

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Neuronowe modele decyzyjne w inwestowaniu w instrumenty pochodne na indeks WIG20 Giełdy Papierów Wartościowych

Mgr inż. Marta Kraszewska

Promotor: prof. dr hab. inż. Ewa Dudek-Dyduch

Kraków 2012

1. Wstęp

Niniejsza praca związana jest z modelami decyzyjnymi opartymi na sieciach neuronowych, a przeznaczonymi do inwestowania w instrumenty pochodne na indeks WIG20 Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie, w szczególności kontraktów opcyjnych.

Wszędzie gdzie pojawia się zagadnienie predykcji, klasyfikacji lub kontroli, sztuczne sieci neuronowe brane są pod uwagę jako alternatywa dla innych metod analitycznych. Są one nowoczesnymi systemami obliczeniowymi przetwarzającymi informacje, wzorującymi się na zjawiskach zachodzących w mózgu człowieka, zdolnymi do modelowania niezmiernie złożonych problemów. Sieci neuronowe bywają na ogół lepsze od innych metod analitycznych w przypadku danych chaotycznych, co ma miejsce w sytuacji znaczących wahań kursów na giełdzie. Takie zachowanie nie daje szans większości innych metod, natomiast sieci neuronowe na ogół radzą sobie dobrze z tego rodzaju sygnałami wejściowymi.

Istnieje wiele zagadnień z dziedziny finansów, w których na szeroką skalę stosuje się sieci neuronowe: oszustwa związane z kartami kredytowymi, analiza wniosków o udzielenie pożyczki hipotecznej, klasyfikacja obligacji przedsiębiorstw, prognozowanie zachowania rynku akcji, prognozowanie upadłości banków, wycena nieruchomości, analiza kondycji finansowej przedsiębiorstw, wybór strategii sprzedaży, prognozowanie sprzedaży, podejmowanie decyzji na poziomie menedżerskim, analiza kondycji biur turystycznych, prognozowanie wskaźników ekonomicznych, przewidywanie przepływów gotówkowych, lokalizowanie podmiotów uchylających się od płacenia podatków czy wybór funduszu powierniczego i wiele innych. Z przeprowadzonych badań literaturowych wynika, że brak jest prac poruszających problem wyceny opcji na indeks WIG20 Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie z wykorzystaniem sieci neuronowych.

2. Geneza i cel pracy

Wycena opcji jest niezwykle trudnym, ważnym i ryzykownym problemem. Składa się na to szereg czynników m. in. aktualna wartość instrumentu bazowego na który wystawiona jest opcja, zmienność instrumentu bazowego czy czas pozostający do wygaśnięcia opcji. Pierwsze dwa czynniki w dużym stopniu uzależnione są od sytuacji jaka w danej chwili panuje na giełdzie, a co za tym idzie również od czynników zewnętrznych, takich jak ogólnoswiatowa sytuacja na rynkach finansowych oraz sytuacja gospodarcza poszczególnych państw na świecie (Stanów Zjednoczonych czy krajów Unii Europejskiej).

Należy również podkreślić, że rynek opcji na indeksy giełdowe jest stosunkowo młodym i silnie rozwijającym się rynkiem sięgającym swych początków lat 70-tych ubiegłego stulecia w Stanach Zjednoczonych. Na Giełdzie Papierów Wartościowych w Warszawie rynek ten istnieje od 2003 roku.

Mimo iż w ramach matematyki finansowej stworzono szereg modeli wspomagających decyzje inwestorów w zakresie kupna opcji, to jednak w przypadku niestabilnego rynku, z jakim mamy do czynienia w ciągu ostatnich kilku lat, modele te dają wątpliwe wyniki. Z drugiej strony jak wiadomo sieci neuronowe są wykorzystywane do podejmowania decyzji właśnie w sytuacjach trudnych do zamodelowania za pomocą zależności matematycznych.

Powstające zatem pytanie, czy sieci neuronowe można wykorzystać do wyceny opcji na indeks WIG20 Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie, stało się bezpośrednią genezą badań przeprowadzonych w ramach prezentowanej pracy.

W chwili obecnej przez inwestorów do wyceny opcji na indeks WIG20 stosowany jest m.in. model Blacka-Scholesa. Niestety istotnym ograniczeniem tego modelu jest to, iż rzeczywiste rynki nie zawsze spełniają przyjęte w nim założenia. W związku z tym wyceny rynkowe mogą różnić się od tych wynikających z modelu. W szczególności, rozkład prawdopodobieństwa ceny akcji w przyszłości nie ma postaci rozkładu logarytmiczno-normalnego. Dlatego też powstało wiele prac, w których autorzy rozwijali modele zmniejszając ilość ograniczeń wynikających z modelu Blacka-Scholesa. Jednak i te modele nie są w stanie przewidzieć gwałtownych ruchów cen na rynkach kapitałowych wywołanych różnymi czynnikami. W takiej sytuacji teoretyczne wyceny modeli należy traktować bardzo ostrożnie. Kluczem do sukcesu może być zastosowanie zupełnie nowego podejścia do problemu wyceny opcji, a mianowicie sieci neuronowych. Pożądane zatem jest stworzenie takich modeli wyceny opcji na indeks WIG20, które brałyby pod uwagę również inne czynniki niż rozważane w dotychczas znanych modelach matematycznych, a mające istotny wpływ na popyt i podaż.

Praca, ze względu na analizowany problem, ma charakter interdyscyplinarny. Poruszane są w niej przede wszystkim zagadnienia z obszaru sztucznej inteligencji, ale istotna jest również wiedza z zakresu matematyki finansowej oraz rynków finansowych.

Celem pracy jest stworzenie narzędzia informatycznego opartego na sieciach neuronowych wspomagającego decyzje inwestorów. Dla realizacji tego celu konieczne jest zdefiniowanie następujących celów pośrednich:

1. Zaproponowanie struktury neuronowego modelu decyzyjnego do wyceny kontraktów opcyjnych na indeks WIG20.
2. Wybór środowiska do realizacji modeli neuronowych spośród rozwiązań dostępnych na rynku.
3. Analiza dostępnych danych rzeczywistych oraz pozyskanie informacji o notowaniach z Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie.
4. Przebadanie możliwości wykorzystania modeli neuronowych do wyceny opcji w okresie stabilnego wzrostu na Giełdzie Papierów Wartościowych w Warszawie.

5. Przebadanie możliwości wykorzystania modeli neuronowych do wyceny opcji w okresie gwałtownych wahań kursów na GPW w Warszawie.
6. Porównanie efektywności modeli decyzyjnych opartych na sieciach neuronowych z innymi modelami matematyki finansowej.
7. Zaproponowanie nowego narzędzia opartego na sieciach neuronowych wspomagającego decyzje inwestorów na rynku instrumentów pochodnych.

W związku z powyższym tak sformułowane cele pośrednie doprowadziły do sprecyzowania następującej tezy pracy:

Istnieje możliwość opracowania neuronowych modeli decyzyjnych służących do inwestowania w opcje na indeks WIG20 Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie, przy czym zaproponowane modele mogą dawać lepsze wyniki niż inne znane metody predykcji w sytuacji gwałtownych wahań kursów na giełdzie.

