

**UNIWERSYTET WARSZAWSKI
WYDZIAŁ ZARZĄDZANIA**

mgr inż. Katarzyna Halicka

Autoreferat rozprawy doktorskiej na temat:

**SKUTECZNOŚĆ PROGNOZOWANIA
W ZARZĄDZANIU TRANSAKCJAMI
NA GIEŁDZIE ENERGII**

Promotor:
prof. zw. dr hab. inż. Joanicjusz Nazarko

Recenzenci:
prof. zw. dr hab. inż. Leszek Kieltyka

dr hab. Jerzy Wierziński, prof. UW

Warszawa 2007

SPIS TREŚCI

Wprowadzenie	3
1. Uzasadnienie wyboru tematu	4
2. Cel, zakres i hipotezy rozprawy doktorskiej	5
3. Metody badawcze	6
4. Struktura rozprawy doktorskiej	6
5. Rezultaty badawcze	8
Podsumowanie	13
Załącznik	14
Literatura	15

WPROWADZENIE

W dynamicznie zmieniających się warunkach funkcjonowania współczesnych przedsiębiorstw, decydującego znaczenia w ich efektywnym zarządzaniu nabiera informacja zorientowana na przyszłość. Powoduje to wzrost ważności prognozowania – tym większy, im bardziej widoczne są jego efekty. Prognozowanie staje się jednym z kluczowych elementów zarządzania podmiotami funkcjonującymi na rynku, niezależnie od różnic w rodzaju prowadzonej przez nie działalności. Budowa i analiza modeli prognostycznych dostarcza wiedzy o czynnikach wywierających wpływ na badane zjawisko. Wiedza prognostyczna pomaga w lepszym wykorzystywaniu pojawiających się szans i w skuteczniejszym unikaniu zagrożeń.

Mimo, że elektroenergetyka należy do tradycyjnych dziedzin przemysłu, poziom jej rozwoju stanowi o zaawansowaniu ekonomicznym kraju – zużycie energii elektrycznej na jednego mieszkańca jest jednym z syntetycznych wskaźników rozwoju gospodarczego. Ze względu na powszechność wykorzystania energii elektrycznej sektor elektroenergetyczny uznawany jest za mający strategiczne znaczenie dla gospodarki. W Polsce przemysł elektroenergetyczny poddawany jest od kilkunastu lat intensywnej restrukturyzacji mającej na celu przejście elektroenergetyki od funkcjonowania w warunkach monopolu do rozwiniętego rynku energii elektrycznej umożliwiającego swobodny przepływ towaru – jakim jest energia elektryczna – pomiędzy wytwórcami a odbiorcami.

Rynek energii w Polsce został podzielony na trzy typy rynków: kontraktowy, giełdowy i bilansujący.

Handel energią na rynku kontraktowym odbywa się na podstawie kontraktów zawieranych pomiędzy wytwórcami energii a podmiotami handlującymi energią oraz odbiorcami energii. Giełda energii jest miejscem gdzie kupujący i sprzedający zawierają transakcje na zasadzie konkurencyjności. Kurs energii elektrycznej ustalany jest w podobny sposób, jak w systemie jednolitego kursu na Giełdzie Papierów Wartościowych w Warszawie, co zapewnia kształtowanie się cen, zgodnie z prawem podaży i popytu. Rynek bilansujący jest rynkiem, na którym operator systemu przesyłowego bilansuje różnice pomiędzy transakcjami zawartymi pomiędzy poszczególnymi uczestnikami rynku, a rzeczywistym zapotrzebowaniem na energię elektryczną.

Rozwój rynku energii przyczynił się do powstania czwartego segmentu rynku. W ramach tego segmentu uczestnicy mogą sprzedawać/kupować energię korzystając z elektronicznych form obrotów, takich jak np. platforma internetowa, kantor energii czy też hurtownie internetowe.

Wśród podmiotów funkcjonujących na rynku energii, najliczniejszą grupę stanowią spółki dystrybucyjne. Kupują one, przy występujących fluktuacjach cen, energię elektryczną na rynku hurtowym. Jednocześnie, zobowiązane są pokryć zmieniające się – w zależności od godziny, dnia tygodnia, a także warunków atmosferycznych – zapotrzebowanie na energię elektryczną odbiorców detalicznych.

1. UZASADNIENIE WYBORU TEMATU

Energia elektryczna jako towar ma specyficzne cechy. Warunki techniczne funkcjonowania systemu elektroenergetycznego i praktyczny brak możliwości magazynowania energii elektrycznej wymuszają w każdej chwili zbilansowanie jej popytu i podaży. Ze względu na mechanizm kształtowania cen na rynku bilansującym przedsiębiorstwo obrotu i dystrybucji powinno dążyć do zbilansowania podaży i popytu energii poprzez transakcje na rynku kontraktowym, giełdowym czy też poprzez elektroniczne formy obrotu. Równoważenie podaży i popytu poprzez rynek bilansujący jest zdecydowanie niekorzystne finansowo dla przedsiębiorstwa energetycznego i ogranicza jego zyski. Przedstawione zasady funkcjonowania rynku energii elektrycznej unaoczniają znaczenie prognozowania w zarządzaniu transakcjami na tym rynku.

Przedsiębiorstwa energetyczne, dokonując transakcji na giełdzie energii powinny określić ilość energii oraz cenę po jakiej gotowe są kupić bądź sprzedać energię elektryczną. Dysponują one z reguły programami komputerowymi prognozującymi zapotrzebowanie na energię, nie posiadają natomiast użytecznych narzędzi prognozowania cen energii na giełdzie energii. Taki stan rzeczy w pełni uzasadnia, zdaniem autorki, potrzebę podjęcia naukowego opracowania problematyki skuteczności prognozowania w zarządzaniu transakcjami na giełdzie energii elektrycznej.

