

# Hybrydowy system zasilania wykorzystujący technologie wodorowe i źródła energii odnawialnej

Marcin Szczepaniak, Andrzej Wojciechowski, Jacek Chmielowiec

## 1. Wstęp

Integracja alternatywnych źródeł energii w proekologicznym systemie zasilacza ma na celu wykorzystanie nowych, przyjaznych środowisku technologii w życiu codziennym. Projekt systemu zakłada wykorzystanie technologii wodorowych (ogniwo paliwowe, elektrolizer, magazyn wodoru) oraz paneli fotowoltaicznych, generatorów wiatrowych i akumulatorów do opracowania modelu systemu bezprzerwowego zasilania. Zadaniem urządzenia będzie zapewnienie ciągłości dostaw energii elektrycznej kluczowych obiektów wymagających stałego zasilania (np. przekaźniki sieci GSM, centra serwerowe), środków wspomagających akcje prowadzone przez sztaby zarządzania kryzysowego podczas klęsk żywiołowych itp. Dobór poszczególnych elementów każdego z podsystemów (wodorowego, słonecznego) oraz układów zarządzania ich pracą pozwala wykazać, że jest możliwa autonomiczna praca urządzenia w przypadku konieczności długiego, samodzielnego działania bez kontaktu z zapleczem logistycznym (autouzupełnianie paliwa).

## 2. Koncepcja systemu

Schemat systemu przedstawia rysunek 1.

Sercem systemu i jednocześnie elementem integrującym jest moduł sterowania, który umożliwi bezobsługową pracę urządzenia, przy jednoczesnej optymalizacji parametrów jego działania, w tym minimalizacji zużycia energii na potrzeby własne. Zadaniem modułu sterującego jest zarządzanie przepływem energii (ogniwo PEM – odbiornik, generator wiatrowy – elektrolizer oraz panel PV – elektrolizer), gazów reakcyjnych

**Streszczenie:** Prezentowany referat, jak i wykonane prace wstępne pokażą, że możliwa jest budowa quasiautonomicznego, cichego i bezemisyjnego systemu zasilania, bazującego na technologii wodorowej i odnawialnych źródłach energii, przystosowanego do pracy w warunkach rzeczywistych (wysokie i niskie temperatury otoczenia) i mogącego zastąpić funkcjonalnie tradycyjny, spalinowy zespół prądotwórczy.

Efekt ten uzyskano poprzez doświadczalne badania zaprezentowanych w pracy podzespołów systemu i analityczne zintegrowanie różnych źródeł energii elektrycznej tak, aby wytworzyć hybrydowy układ źródeł prądu, zdolny do zasilania środków wspomagających akcje prowadzone przez sztaby zarządzania kryzysowego podczas klęsk żywiołowych itp. W pracy przedstawiony jest sposób doświadczalnego doboru poszczególnych elementów każdego z podsystemów oraz układów zarządzania ich pracą, który w efekcie powinien

pozwolić na wskazanie, że jest możliwa autonomiczna praca urządzenia w przypadku konieczności długiego samodzielnego działania bez kontaktu z zapleczem logistycznym.

Praca prezentuje możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł energii elektrycznej do jednoczesnej pracy systemu z pełnym obciążeniem i magazynowania energii do regeneracji systemu wodorowego (wytworzenia wodoru do samodzielnego cyklu pracy) i podtrzymywania gotowości urządzenia.

Przedstawiona w pracy propozycja urządzenia integruje kluczowe technologie, takie jak: nowoczesne baterie akumulatorów, niekonwencjonalne źródła energii – ogniwa paliwowe, odnawialne źródła energii – ogniwa fotowoltaiczne, generator wiatrowy oraz blok systemu zarządzania energią optymalizujący współpracę wszystkich komponentów.

