

## Mikrosieć okrętowa dla jednostek żaglowych

---

### Streszczenie

W artykule przedstawiono koncepcję mikrosieci okrętowej DC-AC dla jednostek żaglowych integrującej kilka lokalnych generatorów energii, na które składają się: generator zespolony z napędem pomocniczym jednostki, generatory napędzane turbinami wodną i wiatrową oraz współpracujący z panelem fotowoltaicznym. Zakłada się, że projektowane rozwiązanie systemu zasilania charakteryzować się będzie wysokim stopniem automatyzacji oraz znaczną niezawodnością pracy. Autorzy rozpatrują również możliwość zastosowania w charakterze napędu pomocniczego jednostki wolnobieżnego silnika elektrycznego PMSM napędzającego pędniki (śruby okrętowe) pracujące w układzie przeciwbieżnym. W artykule przedstawiono strukturę sieci oraz scharakteryzowano niektóre rozwiązania szczegółowe zastosowane dla jej realizacji. Rozważono także aspekty ekonomiczne proponowanego rozwiązania.

### Wprowadzenie

Wszystkie większe jednostki pływające wymagają posiadania elektrycznej sieci okrętowej służącej zasilaniu urządzeń wykorzystywanych do realizacji różnorodnych zadań, tj.: nawigowania i sterowania jednostką, realizacja napędu (pomocniczego) czy też funkcji związanych z utrzymaniem życia codziennego załogi. Szczególnym typem jednostek pływających są te, które wykorzystują energię wiatru, służą żeglownianiu. Specyfika realizacji zasilania sieci elektrycznej

polega tutaj na wykorzystaniu pokładowej baterii akumulatorów ładowanej w czasie działania napędu pomocniczego jednostki – np. silnika spalinowego, z którym zespolona jest określonego typu prądnica (np. w przypadku mniejszej wymaganej mocy – alternator). Istnieją wprawdzie rozwiązania wspomagające proces ładowania baterii [Soto, Seijo, i in. 2010] w czasie nie działania napędu pomocniczego w postaci minigeneratorów wiatrowych lub bazujących na fotowoltaice lecz rzadkością są rozwiązania umożliwiające wykorzystanie do ładowania baterii jednocześnie wszystkich aktualnie dostępnych na akwenach wodnych tzw. odnawialnych źródeł energii (OZE) – wiatru, promieniowania słonecznego i wody (w czasie ruchu jednostki).

Przedmiotem artykułu jest mikrosieć okrętowa bazująca na aktualnie dostępnych OZE oraz dodatkowym generatorem elektrycznym sprzężonym z silnikiem napędowym jednostki. Energia magazynowana jest następnie w lokalnej baterii akumulatorów i wykorzystywana do zasilania odbiorników. Okrętowa sieć prądu stałego rozszerzona jest o 1- lub 3-fazową (ew. specjalną) sieć prądu przemiennego. Rozpatruje się również zastosowanie w jednostce, jako napędu pomocniczego, silnika elektrycznego. Zarządzanie pracą poszczególnych elementów systemu zintegrowane jest w centralnym module sterowania.

Należy zaznaczyć, że opisywany system umożliwia optymalne wykorzystanie źródeł OZE w danym punkcie pracy w zależności od dostępności danego typu energii (czynnik zależny m.in. od strefy klimatycznej). W konsekwencji maksymalizujemy sprawność całej

instalacji. Cały proces jest oczywiście zautomatyzowany i przebiega bez ingerencji członków załogi. Jest to niezwykle istotny aspekt z punktu widzenia efektywności przy poniesionych nakładach inwestycyjnych. Ponadto użytkownik końcowy ma możliwość konfiguracji (na etapie budowy bądź modernizacji systemu) udziału procentowego zainstalowanej mocy poszczególnych urządzeń pośredniczących w przetwarzaniu energii pozyskiwanej z danego typu OZE. W ten sposób uzyskujemy znaczny stopień uniwersalności, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów, a także zwiększamy pewność zasilania urządzeń instalowanych na pokładzie jednostki pływającej.

Omawiane rozwiązanie jest przedmiotem prac prowadzonych w Zakładzie Energoelektroniki i Sterowania Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej.