W literaturze mianem metod skutecznych określane są takie metody, z wykorzystaniem których można osiągnąć pozytywne, pożądane wyniki, za pomocą których można uzyskać oczekiwany skutek. W tym wypadku „oczekiwanym skutkiem” jest obniżenie wartości zakupu energii elektrycznej na rynku hurtowym przez przedsiębiorstwo obrotu i dystrybucji.

W literaturze przedmiotu można znaleźć liczne prace poświęcone metodom prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną. Natomiast niewiele jest prac dotyczących prognozowania cen energii.

W rozprawie autorka podjęła próbę opracowania metody prognozowania cen na giełdzie energii, zasługującej na miano skutecznej.

Zdaniem autorki, w warunkach krajowych, temat pracy ma charakter innowacyjny, a jego opracowanie może przyczynić się do zwiększenia efektywności ekonomicznej przedsiębiorstw obrotu i dystrybucji. Wykorzystanie skutecznych metod prognozowania cen i zapotrzebowania na energię elektryczną może doprowadzić do obniżenia wartości zakupu energii elektrycznej na rynku hurtowym. W chwili obecnej, według wiedzy autorki, projekty o takim zakresie tematycznym nie są realizowane. Potencjalnymi wynikami badań mogą być zainteresowane spółki dystrybucyjne działające na krajowym rynku energii.

W przekonaniu autorki, temat rozprawy ma duże znaczenie zarówno naukowe, jak i praktyczne, a dotychczasowe kompetencje, doświadczenie zawodowe i zainteresowania badawcze upoważniły ją do podjęcia tego tematu.

2. CEL, ZAKRES I HIPOTEZY ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

W niniejszej rozprawie autorka postawiła przed sobą dwa zasadnicze cele badań:

1. Opracowanie modelu wspomagającego zarządzanie transakcjami na giełdzie energii elektrycznej przez przedsiębiorstwa obrotu i dystrybucji z wykorzystaniem prognoz zapotrzebowania i cen energii elektrycznej.
2. Ocena skuteczności stosowania przez przedsiębiorstwo prognoz w zarządzaniu transakcjami na giełdzie energii.

Efektym użytkowym badań było opracowanie użytecznych narzędzi, możliwych do wykorzystania w przedsiębiorstwie obrotu i dystrybucji do prognozowania cen energii elektrycznej na giełdzie energii.

Praca posiada wymiar teoretyczny i empiryczny. W jej wymiarze teoretycznym opracowano podstawy metodyczne niezbędne do budowy modelu prognostycznego, a także do budowy modelu wspomagającego przedsiębiorstwo obrotu i dystrybucji (spółkę dystrybucyjną) w zarządzaniu transakcjami na giełdzie energii elektrycznej. W wymiarze empirycznym dokonano licznych analiz dotyczących danych historycznych obejmujących cenę i wolumen obrotu na giełdzie energii oraz czynniki meteorologiczne wpływające na zapotrzebowanie i ceny energii na giełdzie. Zweryfikowano szereg hipotez statystycznych dotyczących korelacji zmiennych. Poza tym, przeprowadzono wiele symulacji badających wpływ jakości prognoz ceny i zapotrzebowania na wartość zakupu energii przez przedsiębiorstwo obrotu i dystrybucji. Ważnym elementem, wieńczącym pracę i łączącym wymiar teoretyczny z praktycznym, jest analiza skuteczności prognoz wykorzystywanych do budowy ofert giełdowych.

Przeprowadzone studia literaturowe oraz badania empiryczne pozwoliły autorce sformułować następujące hipotezy badawcze, które były przedmiotem weryfikacji w rozprawie:

1. Wzrost jakości prognozy cen energii elektrycznej umożliwia poprawę skuteczności zarządzania transakcjami na giełdzie energii przez przedsiębiorstwa obrotu i dystrybucji.
2. Sztuczne sieci neuronowe stanowią użyteczne narzędzie do prognozowania cen energii elektrycznej na Towarowej Giełdzie Energii SA.

Weryfikacja powyższych hipotez wskazała na możliwości wykorzystania wyników badań przeprowadzonych w rozprawie do zmniejszenia kosztów zakupu energii elektrycznej przez przedsiębiorstwa obrotu i dystrybucji.

3. METODY BADAWCZE

Wykorzystane w pracy metody badawcze są konsekwencją wybranego tematu badań i problemu naukowego do rozwiązania. Do osiągnięcia celu rozprawy wykorzystano elementy następujących metod badań naukowych: metoda analizy i krytyki piśmiennictwa, metoda obserwacyjna, metody statystyczne, metoda eksperymentu i metoda wnioskowania indukcyjnego.

W celu weryfikacji hipotez rozprawy zaprojektowano i zrealizowano logiczny ciąg następujących po sobie zadań badawczych:

- analizę funkcjonowania rynku energii;
- analizę funkcjonowania Towarowej Giełdy Energii Elektrycznej SA;
- analizę sposobu pokrywania zapotrzebowania na energię elektryczną przez przedsiębiorstwa obrotu i dystrybucji;
- krytyczną dyskusję stosowanych metod prognozowania popytu i cen energii elektrycznej;
- zebranie, opracowanie i analizę danych historycznych dotyczących: godzinowych wartości cen i wolumenu energii na giełdzie energii, temperatury, prędkości wiatru i zachmurzenia w okresie 01.01.2004 – 31.01.2005 r.;
- analizę prognoz dotyczących cen i wolumenu na giełdzie energii;
- opracowanie modelu wspomagającego zarządzanie transakcjami na giełdzie energii;
- budowę modeli do prognozowania cen energii na TGE SA opartych na sztucznych sieciach neuronowych;
- ocenę dopasowania zbudowanych modeli prognostycznych do danych rzeczywistych;
- wyznaczenie prognozy cen energii na TGE SA;
- analizę trafności wyznaczonych prognoz;
- ocenę sztucznych sieci neuronowych jako narzędzia do prognozowania cen energii elektrycznej na TGE SA;
- konstrukcję ofert giełdowych na podstawie prognoz cen energii wyznaczonych z wykorzystaniem SSN.

