

Jadwiga Kostrzewska, Maciej Kostrzewski

Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

e-mails: jadwiga.kostrzewska@uek.krakow.pl; maciej.kostrzewski@uek.krakow.pl

WYBRANE METODY WYKRYWANIA SKOKÓW CEN NA RYNKU ENERGII ELEKTRYCZNEJ¹

SOME METHODS OF ELECTRICITY PRICE JUMP DETECTION

DOI: 10.15611/pn.2018.508.10

JEL Classification: C22, Q02, Q41, Q47

Streszczenie: Ważną cechą rynków energii jest występowanie gwałtownych zmian cen. Skoki cen są zwyczajnym zjawiskiem na rynkach energii, przy tym ich występowanie jest częstsze, a zmiany wartości są gwałtowniejsze niż na innych rynkach towarowych czy finansowych. W artykule w celu identyfikacji skoków wykorzystano metody oparte na: analizie kwantylowej, kryterium Tukeya, rekurencyjnym filtrze cen oraz nieparametrycznej technice Barndorffa-Nielsen i Shepharda. Przeprowadzono analizę sezonowości skoków cen energii elektrycznej w okresie zimowym/letnim, dniach tygodnia oraz godzinach doby. Za pomocą procesu Hawkesa wskazano na występowanie grupowania skoków cen. Analizę przeprowadzono na podstawie danych pochodzących z rynku dnia następnego giełdy Nord Pool. Wyniki pracy pozwalają lepiej zrozumieć mechanizm powstawania skoków cen oraz dostarczają cennych wskazówek pomocnych w konstrukcji zaawansowanych struktur stochastycznych wykorzystywanych w prognozowaniu skoków oraz cen energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: rynek energii, skoki cen, sezonowość skoków cen, grupowanie skoków, proces Hawkesa.

Summary: An important feature of commodity markets is an occurrence of rapid price changes. Jumps or spikes are more frequent and sharper on energy markets than on other commodity or financial markets. We applied four jump detection methods based on: quantiles, the Tukey criterion, the recursive filter of prices and the nonparametric Barndorff-Nielsen and Shephard test. We analyzed seasonal patterns in the series of electricity price jumps in winter- and summertime, on weekdays and in hours of a day. We applied the Hawkes process to indicate the existence of jump clustering phenomenon. We analyzed the data from a day-ahead Nord Pool market. The results contribute to better understanding of the mechanisms of jump generation and deliver valuable guidelines which might be employed in the construction of advanced stochastic structures for jumps and electricity price forecasting.

Keywords: energy market, price jumps/spikes, price jump seasonality, jump clustering, Hawkes process.

¹ Publikacja dofinansowana ze środków przyznanych Wydziałowi Zarządzania Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, w ramach dotacji na utrzymanie potencjału badawczego.

1. Wstęp

Rynek energii elektrycznej charakteryzuje się gwałtowniejszymi i częstszymi zmianami cen – skokami niż inne rynki towarowe lub finansowe. Przyczyny upatruje się w braku możliwości magazynowania dużych ilości energii elektrycznej w sposób uzasadniony ekonomicznie przy konieczności ciągłego równoważenia zapotrzebowania i produkcji. Kolejnym czynnikiem, który może powodować występowanie gwałtownych zmian cen energii elektrycznej, jest fakt, że popyt i podaż tego dobra zależą od warunków pogodowych, takich jak temperatura powietrza, siła wiatru, wielkość opadów atmosferycznych, nasłonecznienie, ale także od sezonowości rocznej (okres zimowy – okres letni), tygodniowej (kolejne dni tygodnia, dni robocze, dni wolne od pracy), dziennej (ze względu na godziny pracy, aktywność zawodową, godziny zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną). Te cechy sprawiają, że zmiany cen na rynku energii elektrycznej są częstsze i gwałtowniejsze w porównaniu z innymi rynkami towarowymi lub finansowymi.

