

## EFEKTYWNOŚĆ EKONOMICZNA HYBRYDOWEJ MIKROINSTALACJI OZE

Elżbieta BOGALECKA<sup>1</sup>, Zbigniew KRZEMIŃSKI<sup>2,3</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 58 347 29 36, e-mail: elzbogal@pg.edu.pl
2. MMB Drives sp. z o.o.  
tel.: 605068292, e-mail: zkrzem@mmb-drives.com.pl
3. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 58 347 23 48, e-mail: zbikrzem@pg.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono warunki pracy mikroelektrowni hybrydowej zainstalowanej w małej firmie mieszczącej się na terenie przemysłowym. Pokazano strukturę i parametry elektrowni składającej się z paneli fotowoltaicznych i elektrowni wiatrowej. Przeanalizowano odbiorniki energii oraz warunki pobierania mocy biernej. Dla wybranego okresu czasu pokazano zużycie oraz produkcję energii elektrycznej i energię zużytą na potrzeby firmy oraz oddaną do sieci. Na podstawie cen energii określono czas zwrotu nakładów inwestycyjnych już poniesionych. Zbadano celowość modernizacji przekształtników w elektrowni polegającej na wymianie tranzystorów IGBT na tranzystory SiC i celowość zakupu magazynu energii. Wykazano, że poniesione nakłady zwrócą się po ponad 10 latach. Nieuchronny wzrost cen energii spowoduje skrócenie czasu zwrotu nakładów inwestycyjnych do mniej niż 10 lat.

**Słowa kluczowe:** mikroelektrownia hybrydowa, efektywność, moc bierna, czas zwrotu nakładów.

### 1. WSTĘP

W ostatnich 10 latach w Polsce widoczny był gwałtowny wzrost mocy instalowanych elektrowni wiatrowych i słonecznych. Zmiana warunków instalowania i mechanizmów wsparcia instalacji OZE [1, 2] spowodowały spadek ilości instalowanych dużych farm wiatrowych i słonecznych w Polsce. Zmiany te skłaniają inwestorów do budowy małych elektrowni hybrydowych [3], których celem głównym jest zaspokojenie potrzeb własnych. Inwestorami są małe przedsiębiorstwa albo osoby fizyczne. Koszt takich instalacji jest na tyle niski, że firmy są w stanie sfinansować inwestycje ze środków własnych, bez wsparcia kredytowego. Osobnym problemem jest dobór parametrów instalacji hybrydowej, tak aby zaspokoić wymagania użytkownika [4]. Dobór parametrów elektrowni a także sposób wykorzystania zasobów [5] mają istotny wpływ na czas zwrotu inwestycji.

Przedmiotem artykułu jest mikroelektrownia hybrydowa typu „on-grid” złożona z elektrowni wiatrowej i elektrowni słonecznej zainstalowanych w małej firmie produkcyjnej, a celem artykułu jest analiza wpływu instalacji hybrydowej na ilość energii elektrycznej pobranej z sieci, na pobór mocy biernej, a także ocena okresu zwrotu nakładów i ocena celowości modernizacji instalacji. Celem badanej instalacji jest pokrywanie potrzeb własnych i ewentualna

sprzedaż nadwyżek do sieci elektroenergetycznej po cenach [6, 7] zapewniających rozsądny czas zwrotu inwestycji. Ograniczeniem jest moc mikroinstalacji, wynosząca obecnie 50kW. Jest to moc sumaryczna źródeł energii elektrycznej, czyli w tym przypadku elektrowni słonecznej i wiatrowej. Analizę oparto na wynikach pomiarów za wybrany okres czasu. Krótki czas działania instalacji nie pozwala na przedstawienie skumulowanych wyników za dłuższy okres np.: 1 roku.

