



Zeszyty Naukowe

Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk

rok 2017, nr 97, s. 5–20

Bartosz SOLIŃSKI*

System wsparcia hybrydowych mikroinstalacji wykorzystujących odnawialne źródła energii a ich efektywność ekonomiczna

Streszczenie: Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii do produkcji energii elektrycznej polega na przetwarzaniu pierwotnych źródeł energii występujących w postaci słońca, wiatru itp. w energię elektryczną. Efektywność ekonomiczna wykorzystania tych źródeł w instalacjach małych mocy silnie uzależniona jest od systemu wsparcia, opartego głównie na instrumentach finansowych. Mikroinstalacje, dzięki wykorzystaniu specjalnych instrumentów dedykowanych dla rynku prosumenta, mogą stać się coraz bardziej interesujące nie tylko pod względem ekologicznym i niezależności energetycznej, ale także finansowym.

W artykule pod pojęciem elektrowni hybrydowej, rozumie się jednostkę produkcyjną, wytwarzającą energię elektryczną lub energię elektryczną i ciepło, w której w procesie wytwarzania energii wykorzystuje się dwa lub więcej odnawialnych źródeł energii lub źródła energii inne niż odnawialne. Połączenie dwóch źródeł energii ma na celu wzajemne ich uzupełnianie się, dla zapewnienia ciągłości dostaw energii elektrycznej i ciepła. Idealna byłaby sytuacja, gdyby oba źródła energii wchodzące w skład elektrowni hybrydowej w sposób ciągły pokrywały całkowite zapotrzebowanie na energię odbiorców. Niestety z uwagi na krótko i długoterminową zmienność warunków atmosferycznych, taki bilans jest trudno osiągalny i to w przypadku przewymiarowanie mocy instalacji, co czyni go nieoptymalnym.

W artykule dokonano oceny możliwości bilansowania elektrowni hybrydowej w okresach dobowych i miesięcznych, scharakteryzowano podstawowe typy elektrowni hybrydowych i jej elementy składowe oraz system wsparcia mikroinstalacji. W artykule w analizach rozważono zastosowanie systemu wsparcia opartego o taryfy gwarantowane (tzw. *feed-in tariff*), opusty oraz dotacje (preferencyjne pożyczki z umorzeniem). Następnie przedstawiono analizę efektywności energetycznej i ekonomicznej dla typowego zestawu hybrydowej mikroinstalacji składającej się z elektrowni wiatrowej i modułów fotowoltaicznych. Założono czternaście wariantów finansowania, których efektywność ekonomiczną porównano z wykorzystaniem metody prostego okresu zwrotu nakładów.

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, elektrowni hybrydowa, efektywność ekonomiczna, system wsparcia

* Dr. inż., Wydział Zarządzania, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków;
e-mail: bartosz.solinski@zarz.agh.edu.pl

Support system hybrid micro-installations using renewable energy sources and economic efficiency

Abstract: Using renewable energy sources for electricity production is based on the processing of primary energy occurring in the form of sun, wind etc., into electrical energy. Economic viability using those sources in small power plants strongly depends on the support system, based mainly on financial instruments. Micro-installations, by using special instruments dedicated to the prosumer market may become more and more interesting not only in terms of environmental energy, but also financial independence.

In the paper, the term hybrid power plant is understood to mean a production unit generating electricity or electricity and heat in the process of energy production, in which two or more renewable energy sources or energy sources other than renewable sources are used. The combination of the two energy sources is to their mutual complementarity, to ensure the continuity of the electricity supply. The ideal situation would be if both sources of energy included in the hybrid power plant continuously covered the total demand for energy consumers. Unfortunately, due to the short-term and long-term variability of weather conditions, such a balance is unattainable.

The paper assesses the possibility of balancing the hybrid power plant in daily and monthly periods. Basic types of power plants and hybrid components and system support micro-installations were characterized. The support system is based particularly on a system of feed-in tariffs and the possibility of obtaining a preferential loan with a subsidy (redemption of part of the loan size). Then, an analysis of energy and economic efficiency for a standard set of hybrid micro-installations consisting of a wind turbine and photovoltaic panels with a total power of 5 kW, were presented. Fourteen variants of financing, economic efficiency compared with the use of the method of the simple payback period were assumed.

Keywords: renewable energy sources, hybrid power plants, economic efficiency, support system

Wprowadzenie

Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii do produkcji energii elektrycznej polega na przetwarzaniu pierwotnych źródeł energii występujących w postaci Słońca, wiatru, energii spodku wód itp. w energię elektryczną. Podstawową zaletą tych źródeł jest możliwość wykorzystania darmowej energii, a wadą duża zależność wytwarzanej energii w danej instalacji od zmienności warunków pogodowych. Aby zwiększyć możliwości efektywnego wykorzystania tych źródeł, zaczęto budować elektrownie hybrydowe, które są kombinacją dwóch lub kilku technologii pozyskiwania energii elektrycznej, często łączonych także z zasobnikiem energii.

Istnieje wiele różnych definicji elektrowni hybrydowej¹. W artykule pod pojęciem elektrowni hybrydowej rozumie się jednostkę produkcyjną, wytwarzającą energię elektryczną lub energię elektryczną i ciepło, w której w procesie wytwarzania energii wykorzystywane są dwa lub więcej odnawialne źródła energii lub źródła energii inne niż odnawialne. Połączenie dwóch źródeł energii ma na celu wzajemne ich uzupełnianie się, dla zapewnienia ciągłości dostaw energii elektrycznej lub/i cieplnej. Idealna byłaby sytuacja, gdyby oba źródła

¹ Zob. Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 18 października 2012, 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 odnawialnym źródle energii Dz.U. 2012, poz. 1229; Patel M, Wind and solar Power systems, CRC Press LCC, Florida, 1999; Soliński B. red. Hybrydowy, wiatrowo-słoneczny system wytwarzania energii elektrycznej, ART TOP, Włocławek 2014; Ustawa o odnawialnych źródłach energii Dz.U. 2015 poz. 478.

energii wchodzące w skład elektrowni hybrydowej, w sposób ciągły pokrywały całkowite zapotrzebowanie na energię odbiorników.