Skoki cen, jako zdarzenia rzadkie, nietypowe, są trudne do modelowania, a tym bardziej prognozowania. Z drugiej strony analiza skoków dostarcza cennych wskazań w modelowaniu i prognozowaniu: ceny podlegają innemu mechanizmowi w okresie o mniejszej zmienności, innemu – w okresie, gdy występują skoki cen. W literaturze są stosowane modele, w których występowanie skoków jest uwzględnione przy prognozowaniu ceny energii elektrycznej². Inne podejście skupia uwagę na analizie i prognozie skoków cen (por. np. [Christensen i in. 2012; Weron 2014]).

Celem artykułu jest analiza podstawowych własności skoków cen na rynku energii elektrycznej: sezonowości oraz grupowania. Zbadano występowanie sezonowości długookresowej (okresy zimowe i letnie) oraz sezonowości wewnątrztygodniowej i godzinowej (śróddziennej), a także sprawdzono, czy skoki cen energii elektrycznej podlegają grupowaniu. W artykule w celu identyfikacji skoków wykorzystano metody oparte na: analizie kwantylowej, kryterium Tukeya, rekurencyjnym filtrze cen oraz nieparametrycznej technice Barndorff-Nielsen i Shepharda. Przeprowadzono analizę sezonowości skoków cen energii elektrycznej w okresie zimowym/letnim, dniach tygodnia oraz godzinach doby. Za pomocą procesu Hawkesa zbadano występowanie grupowania skoków cen. Uzyskane wyniki będą podstawą dalszych badań autorów m.in. przy konstrukcji bardziej zaawansowanych modeli stochastycznych do prognozowania skoków oraz cen energii elektrycznej.

2. Dane i metody wykrywania skoków

Podstawą analizy są dane dotyczące godzinowych cen systemowych energii elektrycznej (*system price*, EUR/MWh) na rynku dnia następnego giełdy Nord Pool³

² Szeroki przegląd modeli cen energii elektrycznej można znaleźć w pracy R. Weron [2014].

³ Dane pochodzą z serwisu <http://nordpoolgroup.com>

w okresie od 29.12.2014 do 2.07.2017. Nord Pool jest czołowym i największym rynkiem energii w Europie. Cena systemowa energii elektrycznej jest obliczana przy założeniu braku ograniczeń w zdolności produkcyjnej elektrowni na podstawie wszystkich zleceń na następny dzień z regionów: skandynawskiego (Dania, Finlandia, Norwegia i Szwecja) i bałtyckiego (Litwa, Łotwa i Estonia). Cena ta jest ceną referencyjną przy wycenie większości standardowych kontraktów terminowych w krajach skandynawskich.

Analiza szeregu godzinowych cen energii elektrycznej w badanym okresie wskazuje na dużą zmienność, w tym występowanie bardzo gwałtownych zmian – skoków cen (zob. rys. 2c w dalszej części artykułu). Podstawowym problemem jest wskazanie, które spośród obserwacji można uznać za skok, a które nie są skokami. W literaturze przedmiotu nie ma jednoznacznej definicji skoku cen energii elektrycznej (por. np. [Janczura i in. 2013]). Na ogół skok jest identyfikowany wtedy, gdy cena przekracza pewien ustalony próg. Techniki wykrywania skoków mogą prowadzić do różnych wyników. W literaturze nie ma jednoznacznych wskazówek, która z nich jest najlepsza, a wybór metody zależy od celu badania. W artykule zastosowano cztery techniki.

Metoda kwantylowa pozwala na identyfikację pewnego odsetka najwyższych i/lub najniższych wartości jako skoków np. 2,5% (por. [Janczura i in. 2013; Kostrzevska i in. 2016]). Na rynkach energii elektrycznej na ogół przyjmuje się odsetek skoków pomiędzy 5 i 10% (por. [Borovkova, Schmeck 2017]). W artykule w wyniku zastosowania metody kwantylowej za skoki uznano 2,5% najwyższych oraz 2,5% najniższych wartości (łącznie 5%).

Rekurencyjny filtr cen (*RFP – recursive filter of prices*, [Janczura i in. 2013]) traktuje ceny spoza zakresu wyznaczonego przez wartość średnią z wszystkich obserwacji pomniejszoną lub powiększoną o trzy odchylenia standardowe jako wartości nietypowe, które w procedurze rekurencyjnej zostają zastąpione przez wartość średnią z wszystkich cen. Każda z obserwacji uznana za nietypową w poszczególnych krokach procedury zostaje zidentyfikowana jako skok.