W punkcie 2 pokazano strukturę i parametry elektrowni składającej się z paneli fotowoltaicznych i elektrowni wiatrowej oraz przedstawiono produkcję energii elektrycznej w wybranym przedziale czasu, przeanalizowano odbiorniki energii oraz warunki pobierania mocy biernej, przedstawiono zużycie energii elektrycznej w wybranym przedziale czasu. W części 3 przeanalizowano ceny energii i określono wartości energii zużytej na potrzeby firmy oraz oddanej do sieci, określono czas zwrotu nakładów inwestycyjnych już poniesionych. Przy badaniu efektywności ekonomicznej przeważnie tylko moc czynna jest brana pod uwagę, zapominając o możliwości kompensacji mocy biernej przez przekształtniki mikroelektrowni, co skutkuje zmniejszeniem opłat za moc bierną do wartości nieistotnej w bilansie. Przekształtniki w elektrowni zbudowane są z krzemowych tranzystorów IGBT. Coraz powszechniejsza staje się technologia wytwarzania elementów półprzewodnikowych z węgla krzemu (SiC). W punkcie 4 przeanalizowano celowość modernizacji przekształtników zainstalowanych w elektrowni przez wymianę tranzystorów IGBT na tranzystory SiC. Ponieważ sprzedaż energii z mikroinstalacji jest mniej korzystna niż zużycie energii na potrzeby własne, to zbadano celowość zainwestowania w magazyn energii.

### 2. ELEKTROWNIA HYBRYDOWA I WARUNKI JEJ PRACY

Analizowana eksperymentalna elektrownia hybrydowa przyłączona do sieci elektroenergetycznej nn, przedstawiona na rysunku 1, jest zainstalowana na terenie małego przedsiębiorstwa produkcyjno - badawczego. Elektrownia składa się z elektrowni wiatrowej o mocy 40kW i modułów PV o mocy 10kWp. Odnawialne źródła energii wraz

z odbiornikami energii w przedsiębiorstwie są włączone do sieci przez dwukierunkowy licznik energii.

W elektrowni wiatrowej usytuowanej na wieży o wysokości 21 m, o średnicy 16 m i stałym kącie ustawienia łopat, prędkości znamionowej 60 obr/min, generatorem jest maszyna asynchroniczna klatkowa z przekładnią. Generator przyłączony jest do sieci przez dwukierunkowy falownik napięcia zbudowany z krzemowych tranzystorów IGBT. W procesorze sterującym zaimplementowany jest oryginalny algorytm sterowania, dedykowany dla małych elektrowni wiatrowych [8]. Celem algorytmu jest zapewnienie bezpieczeństwa elektrowni przy silnym wietrze i zwiększenie jej sprawności przy mniejszych wartościach wiatru. Ponieważ elektrownia wiatrowa służy do badań a algorytmy sterowania elektrownią są modyfikowane i testowane, to włączana jest w godzinach pracy; nie pracuje całą dobę.



Rys. 1. Badana elektrownia hybrydowa

Moduły fotowoltaiczne podzielone są na dwa łańcuchy, z których każdy ma swoją przetwornicę DC/DC typu BOOST, o napięciu wyjściowym 700 V, zbudowaną z tranzystorów z węgla krzemu. W przetwornicach zaimplementowany jest algorytm śledzenia punktu pracy z maksymalną sprawnością (MPPT). Przetwornice DC/DC są umieszczone blisko modułów, co przy wyższym napięciu DC na przewodach łączących z falownikiem zmniejsza straty energii elektrycznej. Przekształtnik DC/AC jest falownikiem napięcia zbudowanym z krzemowych tranzystorów IGBT. Algorytm sterowania zapewnia transport energii do sieci, kontroluje napięcie DC i może być także kompensatorem mocy biernej. Przekształtnik do modułów fotowoltaicznych jest beztransformatorowy.

Firma, w której są zainstalowane obydwa źródła, jest małą firmą produkującą urządzenia energoelektroniczne i układy napędowe. Istotną częścią pracy są prace badawczo – rozwojowe i projektowe. Firma nie ma więc bardzo dużych potrzeb energetycznych, nie ma dużych odbiorników energii pracujących w sposób ciągły. Duża część produkcji to urządzenia eksperymentalne albo prototypy, więc moc zamówiona jest stosunkowo duża, aby uwzględnić okresowe próby obciążenia urządzeń. Praca w firmie jest jednozmianowa, czyli pobór energii ma miejsce

głównie w godzinach 7 – 18. Średnie stałe obciążenie to ok. 2 - 3 kW (serwer, oświetlenie, alarm, lodówki). W godzinach pracy, jeżeli nie są prowadzone próby, obciążenie jest na poziomie ok. 10 kW. Ze względu na zabezpieczenia moc zamówiona przekracza 40 kW.

