

doi:10.15199/48.2018.06.16

Optymalizacja trójsystemowego autonomicznego układu zasilania energią odnawialną w budynku mieszkalnym

Streszczenie. Dzięki coraz powszechniejszemu zastosowaniu systemów zasilania energią odnawialną z zastosowaniem generatorów fotowoltaicznych (PV) i turbin wiatrowych (TW) jest możliwość zaimplementowania tych układów do zasilania w sposób autonomiczny budynków mieszkalnych. Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na efektywność wielosystemowych układów zasilania jest odpowiednie zbilansowanie całego systemu. W artykule opisane zostały analizy dokonane na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych wykonywanych w funkcjonującym budynku mieszkalnym z zastosowaniem współpracujących układów turbin wiatrowych, paneli fotowoltaicznych, generatora na biopaliwo oraz magazynu wyprodukowanej energii elektrycznej.

Abstract. With the increasingly widespread use of renewable energy power supply system using photovoltaic generators (PV) and wind turbines (WT) it is possible to implement these systems to autonomous power supply of the residential buildings. A very important factor influencing the effectiveness of multi-system systems is the proper balance of the whole system. This article describes the analysis made on the basis of actual measurement data in a functioning residential building using co-operating wind turbine systems, photovoltaic panels, biofuel generator and the storage of produced electricity. (**Optimization of the three-way, autonomous renewable energy power supply system in the residential building.**)

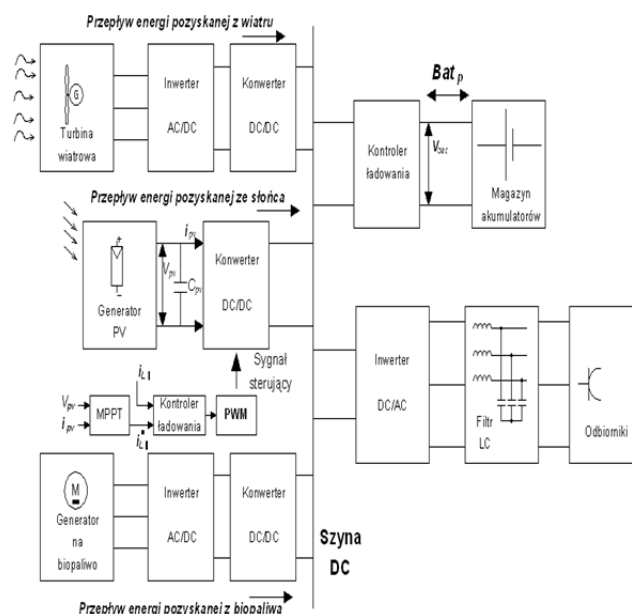
Słowa kluczowe: hybrydowy system zasilania, bateria PV, ogniwa fotowoltaiczne, generatory wiatrowe

Keywords: hybrid power system, PV cell, photovoltaic, wind generators

Wstęp

Dzięki dynamicznemu rozwojowi energetyki odnawialnej zaistniała możliwość wykorzystania kilku systemów do zasilania autonomicznych budynków mieszkalnych. Dzięki możliwości produkcji energii elektrycznej w sposób ekologiczny i czysty istnieje możliwość dostarczania niezbędnej energii, aby zagwarantować samowystarczalność energetyczną budynku. W ostatnich latach nastąpił znaczący wzrost udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w produkcji energii elektrycznej i zarówno w skali mikro, jak również globalnie dzięki dynamicznemu wzrostowi wydajności produkowanych generatorów i spadkowi kosztów ich produkcji [1, 3]. Należy również zaznaczyć, iż wyniki prowadzonych badań wskazują, iż możliwe jest pokrycie potrzeb energetycznych gospodarki światowej w oparciu o dostępne zasoby energii słońca wiatru oraz wody. Dzięki takim działaniom źródła odnawialne realizują coraz więcej zadań, które dotychczas były wyłącznym monopolem energetyki konwencjonalnej. Istotnym problemem źródeł generacji słonecznej oraz wiatrowej jest ich zmienność w czasie oraz w przypadku generacji wiatrowej duża stochastyczność i zmienność. W celu rozwiązania omawianego wyżej problemu należy do hybrydowego systemu fotowoltaiczno-wiatrowego zaimplementować system gromadzenia nadwyżek produkowanej energii oraz skorelować dodatkowy układ gwarantujący całkowitą eliminację problemu. Prowadzone badania wykazują znaczący postęp w dziedzinie prognozowania uzysku energetycznego zarówno dla fotowoltaiki, jak i turbin wiatrowych. Jednak sama wiedza, że w przeciągu następnego dnia będzie dostępna określona wielkość energii elektrycznej nie jest wystarczająca, np. w wypadku układów autonomicznych, ponieważ funkcją celu jest pokrycie całkowitego występującego zapotrzebowania na energię w badanych źródłach. Badania przeprowadzone dla omawianej lokalizacji wskazują w szczególności na częściową komplementarność źródeł słonecznych i wiatrowych. Połączenie koncepcji magazynowania energii oraz wykorzystania czasowej komplementarności różnych źródeł energii stało się przyczynkiem do rozwoju tak zwanych układów hybrydowych i skojarzonych. Są one przedmiotem licznych analiz i badań w literaturze krajowej i zagranicznej. Obecne kierunki prac koncentrują się głównie na

