

**Marcin Kostrzewa**

## **Układy hybrydowe jako jeden ze sposobów zapewnienia wzrostu bezpieczeństwa energetycznego Polski**

### **Abstrakt**

W artykule opisano oraz przeanalizowano ideę układów hybrydowych, wprowadzonych nowelizacją ustawy o odnawialnych źródłach energii z 22 czerwca 2016 r. Układy te powodują, iż konkurencja między producentami energii elektrycznej staje się bliższa idei wolnorynkowej. Tania, ale nie zawsze dostępna energia elektryczna generowana przez elektrownie wiatrowe może być w łatwy sposób uzupełniona instalacją spalania biomasy lub inną technologią, wskutek czego dyspozycyjność całego układu znacząco wzrośnie niwelując tym samym niepewność generacji farmy wiatrowej oraz przyczyniając się do wzrostu bezpieczeństwa energetycznego Polski.

**Słowa kluczowe:** *układy hybrydowe, bezpieczeństwo energetyczne Polski, odnawialne źródła energii*

---

## **Hybrid systems as one of the ways to increase Poland's energy security**

### **Abstract**

The article describes and analyzes the idea of hybrid systems introduced to Polish Law by amended Renewable Energy Sources Act dated 22nd of June 2016. The application of hybrid systems will lead electricity producers to a bit closer free-market idea. Cheap but not always available electricity generated by wind power plants can be easily supplemented by biomass combustion installation or other technology. This will significantly rise the availability of the whole system resulting in wind farm generation uncertainty reduction and contributing to the increase of Poland's energy security.

**Keywords:** *Hybrid systems, Poland's energy security, renewable energy sources*

---

## Wstęp

W świetle definicji bezpieczeństwa energetycznego zawartej w ustawie z 10 kwietnia 1997 roku Prawo Energetyczne, ekonomiczne uzasadnienie realizacji projektów inwestycyjnych związanych z energetyką stanowi – obok aspektów technicznych oraz środowiskowych – o stanie gospodarki umożliwiającym pokrycie bieżącego, ale również perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców w paliwa i energię (Prawo energetyczne 1997).

Wymiar techniczny utożsamiany jest najczęściej z technologiami pozwalającymi generować energię elektryczną w sposób stabilny, tj. taki, który równoważy dostawy energii elektrycznej z zapotrzebowaniem na tę energię. Perspektywa środowiskowa powinna być rozumiana jako działania podejmowane w taki sposób, aby zachować lub przywrócić równowagę przyrodniczą (Prawo ochrony środowiska 2001). Wymiar ekonomiczny identyfikowany jest natomiast z kosztami energii, dla których jednostka wytworzonej energii powinna być jak najtańsza.

Najbardziej powszechnym modelem przyjmowanym do analiz ekonomicznych, który służy do określenia i porównywania kosztów produkcji energii dla każdej z technologii odnawialnych źródeł energii (OZE) jest wskaźnik uśrednionego kosztu energii elektrycznej (ang. *Levelized Costs of Electricity* – LCOE). W tym wskaźniku koszty wytwarzania energii obliczane są jako minimalna cena, przy której suma przychodów jest równa sumie kosztów poniesionych na budowę, eksploatację oraz finansowanie w szczególności kosztu kapitału własnego w danym okresie (Instytut Energetyki Odnawialnej 2013).

W na potrzeby niniejszego artykułu, w celu porównania kosztów wytworzenia energii w poszczególnych regionach świata i w Polsce oraz zmian tych kosztów w czasie, wykorzystano standard liczenia tzw. uproszczonego kosztu rozłożonego lub „zlinearyzowanego” (ang. *Levelized Cost of Electricity* – LCOE) (*ibidem*).

W ogólnym przypadku koszt LCOE oblicza się jako stosunek wydatków do uzysku energii elektrycznej, korzystając z niżej zamieszczonej zależności:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^N \frac{[I_t + M_t]}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

gdzie:

LCOE – jednostkowy uśredniony koszt produkcji energii w cyklu życia wyrażony w [PLN/MWh] lub [PLN/kWh];

$I_t$  – nakłady inwestycyjne w roku t-tym;

$M_t$  – wydatki eksploatacyjne oraz koszty finansowe kredytu w roku t-tym;

$E$  – produkcja energii w roku t-tym [MWh];

$r$  – stopa dyskontowa, rozumiana w analizowanym przypadku jako koszt kapitału własnego (Instytut Energetyki Odnawialnej 2013).

Metoda LCOE wykazuje następujące zalety:

- umożliwia bezpośrednie porównanie kosztów różnych rodzajów i technologii OZE z uwzględnieniem ich wielkości;
- pozwala na określenie (dla roku bazowego) luki kosztowej i finansowej pomiędzy kosztem wytworzenia energii w danym OZE, a ceną energii na rynku hurtowym;
- obiektywizuje wyniki obliczeń;
- umożliwia porównywanie wskaźników pomiędzy krajami i systemami wsparcia OZE ze względu na to, że jest powszechnie znana i uwzględniana;
- jest łatwa do zrozumienia dla osób podejmujących decyzje w sprawie systemów wsparcia OZE, oraz dla społeczeństwa;
- pozwalają na syntetyczne porównanie kosztów i ich agregatów w różnych krajach oraz wyników różnych prac badawczych w tym zakresie;
- dzięki uniwersalności i powszechności dostarcza dane i koszty referencyjne do walidacji wyników pierwszych analiz ekonomicznych dla wprowadzanych nowych technologii o niestandardowej i nieugruntowanej strukturze kosztów, co jest szczególnie ważne w sytuacji niedostatecznej liczby zrealizowanych instalacji i nie w pełni reprezentatywnych danych kosztowych z funkcjonujących w danym kraju inwestycji (*ibidem*).

