

doi:10.15199/48.2016.08.31

Analiza zastosowania hybrydowego systemu zasilania odnawialnej energetyki wiatrowej i fotowoltaicznej w budynkach mieszkalnych

Streszczenie. W związku z ciągle rosnącym zapotrzebowaniem gospodarstw domowych na energię elektryczną i jednocześnie przy rosnących cenach energii, pojawiły się alternatywne możliwości wytwarzania energii w sposób mogący zapewnić autonomiczność energetyczną budynku lub w znacznym stopniu uniezależnić obiekt od sieci zawodowej. Dzięki prowadzeniu intensywnych badań dotyczących zwiększeniu sprawności generatorów fotowoltaicznych i wiatrowych, przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów materiałowych i dynamicznemu wzrostowi produkcji, systemy energetyki słonecznej i wiatrowej stały się alternatywnym sposobem wytwarzania energii dla budynków jednorodzinnych, w sposób autonomiczny jak i w układzie zasilania wypowowego z podłączeniem do sieci zawodowej.

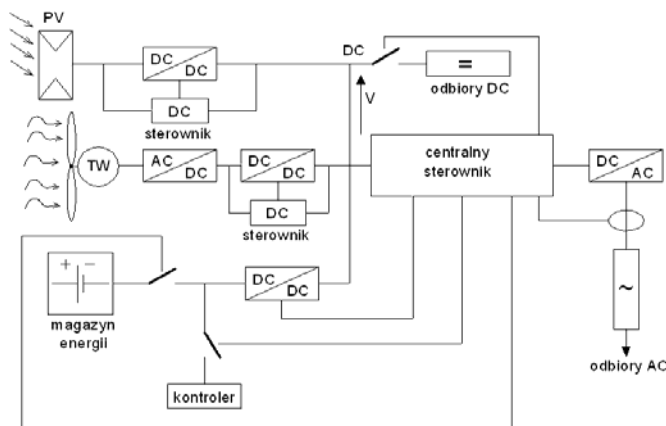
Abstract. Due to the ever increasing demand of households for electricity and the rising energy prices, alternative ways of energy production have appeared, able to ensure the building's energy autonomy or make it largely independent from the professional network. Thanks to intensive research on increasing the efficiency of photovoltaic and wind power generators, while reducing material costs and dynamically increasing production, solar and wind energy systems have become an alternative way of producing energy for single-family houses, both in an autonomous power supply system and as islands connecting to the professional network. (Analysis of the use of a hybrid power system of renewable wind and photovoltaic energy in residential buildings).

Słowa kluczowe: bateria PV, ogniwa fotowoltaiczne, inwerter, energia słoneczna.

Keywords: PV cell, photovoltaic cells, inverter, solar energy.

Wstęp

Projekt systemu zakłada wykorzystanie energii słonecznej oraz wiatrowej do zasilania budynku jednorodzinnego za pomocą generatorów wiatrowych, fotowoltaicznych oraz magazynowaniu wygenerowanej nadwyżki energii w magazynach akumulacyjnych. Zadaniem systemu będzie zapewnienie ciągłości dostaw energii elektrycznej optymalnie wykorzystując poszczególne elementy każdego z podsystemów (wiatrowego, słonecznego) oraz układów zarządzających ich pracą. System będzie także umożliwiał autonomiczną pracę urządzeń w przypadku konieczności długiego, samodzielnego działania w sposób niezależny lub alternatywnie w połączeniu z siecią zawodową.

