



Bartosz SOLIŃSKI*

Efekty energetyczne, ekonomiczne i ekologiczne bilansowania hybrydowej mikroinstalacji wiatrowo-słonecznej

Streszczenie: Odnawialne źródła energii to takie jej rodzaje, których używanie nie wiąże się z ich długotrwałym deficytem, a ich zasoby odnawiają się w krótkim czasie. Podstawową zaletą wykorzystania odnawialnych źródeł energii jest możliwość spożytkowania darmowej energii, oddziałującej negatywnie na środowisko tylko w niewielkim stopniu, a więc dostarczającej interesariuszom wielu rodzajów efektów natury energetycznej, ekonomicznej oraz ekologicznej. Jednym z głównych problemów towarzyszących wytwarzaniu energii z takich źródeł jak wiatr i słońce, jest duża zmienność i nieprzewidywalność wielkości jej wytwarzania wynikająca z zależności ilości produkowanej energii od aktualnych warunków pogodowych. Tworzenie systemów hybrydowych opartych na kilku rodzajach technologii ma na celu wzajemne ich uzupełnianie się generujące szereg korzyści. Idealna byłaby sytuacja, gdyby oba źródła energii wchodzące w skład elektrowni hybrydowej (w tym przypadku elektrownia wiatrowa i elektrownia fotowoltaiczna), w sposób ciągły pokrywały całkowite zapotrzebowanie na energię użytkownika. 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, jednak w chwili obecnej są one zbyt kosztowne, dlatego pośrednio rolę magazynu obecnie pełni sieć elektroenergetyczna. W artykule scharakteryzowano zalety i wady odnawialnych źródeł energii, ze szczególnym uwzględnieniem energii słońca i wiatru. Na podstawie rzeczywistych danych z pracujących systemów wytwórczych i zużycia energii w gospodarstwie domowym dokonano symulacji i wyznaczenia rzeczywistego bilansowania się systemu dla różnych wariantów. Następnie dokonano analiz efektów energetycznych, ekologicznych i ekonomicznych uwzględniających bilansowanie się tych źródeł wynikające z efektu wzajemnego uzupełniania się wytwarzanej energii w pewnych okresach w tych elektrowniach. Efekty te podzielono na dwie grupy – pierwszą związaną z efektami globalnymi i drugą z efektami związanymi z energią bezpośrednio zbilansowaną w gospodarstwie domowym. Efekty te świadczą o przewadze systemów hybrydowych wiatrowo-słonecznych nad systemami wykorzystującymi tylko jedno źródło wytwórcze.

Słowa kluczowe: efekty ekologiczne, ekonomiczne i energetyczne, odnawialne źródła energii, elektrownia hybrydowa

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

Energetic, economic and ecological effects of balancing solar-wind hybrid microinstallation

Abstract: Renewable energy sources is an energy that is derived from natural processes that are replenished at a higher rate than they are consumed. The main advantage of using renewable energy sources is the ability to use free energy which only slightly negatively impacts the environment, thus providing stakeholders energy, economic and ecological effects. One of the main problems accompanying the generation of energy from renewable sources is the large variability and unpredictability of its production resulting from the dependence of the amount of energy produced on the current weather conditions (wind and solar energy). Creating hybrid systems based on several types of technology is intended to complement each other, generating a number of benefits. It would be ideal if both hybrid energy systems sources could continuously cover the total energy requirement of the user. Unfortunately due to the short-term and long-term variability of the weather conditions, such a balance is unattainable especially for wind and solar energy. With the use of such unpredictable and discontinuous energy sources as the sun and wind, it is desirable to add energy storage to the power system, however. Energy storage is too expensive, the role of the energy storage is now also played by the electricity grid. The article presents the advantages and disadvantages of renewable energy sources, with a particular focus on the solar and wind energy. On the basis of real data from the working systems of production and household energy consumption, simulations were performed and the actual balancing of the system for different variants was calculated. Energy, ecological and economic effects were then taken into account, reflecting the balancing of these sources resulting from the mutual complement of generated power at certain times in these power stations. These effects demonstrate the superiority of wind-solar hybrid systems over systems using only one generation source.