Należy zauważyć, że metoda ta nie służy ocenie rentowności realizowanych projektów energetycznych<sup>1</sup>, ponieważ nie uwzględnia przychodów jakie spółka doświadcza w kolejnych latach eksploatacji instalacji i ich zmian. W zależności wskazanej powyżej uwzględnia się ilość generowanej przez instalacje energii elektrycznej, pomijane są natomiast wpływy wynikające z wysokości cen energii elektrycznej i dotacji, oraz ich zmiany w czasie. W takim modelu nie zostanie więc odzwierciedlona sytuacja, która ostatnimi czasy miała miejsce na rynku polskim tj. nagła zapaść cen zielonych certyfikatów mająca niebagatelny wpływ na rentowność spółek zajmujących się OZE.

Znacznie lepiej wskaźnik LCOE będzie korespondował z nowym systemem wsparcia – systemem aukcyjnym, jaki planuje się wdrożyć do polskiego prawodawstwa w oparciu o ustawę z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Ustawa o odnawialnych źródłach energii 2015). Podmiot, który wygra aukcję oferując odpowiednią ilość energii po jak najniższej cenie (każdorazowo niższej od ceny referencyjnej) będzie zobligowany do odsprzedania deklarowanej ilości energii po cenie aukcyjnej przez okres 15 lat. Ryzyko bezpośrednie związane ze zmianami cen energii elektrycznej oraz zmianami cen praw majątkowych zostaje całkowicie wyeliminowane. Niestety, wprowadzenie nowego systemu wsparcia z dużym prawdopodobieństwem spowoduje pozostawienie dużej części już istniejących instalacji w starym, ułomnym systemie zielonych certyfikatów.

W nowym systemie wsparcia OZE aukcje powinny być organizowane w związku z koniecznością wypełnienia celów dyrektywy unijnej co do ilości udziału energii odnawialnej w całkowitym zużyciu energii elektrycznej na rok 2020 dookreślonej w ramach polskiego prawodawstwa ustawą z 10 kwietnia 1997 r. Prawo Energetyczne oraz rozporządzeniem ministra gospodarki z 5 maja 2014 r. zmieniającym rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii oraz obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnych źródłach energii (Prawo Energetyczne 1997; Dyrektywa 2009/28/WE 2009: Ministerstwo Gospodarki 2014).

---

<sup>1</sup> Modelem najczęściej stosowanym do oceny rentowności inwestycyjnej projektów energetycznych jest metoda NPV, oparta na analizie zdyskontowanych przepływów pieniężnych przy założonej stopie dyskonta.

## Analiza wartości LCOE dla różnych technologii OZE

Odnawialne źródła energii w ostatniej dekadzie były subsydiowane na całym świecie w oparciu o różne mechanizmy zachęt finansowych. Zachęty dla inwestorów doprowadziły do znaczącego wzrostu mocy zainstalowanych w źródłach odnawialnych z poziomu 1 TW w roku 2006 do poziomu ok. 2 TW na koniec roku 2015, co oznacza blisko dwukrotny wzrost mocy zainstalowanej. Polska na tym tle w analizowanym okresie prezentuje się bardzo dynamicznie, uzyskując prawie trzykrotny wzrost mocy zainstalowanej w OZE, co znacznie przewyższa procentowy wzrost na świecie, jak i w Europie. Zestawienie mocy zainstalowanych w OZE w poszczególnych regionach świata przedstawiono w tabeli 1.

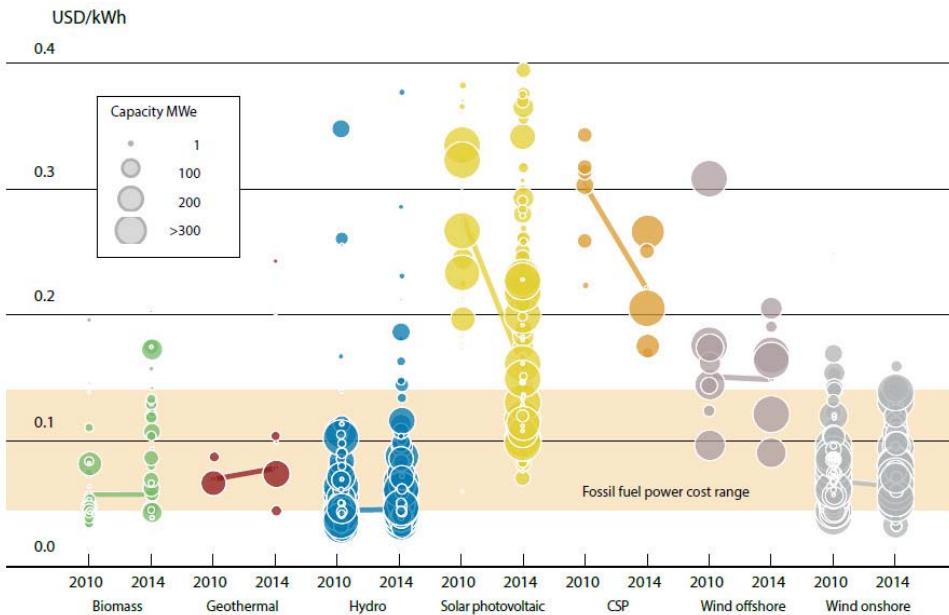
**Tabela 1.** Porównanie mocy zainstalowanej w OZE na świecie dla na koniec roku 2006 oraz 2015