Słowa kluczowe: hybrydowy system zasilania, ogniwa paliwowe, odnawialne źródła energii

## HYBRID POWER SYSTEM USING HYDROGEN AND RENEWABLE ENERGY SOURCES

**Abstract:** The paper presented and preliminary work show that it is possible to build quasiautonomic, silent and emission-free power system based on hydrogen technology and renewable energy sources, adapted to work in real conditions (high and low ambient temperatures) and likely functionally replace traditional, combustion generator.

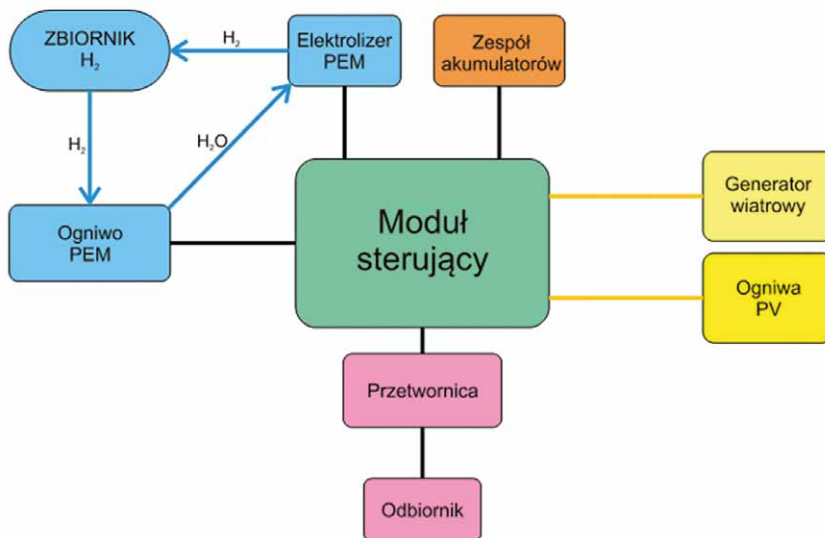
This effect was obtained by experimental studies of the working components of the system presented in the paper and the analytical integration of different sources of energy, so as to produce a hybrid system of power source capable of powering equipment used by the crisis management staff during natural disasters, etc. The work will present experimental means for selection of individual elements of each of the subsystems, as described below, and systems to manage their work, which in effect should allow to

demonstrate that autonomous operation of the unit in case of a necessity long, independent operation without contact with logistics facilities is possible.

The paper will present the possibilities of using renewable energy sources for simultaneous operation of the system with a full load and energy storage system for the regeneration of hydrogen (hydrogen to produce a self-cycle) and maintaining the state of readiness.

The device presented integrates essential technologies, such as modern batteries, unconventional energy sources – fuel cells, renewable energy – photovoltaic cells (PV), wind power generator and block energy management system which optimizes the cooperation of all the components.

Keywords: hybrid power system, fuel cells, renewable energy sources



Rys. 1. Schemat hybrydowego systemu zasilania

(elektrolizer – zbiornik, zbiornik – ogniwo) oraz wody (ogniwo – elektrolizer), zabezpieczenie poszczególnych

elementów przed uszkodzeniem oraz zapewnienie bezpieczeństwa pracy urządzenia zasilanego wodorem.