Poza godzinami pracy włączonych pozostaje kilka komputerów (z filtrami składowej wspólnej), UPS (z filtrem). Urządzenia te oraz kable są źródłem mocy biernej pojemnościowej o wartości ok. 2100 var, co skutkuje dodatkową opłatą za moc bierną. Cena energii biernej pojemnościowej, to trzykrotność ceny oddanej do sieci energii czynnej.

W godzinach pracy firmy energia produkowana przez źródła odnawialne zużywana jest na potrzeby własne a nadwyżki są oddawane do sieci. Poza godzinami pracy energia wyprodukowana przez elektrownię słoneczną jest niewielka lub zerowa a produkowana przez elektrownię wiatrową jest oddawana do sieci.

### 3. POTENCJAŁ ENERGETYCZNY ELEKTROWNI HYBRYDOWEJ

Wielkości elektrowni wiatrowej i słonecznej zainstalowanych w firmie nie wynikły z procesu optymalizacji. Elektrownia wiatrowa jest dopuszczalną, małą elektrownią wiatrową a moc elektrowni słonecznej wynika z dostępnej powierzchni dachu. Potencjał energetyczny hybrydowego układu zasilania wynika z miejsca zainstalowania oraz parametrów i charakterystyk źródeł.

Dobrze usytuowana elektrownia słoneczna może w Polsce wyprodukować rocznie ok. 1000 kWh/kWp/rok. Badana elektrownia usytuowana jest na dwóch częściach dachu o małym kącie pochylenia względem ziemi, wystawionych na wschód i zachód. Uwzględniając nieoptymalne ustawienie modułów względem słońca, można oszacować, że elektrownia słoneczna o mocy 10 kWp może wyprodukować rocznie ok. 7800 kWh.

Energia wyprodukowana przez elektrownię wiatrową wynika ze średniej prędkości wiatru (z rozkładu Weibulla) oraz charakterystyki elektrowni (moc w funkcji prędkości wiatru). Badana elektrownia służy głównie celom badawczym i została usytuowana w dzielnicy przemysłowej, na niedużej wysokości i terenie o dużej szorstkości, z budynkami i przeszkodami terenowymi. Na podstawie częściowych pomiarów i analizy terenu można przyjąć średnią prędkość wiatru równą 4.5 - 5 m/s. Jak podano w [8] przy tej prędkości wiatru roczna produkcja energii wynosi ok. 60 – 80 MWh. Po uwzględnieniu sprawności generatora z przekształtnikiem i przekładnią (0.83), strat wynikających z nieoptymalnego ustawienia względem wiatru (ok. 20°) i strat wynikających z przestojów (15 %) można oszacować ostrożnie roczną produkcję energii na 40 - 54 MWh. Sumaryczna ilość energii produkowanej przez źródła odnawialne może być oszacowana na wartość 47.8 – 63.7 MWh.

Roczne potrzeby energetyczne firmy wynoszą ok. 25 MWh. Przy pełnym pokryciu potrzeb własnych ze źródeł odnawialnych, pozostałaby nadwyżka ok. 23 – 38 MWh. Badana instalacja jest w stosunku do potrzeb małego przedsiębiorstwa znacznie przewymiarowana.

Zwymiarowanie małej elektrowni i sposób wykorzystania energii mają fundamentalny wpływ na czas zwrotu inwestycji. Koszt badanej instalacji wynosi ok. 350 tys. zł.

Aktualna cena sprzedaży energii wynosi 0.18 zł/kWh, a cena zakupu 0.31 zł/kWh powiększona o opłatę zmienną (0,07 – 0,27 zł/kWh) i stawkę jakościową 0,0125 zł/kWh. Roczne koszty zakupu energii czynnej i biernej bez instalacji OZE (i bez innych składników opłat) wynoszą ok. 20 tys. zł.

Przekształtniki do elektrowni słonecznej mają wbudowaną funkcję kompensacji mocy biernej. Uruchomienie elektrowni słonecznej spowodowało opłaty za moc bierną z kwoty ok. 6000 zł/rok do kwoty ok. 60 zł/rok.

