

doi:10.15199/48.2019.10.23

## Analiza autokorelacji przestrzennej mocy wytwórczych w OZE na terenie Polski

**Streszczenie.** Generacja energii elektrycznej w rosnącej liczbie instalacji Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) z czasem wywierać będzie coraz większy wpływ na funkcjonowanie Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE). W oparciu o stan mocy zainstalowanej OZE na koniec 2018 r. (publikacja URE), przeprowadzono analizę autokorelacji przestrzennej dla poszczególnych technologii wytwarzania w celu identyfikacji, czy na terenie kraju zachodzi klasteryzacja mocy danego typu źródeł wytwórczych.

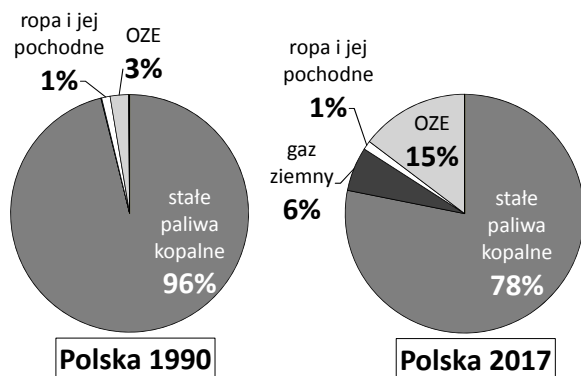
**Abstract.** Growing electric energy generation from Renewable Energy Sources (RES) will increasingly influence the operation of the national power system. Based on the actual state of RES installed power (published by Energy Regulatory Office), the spatial autocorrelation analysis was conducted for particular generation technologies in order to identify the presence of clusters of a given type of RES. (**Spatial autocorrelation analysis of the RES generating power in Poland**).

**Słowa kluczowe:** Odnawialne Źródła Energii, autokorelacja przestrzenna, statystyka Morana I, python PySAL.

**Keywords:** Renewable Energy Sources, spatial autocorrelation, Moran's I statistic, python PySAL.

### Wstęp

Krajowy rynek OZE jest w fazie dynamicznej ekspansji, wspartej prawodawstwem na szczeblu międzynarodowym i krajowym. Porównując struktury wytwarzania energii elektrycznej brutto w Polsce dla lat 1990 i 2017 (Rys. 1) zauważyć można znaczący postęp w tej przestrzeni. Z biegiem lat, w polskim miksie wytwarzania istotnymi stały się również elektrociepłownie gazowe. Stopniowe odejście od stałych paliw kopalnych jako podstawowego źródła energii pierwotnej w elektroenergetyce stało się globalnym trendem, zauważalnym w szczególności w państwach zamożnych. Droga ku transformacji energetycznej w kierunku OZE nie jest jednak pozbawiona przeszkód, zarówno o charakterze ekonomicznym jak i technicznym – polski Krajowy System Elektroenergetyczny (KSE), działający głównie w oparciu o spalanie węgla kamiennego i brunatnego jest tego adekwatnym przykładem [1]. Artykuł dotyczy analizy autokorelacji przestrzennej mocy zainstalowanej OZE w podziale na powiaty, która pozwoli na określenie równomierności rozwoju źródeł OZE na terenie całego kraju.



Rys. 1 Struktura wytwarzania energii elektrycznej brutto w Polsce w latach 1990 i 2017 (Eurostat)

### Regulacja w sektorze OZE

W dyrektywie RED (2009/28/WE) [2] Komisja Europejska wyznaczyła cel udziału OZE w całkowitym zużyciu energii Unii Europejskiej na poziomie 20% do 2020 r. oraz zobligowała państwa członkowskie do przygotowania indywidualnych strategii w tym zakresie. W ramach Krajowego Planu Działania w Zakresie Energii ze Źródeł Odnawialnych (KPD) [3] Polska zobowiązała się do