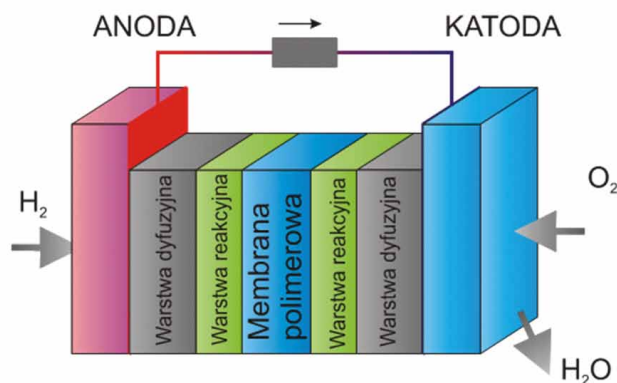
Podstawowym źródłem energii elektrycznej systemu jest ogniwo PEM (ang. *Proton Exchange Membrane* lub *Polimer Electrolyte Membrane*) zasilane wodorem zgromadzonym w zbiorniku  $H_2$ . Wodór do zbiornika dostarcza elektrolizer PEM rozkładający wodę pochodzącą z ogniwa, zasilany energią elektryczną pochodzącą z ogniw fotowoltaicznych (PV) oraz generatora wiatrowego. Dodatkowo ogniwa PV oraz generator wiatrowy zapewniają energię niezbędną do naładowania zespołu akumulatorów. Zadaniem akumulatorów jest zagwarantowanie ciągłości zasilania modułu sterującego oraz odbiornika np. podczas obsługi ogniwa PEM.

Przetwornica (np. DC/AC) dostarcza energię elektryczną o parametrach odpowiednich do prawidłowej pracy odbiornika.

Powodzenie realizacji projektu wymaga zastosowania nowoczesnych technologii związanych z wykorzystaniem wodoru

reklama

reklama



Rys. 2. Zasada działania ogniw paliwowych

jako paliwa (wytworzenie – elektrolizer, magazynowanie, zamiana energii chemicznej wodoru w elektryczną – ogniwo paliwowe) oraz technologii związanych z generatorami wiatrowymi, ogniwami fotowoltaicznymi i akumulatorami. Poniżej opisane zostały zasadnicze problemy mogące rzutować na powodzenie realizacji systemu.

### 3. Podzespoły energetyczne systemu

#### 3.1. Technologie wodorowe

Zasadę działania ogniw paliwowych przedstawia rysunek 2.

Ogniwo paliwowe zbudowane jest z dwóch elektrod: anody i katody. Elektrody odseparowane są przez elektrolit występujący w formie płynnej lub jako ciało stałe. Elektrolit umożliwia przepływ kationów, natomiast uniemożliwia przepływ elektronów. Reakcja chemiczna zachodząca w ogniwie polega na ciągłym „rozbijaniu” cząstek wodoru na protony i elektrony na anodzie, a następnie na łączeniu substratów reakcji na katodzie. Procesom elektrochemicznym towarzyszy przepływ elektronu od anody do katody z pominięciem nieprzepuszczalnej membrany. W wyniku elektrochemicznej reakcji wodoru i tlenu powstaje prąd elektryczny, woda i ciepło. Paliwo – wodór w stanie czystym lub w mieszaninie z innymi gazami – jest doprowadzane w sposób ciągły do anody, a utleniacz – tlen w stanie czystym lub mieszaninie (powietrze) – podawany

jest w sposób ciągły do katody. Ogniwo paliwowe teoretycznie nie ulega rozładowaniu. W rzeczywistości degradacja lub niesprawność komponentów ograniczają jego żywotność.

Planowane do wykorzystania w projekcie ogniwo paliwowe oraz elektrolizer (oba typu PEM), składają się ze stosu szeregowo połączonych celi, z których każda wykonana jest w formie konstrukcji MEA (*Membrane Electrode Assembly*). Celki oddzielone są grafitowymi płytkami bipolarnymi. Natomiast pojedyncza celka MEA składa się z polimerowego elektrolitu elektrod zazwyczaj węglowych. Stos ogniwa paliwowego i elektrolizera wykonuje się, pakietując dane komponenty, uzyskując konstrukcję pozbawioną ruchomych części mechanicznych. Ich obsługa jest dość złożona, ponieważ na poprawność działania stosu ma wpływ szereg czynników. Dlatego ważna jest znajomość budowy, zasady działania oraz procesów fizykochemicznych i termodynamicznych, które zachodzą wewnątrz stosu. Przykładowo, w teorii celki polimerowego ogniw paliwowych daje napięcie w warunkach OCV około 1,2 V, natomiast w praktyce wartość ta maleje poniżej 1 V. Istotna jest więc znajomość źródeł strat powodujących spadek napięcia oraz konstrukcji stosu i zasady jego obsługi, tak aby nie doprowadzić do obniżenia wartości napięcia na celce poniżej wartości granicznej, co doprowadziłoby do nieodwracalnego jej zniszczenia. Innymi

