

Arkadiusz DOBRZYCKI\*  
Jacek KAMIŃSKI\*  
Robert PIETRACHO\*

## KONCEPCJA ALGORYTMU OPTYMALNEGO PODZIAŁU MOCY ŹRÓDEŁ HYBRYDOWEJ ELEKTROWNI WIATROWO-SOLARNEJ

Niniejszy artykuł dotyczy problematyki elektrowni hybrydowych wykorzystujących OZE. W szczególności skupiono się na optymalnym, zapewniającym jak najlepsze możliwości regulacyjne, układzie wiatrowo-solarnym. Przedstawiono koncepcję algorytmu doboru i podziału mocy poszczególnych źródeł. Opracowany algorytm uwzględnia wykorzystanie magazynów energii jako elementu buforującego, zmniejszającego wahań generowanej mocy. Przedstawiono wyniki obliczeń dla przykładowej lokalizacji.

SŁOWA KLUCZOWE: optymalizacja elektrowni hybrydowej, magazyny energii, minimalizacja wahań mocy, fotowoltaika, elektrownia wiatrowa

### 1. WPROWADZENIE

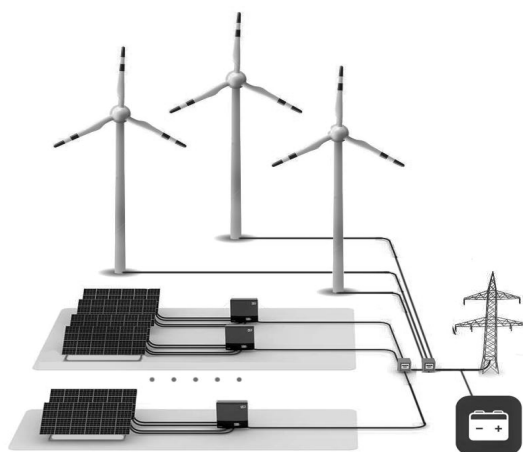
Elektrownia to obiekt produkujący energię elektryczną na skalę przemysłową i wykorzystujący w tym celu zwykle energię paliw organicznych lub jądrowych, zdolny do regulacji parametrów energii wytworzonej (mocy, napięcia, częstotliwości) [10].

Obecnie na rynku wytwarzania energii elektrycznej dostrzegalny jest trend zwracania się w kierunku wykorzystania źródeł odnawialnych, szczególnie wiatru i słońca. Obok zalet ekologicznych, dodatkowo za wykorzystaniem tego typu źródeł przemawiają nakazy i zachęty prawodawstwa europejskiego [1] i krajowego [12, 13]. Jednakże dla obu tych źródeł występują trudności w regulacji zarówno mocy, napięcia jak i częstotliwości. Skonstruowanie obiektu kombinowanego, połączenie turbin wiatrowych z panelami słonecznymi pozwala na polepszenie warunków pracy i zmniejszenie wahań mocy wynikających ze stochastycznej natury wiatru i zmian gęstości mocy promieniowania w ciągu doby. Na tej podstawie można utworzyć obiekt kombinowany, połączenie turbin wia-

---

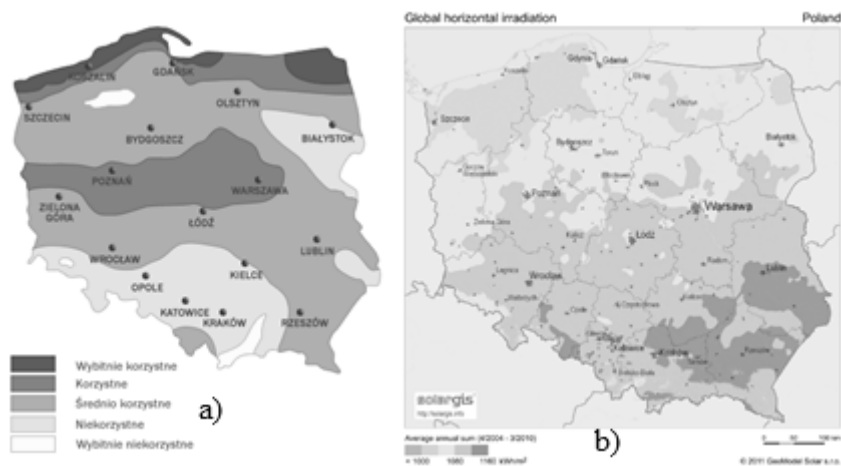
\* Politechnika Poznańska.