osiągnięcia 15-procentowego udziału OZE w całkowitym zużyciu energii do 2020 r. W 2018 roku, dyrektywa RED II [4], będąca częścią tzw. „Pakietu Zimowego”, zwiększyła europejski cel udziału OZE do 32%, jednakże bez konieczności aktualizacji KPD. Według GUS, udział OZE w zużyciu energii w Polsce wyniósł w 2017 r. 11,0% wobec 11,3% w roku 2016. Niespełnienie celów OZE wiąże się z koniecznością wirtualnego odkupienia brakującej energii z OZE od Państw, które wykazały nadwyżkę – tzw. „transfer statystyczny”, który wg. Najwyższej Izby Kontroli kosztować może 8 mld zł [5].

Wypełnienie przez Polskę celu 15% udziału OZE w całkowitym zużyciu energii zależy w dużej mierze od sektora elektroenergetycznego. Na poziomie krajowym, aktami nadającymi kształt rynkowi OZE jest ustawa Prawo Energetyczne [6] oraz ustawa OZE [7], która określa zasady funkcjonowania oraz wspierania wytwórców energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Wytwórcy energii elektrycznej z OZE mogą uzyskać wsparcie poprzez uzyskanie świadectw pochodzenia i sprzedaż tzw. „zielonych certyfikatów”, bądź na drodze udziału w aukcjach OZE.

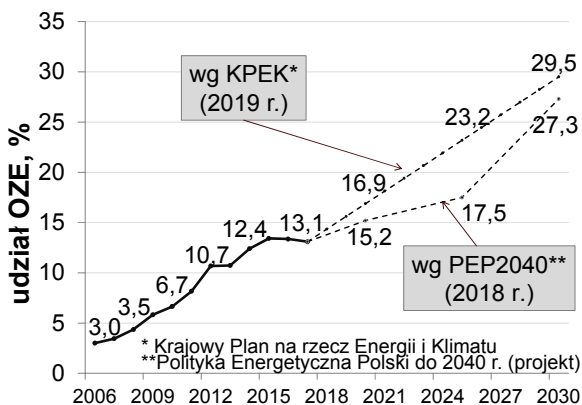
### Krajowe strategie w zakresie OZE

KPD, jak również i Polityka Energetyczna Polski do 2030 roku (PEP2030) [8] są dokumentami opracowanymi blisko dekadę temu, toteż nie obejmują aktualnego stanu technologicznego i ekonomicznego w branży OZE, za czym idzie konieczność aktualizacji założeń i prognoz, będących fundamentem krajowej długoterminowej strategii. Odpowiedzią na potrzebę wyznaczenia nowej „mapy drogowej” dla energetyki OZE są projekty PEP2040 [9] oraz Krajowego Planu na rzecz Energii i Klimatu na lata 2021-2030 (KPEK) [10], będącego realizacją obowiązku nałożonego przez rozporządzenie [11]. W obu projektach zakłada się dynamiczny wzrost udziału OZE w wytwarzaniu energii elektrycznej, co pokazano na Rysunku 2.

Należy w tym punkcie podkreślić, iż zarówno KPEK i PEP2040 są projektami, a ich ostateczne wersje nie są jeszcze znane. W obu dokumentach zakłada się dalszy wzrost udziału OZE w generacji energii elektrycznej, który w 2030 roku ma osiągnąć poziomu blisko 30%.

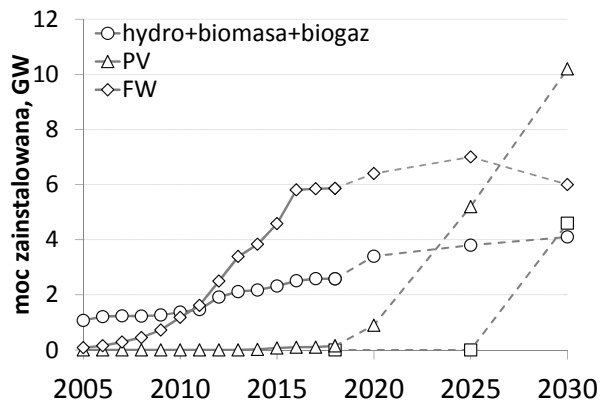
Strategia KPEK zawiera również prognozy mocy zainstalowanej w poszczególnych typach OZE w perspektywie 2030 r. (Rys. 3), co można interpretować jako wskazanie potencjalnie najbardziej preferowanych oraz subsydiowanych przez państwo rodzajów OZE, którymi są