Region świata	Moc zainstalowana w OZE na koniec roku 2006 [GW]	Moc zainstalowana w OZE na koniec roku 2015 [GW]	Zmiana procentowa w analizowanym okresie
<b>Polska</b>	<b>2,56</b>	<b>7,043</b>	<b>275%</b>
Świat	1031,494	1964,655	190%
Afryka	24,771	36,447	147%
Azja	292,013	779,947	267%
Ameryka Centralna	6,519	11,58	178%
Euroazja	65,328	90,081	138%
Europa	271,92	493,296	181%
Środkowy Wschód	10,677	17,487	164%
Ameryka Północna	210,791	326,707	155%
Ameryka Południowa	132,605	183,185	138%
Oceania	16,87	25,926	154%

**Źródło:** opracowanie własne na podstawie IRENA 2016a.

Upowszechnienie technologii OZE spowodowało w przypadku większości technologii wyraźny spadek wskaźnika LCOE, czyli zmniejszenie kosztu wyprodukowania jednostki

energii elektrycznej. Dodatkowo do takiej sytuacji przyczynił się zwiększony stopień wykorzystania mocy znamionowej w ciągu roku dla poszczególnych technologii wynikający z rozwoju technologicznego oraz zmniejszone koszty OPEX i CAPEX wynikające z silnej konkurencji producentów danych technologii między sobą. Dla większości technologii spodziewany jest dalszy spadek kosztów inwestycyjnych CAPEX spowodowany nadwyżką mocy zainstalowanych. Aby w myśl podstawowej zasady ekonomicznej utrzymać popyt na daną technologię na stałym poziomie, w związku ze spadkiem cen energii, a co za tym idzie spadkiem przychodów dla inwestorów, koszt technologii również będzie musiał spadać. Tylko w odniesieniu do technologii opartej na spalaniu biomasy wartość wskaźnika LCOE w czasie będzie najprawdopodobniej wzrastała z uwagi na silną zależność LCOE od kosztów paliwa. Wartość wskaźników LCOE oraz zmianę tego parametru w okresie 2010-2014 dla poszczególnych technologii OZE zaprezentowano na rysunku 1.



**Rysunek 1.** Koszt zlinearyzowany poszczególnych technologii OZE dla całego świata w roku 2010 oraz 2014

**Źródło:** IRENA 2015.

Na powyższym rysunku oprócz porównania poszczególnych technologii OZE między sobą zobrazowano również postęp technologii OZE w stosunku do technologii opartych na spalaniu paliw kopalnych (beżowy obszar na wykresie). Większość technologii OZE już w roku 2014 znajdowała się w obszarze LCOE charakterystycznym dla instalacji zasilanych paliwami kopalnymi. Efekt ten będzie nasilał się z upływem czasu.

Instalacje oparte na technologii wytwarzania energii elektrycznej z paneli fotowoltaicznych silnie wkroczyły w zakres LCOE charakterystyczny dla źródeł kopalnych osiągając w przypadku niektórych inwestycji LCOE poniżej 0,1 USD/kWh, zaś elektrownie wiatrowe oraz wodne silnie ugruntowały swoją pozycję w tym obszarze, niejednokrotnie osiągając mniejszą wartość LCOE niż inwestycje oparte na paliwach kopalnych.