Pełne wykorzystanie zasobów źródeł odnawialnych pozwala na oszczędność opłat za moc czynną i sprzedaż nadwyżek do sieci. W takim przypadku czas zwrotu nakładów na tę badaną instalację wyniósłby ok. 16 lat. W obliczeniu uwzględniono tylko przychody ze sprzedaży nadwyżek energii czynnej i brak zakupu mocy czynnej. Ceny zakupu i sprzedaży energii różnią się średnio o 0,332 zł/kWh, a zatem sprzedaż energii jest nieopłacalna. Gdyby zużyć całą energię z OZE (64MWh) na swoje potrzeby to czas zwrotu wyniósłby ok. 9.5 roku. Warunkiem jednak pełnego pokrycia potrzeb własnych z OZE jest magazyn energii. Przewidywany znaczny wzrost cen energii powinien skompensować ten dodatkowy koszt.

#### 4. BADANIA INSTALACJI OZE W WYBRANYCH OKRESACH

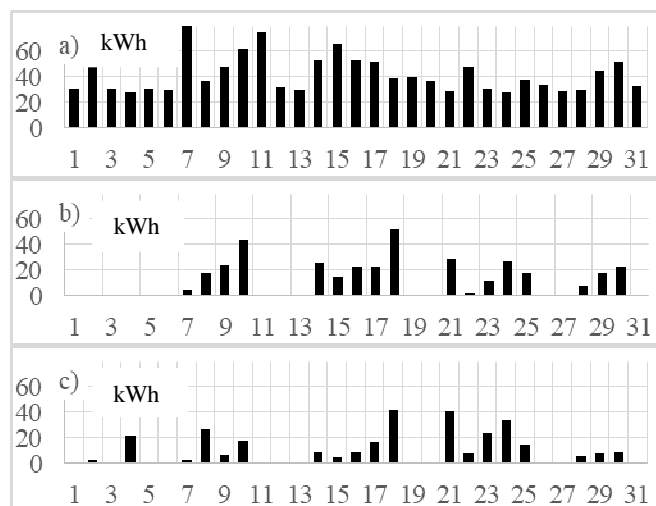
Dane pomiarowe z elektrowni hybrydowej były dostępne w wybranych okresach ze względu na prowadzone prace badawczo-rozwojowe. W tabelicy 1 pokazano ilość energii wytworzonej w elektrowni wiatrowej i czas jej pracy. Elektrownia była włączana w godzinach pracy firmy. Podano również ilość energii oddanej do sieci. Z danych podanych w tabelicy 1 wynika, że znaczna część wytworzonej energii, nawet 84% w maju, jest oddawana do sieci.

Jednocześnie rejestrowano czas pracy elektrowni wiatrowej i dokonano prognozy produkcji energii przez elektrownię wiatrową załączoną przez cały dostępny w roku czas. Z danych podanych w tabelicy 1 wynika, że pojawiają się warunki pogodowe pozwalające na produkcję energii oszacowaną w rozdziale 3.

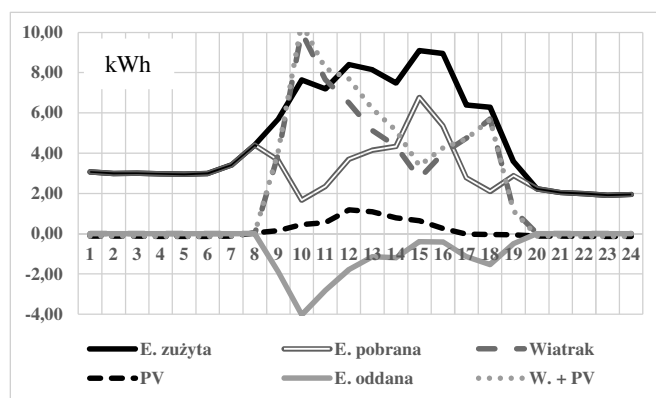
Ponieważ elektrownia hybrydowa pracuje w wybranych przedziałach czasu, na rysunku 2 pokazano energię pobraną i oddaną do sieci oraz wytworzoną w elektrowni wiatrowej w ciągu jednego miesiąca. Z rysunku 2 widać, że energia jest w ciągu jednego dnia wytwarzana i oddawana do sieci. Brak odpowiedniej mocy włączonych odbiorników powoduje, że pojawia się sprzedaż energii po niekorzystnych cenach.

