

Jakub JURASZ, Jerzy MIKULIK\*

## **WPLYW DYSTRYBUCJI PRZESTRZENNEJ NA STABILNOŚĆ ŹRÓDEŁ FOTOWOLTAICZNYCH**

Energia promieniowania słonecznego dociera do powierzchni Ziemi ze zmiennym natężeniem, zależnym od pory roku oraz warunków atmosferycznych a w szczególności przemieszczających się chmur. W wielu krajach o sprzyjających warunkach klimatycznych (Cypr, Włochy), energia elektryczna pochodząca z konwersji fotowoltaicznej osiągnęła już tak zwany parytet sieci. Oznacza to, iż w oparciu o systemy PV jest ona generowana po koszcie równym lub niższym cenie zakupu energii z sieci. Zakładając, iż nakłady inwestycyjne na tego typu instalacje ciągle będą maleć a cena energii pochodzącej ze źródeł konwencjonalnych rosnąć, sytuacja ta może mieć również miejsce w Polsce i wtedy rozwój energetyki słonecznej nie będzie już zależny od różnych systemów wsparcia a będzie wynikiem rachunku ekonomicznego, przeprowadzonego przez każdego odbiorcę energii. W związku z tym konieczne jest zbadanie wpływu zmienności nasłonecznienia na uzysk energii z instalacji fotowoltaicznych. Niniejszy artykuł, jest próbą oceny oraz zbadania zależności pomiędzy stabilnością uzysku a rozproszeniem instalacji na danym obszarze.

### **1. WSTĘP TEORETYCZNY**

Dynamiczny rozwój systemów fotowoltaicznych oraz ich wzrastający udział w produkcji energii elektrycznej powoduje, iż coraz ważniejsze staje się zrozumienie oraz ograniczenie niekorzystnego wpływu zmienności warunków atmosferycznych. Źródła fotowoltaiczne, mają charakter niestabilny, oznacza to, iż nie są to źródła energii, które mogą zagwarantować uzyskanie określonej mocy lub wygenerowanie z góry założonej porcji energii w określonym horyzoncie czasowym. W ramach funkcjonowania systemu elektroenergetycznego Hiszpanii operator instalacji o mocy znamionowej większej niż 10 MW zobowiązany jest do przedstawienia prognozy ilości

---

\* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, ul. Gramatyka 10, 30-067 Kraków, jakubkamiljurasz@gmail.com.

wygenerowanej energii elektrycznej dla najbliższych dni. Natomiast w Kalifornii, operator sprawujący kontrole nad ponad 200 tysiącami instalacji PV, musi przedstawić prognozy dzienne dla kolejnych 24 godzin. Prognozy te ogłaszane są w dzień je poprzedzający o 5:30. W ramach funkcjonowania takiego systemu, operator dostarcza również prognozy dla kolejnej godziny, przy czym podawane są ona na 105 minut przed jej początkiem [1]. Reasumując prognozy uzysku, są jedną z metod radzenia sobie z niestabilnością źródeł fotowoltaicznych, a ich trafność pozwala na ustalenie odpowiedniego harmonogramu pracy innych elektrowni. Stan wiedzy z zakresu prognozowania uzysku dla energetyki słonecznej przedstawiono w pracy [3].

Uzysk instalacji fotowoltaicznej wzór: (1) zależy jest od kąta nachylenia modułów ( $K$ ) oraz ich orientacji ( $O$ ), technologii w jakiej są wykonane moduły ( $Tech$ ), sprawności całej instalacji ( $W$ ), jej mocy znamionowej ( $P$ ) oraz dwóch parametrów stochastycznych – nasłonecznienia ( $GHI$ ) oraz temperatury ( $T$ ). Wartość nasłonecznienia może być opisana za pomocą modelu czystego nieba [1], przy czym są to warunki idealne i w rzeczywistości należy uwzględnić przemieszczające się chmury, które ograniczają ilość dostępnego promieniowania słonecznego. Stosunek promieniowania zmierzonego do obliczonego na podstawie modelu czystego nieba określany jest mianem wskaźnika czystego nieba.

$$U_{PV} = (GHI, T, K, O, Tech, W, P) \quad (1)$$

Oznacza to, iż zmienność nasłonecznienia wynika z ruchu Słońca oraz przemieszczania i zmiany kształtu chmur. Wędrowka Słońca jest daję się dokładnie odwzorować na podstawie matematycznych zależności i może być bardzo precyzyjnie określona dla dowolnych współrzędnych na kuli ziemskiej. Natomiast fluktuacje wynikające z zacieniania przez chmury, które można określić mianem szumu dają się prognozować jednak z różną dokładnością oraz z ograniczonym horyzontem czasowym. Mała przemieszczająca się nad instalacją PV chmura może w ciągu sekund spowodować, iż uzysk energetyczny spadnie niemal do zera, po czym wróci do stanu wyjściowego. Zmienność ta, jak się uważa, może mieć negatywny wpływ na funkcjonowanie systemu energetycznego. Wraz ze wzrostem udziału fotowoltaiki w rynku energetycznym, temat ten został poruszony po raz pierwszy od lat 1992, przez wielu autorów [5,2,6]. Zaczęto, więc w odniesieniu do energetyki słonecznej oraz wiatrowej posługiwać się terminem szybkości narastania (ang. ramp rate), pierwotnie odnoszącym się do elektrowni zawodowych, które załączane lub wyłączane są w zależności od zmian w popycie na energię elektryczną.