3. Charakterystyka opcji

Opcje (*ang. option*), zwane również kontraktami opcyjnymi (*ang. option contracts*), zaliczają się do instrumentów pochodnych (derywatów). Są terminowymi transakcjami warunkowymi, w których jedna ze stron **nabywa prawo, a nie obowiązek**, do kupna lub sprzedaży określonych instrumentów bazowych (np. indeksu, akcji, obligacji, waluty) po określonej cenie i w określonym czasie.

W kontrakcie opcyjnym występują dwie strony: **wystawca kontraktu** (sprzedawca) i **nabywca kontraktu** (właściciel). Nabywca kontraktu opcyjnego ma prawo realizacji umowy, natomiast wystawca opcji ma obowiązek zrealizowania kontraktu. W związku z tym, że tylko jedna ze stron nabywa prawo realizacji kontraktu, opcje nazywane są kontraktami niesymetrycznymi. Niesymetryczność kontraktu opcyjnego w prawach i obowiązkach nabywcy i wystawcy to jego podstawowa, charakterystyczna cecha, wyróżniająca spośród bardzo popularnych w Polsce kontraktów terminowych futures, w których obowiązki wystawcy i nabywcy są takie same.

Wyróżniamy dwa podstawowe rodzaje opcji – opcje kupna (*ang. call option*) i opcje sprzedaży (*ang. put option*).

Nabywca opcji kupna ma prawo kupić określone aktywa (np. akcje) po określonej cenie, w określonym czasie. Z kolei wystawca opcji kupna ma obowiązek sprzedać określone aktywa po określonej cenie, w określonym czasie.

Nabywca opcji sprzedaży ma prawo, ale nie obowiązek, sprzedać określone aktywa po określonej cenie, w określonym czasie. Z kolei wystawca opcji sprzedaży ma obowiązek kupić określone aktywa po określonej cenie, w określonym czasie.

Cena, po jakiej nabywca kontraktu ma prawo, ale nie obowiązek, kupić lub sprzedać instrument bazowy (*ang. underlying asset*), nazywana jest ceną zakupu, premią lub **premią opcyjną** (*ang. option premium*). Nie jest ona zwracana nabywcy kontraktu nawet wówczas, gdy opcja nie zostanie wykonana.

Kurs wykonania (realizacji) opcji (*ang. exercise price, strike price*) to umowny kurs, po którym następuje rozliczenie kontraktu opcyjnego.

Ze względu na termin wykonania (*ang. expiration date*), opcje dzielą się na opcje europejskie (*ang. european option*), które mogą zostać wykonane tylko i wyłącznie w dniu wygaśnięcia opcji oraz opcje amerykańskie (*ang. american option*), które mogą zostać wykonane w dowolnym terminie od momentu nabycia aż do terminu wygaśnięcia.

Określenie premii opcyjnej, jaką nabywca opcji zapłaci wystawcy opcji, czyli ceny opcji nie jest zadaniem łatwym, ponieważ o jej wysokości decyduje szereg czynników.

4. Modele sieci neuronowych

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano dane rzeczywiste reprezentujące notowania opcji na indeks WIG20 Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie z lat 2005-2010. Część danych została pobrana z ogólnie dostępnego archiwum notowań Giełdy Papierów Wartościowych. Pozostałe dane, konieczne do zbudowania modeli sieci neuronowych, zostały udostępnione bezpłatnie przez GPW na potrzeby niniejszej pracy. Dane te zostały przez autorkę odpowiednio przetworzone dla celów eksperymentów.

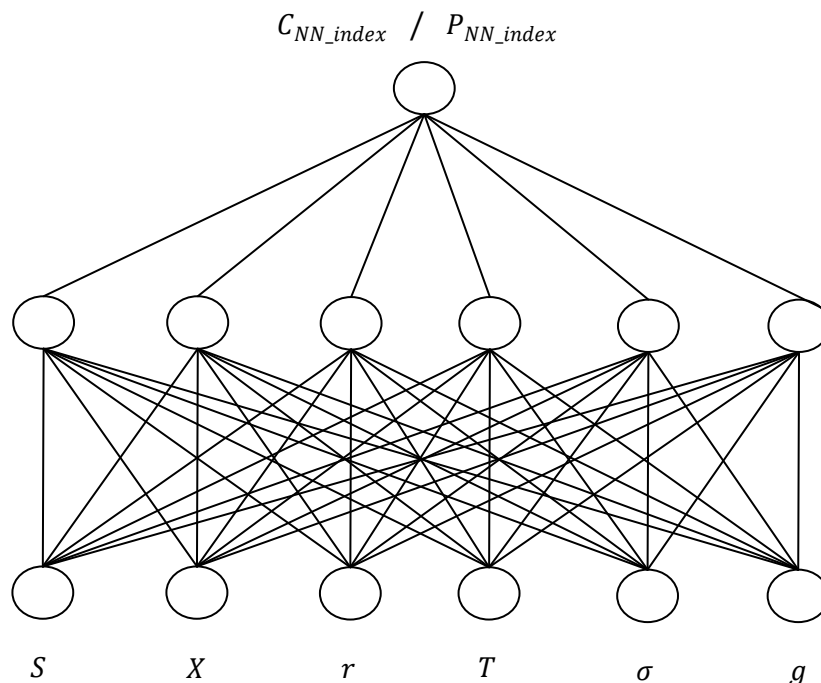
W badaniach eksperymentalnych prezentowanych w niniejszej pracy wykorzystano perceptrony wielowarstwowe MLP, które należą do najbardziej poznanych i najczęściej wykorzystywanych architektur sieciowych. Sprawdzono również możliwość wykorzystania sieci o radialnych funkcjach bazowych RBF.

Analizy doboru zmiennych wejściowych sieci neuronowej autorka dokonała w oparciu o model matematyczny wyceny opcji zwany modelem Mertona.

Założono, że sieć będzie posiadała 6 zmiennych wejściowych, 1 warstwę ukrytą o dowolnej ilości neuronów oraz 1 wyjście (rys. 1). Parametrami wejściowymi sieci są:

- S – aktualna wartość instrumentu bazowego WIG20, na który wystawiona jest opcja,
- X – cena wykonania opcji,
- r – wolna od ryzyka stopa procentowa,
- T – czas pozostający do wygaśnięcia opcji,
- g – stopa dywidendy
- σ – zmienność implikowana instrumentu bazowego WIG20.

Wyjście sieci neuronowej reprezentuje wartość premii dla opcji kupna C_{NN_index} lub opcji sprzedaży P_{NN_index} w zależności od rozważanego modelu sieci neuronowej.



Rys. 1. Proponowana struktura sieci neuronowej.

