizy technicznej; w zapisie wzorów pojawiają się zbędne lub niesparowane nawiasy, np. (B.8), (B.10), (B.12), (B.15), (B.16), (B.20), (B.22), (B.23), (B.24), (B.34), (B.37), (B.38); zmienne wyszczególnione pod wzorem (B.14) nie pojawiają się w tym wzorze
- str. 123: "z wykresów wynika ..." - z jakich wykresów?
- str. 124: "wartości wskaźnika osiągają najwyższy poziom, gdy ceny na rynku osiągają nowe ekstrema, po czym zaczynają podążać w bok" - co znaczy "w bok"?
- str. 124: "Ponad to" - powinno być "Ponadto"
- str. 126: "zwanaej", "zakątda" - powinno być "zwanej" i "zakłada"
- str. 126: "Jest wskaźnikiem wyprzedzającym, osiągającym swoje ekstrema" - niezrozumiałe
- str. 128: symbol "||" we wzorach (B.35) i (B.36) nie jest objaśniony

### **Podsumowanie**

Uważam, że zakres tematyczny rozprawy i osiągnięte w niej oryginalne wyniki dotyczące predykcji cen akcji spółek giełdowych za pomocą sieci neuronowych lokują ją w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie informatyka. Pomimo zamieszczonych powyżej uwag krytycznych moja generalna opinia o pracy jest pozytywna.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Michała Palucha stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje umiejętność prowadzenia przez kandydata samodzielnej pracy naukowej oraz jego ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie informatyka. Rozprawa spełnia wymogi ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Prof. D. D. D.", with a long horizontal stroke extending to the right.