

Analiza statystyczna danych do prognozowania ultrakrótkoterminowego produkcji energii elektrycznej w systemach fotowoltaicznych

Streszczenie. W tekście przedstawiono obszerną analizę statystyczną danych mogących mieć potencjalne znaczenie w procesie prognozowania ultrakrótkoterminowego produkcji energii przez system fotowoltaiczny. Sformułowano wnioski końcowe z przeprowadzonych analiz statystycznych.

Abstract. The paper presents comprehensive statistical analysis of data potentially useful in ultra short-term electric energy production forecasting for photovoltaic systems. The obtained results have been discussed and the final conclusions have been presented. **(Statistical analysis of data for ultra short-term electric energy production forecasting for photovoltaic systems)**

Słowa kluczowe: prognozowanie ultrakrótkoterminowe produkcji energii elektrycznej, system fotowoltaiczny, analiza statystyczna danych, **Keywords:** ultra short-term forecasting of electric energy production, photovoltaic system, statistical analysis of data.

doi:10.12915/pe.2014.04.01

Wstęp

Systemy fotowoltaiczne można podzielić, ze względu na sposób wykorzystania energii i współpracę z lokalną instalacją zasilającą, na systemy off-grid (autonomiczne), on-grid (podłączone do publicznej sieci elektroenergetycznej) oraz systemy autonomiczne z podłączeniem do sieci publicznej. Na świecie dominują instalacje fotowoltaiczne podłączone do sieci energetycznej, natomiast w Polsce nadal dominują niewielkie instalacje autonomiczne. Średni roczny wzrost produkcji na świecie światowej układów fotowoltaicznych w ostatniej dekadzie wyniósł około 45% (od kilku lat notowany jest z roku na rok blisko 2-krotny wzrost produkcji) i jest to jedna z najdynamiczniej rozwijających się technologii OZE [1]. W Polsce również w sposób ciągły, wzrasta rola zasilania urządzeń elektrycznych z układów fotowoltaicznych. Problemy związane są przede wszystkim z kosztami urządzeń i losowym dostępem do energii z takich źródeł (nasłonecznienie). W ostatnich dwóch latach w naszym kraju nastąpił dość gwałtowny wzrost zainteresowania fotowoltaiką [2]. Fakt ten wiązać można z projektem Ministerstwa Gospodarki dotyczącym nowej ustawy o odnawialnych źródłach energii. W roku 2007 roku wg raportu Instytutu Energetyki Odnawialnej (IEO) dla Ministerstwa Gospodarki wskazano tylko cztery firmy produkujące (montaż) moduły PV i dwie dostarczające komponenty do systemów fotowoltaicznych. Natomiast w roku 2013 na polskim rynku odnotowano działalność aż 198 firm, które zajmują się produkcją paneli fotowoltaicznych i dystrybucją elementów elektrowni PV. Pojedyncze moduły dostępne w sprzedaży mają moce od 5 do 300 W przy cenie około 1 €/W dla modułów o większej mocy. Na rynku polskim dominują panele chińskie (91,6%) – w sumie zagraniczne produkty stanowią 96% wszystkich sprzedanych paneli PV na naszym rynku. W Polsce produkowanych jest więc jedynie około 4% paneli. Na koniec roku 2012 przyłączonych było w Polsce do sieci elektroenergetycznej 9 instalacji (on-grid), których łączna moc wynosiła 1,35 MW. Natomiast moc małych elektrowni fotowoltaicznych typu off-grid wynosiła w sumie 2,25 MW. Największa w Polsce elektrownia fotowoltaiczna ma moc 1 MW i znajduje się w miejscowości Wierzchosławice [2]. Według bardzo optymistycznych szacunków opublikowanych w Krajowym Planie Działań, przy korzystnych regulacjach prawnych do 2020 roku możemy mieć zainstalowane w Polsce nawet 1,8 GW w słonecznych elektrowniach fotowoltaicznych.

Wykonane analizy statystyczne dotyczą systemu fotowoltaicznego w Centrum Fotowoltaiki Wydziału EiT Politechniki Warszawskiej. Analizy były podstawą do kolejnego etapu badań – analizy doboru zmiennych do modeli prognostycznych. Ogólnie metody prognozowania produkcji energii oraz mocy w systemach fotowoltaicznych podzielić można na 3 kategorie [3]: metody fizyczne, metody statystyczne oraz metody wykorzystujące metody sztucznej inteligencji. Te ostatnie są często wykorzystywane i mają duży potencjał, o czym świadczą liczne publikacje z zakresu prognozowania w elektroenergetyce [3,4,5,6,7,8,9,10].