ważnymi parametrami wpływającymi na sprawność działania ogniwa paliwowego są: temperatura pracy, ciśnienie substratów oraz procentowe zużycie paliwa w danym obiegu, które decydują o wartości napięcia każdej celki z osobna, jak i całego stosu pod danym obciążeniem elektrycznym. Często są przypadki zniszczenia stosu w wyniku zbyt dużego „spalenia” wodoru w jednym cyklu, które prowadzi do sytuacji niedoboru tego paliwa w meandrach ostatnich celi, czego następstwem jest wzrost generowanego natężenia prądu powyżej dopuszczalnej wartości granicznej. Stosy ogniw paliwowych PEM generują energię elektryczną w wyniku reakcji chemicznej wodoru i tlenu. Urządzenia te zasilają się paliwem wodorowym o czystości 5.0 oraz powietrzem dostarczanym z kompresora. Ze względu na skład chemiczny powietrza przepływ tego gazu musi być od ok. dwóch do trzech razy większy od przepływu wodoru, co pociąga za sobą wiele aspektów odnośnie do bezpieczeństwa pracy (np. maksymalna dopuszczalna różnica ciśnień) i efektywnego zarządzania doprowadzaniem paliwa w zależności od wielkości obciążenia. Produktem materialnym działania stosu ogniw paliwowych jest woda, natomiast niematerialnym energia (ciepna i elektryczna) – oba muszą być wydajnie odprowadzane i wykorzystane (np. w elektrolizerze). Nie można również dopuścić do zamrażania wody w stosach.

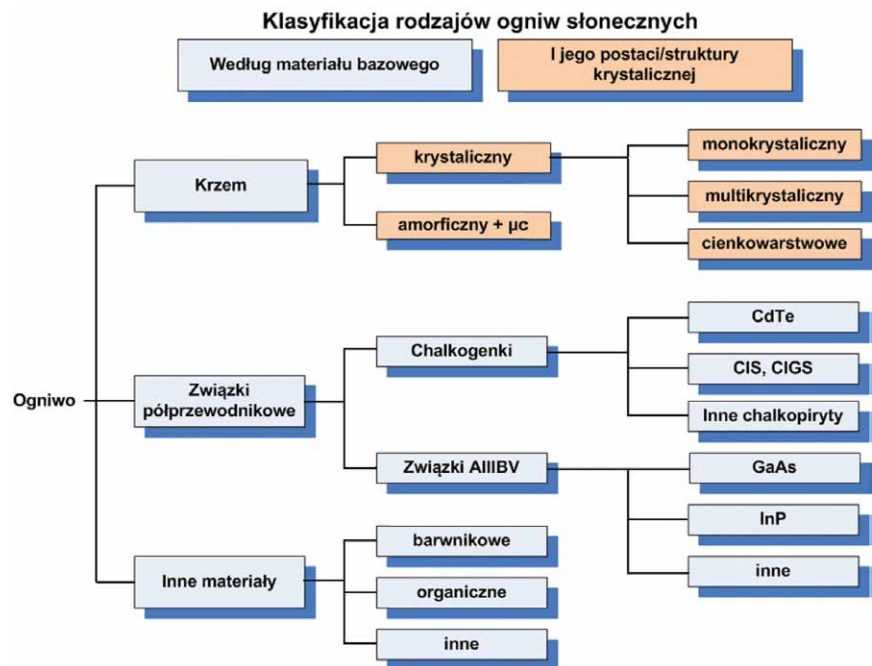
Do zastosowania w hybrydowym źródle zasilania elektrycznego przewidziano ogniwo paliwowe typu PEM ze względu na charakteryzujące go właściwości, m.in. typ membrany (elektrolitu) i niską temperaturę pracy. Poniżej przedstawiono podstawowe właściwości ogniwa typu PEM. Ogniwa paliwowe PEM zasilane są czystym wodorem. Membraną ogniwa PEM jest materiał polimerowy, np. nafion. Charakterystyczną cechą ogniw PEM jest duża sprawność produkcji energii elektrycznej – do 65% – oraz mała ilość wydzielanego ciepła. Niewątpliwą zaletą ogniwa PEM jest dobra jego nadążność w systemach poddawanych zmiennemu obciążeniu oraz krótki czas rozruchu. Cechy te wynikają z niskiej temperatury reakcji