### Struktura sieci

W odniesieniu do struktury sieci autory rozpatrują dwa główne warianty jej rozwiązań – zależne od typu napędu pomocniczego jednostki w postaci:

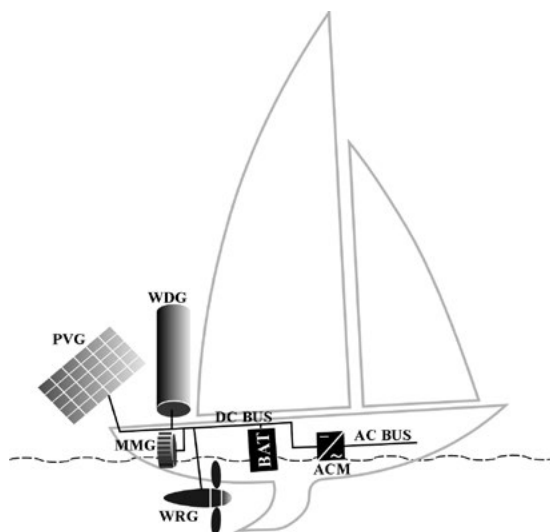
- a) silnika spalinowego – rozwiązanie stosowane dominująco na jednostkach pływających,
- b) silnika elektrycznego – rozwiązanie jeszcze stosunkowo rzadko spotykane [Krystkowiak, Gulczyński 2014a; Krystkowiak, Gulczyński 2014b].

W odniesieniu do podpunktu a) na całkowitą strukturę sieci składają się następujące elementy (Rys. 1.):

- sieć prądu stałego (DC BUS) – sprzęgająca wszystkie elementy systemu generujące energię elektryczną,

- moduł generatora (MMG) sprzężonego z silnikiem napędowym jednostki,
- moduł generatora (WDG) sprzężonego z turbiną powietrzną przy czym preferowane jest rozwiązanie turbiny z pionowym wirnikiem,
- moduł generatora (WRG) sprzężonego z turbiną wodną [Krystkowiak, Gulczyński 2014a; Krystkowiak, Gulczyński 2014b; Żagle.com],
- moduł fotowoltaiczny (PVG),
- bateria akumulatorów (BAT) – opcjonalnie uzupełniona o superkondensator,
- moduł przekształtnika (ACM) dla realizacji sieci prądu przemiennego (AC BUS).

Rys.1. Poglądowe rozmieszczenie poszczególnych elementów sieci elektrycznej na jednostce żaglowej.



Źródło: opracowanie własne.

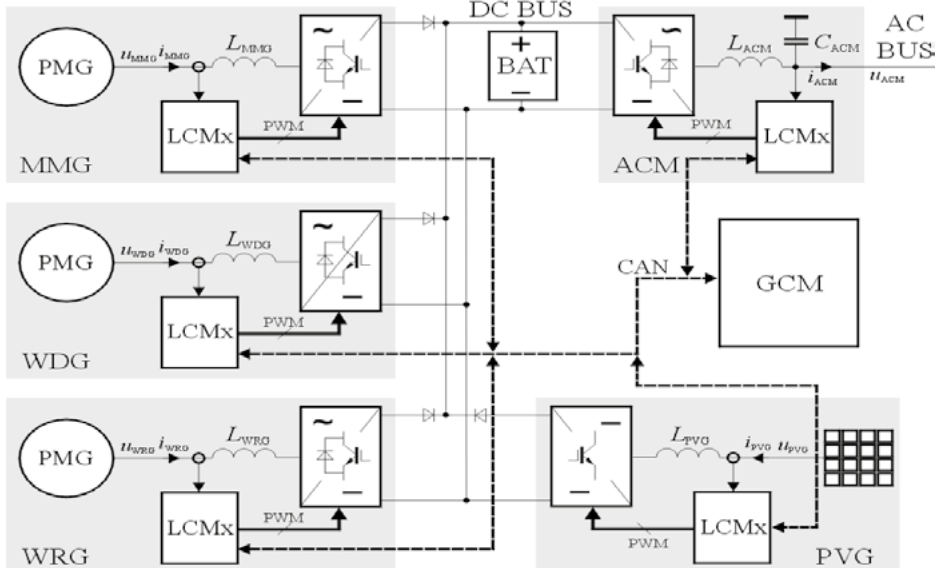
W przypadku rozwiązania podanego w p. b) silnik napędowy pełni – w czasie żeglowania – rolę generatora, realizując funkcję bloku MMG. W czasie wykorzystywania do napędu jednostki silnika jego źródłem energii staje się bateria akumulatorów. W przypadku mniejszych jednostek (np. jachtów pełnomorskich typu zbliżonego do Bavaria Cruiser 56 [Bavariayachts.com] sieć prądu przemiennego realizowana jest, jako 1-fazowa (230 V/ 50 Hz), a w przypadku jednostek większych, jako 3-fazowa ew. przybrać ona może jeszcze inną złożoną formę.