Analiza statystyczna danych

Celem przeprowadzonych analiz statystycznych było określenie czynników wpływających na wielkość produkcji energii elektrycznej oraz wstępny wybór właściwych danych, przydatnych w procesie prognozowania. Szczegółowej analizie poddane zostały dane z okresów: 15.01.2010 - 9.03.2010, 6.07.2010 - 16.08.2010 oraz 5.09.2010 - 31.12.2010 (łącznie około 180 dni). Nominalna moc produkcji energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny wynosiła 19,5 kW. Liczebność analizowanego szeregu czasowych wynosiła 4821. Brakujących danych ani anormalnych wartości maksymalnych nie stwierdzono w szeregu czasowym. Wyraźnego trendu nie wykryto. Test Shapiro-Wilka oraz Kolmogorowa-Smirnowa wykazały, że szereg czasowy nie ma rozkładu normalnego (nie jest zatem spełnione jedno z założeń stosowania liniowego modelu prognostycznego regresji wielokrotnej). Stosunek średniej produkcji godzinowej systemu fotowoltaicznego (obliczony tylko z godzin każdej doby pomiędzy wschodem a zachodem słońca czyli okresu potencjalnej produkcji) do maksymalnej godzinowej produkcji teoretycznej był niski i wynosił zaledwie 16,6%.

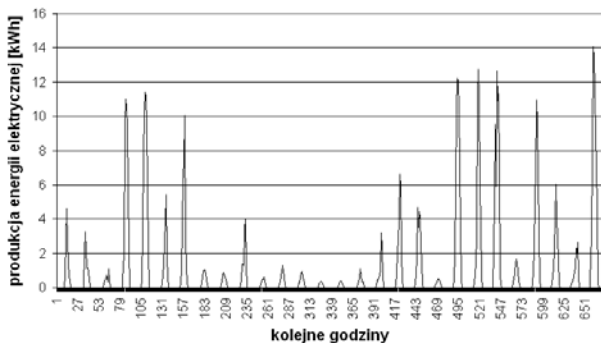
W tabeli 1 przedstawiono dane statystyczne o produkcji energii elektrycznej w okresach 1 godzinnych ze wszystkich godzin każdej doby. Kurtosis (miara spłaszczenia rozkładu szeregu czasowego, dla rozkładu normalnego wynosi 0) ma wartość dodatnią co oznacza, że wartości szeregu czasowego są bardziej skoncentrowane niż przy rozkładzie normalnym. Współczynnik skośności (przyjmujący wartość zero dla rozkładu symetrycznego) jest dodatni czyli występuje rozkład o prawostronnej asymetrii (występuje więcej wartości szeregu czasowego większych niż wartość średnia). Duże wartości odchylenia standardowego w stosunku do wartości średniej (współczynnik zmienności)

sugerują potencjalne trudności w uzyskaniu wysokiej jakości prognoz [8].

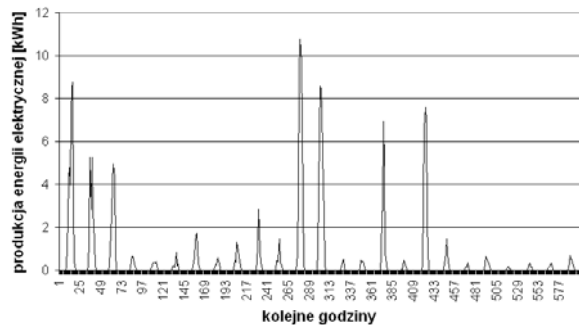
Tabela 1 Dane statystyczne szeregu czasowego produkcji energii elektrycznej w okresach 1 godzinnych.

Miara statystyczna	24 godziny z każdej doby	Tylko okresy pomiędzy wschodem a zachodem słońca
Maksymalna produkcja	14,63 kWh	14,63 kWh
Minimalna produkcja	0 kWh	0 kWh
Rozstęp	14,63 kWh	14,63 kWh
Średnia produkcja	1,57 kWh	3,24 kWh
Odchylenie standardowe	3,27 kWh	4,13 kWh
Mediana	0 kWh	1,05 kWh
Współczynnik zmienności	205%	127%
Wariancja	10,67	17,12
Skośność	2,33	1,23
Kurtoza	4,38	0,17