Keywords: ecological effects, economic efficiency, renewable energy sources, hybrid power plants

Wprowadzenie

Podstawową zaletą wytwarzania energii w odnawialnych źródłach jest pozyskanie darmowej, odnawialnej w czasie i ekologicznej energii. Jednak jednym z głównych problemów towarzyszących wytwarzaniu energii z wiatru i słońca jest duża zmienność i nieprzewidywalność wielkości jej wytwarzania wynikająca z zależności ilości produkowanej energii od aktualnych warunków pogodowych. Z jednej strony przenosi się to na niepewność szacunków energetycznych dla planowanych systemów energetycznych, a z drugiej – ciągłą zmienność w czasie wpływającą na konieczność jej bilansowania. 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 opracowaniu, 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.

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; Ustawa o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r. (Dz.U. 2015 poz. 478), (Patel 1999; Soliński red. 2014).

Połączenie dwóch źródeł energii ma na celu wzajemne ich uzupełnianie się, dla zapewnienia ciągłości dostaw energii elektrycznej. Idealna byłaby sytuacja, gdyby oba źródła energii wchodzące w skład elektrowni hybrydowej, w sposób ciągły pokrywały całkowite zapotrzebowanie na energię.

Niestety – tak jak to już wspomniano – z uwagi na krótko- i długoterminową zmienność warunków atmosferycznych, taki bilans jest trudno 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, 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. Możliwość magazynowania energii w sieci energetycznej występuje też w niektórych systemach wsparcia i jest stosowana w wielu krajach dla mikroinstalacji (prosument).

Problematyka analizy efektów ekologicznych jest tematem licznych prac (m.in. [Hondo 2005](#); [Pehnt 2006](#); [Nugent i Sovacool 2014](#)), w których autorzy skupiają się przede wszystkim na analizie cyklu życia (LCA) dla odpowiednich technologii odnawialnych źródeł energii i wyznaczaniu emisji gazów cieplarnianych, a następnie porównywaniu ich z emisją dla źródeł konwencjonalnych (najczęściej opartych na węglu).

Celem artykułu było przedstawienie efektów energetycznych, ekonomicznych i ekologicznych elektrowni hybrydowych – wykorzystujących energię wiatru i słońca w mikroinstalacjach. Ukazano korzyści wynikające z efektu wzajemnego uzupełniania się tych źródeł wpływającego na zwiększone bilansowanie się systemu wytwórczego, opartego na tych dwóch rodzajach technologii. Właśnie efekty energetyczne, ekonomiczne i środowiskowe związane z możliwością wzajemnego bilansowania się świadczą o przewadze tego typu systemów nad systemami wykorzystującymi tylko jedno źródło wytwórcze.

1. Efekty wykorzystania odnawialnych źródeł energii

Można wyróżnić wiele klasyfikacji elektrowni hybrydowych ([Patel 1999](#); [Soliński 2015](#)). W artykule dokonano analiz bilansowania hybrydowych elektrowni dwuskładnikowych, opartych wyłącznie na źródłach odnawialnych – wiatrowo-słonecznych, podłączonych i oddających nadwyżkę energii do sieci (*on-grid*).

Według ustawy o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r. odnawialne źródła energii zostały zdefiniowane jako: „odnawialne, niekopalne źródła energii obejmujące energię wiatru, energię promieniowania słonecznego, energię aerotermalną, energię geotermalną, energię hydrotermalną, hydroenergię, energię fal, prądów i pływów morskich, energię otrzymywaną z biomasy, biogazu, biogazu rolniczego oraz z biopłynów”. Jak widać, definicja ta nie odnosi się bezpośrednio do specyfiki tych zasobów, a głównie skupia się na wymienieniu poszczególnych źródeł kwalifikujących się do tego rodzaju zasobów energetycznych. Natomiast według IEA (w słowniku – *International Energy Agency*) definicja ta brzmi: *energy that is derived from natural processes (e.g. sunlight and wind)*