Niestety, tak jak to już wspomniano, z uwagi na krótko i długoterminową zmienność warunków atmosferycznych, taki bilans jest trudno osiągalny. Przy wykorzystywaniu tak mało przewidywalnych i nieciągłych źródeł energii, jakimi są Słońce i wiatr pożądane jest dołączenie do systemu energetycznego zasobników energii elektrycznej, które gromadzą nadmiar energii w czasie nadprodukcji, a oddają ją, gdy warunki atmosferyczne nie sprzyjają wytwarzaniu energii ze źródeł odnawialnych, z których najpopularniejsze są akumulatory chemiczne. W przypadku elektrowni hybrydowych dużej mocy nie stosuje się systemów magazynowania energii, natomiast rolę tę pełni pośrednio sieć energetyczna.

1. Rodzaje elektrowni hybrydowych

Można wyróżnić wiele klasyfikacji elektrowni hybrydowych (Patel 1999; Soliński i in. 2008; Nema i in 2009; Ostrowski i in. 2010). Poniżej przedstawiono zdaniem autora najważniejsze z nich w kilku płaszczyznach podziału.

Ze względu na rodzaj stosowanych nośników energii:

- elektrownie wykorzystujące jedynie nośniki odnawialne (np. elektrownia wiatrowa–elektrownia słoneczna),
- elektrownie wykorzystujące nośniki odnawialne jak i nieodnawialne (np. elektrownia wiatrowa–elektrownia gazowa).

Ze względu na ilość używanych nośników energii:

- dwuskładnikowe (np. elektrownia wiatrowa–elektrownia słoneczna),
- wieloskładnikowe (np. elektrownia wiatrowa–elektrownia słoneczna–dieslowy agregat prądotwórczy).

Ze względu na sposób zachowania ciągłości dostaw energii (jeżeli zastosowane nośniki energii tego wymagają):

- elektrownie hybrydowe bez magazynowania energii (np. elektrownia wiatrowa–elektrownia słoneczna),
- elektrownie hybrydowe z magazynowaniem energii (np. elektrownia wiatrowa–elektrownia szczytowo-pompowa).

Ten podział jest ściśle związany z charakterem wykorzystywanych źródeł energii oraz wielkości jednostki wytwórczej. W rzeczywistości można spotkać praktycznie wszystkie kombinacje elektrowni hybrydowych.

Kolejny istotny podział elektrowni hybrydowych dotyczy ich współpracy z siecią, w tym przypadku wyróżnia się elektrownie hybrydowe pracujące w systemach:

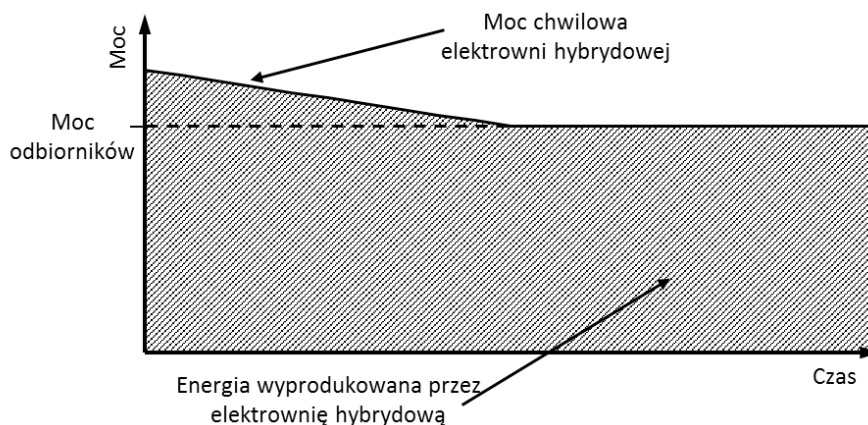
- on-grid,
- off-grid,
- w systemach mieszanych.

Instalacje przyłączane do sieci to inaczej systemy on-grid. Energia elektryczna wyprodukowana przez elektrownię hybrydową jest w inwerterze sieciowym zamieniana na prąd przemienny o napięciu i częstotliwości zgodnymi z siecią elektroenergetyczną, z którą współpracują. Instalacje energetyczne nieprzyłączane do sieci to inaczej systemy off-grid. Nazywa się je instalacjami autonomicznymi. Instalacje te mogą pracować niezależnie od

sieci energetycznej. Z reguły służą do zasilania obiektów, do których prowadzenie przyłącza elektroenergetycznego okazuje się nieopłacalne, na przykład: schroniska górskie, sygnalizacja drogowa, gdzie nie ma dostępu do sieci energetycznej, itp. Systemy takie wymagają jednak magazynowania energii np. w akumulatorach.

2. Bilansowanie elektrowni hybrydowych

Połączenie dwóch źródeł energii ma na celu wzajemne ich uzupełnianie się, dla zapewnienia ciągłości dostaw energii elektrycznej. Jak przedstawiono na rysunku 1 idealna byłaby sytuacja, gdyby oba źródła energii wchodzące w skład elektrowni hybrydowej, w sposób ciągły pokrywały całkowite zapotrzebowanie na energię odbiorników. W tym przypadku wystarczyłoby zainstalowanie elektrowni słonecznej oraz wiatrowej o mocach niewiele większych od mocy odbiorników.



Rys. 1. Bilans energetyczny w przypadku idealnym
 Źródło: Soliński i in. 2015

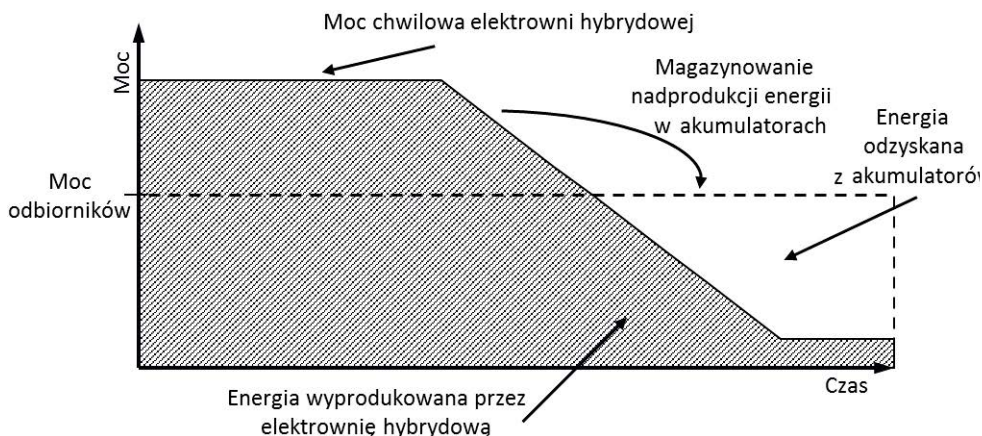
Fig. 1. The energy balance in the ideal case

Niestety z uwagi na krótko- i długoterminową zmienność warunków atmosferycznych taki bilans jest nieosiągalny. Przy wykorzystywaniu tak mało przewidywalnych i nieciągłych źródeł energii jakimi są słońce i wiatr pożądane jest dołączenie do systemu energetycznego zasobników energii elektrycznej, które gromadzą nadmiar energii w czasie nadprodukcji, a oddają ją gdy warunki atmosferyczne nie sprzyjają wytwarzaniu energii ze źródeł odnawialnych.