Tabela 1. Zestawienie czasu pracy i energii wytworzonej w elektrowni wiatrowej z energią pobraną i oddaną do sieci przez firmę

Miesiąc	Czas pracy	Energia wytworzona	Energia pobrana z sieci	Energia oddana do sieci	Prognoza na rok
	-- h -- m	kWh	kWh	kWh	MWh
Styczeń	89 h 27 m	223	2929	20	22,3
Luty	42 h 50 m	43	3221	3	8,1
Marzec	152 h 47 m	440	3627	98	25,8
Kwiecień	144 h 31 m	531	2232	197	31,7
Maj	119 h 40 m	365	1425	306	27,3
Czerwiec	132 h 56 m	699	1315	488	45,4



Rys. 2. Rejestracja dziennej energii: a) pobranej z sieci (1425 kWh), b) wytworzonej w elektrowni wiatrowej (365 kWh), c) oddanej do sieci (306 kWh) w maju 2018; pobrana z sieci 2 maja 118 kWh, 7 maja 143 kWh



Rys. 3. Godzinowa energia zużyta w dniu 5.02.2019 (E. zużyta), pobrana z sieci (E. pobrana), wytworzona przez elektrownię wiatrową (Wiatrak), wytworzona przez instalację fotowoltaiczną (PV), oddana do sieci (E. oddana), wytworzona łącznie przez instalację OZE (W. + PV)

Dane z rysunku 2 pozwalają częściowo ocenić pojemność magazynu energii niezbędnego do zapewnienia zaspokojenia pełnego zapotrzebowania firmy na energię elektryczną. Dokładniejszą ocenę należy przeprowadzić na podstawie analizy godzinowej energii wytwarzanej, pobieranej z sieci energetycznej i oddawanej. Na rysunku 3 pokazano energię zużyta w firmie, pobraną z sieci, wyprodukowaną przez wiatrak i fotowoltaikę oraz oddaną do sieci. Z rysunku 3 wynika, że nawet jeżeli wiatrak i fotowoltaika wytwarzają łącznie w ciągu godziny więcej energii niż zużywana w firmie, to energia jest pobierana z sieci. Przyczyną są chwilowe wzrosty produkcji energii z elektrowni wiatrowej związane z nierównomiernością prędkości wiatru.

#### 5. MODERNIZACJA ELEKTROWNI HYBRYDOWEJ

Oszacowania i dane podane w rozdziałach 3 i 4 wskazują na celowość inwestycji w magazyn energii. Można oszacować, że magazyn energii pozwoli na całkowite wyeliminowanie oddawania energii do sieci, co pozwoli na rozliczenie ok. 15 MWh energii po 332 zł/MWh, łącznie 4980 zł rocznie. Koszt zakupu akumulatora zwróci się po ok. 3 latach.

Wytwarzanie, magazynowanie i oddawanie energii z magazynu jest związane z przetwarzaniem ok. 60 MWh w falowniku DC/AC lub AC/DC. Zastosowanie tranzystorów z węgla krzemu zwiększy sprawność falowników o ok. 2%, czyli zredukuje straty energii o 1,2 MWh rozliczane po 512 zł/MWh, czyli 614 zł. Dodatkowy koszt związany z zastosowaniem tranzystorów SiC wyniesie ok. 6120 zł, co zwróci się po ok. 10 latach.

Podane wyżej szacunku zwrotu nakładów inwestycyjnych są przybliżone, nie uwzględniają stopy dyskontowej i zmiany cen energii elektrycznej. Aktualnie ceny energii zostały zamrożone na poziomie cen z roku 2018. Należy przypuszczać, że w następnych latach nastąpi wzrost cen, co spowoduje dalszy wzrost efektywności ekonomicznej małych elektrowni hybrydowych.

## 6. WNIOSKI KOŃCOWE

Artykuł dotyczy określenia efektywności małej elektrowni hybrydowej dokonanego na podstawie danych oszacowanych z charakterystyk elektrowni wiatrowej i elektrowni fotowoltaicznej. Oszacowane wartości zostały częściowo zweryfikowane na podstawie danych zarejestrowanych podczas pracy elektrowni. Uzyskane rezultaty są obarczone znaczną niepewnością wynikającą ze zmienności warunków atmosferycznych oraz wprowadzanych modyfikacji algorytmów sterowania.