5. Wyniki eksperymentów

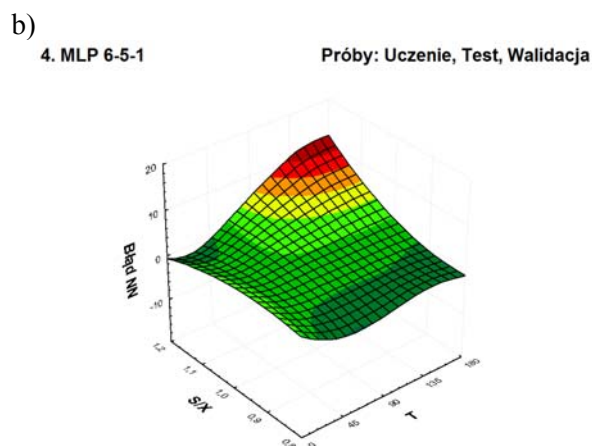
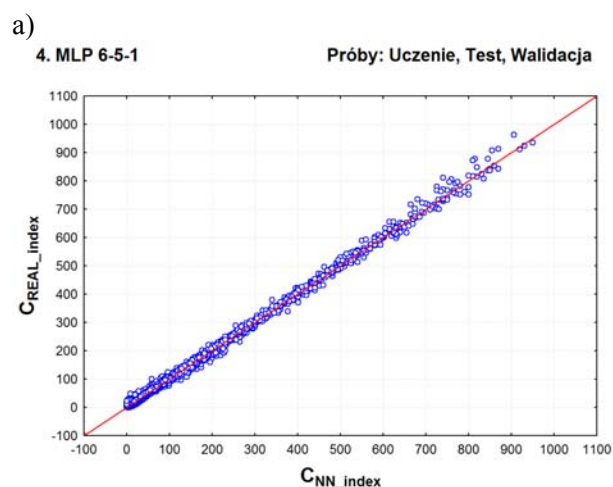
Punktem wyjścia do zaprezentowanych w pracy badań była szczegółowa analiza danych uzyskanych przez autorkę rozprawy z ogólnie dostępnego archiwum notowań GPW oraz udostępnionych bezpłatnie przez GPW w Warszawie na potrzeby niniejszej pracy. Następnie zastosowano podejście eksperymentalne w doborze rodzaju i struktury sieci neuronowej do wyceny opcji kupna i sprzedaży na indeks WIG20. Zaprezentowano również sposoby jej uczenia z wykorzystaniem opcji automatycznego poszukiwania sieci dostępnej w module Automatyczne Sieci Neuronowe pakietu STATISTICA. Badania przeprowadzono dla jednokierunkowych sieci wielowarstwowych MLP oraz dla sieci o radialnych funkcjach bazowych RBF. Otrzymane wyniki porównano z rzeczywistymi wycenami rynkowymi oraz przeprowadzono dynamiczną analizę zmian cen dla wybranych opcji kupna na indeks WIG20 w okresie stabilnego wzrostu GPW w Warszawie, tj. dla lat 2005-2007. Do analizy porównawczej wykorzystano znane z literatury i powszechnie stosowane uniwersalne miary jakości prognoz.

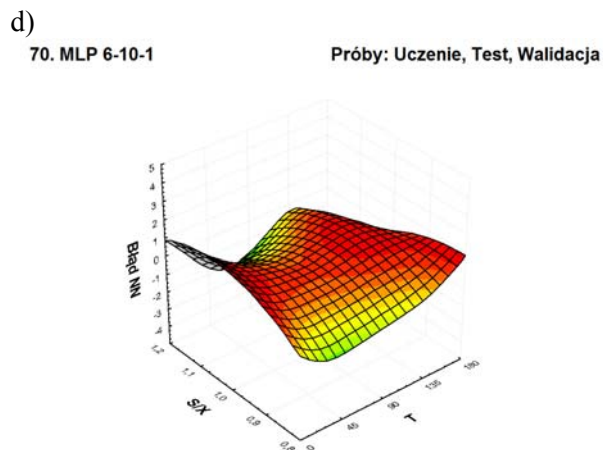
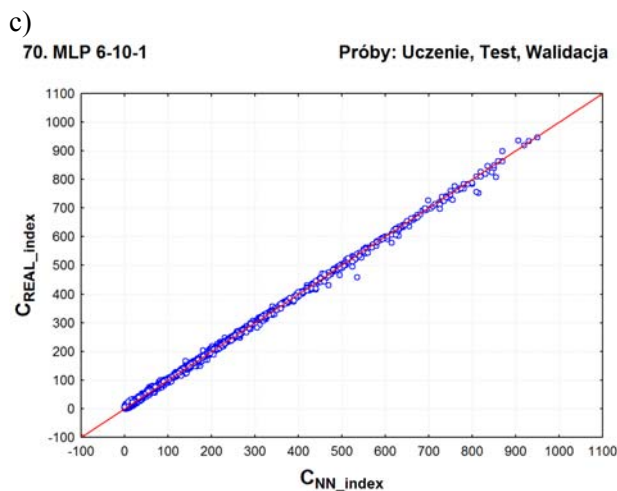
W trakcie doboru rodzaju i struktury sieci neuronowej oraz sposobu jej uczenia wykorzystano podejście eksperymentalne. Podstawową wadą takiego rozwiązania w procesie budowy modelu neuronowego są ogromne wymagania czasowe. Z pomocą może przyjść, dostępna w module Automatyczne Sieci Neuronowe pakietu STATISTICA 8, opcja automatycznego poszukiwania sieci, która ocenia dużą liczbę różnych architektur sieci o różnym stopniu złożoności, wybierając zbiór tych, które najbardziej odpowiadają danemu problemowi.

Miernikami oceny poprawności wszystkich zbudowanych modeli neuronowych są:

- graficzna interpretacja w postaci wykresu rozrzutu będącego graficzną interpretacją korelacji, wyrażającego zależność wartości zmiennej zależnej w odniesieniu do przewidywań modelu neuronowego,
- błąd średni ME na wyjściu modelu neuronowego prezentowany w zależności od czasu pozostającego do wygaśnięcia opcji T wyrażonego w dniach oraz w zależności od parametr S/X określającego stosunek aktualnej wartości instrumentu bazowego WIG20 S , na który wystawione są opcje do ceny wykonania opcji X ,
- przyjęte miary błędów.

Poniżej zaprezentowano porównanie wstępnie uzyskanych wyników z najlepszymi wynikami uzyskanymi odpowiednio dla opcji kupna i sprzedaży na indeks WIG20 w okresie stabilnego wzrostu giełdy tj. dla lat 2005-2007.

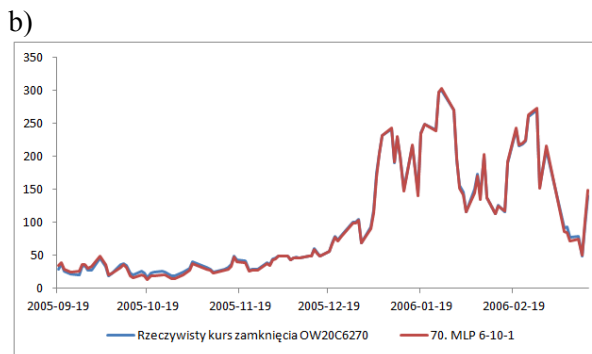
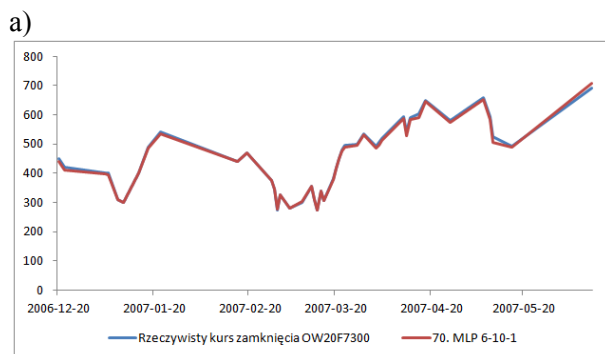