zachodzącej w ogniwie: 60–100 stopni Celsjusza.

Decydujące dla projektu jest również dobranie optymalnego sposobu magazynowania energii w postaci wodoru oraz wielkość zbiornika, aby umożliwić ciągłe działanie ogniwa. Wybór metody przechowywania wodoru będzie miał kluczowe znaczenie dla gabarytów i ciężaru projektowanego modelu zasilacza.

### 3.2. Ogniwa fotowoltaiczne i energia wiatrowa

Rodzaj zastosowanych ogniw fotowoltaicznych przekłada się znacząco na nominalną moc systemu zasilania, wymiary i masę. Dlatego ważnym czynnikiem, mającym wpływ na skuteczną realizację projektu, jest wybór odpowiednich baterii słonecznych w celu uzyskania wymaganej mocy elektrycznej koniecznej dla zasilania elektrolizera i ładowania akumulatorów.



Rys. 3. Klasyfikacja materiałowa ogniw fotowoltaicznych [9]



Aktualnie odnotowywane są znaczące osiągnięcia w dziedzinie materiałów fotowoltaicznych wykorzystywanych dla celów uzyskania energii elektrycznej. Rysunek 3 przedstawia klasyfikację ogniw ze względu na zastosowany materiał.

Obecnie na świecie dominującym materiałem do produkcji ogniw fotowoltaicznych jest krzem krystaliczny. Powodów takiej sytuacji jest wiele:

- dobrze opanowana technologia – produkcja materiału krystalicznego na dużą skalę o dobrych parametrach technologicznych jest dobrze opanowana;
- rozpowszechnienie w przyrodzie – nie ma niebezpieczeństwa, że zabraknie go podczas zwiększania produkcji;
- technologie wykorzystywane w innych dziedzinach techniki – przy produkcji ogniw fotowoltaicznych opartych o krzem krystaliczny są wykorzystywane technologie rozwijane także w innych dziedzinach techniki, takich jak przemysł półprzewodnikowy;
- wysoka sprawność pozyskania energii – ogniwa na bazie krzemu krystalicznego osiągają wysokie sprawności przy wciąż malejących kosztach.

Wśród ogniw wykonanych na bazie krzemu krystalicznego wyróżniamy ogniwa: monokrystaliczne Cz-Si oraz polikrystaliczne Si-m. Ogniwa monokrystaliczne wykonane są z monolitycznego krzemu, pozbawionego defektów zarówno strukturalnych, jak i punktowych, w którym zachowany jest jeden kierunek krystalograficzny w całym obszarze. Krzem taki jest, co umożliwia zastosowanie go w wielu elementach elektronicznych lub optoelektronicznych, w tym złącz p-n. Konstrukcja ogniwa krystalicznego opiera się na półprzewodnikowym złączu p-n, formowanym poprzez odpowiednie domieszkowanie w procesie dyfuzji czystego krzemu pierwiastkami o charakterze donorowym lub akceptorowym. Rodzaj

i poziomy domieszkowane wpływają znacząco na właściwości energetyczne ogniwa. Sprawność ogniw z krzemu monokrystalicznego mieści się w granicach 18–20% i jest uzależniona również od innych czynników oraz elementów konstrukcji. Najnowsze publikacje informują o uzyskaniu sprawności ogniw monokrystalicznych dochodzącej do 44%. Technologię monokrystaliczną, ze względu na jej wysoką sprawność, stosuje się zazwyczaj w niewielkich rozmiarów instalacjach PV, w celu maksymalnego uzysku mocy instalacji przy niewielkiej lub ograniczonej powierzchni montażowej. Obecnie większość produkowanych modułów monokrystalicznych posiada moc jednostkową od 100 do około 200 W.