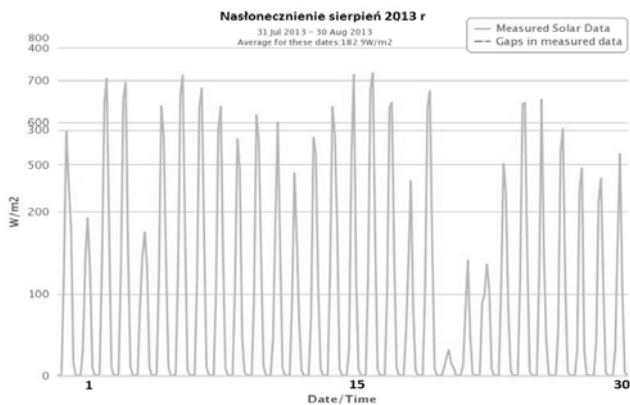


Rys.1. Schemat badanego hybrydowego systemu zasilania

Badany system hybrydowy

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano systemy zasilania typu on-grid oraz off-grid. System zasilania on-grid podłączony jest do sieci elektroenergetycznej poprzez inwerter sieciowy elektroniczny, który posiada blokadę podania napięcia w przypadku zaniku potencjału w sieci zawodowej. Omawiany falownik automatycznie synchronizuje się z parametrami sieci zawodowej i w optymalny sposób generuje prąd z sytemu PV. Oddzielnym układem zasilania jest system zasilania off-grid, który zasilą obwody odbiorcze obiektu w sposób autonomiczny bez

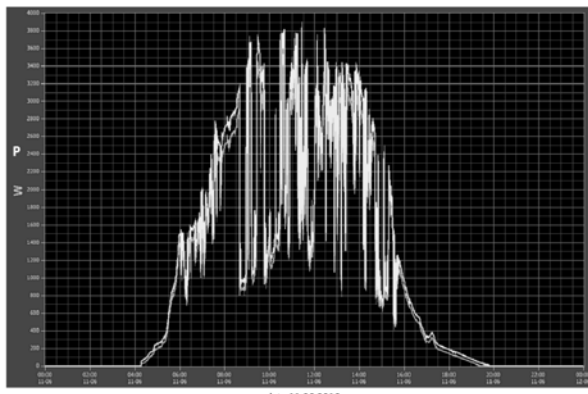
podłączenia do sieci zewnętrznej zawodowej. W badanym systemie on-grid, zastosowano dwa układy o mocy nominalnej generatorów fotowoltaicznych 4140 Wp oraz inwerter beztransformatorowy sieciowy. W tym układzie rejestrowane są wszystkie parametry elektryczne biorące udział w procesie produkcji energii DC z fotoogniw polikrystalicznych, przetwarzania napięcia DC na AC oraz charakterystyki pracy urządzeń odbiorczych. W inwerterze zastosowany został układ podwójnego MPPT (maximum power point tracking) czyli systemu, którego zadaniem jest optymalne obciążenie paneli fotowoltaicznych, w celu generowania przez nie maksymalnej mocy wyjściowej [1]. Kolejnym badanym systemem jest układ zasilania off-grid. Zastosowany został również wiatrowo-fotowoltaiczny hybrydowy układ, w którym inwertery hybrydowe zasilają domową sieć wewnętrzną i magazyny energii elektrycznej o pojemności 1900 Ah oraz cieplnej w wymiennikach cieczowych o pojemności 450 litrów. W tym układzie generatory fotowoltaiczne posiadają moc nominalną 2040 Wp, natomiast generator wiatrowy generuje moc nominalną o wartościach nominalnych 3 kW. W układzie fotowoltaicznym zastosowano generatory poli- i monokrystaliczne. Natomiast w układzie generatorów wiatrowych zastosowano turbiny wiatrowe o poziomej osi obrotu wirnika. Inwerter hybrydowy jest połączony z wydzielonymi obwodami odbiorczymi, dzięki możliwości podłączenia dwóch układów zasilania z zastosowaniem generatorów fotowoltaicznych, wiatrowych oraz systemu magazynowania energii. Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskuje się pełną autonomiczność zasilania budynku. Oczywiście istotnym czynnikiem wpływającym na sprawność systemu jest wartość energii słonecznej oraz wiatrowej możliwej do uzyskania z danej lokalizacji obiektu. Dane te są bardzo istotne, gdyż dotyczą lokalnych warunków klimatycznych, które mogą znacznie odbiegać od ogólnodostępnych. Dlatego istotnym elementem procesu projektowania układów wiatrowych jest dokonanie lokalnych pomiarów parametrów mikro-klimatycznych lokalnych, które mogą w znacznym stopniu odbiegać od ogólnych uśrednionych wyników charakterystyk klimatycznych makro-regionów. Rysunek 2 pokazuje rzeczywiste wartości nasłonecznienia badanego terenu w czerwcu 2013 roku.