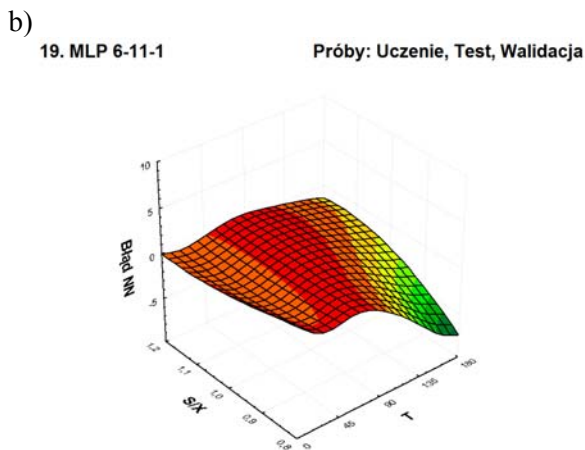
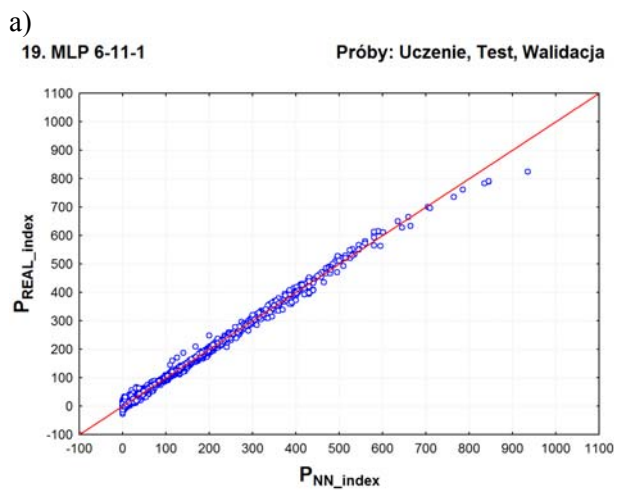
Rys. 2. Model neuronowy nr 4 MLP 6-5-1 z 5 neuronami w warstwie ukrytej
 a) wykres rozrzutu, b) błąd średni ME.
 Model neuronowy nr 70 MLP 6-10-1 z 10 neuronami w warstwie ukrytej
 c) wykres rozrzutu, d) błąd średni ME.

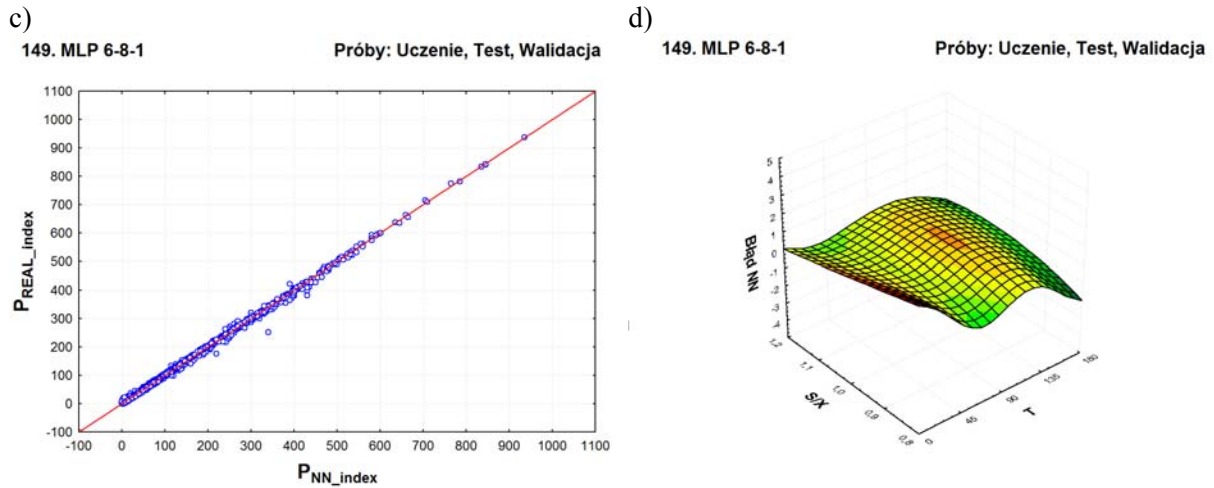
Tabela 1. Miary błędów dla wybranych sieci neuronowych (wycena opcji kupna).

Numer sieci	Typ sieci	ME	MAE	RMSE	R ²	I ² Theila
4	MLP 6-5-1	1,087	4,220	6,667	0,998	0,00141
70	MLP 6-10-1	0,222	2,261	3,407	0,999	0,00037



Rys. 3. a) Wycena opcji kupna OW20F7300 z terminem wygaśnięcia 15.06.2007r.
 b) Wycena opcji kupna OW20C6270 z terminem wygaśnięcia 17.03.2006r.

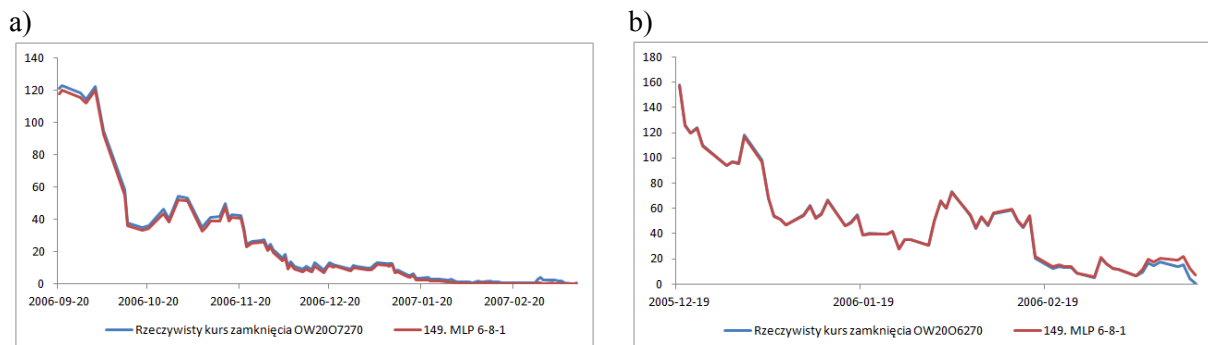




Rys. 4. Model neuronowy nr 19 MLP 6-11-1 z 11 neuronami w warstwie ukrytej
 a) wykres rozrzutu, b) błąd średni ME.
 Model neuronowy nr 149 MLP 6-8-1 z 8 neuronami w warstwie ukrytej
 c) wykres rozrzutu, d) błąd średni ME.

Tabela 2. Miary błędów dla wybranych sieci neuronowych (wycena opcji sprzedaży).