W metodzie opartej na kryterium Tukeya (por. [Tukey 1997; Pawełek i in. 2015]) obserwacje spoza opartego na kwartylach zakresu $\langle Q_1 - 1,5Q, Q_3 + 1,5Q \rangle$, gdzie Q jest rozstępem kwantylowym, zostają uznane za nietypowe, czyli zidentyfikowane jako skoki.

Nieparametryczna metoda wykrywania skoków została oparta na pracach [Ané, Métais 2010; Barndorff-Nielsen, Shephard 2004; 2006a; 2006b], a także [Kostrzewski 2012]. W technice tej identyfikacja skoków opiera na spostrzeżeniu, że w szeregu cen można zaobserwować małe zmiany cen w czasie, zwane zmianami ciągłymi, jak również sporadyczne gwałtowne zmiany – skoki. Takie szeregi czasowe można modelować za pomocą procesów dyfuzji ze skokami (*jump-diffusion processes*), które są rozwiązaniami układu równań różniczkowych:

$$dY_t = \mu(t)dt + \sigma(t)dW_t + k(t)dq_t,$$

gdzie μ interpretowane jako trend, σ jako zmienność oraz k wartość skoku są funkcjami, dla których istnieje dokładnie jedno rozwiązanie powyższego równania, W oznacza proces Wienera, a q proces liczący Poissona. Dwa pierwsze składniki wzoru definiują część ciągłą procesu, tworząc proces dyfuzji (*pure diffusion process*). Ostatni składnik to proces odpowiedzialny za skoki (*pure jump process*). W celu oddzielenia zmian ciągłych od skoków cen energii elektrycznej zastosowano podział wariacji kwadratowej na zrealizowaną wariancję oraz zrealizowaną wariację dwupotęgową. Algorytm wykrywania skoków przeprowadzono zgodnie z propozycją podaną w pracy [Ané, Métais 2010].

Wyznaczanie skoków bez uprzedniego wyeliminowania krótko- i długookresowej sezonowości cen energii elektrycznej może doprowadzić do niesłusznego uznania obserwacji za skok w sytuacji, gdy bardzo wysokie/niskie ceny były spowodowane czynnikami sezonowymi: np. w godzinach zwiększonej konsumpcji energii elektrycznej ceny są na ogół znacznie wyższe niż w godzinach nocnych.

W celu oczyszczenia szeregu cen energii elektrycznej dokonano dekompozycji szeregu za pomocą filtru Hodricka-Prescotta na składnik długookresowy trendu i sezonowości oraz składnik nieregularny. Zgodnie z wynikami R. Werona i M. Zatora [2015] zastosowanie filtru HP daje podobne wyniki do zalecanej w literaturze, ale bardziej wymagającej obliczeniowo metody falkowej. W celu wyodrębnienia krótkookresowego składnika sezonowego od poszczególnych wartości składnika nieregularnego otrzymanego po zastosowaniu filtru HP odjęto mediany odpowiadające kolejnej godzinie kolejnego dnia tygodnia (24 razy 7 median). W ten sposób dzienna i tygodniowa sezonowość zostały usunięte z szeregu cen energii elektrycznej. Skoki dodatnie i ujemne cen energii elektrycznej zostały wyznaczone na składniku nieregularnym (resztach) uzyskanym po zastosowaniu filtru HP, a następnie filtru median.

Liczba wykrytych skoków cen energii elektrycznej różni się w zależności od zastosowanej metody. Ponadto różne metody niekoniecznie identyfikują te same obserwacje jako skoki cen. W tabeli 1 zostały zamieszczone odsetki skoków dodatnich, ujemnych oraz skoków wykrytych za pomocą wspomnianych metod. W szczególności zwraca uwagę większy odsetek wykrytych skoków dodatnich niż ujemnych (nie dotyczy metody kwantylowej, która z konstrukcji daje wynik symetryczny).