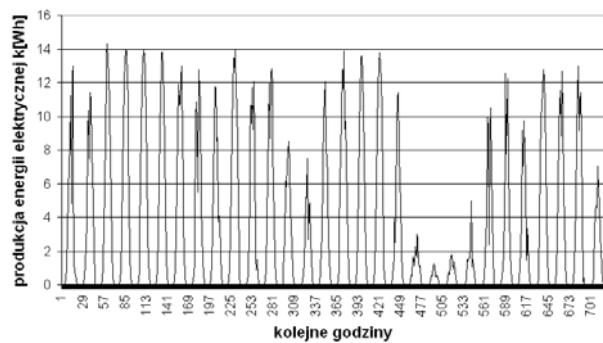
Przebieg produkcji energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny w 3 różnych porach roku przedstawiają rysunki 1, 2 oraz 3. Widoczna jest silna dobowa okresowość wynikająca przede wszystkim z poziomu nasłonecznienia. Największa i najbardziej powtarzalna jest produkcja energii elektrycznej w miesiącach letnich o silnym nasłonecznieniu i wysokiej temperaturze powietrza. W miesiącach zimowych i około zimowych występuje mała powtarzalność przebiegów dobowych z powodu dużej losowości występowania nasłonecznienia. Tylko w nielicznych dniach w zimie produkcja osiąga wartości bliskie maksymalnym zdolnościom produkcyjnym. Produkcja energii elektrycznej odbywa się więc tylko w warunkach odpowiedniego nasłonecznienia. Wydaje się, że prognozy dla okresu zimy i miesięcy około zimowych będą charakteryzować się znacznie większym poziomem błędów niż prognozy dla miesięcy letnich.



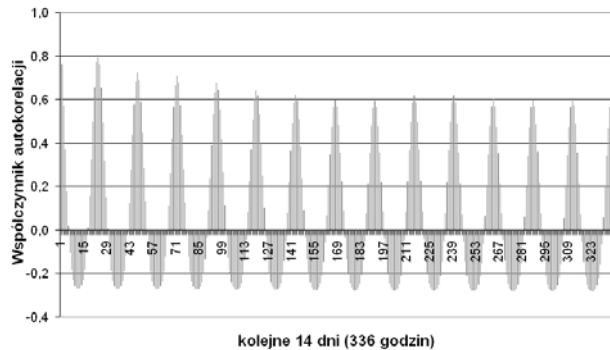
Rys. 1 Przebieg produkcji energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny w miesiącu zimowym (luty 2010) [11].



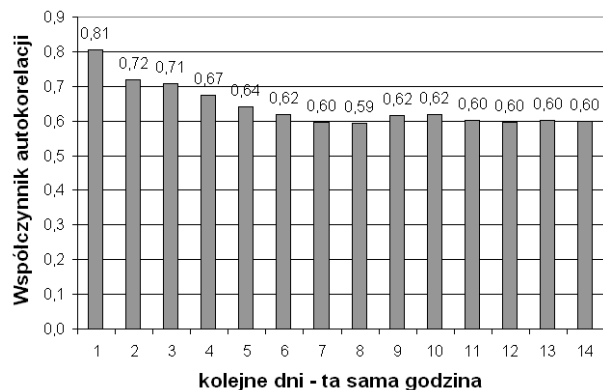
Rys. 2 Przebieg produkcji energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny w miesiącu jesiennym (listopad 2010) [11].



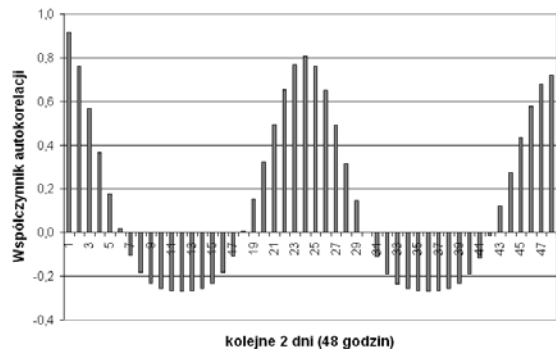
Rys. 3 Przebieg produkcji energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny w miesiącu letnim (lipiec 2010) [11].



Rys. 4 Współczynniki autokorelacji szeregu czasowego produkcji energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny w okresie do 14 dni wstecz [11].