Na podstawie uzyskanych rezultatów można stwierdzić, że inwestycja w elektrownię hybrydową produkującą energię elektryczną przeznaczoną do sprzedaży jest nieopłacalna. Natomiast całkowite zużycie energii z elektrowni hybrydowej na potrzeby firmy pozwala na uzyskanie czasu zwrotu nakładów inwestycyjnych w okresie mniejszym niż 10 lat. Wymaga to dodatkowych inwestycji w magazyny energii elektrycznej.

Dalsze dodatkowe inwestycje w zamianę tranzystorów IGBT tranzystorami SiC nie powodują zmiany czasu zwrotu nakładów.

Przedstawiona analiza efektywności elektrowni hybrydowej jest oparta na aktualnych cenach energii elektrycznej. Zwiększenie cen energii doprowadzi do poprawy efektywności ekonomicznej mikroelektrowni hybrydowych.

Przedstawione w artykule wyliczenia mają charakter przybliżony i nie mogą być podstawą decyzji inwestycyjnych. Rozważania dotyczą jednej małej firmy i nie mogą być uogólniane. Wnioski dotyczące konieczności zastosowania magazynu energii otrzymane na podstawie przedstawionych danych są w pełni uzasadnione.

## 7. INFORMACJA

Projekt finansowany ze środków RPOWP w ramach projektu RPPM.01.01.01-22-0076/16-00



URZĄD MARSZAŁKOWSKI  
WOJEWÓDZTWA POMORSKIEGO

Unia Europejska  
Europejskie Fundusze  
Strukturalne i Inwestycyjne



## 8. BIBLIOGRAFIA

1. Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii. Dz. U. 2015 poz. 478 z późn. zmianami.
2. Ptak. M.: Public support for renewable energy in Poland, *Economic and Environmental Studies*, Vol. 17, No. 4 (44/2017), 707-724, December 2017 <http://seo.org.pl/rekordowa-liczba-przylaczonych-mikroinstalacji-do-sieci-pge/>, dostęp 24.02.2019
3. Bogalecka E., Michoński A.: Optimizing the Parameters of a Small Standalone Hybrid Power Plant, *Acta Energetica*, Nr 2/31 2017, s. 4-10
4. Maleki A, Rosen M. A., Pourfayaz, F., Optimal operation of a grid connected hybrid renewable energy system for residential applications, *Sustainability* 2017, 9, 1314; doi: 10.3390
5. Cennik standardowy dla przedsiębiorstw\_30012019.pdf, Energa Obrót S.A. file:///C:/Users/Admin/Downloads/Standardowy%20cennik%20energii%20elektrycznej%20dla%20przedsiębiorstw%20(obowiązujący%20od%2001.07.2018).pdf dostęp 24.02.2019
6. <http://gramwzielone.pl/trendy/27700/ile-wlasciciele-instalacji-oze-dostana-za-energie-od-2018-r>, dostęp 24.02.2019
7. Krzemiński Z., Elektrownie wiatrowe MMB Drives 40, [http://www.mmb-drives.com.pl/produkty/folder\\_mmb\\_elektrownia\\_wiatrowa\\_v2.pdf](http://www.mmb-drives.com.pl/produkty/folder_mmb_elektrownia_wiatrowa_v2.pdf), dostęp 3.03.2019

## EFFICIENCY OF HYBRID MICROINSTALLATION WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

The article presents the working conditions of a hybrid micro-plant installed in a small company located in an industrial area. The structure and parameters of a power plant consisting of photovoltaic panels and a wind power plant are shown. The energy receivers and the conditions of reactive power consumption were analyzed. For the selected period of time, the consumption and production of electricity and energy consumed for the needs of the company and sent to the network were shown. On the basis of energy prices, the payback period of investment outlays was determined. When examining economic efficiency, usually only active power is taken into account. The analysis takes into account the possibility of reactive power compensation by wind turbine and solar power converters. The purposefulness of modernization of converters in a power plant relying on the replacement of IGBT transistors by SiC transistors and the purposefulness of purchasing an energy storage was examined. It has been shown that the expenditure incurred will pay back after more than 10 years. The inevitable increase in energy prices will shorten the payback period of investment outlays to less than 10 years.

**Keywords:** small hybrid power plant, efficiency, reactive power, payback period