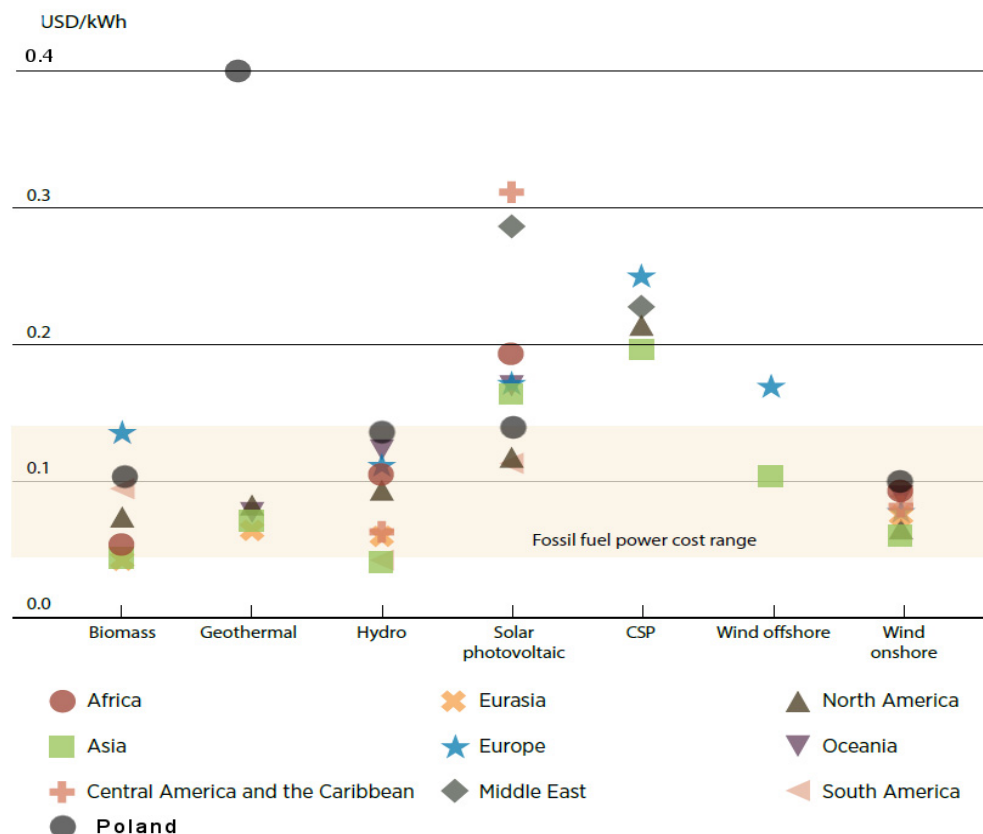
W przyszłości spodziewany jest dalszy spadek wartości LCOE dla większości instalacji OZE przy jednoczesnym zmniejszeniu odchylenia standardowego tego wskaźnika dla poszczególnych inwestycji tworzący dany koszyk technologiczny OZE w taki sposób, iż w roku 2025 średnia wartość LCOE dla projektów opartych na technologii PV osiągnie 0,06 USD/kWh w stosunku do 0,13 USD/kWh na koniec roku 2015 r, zaś dla elektrowni wiatrowych na lądzie w roku 2025 wskaźnik ten ukształtuje się na poziomie ok. 0,05 USD/kWh w stosunku do obecnego, utrzymującego się na poziomie ok. 0,07 USD/kWh (IRENA 2016b). Równoległe nastąpi przesunięcie wskaźnika LCOE dla technologii kopalnych „w górę” tj. wzrost jego wartości w związku z przewidywanym znacznym wzrostem kosztów uprawnień do emisji.

W samej Europie spadek wskaźnika LCOE będzie możliwy w związku z zamiarem budowy unii energetycznej w sposób taki, aby osiągnąć 10-procentową międzysystemową łączność elektroenergetyczną do roku 2020 i dalej 15-procentową do roku 2030 (Komisja Europejska 2015).

W ten sposób energia elektryczna generowana przez nadwyżkę mocy zainstalowanych w poszczególnych krajach wspólnoty będzie rozprzestrzeniała się po krajach unii powodując zmniejszenie LCOE oraz wzrost konkurencyjności ekonomicznej UE.

Równie istotna jak porównanie poszczególnych technologii między sobą wydaje się być analiza wartości LCOE z rozróżnieniem na poszczególne regiony świata. Zestawienie takie pokazano na rysunku 2.

Poniższy przegląd porównuje LCOE dla poszczególnych technologii pomiędzy różnymi regionami świata i Polską. Energia skoncentrowanego promieniowania słonecznego (ang. CSP) oraz farmy wiatrowe na morzu (ang. *wind offshore*) na terenie Polski nie występują, dlatego nie zostały ujęte w poniższym zestawieniu.



Rysunek 2. Koszt zlinearyzowany poszczególnych technologii OZE w różnych regionach świata oraz Polsce

Źródło: opracowanie własne na podstawie Instytut Energetyki Odnawialnej 2013; IRENA 2015.

W przypadku kilku technologii Europa pozostaje mało konkurencyjna. Wyjątek w tym aspekcie stanowią farmy wiatrowe. Jak wspomniano wcześniej, zwiększenie wymiany energii elektrycznej pomiędzy krajami UE będzie sprzyjało zmniejszaniu dystansu w stosunku do pozostałych regionów świata. Należy jednak zdawać sobie sprawę,



że ze względu na różne uwarunkowania nie wszystkie technologie w danym regionie świata mogą konkurować między sobą np. ciężko sobie wyobrazić, aby europejska hydroenergia mogła konkurować z chińską.

Zastanawiająca w przypadku Polski jest wartość wskaźnika LCOE dla źródeł geotermalnych wynosząca ok. 0,4 USD/kWh. Jak widać z powyższego zestawienia technologia ta nie jest konkurencyjna pod względem cenowym w porównaniu z innymi regionami świata. W projekcie rozporządzenia (Minister Energii 2016) zasugerowano cenę referencyjną dla tego źródła na poziomie 455 zł/MWh (0,12 USD/kWh). Cena referencyjna na takim poziomie uniemożliwi realizację projektów związanych z tą technologią.

W związku z przewidywanym wzrostem LCOE dla technologii opartych na technologiach paliw kopalnych, wprowadzeniem dodatkowych systemów (tj. rynek mocy) (Cire.pl 2016) umożliwiających budowę nowych, konwencjonalnych źródeł energii co przełoży się na wzrost cen energii dla odbiorców końcowych oraz w związku z zamiarem budowy unii energetycznej w sposób taki, aby osiągnąć 10-procentową międzysystemową łączność elektroenergetyczną do roku 2020 i dalej 15-procentową do roku 2030 sytuacja Polski na tle Państw Europy zachodniej wydaje się stawać coraz mniej konkurencyjna.

Politykę wymiany międzysystemowej pomiędzy krajami unii europejskiej należy uznać za jak najbardziej słuszną. Spowoduje ona możliwość instalacji nowych mocy w OZE obniżając ich LCOE w obrębie wspólnoty oraz kształtując konkurencyjność zarówno polskiej, jak i europejskiej gospodarki.