that are replenished at a higher rate than they are consumed. Solar, wind, geothermal, hydro, and biomass are common sources of renewable energy (www.iea.org/aboutus/glossary/), co można tłumaczyć: „energia, którą uzyskuje się z procesów naturalnych (np. energia słoneczna i wiatrowa), która jest w większym stopniu uzupełniana (odnawiana) niż zużywana. Do głównych rodzajów tych źródeł zalicza się energię słoneczną, wiatrową, geotermalną, wodną i biomasę”. Można więc powiedzieć, że odnawialne źródła energii to takie jej rodzaje, których używanie nie wiąże się z ich długotrwałym deficytem, a ich zasoby odnawiają się w krótkim czasie.

Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii niesie ze sobą szereg efektów, większość z nich została szeroko omówiona w literaturze przedmiotu (Lewandowski 2006; Soliński 2015; Gasparatos i in. 2017). Do najważniejszych efektów można zaliczyć:

- ograniczenie emisji zanieczyszczeń:
 - dbałość o środowisko (ochrona klimatu),
 - zdolność dostarczania energii przy braku emisji (lub niewielkiej jej poziomów) zanieczyszczeń powietrza i gazów cieplarnianych;
- zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego państwa:
 - dywersyfikacja dostaw energii,
 - decentralizacja wytwarzania,
 - odnawialność zasobów w czasie,
 - brak zapotrzebowania na paliwo,
 - zmniejszenie importu energii pierwotnej;
- wytwarzanie energii w układach położonych w pobliżu bezpośrednich użytkowników (charakter lokalny i zdecentralizowany);
- zmniejszenie kosztu przesyłu energii;
- tworzenie nowych miejsc pracy;
- promowanie rozwoju regionalnego (w szczególności obszarów wiejskich).

Z racji badań układów hybrydowych wiatrowo-słonecznych poniżej dokonano charakterystyki tych dwóch źródeł i przedstawiono efekty towarzyszące ich wykorzystaniu.

1.1. Energia słoneczna

Promieniowanie słoneczne jest podstawowym źródłem energii na ziemi. Strumień energii słonecznej podążający w stronę ziemi ma gęstość mocy 1366 W/m^2 , co na prostopadłym do kierunku strumienia przekroju kuli ziemskiej daje stały dopływ mocy rzędu 173 000 TW (Mejro 1980). Wielkość energii docierającej do powierzchni ziemi w ciągu roku jest wielokrotnie większa od wszystkich kopalnych zasobów energetycznych (złóż węglowodorów) i znacząco przewyższa potrzeby energetyczne całego świata. Jest jednak rozproszona, charakteryzuje się nierównomiernym rozkładem w czasie (cykl dobowy i roczny), jest uwarunkowana terytorialnie, klimatycznie i czasowo. Energię promieniowania słonecznego można wykorzystywać na dwa podstawowe sposoby. Zamieniać ją bezpośrednio w energię elektryczną w ogniach fotowoltaicznych (konwersja fotowoltaiczna) oraz zamieniać ją w ciepło, które z kolei może być wykorzystane, np. do ogrzewania wody użytkowej (konwersja

fototermiczna). Należy nadmienić, że występuje też konwersja fotochemiczna (fotosynteza wpływająca na rozwój roślin) – trzeci sposób wykorzystania energii słonecznej. Efekty wykorzystania tych źródeł przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Efekty wykorzystania energii słonecznej

TABLE 1. Effects of using solar energy

Energia słoneczna	
Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> → wszechobecność (możliwość lokalnego wykorzystania) → niskie koszty eksploatacyjne → brak emisji zanieczyszczeń → brak odpadów → poprawa samowystarczalności energetycznej kraju → oszczędność paliw kopalnych → brak emisji hałasu → brak ruchomych części mechanicznych wykorzystywanych do przetwarzania energii 	<ul style="list-style-type: none"> → cykliczność dobową i sezonową wytwarzanej energii → problemy z magazynowaniem większych ilości energii → terenochność instalacji (dot. elektrowni) → wysokie koszty urządzeń elektroenergetycznych zapewniających właściwą pracę i współpracę instalacji z siecią

Źródło: Soliński 2015.