ogniwa fotowoltaiczne oraz morskie turbiny wiatrowe. Uwagę zwraca wysoki szacowany poziom ponad 10 GW mocy w 2030 r. w farmach fotowoltaicznych, których całkowita moc zainstalowana obecnie kształtuje się w granicach 700 MW.



Rys. 2 Progniza udziału OZE w wytwarzaniu energii elektrycznej brutto wg KPEK i PEP2040

Jak wynika z danych GUS, w 2016 i 2017 odnotowano spadek udziału energii odnawialnej w zużyciu energii finalnej. Problemem Polski w utrzymaniu tempa zwiększania wartości tego wskaźnika jest utrzymujący się wzrost zapotrzebowania na energię w każdej jej postaci. Ograniczając się do sektora elektroenergetycznego, przyrost mocy zainstalowanej (a tym samym produkcji energii) w OZE jest zbyt wolny w stosunku do zwiększającego się popytu na energię u odbiorców. Jednakże, zarówno w PEP2040 oraz w KPEK zakłada się odbudowanie trendu wznoszącego dla rozwoju mocy wytwórczych z OZE, co ma stać się za sprawą kontraktacji znaczących wolumenów w aukcjach OZE w 2019 r.



Rys. 3 Progniza mocy zainstalowanej wg KPEK

Ministerstwo Energii planuje również wykorzystanie potencjału tkwiącego w morskich elektrowniach wiatrowych – technologia *offshore*. Aktualnie, źródła tego typu nie są wykorzystywane w KSE, jednakże w państwach będących liderami w zakresie OZE są już powszechnością. Tylko w 2018 r., w Europie zainstalowano łącznie 409 nowych turbin wiatrowych o mocy 2,65 GW, gdzie zdecydowana większość nowych instalacji przypada na Niemcy i Wielką Brytanię (WindEurope). Powołując się na KPEK, w 2030 r. do polskiej sieci elektroenergetycznej przyłączonych może zostać przyłączonych ponad 4 GW mocy zainstalowanej w *offshore*, a dostawy energii z pierwszej polskiej morskiej farmy wiatrowej mogą mieć miejsce już w roku 2025. W specjalnej strefie na Bałtyku zaplanowano budowę kilkunastu elektrowni tego typu. Co więcej, warunki

przyłączeniowe udzielone przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne (PSE) uzyskały już projekty o łącznej mocy ponad 7 GW. PEP 2040 zakłada dla morskich farm wiatrowych łączną moc na poziomie 10 GW do roku 2040.

Poza realizacją celów klimatycznych wynikających z zobowiązań wspólnotowych, rozwój OZE jest aspektem kluczowym z punktu widzenia funkcjonowania sieci elektroenergetycznej. 26 marca bieżącego roku Operator Sieci poinformował o pobiciu kolejnego rekordu zapotrzebowania na moc w szczycie porannym okresu letniego, który wyniósł ponad 24,1 GW o godzinie 13:13. Warty podkreślenia jest struktura źródeł mocy, które pokryły wyjątkowo wysoki poziom zapotrzebowania – jedynie 0,7 GW generacji pochodziło z elektrowni wiatrowych, których sumaryczna moc zainstalowana w KSE wynosi blisko 6 GW. Jednocześnie, miał miejsce najwyższy jak dotąd poziom mocy poboru energii z za granicy, który wyniósł 2,7 GW (ponad 10% zapotrzebowania na moc). Świadczy to o ograniczonej warunkami atmosferycznymi dyspozycyjności OZE (w tym partykularnym przypadku źródeł wiatrowych).