Teoretycznie możliwe jest wtedy uzyskanie systemu zbilansowanego energetycznie, co pokazano na rysunku 2.

Istnieją różne metody magazynowania energii:

- Krótkookresowe (minuty–godziny):
 - bateria akumulatorów, małej pojemności,



Rys. 2. Zbilansowana elektrownia hybrydowa z magazynowaniem energii elektrycznej
 Źródło: Soliński i in. 2015

Fig. 2. Balanced hybrid power with the storage of electricity

- super kondensatory,
- akumulatory kinetyczne.
- Długookresowe (godziny–dni):
 - elektrownie wodne, szczytowo-pompowe,
 - duże baterie akumulatorów,
 - magazynowanie sprężonego powietrza (*Compressed Air Energy Storage – CAES*),
 - ogniwa paliwowe.

3. Elementy składowe hybrydowej elektrowni wiatrowo-słonecznej

W ostatnich latach najbardziej popularnymi ekologicznymi elektrowniami hybrydowymi stały się zespoły wytwórcze wykorzystujące wiatr i energię słoneczną. Intuicyjnie oba te źródła energii powinny się nawzajem uzupełniać. Jednak nie są one w stanie zapewnić ciągłej dostawy energii elektrycznej. W związku z tym w proponowanych na rynku zestawach hybrydowych, jak dotychczas zawsze uwzględniane było magazynowanie energii elektrycznej w akumulatorach. Jednak poprzez rozwój rozwiązań prosumenckich i możliwości podłączania także małych układów wytwarzających energię do sieci, problem magazynowania został wyeliminowany i w tym przypadku rolę magazynu energii pełni sieć elektroenergetyczna (bilansowanie przejmuje operator sieci).

W skład takiego typowego zestawu wchodzi, poza elektrownią wiatrową o pionowej (VAWT) lub poziomej osi obrotu (HAWT) i zestawem modułów fotowoltaicznych (PV), urządzenia służące do przekształcania prądu elektrycznego – inwertery sieciowe – służące do zamiany prądu stałego na prąd przemienny, ale ponadto mające zdolność synchroni-

zowania się z siecią energetyczną, dzięki czemu mogą służyć do przekazywania energii wyprodukowanej w elektrowni hybrydowej do sieci energetycznej. W części elektrycznej kolejnymi elementami są odpowiednie kable połączeniowe (odporne na działanie promieni UV oraz działania czynników atmosferycznych), konektory połączeniowe, a także rozdzielnica zawierająca pozostałe, niezbędne urządzenia elektroinstalacyjne m.in.: ochronniki przeciwprzepięciowe, rozłączniki izolacyjne, zabezpieczenia nadprądowe.

Ponadto w skład elektrowni hybrydowej wchodzi wyposażenie, takie jak:

- system montażowy paneli fotowoltaicznych,
- maszt elektrowni wiatrowej.

Natomiast w przypadku systemów z własnym magazynowaniem energii system jest rozbudowany o kolejne elementy:

- regulatory ładowania akumulatorów, służące do kontroli i ładowania akumulatora napięciem stałym, posiadające zabezpieczenia przed przeładowywaniem i nadmiernym rozładowaniem akumulatorów, odwrotną polaryzacją z automatycznym wykrywaniem napięcia pracy systemu,
- inwertery wyspowe, inaczej przetworniki napięcia, falowniki, służące do zamiany prądu stałego na prąd przemienny. Napięcie wyjściowe z tych inwerterów jest czysto-sinusoidalne i może służyć do zasilania wszystkich powszechnie stosowanych urządzeń elektrycznych. Urządzenia posiadają zabezpieczenia przed zwarciami, odwrotną polaryzacją napięcia, nadmiernym rozładowaniem akumulatora,
- akumulatory, konstruowane do pracy cyklicznej i bezobsługowej.

Wymienione powyżej urządzenia są dedykowane instalacjom fotowoltaicznym. W przypadku kontrolerów ładowania i inwerterów wyspowych w urządzeniach zapewniono optymalne wykorzystanie krzywej mocy modułu fotowoltaicznego, dla zapewnienia maksymalizacji produkcji energii elektrycznej. W przypadku elektrowni wiatrowych mamy do czynienia z reguły z urządzeniami konstruowanymi specjalnie dla danego modelu, w zależności od typu generatora, mocy itp. Zarówno małe, jak i średnie elektrownie wiatrowe są wyposażone w generatory prądu stałego lub przemiennego jedno- jak i trójfazowe. Z uwagi na to w przypadku każdej takiej konstrukcji opracowywany jest również układ elektroniczny umożliwiający np. ładowanie akumulatora czy też współpracę z siecią energetyczną.

4. System wsparcia odnawialnych źródeł energii obowiązujący w Polsce

System wsparcia sektora energetyki odnawialnej w Polsce od wielu lat oparty był na dotacjach, subwencjach inwestycyjnych i preferencyjnych kredytach, a także na wsparciu fiskalnym. Pewne wzmocnienie tego systemu nastąpiło w 1999 roku, gdy ukazało się rozporządzenie ministra gospodarki w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku zakupu energii elektrycznej i ciepła ze źródeł niekonwencjonalnych (Dz.U. z 1999 r. Nr 13, poz. 119), nakładające obowiązek zakupu energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii po najwyższej cenie taryfowej obowiązującej odbiorców przyłączonych na niskim napięciu. Był to – jak się wydaje – pierwszy krok na długiej drodze wdrażania systemu wsparcia odnawialnych źródeł energii w Polsce. Rozporządzenie to było następnie wielokrotnie nowelizowane, nakładając kolejne obowiązki i określając cele obligatoryjne dotyczące udziału

odnawialnych źródeł energii w sprzedaży energii elektrycznej odbiorcom końcowym przez przedsiębiorstwa energetyczne (Soliński 2011).