Numer sieci	Typ sieci	ME	MAE	RMSE	R ²	I ² Theila
19	MLP 6-11-1	-0,165	3,242	5,303	0,996	0,00298
149	MLP 6-8-1	-0,027	1,791	2,975	0,999	0,00094



Rys. 5. a) Wycena opcji sprzedaży OW2007270 z terminem wygaśnięcia 16.03.2007r.
 b) Wycena opcji sprzedaży OW2006270 z terminem wygaśnięcia 17.03.2006r

Zaprezentowane modele neuronowe do wyceny opcji kupna i sprzedaży różnią się nieznacznie. Wstępna analiza wykluczyła zastosowanie sieci neuronowych o radialnych funkcjach bazowych RBF dla obu typów opcji. Nawet 10-krotne zwiększenie ilości neuronów w warstwie ukrytej nie przyniosło satysfakcjonujących rezultatów. Mimo że modele oparte na sieciach RBF charakteryzowały się stosunkowo krótkim czasem uczenia w porównaniu z modelami opartymi na sieciach MLP, to jednak ich zastosowanie do wyceny opcji kupna i sprzedaży na indeks WIG20 okazało się nieskuteczne.

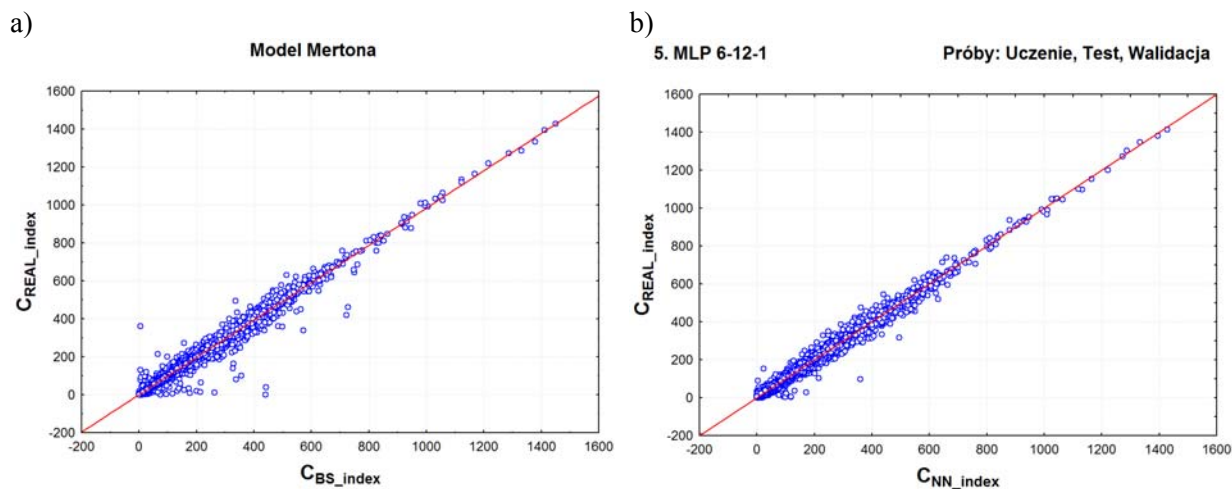
Dla opcji kupna najlepsze rezultaty osiągnięto dla modelu neuronowego nr 70 MLP 6-10-1 z 10 neuronami w warstwie ukrytej. Zauważono, że większa ilość neuronów w warstwie ukrytej prowadzi do przeuczenia sieci. Obliczone miary błędów wskazują na bardzo dobre dopasowanie wartości otrzymanych z modelu neuronowego do rzeczywistej wyceny rynkowej. Świadczy o tym również wartość współczynnika determinacji R^2 równego

0,999. Współczynnik I^2 Theila równy 0,00037 jest najniższym jaki udało się uzyskać spośród wszystkich modeli neuronowych do wyceny opcji kupna.

Dla opcji sprzedaży najlepsze wyniki uzyskano dla modelu neuronowego nr 149 MLP 6-8-1 z 8 neuronami w warstwie ukrytej. Podobnie jak w modelach do wyceny opcji kupna, zastosowano wykładniczą funkcję aktywacji zarówno dla neuronów w warstwie ukrytej jak i neuronów wyjściowych. Najniższą wartość współczynnika I^2 Theila równą 0,00094, uzyskano również dla modelu neuronowego nr 204 MLP 6-12-1 z 12 neuronami w warstwie ukrytej.

Rezultaty uzyskane w proponowanych modelach neuronowych potwierdzają słuszność modelu Mertona uwzględniającego wypłatę dywidendy dla Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie. W przypadku stabilnej sytuacji na rynku znane modele wyceny opcji są doskonałym narzędziem dla inwestora ułatwiającym wycenę opcji, a tym samym podjęcie właściwej decyzji. Co jednak stanie się, kiedy nagle i niespodziewane wydarzenia wstrząsną giełdą? Jak w takiej sytuacji zachowują się znane modele wyceny opcji, jeśli zmienność instrumentu bazowego na który wystawione są opcje gwałtownie wzrośnie? Z pomocą mogą przyjść modele oparte na sieciach neuronowych, które jak wiadomo mają charakter adaptacyjny i w związku z tym mogą służyć do opisu zależności i systemów zmieniających się w czasie.

W kolejnym etapie badań przeanalizowane sytuacje, w których nagle i niespodziewanie dochodzi do znaczących wahań kursów giełdowych. Gwałtowna zmiana wartości indeksu WIG20 jednoznacznie wpływa na jego zmienność implikowaną. W związku z tym zbadano jak w takich sytuacjach poradzi sobie model neuronowy i model Mertona.