Rozwiązania szczegółowe zastosowane do realizacji sieci

Ogólny schemat blokowy sieci pokazano na rys. 2. Poszczególne bloki

odpowiadają funkcjonalnie elementom wymienionym w rozdziale poprzednim. W blokach MMG, WDG i WRG w roli generatorów zastosowano maszyny typu permanent magnet [Hu, Jiaotong, i in. 2008; Blogspot; Komel]. Zastosowanie tych maszyn podyktowane jest nie tylko ich właściwościami elektrycznymi, ale również i aspektem ekonomicznym (rozwiązanie stosunkowo bezawaryjne, niewymagające skomplikowanych czynności konserwacyjno-serwisowych, duża sprawność przy odpowiednim sterowaniu). Ich wykonanie (ACM, DCM) zależy m.in. od projektowanej mocy wyjściowej bloku. Wszystkie bloki posiadają lokalne sprzężenia zwrotne od określonej wielkości wyjściowej bloku (tj. prądu lub napięcia).

Rys. 2. Schemat blokowy sieci.



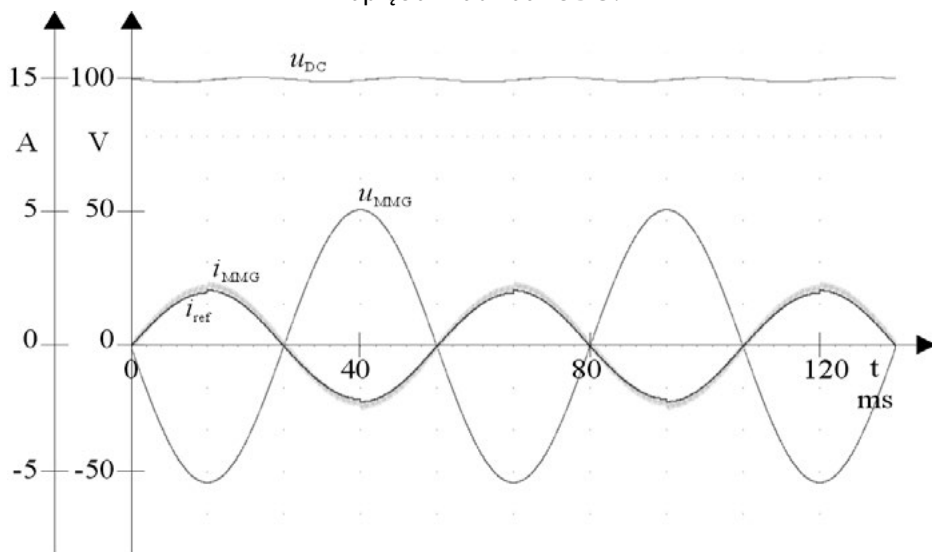
Źródło: opracowanie własne.

Sposób sterowania przekształtnikami w blokach MMG, WDG, WRG i PVG jest tego typu, że realizują one funkcję sterowanych źródeł prądu [Rudnicki, Czerwieński i Fryc 2011]. Przekształtniki w blokach MMG, WDG, WRG w przypadku zastosowania maszyny PMG w wykonaniu ACM są prostownikami aktywnymi.

liwia zwiększenie sprawności generatorów. W konsekwencji przy poniesionych nakładach finansowych pozyskujemy większą moc (ograniczenie strat w maszynie).

Do współpracy z panelem solarnym służy przetwornica DC/DC typu boost, pracująca w konfiguracji interleaved converter. Wyjścia poszczególnych bloków

Rys. 3. Przebiegi sygnałów w modelu symulacyjnym bloku MMG w postaci: prądu odniesienia, prądu fazowego, napięcia generatora i napięcia w obwodzie DC.