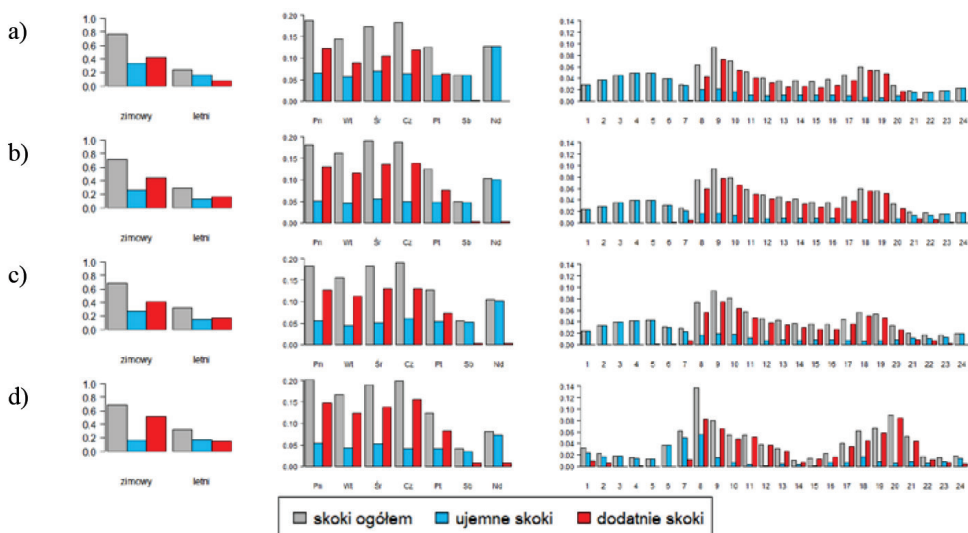
Tabela 1. Odsetek wykrytych skoków wśród wszystkich obserwacji

Metoda:	Kwantylowa	RFP	Tukey	Nieparametryczna
Skoki ujemne	2,50	2,49	3,03	1,47
Skoki dodatnie	2,50	3,80	4,20	2,89
Skoki ogółem	5,00	6,29	7,23	4,36

Źródło: opracowanie własne.

3. Sezonowość skoków cen energii elektrycznej

Znany z literatury jest fakt, że ceny energii elektrycznej podlegają sezonowym zmianom (por. np. [Weron 2014]). Znacznie mniej uwagi poświęca się analizie sezonowości skoków cen energii elektrycznej. W analizowanym szeregu skoków cen, pomimo usunięcia trendu i sezonowości z szeregu cen energii elektrycznej, można zaobserwować występowanie sezonowości, która nie musi pokrywać się z sezonowością samych cen. Poniżej przedstawiono wyniki analizy występowania skoków dodatnich, ujemnych oraz skoków ogółem w zależności od pory roku (okresy zimowy i letni⁴), dnia tygodnia oraz godziny doby (rys. 1).



Rys. 1. Odsetek skoków ogółem, ujemnych i dodatnich skoków w okresie zimowym i letnim (po lewej stronie), w kolejnych dniach tygodnia od poniedziałku do niedzieli (na środku) oraz w kolejnych godzinach doby (po prawej stronie) wśród skoków wykrytych za pomocą metody kwantylowej (a), RFP (b), Tukeya (c) lub nieparametrycznej (d)

Źródło: opracowanie własne.

Niezależnie od zastosowanej metody identyfikacji można zaobserwować pewne wspólne cechy występowania skoków cen energii elektrycznej na rynku dnia następnego giełdy Nord Pool. W okresie zimowym na ogół występuje więcej skoków cen energii elektrycznej ogółem niż w okresie letnim, co spowodowane jest występowaniem większej liczby skoków dodatnich (lewa kolumna rys. 1). Zjawisko to można tłumaczyć wyższym zapotrzebowaniem na energię elektryczną w okresie zimowym.

⁴ Na podstawie daty zmiany czasu z letniego na zimowy oraz z zimowego na letni.

Występowaniu większej liczby dodatnich skoków cen energii elektrycznej w dniach od poniedziałku do piątku, a także większej liczby ujemnych skoków cen w soboty i niedziele (środkowa kolumna rys. 1), odpowiada wyższa konsumpcja energii elektrycznej w dniach roboczych. Największy odsetek skoków ujemnych odnotowano w niedziele, kiedy konsumpcja energii elektrycznej jest niższa.