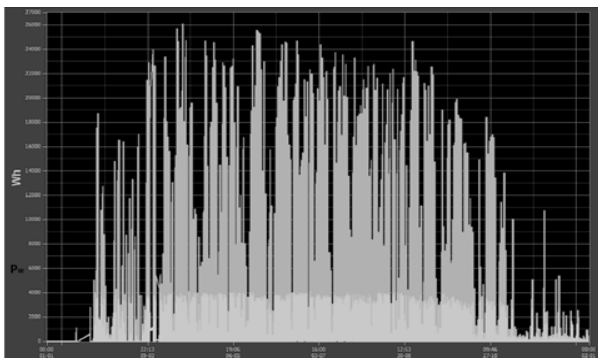
Rys.2. Natężenie promieniowania słonecznego w miesiąc czerwcu na badanym terenie

Ogniwa fotowoltaiczne

Baterie słoneczne uznawane są za najbardziej przyjazne środowisku naturalnemu źródło energii. Wynika to z braku emisji zanieczyszczeń, braku hałasu, a także praktycznie braku ujemnego wpływu na środowisko zewnętrzne. Ponadto panele wytwarzane są z powszechnie dostępnych surowców, a ich pozyskanie nie wymaga ingerowania w sposób istotny w środowisko naturalne [4]. Dlatego, gdy obecnie kopalnie nośniki energii szybko drożeją, jednocześnie degradując środowisko naturalne, ekonomicznie uzasadnione staje się wspieranie systemów produkujących energię odnawialną, w tym ogniwa fotowoltaiczne, które w użytkowaniu są praktycznie bezobsługowe oraz mają bardzo długi okres eksploatacji [2]. Według producentów ogniw, ich sprawność wynosi około 80% po 25 latach eksploatacji. Systemy wolnostojące fotowoltaiczne są niezawodne i coraz częściej kluczowym kryterium brany pod uwagę jest fakt, że takie układy nie wymagają obsługi. [1, 3, 5].



Rys.3. Wykres dobowego nasłonecznienia i przetworzonej energii słonecznej przez inwerter z 11.06.2015 roku.



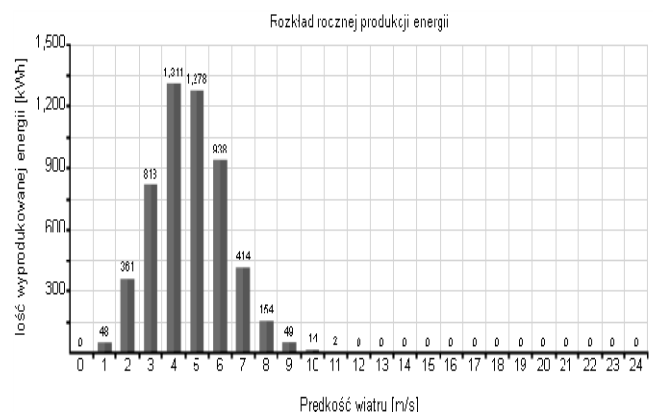
Rys.4. Wielkość wyprodukowanej energii elektrycznej w funkcji czasu z 2014 roku

Ważnym czynnikiem wpływającym na sprawność generatorów fotowoltaicznych jest temperatura otoczenia. Na rysunku 4 można zauważyć okresy letnie, które przez wysokie temperatury wpływały negatywnie na uzysk generowanej energii w porównaniu z okresami wiosenno-jesiennymi.