Zauważyć można rozbieżność pomiędzy wartością udziału OZE w wytwarzaniu energii elektrycznej brutto porównując dane dla roku 2017 przedstawione na Rysunku 2 (13,1%) oraz na Rysunku 1 (14,65%). Dane dla obu wykresów pochodzą z różnych źródeł (Rys. 1 – Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., Rys. 2 – Eurostat) i różnią się również pod względem wielkości całkowitej generacji w 2017 r. (167,85 TWh wg PSE wobec 165,85 TWh wg Eurostatu). Niezgodność co do otrzymanych wyników wynikać może z odmiennych sposobów pozyskiwania danych przez oba podmioty.

#### Autokorelacja przestrzenna

Statystyka przestrzenna wykorzystywana jest powszechnie do oceny wielu zjawisk ekonomicznych, strukturalno-przemysłowych, społecznych oraz demograficznych, ponieważ wiele z nich uzależnionych jest od położenia na danym obszarze [11]. Autokorelację rozumie się jako zwiększenie/zmniejszenie się prawdopodobieństwa występowania zjawiska w jednostkach sąsiadujących z daną jednostką przestrzenną, w której to zjawisko zachodzi/nie zachodzi [12]. Przedmiotami analizy przestrzennej mogą być różnorakie wskaźniki/wielkości opisujące kwantytatywnie dane zjawisko, na przykład ceny transakcyjne na rynku nieruchomości (Cellmer, 2012), długość infrastruktury wodno-ściekowej (Woźniak i Sikora, 2007), miesięczne wynagrodzenie (Pośpiech i Mastalerz-Kodzis, 2015) czy wskaźniki ubóstwa (Kołodziejczak i Kossowski, 2016). W przypadku niniejszej pracy przedmiotem badań analitycznych jest moc zainstalowana w poszczególnych rodzajach OZE, przypisana do jednostek terytorialnych na poziomie powiatów.

Spśród dostępnych w literaturze miar autokorelacji, wyodrębnić można dwie zasadnicze grupy: miary o charakterze globalnym (które odzwierciedlają siłę autokorelacji w całej analizowanej przestrzeni) i lokalnym (gdzie celem jest identyfikacja zależności w ograniczonym rejonie) [12]. W literaturze, najpowszechniej stosowaną miarą wyrażającą globalną przestrzenną autokorelację analizowanej zmiennej jest statystyka *I* Morana, która wyraża się wzorem [13]:

$$(1) \quad I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} (x_j - \bar{x})(x_i - \bar{x})}{S_0 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

gdzie:  $n$  – liczba jednostek przestrzennych (tutaj: powiatów),  $c_{ij}$  – elementy macierzy sąsiedztwa  $C$ ,  $S_0$  – suma elementów macierzy sąsiedztwa  $C$ ,  $x_i$  – wartości obserwacji dla  $i$ -tej jednostki (tutaj: mocy zainstalowanej).

W przypadku otrzymania wartości  $I$  równej 0, stwierdza się brak występowania autokorelacji przestrzennej. Dodatnia wartość  $I$  oznacza występowanie badanego zjawiska na podobnym poziomie w granicach sąsiadujących ze sobą jednostek, natomiast otrzymanie wartości  $I$  poniżej 0 świadczy o zróżnicowanych wartościach zjawiska w sąsiedztwie. Macierz sąsiedztwa  $C$  jest macierzą kwadratową, określającą w sposób binarny (zerojedynkowy) sąsiedztwo pomiędzy dwoma jednostkami. Jeżeli sąsiedztwo zachodzi,  $c_{ij}$  przyjmuje wartość 1, w przeciwnym wypadku 0. W zależności od charakteru badanej przestrzeni, sąsiedztwo określane może być w oparciu o różne kryteria: wspólnej granicy, długości wspólnej granicy, odległości między obiektami czy odwrotności odległości. W zdecydowanej większości prac w miejsce macierzy sąsiedztwa  $C$  stosuje się macierz wag przestrzennych  $W$ , która oprócz sąsiedztwa odzwierciedla również siłę powiązań pomiędzy elementami przestrzeni. Spośród pięciu dostępnych wariantów macierzy wag sąsiedztwa (Kopczewska, 2006), na potrzeby niniejszej analizy wykorzystano macierz wag wg kryterium wspólnej granicy, pierwszego rzędu standaryzowaną rzędami. Standaryzacja polega na podzieleniu wagi danej jednostki przez sumę wag wszystkich jednostek będących w sąsiedztwie:

$$(2) \quad W_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{j=1}^n c_{ij}}$$

W celu oceny istotności współczynnika  $I$  przeprowadza się weryfikację hipotezy zerowej o braku autokorelacji przestrzennej oraz o jej istnieniu:

$$(3) \quad \begin{aligned} H_0 : I &= 0 \\ H_1 : I &\neq 0 \end{aligned}$$

Przyjęcie bądź odrzucenie hipotezy zerowej odbywa się poprzez obliczenie statystyki testowej  $Z_I$  o rozkładzie normalnym:

$$(4) \quad Z_I = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{var}(I)}} = \frac{I - \frac{-1}{n-1}}{\sqrt{\text{var}(I)}}$$

gdzie:  $E(I)$  – wartość oczekiwana,  $\text{var}(I)$  – wariancja.

Na podstawie otrzymanego wyniku  $Z_I$  wyznacza się parametr  $p$  i porównuje jego wartość z założonym poziomem istotności  $\alpha$  (w analizie przyjęto poziom 0,05). Jeżeli wartość  $p$  jest mniejsza bądź równa  $\alpha$ , hipoteza zerowa  $H_0$  jest odrzucana, a przyjmuje się hipotezę alternatywną  $H_1$ .

### Przebieg analizy

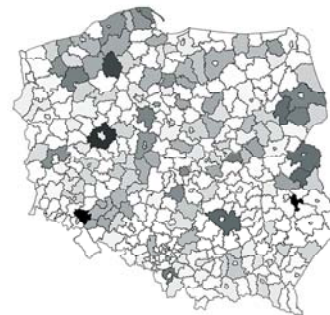
Analizie poddano stan mocy zainstalowanej w OZE na dzień 31 grudnia 2018 roku w podziale na powiaty, udostępniony przez URE. Dane wyodrębniono dla 15 różnych grup technologii wytwórczych zagregowano do 5 podstawowych zmiennych: elektrownie wiatrowe (FW), słoneczne (PV), biogazowe, biomasowe i hydroelektrownie, które analizowano jako odrębne zjawiska. Ponadto, utworzono dodatkową zmienną „suma”, która reprezentuje całkowitą moc zainstalowaną w OZE w danym powiecie.

Dane przestrzenne jednostek administracyjnych Polski zaczerpnięto z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii. Do przeprowadzenia obliczeń statystycznych użyto biblioteki PySAL, będącej pakietem narzędzi do analizy przestrzennej w języku programowania Python.

Dane zwizualizowano przy pomocy narzędzia kartogramu aplikacji MS Power BI Desktop. Dla każdej zmiennej obliczono wartość statystyki Morana  $I$ , statystyki testowej  $Z_I$  oraz wyznaczono wartość parametru  $p$ . Przyjęta wartość poziomu istotności wyniosła 0,05.