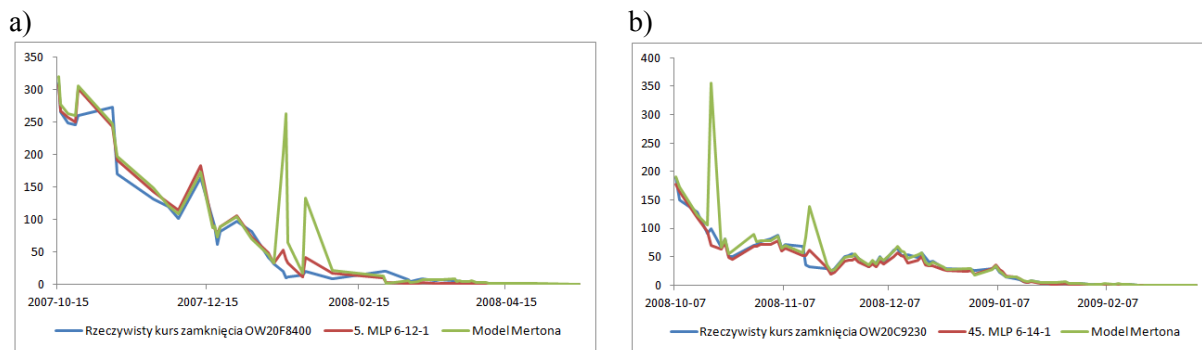


Rys. 6. Wykres rozrzutu

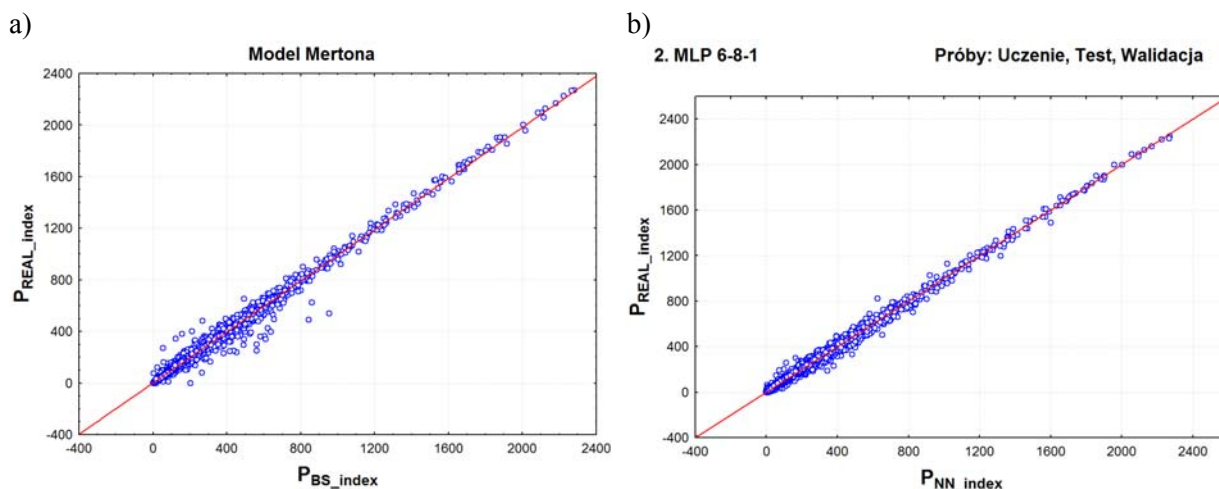
a) model Mertona, b) model neuronowy nr 5 MLP 6-12-1 z 12 neuronami w warstwie ukrytej.

Tabela 3. Miary błędów dla wybranych sieci neuronowych (wycena opcji kupna).

Numer sieci	Typ sieci	ME	MAE	RMSE	R ²	I ² Theila
	Model Mertona	0,814	6,672	16,522	0,975	0,00986
21	MLP 6-8-1	-0,737	7,934	13,703	0,982	0,00678
28	MLP 6-10-1	-0,612	8,086	13,653	0,983	0,00673
5	MLP 6-12-1	-0,605	7,707	13,310	0,990	0,00640
15	MLP 6-14-1	-0,739	7,979	13,751	0,982	0,00683



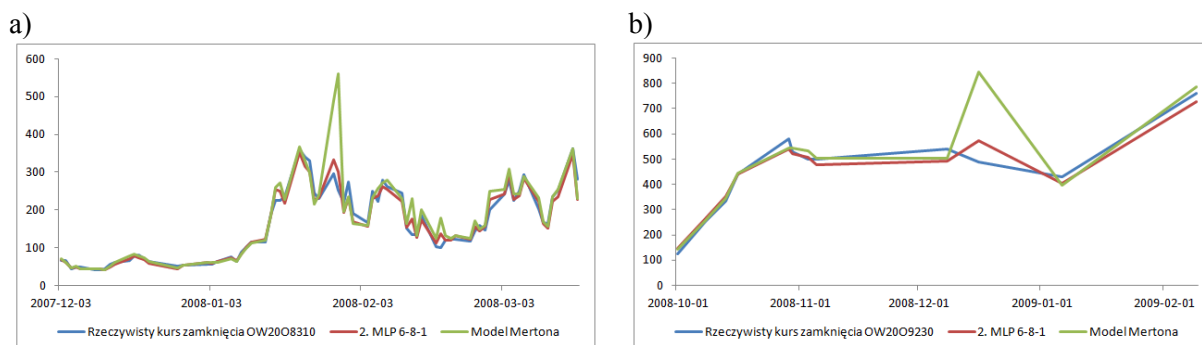
Rys. 7. a) Wycena opcji kupna OW20F8400 z terminem wygaśnięcia 20.06.2008r.
 b) Wycena opcji kupna OW20C9230 z terminem wygaśnięcia 20.03.2009r.



Rys. 8. Wykres rozrzutu
 a) model Mertona, b) model neuronowy nr 2 MLP 6-8-1 z 8 neuronami w warstwie ukrytej.

Tabela 4. Miary błędów dla wybranych sieci neuronowych (wycena opcji sprzedaży).

Numer sieci	Typ sieci	ME	MAE	RMSE	R ²	I ² Theila
	Model Mertona	0,451	7,390	18,204	0,992	0,00596
2	MLP 6-8-1	-0,361	9,231	15,583	0,994	0,00437
12	MLP 6-10-1	-0,582	9,682	15,963	0,977	0,00518
24	MLP 6-12-1	-0,573	9,340	15,594	0,978	0,00493



Rys. 9. a) Wycena opcji sprzedaży OW20O8310 z terminem wygaśnięcia 20.03.2008r.
 b) Wycena opcji sprzedaży OW20O9230 z terminem wygaśnięcia 20.03.2009r.

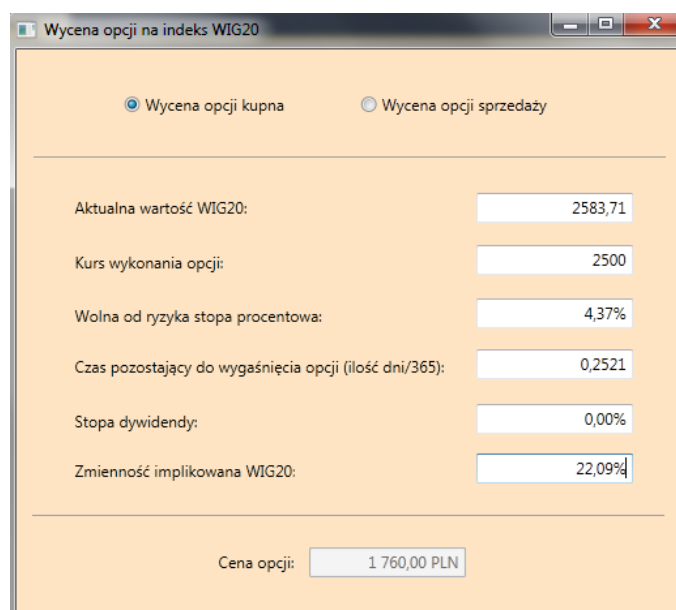
Przedstawione przykłady wskazują, że w sytuacji gwałtownych wahań kursów na giełdzie, model neuronowy podąża za rynkiem. Im bardziej gwałtowne i niespodziewane zmiany, tym wycena opcji kupna z wykorzystaniem modelu Mertona znacząco odbiega od rzeczywistych wycen rynkowych. W takich szczególnych sytuacjach, inwestor mógłby podejmować swoje decyzje w oparciu o wyceny uzyskane z modelu neuronowego.

W sytuacji gwałtownej zmiany zmienności implikowanej indeksu WIG20, odbiegającej od średniej wartości w okresie notowań opcji, model neuronowy wskazuje wartości premii opcyjnych zbliżone do rzeczywistych wycen rynkowych. Jest to istotna informacja dla inwestorów, ponieważ w takich sytuacjach teoretyczne wyceny opcji z wykorzystaniem znanych modeli matematycznych różnią się znacząco od wycen rynkowych. Zaprezentowana dynamiczna wycena wybranych opcji kupna i sprzedaży w całym okresie ich notowań, w szczególności w sytuacji gwałtownych wahań kursów na giełdzie, potwierdza trafność wycen z wykorzystaniem zaproponowanych przez autorkę modeli neuronowych.