Rozwiązanie powyższych zadań badawczych umożliwiło, zdaniem autorki, weryfikację sformułowanych hipotez i osiągnięcie celu rozprawy.

4. STRUKTURA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Niniejsza rozprawa składa się z sześciu rozdziałów.

W *rozdziale pierwszym* uzasadniono ważność wybranego przez autorkę tematu rozprawy. Przedstawiono jego znaczenie badawcze i aplikacyjne. Sformułowano cele badawcze i użytkowe rozprawy. Postawiono hipotezy badawcze oraz wskazano proponowaną procedurę weryfikacji hipotez i osiągnięcia celów pracy.

W *rozdziale drugim* zaprezentowano podstawowe zasady i cele funkcjonowania rynku energii elektrycznej. Odwołano się do rozwiązań wprowadzonych na rynkach m.in. w Anglii, Walii i Kalifornii. Dalej, opisano uwarunkowania prawne i podstawy organizacyjne

funkcjonowania rynku energii w Polsce. Opisano główne modele rynku i szczegółowo scharakteryzowano model wdrażany w Polsce. Przedstawiono i omówiono strukturę rynku energii w Polsce, uczestników rynku energii, główne typy kontraktów i transakcji zawieranych na tym rynku. Wskazano również kierunki rozwoju rynku energii w Polsce w warunkach integracji europejskiej.

Rozdział trzeci rozprawy jest w całości poświęcony Towarowej Giełdzie Energii SA (TGE SA). Początkowo omówiono zasady funkcjonowania giełdy energii w Polsce, przedstawiono strukturę giełdy. Scharakteryzowano poszczególne rynki na niej działające. Szerzej omówiono, najdłużej funkcjonujący na polskiej giełdzie i rozwijający się dynamicznie, rynek dnia następnego. Następnie przedstawiono sposoby zawierania transakcji na rynku dnia następnego, skonstruowano schemat blokowy działania tego rynku oraz przeprowadzono analizę kształtowania się cen i wolumenu obrotu energii elektrycznej.

Rozdział czwarty poświęcony jest zagadnieniom prognozowania popytu na energię elektryczną. Początkowo przedstawiono klasyfikację prognoz zapotrzebowania na energię elektryczną ze względu na horyzont prognozy. Następnie, bazując na literaturze krajowej i zagranicznej, podano przykłady wykorzystania tych prognoz. W dalszej części rozdziału przedstawiono źródła pokrywania zapotrzebowania na energię elektryczną przez spółkę dystrybucyjną. Porównano ceny energii elektrycznej pochodzącej z różnych źródeł i z różnych rodzajów transakcji na rynku energii. Następnie podano, na przykładzie jednej ze spółek dystrybucyjnych, strukturę zakupu energii elektrycznej. Dalej skonstruowano kluczowy dla realizacji założonych celów pracy model wspomagający zarządzanie transakcjami na rynku energii i algorytm zawierania transakcji kupna/sprzedaży na rynku dnia następnego TGE SA.

W rozdziale piątym omówiono zagadnienia dotyczące prognozowania cen energii elektrycznej na giełdzie energii. Na podstawie literatury przedmiotu wskazano przykłady wykorzystania do krótkoterminowego prognozowania cen takich metod jak ARIMA, GARCH, regresja dynamiczna, data mining, teoria chaosu, sztuczne sieci neuronowe oraz wnioskowanie rozmyte. W dalszej części rozdziału omówiono metodykę prognozowania cen energii z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Przedstawiono przykładowe predyktory neuronowe, za pomocą których można wyznaczyć jednostkową cenę energii elektrycznej dla każdej godziny doby handlowej dzień przed fizyczną dostawą energii. Przeprowadzono ocenę dopasowania modeli do danych rzeczywistych. Korzystając z modelu neuronowego najlepiej dopasowującego się do danych rzeczywistych wyznaczono prognozę ceny energii elektrycznej w styczniu 2005 r. oraz zbadano jej trafność.

W rozdziale szóstym omówiono zasady wyznaczania wartości obrotu na rynku bilansującym. Następnie przedstawiono dwie przykładowe oferty giełdowe. Jedna została zbudowana na podstawie prognoz przygotowanych przez spółkę dystrybucyjną, druga została skonstruowana z uwzględnieniem prognoz wyznaczonych przez autorkę rozprawy. Na podstawie tych ofert giełdowych wyznaczono i porównano wartość zakupu energii elektrycznej. W dalszej części rozdziału przeanalizowano własności statystyczne badanych

prognoz oraz zbadano wpływ jakości prognoz ceny i zapotrzebowania na wartość obrotu na rynku bilansującym. Kluczowe badania przeprowadzono w ramach tego rozdziału polegały na analizie skuteczności prognoz wykorzystywanych do budowy ofert giełdowych.