Układ zasilania generatorami wiatrowymi

Prędkości wiatru, przy którym pracują generatory wiatrowe mieści się w zakresie od 1,5 do 25 m/s. Sprawność turbin wiatrowych waha się od 25% do 60% w zależności od rodzaju budowy. Generatory wiatrowe to nie tylko wielkie elektrownie zbudowane dla energetyki przemysłowej. Małe generatory wiatrowe znajdują również zastosowanie w systemach stworzonych do pracy w układach zamkniętych domowych np. przy ładowaniu akumulatorów, podgrzewaniu wymienników wodnych, ładowaniu pieców akumulacyjnych, zasilaniu pomp centralnego ogrzewania, itp. Turbiny wiatrowe nastawione na pracę w układach zamkniętych nie muszą generować prądu o ściśle ustalonych, niezmiennych parametrach wymaganych w sieciach przesyłowych. Pozwala to na większą swobodę przy projektowaniu tych urządzeń i ułatwia dopasowanie układów do potrzeb indywidualnego użytkownika.

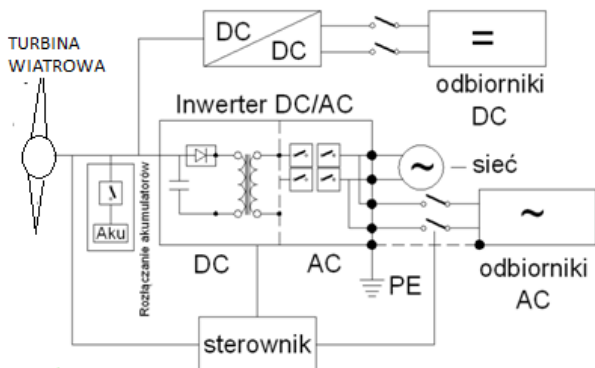
Odpowiednio usytuowana elektrownia wiatrowa może wytworzyć rocznie taką ilość energii elektrycznej, jaka odpowiada 25% iloczynowi jej mocy nominalnej oraz liczby godzin w ciągu roku. W tak obliczonej wartości uwzględnione są zarówno okresy bezwietrzne, jak i te, kiedy prędkość wiatru jest mniejsza lub większa od tej, przy której elektrownia wiatrowa produkuje moc nominalną. Aby odpowiednio dobrać moc generatora wiatrowego należy mieć na uwadze wartość średniego rocznego zapotrzebowania na energię oraz czy produkowana energia będzie odsprzedawana do sieci zawodowej. Zakładając, że zapotrzebowanie domu jednorodzinnego na energię elektryczną wynosi rocznie 3000 kWh, a produkowana energia będzie wyłącznie na potrzeby własne użytkowników. Przy założeniu, że turbina wiatrowa będzie pracować przez około 25% dni w roku, to generator powinien mieć moc nominalną na poziomie 1,5 kW. W projekcie wykorzystano liśmy generator wiatrowy o mocy 3 kW, który w lokalnych warunkach terenowych wytworzył 5278 kWh w ciągu roku. Na rysunku 5 przedstawiono pokazuje rozkład rocznej produkcji energii w zależności od prędkości wiatru.



Rys.5. Roczny rozkład wielkości oczonej energii elektrycznej wyprodukowanej przez turbinę wiatrowa o mocy 3 kW.

Generator prądu zmiennego użyty w elektrowni wiatrowej również pozwala na uzyskanie odpowiedniej jakości energii prądu stałego po uprzednim wyprostowaniu

i regulacji napięcia. Ponieważ prędkość obrotowa turbin wiatrowych zależy od prędkości wiatru, również wartość generowanego napięcia i jego częstotliwość jest zmienna. Z tego powodu stosowany jest pośredni obwód prądu stałego wyposażony w regulator napięcia współpracujący z przetwornicą napięcia stałego na napięcie przemiennie (DC/AC) – rysunek 6.