trowych z panelami słonecznymi. Przykładową strukturę elektrowni hybrydowej wiatrowo-solarnej przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Struktura elektrowni hybrydowej

Podstawowymi kryteriami jakie należy wziąć pod rozwagę planując zbudowanie elektrowni hybrydowej są warunki klimatyczne występujące na danym obszarze. Na rysunku 2 przedstawiono te parametry dla obszaru Polski.



Rys. 1.2. Warunki wietrzności a) i natężenia promieniowania, b) na terenie Polski [6, 14]

Najkorzystniej jest gdy panele fotowoltaiczne i turbiny pracują w lokalizacji o dużej gęstości mocy promieniowania i dobrych warunkach wietrznych.

Przy projektowaniu elektrowni hybrydowej konieczne jest uzyskanie możliwie dokładnych danych pomiarowych dotyczących prędkości wiatru oraz natężenia promieniowania. Źródłem danych są zwykle pomiary (często bardzo dokładne) wykonane przez profesjonalne firmy lub ogólnodostępne (mniej dokładne) dane pomiarowe Ministerstwa Rozwoju [15].

Wahania mocy są nieodłącznym problemem występującym podczas eksploatacji rozpatrywanych źródeł energii. W przypadku wykorzystania OZE w elektrowniach hybrydowych powinno się rozważyć zastosowanie systemu niwelującego te wahania. Obiektem tym można nazwać każdy magazyn energii, który w czasie pracy elektrowni zapewni możliwość magazynowania nadwyżek lub w przypadku złych warunków atmosferycznych pozwoli zachować ciągłość dostaw energii do sieci elektroenergetycznej. Bufor ten nie powinien utracić zdolności do oddawania energii w przewidywanym okresie eksploatacyjnym.

## **2. OGÓLNE KRYTERIA DOBORU KOMPONENTÓW ELEKTROWNI HYBRYDOWEJ**

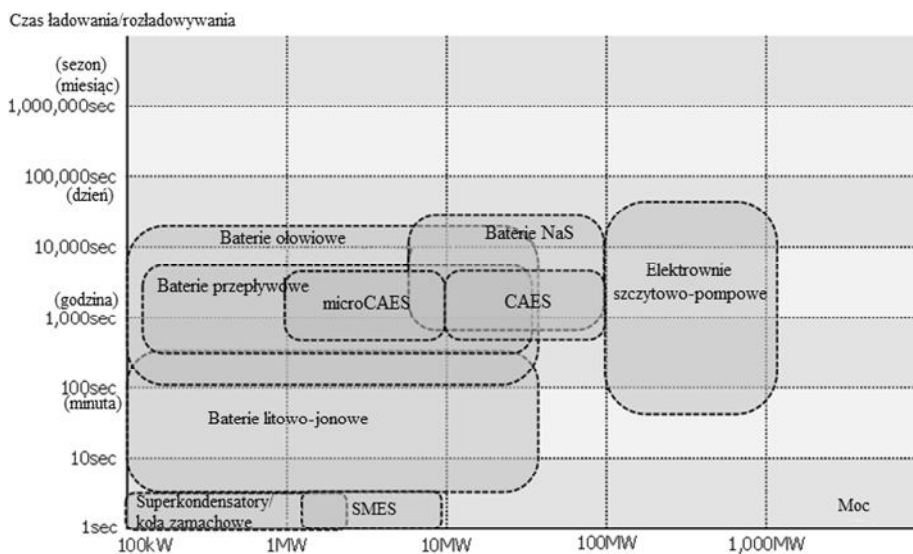
Dobierając urządzenia będące elementami większych i bardziej złożonych układów należy zwrócić uwagę na szereg aspektów dotyczących zarówno samego elementu, jak i systemu w skład którego dany element ma wejść. Wśród tych pierwszych wyróżnić można m. in.: moc znamionową urządzenia, sprawność, dostępność na rynku, awaryjność, trwałość i warunki gwarancyjne producenta oraz koszt samego komponentu. Niebagatelne znaczenie ma też technologia wykonania każdej części. Indywidualne właściwości każdego elementu, które powinno się uwzględniać przy wyborze rozwiązań, zależą natomiast od typu urządzenia i rodzaju wykonywanych przez nie zadań. W przypadku elektrowni hybrydowej podstawowymi składnikami są panele fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe oraz magazyny energii.