Podobnie zaobserwowano, analizując kolejne godziny doby (prawa kolumna rys. 1): okresy wyższego zapotrzebowania na energię elektryczną pokrywają się z okresami o większej liczbie dodatnich skoków cen. W godzinach nocnych na ogół nie występują lub występuje niewiele dodatnich skoków cen energii elektrycznej, natomiast w tych godzinach występuje większość ujemnych skoków. Duży odsetek dodatnich skoków zaobserwowano w okresie zwiększonego zapotrzebowania na energię, tj. od 8 do około 19-20 godziny doby. Ponadto wśród skoków dodatnich można wskazać dwa maksima: w godzinie 9 i 18 lub 8 i 20 (metoda nieparametryczna), co odpowiada godzinom rozpoczęcia pracy oraz godzinom powrotów do domu. Wykres częstości występowania skoków, szczególnie dodatnich, przypomina kształtem wykres poziomu konsumpcji energii elektrycznej w kolejnych godzinach doby.

4. Grupowanie skoków cen energii elektrycznej

Jeżeli wystąpieniu skoku towarzyszy wzrost prawdopodobieństwa pojawienia się kolejnego skoku w najbliższym czasie, świadczy to o zjawisku grupowania skoków (*jump clustering*). W praktyce zjawisko grupowania skoków potwierdza przeplatanie się okresów bez skoków z okresami ze skokami. Formalnie można sprawdzić, czy występuje grupowanie skoków, za pomocą procesu Hawkesa.

Jednowymiarowy model Hawkesa dla momentów występowania skoków jest zdefiniowany za pomocą warunkowej funkcji intensywności [Daley, Vere-Jones 2003; Kostrzewski 2014]:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \int_{-\infty}^t g(t-s)N(ds) = \lambda_0 + \sum_{t_i < t} g(t-t_i),$$

gdzie $g(z) = \sum_{k=1}^K a_k z^{k-1} e^{-c \cdot z}$ wyraża wpływ wystąpienia skoków w przeszłości na obecną wartość intensywności; ponadto: $\lambda_0 > 0$, $a_k > 0$, $c > 0$. Warunkowa funkcja intensywności $\lambda(t)$ jest procesem stochastycznym. Parametr λ_0 reprezentuje poziom intensywności w wypadku, gdy w przeszłości nie wystąpił skok. Parametry a_k oraz c kontrolują poziom grupowania, natomiast K jest stopniem funkcji g . Wartości $K > 0$ wskazują na występowanie grupowania skoków. Przy ogólnych założeniach estymatory największej wiarygodności są zgodne i asymptotycznie normalne (por. [Ogata 1978; Daley, Vere-Jones 2003]).

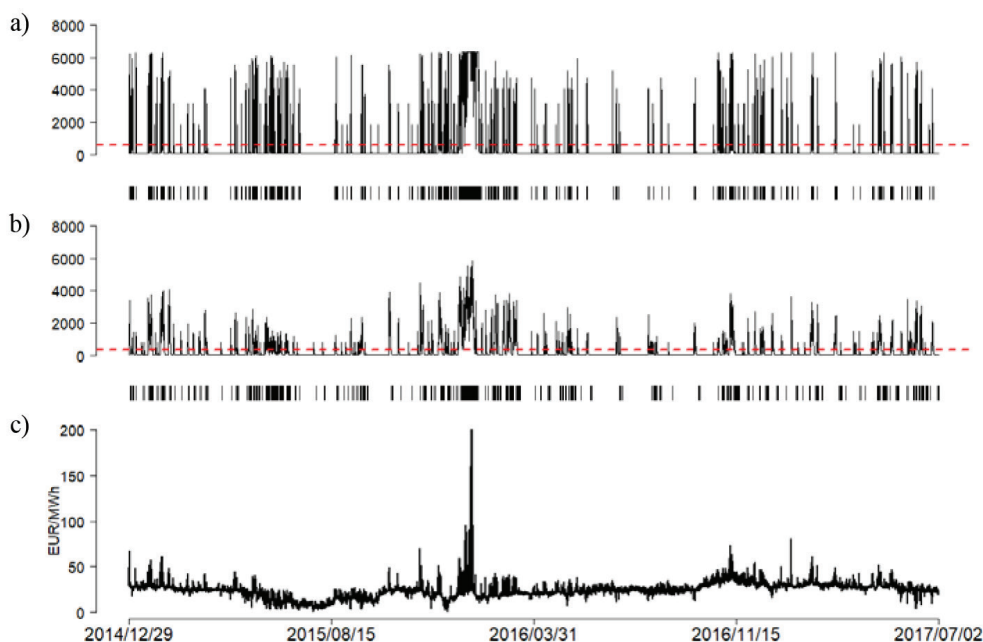
Dla skoków cen energii elektrycznej oszacowano procesy Hawkesa z parametrem $K = 0$ lub $K = 1$. Niższe wartości kryterium AIC dla $K = 1$ wskazują na występowanie grupowania skoków cen. Wynik taki uzyskano niezależnie od zastosowanej metody wykrywania skoków. W tabeli 2 zestawiono wartości oszacowanych