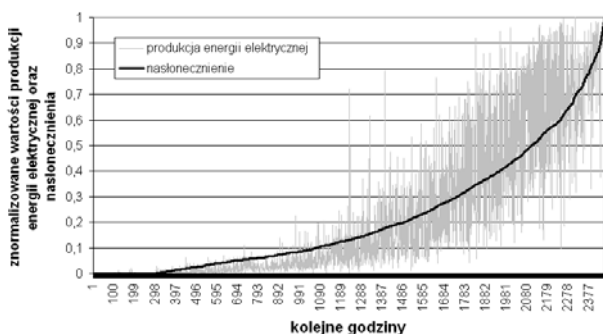
Rys. 5 Współczynniki autokorelacji szeregu czasowego produkcji energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny – kolejne 14 dni dla tej samej godziny.



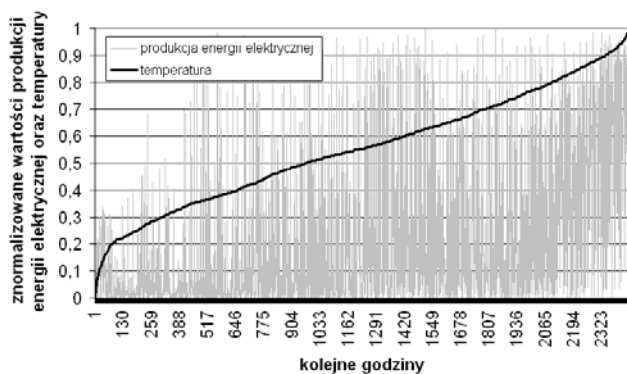
Rys. 6 Współczynniki autokorelacji szeregu czasowego produkcji energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny w okresie do 2 dni wstecz [11].

Analiza autokorelacji wskazuje na stosunkowo wysokie korelacje z wartościami sprzed dokładnie 24, 48, 72 itd. godzin czyli okresów kolejnych dni (rys.4, rys.5). Wartość autokorelacji dla tej samej godziny w poprzednich dniach stopniowo maleje ale nie jest to spadek gwałtowny, co sprawia, że dane tego rodzaju mogą być potencjalnie przydatne w procesie prognozowania nawet z okresu 1-2 tygodni wstecz. Korelacje maleją szybko dla pośrednich godzin, innych niż wielokrotność 24 godzin (rys.6).

Analizie statystycznej poddano wybrane dostępne czynniki poza energetyczne (potencjalne zmienne objaśniające egzogenne) oraz czynniki energetyczne w postaci wybranych opóźnień zmiennej objaśnianej (potencjalne zmienne objaśniające endogeniczne) mogące mieć wpływ na produkcję energii elektrycznej przez elektrownię słoneczną (zmienna objaśniana). Obliczono współczynniki korelacji pomiędzy zmienną objaśnianą oraz potencjalnymi zmiennymi objaśniającymi. Wyniki przedstawiono w tabeli 2. Weryfikacja istotności korelacji z tabeli 2, wykazała we wszystkich przypadkach ich istotność z $p < 0,05$ (5% poziom istotności) z wyjątkiem kierunku wiatru. Kierunek wiatru, opady oraz zmiana ciśnienia z uwagi na bardzo niskie wartości współczynników korelacji powinny zostać wyeliminowane z zestawu potencjalnych zmiennych objaśniających. Na rysunku 7 przedstawiono korelację pomiędzy produkcją energii elektrycznej oraz nasłonecznieniem (dane znormalizowane do zakresu $<0,1>$ oraz uporządkowane rosnąco – nasłonecznienie). Natomiast korelacje pomiędzy produkcją energii elektrycznej oraz temperaturą, zachmurzeniem i długością dnia zostały przedstawione kolejno na rysunkach 8, 9, 10 (dane do rysunków 7, 8, 9, 10 zostały pobrane wyłącznie dla godzin pomiędzy wschodem a zachodem słońca).



Rys. 7 Korelacja pomiędzy produkcją energii elektrycznej oraz nasłonecznieniem.



Rys. 8 Korelacja pomiędzy produkcją energii elektrycznej oraz temperaturą.