## 2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań była ocena wpływu rozmieszczenia przestrzennego na korelację wartości nasłonecznienia pomiędzy poszczególnymi lokalizacjami oraz ocena zmienności nasłonecznienia oraz natężenia promieniowania słonecznego pod kątem ich wpływu na system energetyczny. Badania ograniczone zostały do 87 lokalizacji w Polsce oraz jednego roku kalendarzowego.

## 3. MATERIAŁY I METODY

W badaniu wykorzystano dane [7] dotyczące nasłonecznienia dla 87 miast leżących na terytorium Polski, których liczba mieszkańców przekraczała 50 tysięcy. Zakres danych obejmował rok 2005 z krokiem czasowym pomiędzy kolejnymi rekordami wynoszącym 10 minut. Dane poddano wstępnej obróbce w celu wyeliminowania błędów związanych z brakiem wartości (oznaczane w pobranych plikach, jako „-999”) oraz usunięciu wartości pomiarów dla godzin nocnych. Przy czym za koniec godzin nocnych uznawano moment, w którym nastąpił pierwszy z odczytów powyżej zera dla, któregośkolwiek z obserwowanych miast, natomiast ich początek, w momencie odczytu ostatniej wartości powyżej zera. Operacje te wykonano dla każdej doby roku 2005.

Pierwszym krokiem badania były budowa macierzy odległości pomiędzy miastami w oparciu o ich współrzędne geograficzne. Następnie wykorzystując zgromadzone roczne dane dotyczące nasłonecznienia stworzono macierz korelacji dla wszystkich możliwych par miast. W kolejnym kroku przekształcono obie macierze w odpowiadające im wektory kolumnowe, oraz posortowano je na podstawie wektora odległości, od najmniejszych do największych. W efekcie uzyskano 3740 punktów, przy czym położenie każdego opisywane było przez wartość współczynnika korelacji oraz odległości między miastami.

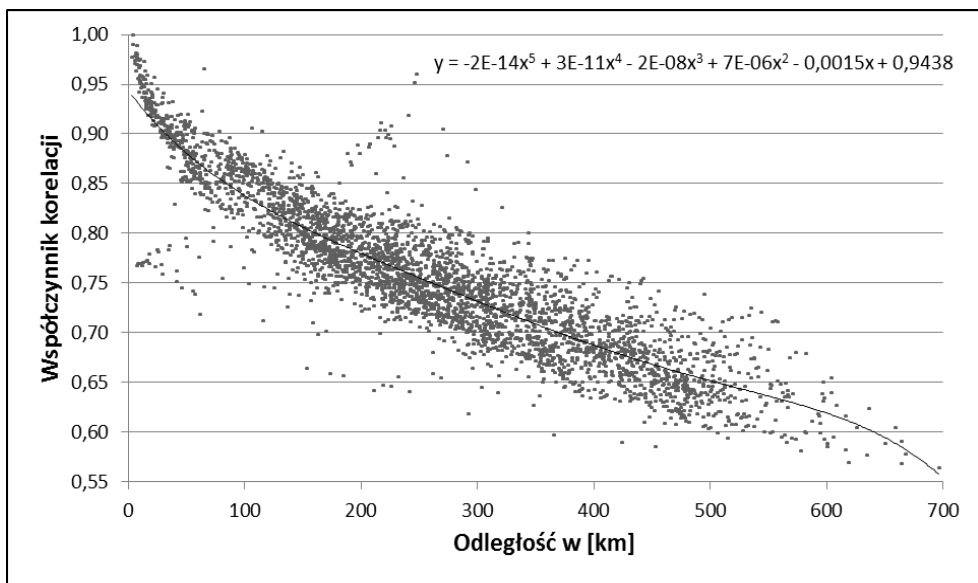
Drugi etap badań, polegał na segmentacji obserwowanego zbioru miast, w celu wyodrębnienia grup podobnych do siebie. Grupowanie przeprowadzono wykorzystując algorytm K-średnich, dla którego obliczenia wykonywano w oparciu o różną liczbą skupień. Za miarę odległości przyjęto odległość euklidesową. Każde z miast (punktów) było opisywane przez 29230 zmiennych, co jest równoznaczne liczbie odczytów wartości nasłonecznienia dla pojedynczego miasta.

W ramach ostatniego etapu badań porównano wartości nasłonecznienia dla pojedynczych par miast oraz zestawiono je z sumarycznym profilem nasłonecznienia dla wszystkich lokalizacji w przeciągu czterech kolejnych dni. Badania zakończono analizą zmienności wartości natężenie promieniowania dla miasta Wrocławia dla dwóch

następujących po sobie dni. Obliczenia oraz analizy wykonano w oparciu o narzędzia dostępne w programach MS Excel, Statistica oraz Matlab.