6. Narzędzie do wspomaganie decyzji inwestorów

Dysponując narzędziem do wyceny opcji na indeks WIG20 opartym na modelu neuronowym, który będzie wiernie odzwierciedlał rzeczywistą sytuację panującą na Giełdzie Papierów Wartościowych w Warszawie, inwestor zyskuje możliwość podejmowania trafnych decyzji kupna bądź sprzedaży instrumentu pochodnego.

Proponowana aplikacja może być skutecznym narzędziem do wyceny opcji dla potencjalnego inwestora zainteresowanego kupnem bądź sprzedażą kontraktu opcyjnego na WIG20, szczególnie w sytuacji gwałtownych zmian indeksów na Giełdzie Papierów Wartościowych w Warszawie.



Parametr	Wartość
Aktualna wartość WIG20:	2583,71
Kurs wykonania opcji:	2500
Wolna od ryzyka stopa procentowa:	4,37%
Czas pozostający do wygaśnięcia opcji (ilość dni/365):	0,2521
Stopa dywidendy:	0,00%
Zmienność implikowana WIG20:	22,09%
Cena opcji:	1 760,00 PLN

Rys. 10. Interfejs zaproponowanej aplikacji do wyceny opcji kupna lub sprzedaży.

Narzędzie zostało stworzone w Microsoft Visual C# 2010 Express, który jest darmowym, w pełni funkcjonalnym środowiskiem programistycznym dla języka C# dla platformy .NET. Wybór nie był przypadkowym. Microsoft Visual C# 2010 Express może być wykorzystywane zarówno dla użytku prywatnego jak i komercyjnego bez żadnych ograniczeń i jest fragmentem szerszego pakietu Microsoft Visual Studio. Posiada rozbudowany, intuicyjny interfejs, który znacznie ułatwia tworzenie programów. Wśród wielu jego zalet na uwagę zasługuje możliwość budowania rozwiązań nie tylko na urządzenia PC, ale również na coraz powszechniejsze w ostatnich latach urządzenia mobilne, takie jak tablety czy telefony

komórkowe. Ciekawym kierunkiem rozbudowy proponowanego narzędzia informatycznego mogłoby być stworzenie opcji programu do użytkowania na telefonie komórkowym.

Ponieważ nauczona sieć stanowi model rynku, a rynek nie jest procesem stacjonarnym, zatem model neuronowy wykorzystany w aplikacji powinien być dopasowywany do zmieniającego się rynku. Informację dotyczącą prawidłowości podjętych decyzji z wykorzystaniem zaproponowanego narzędzia informatycznego, będzie można ocenić w dniach wygaśnięcia opcji. Przypadają one 4 razy w roku, każdorazowo w trzeci piątek miesiąca marca, czerwca, września i grudnia. Jeżeli w tym dniu zgodnie z kalendarzem giełdy nie odbywa się sesja, dniem wygaśnięcia jest ostatni dzień sesyjny przypadający przed trzecim piątkiem miesiąca wygaśnięcia. Dzień wygaśnięcia jest ostatnim dniem obrotu danej serii opcji na GPW w Warszawie.

Zatem algorytmy obliczania wartości opcji oparte na modelach neuronowych, wykorzystane w opracowanym narzędziu, będą korygowane co kwartał przez administratora systemu. Nowe modele neuronowe, uwzględniające poszerzony zbiór uczenia o zbiór rzeczywistych notowań z ostatnich trzech miesięcy, będą zastępowały istniejące modele.

7. Podsumowanie

Zasadniczym celem badań zaprezentowanych w rozprawie było zaproponowanie narzędzia informatycznego opartego o modele neuronowe wspomagającego decyzje inwestorów w zakresie wyceny opcji kupna i sprzedaży na indeks Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie. Stworzenie takiej aplikacji poprzedzone zostało szczegółową analizą danych rzeczywistych otrzymanych z GPW w Warszawie oraz rozważaniami nad doбором optymalnej struktury oraz typu sieci neuronowej. Przeprowadzone badania pozytywnie zweryfikowały ideę opracowania narzędzia informatycznego do wspomaganie podejmowania decyzji inwestycyjnych.

Teoretyczne rozważania autorki dotyczące rynku instrumentów pochodnych, ze szczególnym omówieniem opcji na indeks WIG20 Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie, zostały uzupełnione krótkimi przykładami opracowanymi przez autorkę, mającymi na celu lepsze zrozumienie mechanizmów obrotu opcjami na indeksy giełdowe. Przegląd wybranych modeli matematyki finansowej do wyceny instrumentów pochodnych, zaprezentowany w rozdziale trzecim, wskazuje jak ważnym i trudnym problemem dla inwestora jest prawidłowe oszacowanie rzeczywistej wartości opcji. Szczegółowa analiza opracowanych w ciągu ostatnich trzydziestu lat, a obecnie stosowanych wybranych modeli matematycznych, podkreśla fakt, że modele te w istotny sposób upraszczają skomplikowaną rzeczywistość rynku. Dlatego też opisujące je zależności matematyczne definiujące wartość opcji należy traktować jako przybliżone. Ostatni z rozdziałów zawierających teoretyczne rozważania (rozdział czwarty) poświęcony został budowie i zasadom funkcjonowania sztucznych sieci neuronowych oraz metodom ich uczenia. Przedstawiony przegląd znanych dotychczas zastosowań sieci neuronowych w zagadnieniach ekonomicznych, w tym również do wyceny opcji na indeksy giełd zagranicznych, wskazuje na brak prac dotyczących rynku kontraktów opcyjnych na Giełdzie Papierów Wartościowych w Warszawie.

Zasadnicze badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy zostały przedstawione w czterech powiązanych ze sobą rozdziałach.

W rozdziale piątym zaproponowano ogólną strukturę sieci neuronowej uzupełnioną charakterystyką zmiennych wejściowych oraz algorytmów ich wyznaczenia. Została ona wykorzystana w rozdziale szóstym, gdzie zaprezentowano eksperymentalne podejście do poszukiwania optymalnych struktur modeli neuronowych do wyceny opcji kupna i sprzedaży na indeks WIG20 Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie dla okresu stabilnego wzrostu. Uzyskane przez autorkę rezultaty potwierdziły możliwość skutecznego zastosowania modeli neuronowych dla rynku opcji GPW w Warszawie. Zaproponowany wektor zmiennych wejściowych, uwzględniający stopę dywidendy, jest nowatorskim rozwiązaniem skutecznym

w sytuacji wyceny opcji na indeks WIG20 na GPW w Warszawie. Indeks ten, w odróżnieniu od większości indeksów dla giełd zagranicznych (np. indeksu DAX), jest indeksem cenowym, co oznacza konieczność uwzględnienia w modelach wyceny opcji stopy dywidendy. W przypadku indeksu DAX, który jest tzw. indeksem wynikowym, co oznacza, że przy jego obliczaniu bierze się pod uwagę nie tylko wzrost cen akcji (jak przy indeksie WIG20), ale dodatkowo wzrost kapitału poprzez wypłatę dywidendy, stopa dywidendy w modelu wyceny opcji jest pomijana.