wielokryterialnej optymalizacji parametrów takich układów oraz możliwości zastosowania ich w budownictwie pasywnym i niskoemisyjnym. Należy ponadto zaznaczyć, iż generacja słoneczna i wiatrowa obecnie zaczyna odgrywać istotną rolę w krajowych systemach elektroenergetycznych, ze względu na coraz większe rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną zwłaszcza w okresach letnich, kiedy szczególnie następuje wzrost zużycia mocy przez systemy klimatyzacji, a wtedy generatory PV produkują znamionowe ilości energii.



Rys. 1. Schemat trójsystemowego układu zasilania

2. Układy zasilania trójsystemowego

Schemat blokowy proponowanego zintegrowanego systemu generującego energię słoneczną, wiatrową, generator rezerwy na biopaliwo i magazyn akumulatorów przedstawia rysunek 1.

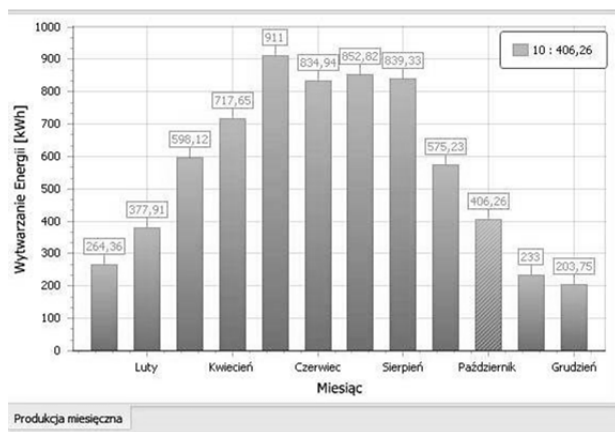
Konfiguracja układu trójsystemowego jest wykorzystana do zasilania systemów autonomicznych, jak również systemów skojarzonych z siecią zawodową [7]. Dla

autonomicznego systemu jeśli zapotrzebowanie jest większe niż suma generowania i przechowywania, to zasilanie musi być dostarczone przez generator rezerwy. Dla konfiguracji sieciowej nie jest potrzebny generator rezerwy. W analizowanym układzie trójsystemowym można wyróżnić dwa niesterowalne źródła energii jakimi są, instalacja fotowoltaiczna (PV) i turbina wiatrowa (TW) oraz jedno sterowalne w postaci generatora na biopaliwo (GR). Wszystkie mogą bezpośrednio zasilać odbiornik w energię elektryczną, jednak ze względu na aspekty ekonomiczne i ekologiczne, priorytetowymi układami są PV i TW. Ze względu na mogące wystąpić rozbieżności w podaży i popytu energii, układ został wyposażony w magazyn energii w postaci układu akumulatorów.