#### 4. WYNIKI BADAŃ

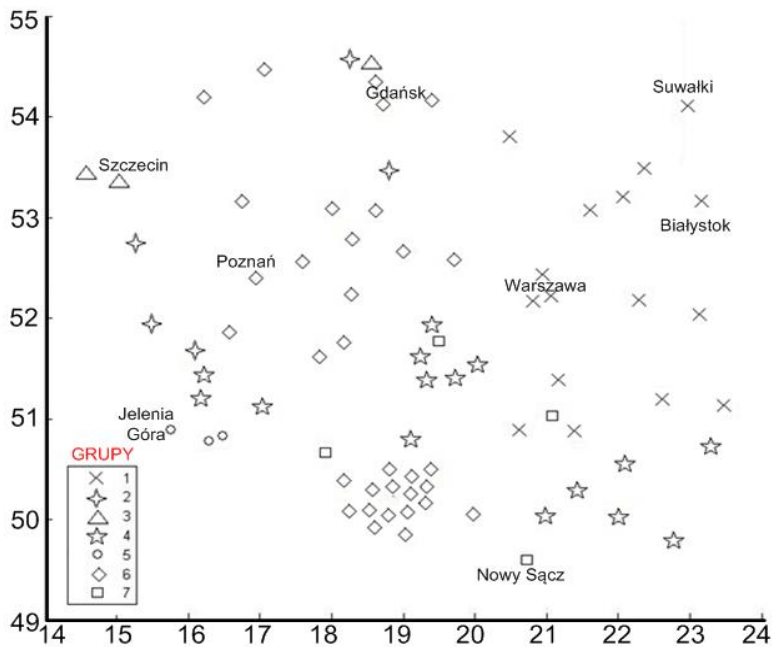
Wyniki badania korelacji pomiędzy wartościami nasłonecznienia dla zbioru 87 miast przedstawione zostały na rysunku 1. Można zauważyć, iż ze wzrostowi odległości pomiędzy punktami pomiarowymi towarzyszy spadek wartości współczynnika korelacji. Zależność ta dobrze opisywana jest wielomianem piątego stopnia. Wyniki tak przeprowadzonej analizy są zgodne z tymi prezentowanymi przez [5], przy czym ze względu na powierzchnię oraz kształt Polski maksymalna odległość między badanymi miastami nie przekraczała 700 kilometrów. Duża ilość odczytów o wartości współczynnika korelacji powyżej 0,9 związana jest ze specyficznym założeniem przyjęcia do analizy wyłącznie miast o populacji ponad 50 tys. mieszkańców. Założenie to motywuje się dążeniem by w wypadku źródeł energii odbiorca końcowy był maksymalnie blisko źródła energii, ponieważ jej przesyłanie na duże odległości związany jest ze stratami. Przyjęto, że miasta o znacznej liczbie mieszkańców są w stanie zapewnić odbiór wygenerowanej energii elektrycznej, co jest istotne zwłaszcza w wypadku źródeł fotowoltaicznych, cechujących się dużą sezonowością pod kątem wolumenu uzyskiwanej energii elektrycznej.



Rys. 1. Wartość współczynnika korelacji w funkcji odległości

Jak wspomniano, wartość nasłonecznienia dla danej lokalizacji w wybranej chwili czasu można określić w oparciu o modele czystego nieba. Natomiast odstępstwa od tych wartości (skutkujące spadkiem ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni) uzależnione są od przemieszczających się warstw chmur, które przesłaniają i blokują część promieniowania słonecznego. W efekcie dzienna krzywa nasłonecznienia znacznie odbiega od sytuacji idealnej (niebo bezchmurne). Gdyby nie, w szczególności przemieszczające się chmury oraz lokalne warunki atmosferyczne, prognozowanie ilości docierającego promieniowania słonecznego można by oprzeć o model czystego nieba uwzględniając jedynie zawartość różnych pyłów i cząstek rozpraszających oraz pochłaniających promieniowanie w atmosferze. W takim idealnym przypadku współczynnik korelacji dla wartości nasłonecznienia dla analizowanych lokalizacji wynosiłby 1 lub był bliski jedności.

Powstaje, więc pytanie, czy mimo zmieniających się warunków nasłonecznienia możliwe jest wyodrębnienia miast, dla których fluktuacje te mają podobny charakter. W tym celu posłużono się dostępnym w pakiecie Statistica narzędziem służącym do segmentacji zbiorów danych w oparciu o metodę k-średnich. Na wstępie wydzielono siedem grup, co zwizualizowano na rysunku 2, natomiast w tabeli 1 zestawiono przynależność miast do poszczególnych grup.