Niewątpliwie tańszą alternatywą są ogniwa oparte na heterozłączu p-n (redukcja kosztów związana jest z mniejszym zużyciem materiałów).

Do grupy cienkowarstwowych ogniw PV zalicza się też elementy wykonane z krzemu amorficznego a-Si, których koszt wytworzenia jest obecnie jednym z najniższych. Sprawność komercyjnych modułów amorficznych sięga około 10%. Ze względu na jednolitą budowę technologia amorficzna charakteryzuje się wysoką odpornością na wstrząsy i uderzenia, znajdując zastosowanie nie tylko w klasycznych modułach PV, ale przede wszystkim w modułach mobilnych, przenośnych i elastycznych. Ogniwa amorficzne charakteryzują się dobrymi sprawnościami w świetle dyfuzyjnym, produkując prąd również w wąskim spektrum promieniowania UV w pochmurne dni bez bezpośredniego promieniowania słonecznego. Istnieją nawet amorficzne moduły PV działające w nocy, absorbujące odbite światło z powierzchni Księżyca, stosowane w morskich bojach meteorologicznych i pomiarowych. Wadą technologii amorficznej jest jej stopień degradacji, większy od technologii poli- i monokrystalicznych. Ogniwa PV wykonane z krzemu

amorficznego, ze względu na znaczną odporność na wstrząsy, są powszechnie wykorzystywane w mobilnych systemach zasilania. Amorficzne ogniwa krzemowe stosuje się w systemach zasilania łodzi, kamperów, namiotów (np. wojskowe namioty – sale operacyjne), a także, ze względu na niski koszt, w wielkoformatowych elektrowniach słonecznych.

Wybór technologii ogniw PV do hybrydowego systemu zasilania będzie zależał od jego przeznaczenia – dwa kryteria: koszt i wielkość urządzenia będą decydujące.

Ze względu na ograniczoną dostępność promieniowania słonecznego, szczególnie w miesiącach zimowych, należy uzupełnić ogniwa PV o generator wiatrowy. 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 szybkie rozkładanie 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.

Dobór wielkości instalacji PV i generatora wiatrowego należy przeprowadzić po analizie zapotrzebowania na energię elektrolizera PEM. Urządzenia te muszą z dużym prawdopodobieństwem powodzenia zapewnić wystarczającą ilość energii niezbędnej do wytworzenia niezbędnej ilości wodoru na potrzeby ogniwa PEM.

### 3.3. Zespół akumulatorów

Zespół akumulatorów pełni w hybrydowym systemie zasilania szereg istotnych funkcji:

- zapewnia ciągłe, dobrej jakości zasilanie odbiornika, nawet w przypadku znacznych zmian obciążenia (ogniwa PEM charakteryzuje ograniczona nadążność);
- zapewnia ciągłe i niezawodne źródło zasilania sterowania systemu zarówno podczas pracy, jak i rozruchu;
- umożliwia obsługę układów wodorowych bez przerywania zasilania odbiornika (np. czynności konserwacyjne

reklama

reklama

i kontrolne, dostarczanie paliwa – wymiana lub dostawienie zbiorników.