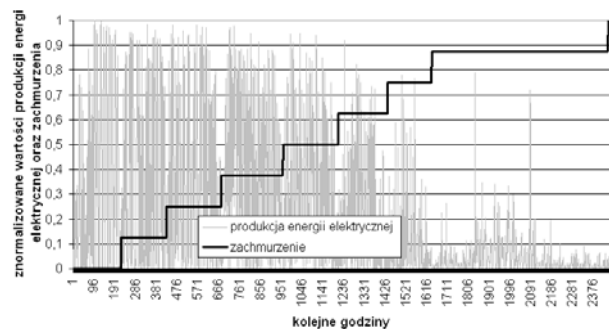
Analizując rysunek 7, na uwagę zasługują fakt, że produkcja energii dla danego poziomu nasłonecznienia

waha się w bardzo szerokim zakresie zmienności. Informacja o nasłonecznieniu wydaje się więc bardzo istotna (bardzo wysoki współczynnik korelacji z wielkością produkcji energii) ale powinna być uzupełniona o inne dane (np. wartości opóźnione szeregu czasowego produkcji energii, temperatura itp.) mające również wpływ na wielkość produkcji energii. Umożliwi to zapewne zwiększenie dokładności prognoz.

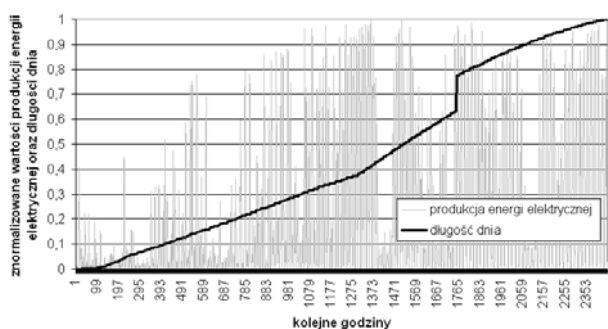
Tabela 2 Współczynniki korelacji liniowej Pearsona wybranych potencjalnych zmiennych objaśniających z godzinową produkcją energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny.

nr	Potencjalne zmienne objaśniające	Współczynnik korelacji
Egzogeniczne		
1	Godzina prognozy (liczba z zakresu od 1 do 24)	0,102
2	Kod pory dnia (1 - okres pomiędzy wschodem a zachodem słońca, 0 – okres od zmroku do świtu)	0,479
3	Opady [mm/h]	-0,080
4	Szybkość wiatru [m/s]	0,101
5	Ciśnienie atmosferyczne [hPa]	0,121
6	Temperatura [stopnie Celjusza]	0,412
7	Zachmurzenie [skala 0-8, brak zachmurz. - 0]	-0,296
8	Nasłonecznienie [Wh/m ²]	0,913
9	Długość dnia w dniu prognozy (liczba z zakresu od 0 do 1 określająca jaką część całego dnia stanowi okres pomiędzy wschodem a zachodem słońca)	0,319
10	Kierunek wiatru [azymut]	0,033
11	Zmiana ciśnienia [hPa]	-0,083
Endogeniczne		
12	Produkcja energii elektrycznej w okresie t-1	0,915
13	Produkcja energii elektrycznej w okresie t-2	0,766
14	Produkcja energii elektrycznej w okresie t-3	0,580
15	Produkcja energii elektrycznej w okresie t-4	0,368
16	Produkcja energii elektrycznej w okresie t-5	0,178
17	Produkcja energii elektrycznej w okresie t-24	0,816
18	Produkcja energii elektrycznej w okresie t-48	0,720

Analizując natomiast rysunek 9, widoczny jest bardzo wyraźny związek pomiędzy poziomem zachmurzenia a produkcją energii elektrycznej. Przyjąć należy, że od poziomu zachmurzenia 6 i więcej (w skali 0-8), wielkość produkcji energii elektrycznej dość gwałtownie spada. Natomiast poziom zachmurzenia pomiędzy 0 a 4 nie wpływa znacząco na wielkość produkcji energii elektrycznej.



Rys. 9 Korelacja pomiędzy produkcją energii elektrycznej oraz zachmurzeniem.



Rys. 10 Korelacja pomiędzy produkcją energii elektrycznej oraz długością dnia.

Wnioski

Bazując na wynikach obliczonych współczynników korelacji liniowej Pearsona pomiędzy produkcją energii elektrycznej a wybranymi potencjalnymi zmiennymi objaśniającymi, wnioskować można o potencjalnej przydatności w procesie prognozowania części analizowanych danych egzogenicznych (nasłonecznienie, temperatura, kod pory dnia, długość dnia, zachmurzenie) oraz części danych endogenicznych (produkcja energii elektrycznej w okresie t-1, t-2, t-3, t-24, gdzie: t to okres prognozy). Wśród zmiennych egzogenicznych kierunek wiatru okazał się statystycznie nieistotny. Ponadto, bardzo małe współczynniki korelacji z produkcją energii elektrycznej odnotowano dla następujących zmiennych egzogenicznych: szybkość wiatru, opady, ciśnienie oraz zmiana ciśnienia. W przypadku zmiennej – godzina prognozy, pomimo niskiej korelacji tej danej z produkcją energii elektrycznej może ona być pomocna w modelach nieliniowych wykorzystujących sztuczną inteligencję np. sztuczne sieci neuronowe [12,13].