4.1. System zielonych certyfikatów

Wymienione powyżej instrumenty zostały zachowane do dziś, lecz cały system wsparcia został znacznie rozbudowany. System wsparcia odnawialnych źródeł energii na rynku energii elektrycznej (dla instalacji zainstalowanych przed 2016 rokiem) oparty jest na systemie kształtowania wielkości energii wykorzystującym tzw. zielone certyfikaty, w którym na wszystkie podmioty sprzedające energię elektryczną odbiorcom końcowym został nałożony obowiązek zakupu odpowiedniej liczby świadectw pochodzenia, zgodnie z celami określonymi w rozporządzeniu ministra gospodarki, a w przypadku ich braku – nałożeniem opłaty zastępczej czyli kary. Producent energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii uzyskuje więc przychody z dwóch źródeł:

- sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym (rynku energii),
- sprzedaży praw majątkowych (PM) wynikających z posiadania świadectw pochodzenia energii.

System ten polega więc na tym, że wytwórcom wytwarzającym energię ze źródeł odnawialnych nadawany jest zbywalny certyfikat za każdą jednostkę wytworzonej energii. Wytwórca energii uzyskuje przychody zarówno z fizycznej sprzedaży energii, jak i handlu certyfikatami. Ceny energii i certyfikatu są ustalone odpowiednio na rynku energii elektrycznej i na wydzielonym rynku zbywalnych świadectw pochodzenia energii (certyfikatów), czyli na Towarowej Gieldzie Energii (TGE) na rynku praw majątkowych (RPM) lub też w kontraktach dwustronnych. W Polsce cena energii wytworzonej w odnawialnych źródłach (fizyczna sprzedaż energii) ustalana jest na podstawie średniej ceny energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym w roku poprzedzającym sprzedaż energii i obwieszczana jest w postaci komunikatu prezesa URE.

Istotną zmianą wprowadzoną przez ustawę o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r. (Dz.U. 2015 poz. 478) był nowy system wsparcia, tzw. system aukcyjny, który zaczął obowiązywać od połowy 2016 r. Inwestorzy, którzy wygrają aukcję w określonym „koszyku technologicznym”, uzyskują gwarancję stałej taryfy indeksowanej inflacją podczas całego okresu wsparcia (maksymalnie przez 15 kolejnych lat).

4.2. Wsparcie dla mikroinstalacji – nowa ustawa o odnawialnych źródłach energii

Przedstawione powyżej systemy wsparcia dotyczą średnich i dużych instalacji. Mikroinstalacje otrzymały zupełnie inny system wsparcia, który uległ istotnym modyfikacjom na przestrzeni ostatnich lat. Już od roku 2012 trwały w Ministerstwie Gospodarki prace nad opracowaniem nowego systemu, który miałby pozwolić polskiej energetyce na spełnienie oczekiwań wyostrowanych w jej kierunku przez Komisję Europejską w szeregu dokumentów strategicznych. Projekty były wielokrotnie modyfikowane i zmieniane. Ostateczny kształt ustawy był odmienny niż pierwsze jej wersje projektowe.

Na początku 2014 roku obowiązywało znowelizowane Prawo energetyczne, które wprowadziło instytucję prosumenta, czyli wytwórcę energii produkującego energię na własne potrzeby a jej nadmiar odsprzedające do sieci elektro-energetycznej. Cena sprzedaży tej energii została początkowo ustalona na poziomie 80% średniej ceny energii na rynku na rynku konkurencyjnym w poprzednim roku ogłoszonej przez prezesa URE, w nowej ustawie cena zakupu została ustalona na poziomie 100% tej ceny.

Nowa ustawa o odnawialnych źródłach energii początkowo wprowadziła także system stałych cen zakupu energii z mikroinstalacji uzależniony od rodzaju wykorzystanego źródła energii odnawialnej, tzw. *feed-in tariff* (Soliński 2008). Instrument ten miał rozpocząć działanie po 1 lipca 2016 roku, jednak poprzez ustawę z dnia 22 czerwca 2016 roku o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii został anulowany a w jego miejsce pojawił się system opustów. W tym systemie Prosument, nadwyżki niewykorzystanej energii, które wprowadził do sieci, może odbierać w proporcjach 0,8 kWh za każdą wprowadzoną do sieci kWh dla instalacji do 10 kW oraz 0,7 kWh za każdą wprowadzoną do sieci kWh dla instalacji 10–40 kW.

Kolejnym istotnym elementem wprowadzonym przez nową ustawę o odnawialnych źródłach energii są roczne rozliczenia z tytułu różnicy między ilością energii elektrycznej pobranej z sieci a ilością energii elektrycznej wprowadzonej do tej sieci. Prosumenci mają więc możliwość rozliczać się z zakładami energetycznymi z zakupionej i sprzedanej energii w ramach tzw. *net-meteringu* (w okresie 365 dni). Niestety w tym przypadku niewykorzystana ilość energii w okresie rocznym przepada.

Dodatkowo po nowelizacji Prawa energetycznego wraz z końcem marca 2014 Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej wprowadził w życie program dofinansowań do mikroinstalacji OZE – Prosument. Program ten w roku 2016 został dostosowany do nowej ustawy o odnawialnych źródłach energii. Środki udzielane są w formie pożyczki, która wynosi do 100% kosztów kwalifikowanych instalacji wchodzących w skład przedsięwzięcia, w ramach dotacji można otrzymać do 30% dofinansowania dla instalacji produkcji energii elektrycznej i 15% do produkcji ciepła. Musi być to jednak instalacja małej mocy tzw. mikroinstalacja. Małe elektrownie wiatrowe lub instalacje fotowoltaiczne muszą posiadać zainstalowaną moc elektryczną do 40 kW. Maksymalna wysokość kosztów kwalifikowanych jest zależna od tego, czy instalacja wykorzystuje jedno odnawialne źródło energii, czy też równolegle wykorzystuje więcej niż jedno źródło (hybrydowa mikroinstalacja). Samo oprocentowanie pożyczki w skali roku wynosi 1%, maksymalny okres finansowania pożyczki to 15 lat, a przy jej udzielaniu możliwa jest karencja w spłacie rat kapitałowych, nie dłuższa niż 6 miesięcy od daty zakończenia przedsięwzięcia.

5. Wydajność energetyczna elektrowni hybrydowej małej mocy

Pierwszym krokiem przy projektowaniu układu hybrydowego jest określenie mocy jednostki wytwórczej, zależnej od przyszłego wykorzystania elektrowni. Na podstawie przewidywanego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz wiedzy na temat lokalnych warunków wiatrowych i słonecznych można w przybliżeniu wyliczyć moc elektrowni wiatrowej (HAWT) i słonecznej (PV), które wejdą w skład instalacji hybrydowej.