Podstawowym zadaniem obliczeniowym, związanym z ustaleniem wartości zmodyfikowanej funkcji celu w rozpatrywanym zadaniu optymalizacji struktury elektrowni solarno-wiatrowej, jest wyznaczenie energii generowanej w układzie w okresie jednego roku. W przypadku posiadania danych pomiarowych prędkości wiatru oraz gęstości mocy promieniowania słonecznego, energię elektryczną generowaną w omawianym układzie hybrydowym, wyznaczamy z zależności:

$$(2) \quad A_e = \sum_{n=1}^{N_1-1} \frac{P_1(v_{w(n+1)}) + P(V(n))}{2} \Delta t_w + \sum_{n=1}^{N_1-1} \frac{P_2(v_{w(n+1)}) + P(E(n))}{2} \Delta t_{PV}$$

Δt_{PV} – krok czasowy pomiarów gęstości mocy promieniowania, Δt_w – krok czasowy pomiarów gęstości mocy energii wiatrowej, $E(n)$ – wartość gęstości mocy promieniowania, $P(E(n))$ – moc paneli PV dla próbki pomiarowej n. W zależności uwzględniono uśrednioną wartość mocy turbiny wiatrowej P_1 oraz paneli PV P_2 , odpowiednio w okresach Δt_w i Δt_{PV} , wynikającą z zastosowania liniowej aproksymacji zmian mocy w czasie.



Rys.2. Wykres produkcji miesięcznej energii w 2015 roku z badanego sumarycznie systemu PV o mocy znamionowej 6,4 kW

2.1 Układ zasilania generatorami fotowoltaicznymi

Rodzaj zastosowanych ogniw fotowoltaicznych w dużym stopniu decyduje o nominalnej mocy systemu zasilania, wymiary decydują o zajętej powierzchni oraz masie elektrowni PV. Dlatego ważnym czynnikiem mającym wpływ na skuteczną realizację projektu jest wybór odpowiednich generatorów fotowoltaicznych w celu uzyskania wymaganej mocy elektrycznej koniecznej dla zasilania instalacji budynku i ładowania magazynu akumulatorów. Aktualnie odnotowywane są znaczące osiągnięcia w dziedzinie zwiększenia sprawności materiałów fotowoltaicznych

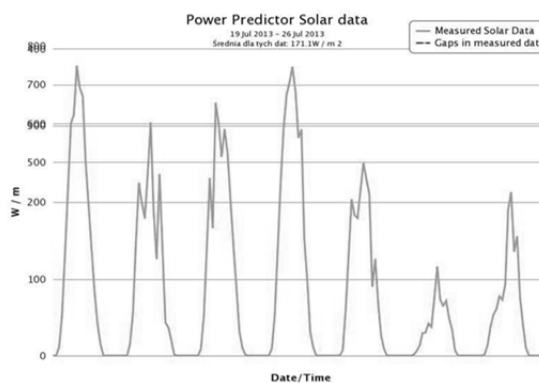
wykorzystywanych dla celów uzyskania wysokiej generacji energii elektrycznej, dzięki czemu zmniejsza się również powierzchnia potrzebna do zainstalowania tej samej mocy układu PV[4].

Energię promieniowania słonecznego obliczono z zależności:

$$(1) \quad A_e^s = J_{PV} = \sum_{n=1}^{12} P_2 (E_{(n)Avg}) T_{(n)Sun}$$

gdzie: $E_{(n)Avg}$ - średnia miesięczna gęstość mocy promieniowania, $P_2 (E_{(n)Avg})$ - moc panelu odpowiadająca gęstości, $(E_{(n)Avg}) T_{(n)Sun}$ - średni czas nasłonecznienia dla miesiąca n.

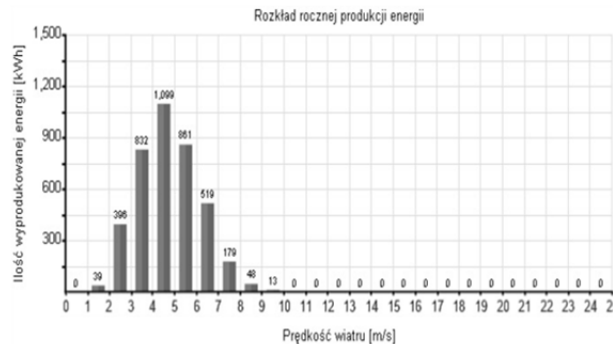
Roczna produkcja energii - 6814,38 kWh
 Produkcja roczna z kWp/PV - 1058,13 kWh/kWp
 Powierzchnia modułów - 45,92 m²
 Strata całkowita systemu - 13,79%