1.2. Energia wiatru

Energia wiatru powstaje dzięki różnicy temperatur mas powietrza, spowodowanej nierównym nagrzewaniem się powierzchni ziemi, czyli jego pierwotnym źródłem jest promieniowanie słoneczne. Zasoby wiatru są stale odnawialne, jednak charakteryzują się dużą zmiennością w czasie (wiatr w każdej sekundzie może zmieniać swoją prędkość), są uwarunkowane terytorialnie, a na jego charakterystykę ma wpływ również lokalne ukształtowanie terenu. Do konwersji energii wiatru na energię mechaniczną, a następnie elektryczną, wykorzystuje się elektrownie wiatrowe. Efekty wykorzystania elektrowni wiatrowych przedstawiono w tabeli 2.

2. Efekty związane z bilansowaniem elektrowni hybrydowych

Połączenie dwóch źródeł energii (wiatru i słońca) ma na celu wzajemne ich uzupełnianie się, dla zapewnienia ciągłości dostaw energii elektrycznej. Idealna byłaby sytuacja, gdyby oba źródła energii wchodzące w skład elektrowni hybrydowej, w sposób ciągły pokrywały całkowite zapotrzebowanie na energię użytkowników. W tym przypadku wystarczyłoby zainstalowanie elektrowni słonecznej oraz wiatrowej o mocach niewiele większych od mocy odbiorników. Niestety z uwagi na krótko- i długoterminową zmienność warunków atmosferycznych, taki bilans jest trudno osiągalny.

TABELA 2. Efekty wykorzystania elektrowni wiatrowych

TABLE 2. Effects of using wind energy

Elektrownie wiatrowe (<i>on shore</i>)	
Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> → brak emisji zanieczyszczeń → brak odpadów → nowe miejsca pracy → możliwość budowy na nieużytkach (pustynie, wybrzeża) → najczystsza i najtańsza technologia energetyczna (z uwzględnieniem całego cyklu życia urządzeń) → oszczędność paliw kopalnych → poprawa samowystarczalności energetycznej kraju 	<ul style="list-style-type: none"> → konieczność odpowiednich warunków geograficznych → wysokie nakłady inwestycyjne → wysoki poziom hałasu → zagrożenie dla ptaków → negatywny wpływ na walory turystyczne rejonu
Morskie elektrownie wiatrowe (<i>off shore</i>)	
<ul style="list-style-type: none"> → większa stabilność, przewidywalność oraz siła wiatru na morzu 	<ul style="list-style-type: none"> → wyższy koszt inwestycji – w porównaniu z elektrowniami lądowymi
<ul style="list-style-type: none"> → niezajmowanie terenów lądowych 	<ul style="list-style-type: none"> → trudność realizacji inwestycji
Małe elektrownie wiatrowe lądowe	
<ul style="list-style-type: none"> → możliwość instalacji na terenie całego kraju → łatwość instalacji → stosunkowo krótki okres realizacji instalacji → znacznie niższy koszt instalacji – w porównaniu z zawodowymi elektrowniami wiatrowymi → brak negatywnego wpływu na krajobraz (zwłaszcza te o osi pionowej) → duża ilość możliwych zastosowań (m.in. stacje nadajnikowe, jachty) 	<ul style="list-style-type: none"> → złożony przebieg załatwiania formalności → wysokie podatki (dzierżawa, podatek od nieruchomości) → konieczność stosowania akumulatorów ze względu na cykliczność pracy

Źródło: Soliński 2015.

W badaniach dotyczących bilansowania systemu wykorzystano rzeczywiste dane z pracujących systemów wytwórczych i zużycia energii w gospodarstwie domowym:

- system fotowoltaiczny (PV) o mocy 5 kW pracujący w gospodarstwie domowym,
- zużycie energii w gospodarstwie domowym zamieszkałym przez cztery osoby,
- elektrownia wiatrowa (HAWT – *Horizontal Axis Wind Turbine*) o mocy 2 kW.