Źródło: opracowanie własne.

Na rys. 3 pokazano wybrane wyniki badań symulacyjnych bloku MMG w postaci przebiegów charakterystycznych prądów i napięć. Implementacja rozwiązań (m.in. w cyfrowym układzie sterowania) umożliwiających uzyskanie sygnałów prądowych maszyn ACM możliwie dobrze zbliżonych do przebiegów sinusoidalnych (sygnałów o niskiej zawartości niepożądanych harmonicznym) umożli-

dołączone są, poprzez indywidualne diody, do wspólnej szyny (dodatniej) obwodu DC. Przekształtnik zastosowany w bloku ACM realizuje funkcję sterowanego źródła napięcia [Gwóźdź 2012] o quasi-sinusoidalnym napięciu wyjściowym. Wszystkie przekształtniki pracują w trybie PWM. W przypadku większych jednostek przewiduje się zastosowanie modułu PV z automatycznym

pozycjonowaniem wobec źródła energii promienistej – słońca.

Poszczególne bloki posiadają lokalne moduły sterowania (LCMx) przekształtnikami znajdującymi się w danym bloku. Globalny moduł sterowania i nadzoru (GCM) realizuje funkcje nadrzędnego algorytmu sterowania poszczególnymi blokami systemu, wykorzystując (zasadniczo) różne warianty algorytmów MPPT [Krystkowiak, Gulczyński 2014a; Krystkowiak, Gulczyński 2014b; Texas Instruments]. Blok ten realizuje również funkcję sterowania procesem ładowania baterii akumulatorów.

Wymiana danych pomiędzy blokami LCMx, a modułem GCM odbywa się poprzez sieć CAN.

## Zastosowanie napędu elektrycznego

Intensywny w ostatnich latach rozwój technologii morskich, wykorzystywanie nowych materiałów oraz coraz ostrzejsze kryteria dotyczące ochrony środowiska – zwłaszcza na mniejszych i zamkniętych akwenach wodnych (tzw. strefy ciszy) – narzucają konieczność zastępowania klasycznych napędów spalinowych napędami elektrycznymi. Mają one istotną zaletę polegającą na posiadaniu dużo większej sprawności energetycznej od napędów spalinowych. Barię w ich rozpowszechnianiu są natomiast jeszcze stosunkowo ograniczone pojemności zasobników energii elektrycznej jakkolwiek, od wielu lat uwidacznia się i tutaj znaczący postęp techniczno-technologiczny, zmniejszający wagę tej niewątpliwiej niedogodności napędu elektrycznego. Przekłada się to bezpośrednio na obniżenie nakładów finansowych (wdra-

żane nowe technologie wytwarzania akumulatorów i superkondensatorów umożliwiają obniżenie kosztów produkcyjnych).

Skrajnym przykładem ultranowoczesnego rozwiązania jednostki pływającej z napędem elektrycznym i zasilaniem bazującym na OZE, jakkolwiek nie posiadającej napędu żaglowego, może być MS *Tûranor PlanetSolar* – jeden z największych na świecie katamaranów z zasilaniem fotowoltaicznym (Rys. 4.) [Designboom], który zaprojektowano na Nowej Zelandii. Wyposażono go w 38 tysięcy ogniw słonecznych, których łączna powierzchnia wynosi 537 metrów kwadratowych. Produkowana przez nie energia zasila cztery silniki elektryczne, dzięki którym katamaran może uzyskać prędkość do 14 węzłów (ok. 26 km/h). Prędkość marszowa wynosi 7,5 węzła (ok. 14 km/h). Przykład ten pokazuje ogromne możliwości niekonwencjonalnego zasilania i napędu jednostek pływających.

Obecnie (2014) MS *Tûranor PlanetSolar* użytkowany jest przez Uniwersytet w Genewie, jako pływające laboratorium badań morskich.

Zakres prowadzonych przez autorów artykułu prac przewiduje zastosowanie do realizacji napędu pomocniczego jednostki żaglowej mającego wiele zalet 3-fazowego wolnoobrotowego silnika elektrycznego typu PMSM z (quasi-)sinusoidalnym przebiegiem sem. (np. [Rudnicki, Czerwieński i Fryc 2011]).