Rys.6. Schemat układu pracy systemu z turbiną wiatrową

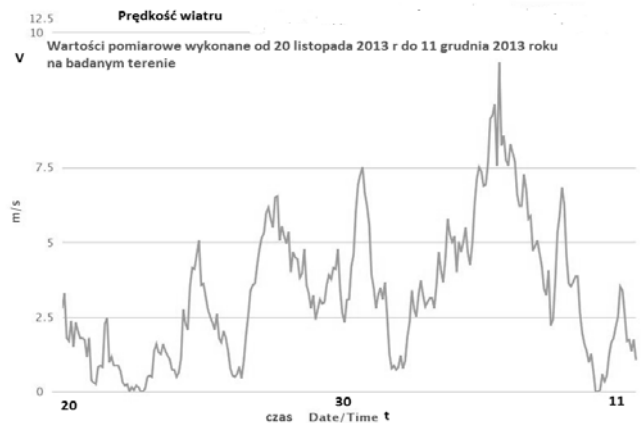
W tego typu rozwiązaniach energia elektryczna może zostać zmagazynowana. Magazynami energii elektrycznej mogą być akumulatory elektrochemiczne, natomiast w wyniku konwersji energia może zostać przetworzona na ciepło w wymiennikach cieczowych.

Charakterystyka energii wiatrowej.

Wiatr powstaje pod wpływem nierównomiernego nagrzewania przez słońce powierzchni ziemi o zmiennej topografii. Zależnie od aury i pory roku kierunek wiatru może się zmieniać. Powietrze nad obszarami nagrzewanymi promieniami słońca unosi się do góry, co powoduje zasysanie chłodnego powietrza, np. z nad morza. Warunki wietrzności dla celów energetycznych w Polsce określa się jako średnie [2]. Podstawowym parametrem energii wiatrowej jest prędkość wiatru. Prędkość wiatru ulega zmianom dziennym, miesięcznym i sezonowym. Do oceny warunków wiatrowych pod kątem wykorzystania ich do budowy siłowni wiatrowych niezbędna jest analiza nie tylko wartości średniej prędkości wiatru na danym terenie, ale także rozkład występowania poszczególnych prędkości wiatru w czasie. Wartość średnia pozbawiona jest bowiem informacji o czasie jej występowania, przez co jest nieprzydatna do projektowania urządzeń przetwarzających energię wiatrową w użyteczną. W przypadku projektów opartych na turbinach wiatrowych nastawianych na kierunek wiatru parametrem pracy staje się również kierunek wiatru, przy czym ma on znaczenie głównie ze względu na proces sterowania siłownią wiatrową. Jako parametr energii wiatrowej można więc uznać czas występowania poszczególnych prędkości wiatru. Moc użyteczna wytwarzana w silniku wiatrowym przejęta od strumienia powietrza wynika z różnicy energii kinetycznej powietrza przed i za wirnikiem [2, 8]. Poniżej przedstawiony jest wzór na moc niesioną przez wiatr przechodzący przez powierzchnię kołową określoną obrotem wirnika. Energia wiatru zależy także od gęstości powietrza. Gęstość powietrza wiąże się ściśle m.in. z jego wilgotnością oraz ciśnieniem statycznym, które wywołane jest ciśnieniem barometrycznym. Z uwagi na złożoność zależności związku gęstości, wilgotności oraz ciśnienia powietrza przyjmuje się najczęściej wartość średnią gęstości. W warunkach Polski $\rho = 1,26 \text{ kg/m}^3$.

Prędkość wiatru cechuje duża stochastyczność i niesterowność, jak można zobaczyć na rysunku 7. To

w konsekwencji prowadzi do dużej niestabilności tego źródła energii oraz trudności w określeniu możliwości uzysku energii w krótkich okresach czasowych.



Rys.7.-Prędkość wiatru w funkcji czasu

Inwertery (przetwornice napięcia).