Podczas doboru paneli fotowoltaicznych do elektrowni hybrydowej należy przeanalizować warunki nasłonecznienia występujące w miejscu lokalizacji przedsięwzięcia: w znacznym stopniu determinują one wybór technologii wykonania modułów – w warunkach polskich, przy znacznej przewadze dni częściowo zachmurzonych, lepszym rozwiązaniem będzie wykorzystanie paneli polikrystalicznych, które bardzo dobrze wykorzystują gorsze energetycznie promieniowanie rozproszone. Ponadto należy zwrócić uwagę na występujące zabezpieczenia paneli przed częściowym zacienieniem (np. przez diody *bypass*) oraz stopień ochrony modułów przed wpływem czynników atmosferycznych [2].

Wybór modelu turbiny wiatrowej do elektrowni hybrydowej zależy z kolei przede wszystkim od warunków wietrznych. W tym przypadku konieczne jest wyznaczenie histogramu prędkości wiatru uwzględniającego te najczęściej wy-

stępujące wartości. Dla niewystarczającej liczby danych, możliwe jest wyznaczenie prawdopodobieństwa wystąpienia danej prędkości wiatru, np. za pomocą rozkładu Weibulla, przy wykorzystaniu wiarygodnej, średniej prędkości wiatru z danego okresu. Informacja o najczęściej pojawiających się prędkościach wiatru pozwala na dobranie turbiny o charakterystyce mocy gwarantującej rozruch dla prędkości wiatru niższych od najpopularniejszych. Na tej podstawie można również oszacować prawdopodobne uzyski mocy z turbiny [8].

Natomiast magazyn energii w układzie hybrydowym pełni bardzo istotną rolę, ponieważ zapobiega wahaniom mocy oddawanej przez źródło do systemu buforując nadwyżki energii w chwilach wysokiej wietrzności lub natężenia promieniowania słonecznego, oddając je do sieci przy niekorzystnych warunkach atmosferycznych [7]. Podczas jego doboru należy kierować się przede wszystkim pojemnością tak, aby był zdolny magazynować energię w ilości co najmniej równej spodziewanym nadwyżkom. Ponadto należy uzyskać informacje o możliwości sterowania i regulacji procesu ładowania. Gdy magazyn jest baterią akumulatorów powinno się także sprawdzić gwarantowaną przez producenta liczbę rozładowań i ponownych ładowań. Ze względu na bogaty wybór magazynów energii można wykorzystać normogramy, które uwzględniają parametry urządzeń. Przykładowy nomogram został przedstawiony na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Przegląd wybranych technologii magazynowania energii w zależności od czasu rozładowania/ładowania i mocy [9]: NaS– baterie siarkowo-sodowe, CAES – pneumatyczne zasobniki energii, SMES– nadprzewodzące zasobniki energii