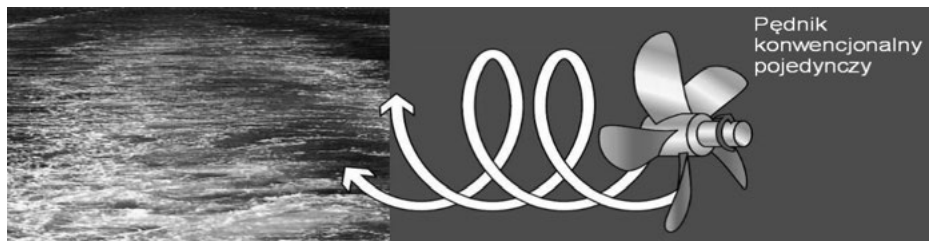
Rys.4. MS Taranor PlanetSolar.



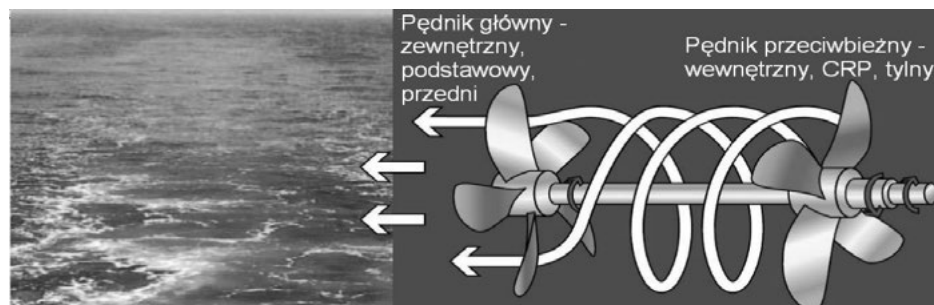
Źródło: Designboom, <http://www.designboom.com/technology/ms-turanor-planet-solar-worlds-largest-solar-powered-boat/>.

Rys. 5. Ilustracja zasady działania napędu konwencjonalnego (Rys. a) oraz jednego z możliwych rozwiązań napędu ze śrubami w układzie przeciwbieżnym (Rys. b).

a)



b)



Źródło: opracowanie własne.

Zalety te okupione są, co prawda, dużą złożonością algorytmu sterowania (np. [Genduso, Miceli, i in. 2010]) jednak, przy zastosowaniu wydajnego obliczeniowo układu sterującego dedykowanego ponadto aplikacjom w energoelektronice (np. [Analog Devices Inc. Blackfin]), nie stanowi to istotnego problemu technicznego ani ekonomicznego.

Docelowo przewiduje się również badania napędu w wersji z pędnikami (śrubami) pracującymi przeciwbieżnie. Przykład rozwiązania napędu tego typu pokazano na rys. 5 b).

Daje ono m.in. wzrost sprawności mechanicznej, mniejsze negatywne oddziaływanie na środowisko wodne oraz stabilniejszy bieg jednostki pływającej – zwłaszcza o mniejszej wyporności.

#### Realizacja praktyczna sieci

Trwające obecnie prace studyjne dotyczą rozwiązań sieci okrętowej przy zastosowaniu maszyn elektrycznych typu permanent magnet zarówno w wykonaniu AC (3-fazowym), jak i DC [Hu, Jiaotong, Xian, i in. 2008; Blogspot]. Zakładana całkowita sumaryczna moc generatorów w wersji prototypowej sieci jest rzędu 1÷2 kW. Napięcie nominalne baterii akumulatorów wynosi 96 V. Jakkolwiek podane wartości nominalne parametrów sieci są, z konieczności, ograniczone to jednak przewiduje się, że zaprezentowana idea sieci może być rozszerzona na różne warianty jej realizacji (związane głównie z wielkością jednostki pływającej i niezbędną mocą jej zasilania). W tym kontekście pewne rozwiązania elementów projektowanej sieci – zastosowane w trakcie badań laboratoryjnych jej prototypu – mogą być nadmiarowe, np. w sto-

sunku do aktualnych mocy odbiorników.

Realizacja lokalnych układów sterowania (LCMx) bazuje na nowoczesnych procesorach Analog Devices Inc. rodziny Blackfin® ADSP-BF504F [Analog Devices Inc. Blackfin] do zastosowań w m.in. energoelektronice. Moduł główny wykorzystuje komputer przemysłowy typu PC w wersji mini-ITX z kartą rozszerzeń funkcjonalnych w standardzie PCIe również z procesorem Blackfin.