## **Analiza LCOE dla układu hybrydowego**

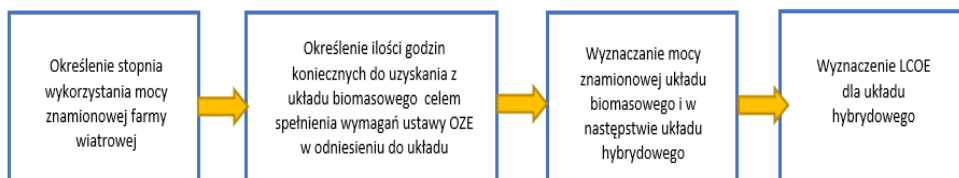
Rozwój energetyki odnawialnej poza granicami Polski oraz zamiar zwiększenia wymiany międzysystemowej pomiędzy krajami UE powinien przekonać polskich decydentów do inicjowania procesów inwestycyjnych oraz legislacyjnych umożliwiających realizację instalacji, które będą wytwarzały konkurencyjnie ekonomiczną energię elektryczną. W przeciwnym razie w niedługim czasie w związku ze wzrostem znaczenia wymiany międzysystemowej pomiędzy państwami w ramach UE, Polska może zostać zmuszona do konfrontacji na rynku tańszej energii wyprodukowanej w bardziej efektywny sposób przez sąsiadów .

Instalacją odnawialnego źródła energii, która może zapewnić zdecydowanie lepszą ciągłość dostaw w stosunku do obecnie stosowanych technologii OZE przy jednocześnie niskim koszcie LCOE, jest układ hybrydowy złożony z farmy wiatrowej oraz instalacji biomasowej.

Nowelizacja ustawy o OZE z 22 czerwca 2016 r. wprowadziła koszyk technologiczny dla instalacji hybrydowej, jednocześnie w ustawie tej wskazano na możliwość uczestnictwa tych instalacji w koszyku o stopniu wykorzystania mocy zainstalowanej elektrycznej łącznej bez względu na źródło pochodzenia większym niż 3504 MWh/ MW/ rok (Ustawa o zmianie ustawy o odnawialnych energii oraz niektórych innych ustaw 2016).

Ogłoszony w lipcu 2016 roku projekt rozporządzenia w sprawie ceny referencyjnej energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii w 2016r. w paragrafie 1 ust. 1 pkt 21 wskazuje, iż dla hybrydowej instalacji odnawialnego źródła energii o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej większej niż 1 MW, cena referencyjna wynosi 430 zł/MWh (Minister Energii 2016).

Układ hybrydowy wydaje się być bardziej racjonalny niż każda z instalacji z osobna. Z jednej strony układ biomasowy zapewni większą ciągłość generacji elektrycznej (wymaganą definicją bezpieczeństwa energetycznego) niż sama farma wiatrowa. Jest to równoważne ze zwiększeniem rocznego stopnia wykorzystania mocy znamionowej układu hybrydowego w stosunku do farmy wiatrowej. Z drugiej zaś strony układ ten będzie bardziej opłacalny ekonomicznie w przeliczeniu na MW mocy zainstalowanej niż układ wykorzystujący wyłącznie samą instalację spalania biomasy.



**Rysunek 3.** Schemat blokowy wykonanych analiz w celu wyznaczenia LCOE dla układu hybrydowego

**Źródło:** opracowanie własne.

Zamieszczony powyżej schemat blokowy obrazuje zakres analiz wykonanych w celu oceny zakresu wartości LCEO dla układu hybrydowego złożonego z elektrowni wiatrowej oraz układu biomasowego.

Stopień wykorzystania mocy znamionowej w ciągu roku dla układu biomasowego kształtuje się na poziomie od 7500 do 8000 godzin pracy z mocą ekwiwalentną mocy znamionowej na rok. Dla farmy wiatrowej przewidywany wskaźnik wykorzystania mocy znamionowej będzie zdecydowanie niższy. Przy ocenie każdego projektu, również i farmy wiatrowej, istotne znaczenie oprócz wartości CAPEX i OPEX projektu, ma ilość energii elektrycznej, jaką dana instalacja może wyprodukować. Zważywszy, że produkcja farmy w przeciwieństwie do elektrowni biomasowej silnie zależy od wielu czynników, w tym w pewnym zakresie trudno przewidywalnych meteorologicznych, wartość produkcji farmy wiatrowej nie jest przedstawiana jako jedna liczba, lecz jako zbiór liczb odpowiadających prawdopodobieństwu, z jakim dana produkcja może mieć miejsce.

Miernikiem wartości prawdopodobieństwa w przypadku farm wiatrowych są najczęściej stosowane wskaźniki P(50), P(75), P(90). Wskaźniki te wskazują odpowiednio największą, średnią i najmniejszą<sup>2</sup> produkcję farmy wiatrowej. Przykładowo wartość P(50) mówi, iż dana produkcja może wystąpić z prawdopodobieństwem 50%, wartość P(75) wskazuje, iż dana produkcja wystąpi z prawdopodobieństwem 75%.

W praktyce do oceny ryzyka kredytowego najczęściej używana jest wartość produkcji odpowiadająca wskaźnikowi P(90). Do tego wskaźnika odwoływano się w późniejszej części artykułu, przedstawiając kolejne analizy zgodnie z zaprezentowanym wcześniej schematem blokowym.