### Wyniki analiz

Rezultaty analizy przestrzennej przedstawiono w sposób graficzny na kartogramach oraz w formie tabelarycznej dla poszczególnych zmiennych.



elektrownie biogazowe	
$I$	0,022244
$E(I)$	-0,002639
$\text{var}(I)$	0,001143
$Z_I$	0,736102
$p$	0,461668

Rys. 4 Wyniki obliczeń autokorelacji przestrzennej dla mocy zainstalowanej w źródłach biogazowych



elektrownie biomasowe	
$I$	-0,019671
$E(I)$	-0,002639
$\text{var}(I)$	0,001143
$Z_I$	-0,503875
$p$	0,614349

Rys. 5 Wyniki obliczeń autokorelacji przestrzennej dla mocy zainstalowanej w źródłach biomasowych



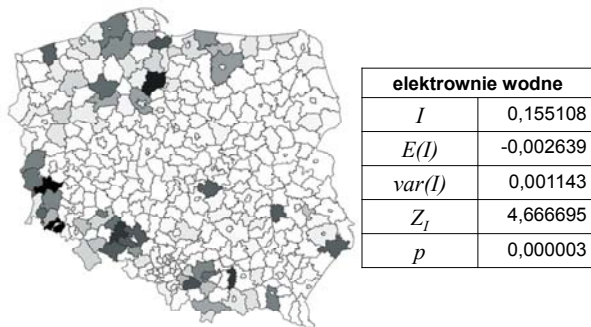
elektrownie wiatrowe	
$I$	0,209253
$E(I)$	-0,002639
$\text{var}(I)$	0,001143
$Z_I$	6,268498
$p$	0,000001

Rys. 6 Wyniki obliczeń autokorelacji przestrzennej dla mocy zainstalowanej w źródłach wiatrowych

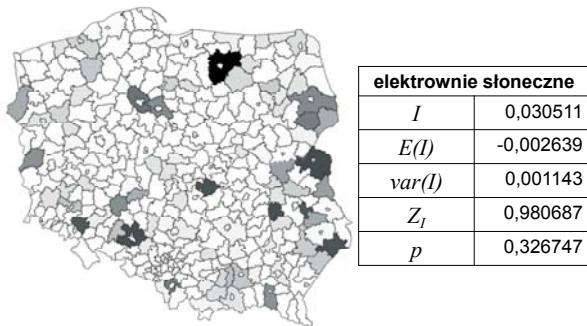
Jak wskazują wyniki przeprowadzonych analiz, w ujęciu generalnym, poziom całkowitej mocy zainstalowanej w OZE w danym powiecie uzależniona od obserwowanego poziomu mocy w powiatach ościennych, o czym świadczy dodatnia wartość statystyki  $I$  Morana i jej istotność mierzona wartością parametru  $p$ . Podobną tendencją, spośród wyszczególnionych rodzajów OZE, wykazują elektrownie wiatrowe oraz wodne. Występowanie farm wiatrowych oraz elektrowni wodnych uzależnione jest silnie



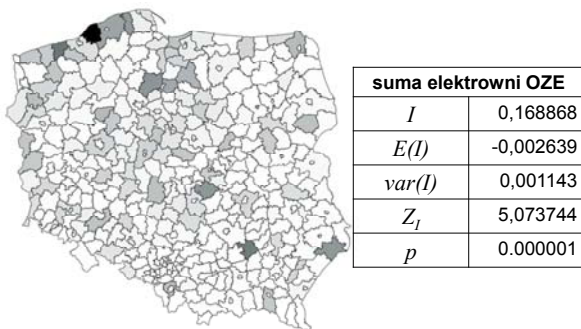
od dostępności zasobów naturalnych (w przypadku tych drugich - cieków rzecznych, w przypadku pierwszych – stałych wiatrów o odpowiedniej prędkości), przez co klasteryzacja tych źródeł w danych obszarach kraju (widoczna również na przedstawionych na wykresach kartogramach) jest wyraźna.



Rys. 7 Wyniki obliczeń autokorelacji przestrzennej dla mocy zainstalowanej w źródłach wodnych



Rys. 8 Wyniki obliczeń autokorelacji przestrzennej dla mocy zainstalowanej w źródłach słonecznych



Rys. 9 Wyniki analiz autokorelacji przestrzennej dla mocy zainstalowanej poszczególnych technologii OZE

Dla zmiennych reprezentujących poziom mocy w elektrowniach biomasowych, biogazowych i słonecznych obserwuje się równomierne rozłożenie mocy na terenie kraju, z kilkoma „wyspami” wyróżniającymi się wyraźnie wyższymi wartościami, jednakże pozbawionymi podobnych sobie sąsiadów. Obserwację potwierdzają wyniki analizy statystycznej, które świadczą o braku autokorelacji

przestrzennej (blisko zerowe wartości statystyki  $I$  oraz wartości  $p$  znacząco przekraczające zadany poziom istotności  $\alpha$ ).