W obliczeniach założono wykorzystanie instalacji przez gospodarstwo domowe zamieszkiwane przez 4 osoby, dla którego założono średnie roczne zużycie energii na poziomie 3180 kWh². Daje to średnie miesięczne zużycie na poziomie 265 kWh.

Dla takiego poziomu zużycia w wyniku symulacji dobrano instalację o mocy 5 kW (1 kW w HAWT i 4 kW w PV), umożliwiającą bilansowanie tego poziomu zużycia energii w okresach miesięcznych.

Dysponując lokalnymi danymi o prędkości wiatru, mapami nasłonecznienia i konkretnymi charakterystykami stosowanych urządzeń można szacunkowo wyznaczyć wielkość wytwarzanej energii. W przedstawionej poniżej analizie dane o warunkach wiatrowych, warunkach nasłonecznienia oraz rzeczywistej wydajności energetycznej systemu hybrydowego pozyskano z elektrowni hybrydowej zainstalowanej na AGH na budynku A1. Obliczeń produkcji energii elektrycznej dokonano dla jednej z najbardziej popularnych technologii ogniw fotowoltaicznych – modułów krzemowych.

W tabeli 1 i na rysunku 3 pokazano produkcję energii elektrycznej z elektrowni hybrydowej złożonej z elektrowni wiatrowej (HAWT) o poziomej osi obrotu o mocy 1 kW oraz modułów fotowoltaicznych (PV) o mocy 4 kW.

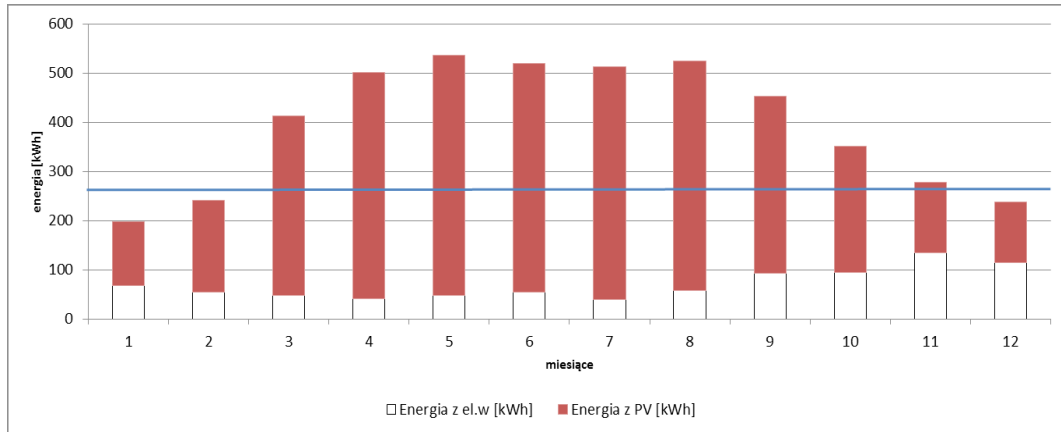
TABELA 1. Średnia miesięczna produkcja energii elektrycznej elektrowni hybrydowej wiatrowo-słonecznej

TABLE 1. Average monthly electricity production of a hybrid wind-solar power plant

Miesiąc	Energia z HAWT [kWh]	Energia z PV [kWh]	Suma [kWh]
Styczeń	68	131	198
Luty	54	187	241
Marzec	48	365	413
Kwiecień	41	460	501
Maj	49	488	537
Czerwiec	55	464	519
Lipiec	40	472	512
Sierpień	57	468	525
Wrzesień	93	361	453
Październik	95	256	351
Listopad	135	143	278
Grudzień	115	122	237
Suma	850	3 916	4 767

Źródło: opracowanie własne.

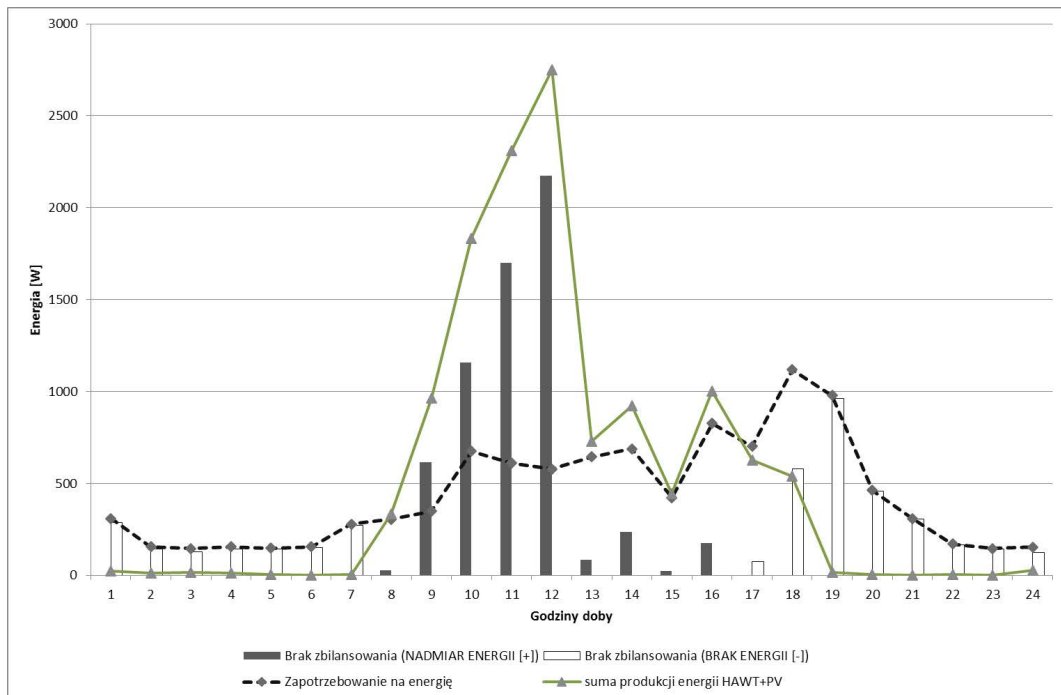
² Wyznaczono na podstawie średniego zużycia energii elektrycznej przez gospodarstwo domowe (2226 kWh średnia dla 2,8 mieszkańca) podanej przez GUS w opracowaniu *Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2012 r.*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2014.