Głównym zadaniem inwertera jest zamiana napięcia stałego na charakterystykę przemienną, nadanie kształtu wyjściowej fali zmienno-napięciowej. Najważniejszymi cechami inwertera w zastosowaniach fotowoltaicznych jest jego charakterystyka obciążenia nominalnego. Inwertery zaprojektowane są do ciągłej pracy w pobliżu punktu maksymalnej mocy oraz do pracy krótkotrwałej w przypadku chwilowego przekroczenia mocy nominalnej. Sprawność inwertera jest zazwyczaj podawana dla jego zaprojektowanej mocy pracy, lecz przez większość czasu inwertery w systemach fotowoltaicznych pracują przy niepełnym obciążeniu. Inwertery mają ogólną sprawność przy pełnym obciążeniu od 92% do 97%, a dla 20% obciążenia od 80% do 95%. Ponieważ straty na dopasowanie są tutaj zazwyczaj większe niż straty rezystancyjne [8]. Inwertery wykazują ciągły spadek sprawności wraz ze zmniejszaniem mocy wyjściowej i wejściowej. Na rynku są dostępne inwertery o różnych mocach oraz z sinusoidą wyjściową czystą o częstotliwości 50 Hz lub tak zwaną modyfikowaną, za którą kryje się fala prostokątna, która nadaje się w zasadzie do wąskiego grona odbiorników (elementy rezystancyjne grzejne) – a w szczególności niezalecana jest do urządzeń elektronicznych oraz indukcyjnych, które wymagają stabilnych parametrów zasilania.

Na podstawie przeprowadzonych testów przetwornicy z modyfikowanym sinusem i urządzeń z elementem indukcyjnym zauważono w przypadku testowania urządzeń z elementem indukcyjnym stwierdzono wzrost temperatury pracy oraz generowanie drgań z równoczesnym podniesieniem poziomu hałasu pracy elementu.

W przypadku stosowania inwerterów z pełnym sinusem uzyskuje się parametry pracy oraz wydłuży się czas eksploatacji urządzenia lub elementu. Oczywiście istotnym kryterium przy zakupie inwertera jest jego cena, w przypadku urządzeń z pełnym sinusem cena jest nawet kilkanaście razy wyższa. Dlatego w przypadku projektowania systemu należy określić specyfikę jakości zasilania odbiorników.

Akumulatorowy magazyn energii

Zespół akumulatorów pełni w hybrydowym systemie zasilania szereg istotnych funkcji polegających na zapewnieniu ciągłego dostarczenia energii, nawet w przypadku znacznych zmian obciążenia (ogniwa PEM charakteryzuje ograniczona nadążność). Energia

elektryczna wykorzystywana jest do ładowania akumulatorów. Następnie w okresie, gdy zapotrzebowanie przewyższa produkcję energii, prąd pobierany jest również z akumulatorów. Przyjęta w założeniach projektowanego systemu autonomia działania i uniwersalność zastosowania stawia również duże wymagania magazynowi akumulatorów. Głównym parametrem akumulatorów, który powinien być spełniony jest szeroki zakres temperaturowy czyli możliwość niezawodnej pracy a w różnych warunkach otoczenia. Bardzo istotny jest również, duży zakres prądu ładowania i rozładowania, gdy jest dostępna energia słoneczna lub wiatrowa, rozładowanie powinno dostosować się do potrzeb systemu. Natomiast wysoka sprawność ładowania i rozładowania powinna być zapewniona w możliwie szerokim zakresie temperatur otoczenia. Gromadzenie energii w akumulatorach jest najprostszą ale niestety równocześnie kosztowną. W chwili obecnej w zastosowaniach wymagających większych mocy wykorzystuje się głównie:

- akumulatory kwasowo-ołowiowe (tradycyjne, żelowe),
- akumulatory nikielowo-kadmowe (NiCd),
- akumulatory nikielowo-metalowo-wodorkowe (NiMH).