parametrów procesu Hawkesa z $K = 1$ dla poszczególnych metod. W szczególności wysokie wartości parametru a_1 przemawiają za występowaniem grupowania skoków cen energii elektrycznej (wartości bliskie zera wskazywałyby na brak tego zjawiska).

Tabela 2. Oszacowania metodą największej wiarygodności parametrów procesu Hawkesa przy $K=1$ (w nawiasach błędy standardowe)

Metoda:	Kwantylowa	RFP	Tukey	Nieparametryczna
λ_0	67,21 (5,271)	65,94 (5,133)	202,60 (10,313)	71,44 (5,989)
a_1	2244,61 (152,843)	2378,66 (173,249)	2279,40 (102,770)	731,38 (72,684)
c	2647,77 (178,075)	2785,32 (151,836)	2689,90 (88,864)	920,91 (57,544)

Źródło: obliczenia własne.



Rys. 2. Warunkowa funkcja intensywności (powyżej) oraz momenty wystąpienia skoków (poniżej) wykrytych za pomocą kryterium Tukeya (a) lub metody nieparametrycznej (b) oraz szereg cen energii elektrycznej (EUR/MWh) w okresie 29.12.2014-2.07.2017 (c). Przerywaną linią zaznaczono wartość stałej funkcji intensywności skoku

Źródło: opracowanie własne.

Wyższe wartości funkcji intensywności odpowiadają większej zmienności cen oraz większemu prawdopodobieństwu wystąpienia skoku. Na rysunku 2 zaprezentowano wykresy funkcji intensywności dla dwóch metod wykrywania skoków:

Tukeya⁵ i nieparametrycznej. Na wykresach widoczne jest, że okresy bez skoków przeplatają się z okresami ze skokami – co potwierdza występowanie zjawiska grupowania skoków cen energii elektrycznej. W szczególności dla każdej z metod identyfikacji skoków najwyższe wartości funkcji intensywności odpowiadają największemu „zagęszczeniu” skoków oraz okresowi czasu o najwyższym poziomie cen.

Występowanie zjawiska grupowania skoków cen energii elektrycznej wskazuje na konieczność zastosowania odpowiednich modeli w celu prognozowania skoków, a także samych cen energii elektrycznej. Oznacza, że w krótkim czasie po wystąpieniu skoku ceny należy spodziewać się następnych gwałtownych zmian, zatem przy modelowaniu i prognozowaniu skoków cen należy uwzględnić historię procesu. Wyniki te są zgodne z literaturą przedmiotu (por. np. [Christensen i in. 2012; Weron 2014]).

5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza pozwala na sformułowanie następujących wniosków. Zaobserwowano, że liczba wykrytych skoków cen energii elektrycznej zależy od zastosowanej metody ich identyfikacji. Nie jest to wniosek zaskakujący, ale wart odnotowania. Ponadto pokazano, że skoki cen energii elektrycznej podlegają sezonowości – niezależnie od sposobu ich identyfikacji. Więcej dodatnich skoków cen i skoków ogółem występuje zwłaszcza w okresie zimowym, w robocze dni tygodnia oraz w godzinach dziennych, a zatem w okresach zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną. Za pomocą procesu Hawkesa wskazano na obecność zjawiska grupowania skoków cen energii elektrycznej. Wynik ten sugeruje konieczność uwzględnienia historii szeregu skoków cen przy konstrukcji modeli służących do prognozowania skoków oraz cen energii elektrycznej.