Rys. 2. Lokalizacja miasta Polski, dla której wyznaczono siedem grup, w których każda jest maksymalnie jednorodna względem zmieniającej się ilości energii promieniowania słonecznego

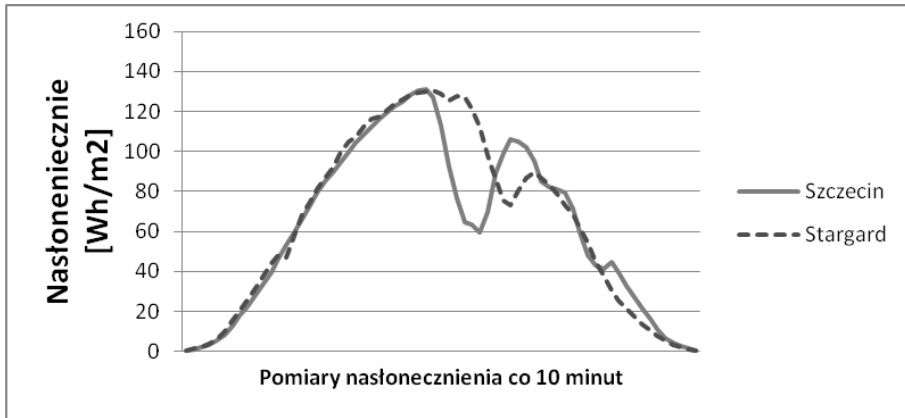
Tabela 1. Liczność grup oraz przynależność poszczególnych miast do grup

Grupa	Liczność	Miasta
1	16	Warszawa, Lublin, Białystok, Radom, Kielce, Olsztyn, Siedlce, Ostrowiec Świętokrzyski, Suwałki, Chełm, Łomża, Elk, Pruszków, Biała Podlaska, Legionowo, Ostrołęka
2	5	Gorzów Wielkopolski, Zielona Góra, Grudziądz, Głogów, Wejherowo
3	3	Szczecin, Gdynia, Stargard Szczeciński
4	15	Wrocław, Częstochowa, Tarnów, Zabrze, Legnica, Piotrków, Lubin, Pabianice, Zamość, Tomaszów Mazowiecki, Przemyśl, Stalowa Wola, Mielec, Bełchatów, Zgierz
5	3	Wałbrzych, Jelenia Góra, Świdnica
6	41	Konurbacja Katowicka, Poznań, Gdańsk, Bydgoszcz, Kraków, Toruń, Rzeszów, Bielsko-Biała, Elbląg, Płock, Włocławek, Koszalin, Słupsk, Konin, Inowrocław, Piła, Ostrów Wielkopolski, Gniezno, Leszno, Tczew, Zawiercie

Analiza wizualna przedstawionej na rysunku XX segmentacji, sugeruje by poddać pod wątpliwość spójność grup siedem oraz trzy. W celu zweryfikowania tego twierdzenia w tabeli 3 przedstawiono współczynniki korelacji dla grupy siódmej, natomiast dla trzeciej wynoszą one odpowiednio: Szczecin-Gdynia 0,8; Gdynia-Stargard 0,8 oraz Szczecin-Stargard 0,93. Silną korelację pomiędzy miastami Szczecin oraz Stargard Szczeciński można wytłumaczyć ich bliskim sąsiedztwem (około 30 km w linii prostej), co bezpośrednio rzutuje na podobieństwo warunków pogodowych. Zależność tą można również uchwycić na wykresie, co przedstawiono na rysunku 3. Widać, iż zmiana nasłonecznienia pomiędzy Szczecinem a Stargardem Szczecińskim jest przesunięta w czasie o pewną wartość. Podobnie w grupie siódmej, tabela 2.

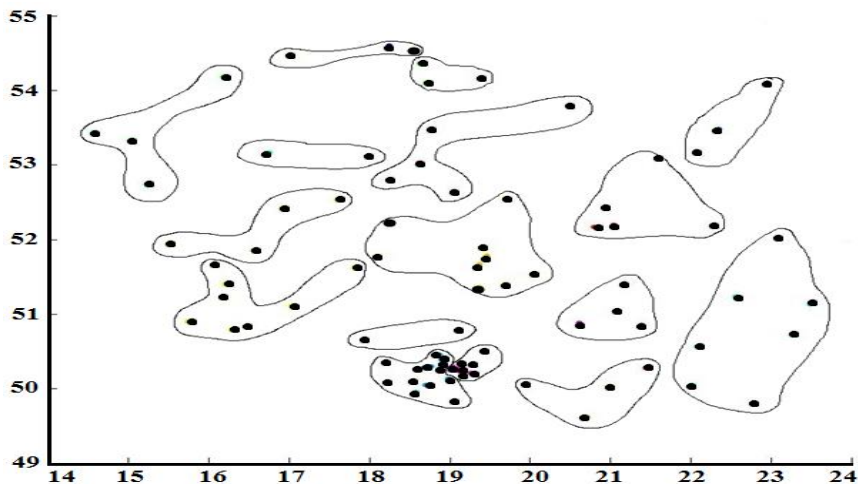
Tabela 2. Współczynniki korelacji dla miast grupy siódmej

Współczynnik korelacji	Łódź	Opole	Nowy Sącz	Starachowice
Łódź	1	0,851	0,763	0,853
Opole	0,851	1	0,764	0,854
Nowy Sącz	0,763	0,764	1	0,782
Starachowice	0,853	0,854	0,782	1