5. REZULTATY BADAWCZE

Pierwszym z celów badawczych zrealizowanych przez autorkę rozprawy było opracowanie modelu wspomagającego zarządzanie transakcjami na giełdzie energii przez przedsiębiorstwa obrotu i dystrybucji. Model, przedstawiony i szczegółowo omówiony w rozdziale czwartym rozprawy, został skonstruowany przez autorkę dla i -tej godziny doby handlowej. Zgodnie z tym modelem (rys. 1), przedsiębiorstwo obrotu i dystrybucji początkowo pokrywa swoje prognozowane zapotrzebowanie (E^*_{Zi}) na rynku terminowym (E_{RTi}). Następnie, kupuje/sprzedaje energię na rynku dnia następnego poprzez kontrakty bilateralne oraz poprzez elektroniczne formy obrotu (E_{RDNSi}). Później, spółka dystrybucja składa swoje oferty handlowe na giełdzie energii (E^*_{TGEi}). W sytuacji, kiedy występuje różnica między rzeczywistym a prognozowanym zapotrzebowaniem na energię elektryczną ($\Delta e_{Zi} \neq 0$)¹ oraz w wypadku występowania różnicy między rzeczywistą a prognozowaną ilością energii zakupionej/sprzedanej na giełdzie energii ($\Delta e_{TGEi} \neq 0$)² przedsiębiorstwo kupuje/sprzedaje energię na rynku bilansującym w i -tej godzinie doby handlowej. Przy czym, cena energii zakupu/sprzedaży na tym rynku jest znacznie wyższa (często nawet dwukrotnie) niż na giełdzie energii. Zarówno zakup, jak i sprzedaż energii elektrycznej na rynku bilansującym przynosi straty finansowe dla spółek dystrybucyjnych. Przedsiębiorstwo energetyczne działające na konkurencyjnym rynku energii powinno tak konstruować swój portfel zakupu/sprzedaży, aby zminimalizować obrót na rynku bilansującym, czyli zmniejszać do zera zarówno zakup, jak i sprzedaż energii.

Rzeczywista ilość energii elektrycznej kupionej/sprzedanej na TGE SA będzie równa prognozowanej ($\Delta e_{TGEi} = 0$), jeżeli spółka dystrybucyjna całkowicie zrealizuje swoją ofertę giełdową. Oferta na giełdzie będzie zrealizowana, jeśli cena energii zostanie trafnie określona przez spółkę dystrybucyjną. Odchylenie Δe_{TGEi} może powstać m.in. w wyniku nietrafnego prognozowania cen energii na TGE SA ($\Delta c_{TGEi} \neq 0$).

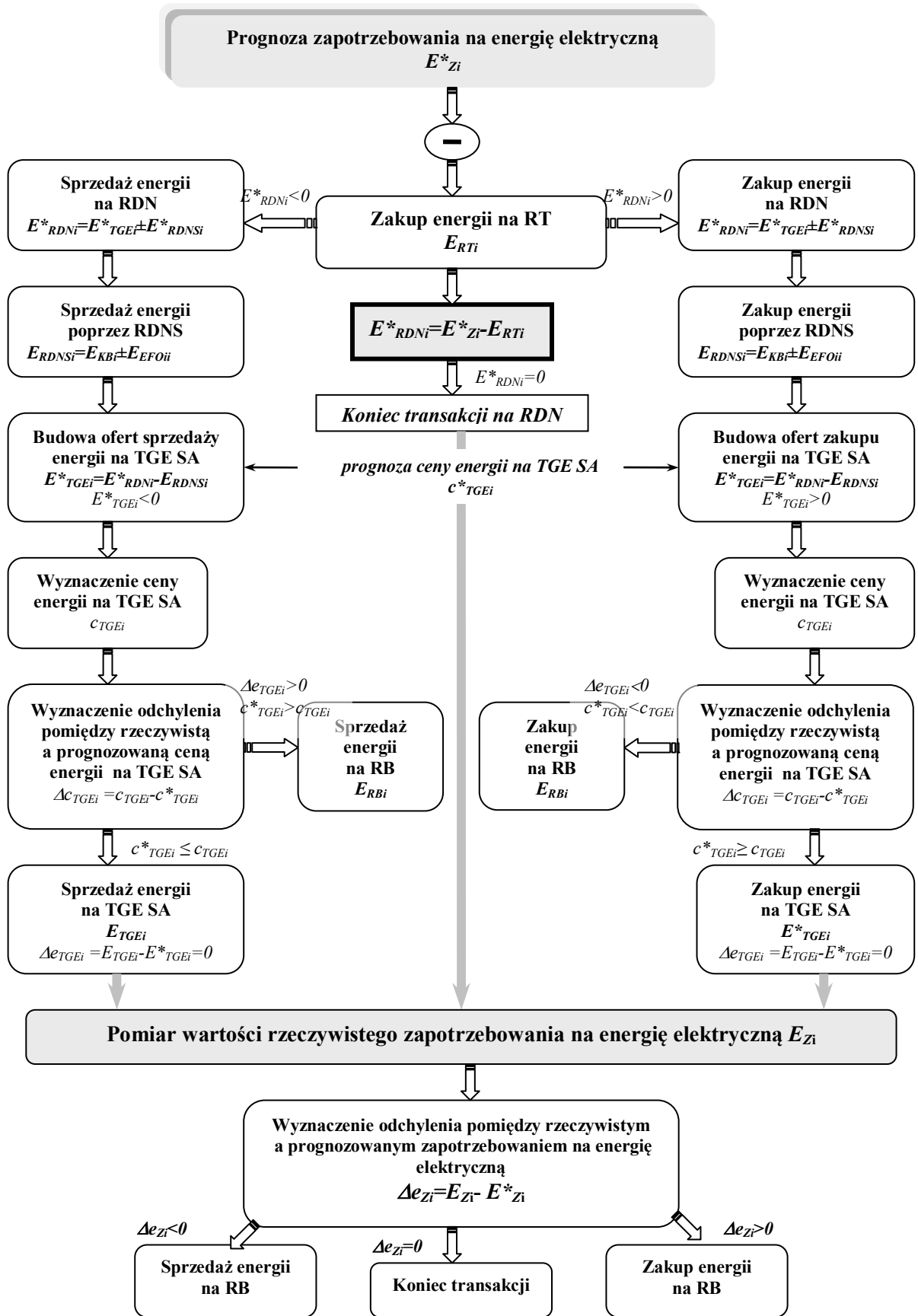
Zatem, minimalizacja wartości obrotu na rynku bilansującym sprowadza się do minimalizacji (braku) odchyżeń pomiędzy wartością rzeczywistą a prognozowaną zapotrzebowania na energię i minimalizacji (braku) odchyżeń pomiędzy wartością rzeczywistą a prognozowaną ilością energii zakupionej/sprzedanej na giełdzie energii, a także minimalizacji odchyżeń pomiędzy wartością rzeczywistą a prognozowaną ceną energii na TGE SA. Szczegółowy schemat modelu wspomagającego zarządzanie transakcjami przedstawiono na rys. 1.