Rys. 3. Produkcja energii elektrycznej elektrowni hybrydowej wiatrowo-słonecznej w poszczególnych miesiącach

Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Average monthly electricity production of a hybrid wind-solar power plant



Rys. 4. Bilans zużycia i produkcji energii – dzień 1

Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. The balance of consumption and energy production – Day 1

Jak można zauważyć na rysunku 3, elektrownia hybrydowa zapewnia dostawy energii elektrycznej w ciągu miesiąca na średnim poziomie 265 kWh (poza trzema miesiącami zimowymi).

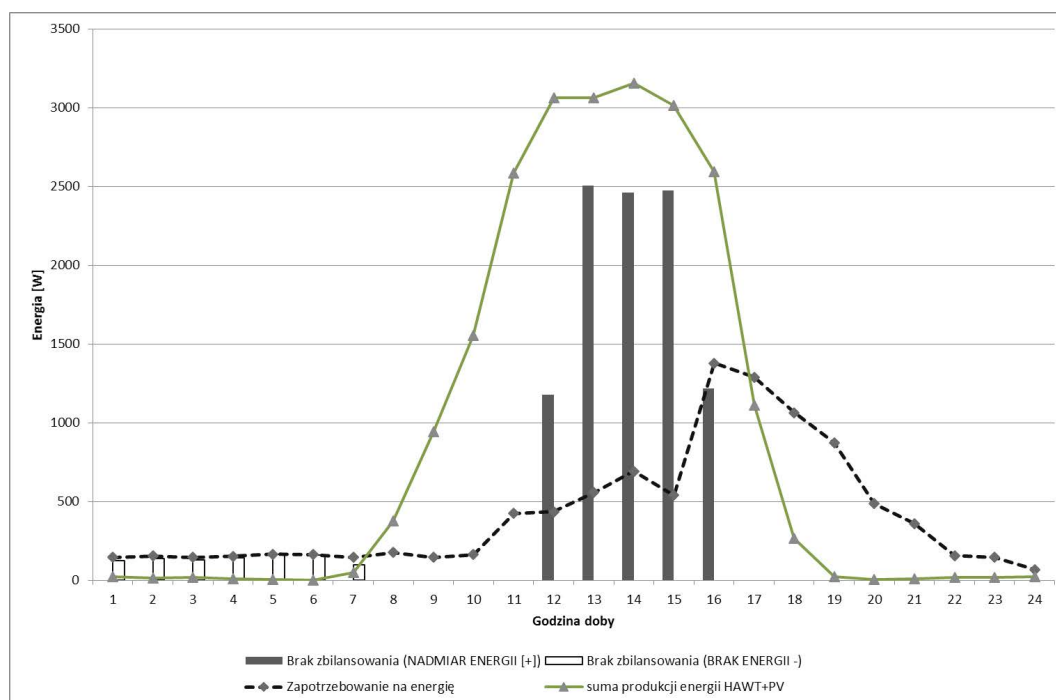
Poniżej dokonano także analizy bilansowania dobowego. Podano przykłady dla dwóch wybranych dni z kwietnia 2016 roku. Zapotrzebowanie na energię elektryczną zostało podane na podstawie rzeczywistego zużycia energii przez gospodarstwo domowe, zamieszkiwane przez 4 osoby.

Jak można zauważyć na rysunkach 4 i 5, elektrownia nie zapewnia bilansowania dobowego. Poziomy braku zbilansowania dobowego są dość wysokie. Dla dnia 1 przy zapotrzebowaniu dobowym na poziomie 10,2 kWh i produkcji przez elektrownię hybrydową 12,3 kWh, braki bilansowe wynoszą:

- nadmiar energii 6,2 kWh,
- brak energii 4,1 kWh.

Natomiast dla dnia 2 przy zapotrzebowaniu dobowym na poziomie 10 kWh i produkcji przez elektrownię hybrydową większej ilości energii 21,9 kWh, braki bilansowe wynoszą:

- nadmiar energii 15,8 kWh,
- brak energii 3,9 kWh.



Rys. 5. Bilans zużycia i produkcji energii – dzień 2

Źródło: opracowanie własne

Fig. 5. The balance of consumption and energy production – Day 2

Dlatego istotne jest korzystanie z systemu *net-meteringu* umożliwiające bilansowanie wytwarzania i zużycia energii w okresach półrocznych. Alternatywnym sposobem jest wykorzystanie systemu magazynowania energii, który ten brak zbilansowania może ograniczyć, jednak wiąże się z koniecznością poniesienia dodatkowych nakładów na system magazynowania (np. akumulatory).

Dla określenia optymalnej mocy układu hybrydowego i optymalnego stosunku mocy obu jednostek wytwórczych należy również przeprowadzić obliczenia dla innych konfiguracji elektrowni np. poprzez zmianę stosunku mocy, czyli zmniejszenie mocy elektrowni wiatrowej, a zwiększenie mocy paneli fotowoltaicznych. Stosunek ten będzie też zależny od dziennego zużycia energii, np. jeśli większość energii jest używana w ciągu dnia w okresie letnim, to uzasadnione jest zwiększenie mocy paneli fotowoltaicznych. Tego typu analizy przeprowadzono w monografii (Soliński i in. 2015).

6. Ocena efektywności ekonomicznej elektrowni hybrydowej

Nakłady inwestycyjne przyjęto na podstawie ofert rynkowych kompletnych systemów elektrowni wiatrowych i słonecznych dla przyjętych i opisanych wyżej technologii oraz założeń, korzystając z ofert przedsiębiorstw³. Na tej podstawie nakłady te zostały określone na poziomie 32 000 zł, za kompletny system hybrydowy wraz z montażem o mocy 5 kW. Ze względu na fakt, że urządzenia te w zasadzie nie wymagają dozoru, pominięto koszty eksploatacyjne. Należy pamiętać, że koszty te związane są z obsługą, naprawą i przeglądami systemu, a czynności te w znaczącej części mogą być przeprowadzone przez właściciela gospodarstwa domowego. Koszty te mogą szczególnie wystąpić w przypadku awarii elektrowni wiatrowej po upływie jej gwarancji, jednak w tym uproszczonym rachunku zostały one pominięte.