Istotną sprawą jest fakt, że akumulatory magazynują prąd stały, a w typowej instalacji domowej przesyłany jest prąd przemienny. Z tego względu przy pobieraniu prądu z akumulatora do zasilania typowych urządzeń należy najpierw wytworzyć prąd przemienny przy użyciu falownika lub zastąpić urządzenia elektryczne takimi, które mogą pracować na prąd stały. Trudniej jest z urządzeniami posiadającymi różnego rodzaju silniki, a więc z lodówką, pralką i zmywarką. Niektóre źródła prądu (np. większe turbiny wiatrowe) również wytwarzają prąd przemienny i przy jego magazynowaniu w akumulatorze konieczne jest najpierw jego wyprostowanie na prąd stały. Warto wspomnieć, że ze 100 jednostek energii włożonej do akumulatora na skutek najróżniejszych strat odbiera się jedynie około 70 jednostek. Dodatkowo, strata energii występuje w procesie zamiany prądu stałego na przemienny.

Podsumowanie

Prezentowany hybrydowy system zasilania stanowi alternatywę dla konwencjonalnych systemów zasilania energetyki zawodowej. Prace badawcze prowadzone na opisanym systemie są bardzo obiecujące, oczywiście także dzięki umiejscowieniu paneli PV w regionie Polski, który jest jednym z najbardziej atrakcyjnych lokalizacji, jeżeli chodzi o nasłonecznienie roczne. Docelowo prezentowany system zostanie uzupełniony o układ CHP i będzie pracował jako system hybrydowy skojarzony z układami CHP. Głównym zadaniem, który sobie jednak postawiliśmy jest

zaprojektowanie stworzenie systemu autonomicznego hybrydowego pracującego bez podłączania do sieci zewnętrznej. Oczywiście zaimplementowanie takiego systemu dopasowanego do charakterystyk pogodowych badanego obszaru wymaga gromadzenia dużej ilości danych meteorologicznych rozłożonych w czasie.

Dzięki coraz powszechniejszemu stosowaniu alternatywnych źródeł zasilania istnieje możliwość przyczynić się do proekologicznych działań mających na celu ograniczenie emisji toksycznych związków do atmosfery i jednocześnie generować oszczędności wynikające z zastosowania alternatywnych systemów zasilania. W ostatnim czasie kraje wysokorozwinięte zadeklarowały kierunku rozwoju energetyki odnawialnej, a w szczególności rozwojowi ogniw słonecznych oraz generatorów wiatrowych. Dzięki temu wzrasta produkcja baterii fotowoltaicznych, co doprowadza do spadku cen ogniw, a tym samym skraca czasookres zwrotu inwestycji.

Autorzy: dr hab. inż. Janusz Partyka, prof. PL Politechnika Lubelska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin E-mail: j.partyka@pollub.pl, mgr inż. Mirosław Mazur, Politechnika Lubelska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: mirekpolon@gmail.com ; mgr inż. Tomasz Marcewicz, Politechnika Lubelska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: tomasz.marcewicz@pollub.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Szymański B., Instalacje fotowoltaiczne [Photovoltaic installations (in Polish)], 2nd edition, published by Geosystem Burek, Kotyza S.C., 2013
- [2] Jastrzębska G., Ogniwa słoneczne, budowa, technologia i zastosowanie, WKiŁ Warszawa 2013
- [3] Zimny J., Odnawialne źródła energii w budownictwie niskoenergetycznym, Polska Geotermia Asocjacja, Warszawa 2010
- [4] Klugmann-Radzimińska E., Fotowoltaika w teorii i praktyce [Photovoltaics in theory and practice (in Polish)], published by BTC, 2010
- [5] Klugman E., Klugman-Radziemska E., Ogniwa i moduły fotowoltaiczne oraz inne niekonwencjonalne źródła energii, Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok 2005
- [6] Pluta Z., Słoneczne instalacje energetyczne, PW Warszawa 2003
- [7] Boczar T., Energetyka wiatrowa [Wind energetics (in Polish)], published by Pomiary Automatyka Kontrola, 2013.
- [8] Boczar T., Wykorzystanie energii wiatru, Wydawnictwo PAK, 2010