### 3. KONCEPCJA ALGORYTMU OPTYMALIZACJNEGO MOCY ŹRÓDEŁ WYTWÓRCZYCH

#### 3.1. Przygotowanie danych

Zdecydowano, że opracowany algorytm optymalizacyjny będzie wykorzystywał dane klimatyczne o strukturze zbliżonej do rekordów uzyskiwanych stacji badawczych Ministerstwa Rozwoju. Są one dostępne w formie plików statystycznych o nazwie *Statystyczny rok klimatyczny* [15]. Pomiar prędkości wiatru oraz natężenia promieniowania słonecznego (dla różnych konfiguracji geograficznych i kątowych) są podawane co godzinę w ciągu całego roku, co daje ostateczną liczbę próbek równą 8760.

Dane statystyczne dotyczące prędkości wiatru podawane są dla wysokości 10 m n. p. g., aby uzyskać informacje dla innej wysokości należy wykorzystać zależność [11]:

$$v_2(h_2) = v_1(h_1) \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (1)$$

gdzie:  $v_2(h_2)$  – szukana prędkość wiatru na założonej wysokości,  $v_1(h_1)$  – znana prędkość wiatru na danej wysokości,  $h_1$ ,  $h_2$  - analizowane wysokości,  $\alpha$  – parametr przyjmowany na poziomie 0,14.

Dane ze statystyk Ministerstwa Rozwoju uzyskano mierząc prędkości wiatru na wysokości 10 m. Wysokość wirnika turbiny to 100 m i dla takich wartości dokonano przeliczenia prędkości.

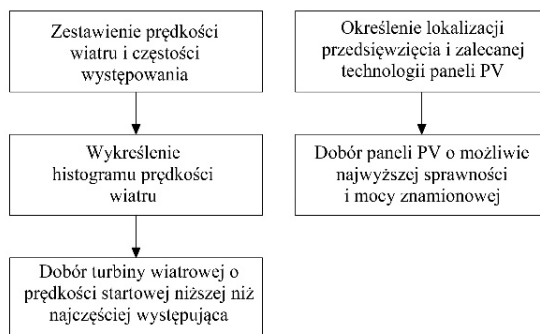
W przypadku analizy promieniowania słonecznego należy wybrać zakładany przypadek kąto-geograficzny. W tym celu obliczyć należy roczną sumę natężenia promieniowania uzyskaną w każdej konfiguracji, po czym wybrać tę, w której łączna wartość natężenia promieniowania jest największa.

#### 3.2. Propozycja algorytmu podziału mocy w elektrowni hybrydowej

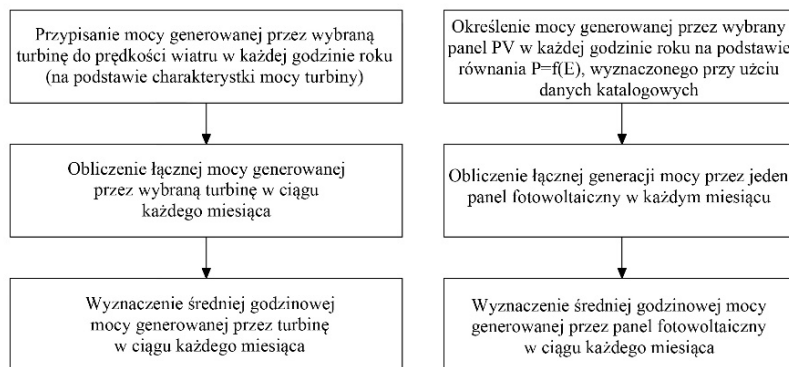
W proponowanym algorytmie zakłada się, że proces projektowania będzie przebiegał w następujących etapach:

1. dobór rodzaju/typu turbin wiatrowych i paneli fotowoltaicznych dla założonych warunków wiatrowych i słonecznych na podstawie danych statystycznych – rys. 3.1;
2. oszacowanie spodziewanych uzysków dla poszczególnych składników systemu – rys. 3.2;
3. określenie podziału mocy wg przyjętych kryteriów.