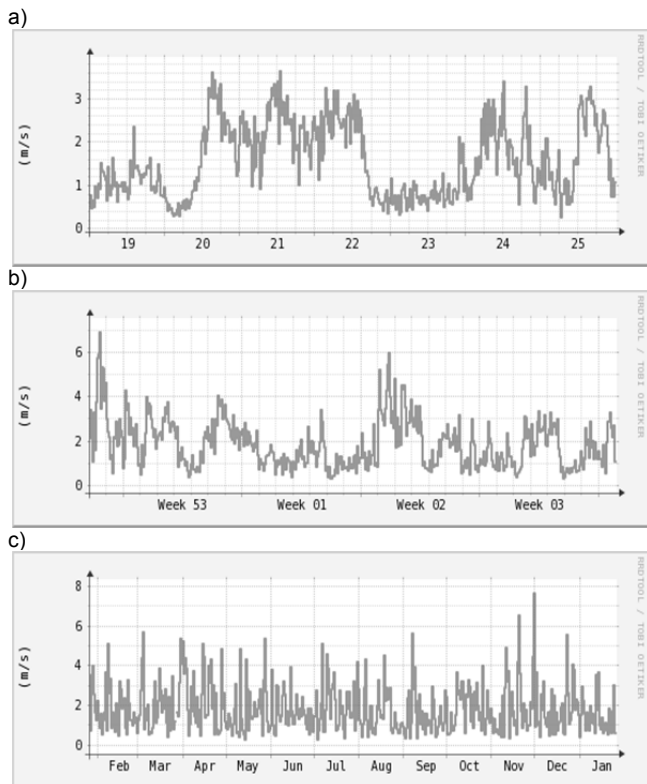
Rys.3. Charakterystyka nasłonecznienia badanego terenu w miesiącu sierpniu 2013 roku.

2.2 Układ zasilania turbinami wiatrowymi

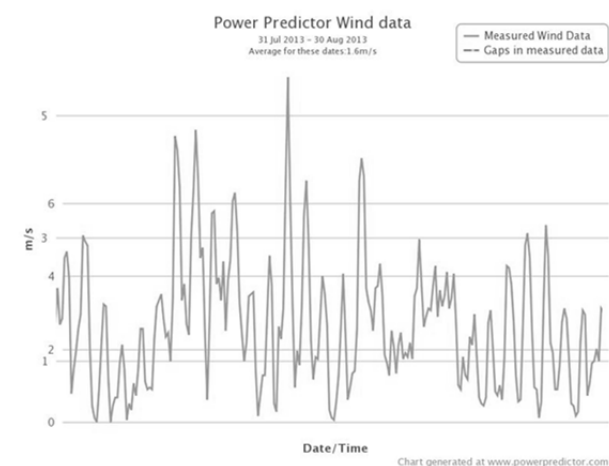
Ze względu na ograniczoną dostępność promieniowania słonecznego w okresach jesienno-zimowych, należy uzupełnić układ hybrydowy o generatory wiatrowe. Do wykonania systemu hybrydowego można wykorzystać elektrownie wiatrowe dostępne na rynku i przeznaczone dla odbiorców indywidualnych i dla małych firm. Konieczna będzie ich adaptacja pozwalająca na łatwy transport i prosty montaż w miejscu instalacji. Wybierając generator wiatrowy należy zwrócić uwagę głównie na wydajność z jaką elektrownia będzie pracowała najczęściej, czyli przy sile wiatru charakterystycznej dla obszaru Polski, tj. około 4,5 - 5,5 m/s[3,2]. Dobór wielkości instalacji PV i generatora wiatrowego należy przeprowadzić po analizie zapotrzebowania budynku mieszkalnego. Urządzenia te muszą zapewnić wystarczające ilości niezbędnej do wytworzenia energii zasilającej obwody odbiorcze budynku i akumulatorowego magazynu energii.



Rys.4. Roczna ilość wyprodukowanej energii przez badane turbiny wiatrowe o sumarycznej mocy 3 kW – 3994 kWh/ 2015 rok



Rys.5. Średnie prędkości wiatru w 2015 roku, wykres przedstawia dane: a) tygodniowe, b) miesięczne c) roczne



Rys.6. Charakterystyka prędkości strumienia powietrza na badanym terenie w miesiącu sierpniu 2013 roku.

Zgodnie z charakterystyką przedstawioną na rysunku 6, możemy powiedzieć, że wykres jest danymi stochastycznymi. Dane wietrzności i nasłonecznienia uzyskano na podstawie pomiarów przeprowadzonych za pomocą stacji pomiarowej „Power Predictor” zainstalowanej na dachu badanego budynku mieszkalnego na wysokości 9 metrów.