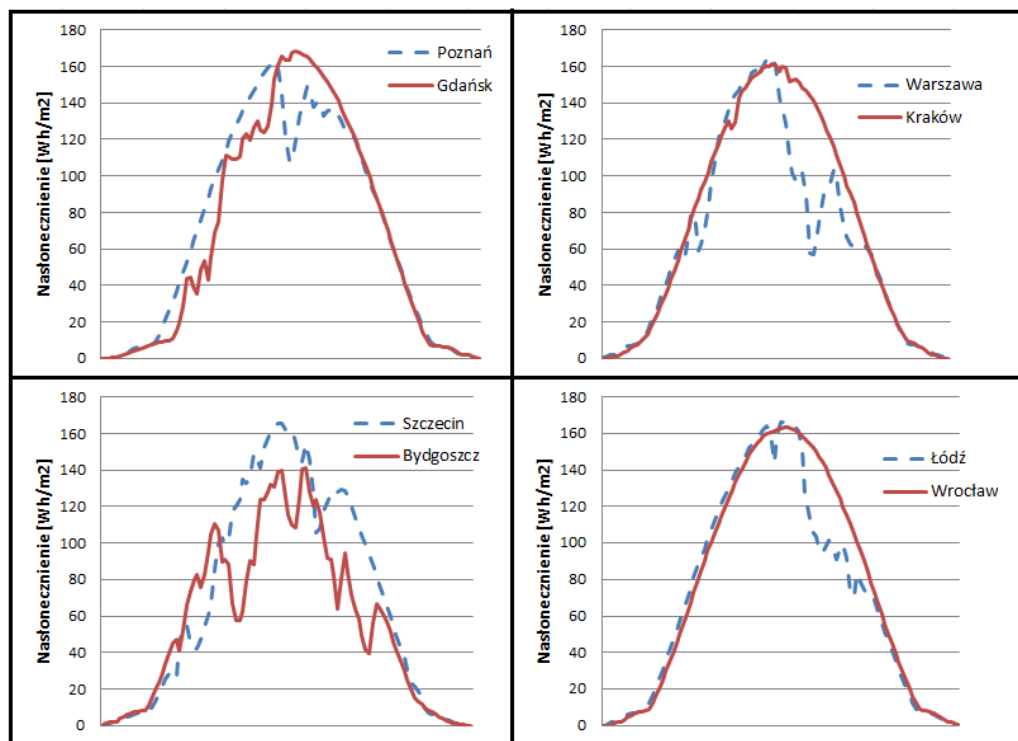
Rys. 3. Przesunięcie w czasie zmian wartości nasłonecznienia dla Szczecina oraz Stargardu Szczecińskiego widoczne po godzinie 12 w południe

Wydzielenie tylko siedmiu grup miast o wysokim podobieństwie w zakresie zmienności nasłonecznienia, po wzięciu pod uwagę powierzchnia, na jakiej są one rozmieszczone nie wydaje się uzasadnione. Na rysunku 4 przedstawiono segmentację miast na 16 grup. Na uwagę zasługuje fakt, wydzielenia z miast województwa Śląskiego trzech grup. Podział terytorium Polski na obszary o dużym podobieństwie fluktuacji nasłonecznienia pozwala na takie rozplanowanie inwestycji z zakresu energetyki słonecznej by zmienność generacji energii elektrycznej (będąca nieodłączną cechą takich instalacji) została zminimalizowana oraz możliwe było przygotowywanie trafnych prognoz uzysku.



Rys. 4. Szesnaście grup miast, cechujących się największą jednorodnością pod kątem zmian wartości nasłonecznienia na przestrzeni roku

Zmienność warunków pogodowych jest kluczowym czynnikiem wpływającym na niestabilność fotowoltaicznych źródeł energii. Małe instalacje są w szczególności podatne na częściowe ograniczenie docierającego do nich promieniowania słonecznego na skutek przemieszczających się chmur. Na rysunku 5 pokazano porównanie wartości nasłonecznienia dla czterech par największych polskich miast. Przedział czasowy obejmuje jeden dzień roku 2005, a pomiar dotyczy konkretnego punktu opisanego współrzędnymi geograficznymi. Wymiary tego punktu są zdefiniowane rozdzielczością obrazu dostarczanego przez satelitę. Należy zwrócić uwagę, iż dla Krakowa i Wrocławia obserwujemy prawie idealną zmianę nasłonecznienia wraz z upływem kolejnych godzin. Oznacza to, iż w danym dniu niebo cechowało się bezchmurnością lub przemieszczanie się pojedynczych chmur nie wpłynęło na wartość nasłonecznienia w wybranej lokalizacji (nie padał tam cień). Natomiast w pozostałych przypadkach wyraźne są duże wahania w ilości promieniowania słonecznego. Szczególnym przypadkiem jest miasto Bydgoszcz, gdzie te fluktuacje osiągają największe sumaryczne wartości.