Głównym celem algorytmu jest taki podział mocy poszczególnych źródeł, aby zminimalizować wahania mocy, a co za tym idzie, wymaganą pojemność magazynu energii.



Rys. 3.1. Proces doboru turbiny i paneli fotowoltaicznych do elektrowni hybrydowej



Rys. 3.2. Proces szacowania spodziewanych uzysków dla poszczególnych składników systemu

#### 4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

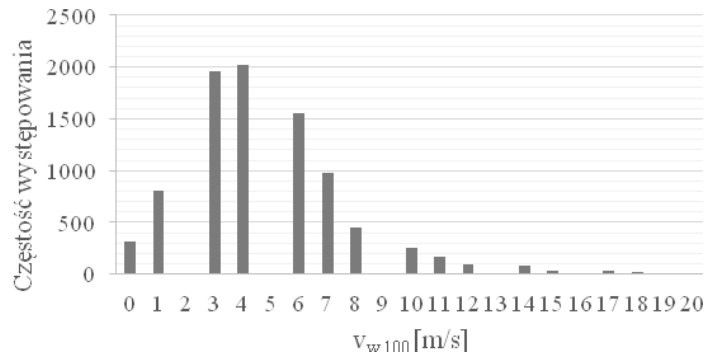
W celu zobrazowania działania zaproponowanego algorytmu, przeprowadzona zostanie symulacyjna analiza teoretycznego obiektu – elektrowni hybrydowej. Ze względu na wybitnie korzystne warunki wietrzne i słoneczne postanowiono, iż obiekt zostanie zlokalizowany w okolicy miasta Świnoujście.

Na podstawie pomiarów prędkości wiatru obliczono prędkości na wys. 100 m (założona wysokość wieży elektrowni wiatrowej), po czym wyznaczono histogram prędkości wiatru występujących w okolicy Świnoujścia, który przedstawiono na rys. 4.1.

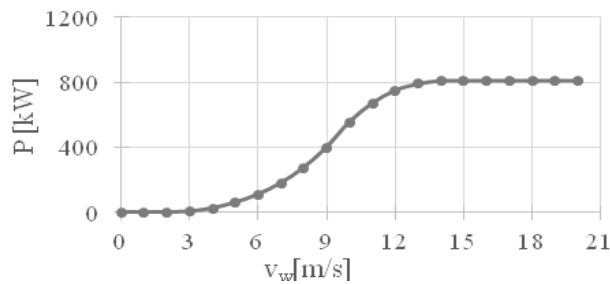
Wykreślona charakterystyka stanowiła podstawę do doboru modelu turbiny. Zdecydowano, że w elektrowni hybrydowej zastosowane zostaną turbiny ENERCON E-48, o krzywej mocy przedstawionej na rys. 4.2.

Następnie dobrano typ paneli fotowoltaicznych. Ze względu na to, iż w warunkach polskich występuje bardzo duża składowa promieniowania rozprosz-

nego, ustalono, iż wykorzystane zostaną panele wykonane w technologii polikrystalicznej o wysokiej jakości. Wybrany model panelu to AXITEC AC-300P/156-72S.



Rys. 4.1. Histogram prędkości wiatru występujących w okolicach miasta Świnoujście [15]



Rys. 4.2. Krzywa mocy turbiny ENERCON E-48 [4]

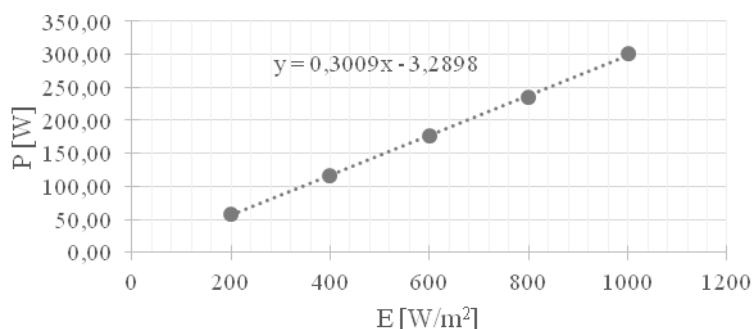
Następnym krokiem, po dobraniu komponentów do instalacji, było obliczenie mocy generowanej przez pojedynczą turbinę i panel fotowoltaiczny w każdej godzinie roku.