Przeprowadzone badania opisane w rozdziale siódmym miały podwójny cel. Pierwszym z nich było sprawdzenie, czy w sytuacjach znacznych wahań na giełdzie, model neuronowy wyceny opcji, będzie w stanie prawidłowo (tj. zgodnie z rynkiem) przewidzieć wartość premii opcyjnej. Tak uzyskane wyniki porównano z rezultatami otrzymanymi z wykorzystaniem modelu Mertona. Drugim celem było przeanalizowanie ile zarobiłby potencjalny inwestor, gdyby kierował się wyłącznie zaleceniami modelu neuronowego (oczywiście pod warunkiem, że znalazłby drugą stronę do zawarcia transakcji). Oba cele badań zostały pozytywnie zweryfikowane na korzyść modeli neuronowych, zatem w rozdziale ósmym rozprawy zaproponowano narzędzie informatyczne oparte na sieciach neuronowych, które będzie wspierało decyzje inwestorów w zakresie kupna i sprzedaży opcji na indeks WIG20.

Za najważniejsze osiągnięcia pracy autorka uważa:

- zaproponowanie struktury neuronowego modelu decyzyjnego do wyceny opcji na indeks WIG20 Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie (rozdział 5),
- analizę dostępnych danych rzeczywistych oraz pozyskanie brakujących informacji o notowaniach z Giełdy Papierów Wartościowych w Warszawie (rozdziały 6-7),
- przebadanie możliwości wykorzystania modeli neuronowych do wyceny opcji na indeks WIG20 w okresie stabilnego wzrostu na giełdzie w Warszawie (rozdział 6),
- przebadanie możliwości wykorzystania modeli neuronowych do wyceny opcji na indeks WIG20 w okresie gwałtownych wahań kursów na giełdzie (rozdział 7),
- porównanie efektywności modeli decyzyjnych opartych na sieciach neuronowych z modelem Mertona w okresie gwałtownych wahań kursów na giełdzie (rozdział 7),
- analiza potencjalnych zysków inwestora uzyskanych z wykorzystaniem modeli neuronowych w okresie gwałtownych wahań kursów na giełdzie (rozdział 7),
- zaproponowanie nowego narzędzia informatycznego opartego na sieciach neuronowych wspomagającego decyzje inwestora na rynku instrumentów pochodnych (rozdział 8).

Opracowane neuronowe modele decyzyjne do wyceny opcji kupna i sprzedaży dla stabilnego i niestabilnego okresu na Giełdzie Papierów Wartościowych w Warszawie oraz zaproponowane narzędzie informatyczne wspomagające decyzje inwestorów potwierdziły prawdziwość tezy niniejszej rozprawy.

Doświadczenie autorki rozprawy związane z prezentowaną tematyką wzbogaciło się znacząco w ciągu kilku ostatnich lat. W wyniku wykonanych badań oraz przeprowadzonych rozważań teoretycznych, dostrzeżono następujące kierunki dalszych badań, które autorka zamierza przeprowadzić w przyszłości:

- poszerzenie dotychczasowych badań o wycenę innych instrumentów pochodnych dostępnych na Giełdzie Papierów Wartościowych w Warszawie z wykorzystaniem modeli neuronowych (kontrakty terminowe na waluty, akcje, indeks WIG20),
- nawiązanie współpracy z instytucjami finansowymi w celu weryfikacji, czy zaproponowane podejście oparte na modelach neuronowych może znaleźć

zastosowanie również do wyceny instrumentów pochodnych na rynku pozagiełdowym,

- dalsza rozbudowa zaproponowanego narzędzia informatycznego wspomagającego decyzje inwestorów o proste strategie inwestycyjne oraz wycenę pozostałych instrumentów pochodnych dostępnych na GPW w Warszawie.

8. Wybrane pozycje literatury

- [1] Black F., Scholes M., *The pricing of options and corporate liabilities*. Journal of Political Economy, vol. 3, pp. 637-659, 1973.
- [2] Cox. J.C., Ross S.A., Rubinstein M., *Option pricing: A simplified approach*. Journal of Financial Economics, pp. 229-263, 1979.
- [3] Domaradzki R., *Zastosowanie sieci neuronowych do generowania strategii decyzyjnych (inwestycyjnych) na przykładzie Giełdy Papierów Wartościowych*. Rozprawa doktorska, promotor: prof. dr hab. inż. Ryszard Tadeusiewicz, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 2007.
- [4] Duch W., Korbicz J., Rutkowski L., Tadeusiewicz R., *Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna 2000. Tom 6. Sieci Neuronowe*. Polska Akademia Nauk, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2000.
- [5] Dudek-Dyduch E., *Cybernetyka systemów neuropodobnych. Sieci neuropodobne – równoległe przetwarzanie informacji*. Polskie Towarzystwo Cybernetyczne. Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, 1986.
- [6] Hebb D., *The Organization of Behavior*. John Wiley & Sons Inc., New York 1949.
- [7] Hecht-Nielsen R., *Neurocomputing*. Addison Wesley Publishing Company, New York 1990.
- [8] Herrmann R., Narr A., *Neural Networks and the Valuation of Derivatives - Some Insights into the Implied Pricing Mechanism of German Stock Index Options*. Neural Networks, vol. 15, pp. 465-476, 2004.
- [9] Hull J., *Kontrakty terminowe i opcje. Wprowadzenie*. Wydawnictwo WIG-Press, Warszawa 1997.
- [10] Jakubowski J., Palczewski A., Rutkowski M., Stettner Ł., *Matematyka finansowa, instrumenty pochodne*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
- [11] Kraszewska M., *Neural networks and the valuation of derivatives: some insights into the pricing of stocks index options*. Contemporary trends in management and finance. Theory and practice, Wydawnictwo Wizja Press & IT, Warszawa 2010, s. 177-188.
- [12] Kraszewska M., *Zastosowanie sieci neuronowych do wyceny kontraktów opcyjnych na indeks WIG*. Pomiar Automatyka i Robotyka 12/2011, s. 220-222, 2011.
- [13] Merton R., *Theory of Rational Option Pricing*. Bell J. Economics and Management Science, vol. 4, pp. 141-183, 1973.
- [14] Merton R., *Option Pricing when Underlying Stock Returns Are Discontinued*. Journal of Financial Economics vol. 3, pp. 125-144, 1976.
- [15] Rachev S.T., Rueschendorf L., *Models for Option Prices*. Theory of Probability and its Applications, vol. 39, pp. 120-152, 1994.

- [16] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- [17] Soroczyński S., Stachowicz J., *Kontrakty futures i opcje*. Kantor Wydawniczy Zakamycze, Kraków 1994.
- [18] Tadeusiewicz R., *Sieci neuronowe*. Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa 1993.
- [19] Tadeusiewicz R., *New Trends in Neurocybernetics*. Computer Methods in Materials Science, vol. 10, no. 1, pp. 1-7, 2010.
- [20] Thorpe E.O., *Extensions of the Black-Scholes Option Model*. Bulletin of the ISI, Proceedings of the 39th Session, pp. 522-529, 1973.
- [21] Weron A., Weron R., *Inżynieria finansowa, wycena instrumentów pochodnych, symulacje komputerowe, statystyka rynku*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.