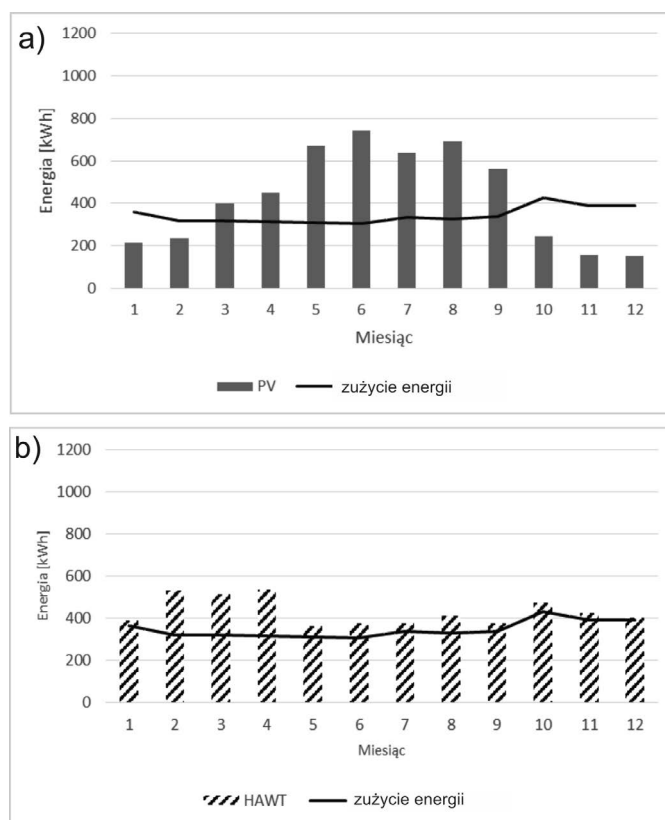
System PV, którego wyniki produktywności posłużyły do symulacji przeprowadzonych w artykule, jest zlokalizowany w jednym z gospodarstw domowych w województwie małopolskim, zamieszkiwanym przez czteroosobową rodzinę. System ten podłączony jest do sieci elektroenergetycznej. W analizach przeprowadzonych w artykule wykorzystano zestaw danych dotyczących produktywności tego systemu oraz zużycia energii elektrycznej przez gospodarstwo domowe. Natomiast dane systemu HAWT pochodzą z rocznej eksploatacji elektrowni wiatrowej w Laboratorium Monitoringu Energii Wiatrowej i Słonecznej AGH. Dane wykorzystywane w przeprowadzonych analizach dotyczą okresu jednego roku ciągłej pracy wszystkich elementów składowych systemu i zostały dobrane losowo dla jednego

z przykładowych lat. Taki zestaw danych posłużył do symulacji i wyznaczenia rzeczywistego bilansowania się systemu dla różnych wariantów i wyliczenia towarzyszących temu efektów natury energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej.

Każdy z symulowanych i ocenianych wariantów systemów został tak dobrany, by sprostać, z małą nadwyżką (10–20%), rocznemu zapotrzebowaniu na energię gospodarstwa domowego. Różnice doboru mocy poszczególnych elementów elektrowni hybrydowej wynikają z faktu, że elektrownia wiatrowa o tej samej mocy co elektrownia fotowoltaiczna wytwarza więcej energii. Tym samym analizom poddano:

- system PV o mocy 5 kW,
- system HAWT o mocy 3 kW,
- system hybrydowy o mocy 2 kW PV i 2 kW HAWT.

Jak można zaobserwować na rysunkach 1 i 2, roczne wielkości wytworzonej energii i zapotrzebowania wydają się być ze sobą mocno skorelowane i wystarczać do pełnego