W przypadku siłowni wiatrowej przypisano każdej godzinowej prędkości wiatru określoną moc generowaną, odczytaną z charakterystyki mocy turbiny.

Wyznaczenie mocy generowanej przez panel PV w ciągu godziny wymagało skorzystania z zależności mocy generowanej od poziomu natężenia promieniowania słonecznego. Charakterystykę  $P = f(E)$ , wyznaczoną na podstawie danych z karty katalogowej, przedstawiono na rys. 4.3.

Stosując interpolację liniową w programie Microsoft Excel wyznaczono równanie opisujące moc generowaną w funkcji natężenia promieniowania. W ten sposób wyznaczono uzysk energii z 1 panelu PV w każdej godzinie roku.

Kolejnym krokiem było obliczenie łącznych mocy generowanych przez każde źródło w ciągu miesiąca oraz wyznaczenie średniej godzinowej produkcji energii w danym miesiącu. Wyznaczone dane zestawiono w tabeli 4.1.



Rys. 4.3. Wykres zależności mocy generowanej przez panel AC-300P/156-72S od poziomu natężenia promieniowania słonecznego (na podstawie [3])

Tabela 4.1. Wyniki obliczeń miesięcznych i godzinowych uzysków energii

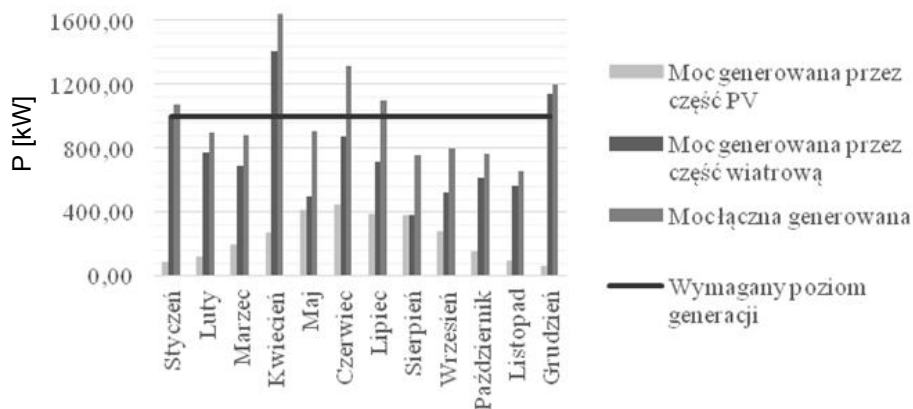
Miesiąc	Turbina wiatrowa – uzysk łączny	Turbina wiatrowa – uzysk średni godz.	Panel fotowoltaiczny – uzysk łączny	Panel fotowoltaiczny - uzysk średni godz.
	kWh	kWh	kWh	kWh
Styczeń	94426	127	8,793	0,012
Luty	84492	126	11,632	0,017
Marzec	79456	107	20,622	0,028
Kwiecień	137597	191	27,453	0,038
Maj	69051	93	43,368	0,058
Czerwiec	83893	117	45,379	0,063
Lipiec	77975	105	40,698	0,055
Sierpień	53177	71	40,178	0,054
Wrzesień	56674	79	28,171	0,039
Październik	83459	112	15,723	0,021
Listopad	62356	87	9,343	0,013
Grudzień	109247	147	6,287	0,008

Założono stały poziom mocy oddawanej do sieci el-en przez elektrownię hybrydową na poziomie 1 MW. Należało zatem tak dobrać udziały poszczególnych źródeł wytwórczych w całym układzie, aby uzyskać jak najniższy poziom nadwyżek i niedoborów mocy. Ustalono, że najoptymalniejszym rozwiązaniem jest wykorzystanie 8 turbin wiatrowych oraz 3000 paneli fotowoltaicznych. Występujące przy tej konfiguracji udziały, wraz z występującymi nadwyżkami i niedoborami energii, przedstawiono w tabeli 4.2 oraz na rys. 4.4.