Wyniki pracy zostaną wykorzystane w dalszych badaniach do budowy złożonych modeli stochastycznych do prognozy skoków oraz cen energii elektrycznych, m.in. w kontekście oceny, czy modele dyfuzji ze skokami można rozszerzyć, uwzględniając zjawisko grupowania skoków oraz zmienność intensywności w czasie.

Literatura

- Ané T., Métais C., 2010, *Jump distribution characteristics: Evidence from European stock markets*, International Journal of Business and Economics, 9(1), 1.
- Barndorff-Nielsen O., Shephard N., 2004, *Power and bipower variation with stochastic volatility and jumps*, Journal of Financial Econometrics, 2(1), 1-37.
- Barndorff-Nielsen O., Shephard N., 2006a, *Econometrics of testing for jumps in financial economics using bipower variation*, Journal of financial Econometrics, 4(1), 1-30.

⁵ Wykresy funkcji intensywności w wypadku metody kwantylowej lub RFP są bardzo podobne do wykresów w wypadku zastosowania kryterium Tukeya do identyfikacji skoków.

- Barndorff-Nielsen O., Shephard N., 2006b, *Impact of jumps on returns and realised variances: Econometric analysis of time-deformed Lévy processes*, *Journal of Econometrics*, 131(1), 217-252.
- Borovkova S., Schmeck M.D., 2017, *Electricity price modeling with stochastic time change*, *Energy Economics*, 63, 51-65.
- Christensen T.M., Hurn A.S., Lindsay K.A., 2012, *Forecasting spikes in electricity prices*, *International Journal of Forecasting*, 28(2), 400-411.
- Daley D.J., Vere-Jones D., 2003, *An Introduction to the Theory of Point Processes: Volume I: Elementary Theory and Methods* (2 ed.), Springer, New York.
<http://nordpoolgroup.com>.
- Janczura J., Trueck S., Weron R., Wolff R., 2013, *Identifying spikes and seasonal components in electricity spot price data: A guide to robust modeling*, *Energy Economics*, 38, 96-110.
- Kostrzewska J., Kostrzewski M., Pawełek B., Gałuszka K., 2016, *The classical and Bayesian logistic regression in the research on the financial standing of enterprises after bankruptcy in Poland*, [w:] *Proceedings of the 10th Professor Aleksander Zelias International Conference on Modelling and Forecasting of Socio-economic Phenomena*, red. M. Papież, S. Śmiech, Foundation of the CUE, Cracow, 72-81.
- Kostrzewski M., 2012, *On the existence of jumps in financial time series*, *Acta Physica Polonica B*, 43(10).
- Kostrzewski M., 2014, *The Hawkes process and time-varying jump intensity in financial time series*, [w:] Loster T., Pavelka T. (red.), *The 8th International Days of Statistics and Economics: Conference Proceedings*, September 11-13, 2014, Prague, Czech Republic, Published by: Libuse Macakova, Melandrium, Slany, 743-754.
- Ogata Y., 1978, *The Asymptotic Behaviour of Maximum Likelihood Estimators for Stationary Point Processes*, *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 30, 243-261.
- Pawełek B., Kostrzewska J., Lipieta A., 2015, *The problem of outliers in the research on the financial standing of construction enterprises in Poland*, [w:] *Proceedings of the 9th Professor Aleksander Zelias International Conference on Modelling and Forecasting of Socio-Economic Phenomena*, red. M. Papież, S. Śmiech, Foundation of the CUE, Cracow, 164-173.
- Tukey J.W., 1977, *Exploratory Data Analysis*, Addison-Wesley, Boston.
- Weron R., 2014, *Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future*, *International Journal of Forecasting*, 30(4), 1030-1081.
- Weron R., Zator M., 2015, *A note on using the Hodrick–Prescott filter in electricity markets*, *Energy Economics*, 48, 1-6.