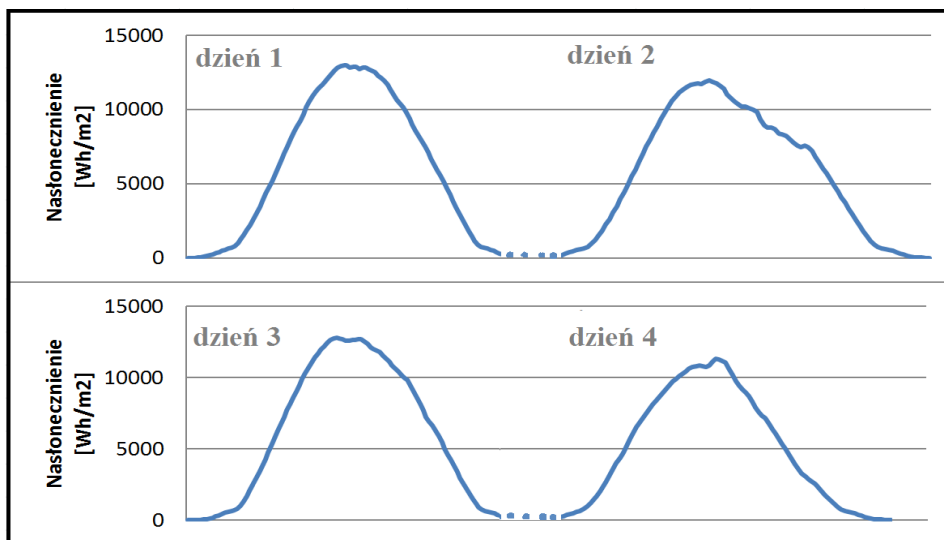


Rys. 5. Porównanie zmienności nasłonecznienia dla par miast, w ciągu wybranego dnia

Zmiany te w sytuacji, gdy systemy te podłączone są do sieci elektroenergetycznej wpływać mogą negatywnie na stabilność sieci. Pojawiające się chwilowe nadwyżki

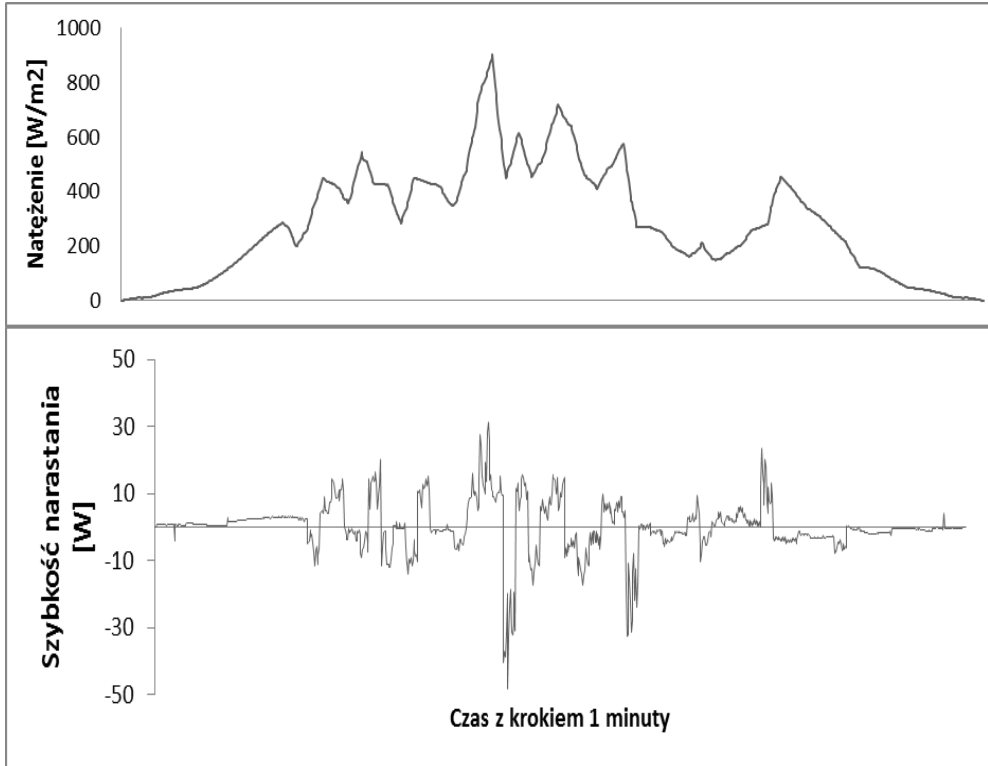


lub niedobory energii, muszą zostać skompensowane poprzez magazyny energii (np. elektrownie szczytowo-pompowe), szybko reagujące elektrownie gazowe lub rezerwę gorącą (ang. spinning reserve). Wszystkie te działania są powszechnie wykorzystywane w systemach elektroenergetycznych jednakże ich stosowanie pociąga za sobą konieczność poniesienia dodatkowych nakładów inwestycyjnych oraz dużych kosztów utrzymania. Sytuacja ta ma miejsce w wypadku niestabilnych, jednakże przewidywalnych, źródeł energii odnawialnej takich jak: energetyka wiatrowa czy słoneczna. W efekcie wprowadzenie do sieci 1 MW mocy elektrycznej z elektrowni wiatrowej lub słonecznej nie jest równoznaczne z zastąpieniem takiej samej mocy wytwórczej ze źródeł konwencjonalnych. Częściowym rozwiązaniem problemu zmienności warunków nasłonecznienia, niepociągającym za sobą dodatkowych nakładów finansowych, wydaje się takie rozmieszczenie instalacji, które pozwoli na osiągnięcie maksymalnej różnorodności warunków atmosferycznych. W poniższym opracowaniu jedynie zasygnalizowano to rozwiązanie, a przykładową sytuację dla grupy instalacji PV zaprezentowano na rysunku 6. Przedstawione na nim zostały zmiany sumy nasłonecznienia padającego na powierzchnię 87 metrów kwadratowych, rozdzieloną równomiernie na 87 lokalizacji. Można zauważyć, iż krzywa uzysku nie odbiega od tej, którą można wykreślić w oparciu o model czystego nieba. Przy czym w godzinach popołudniowych dnia drugiego oraz czwartego wyraźnie doszło do załamania warunków atmosferycznych na obszarze części analizowanych lokalizacji.