Przyjęta w założeniu systemu autonomicznego działania i uniwersalność zastosowania stawia również duże wymagania zespołowi akumulatorów. Istotne parametry, które powinny spełniać akumulatory:

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

Postawione wymagania spełniają akumulatory litowo-fosfatowe wykonane w technologii LiFePO<sub>4</sub> lub LiFeYPO<sub>4</sub>. Są one obecnie jeszcze stosunkowo drogie, jednak ze względu na szybki wzrost produkcji, dyktowany głównie zapotrzebowaniem producentów pojazdów elektrycznych, cena ich systematycznie spada. Akumulatory litowo-fosfatowe wymagają również stosunkowo wysokiej kultury obsługi, co jednak przy skomplikowaniu całego systemu hybrydowego wydaje się stosunkowo proste do zapewnienia.


### 3. Podsumowanie

Hybrydowy system zasilania może stanowić alternatywę dla konwencjonalnych źródeł energii. Charakteryzuje go znikome obciążenie dla środowiska naturalnego oraz możliwość pracy bez dostarczania paliw i materiałów pędnych. Konieczne jest jednak ciągle prowadzenie prac nad doskonaleniem ogniwi paliwowych, prowadzące do zwiększenia ich trwałości, uproszczenia obsługi oraz obniżenia kosztów wytworzenia.

### Literatura

- [1] KRISHNAN K.J., KALAM A, ZAYEGH A.: *Experimental investigation of H<sub>2</sub> generator and PEM fuel cell as a remote area back-up power.* „Procedia Engineering” 49/2012.
- [2] WILLIAMSON K.: *Fuel cell auxiliary power proving efficient for Yorkshire*

- emergency response vehicles.* „Fuel Cells Bulletin” 10/2011.
- [3] BUJŁO P., SIKORA A., PAŚCIAK G., CHMIELOWIEC J.: *Energy flow monitoring unit for Hy-IEL (PEM fuel cell-supercapacitor) electric scooter.* „Electrical Review” 3(86)/2010.
- [4] BUJŁO P., PAŚCIAK G., CHMIELOWIEC J., SIKORA A.: *Experimental Evaluation of Supercapacitor-Fuel Cell Hybrid Power Source for HY-IEL Scooter.* „Journal of Energy” 2013.
- [5] MALINOWSKI M., PAŚCIAK G., DĘBOWSKI L.: *Uninterruptible Power Supply Unit with Fuel-Cell as a Backup Energy Source and DSP-based Control System.* PCIM Europe 2011, 17–19 May 2011, Nuremberg, Germany, pp. 1181–1186.
- [6] BUJŁO P., PAŚCIAK G., CHMIELOWIEC J.: *PEM Fuel Cell-Based Unit – performance and operation characteristic.* *Proceedings of Third International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials.* APTADM 5–9, 2007.
- [7] MAZUREK W., BRYSEWSKA-MAZUREK A., ŚWIEBODA T., NAPOLSKI G.: *Wykorzystanie obiegów ORC w układach energetycznych.* „Przegląd Elektrotechniczny” 8/2013.
- [8] SZCZEPANIAK M.: *Hybrydowe źródło zasilania elektrycznego urządzeń wspomagających akcje ratownicze i ewakuację.* „Elektronika” 7/2013.
- [9] SZCZEPANIAK M.: *Mobilny, hybrydowy system zasilania wykorzystujący technologie wodorowe i źródła energii odnawialnej.* Inżynieria Wojskowa – Problemy i perspektywy, Konferencja Naukowo-Techniczna WITI 2013, Wrocław 2013.
- [10] WOJCIECHOWSKI A.: *Akumulatory litowo-fosfatowe – możliwości wykorzystania w technice wojskowej.* Inżynieria Wojskowa – Problemy i perspektywy, Konferencja Naukowo-Techniczna WITI 2013, Wrocław 2013.

 dr inż. Marcin Szczepaniak  
mgr inż. Andrzej Wojciechowski  
Wojskowy Instytut Techniki Inżynieryjnej;  
dr inż. Jacek Chmielowiec  
Instytut Elektrotechniki

artykuł recenzowany