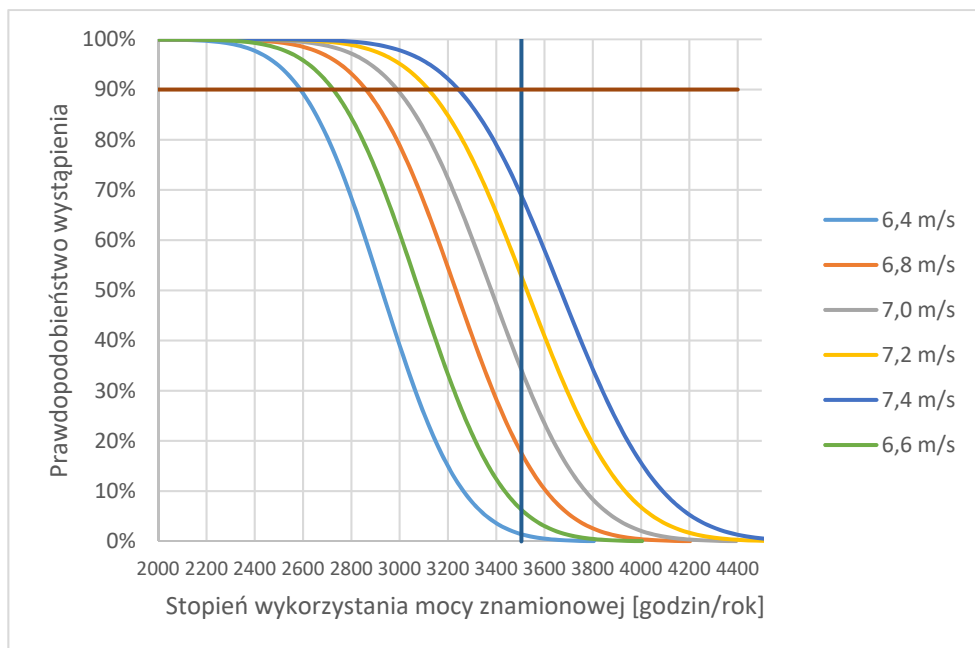
W bieżącym rozdziale przedstawiono analizę farm wiatrowej o mocy 15 MW położonej w różnych lokalizacjach, dla których średnioroczna długoterminowa prędkość wiatru na wysokości gondoli wyniesie: 6,4; 6,6 ; 6,8 ; 7,0 ; 7,2 ; 7,4 m/s.

Szereg czynników opisanych w (MEASNET 2016; PKN 2013) może kształtować trzyletnią całościową niepewność farmy wiatrowej na poziomie od 9 % do 13 %. Niepewność ta również została uwzględniona w ramach wykonywanych analiz.

Na rysunku 4. przedstawiono wartości stopnia wykorzystania mocy znamionowej dla analizowanej farmy wiatrowej tworzącej układ hybrydowy przy założeniu niepewności na poziomie 9% dla różnych lokalizacji różniących się średnioroczną długoterminową prędkością wiatru na wysokości wieży w zakresie od 6,4 do 7,4 m/s.

---

<sup>2</sup> Istnieją wartości P(91) – P(99), dla których produkcja farmy wiatrowej będzie mniejsza od wartości P(90), jednak w praktyce wskaźniki te nie są wykorzystywane.

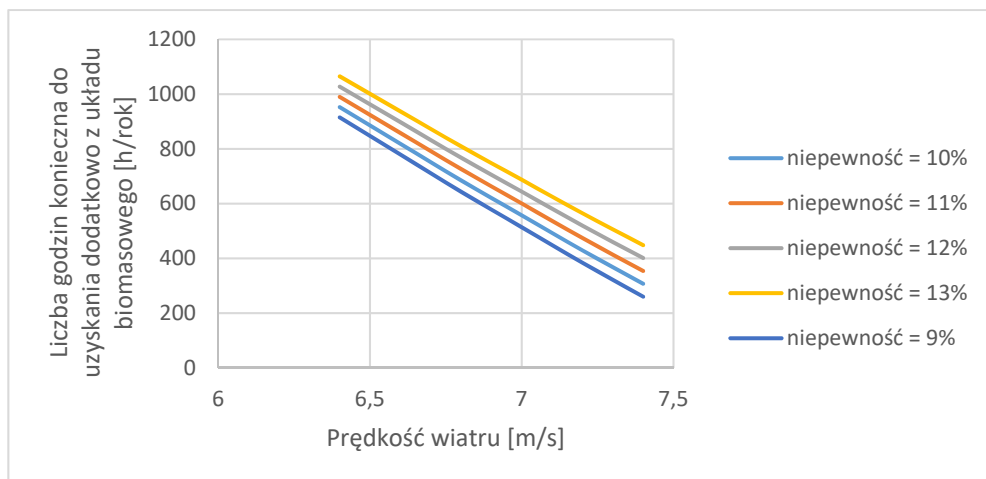


**Rysunek 4.** Rozkład stopnia wykorzystania mocy znamionowej w zależności od poziomu ufności

**Źródło:** opracowanie własne.

Na przygotowanym wykresie poziomą linią oznaczono wskaźnik  $P(90)$  zaś pionową niebieską wymaganą ustawową wartość stopnia wykorzystania mocy znamionowej w ciągu roku dla instalacji hybrydowej. W praktyce dąży się do sytuacji, w której punkt przecięcia linii oznaczającej wskaźnik  $P(90)$  z rozkładem stopnia wykorzystania mocy znamionowej dla danej średniej prędkości wiatru zostanie przeniesiony w miejsce punktu przecięcia poziomej linii oznaczonej, jako wskaźnik  $P(90)$ , z niebieską pionową określającą ustawową wartość stopnia wykorzystania mocy znamionowej w ciągu roku.