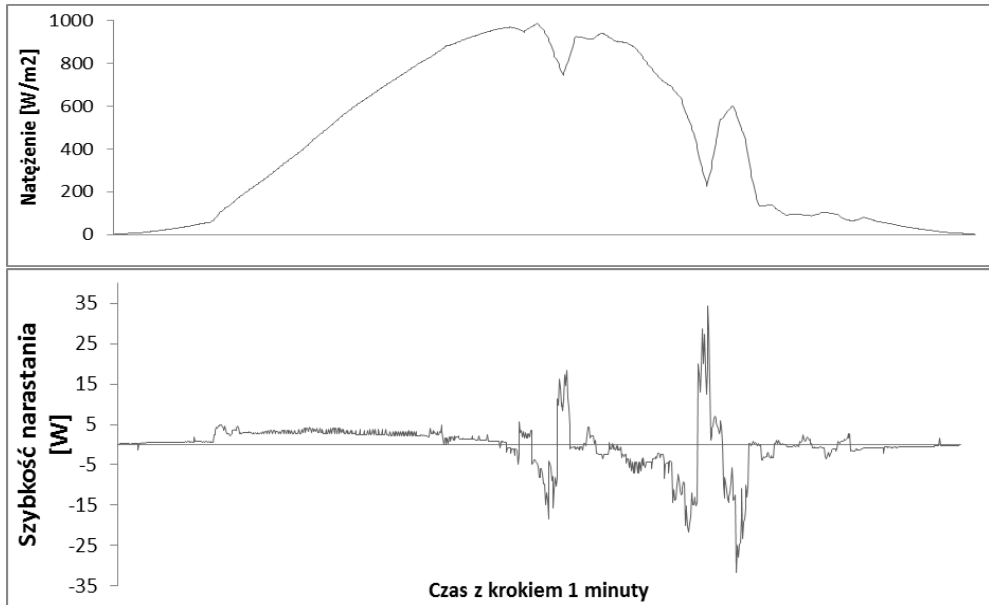


Rys. 6. Krzywa zmian nasłonecznienia, będącego sumą odczytów dla 87 lokalizacji w Polsce w przeciągu czterech kolejnych dni, począwszy od 131 dnia roku

Na kwestię fluktuacji promieniowania słonecznego należy spojrzeć również z punktu widzenia mocy, a nie tylko energii. Gdyż to natężenie promieniowania słonecznego przekłada się bezpośrednio na generowaną moc elektryczną przez daną instalację. Na rysunkach 7 oraz 8 pokazano zmiany wartości natężenia, z krokiem czasowym wynoszącym 1 min. Oznacza to, że wartości te były odczytywane, co minutę. W górnej części obu rysunków pokazano krzywą natężenia promieniowania słonecznego dla dwóch kolejnych dni roku w Wrocławiu. Natomiast w drugiej części rysunku zobrazowano samą zmienność natężenia definiowaną, jako szybkość narastania (ang. ramp rate). Jeśli krzywa szybkości narastania oscyluje wokół zera, oznacza to, iż przyrost lub spadek wartości natężenia promieniowania słonecznego jest niewielki, i zgodny z krzywą dla warunków czystego nieba. Sytuację taką obserwujemy na rysunku ZYC, w pierwszej połowie dnia, do godziny około 12.

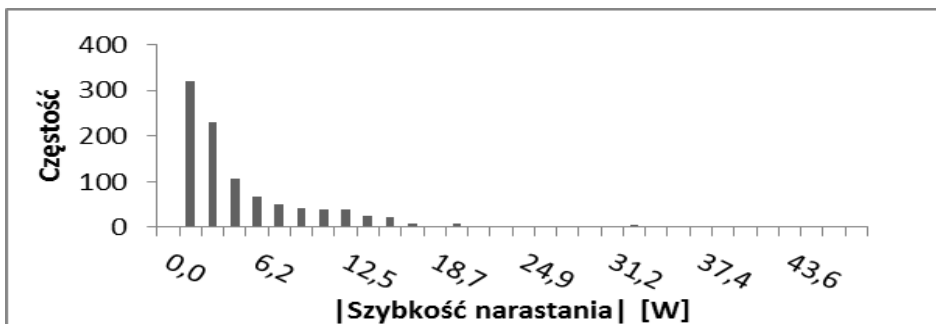


Rys. 7. Wrocław – zmienność natężenia promieniowania słonecznego oraz szybkości narastania, dzień pierwszy