## Wnioski i podsumowanie

W artykule omówiono kluczowe zagadnienia w zakresie rozwoju OZE w Polsce oraz przedstawiono wyniki analizy autokorelacji przestrzennej mocy zainstalowanej w źródłach odnawialnych, dokonanej przy pomocy statystyki globalnej Morana  $I$ . Analiza wykazała występowanie autokorelacji przestrzennej dla mocy w elektrowniach wodnych oraz wiatrowych. Za główną przyczynę zintensyfikowanego rozwoju źródeł tego typu w poszczególnych rejonach kraju uznaje się dostępność i potencjał wykorzystania zasobów niezbędnych do wytworzenia energii, jednakże zdaniem autorów, polityka regionalna w postaci funduszy wspierających inwestycje w OZE, jak również i rola samorządów nie pozostają bez znaczenia w tej kwestii.

Autorzy możliwości kontynuacji i poszerzenia badań opisanych w niniejszym artykule upatrują w udostępnieniu przez URE historii wykorzystanych danych oraz ich dalszej cyklicznej aktualizacji w nadchodzących latach, co pozwoliłoby na śledzenie dynamiki zmian rozwoju OZE w Polsce w ujęciu czasowo-przestrzennym.

**Autorzy:** mgr inż. Radomir Rogus, Polska Grupa Górnicza, Zespół analiz rynkowych, ul. Powstańców 30, 40-039 Katowice, E-mail: [r.rogus@pgg.pl](mailto:r.rogus@pgg.pl); mgr inż. Łukasz Mazanek, Polska Grupa Górnicza, Zespół analiz rynkowych, ul. Powstańców 30, 40-039 Katowice, E-mail: [l.mazanek@pgg.pl](mailto:l.mazanek@pgg.pl).

## LITERATURA

- [1] Janik W., Kaproń H., Paździor A., Uwarunkowania rozwoju produkcji energii elektrycznej na bazie źródeł odnawialnych, *Rynek Energii*, 135 (2018), nr. 2
- [2] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych
- [3] Ministerstwo Gospodarki, Krajowy plan w zakresie energii ze źródeł odnawialnych (2010)
- [4] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych
- [5] Najwyższa Izba Kontroli, *Rozwój sektora odnawialnych źródeł energii*, informacja o wynikach kontroli Nr ewid. 171/2017/P/17/020/KGP
- [6] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne, Dz.U. 1997 nr 54 poz. 348
- [7] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz. U. 2015 poz. 478
- [8] Ministerstwo Gospodarki, Polityka Energetyczna Polski do 2030 r., Załącznik do uchwały z dnia 10 listopada 2009 r.
- [9] Ministerstwo Energii, Polityka energetyczna Polski do 2040 r. – projekt, 2018.
- [10] Ministerstwo Energii, Krajowy plan na rzecz energii i klimatu, projekt, 2019.
- [11] Pośpiech E., Mastalerz-Kodzis A., Autokorelacja przestrzenna wybranych charakterystyk społeczno-ekonomicznych, *Metody ilościowe w badaniach ekonomicznych*, XVI (2015), nr. 4, 85-94
- [12] Cellmer R., Analiza zjawiska autokorelacji przestrzennej cen transakcyjnych na rynku nieruchomości lokalowych, *Acta Sci. Pol., Administratio Locorum*, 11 (2012), nr 1, 51-63
- [13] Moran P.A.P., The Interpretation of Statistical Maps, *Journal of the Royal Statistical Society*, B10 (1947), 243-251