¹ Δe_{Zi} – odchylenie pomiędzy wartością rzeczywistą a prognozowaną zapotrzebowania na energię elektryczną:

$$\Delta e_{Zi} = E_{Zi} - E^*_{Zi}$$

² Δe_{TGEi} – odchylenie rzeczywistej od prognozowanej ilości energii kupionej/sprzedanej na TGE SA:

$$\Delta e_{TGEi} = E_{TGEi} - E^*_{TGEi}$$



Rys 1. Schemat modelu wspomagającego zarządzanie transakcjami, skonstruowany dla i -tej godziny doby handlowej

Źródło: Opracowanie własne.

Omówiony model był podstawą do skonstruowania algorytmu zawierania transakcji kupna/sprzedaży na rynku dnia następnego TGE SA. Algorytm ten został przedstawiony i szczegółowo omówiony w rozdziale 4.5 pt.: *Opracowanie modelu wspomagającego zarządzanie transakcjami*.

Drugim zrealizowanym celem badawczym rozprawy doktorskiej była ocena skuteczności stosowania prognoz w zarządzaniu transakcjami na giełdzie energii. Na potrzeby wynikające z powyższego problemu badawczego skonstruowano miarę skuteczności stosowanych prognoz jako:

$$S_{OG} = \frac{\min(|V_{OGRDN}|; |V_{RDN}|)}{\max(|V_{OGRDN}|; |V_{RDN}|)}, \quad (1)$$

gdzie:

S_{OG} – skuteczność prognoz wykorzystywanych do budowy dla ofert giełdowych OG;

V_{OGRDN} – wartość obrotu energią elektryczną obliczona na podstawie prognoz cen energii elektrycznej na giełdzie energii;

V_{RDN} – wartość obrotu obliczona na podstawie idealnej prognozy cen energii.

Korzystając z zależności (1) autorka określiła skuteczność prognoz wyznaczonych wg modelu prognostycznego opracowanego w rozdziale 5 rozprawy doktorskiej. W celach porównawczych wyznaczyła również skuteczność prognoz wykorzystywanych przy składaniu oferty giełdowej przez spółkę dystrybucyjną. We wszystkich analizowanych wypadkach skuteczności prognoz wykorzystywanych przez autorkę w zarządzaniu transakcjami na giełdzie energii była większa niż prognoz wyznaczonych przez spółkę dystrybucyjną (tabela 1).

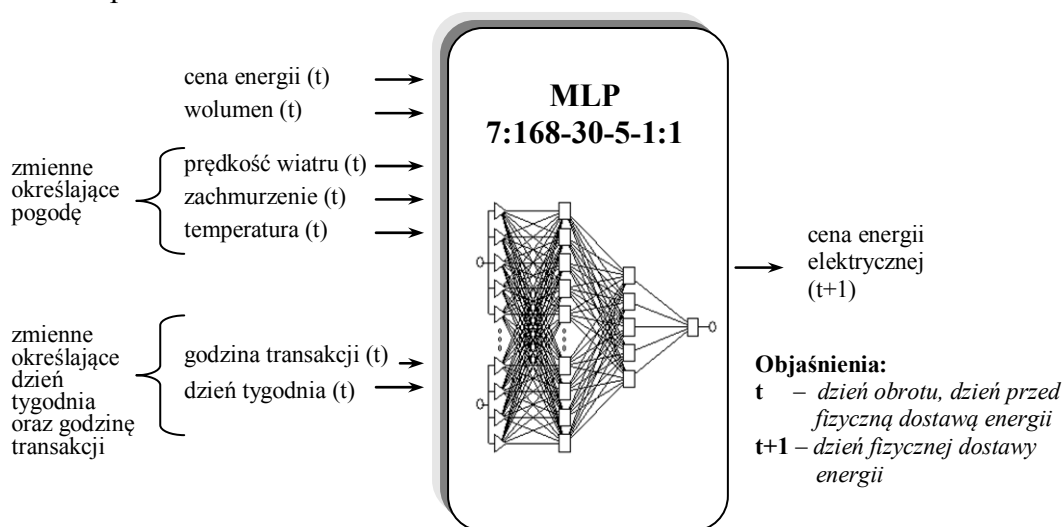
Tab 1. Skuteczność metod wykorzystywanych do wyznaczenia prognoz w styczniu 2005 r.

Data	Rodzaj transakcji	Skuteczność prognoz wyznaczona na podstawie ofert giełdowych przygotowanych przez	
		przedsiębiorstwo obrotu i dystrybucji	autorkę rozprawy
25-01-05	zakup	0,40	0,61↑
31-04-05	sprzedaż	0,89	0,96↑
Styczeń 2005 r.	zakup	0,85	0,91↑
	sprzedaż	0,75	0,95↑

Źródło: Opracowanie własne.

Efekt użyteczny przeprowadzonych przez autorkę badań sprowadza się do opracowania użytecznych metod prognozowania cen energii elektrycznej na giełdzie energii oraz metod przygotowania oferty giełdowej przez przedsiębiorstwa obrotu i dystrybucji. Do budowy modeli prognozujących cenę energii autorka wykorzystwała sztuczne sieci neuronowe. Niepodważalną zaletą wyuczonego predyktora neuronowego jest fakt, że podczas jego wykorzystywania nie jest wymagana specjalistyczna wiedza z dziedziny metod sztucznej inteligencji. Poza tym, w momencie wprowadzenia nowych danych nie jest konieczne rozpoczynanie całego procesu prognozowania od początku.