2.3 Magazyn energii

Zespół akumulatorów pełni w opisywanym systemie zasilania szereg istotnych funkcji które mają duży wpływ na niezawodną i bezawaryjną pracę współpracujących z nim układów. Magazyn energii powinien zapewnić:

- ciągłe, stabilne zasilanie przetworników energii, nawet w przypadku dynamicznych zmian obciążenia,
- niezawodne źródło zasilania, sterowania systemu zarówno podczas pracy, jak i rozruchu,
- obsługę układów zasilania odbiornika (np. czynności konserwacyjne i kontrolne,

Przyjęty w założeniu system działający w pełnej autonomii zapewniający uniwersalność zastosowania poszczególnych urządzeń, stawia również duże wymagania zespołowi akumulatorów. Istotne parametry, które powinien spełniać magazyn akumulatorowy:

- szeroki zakres temperaturowy eksploatacji (praca w różnych warunkach atmosferycznych),
- duży zakres prądu ładowania i rozładowania (ładowanie, gdy jest dostępna energia słoneczna lub wiatrowa, rozładowanie wg. potrzeb systemu hybrydowego),
- wysoka sprawność ładowania i rozładowania w możliwie szerokim zakresie temperatur otoczenia,
- stałe właściwości przy zmiennym obciążeniu,
- brak efektu pamięciowego,
- duża gęstość akumulowanej energii.

Powyższe wymagania w pełnym zakresie spełniają obecnie akumulatory żelowe. Niestety są one obecnie jeszcze stosunkowo drogie, co wpływa znacząco na koszt systemu, jednak ze względu na dynamiczny wzrost produkcji, który dyktowany jest zapotrzebowaniem producentów pojazdów elektrycznych oraz systemom magazynowania energii, cena ich systematycznie spada [8].

3. Analiza optymalizacji systemu

Roczna ilość generowanej energii elektrycznej dla ustalonej parametrów elektrowni wiatrowej została wyznaczona w oparciu o średnioroczną prędkość wiatru dla danej lokalizacji geograficznej, rozkład gęstości prawdopodobieństwa Weibulla oraz krzywe mocy zastosowanych turbin wiatrowych. W przypadku generatorów PV została wyznaczona wielkość generowanej energii w okresie roku w oparciu o rozkład średniej gęstości mocy promieniowania dla poszczególnych miesięcy w badanej lokalizacji geograficznej oraz charakterystyk prądowo-napięciowych zastosowanych paneli PV [2, 5]. Pomiar takie dla przyszłych układów hybrydowych są podstawą opracowania dokumentacji projektowej i powinny stać się podstawowym elementem doboru urządzeń i parametrów układu hybrydowego PV-TW.

Pokrywanie zapotrzebowania na energię elektryczną wyłącznie w oparciu o pobór energii z magazynu energii oraz generatora rezerwowego występuje tylko w godzinach, gdy teoretycznie nie może być generowana energia z instalacji fotowoltaicznej i generatorów wiatrowych. Należy tak dobrać moc znamionową instalacji fotowoltaicznej (P^{PV}) oraz liczbę turbin wiatrowych (n^{TW}) o mocy znamionowej ($P^{TW,N}$) by ich suma wymiany energii z generatorem rezerwowym (GR) była minimalna lub zerowa, a jednocześnie prawdopodobieństwo wystąpienia deficytu energii było mniejsze niż dopuszczalne ($LOLP^{max}$). Dla tak zdefiniowanego problemu, możliwe jest zastosowanie zależności oraz równań przedstawionych na potrzeby modeli symulacyjnych na tej podstawie model optymalizacyjny przyjmuje następującą postać: funkcja celu wynosi:

$$(3) \quad \min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij}^D + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij}^N$$

E_{ij}^D – deficyt energii

E_{ij}^N – nadwyżka energii

Przy ograniczeniu:

$$(4) \quad \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij}^D}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij}^Z} \leq LOLP^{max}$$

$LOLP^{max}$ – prawdopodobieństwo wystąpienia deficytu energii, E_{ij}^Z – zapotrzebowanie na energię dnia i w chwili, generowane przez odbiory.