Podobne analizy wykonano dla niepewności 10%, 11%, 12%, 13%. W związku z czym uzyskano zestawienie liczby godzin odpowiadających wskaźnikowi  $P(90)$ , koniecznych do uzyskania dodatkowo z układu biomasowego w zależności od niepewności oraz prędkości wiatru.



**Rysunek 5.** Liczba godzin konieczna do uzyskania dodatkowo z układu biomasowego celem osiągnięcia ustawowego stopnia wykorzystania mocy znamionowej dla układu hybrydowego

**Źródło:** opracowanie własne

Zgodnie z rysunkiem 5, im większa średnioroczna, długoterminowa prędkość wiatru na wysokości gondoli elektrowni wiatrowej w danej lokalizacji, tym mniejsza liczba godzin konieczna do uzyskania dodatkowo z układu biomasowego, co w dalszej kolejności przełoży się na mniejszy spadek LCOE dla układu hybrydowego. Odwrotnie jest w odniesieniu do niepewności, im większa niepewność w generacji farmy wiatrowej, tym większa liczba godzin konieczna do uzyskania z układu biomasowego celem osiągnięcia ustawowego poziomu mocy zainstalowanej dla układu hybrydowego na poziomie 3504 [godz./rok].

W następnym kroku, zgodnie z wcześniej zaprezentowanym schematem blokowym oszacowano znamionową moc elektryczną układu biomasowego konieczną do uzyskania w różnych lokalizacjach o różnej średniorocznej długoterminowej prędkości wiatru oraz niepewności z zakresu od 9% do 13%. Wyniki serii analiz zaprezentowano w tabeli 2.

**Tabela 2.** Znamionowa moc elektryczna układu biomasowego wymagana w związku z koniecznością spełnienia warunku stopnia wykorzystania mocy znamionowej OZE dla układu hybrydowego

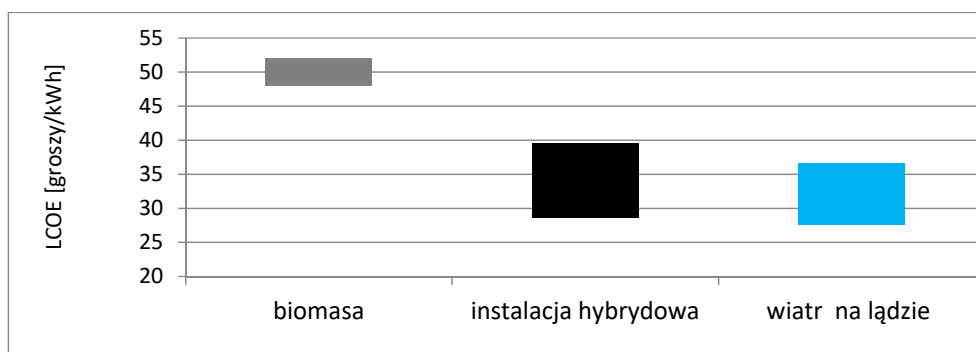
<b>Moc znamionowa elektryczna układu biomasowego konieczna do osiągnięcia ustawowego warunku stopnia wykorzystania mocy znamionowej z układu hybrydowego [MW]</b>						
Okres	6,4 [m/s]	6,6 [m/s]	6,8 [m/s]	7 [m/s]	7,2 [m/s]	7,4 [m/s]
Niepewność = 9%	3,1	2,6	2,2	1,8	1,3	<b>0,9</b>
Niepewność = 10%	3,2	2,8	2,3	1,9	1,5	1,1
Niepewność = 11%	3,4	2,9	2,5	2,1	1,6	1,2
Niepewność = 12%	3,5	3,0	2,6	2,2	1,8	1,4
Niepewność = 13%	<b>3,6</b>	3,2	2,7	2,3	1,9	1,5

**Źródło:** opracowanie własne.

W dalszej kolejności – korzystając z zależności przedstawionej na wstępie tego artykułu – oszacowano wartość LCOE dla poszczególnych technologii, przyjmując wartość tego wskaźnika dla układu biomasowego zgodnie z (Instytut Energetyki Odnawialnej 2013). LCOE dla układu hybrydowego obliczono jako średnią ważoną LCOE dla układu biomasowego i farmy wiatrowej. Dolną granicę LCOE dla farmy wiatrowej wyliczono wykorzystując najlepszy rozpatrywany wariant, tj. najmniejszą niepewność (9%) oraz najlepsze warunki wiatrowe (7,4 m/s), zaś górną granicę LCOE uzyskano biorąc pod uwagę najgorszy rozpatrywany wariant, tj. największą niepewność (13%) oraz najmniej wietrzne warunki (6,4 m/s). Zestawienie uzyskanych wartości LCOE przedstawiono na wykresie na rysunku 6.