Pierwszy przedstawiony w pracy model prognostyczny miał na wejściu 10 zmiennych (cenę energii, wolumen obrotu na giełdzie, 3 zmienne określające pogodę, 3 zmienne określające prognozę pogody i 2 zmienne określające dzień tygodnia i godzinę transakcji), na wyjściu jedną zmienną wyjściową³. Drugi model prognostyczny miał na wejściu 7 zmiennych (cenę energii, wolumen obrotu na giełdzie, 3 zmienne określające pogodę i 2 zmienne określające dzień tygodnia i godzinę transakcji) a na wyjściu jedną zmienną wyjściową (cenę energii na TGE SA). Proces uczenia pierwszego modelu był zdecydowanie dłuższy niż modelu drugiego. Poza tym, wartości poszczególnych mierników wyznaczone dla modelu II były niższe niż dla modelu I dlatego też, do dalszych badań konstruowano sieci neuronowe oparte na modelu II.



Rys. 2. Neuronowy model prognostyczny
Źródło: Opracowanie własne.

Podczas prac preparacyjnych autorka rozprawy testowała szereg modeli sieci różniących się konstrukcją i liczbą zmiennych wejściowych. W dysertacji zaprezentowała tylko te, które dawały rezultaty najlepiej dopasowane do danych rzeczywistych. Ostatecznie prognozę ceny energii elektrycznej w poszczególnych godzinach stycznia 2005 r. wyznaczyła korzystając z modelu przedstawionego na rys. 2.

Tab. 2. Ocena trafności prognozy wyznaczonej w styczniu 2005 r.

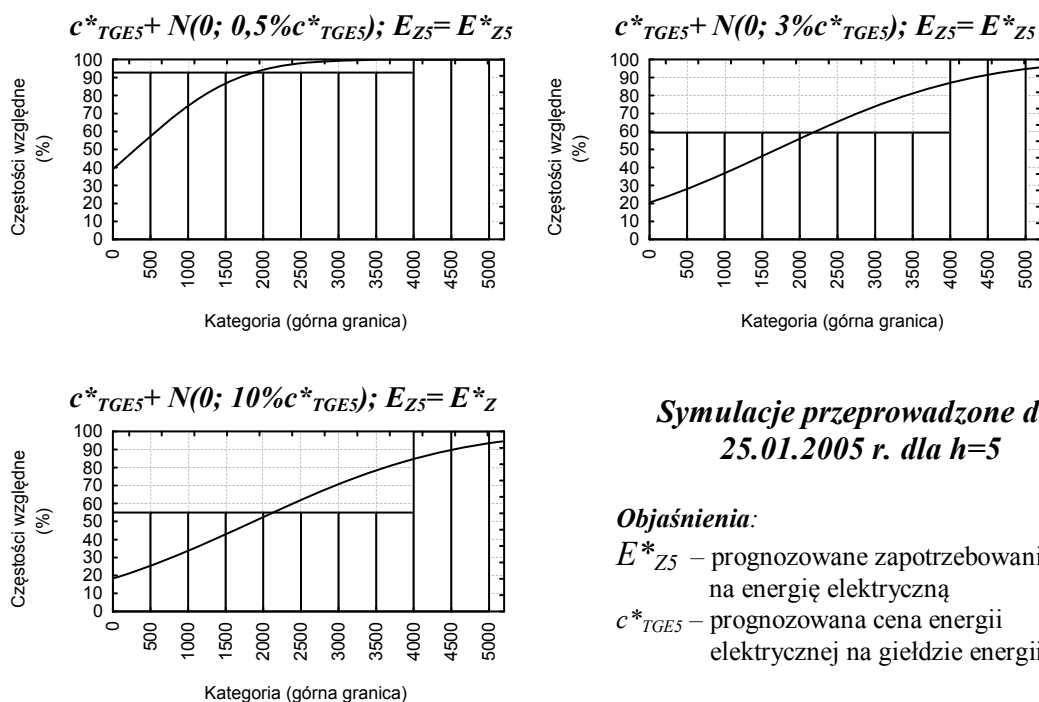
Mienniki uniwersalne	MLP 7:168-30-5-1:1
ME (ang. <i>Mean Error</i>) – błąd średni	0,02 PLN
MAE (ang. <i>Mean Absolute Error</i>) – błąd średni bezwzględny	2,78 PLN
RMSE (ang. <i>Root Mean Square Error</i>) – pierwiastek z błędu średniego kwadratowego	3,60 PLN
MAPE (ang. <i>Mean Absolute Percentage Error</i>) – średni bezwzględny błąd procentowy	2,61%
MdAPE (ang. <i>Median Absolute Percentage Error</i>) – mediana bezwzględnego błędu procentowego	1,96%

Źródło: Obliczenia własne wykonane za pomocą programu *Statistica 6.0*.

³ Wszystkie zmienne były mierzone dla każdej godziny doby handlowej. Dane, dotyczące ceny energii elektrycznej oraz wolumenu obrotów, wykorzystywane do budowy modelu pochodzą ze strony internetowej Towarowej Giełdy Energii SA. Natomiast dane określające pogodę w badanym okresie pochodziły z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie.

Rezultaty oceny jakości otrzymanych prognoz zostały przedstawione w tabeli 2. Otrzymane prognozy charakteryzowały się wysoką jakością. Tym samym została zweryfikowana pozytywnie hipoteza pracy, że sztuczne sieci neuronowe stanowią użyteczne narzędzie do prognozowania cen energii na Towarowej Giełdzie Energii SA.

W rozprawie wykonano szereg symulacji mających na celu zbadanie wpływu jakości prognozy cen energii oraz prognozy zapotrzebowania na wartość zakupu energii elektrycznej przez spółkę dystrybucyjną. Jako miarę jakości prognozy przyjęto wariancję błędu prognozy. Analiza wyników przeprowadzonych symulacji pozwala stwierdzić, że wraz ze zmniejszeniem wartości odchylenia standardowego błędu prognozy, zmniejsza się częstość wystąpienia wyższej wartości obrotu na rynku bilansującym, a co za tym idzie wyższej wartości zakupu energii elektrycznej. Tym samym została zweryfikowana pozytywnie hipoteza dysertacji, że wzrost jakości prognozy cen energii elektrycznej umożliwi poprawę skuteczności zarządzania transakcjami na giełdzie energii przez przedsiębiorstwa obrotu i dystrybucji. Przykładowy wpływ zakłóceń losowych nakładanych zarówno na cenę energii przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Wpływ zakłóceń losowych nakładanych na prognozowane zapotrzebowanie i prognozowaną cenę energii dla różnych wartości σ , wyznaczone 25.01.2005 r., $h=5$

Źródło: Opracowanie własne.