Przychody ustalono w różnych wariantach (tab. 2) związanych z potencjalnym systemem wsparcia możliwym do wykorzystania przez mikroinstalację: zielone certyfikaty, prosument sprzedający nadwyżki energii po 100% (z pełnym bilansowaniem nadwyżek energii), system taryf gwarantowanych (FiT), prosument korzystający z systemu opustów (częściowe bilansowanie nadwyżek energii). Koszt energii dla gospodarstwa domowego ustalono na podstawie taryfy G12, natomiast sprzedaży energii na TGE na podstawie średniej ceny z ostatniego kwartału (www.tge.pl, www.ure.gov.pl, www.tauron-pe.pl).

Poniżej przedstawiono analizę opłacalności z wykorzystaniem prostego okresu zwrotu nakładów (SPBT) dla różnych wariantów związanych z wykorzystaniem odpowiednich systemów wsparcia, przedstawionych w tabeli 3. Dodatkowo uwzględniono warianty z możliwością uzyskania dotacji w wysokości 30% z programu prosument NFOŚiGW (umorzenie części kredytu) i oznaczono je literą A.

W wariantach 1–4 przedstawiono analizy dla elektrowni hybrydowej o mocy 5 kW, a w wariantach 5–7 dla wykorzystania wyłącznie systemu fotowoltaicznego o mocy 4 kW. W wariantach z indeksem A uwzględniono dotacje 30%.

Analizując wyniki można zauważyć, że opłacalność inwestycji w ramach wykorzystania wszystkich systemów wsparcia znacząco wzrasta po uzyskaniu dotacji. Jednak w pełnej

³ EKOLAND www.ekoland.shoper.pl; SOLSUM www.solsum.pl.

TABELA 2. Kalkulacja przychodu i oszczędności dla elektrowni hybrydowej

TABLE 2. Calculation of income and savings for the hybrid power plant

Wariant	Stosowany system wsparcia	Cena energii na rynku konkurencyjnym w 2015 roku [zł]	Dodatkowe korzyści: cena zielonego certyfikatu/zaoszczędzony koszt energii [zł]	Wielkość wytworzonej energii/opustu energii [MWh]	Korzyści [zł]
1	Zielone certyfikaty Sprzedana energia + zielone certyfikaty	169,99	110,0	4,767	1 335
2	Prosument sprzedający nadwyżki energii po 100% ceny energii na rynku konkurencyjnym Sprzedana energia + oszczędność kosztów energii elektrycznej (patrz bilansowanie nadwyżek energii)	169,99	602,7	1,587 3,180 suma	270 1 917 2 186
3	FiT Sprzedana energia + oszczędność kosztów energii elektrycznej	650	602,7	1,587 3,180 suma	1 031 1 917 2 948
4	Prosument – opusty oszczędność kosztów energii elektrycznej 30% energii bezpośredni zużytej (zbilansowanej) + energia odzyskana w formie opustu (80% energii przesłanej do sieci) pomniejszona o energię, która została oddana do sieci za darmo		602,7 602,7	1,430 1,750 suma	862 1 055 1 917
Tylko elektrownia fotowoltaiczna o mocy 4 kW					
5	FiT Sprzedana energia + oszczędność kosztów energii elektrycznej	650,0	602,7	0,736 3,180 suma	651 1 917 2 567
6	Prosument sprzedający nadwyżki energii po 100% ceny energii na rynku konkurencyjnym Sprzedana energia + oszczędność kosztów energii elektrycznej (patrz bilansowanie nadwyżek energii)	169,99	602,7	0,736 3,180 suma	125 1 917 2 042
7	Prosument – opusty oszczędność kosztów energii elektrycznej 20% energii bezpośredni zużytej (zbilansowanej) + energia odzyskana w formie opustu (80% energii przesłanej do sieci) pomniejszona o energię, która została oddana do sieci za darmo		602,7 602,7	0,783 2,396 suma	472 1 444 1 916

Źródło: opracowanie własne.

TABELA 3. Prosty okres zwrotu dla różnych wariantów finansowania elektrowni hybrydowej (HAWT+PV) – warianty 1–4 i elektrowni fotowoltaicznej (PV) – warianty 5–7

TABLE 3. The simple payback period for the different financing options of a hybrid power plant and a photovoltaic power plant

Wariant	Nakłady inwestycyjne [zł]	Procentowa wielkość dotacji [%]	Średni roczny przychód/oszczędność [zł]	Prosty okres zwrotu SPBT [lata]
1	32 000		1 334,7	24,0
1A	32 000	30%	1 334,7	17,0
2	32 000		2 186,3	14,6
2A	32 000	30%	2 186,3	10,4
3	32 000		2 948,0	10,9
3A	32 000	30%	2 948,0	7,6
4	32 000		1 916,9	16,7
4A	32 000	30%	1 916,9	11,7
5	20 100		2 567,3	7,8
5A	20 100	30%	2 567,3	5,5
6	20 100		2 041,8	9,8
6A	20 100	30%	2 041,8	6,9
7	20 100		1 916,5	10,5
7A	20 100	30%	1 916,5	7,3

Źródło: opracowanie własne.

ocenie wariantów z dotacją (z indeksem A) należałoby uwzględnić, koszty prowizji i oprocentowania, które wydłużą okres zwrotu.

Analizy wskazują, że najkorzystniejszym z systemów wsparcia dla systemu hybrydowego jest system taryf gwarantowanych (FiT), wprowadzony pierwotną ustawą o odnawialnych źródłach energii, a następnie zastąpiony systemem opustów. Dawał on możliwość zarabiania na wytwarzaniu energii elektrycznej, nawet w przypadku zbyt dużych mocy zainstalowanych w stosunku do zapotrzebowania czyli tzw. przewymiarowania instalacji. Dla tego systemu wsparcia prosty okres zwrotu nakładów SPBT wyniósł 10,9 lat, a po uwzględnieniu dotacji 7,6 lat. Natomiast wszystkie pozostałe systemy wsparcia cechują się dłuższymi okresami zwrotu nakładów w stosunku do systemu FiT.

Zastosowanie obecnie obowiązującego systemu wsparcia – systemów opustów – dla elektrowni hybrydowej daje długie okresy zwrotu (SPBT) równe 16,7 lat, a po uwzględnieniu dotacji 11,7 lat. Okresy te mogłyby być krótsze ze względu na fakt, że 919 kWh energii elektrycznej możliwej do odzyskania po opuszczeniu 0,8, zostało oddane do sieci za darmo. Wynika to z faktu że analizowana elektrownia hybrydowa wytwarza w ciągu roku zbyt dużo

energii elektrycznej, a w przypadku tego systemu każde przewymiarowanie mocy instalacji staje się nieopłacalne.