W procesie prognozowania warto rozważyć algorytmiczne wykluczenie prognoz pomiędzy zachodem a wschodem słońca, które w tych okresach powinny mieć zawsze zerowe wartości prognoz produkcji energii elektrycznej. W przypadku analizy współczynników korelacji pomiędzy wielkością produkcji energii elektrycznej a potencjalnymi zmiennymi egzogenicznymi uwzględniającą tylko godziny od wschodu do zachodu słońca, wzrasta znacząco (ponad dwukrotnie) współczynnik korelacji z zachmurzeniem (-0,495), opadami (-0,136) oraz zmianami ciśnienia (-0,212). Dla innych danych egzogenicznych nie odnotowano większych zmian we współczynnikach korelacji z wartością produkcji energii elektrycznej.

Charakterystyczna jest silna zmienność wielkości produkcji energii elektrycznej przy danym poziomie nasłonecznienia, co sugeruje konieczność wykorzystania innych danych niż tylko wielkość nasłonecznienia w celu zwiększenia jakości prognoz. Z uwagi na brak rozkładu normalnego, wydaje się, że modele liniowe regresji wielorakiej nie powinny być preferowaną metodą prognozowania.

Kontynuacją poruszanej w artykule tematyki stanowi artykuł pt.: „Analiza doboru zmiennych w zadaniu prognozowania ultrakrótkoterminowego produkcji energii elektrycznej w systemach fotowoltaicznych”.

Autor dziękuje firmie Globema za udostępnienie danych w ramach projektu 4RES.

LITERATURA

- [1] Głuchy D., Jarmuda T., Kurz D., Skowronek K., Trzmiel G.: „Współpraca systemu fotowoltaicznego z układem zasilania w energię w budynku inteligentnym”, INPE, 152 (2012), 67-73,
- [2] <http://gramwzielone.pl/energia-sloneczna>,
- [3] Yuehui H. et al.: „Comparative study of power forecasting methods for PV stations”, International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2010,
- [4] Al-Messabi N., et al.: „Forecasting of photovoltaic power yield using dynamic neural networks”, The 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN),
- [5] Baczyński D., Wasilewski J.: „Krótkoterminowe prognozowanie produkcji energii elektrycznej w systemach fotowoltaicznych”, Rynek Energii, 96 (2011), nr 5, 47-51,
- [6] Dobrzańska I., Dąsał K., Łyp J., Popławski T., Sowiński J.: *Prognozowanie w elektroenergetyce. Zagadnienia wybrane*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa (2002),
- [7] Jie Shi, et al.: „Forecasting power output of photovoltaic system based on weather classification and support vector machine”, Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011 IEEE, Orlando 2011,
- [8] Piotrowski P.: „Prognozowanie w elektroenergetyce w różnych horyzontach czasowych”, Monografia, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej „Elektryka”, z. 144, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013,
- [9] Popławski T. (red.): „Wybrane zagadnienia prognozowania długoterminowego w systemach elektroenergetycznych”, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2012.
- [10] Yona A., et al.: „Application of neural network to 24-hour-ahead generating power forecasting for PV system”, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE,
- [11] Baczyński D., Helt P., Marzecki J., Piotrowski P., Wasilewski J.: „Opracowanie metod prognozowania produkcji energii elektrycznej dla źródeł odnawialnych”, praca na zlecenie firmy Globema w ramach umowy z Instytutem Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej,
- [12] Piotrowski P.: „Prognozowanie krótkoterminowe godzinowych obciążeń w spółce dystrybucyjnej z wykorzystaniem sieci neuronowych – analiza wpływu doboru i przetworzenia danych na jakość prognoz”, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), (83) 2007, nr 7-8, 40-43,
- [13] Piotrowski P.: „Analiza statystyczna danych mających wpływ na produkcję energii elektrycznej przez farmę wiatrową oraz przykładowe prognozy krótkoterminowe”, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), (88) 2012, nr 3a, 161-164,

Autor: dr inż. Paweł Piotrowski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: pawel.piotrowski@ien.pw.edu.pl