Na podstawie przeprowadzonych w pracy symulacji można zauważyć, że niewielkie zakłócenie prognozy cen energii generuje względnie duże wartości obrotu na rynku bilansującym, podczas gdy niewielkie zakłócenie prognozy zapotrzebowania generuje zdecydowanie mniejsze wartości obrotu na tym rynku.

PODSUMOWANIE

Podjęta w rozprawie doktorskiej problematyka skuteczności prognozowania w zarządzaniu transakcjami na giełdzie energii była dla autorki dosyć dużym wyzwaniem badawczym zarówno ze względu na próbę nowatorskiego ujęcia tematu, jak i złożoność funkcjonowania rynku energii elektrycznej. Dodatkową trudność stanowiły zachodzące w trakcie pisania pracy zmiany w zasadach funkcjonowania rynku energii (w tym giełdy), co zmuszało autorkę do kilkakrotnych aktualizacji już napisanych fragmentów pracy.

Zdaniem autorki, obie hipotezy zostały pomyślnie zweryfikowane w treści pracy poprzez wykonanie logicznego ciągu przedstawionych wcześniej zadań badawczych. Realizacja wymienionych zadań badawczych pozwoliła też na osiągnięcie zakładanych celów rozprawy.

Istotnym i oryginalnym osiągnięciem rozprawy jest przeprowadzenie oceny skuteczności prognozowania w zarządzaniu transakcjami na giełdzie energii oraz porównanie skuteczności prognoz wyznaczonych różnymi metodami. Autorka wykazała tutaj wyższość proponowanej przez siebie metody nad stosowanymi obecnie w praktyce przez spółkę dystrybucyjną.

Problematyka prognozowania cen i zarządzania transakcjami na giełdzie energii jest – zdaniem autorki – niezwykle interesującym obszarem badawczym. Niniejsza praca nie wyczerpuje w pełni tego zagadnienia. Istotne kierunki dalszych badań związane są np. z udoskonalaniem modeli prognostycznych poprzez budowę modeli dla specyficznych dni w roku (np. Święta Bożego Narodzenia), a także z pomiarem ryzyka transakcji, czy też zysku narażonego na ryzyko.

W opinii autorki przeprowadzone w rozprawie badania i analizy mogą być dobrą podstawą do dalszych prac z tego zakresu.

Załącznik

SPIS TREŚCI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Wprowadzenie	4
1. Cel, zakres i teza pracy	10
2. Rynek energii elektrycznej w Polsce	
2.1. Podstawy organizacyjno-prawne funkcjonowania rynku energii elektrycznej	16
2.2. Model krajowego rynku energii	22
2.3. Struktura rynku energii w Polsce	28
2.4. Uczestnicy rynku energii	36
2.5. Główne typy kontraktów i transakcji na rynku energii	46
2.6. Kierunki rozwoju rynku energii w Polsce w warunkach integracji europejskiej	53
3. Znaczenie Towarowej Giełdy Energii SA (TGE SA) na konkurencyjnym rynku energii	
3.1. Zasady funkcjonowania Towarowej Giełdy Energii SA	61
3.2. Transakcje na rynku dnia następnego	66
3.3. Historyczne kształtowanie się cen i wolumenów energii elektrycznej na rynku dnia następnego TGA SA	74
3.4. Transakcje na rynku terminowym	82
3.5. Transakcje na rynku praw majątkowych	89
3.6. Rynek uprawnień do emisji	91
3.7. Rozwój rynku giełdowego	94
4. Planowanie zakupów energii elektrycznej przez przedsiębiorstwa obrotu i dystrybucji	
4.1. Prognozowanie popytu na energię elektryczną	96
4.2. Źródła zakupów energii elektrycznej	104
4.3. Ceny energii elektrycznej pochodzącej z różnych źródeł zakupów	110
4.4. Konstrukcja portfela zakupu/sprzedaży energii elektrycznej	113
4.5. Opracowanie modelu wspomagającego zarządzanie transakcjami na giełdzie energii	118
5. Prognozowanie cen energii elektrycznej na TGE SA	
5.1. Przegląd metod prognozowania cen energii	127
5.2. Metodyka prognozowania cen energii z wykorzystaniem SSN	132
5.3. Wyznaczenie przykładowych prognoz cen energii elektrycznej	141
5.4. Analiza i ocena wyników	152
6. Prognozowanie w zarządzaniu transakcjami na TGE SA przez przedsiębiorstwo obrotu i dystrybucji energii	
6.1. Zasady wyznaczania wartości obrotu na rynku bilansującym	156
6.2. Przykładowe obliczenia i symulacje komputerowe	
6.2.1. Przykładowa oferta giełdowa konstruowana przez przedsiębiorstwo obrotu i dystrybucji	165
6.2.2. Oferty giełdowe zbudowane z uwzględnieniem prognoz cen energii elektrycznej	169
6.2.3. Własności statystyczne badanych prognoz	171
6.2.4. Wpływ jakości prognoz na wartość obrotu na rynku bilansującym	176
6.3. Ocena skuteczności prognozowania	181
Podsumowanie	186
Literatura	190
Akty prawne	201
Źródła elektroniczne	202
Spis rysunków	203
Spis tabel	206

LITERATURA (pozycje wybrane)