Ze względu na zmienną naturę generacji wiatrowej oraz słonecznej, należy oczekiwać, iż sumaryczny uzysk instalacji PV oraz turbiny wiatrowej bardzo rzadko będzie wynosił dokładnie moc znamionową, sytuacja taka jest jednak w rzeczywistości dopuszczalna i możliwa. W związku z tym przyjęto założenie, o nieprzekraczaniu przez sumaryczną moc zainstalowaną w PV oraz TW maksymalnej zdolności do przyjmowania energii przez układ akumulatorów. Zmienność zapotrzebowania na energię jest kluczowym czynnikiem wpływającym na planowanie pracy hybrydowego systemu PV-TW. Jak już wspomniano, w wypadku zapotrzebowania na energię, można wyróżnić pewne charakterystyczne jej przebiegi w ujęciu rocznym, tygodniowym, dobowym oraz godzinnym, a tym samym istotną rolę zaczyna odgrywać dostępność odnawialnych źródeł energii w szczególności z perspektywy cyklu dobowego oraz rocznego.

Wnioski

Odnawialne źródła energii można efektywnie wykorzystać w alternatywnym wykorzystywaniu konwencjonalnych systemów zasilania oraz w celu zaspokojenia rosnących potrzeb energetycznych nowo budowanych budynków pasywnych lub istniejących. Badany układ trój systemowego zasilania okazał się skuteczny w tym projekcie. W przypadku systemu rozważanego w niniejszym dokumencie, dodanie skorelowania dwóch źródeł energii odnawialnych, takich jak energia wiatrowa, słoneczna przyczyniła się do zróżnicowania produkcji energii i zmniejszyła udział jednego źródła w celu spełnienia zapotrzebowania energetycznego badanego budynku mieszkalnego. Strategie łączenia generatorów OZE mogą być różne, a także mogą być jednym z czynników, które powodują wzrost zainteresowania tego typu zasilaniem obiektów mieszkalnych. Można zoptymalizować bardziej zmienne parametry, w tym różne parametry dla generatorów na biopaliwo i innych elementów odpowiedzialnych za prawidłową pracę systemu. Można również rozważyć projekt i działanie takiego systemu hybrydowego w połączeniu z siecią zawodową. Czynniki te można rozważyć przy ocenie i minimalizacji ogólnych korzyści w planowaniu i uruchomieniu systemów o znacznej

wielkości. Sugerowana metodologia rozważała zarówno dokładność uzyskanych rozwiązań, jak i wyniki obliczeniowe. W proponowanej metodzie trój systemowego wytwarzania energii, w tym energii wiatrowej, słonecznej oraz magazynu akumulatorów, poszczególne elementy są zaprojektowane na podstawie ograniczenia kosztów projektu. Hybryda zapewnia lepszą niezawodność i niższe koszty w porównaniu do indywidualnych układów zasilana odnawialnych źródeł energii. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii zapewnia niezaprzeczalne korzyści środowiskowe w porównaniu do konwencjonalnych rozwiązań alternatywnych.

Autorzy: dr hab. inż. Janusz Partyka profesor PL, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej ul. Nadbystrzycka 38A,; mgr inż. Mirosław Mazur, Wydział Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej ul. Nadbystrzycka 38A, E-mail: mirekpolon@gmail.com.

LITERATURA

1. Klugman E.E, Klugman-Radziemska E., Ogniwa i moduły fotowoltaiczne oraz inne niekonwencjonalne źródła energii, *Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko*, Białystok, 2005
2. Boczar T., Energetyka Wiatrowa, *Wydawnictwo Pomiaru Automatyka Kontrolna*, 2008
3. Bajor M., Ziołkowski P., Wideliski G., Badanie współzależności poziomów generacji wiatrowej i potencjalnej generacji ze źródeł PV na obszarze ENERGA-OPERATOR SA., *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2015
4. Jurasz J., Mikulik J. Investigating Theoretical PV Energy Generation Patterns with Their Relation to the Power Load Curve in Poland, *International Journal of Photoenergy*, 2016
5. Paska J., Generacja rozproszona z wykorzystaniem hybrydowych układów wytwórczych, *Energetyka*, 6, 2013
6. Rodacki T., Kandyba A., Przetwarzanie energii w elektrowniach słonecznych, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice, 2000
7. Jurasz J., Mikulik J., Solar & wind hybrid power source for residential building mathematical model approach, *Architecture Civil Engineering Environment*, 2007
8. Wojciechowski A., Akumulatory litowo-fosfatowe – możliwości wykorzystania w technice wojskowej, Inżynieria Wojskowa – Problemy i perspektywy, Konferencja Naukowo-Techniczna WITI 2013, Wrocław, 2013