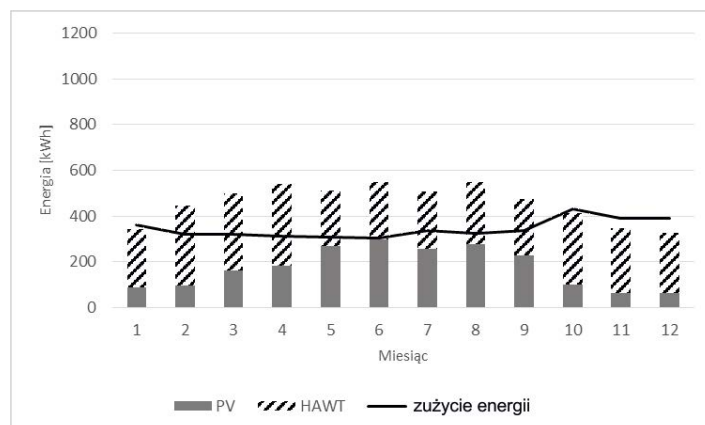


Rys. 1. Wielkości wytworzonej energii przez system PV oraz system HAWT i zużycie energii przez gospodarstwo domowe w poszczególnych miesiącach

a) PV, b) HAWT

Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Monthly electricity production of PV and HAWT power plants and household electricity consumption



Rys. 2. Wielkości wytworzonej energii przez system hybrydowy PV+HAWT i zużycie energii przez gospodarstwo domowe w poszczególnych miesiącach
Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Monthly electricity production of hybrid power plant PV+HAWT and household electricity consumption

bilansowania systemu. Jednak analizy rzeczywistego (bieżącego) bilansowania wskazują na zupełnie inny obraz zaistniałej sytuacji.

W tabeli 3 ukazano wskaźniki wyznaczonych efektów energetycznych, dla poszczególnych trzech wariantów systemu opisanych powyżej. Charakterystykę poszczególnych wskaźników przedstawiono poniżej:

- wielkość wytwarzanej energii przez system – E – jest to wielkość energii wytworzona w ciągu rocznej eksploatacji systemu;
- zużycie energii w gospodarstwie domowym – C – jest to całkowita wielkość energii zużyta przez gospodarstwo domowe (obejmująca zarówno energię z systemu wytwórczego, jak i sieci elektroenergetycznej);

TABELA 3. Wskaźniki efektów energetycznych dla trzech wariantów

TABLE 3. Energy effects indicators for three variants

Wskaźnik	PV	HAWT	PV+HAWT
Wielkość wytwarzanej energii [kWh]	5 173	5 146	5 500
Zużycie energii przez gospodarstwo domowe [kWh]	4 132	4 132	4 132
Nadwyżka wyprodukowanej energii przez system w gospodarstwie domowym [kWh]	1 041	1 014	1 368
Energia zbilansowana bezpośrednio [kWh]	1 007	885	1 331
Udział energii zbilansowanej bezpośrednio [%]	19,5	17,2	24,2

Źródło: opracowanie własne.

- nadwyżka energii w gospodarstwie domowym – jest to różnica pomiędzy energią wytworzoną przez system i energią zużytą w gospodarstwie domowym (w ciągu roku) – $(E-C)$;
- energia zbilansowana bezpośrednio – jest to energia wytworzona w systemie i bezpośrednio zużyta w gospodarstwie domowym na bieżące zapotrzebowanie;
- udział energii zbilansowanej bezpośrednio – jest to stosunek energii zbilansowanej bezpośrednio i całkowitej energii wytworzonej w systemie.

Analizując uzyskane efekty przedstawione w tabeli 3, widać, że systemy generują podobne efekty energetyczne, co związane jest z podobną efektywnością energetyczną przedstawionych wariantów. Dopiero analiza efektów związanych z energią zbilansowaną bezpośrednio i udziałem tej energii w stosunku do energii wytworzonej w systemie, uwidacznia przewagę systemu hybrydowego PV+HAWT. System ten generuje znacząco większy efekt bilansowy, co wynika z istotnie większej ilości energii zbilansowanej bezpośrednio w gospodarstwie domowym:

- o 32% większy w stosunku do systemu PV,
- o 50% większy w stosunku do systemu HAWT.

W ten sposób wyznaczone efekty energetyczne posłużyły do wyznaczenia efektów ekologicznych i ekonomicznych, których analizę przedstawiono poniżej.

Efekty natury ekologicznej i ekonomicznej podzielono na dwie grupy:

- efekty globalne (całkowite),
- efekty bilansowe (lokalne).