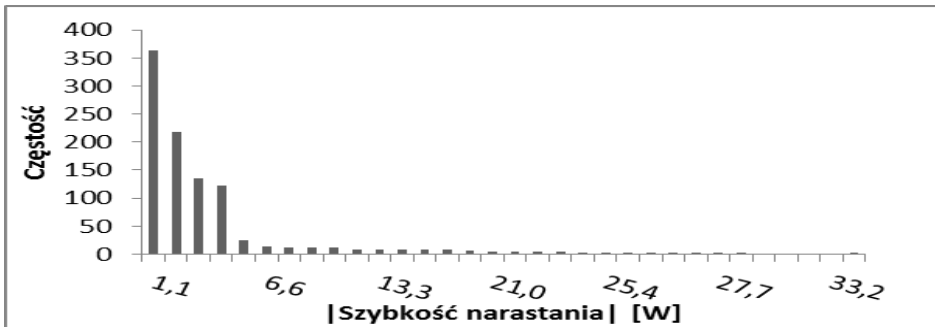


Rys. 8. Wrocław – zmienność natężenia promieniowania słonecznego oraz szybkości narastania, dzień drugi

Ważne jest by zrozumieć, jakie wartości parametru szybkość narastania dominują dla danej lokalizacji. Analizę dla dwóch dni z rysunków 7 oraz 8 przedstawiono na histogramach znajdujących się na rysunkach 9 i 10. Widać wyraźnie, iż dominują wartości mniejsze niż 20 W – dla pierwszego przypadku oraz mniejsze niż 7 W dla drugiego przypadku. Parametr szybkość narastania podany został w wartości bezwzględnej. Należy mieć jednak na uwadze, iż wartości te odnoszą się do powierzchni 1 m<sup>2</sup> tak, więc dla większych instalacji wartości te należy odpowiednio przeskalować, uwzględniając charakterystykę wykorzystanych modułów fotowoltaicznych.



Rys. 9. Histogram dla wartości parametru szybkość narastania dzień pierwszy



Rys. 10. Histogram dla wartości parametru szybkość narastania dzień drugi

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysnuć następujące wnioski:

- wraz z rosnącą odległością pomiędzy instalacjami PV maleje wartość współczynnika korelacji opisującego zależność pomiędzy odpowiadającymi im zmianami nasłonecznienia;
- możliwe jest wskazanie miast, na obszarze Polski, które cechują się podobną zmiennością w zakresie wartości nasłonecznienia;
- podzielenie systemu PV, o danej mocy  $X$  [MW], na równomiernie rozmieszczonych lokalizacjach, przy czym moc nowych systemów równa jest  $X/Y$  [MW] gdzie  $Y$  to liczba nowych lokalizacji, pozwala na wygładzenie krzywej uzysku energii elektrycznej. Jest to tak zwany przestrzenny efekt wygładzający, opisany między innymi w [5].

Zmniejszające się nakłady inwestycyjne, rosnący trend cen energii ze źródeł konwencjonalnych oraz wzrost sprawności konwersji fotowoltaicznej powoduje, iż parytet sieci dla instalacji fotowoltaicznych może zostać osiągnięty w Polsce w przeciągu najbliższych lat. W związku z tym, konieczne jest podjęcie działań mających na celu zminimalizowanie wpływu zmienności warunków słonecznych na funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego. W szczególności winny zostać uwzględnione takie zadania, które w sposób niepociągający dodatkowych nakładów pozwalają zredukować zmienność uzysku z instalacji PV w skali kraju. Rozumie się przez to takie rozmieszczenie systemów PV, które pozwala na generowanie względnie stabilnej i przewidywalnej ilości energii w ciągu kolejnych godzin dnia. Można, więc przyjąć, iż z punktu widzenia stabilności systemu energetycznego korzystniejsze są małe, ale rozproszone na dużym obszarze instalacji fotowoltaiczne niż jedna duża farma podatna na zmienność warunków atmosferycznych jednej konkretnej lokalizacji.

## LITERATURA

- [1] BIRD R. E., HULSTROM L. R. (1981). *A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces*. Solar Energy Research Institute. SERI/TR-642-761
- [2] HOFF T.E., PEREZ R., *Quantifying PV power Output Variability*. Solar Energy, 2010, Vol. 84, No. 8, 1782-1793
- [3] HOFF T.E., PEREZ R., *Modeling PV Fleet Output Variability*. Solar Energy, 2012, Vol. 86, No. 8, 2177-2189
- [4] International Energy Agency. (2013). *Photovoltaic and Solar Forecasting: State of the Art*. <http://iea-pvps.org/>
- [5] KLEISSL J., *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, Elsevier, San Diego 2013
- [6] PEREZ, M., Fthenakis, V., (2012). *Quantifying Long Time Scale Solar Resource Variability*. Materiały konferencyjne: World Renewable Energy Forum, Denver, CO.
- [7] <http://www.soda-is.com/> (SODA) dostęp 23.01.2015

## SPATIAL DISTRIBUTION IMPACT ON PHOTOVOLTAIC SOURCES STABILITY

This work aims to study the impact of spatial distribution on stability of energy yield from photovoltaic installations. Site-pair correlation for one year-period for 87 cities in Poland has been presented, showing decreasing trend with increasing distance separating each pair. Further, an analysis of similarity between certain groups of cities was conducted in order to single out sets which solar conditions are similar and correlate. The last part of this work was to assess the impact of sudden changes in irradiance, which cause swift fluctuations in power output from PV system.