1. Benini M., Marracci M., Pelacchi P., Venturin A., *Day-ahead market price volatility analysis in deregulated electricity markets*, Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, vol. 3, 2002, s. 1354-1359.
2. Buhan Zhang, Ciling Zeng, Shaorong Wang, Pelyuan Xie, *Forecasting market-clearing price in day-ahead market using SOM-ANN*, Universities Power Engineering Conference, 2004, s. 390-393.
3. Chodakowska E., Halicka K., Kononiuk A., Nazarko J., *Prognozowanie cen energii elektrycznej na Towarowej Giełdzie Energii SA z wykorzystaniem modeli ARIMA*, w: Technologie informatyczne i prognozowanie w zarządzaniu – wybrane zagadnienia, pod red. Kiełtyki L., Nazarko J., Białystok 2005, s. 140-159.
4. Chodakowska E., Halicka K., Kononiuk A., Nazarko J., *Zastosowanie modeli GARCH do prognozowania cen energii elektrycznej*, w: Technologie informatyczne i prognozowanie w zarządzaniu – wybrane zagadnienia, pod red. Kiełtyki L., Nazarko J., Białystok 2005, s. 159-172.
5. Chodakowska E., Halicka K., Kononiuk A., Nazarko J., *Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do prognozowania cen energii elektrycznej na Towarowej giełdzie energii SA*, w: Technologie informatyczne i prognozowanie w zarządzaniu – wybrane zagadnienia, pod red. Kiełtyki L., Nazarko J., Białystok 2005, s. 235-245.
6. Conejo A. J., Plazas M. A., Espinola R., Molina A. B., *Day-ahead electricity price forecasting using the wavelet transform and ARIMA models*, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 20, Number 2, May 2005, s. 1035-1041.
7. Contreras J., Santos J. R., *Short-term demand and energy price forecasting*, IEE MELECON, May 2006, s. 924-927.
8. Garcia R. C., Contreras J., M. van Akkeren, Garcia J. B. C., *A GARCH forecasting model to predict day-ahead electricity prices*, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 20, Number 2, May 2005, s. 867-874.
9. Halicka K., *Prognozowanie cen energii elektrycznej z wykorzystaniem SSN na Towarowej Giełdzie Energii SA*, Prace Naukowe Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu, Taksonomia, Nr 12, Wrocław 2005, s. 233.
10. Halicka K., Nazarko J., Jurczuk A., *Zarządzanie portfelem zakupów na rynku następnego dnia*. „Zagadnienia Techniczno-Ekonomiczne. Kwartalnik AGH”, tom 48, zeszyt 1, Kraków 2003, s. 111-123.
11. Jurczuk A., Halicka K., *Present situation of the Polish energy market*, Proceedings of Seminar "Technology evolution for future European markets", PR5 EU, Wielka Brytania – Rumunia 2003, s. 18-25.
12. Łucki Z., Soliński J., Wiernek M., Nazarko J., Jurczuk A., Halicka K., *Integracja polskiego sektora energetycznego z europejskim rynkiem energii*, w: Stosunki gospodarcze Unii Europejskiej. Handel, finanse i procesy integracyjne (wybrane zagadnienia), praca zbiorowa pod redakcją M. Dudka, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra 2004, s. 348.
13. Kosieradzka A., Lis S., *Programowanie poprawy produktywności*, IOiZwP “ORGMASZ”, Warszawa 1998.
14. Makridakis S., Wheelwright S. C., Hyndman R. J., *Forecasting. Methods and Applications*, John Wiley & Sons, Inc., New York 1998.
15. Mandal P., Senjyu T., Funabashi T., *Neural networks approach to forecast several hour ahead electricity prices and loads deregulated market*, Energy Conversion and Management, Number 47, 2006, s. 2128-2142.
16. Masters T., *Sieci neuronowe w praktyce. Programowanie w języku C++*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
17. Nazarko J., Chraślowska J., *Benchmarking w ocenie efektywności krajowych spółek dystrybucyjnych energii elektrycznej*, Prace Naukowe Akademii Ekonomicznej im. Oskara Langego we Wrocławiu. „Taksonomia” 2005, nr 12, s. 38-47.

18. Nazarko J., Broadwater R. P., Tawalbeh N. I., *Identification of statistical properties of diversity and conversion factors from load research data*, 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELECON 98, 18-20 May 1998, Tel-Aviv, Israel, Vol. 1., pp. 217-220.
19. Nogales F. J., Contreras J., Conejo A. J., Espinola R., *Forecasting next-day electricity prices by times series models*, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 17, Number 2, May 2002, s. 342-348.
20. Popławski T., *Rozmyty model prognozowania cen energii na Towarowej Giełdzie Energii*, Przegląd Elektrotechniczny, wrzesień 2006, s. 41-43.
21. Sobolewski K., *O pojęciu skuteczności pojęciach związanych*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 1998.
22. Taylor W., Buizza R., *Neural network load forecasting with weather ensemble predictions*, Power Systems, IEEE Transactions on Volume 17, Issue 3, August 2002, s. 626-632.
23. Weron A., Weron R., *Giełda energii. Strategie zarządzanie ryzykiem*, CIRE, Wrocław 2000.
24. Witkowska D., *Sztuczne sieci neuronowe i metody statystyczne*, Wybrane zagadnienia finansowe, Wydawnictwo C.H. BECK, Warszawa 2002.
25. Xin Lu, Zhao Yang Dong, Xue Li, *Electricity market price spike forecast with data mining techniques*, Electric Power System Research 73, 2005, s. 19-29.
26. Yamin H Y., Shahidehpour S. M., Li, Z., *Adaptive short-term electricity price forecasting using artificial neural networks in the restructured power markets*, International Journal of Electrical Power and Energy Systems Volume: 26, Issue 8, October, 2004, s. 571-581.
27. Zerka, M., *Strategie na rynkach energii elektrycznej*, Instytut Doskonalenia Wiedzy o Rynku Energii, Warszawa 2003.