Efekty globalne obejmują korzyści związane z całkowitą wielkością wytworzonej energii przez dany wariant systemu energetycznego funkcjonującego w gospodarstwie domowym. Natomiast efekty lokalne (bilansowe) obejmują korzyści związane z energią zbilansowaną bezpośrednio w gospodarstwie domowym w danym wariantcie systemu energetycznego funkcjonującego w gospodarstwie domowym.

Efekty globalne i lokalne wyrażają wartości dla odpowiednich grup interesariuszy. Taki ich podział miał na celu chęć wyrażenia w sposób bardziej rzeczywisty wartości dla różnych grup interesariuszy. Właśnie efekt lokalny, zwany w tym artykule efektem bilansowym jest z punktu widzenia wielu interesariuszy bardziej wartościowy i stanowi rzeczywistą wartość dodaną, ponieważ ta część wytworzonej w systemie energii jest bezpośrednio zużyta w miejscu wytworzenia (w tym przypadku w gospodarstwie domowym). Dzięki temu nie musi być magazynowana (co wiąże się ze stratami energetycznymi), nie wymaga przesyłu i nie zakłóca w pewien sposób funkcjonowania całego systemu elektroenergetycznego, który ciągle musi dostosowywać się do zmiennej pobieranej wielkości energii z instalacji oraz dysponować odpowiednią rezerwą mocy. Natomiast pozostała część wytworzonej energii, która w końcu musi być zużyta przez innych użytkowników, nie daje wszystkim interesariuszom takiej samej wartości, jak energia bezpośrednio wykorzystana na bieżące zużycie.

Efekty ekologiczne (tab. 4), które związane są z unikniętą emisją, zostały obliczone na podstawie wskaźników przedstawionych w opracowaniu ([Wskaźniki emisyjności... 2017](#)) i odniesiono je w stosunku do energii elektrycznej wytworzonej w instalacjach spalania.

TABELA 4. Efekt ekologiczny – uniknięta emisja

TABLE 4. Ecological effect – avoided emission

Uniknięta emisja [kg]	Efekt globalny			Efekt bilansowy		
	PV	HAWT	PV+HAWT	PV	HAWT	PV+HAWT
CO ₂	4 190,37	4 168,34	4 455,04	815,99	716,95	1 078,12
SO ₂	7,96	7,92	8,46	1,55	1,36	2,05
No _x	5,01	4,98	5,32	0,98	0,86	1,29
CO	1,23	1,22	1,31	0,24	0,21	0,32
TSP (pył całkowity)	0,33	0,32	0,35	0,06	0,06	0,08

Źródło: opracowanie własne.

Przedstawiono je dla dwóch grup efektów, które scharakteryzowano powyżej, korzystając z wielkości efektów energetycznych wyznaczonych i zaprezentowanych w tabeli 3.

Natomiast efekty ekonomiczne wyznaczono na podstawie stawek taryfowych (taryfa G11) dla energii i przesyłu (Tauron 0,437 zł/kWh + VAT) oraz systemu opustów (w tym przypadku związanego z nim współczynnika korekcyjnego 0,8). Stanowią one roczną wielkość oszczędności związanej z brakiem konieczności opłat za zużytą energię elektryczną w gospodarstwie domowym. W tabeli 5 ukazano efekty natury ekonomicznej, dzieląc je również na te dwie wyżej opisane grupy (efekt globalny i efekt bilansowy). Ukazano w niej wyznaczony wskaźnik rocznej wielkości oszczędności z tytułu wytworzenia energii w danym wariantcie systemu energetycznego zainstalowanego w gospodarstwie domowym.

TABELA 5. Efekty ekonomiczne

TABLE 5. Economic effects

	Efekt globalny			Efekt bilansowy		
	PV	HAWT	PV+HAWT	PV	HAWT	PV+HAWT
Roczna wielkość oszczędności [zł]	2 333	2 308	2 508	542	476	715

Źródło: opracowanie własne.