Zgodnie z przypuszczeniami, koszt wytworzenia jednej kWh jest najmniejszy w przypadku farmy wiatrowej, zaś dużo wyższy w przypadku instalacji spalania biomasy. Wynika to z większych kosztów OPEX oraz dodatkowych kosztów paliwa, które

w okresie eksploatacji farmy wiatrowej nie są konieczne. Włączenie układu biomasowego do instalacji hybrydowej tworzonej łącznie z farmą wiatrową pozwala osiągnąć zadawalająco niski poziom LCOE i jednocześnie spełnić wymóg stopnia wykorzystania mocy znamionowej zgodnie z wymogami ustawy OZE.



**Rysunek 6.** Zestawienie wartości LCOE dla rozważanych technologii

**Źródło:** opracowanie własne.

Z przedstawianych analiz dla układy hybrydowego wynika, że jest możliwe osiągnięcie konkurencyjnego wskaźnika LCOE na poziomie od 0,07 do 0,1 USD/kWh. Spodziewane obniżenie kosztów CAPEX, w tym cen elektrowni wiatrowych, dodatkowo pomniejszy wartość wskaźnika LCOE.

## Podsumowanie

W poszczególnych rozdziałach artykułu wskazano na aspekty, które mogą mieć istotne znaczenie z punktu widzenia kształtowania się wskaźników LCOE dla poszczególnych technologii OZE, jak również w odniesieniu do konkurencyjności Unii Europejskiej w stosunku do innych regionów świata. Dokonano porównania wartości LCOE pomiędzy poszczególnymi technologiami jak również regionami świata, a także analizy zmiany tych wskaźników w czasie, prognozując wartość tych wskaźników w stosunku do nadchodzącego dziesięciolecia, w oparciu o dostępną literaturę branżową.

Przedstawiono ryzyka związane z obecną polityką krajową, nie do końca korelującą się ze strategią Unii Europejskiej. Zaprezentowano efektywne ekonomicznie sugestie

technologiczne możliwe do zastosowania w oparciu o polskie prawodawstwo. Rozwiązanie to stanowi kompromis pomiędzy stopniem wykorzystania mocy znamionowej określającym stabilność danego źródła, efektywnością ekonomiczną, a koniecznością realizacji celów udziału OZE w polskim miksie energetycznym.

Rozpatrując bezpieczeństwo energetyczne jako składową bezpieczeństwa ekonomicznego (Książkowski 2011) i jednocześnie jako pojęcie mieszczące w sobie aspekt surowcowy ściśle związany z technicznym, finansowym i środowiskowym postrzeganiem rozważanych problemów – jak wskazano we wcześniejszych rozdziałach niniejszego artykułu – układy hybrydowe mogą stanowić o sile energetyki rozproszonej, uniezależniając na tyle, na ile to możliwe, popyt na energię od rynków zagranicznych, przy jednoczesnym niskim koszcie wytworzenia jednostki energii. Można się spodziewać, iż wzajemne uzupełnianie się technologii wewnątrz układów hybrydowych będzie powodowało ich szybszy rozwój, co małymi krokami zdaje się umożliwiać legislator.

## Bibliografia

- Cire.pl (2016), *ME opublikowało raport po konsultacjach dot. rynku mocy*, <http://www.cire.pl/item,135267,1,0,0,0,0,me-opublikowalo-raport-po-konsultacjach-dot-ryнку-mocy.html> [27.06.2017]
- Dyrektywa 2009/28/WE (2009), Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych
- Instytut Energetyki Odnawialnej (2013), *Analiza dotycząca możliwości określenia niezbędnej wysokości wsparcia dla poszczególnych technologii OZE w kontekście realizacji „Krajowego Planu Działania w Zakresie Energii ze źródeł odnawialnych”*, Warszawa
- IRENA (2015), *Renewable power generation costs in 2014*, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- IRENA (2016a), *Renewable energy statistics 2016*, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- IRENA (2016b), *The power to change: solar and wind cost reduction potential*, The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi



- Komisja Europejska (2015), Komunikat komisji do parlamentu europejskiego, rady, europejskiego komitetu ekonomiczno-społecznego, komitetu regionów i europejskiego banku inwestycyjnego - strategia ramowa na rzecz stabilnej unii energetycznej opartej na przyszłościowej polityce (...), Bruksela
- Książopolski K.M. (2011), *Bezpieczeństwo ekonomiczne*, Dom Wydawniczy Elipsa, Warszawa
- MEASNET (2016), *Evaluation of site-specific wind conditions*, Measuring Network of Wind Energy Institutes, Madrid
- Minister Energii (2016), Projekt rozporządzenia Ministra Energii w sprawie ceny referencyjnej energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii w 2016 r., Ministerstwo Energii, Warszawa
- Ministerstwo Gospodarki (2014), Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 5 maja 2014 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej (...), Warszawa
- PKN (2013), PN-EN 61400-12-2:2013-12 Pomiar własności energetycznych prądotwórczych turbozespołów wiatrowych z użyciem anemometrów mocowanych na gondoli, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa
- Prawo energetyczne (1997), ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne, Dz.U. 1997 nr 54 poz. 348 z późn. zm.
- Prawo ochrony środowiska (2001), ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska, Dz.U. 2001 Nr 62 poz. 627 z późn. zm.
- Ustawa o zmianie ustawy o odnawialnych energii oraz niektórych innych ustaw (2016), Dz.U. 2016 Nr 0 poz. 925
- Ustawa o odnawialnych źródłach energii (2015), z dnia 20 lutego 2015 r., Dz.U. 2015 nr 0 poz. 478