Tabela 4.2. Wyniki obliczeń godzinowych i miesięcznych uzysków energii i poziomów generowanej mocy

Miesiąc	Śr. uzysk godz. z czę- ści wiatrowej	Śr. uzysk godz. z czę- ści PV	Moc łączna generowana	Występujące nadwyżki mocy	Występujące niedobory mocy
	kWh	kWh	kW	kW	kW
Styczeń	1015,33	35,45	1050,79	50,79	0,00
Luty	1005,86	51,93	1057,78	57,78	0,00
Marzec	854,37	83,15	937,52	0,00	62,48
Kwiecień	1528,86	114,39	1643,24	643,24	0,00
Maj	742,48	174,87	917,35	0,00	82,65
Czerwiec	932,14	189,08	1121,22	121,22	0,00
Lipiec	838,44	164,10	1002,55	2,55	0,00
Sierpień	571,80	162,01	733,80	0,00	266,20
Wrzesień	629,71	117,38	747,09	0,00	252,91
Październik	897,41	63,40	960,81	0,00	39,19
Listopad	692,84	38,93	731,78	0,00	268,22
Grudzień	1174,70	25,35	1200,05	200,05	0,00
Rok	10883,94	1220,05	12103,99	1075,64	971,65



Rys. 4.4. Poziom generowanej mocy przy założonej konfiguracji części wiatrowej i fotowoltaicznych elektrowni hybrydowej

W przypadku założonej konfiguracji średni miesięczny poziom generacji mocy na godzinę wynosi 1008,67 kW. Jest to wartość bardzo zbliżona do zakładanej. Można zatem stwierdzić, iż przewidziana konfiguracja udziałów poszczególnych źródeł jest prawidłowa i odpowiednio zoptymalizowana. Stanowi to podstawę do uznania proponowanego algorytmu konfiguracyjnego za skuteczny.

Na potrzeby projektowanej elektrowni hybrydowej określono cechy, które wybrany magazyn musi spełniać:

- długa żywotność, przy zachowaniu stałych parametrów w czasie eksploatacji;
- możliwość komunikacji i monitoringu;
- wysoka moc znamionowa, spełniająca wymagania jako bufora;
- wysoka sprawność układu;
- prosta procedura przyłączenia instalacji.

Na podstawie powyższych wymagań i dostępnych technologii, wybrano baterie litowo-jonowe jako bufor dla elektrowni hybrydowej. Przykładem możliwego do zastosowania technologii magazynu energii jest bateria CrystEna, firmy Hitachi. Jest to zintegrowany system, który zawiera baterie litowo-jonowe jak i szereg instrumentów związanych z procesami sterującymi i monitorującymi pracę układu. Jest to produkt przeznaczony do stabilizacji procesów produkcyjnych z odnawialnych źródeł energii. Specyfikacja baterii CrystEna została przedstawiona w tabeli 4.3, a przykład instalacji na rysunku 4.5.

Tabela 4.3. Zestawienie parametrów baterii litowo-jonowych CrystEna [9]

Parametr	Wartość
Wymiary	12,2 m x 2,4 m x 2,6 m
Moc	+1 MW ~ -1 MW
Układ połączeń	500 kVA x 2 zestaw
Napięcie AC	3-fazowe 280V
Pojemność baterii	450 kWh
Typ baterii	3,7 V/szt., 75 Ah, Max. 225 A
Wydajność system	Ok. 90% ( w zależności od warunków pracy)
Żywotność	ok. 10 lat



Rys. 4.5. Bateria CrystEna wykorzystana w Somerdale, New Jersey [5]

## 5. PODSUMOWANIE

W przypadku elektrowni wykorzystujących energię wiatru i promieniowania słonecznego do produkcji energii elektrycznej istotnym problemem jest niestabilność obu tych źródeł. Zarówno prędkość wiatru jak natężenie promieniowania mają charakter stochastyczny.