Innym wariantem, który został także przeanalizowany dotyczył prosumenta, który może dokonywać pełnego zbilansowania nadwyżek energii i pokrycia nimi własnego zapotrzebowania, a nadwyżki energii wygenerowane ponad swoje całkowite zużycie roczne sprzedaje po 100% ceny na rynku konkurencyjnym ogłoszonej przez URE. W tym wariantcie również istniała możliwość zarabiania na wytwarzaniu energii w przypadku nadwyżki energii w stosunku do zapotrzebowania. Taki wariant niwelował problem niezyskania zapłaty za nadwyżki energii (występujący w przedstawionym powyżej wariantcie systemu opustów), przez co jego okres zwrotu jest nieco krótszy niż dla systemu opustów, ale dłuższy niż w systemie FiT.

Porównanie systemu FiT i systemu opustów staje się nieco bardziej problematyczne jeśli weźmie się pod uwagę fakt, że stosowanie podwójnego wsparcia miało być niedozwolone. Przede wszystkim system FiT pozwalał generować przychody, wynikające ze wsparcia wyższą taryfą gwarantowaną, więc nie mógłby korzystać z dodatkowego wsparcia w postaci dotacji. Wtedy okresy zwrotu nakładów dla obu systemów są bardzo zbliżone do siebie i wynoszą 10,9 lat dla FiT oraz 11,7 lat dla systemu opustów z dotacją.

Wykorzystanie wyłącznie instalacji fotowoltaicznej (warianty 5–7) dają krótsze okresy zwrotu nakładów (5,5–10,5 lat) niż systemu hybrydowego (PV+HAWT) (7,6–24 lat), co wynika z przeciętnej efektywności elektrowni wiatrowych małych mocy i stosunkowo niekorzystnych warunków wiatrowych w badanej lokalizacji oraz wyższych cen elektrowni wiatrowych.

W tym przypadku dla wykorzystania wyłącznie instalacji fotowoltaicznej, najkrótszym okresem zwrotu nakładów charakteryzuje się system FiT. Jednak po uwzględnieniu braku możliwości uzyskania dotacji w tym systemie, okres zwrotu dla systemu FiT wynosi 7,8 lat, a dla systemu opustów z dotacją 7,3 lat. Więc system opustów staje się korzystniejszy.

Podsumowanie

Wykorzystywany system wsparcia ma istotne znaczenie dla oceny efektywności ekonomicznej mikroinstalacji opartej o odnawialne źródła energii. Stosowane w nim instrumenty finansowe m.in stałe ceny gwarantowane (feed-in tariff), dotacje (program prosument), system opustów i bilansowanie zużycia (net-metering) znacząco poprawiają opłacalność wykorzystania odnawialnych źródeł przez prosumentów. Uzyskane wskaźniki prostego okresu zwrotu nakładów dla elektrowni hybrydowej na poziomie ponad 10 lat w zależności od możliwych wariantów nie są zbyt imponujące i zachęcające do realizacji inwestycji, przez co takie rozwiązania są bardzo rzadko spotykane na rynku, mimo szeregu swych zalet. W przypadku właściwie dobranej mocy instalacji hybrydowej do profilu zużycia i zwiększenia ilości energii zużytej bezpośrednio przez odbiorniki (zbilansowanej), wskaźnik ten może ulec poprawie. Dla systemów hybrydowych należało by rozważyć dodatkowe wsparcie, wynikające właśnie z faktu większego bilansowania zużycia energii w stosunku do systemów opartych wyłącznie na jednym źródle energii.

W przypadku wykorzystania instalacji opartej wyłącznie na modułach fotowoltaicznych, okresy zwrotu nakładów są krótsze (dla systemu opustów z dotacją SPBT wynosi 7,3 lat).

W przypadku tego rodzaju instalacji wydają się być one akceptowalne i wskazują, że wsparcie jest ustalone na poziomie gwarantującym właściwe wykorzystanie środków, przy jednoczesnym połączeniu wsparcia środkami z NFOŚiGW w formie umorzenia części pożyczki (jako dotacji) i obowiązującego obecnie systemu opustów.

Literatura

- Nema i in. 2009 – Nema, P., Nema, R. i Rangnekar, S. 2009. A current state of art. Development of hybrid energy system using wind and PV-solar: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, Elsevier, s. 2096–2103.
- Ostrowski i in. 2010 – Ostrowski, J., Soliński, I. i Soliński, B. 2010. Czy na Podkarpaciu pojawia się hybrydowe wiatrowo-gazowe elektrownie? *Przegląd Gazowniczy* nr 2 s. 10–14.
- Patel, M. 1999. *Wind and solar Power systems*, CRC Press LCC, Florida.
- Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 18 października 2012, 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 odnawialnym źródle energii Dz.U. 2012, poz. 1229.
- Soliński, B. red. 2014. *Hybrydowy, wiatrowo-słoneczny system wytwarzania energii elektrycznej*. Włocławek: ART TOP.
- Soliński i in. 2015 – Soliński, B., Matusik, M., Ostrowski, J., Soliński, I. i Turoń, K. 2015. *Modelowanie funkcjonowania hybrydowych wiatrowo-słonecznych systemów wytwarzania energii elektrycznej*. Kraków: Wydawnictwa AGH.
- Soliński, B. 2011. Ocena efektów implementacji i zarządzania systemem wsparcia odnawialnych źródeł energii w Polsce na rynku energii elektrycznej. *Zeszyt naukowy nr 21. Zarządzanie nr 7, Wyższa Szkoła Zarządzania i Bankowości w Krakowie*, Kraków.
- Soliński, B. 2008. Rynkowe systemy wsparcia odnawialnych źródeł energii – porównanie systemu taryf gwarantowanych z systemem zielonych certyfikatów. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 11, z. 2, Kraków.
- Soliński i in. 2008 – Soliński, I., Ostrowski, J. i Soliński, B. 2008. Wiatrowo-gazowe elektrownie hybrydowe. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 11, z. 2, s. 121–128, Kraków.
- Urząd Regulacji Energetyki. [Online] Dostępne w: www.ure.gov.pl [Dostęp: 1.06.2017].
- Ustawa o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r., Dz.U. 2015 poz. 478.
- Ustawa z dnia 29 grudnia 2015 roku o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii, Dz.U. 2015 poz. 2365.
- Ustawa z dnia 22 czerwca 2016 roku o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii, Dz.U. 2016 poz. 925.
- Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne (Dz.U. z 2006 r. Nr 89, poz 625 z późn. zm.).