Analizując uzyskane wyniki dla dwóch grup efektów, można zauważyć, że efekty bilansowe, które jak to już scharakteryzowano powyżej, mają większą wartość dla interesariuszy, są znacząco niższe w stosunku do efektów globalnych. Niezmiernie trudno jest dobrać taki system oparty na wietrze i słońcu, aby jego bilansowanie bieżącego zużycia

energii w gospodarstwie domowym było znaczące przy jednoczesnym „nieprzeskalowaniu” (zainstalowaniu zbyt dużej mocy wytwórczej) całego systemu hybrydowego, które prowadzi do dużej nadwyżki wytworzonej energii w stosunku do energii zużytej w ciągu roku.

Analizując wielkość efektów bilansowych dla różnych wariantów systemu, można zauważyć (tab. 4 i 5), że system hybrydowy (PV+HAWT) oparty na energii wiatru i słońca, prowadzi do zwiększenia uzyskiwanych efektów natury ekologicznej i ekonomicznej. Związane jest to z większą wielkością energii bilansowanej bezpośrednio w takim systemie hybrydowym, w stosunku do systemów opartych wyłącznie na słońcu (PV) lub wietrze (HAWT).

Podsumowanie

Aspekt bilansowania przy wzroście udziału źródeł odnawialnych w systemie energetycznym będzie nabierał coraz większego znaczenia, celowe wydaje się więc ukazanie możliwości zwiększenia jego poziomu. Właśnie dzięki połączeniu energii wiatru i słońca w systemie hybrydowym i ich wzajemnym uzupełnianiu się większa część energii zostaje zużyta w miejscu wytworzenia. Generuje to istotne korzyści dla wszystkich interesariuszy w całym systemie energetycznym. Wyznaczone efekty energetyczne, ekonomiczne i środowiskowe związane z większym poziomem bilansowania, który w badanym przypadku wzrósł o 32% w stosunku do systemu PV i aż o 50% w stosunku do HAWT, świadczą o przewadze systemów hybrydowych nad systemami wykorzystującymi tylko jedno źródło wytwórcze. Jednak należy pamiętać, że taki efekt jest możliwy w przypadku właściwego doboru wielkości mocy elektrowni wiatrowej i fotowoltaicznej do profilu obciążenia. To m.in. te elementy będą wpływały na wielkość tych efektów, która będzie oczywiście różna w zależności od badanego przypadku.

Literatura

- Gasparatos i in. 2017 – Gasparatos, A., Doll, C., Esteban, M., Ahmed, A. i Olang, T. 2017. Renewable energy and biodiversity: implication for transitioning to a Green Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, s. 161–184.
- Hondo H. 2005 – *Life cycle GHG emission analysis of power generation system*. *Energy* 2005, 30, s. 2042–2056.
- Lewandowski, W. 2006. *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne.
- Mejro Cz., 1980 – *Podstawy gospodarki energetycznej*. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne.
- Nugent, D. i Sovacool, B. 2014. Assessing the lifecycle greenhouse gas emission from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy* 65, s. 229–244.
- Patel, M. 1999. *Wind and solar Power systems*, CRC Press LCC, Florida.
- Pehnt, M. 2006. Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies. *Renewable Energy* 31(1), s. 55–71.
- 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. 2015. *Zarządzanie hybrydowymi systemami wytwarzania energii elektrycznej wykorzystującymi odnawialne źródła energii*. Kraków: Wyd. AGH.
- Soliński, B. red. 2014. *Hybrydowy, wiatrowo-słoneczny system wytwarzania energii elektrycznej*. Włocławek: AR TOP.
- Ustawa o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r. (Dz.U. 2015, poz. 478).
- Wskaźniki emisyjności CO₂, SO₂, NO_x, CO i TSP dla energii elektrycznej na podstawie informacji zawartych w Krajowej bazie o emisjach gazów cieplarnianych i innych substancji za 2015 rok*. KOBZE (Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami) – Zespół Zarządzania Krajową Bazą, Luty 2017.
- [Online] Dostępne w: www.iea.org/aboutus/glossary/ [Dostęp: 12.03.2017].