Projektowanie elektrowni hybrydowych pozwala w pewnym stopniu kontrolować ten proces, tzn. można przewidzieć w jakich okresach roku można spodziewać się dominacji jednego ze źródeł.

Proponowany algorytm doboru elementów elektrowni wiatrowo-solarnej uwzględniająca stałą wartość mocy generowanej pozwala, przy wykorzystaniu magazynu energii o stosunkowo niewielkiej pojemności, zminimalizować te wahania.

Podsumowując, należy zaznaczyć, że opracowany algorytm spełnia założenia, co wykazał prezentowany przykład.

Kolejnym krokiem w rozwoju algorytmu, a w konsekwencji aplikacji komputerowej wspomagającej projektowanie hybrydowych elektrowni wiatrowo-solarnych, powinno być opracowanie algorytmu dobierającego turbiny wiatrowe i panele PV z bazy danych.

## LITERATURA

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE, Dz.U. UE L 09.140.16.
- [2] Jastrzębska G., Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014.
- [3] Karta katalogowa panelu AC-300P/156-72S, AXIpower.
- [4] Karta katalogowa turbiny E-48, ENERCON product overview.
- [5] Magazyn energii, <http://demansys.com/news/02-25-2015-news.html>, 01.02.2016 r.
- [6] Natężenie promieniowania: <http://solaris18.blogspot.com/2011/09/nasonecznienie-usonecznienie-i.html>, 01.02.2016 r.
- [7] Nawrowski R., Jarmuda T., Projekt hybrydowej elektrowni słoneczno-wiatrowej, Poznan Univeristy of Technology Academic Journals 2014.
- [8] Nawrowski R., Tomczewski A., Jarmuda T., Koncepcja optymalizacji struktury hybrydowej elektrowni solarno-wiatrowej, Poznan Univeristy of Technology Academic Journals, 2014.
- [9] Nishioka A., Power System Stabilization, CIGRE TNC Technical Seminar, 2014.
- [10] Strzelczyk F., Pawlik M., Laudyn D., Elektrownie, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.

- [11] Trepińska J., Pionowy profil prędkości wiatru przyziemnego, Folia Geographica vol. XXXV–XXXVI, 2004-2005.
- [12] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz. U. z 2015 r. poz. 478.
- [13] Ustawa z dnia 29 grudnia 2015 r. o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz ustawy – Prawo energetyczne, Dz. U. z 2015 r. poz. 2365.
- [14] Warunki wietrzności: <http://www.polenergia.pl/pol/pl/strona/otoczenie>, 01.02.2016 r.
- [15] [www.mr.gov.pl/strony/zadania/budownictwo/dane-do-swiadectw-charakterystyki-energetycznej-budynkow/](http://www.mr.gov.pl/strony/zadania/budownictwo/dane-do-swiadectw-charakterystyki-energetycznej-budynkow/), Typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne do obliczeń energetycznych budynków. Statystyki, Ministerstwo Rozwoju, 11.08.2016 r.

#### **THE CONCEPT OF HYBRID POWER PLANT CONNECTED WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE SELECTED LOCATION**

In thesis pointed out some problems associated with power control in wind power plants and solar farms. Further, thesis shows us a concept of algorithm for optimization hybrid power plant which is connected with energy storage. Energy storage system increases power plant ability to stabilize active power, voltage and voltages frequency (power quality). The concept included component selection criteria and showed influence of energy storage system. In the project were used devices from well-known companies to submit working process of our optimization method.

*(Received: 10. 02. 2016, revised: 9. 03. 2016)*