Podstawowy wariant wykonania części silnoprądowej przewiduje zastosowanie modułów IPM IGBT MITSUBISHI ELECTRIC, a wariant docelowy – hybrydowych modułów Z-IPM [Z-IPM, Preliminary Technical Note, ALFINE-TIM] opartych na technologii SiC firmy CREE. Moduły te – przeznaczone do zastosowań w układach badawczo-rozwojowych i specjalnego przeznaczenia – zaprojektowano w firmie ALFINE-TIM. Zakłada się, że ich zastosowanie pozwoli podnieść sprawność, zmniejszyć gabaryty i poprawić niezawodność pracy części silnoprądowej bloków.

#### Podsumowanie

Zaproponowane rozwiązanie mikro-sieci okrętowej dla jednostek żaglowych pozwala na optymalne wykorzystanie dostępnych na akwenach wodnych odnawialnych źródeł energii. Dzięki temu rośnie efektywność zaopatrywania w energię jednostki, co zwiększa jej niezależność tak od lokalnych warunków meteorologicznych, jak i minimalizuje zużycie paliwa związane z koniecznością zasilania generatora zespolonegoz pomocniczym napędem spalinowym. Implementacja opisywanego

rozwiązania jest uzasadniona ekonomicznie zwłaszcza w przypadku większych jednostek pływających. Zapewnia nie tylko pewność zasilania przy danym punkcie pracy systemu, ale także i duży stopień uniwersalności.

Kolejnym krokiem ku minimalizacji niekorzystnego oddziaływania jednostki na lokalne środowisko (emisja spalin, hałas) jest zastosowanie do realizacji napędu pomocniczego silnika elektrycznego. Pozwala on na zwiększenie komfortu podróżowania jednostką i jej eksploatacji – zwłaszcza na małych akwenach wodnych. Dodatkowo, wykorzystanie pędników (śrub) w nietypowej konfiguracji pracy, tj. pracujących przeciwbieżnie umożliwi dalszą poprawę określonych parametrów jednostki.

#### Bibliografia:

Genduso, F., Miceli, R., Rando, C., Galluzzo, G.R., 2010, Back EMF Sensorless Control Algorithm for High Dynamic Performance PMSM, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.57, No. 6, p. 2092-2100.

Gwóźdź, M., 2012, Power Electronics Wide Band Controlled Current and Voltage Sources Based on Multi-channel Inverters, (in polish), Przegląd Elektrotechniczny, No 10A, p.132-134.

Hu, W., Jiaotong, X., Xian, Y. W., Song, X., Wang, Z., 2008, Development of wind turbine simulator for wind energy conversion systems based on permanent magnet synchronous motor, Electrical Machines and Systems, ICEMS, p. 2322-2326.

Krystkowiak, M., Gulczyński, A., 2014a, Budowa oraz algorytm sterowania przekształtnika energoelektronicznego zaimplementowanego w niekonwencjonalnym systemie mini elektrowni wodnej dedykowanej dla jednostek jachtowych, Poznan University of Technology Academic Journals, Issue 80, s. 27-34.

Krystkowiak, M., Gulczyński, A., 2014b,

Budowa i zasada działania modelu eksperymentalnego mini elektrowni wodnej dedykowanej dla jednostek jachtowych, Postępy w Elektrotechnice Stosowanej PES-9.

Rudnicki, T., Czerwieński, R., Fryc, A., 2011, Układy sterowania silnikiem PMSM, KOMEL: Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 90, s. 51-55.

Spagnolo, G. S., Papalillo, D., Martocchia, A., Makary, G., 2012, Solar-Electric Boat, Journal of Transportation Technologies, No 2, p. 144-149: <http://dx.doi.org/10.4236/jtts.2012.22015> [dostęp: 05.2014.].

Soto, J. L. F., Seijo, R. G., Formoso, J. A., Iglesias, G., Couce, L. C., 2010, Alternative Sources of Energy in Shipping, Journal of Navigation, Vol. 63, No. 1-2, p. 435-448, doi:10.1017/S0373463310000111 [Dostęp: 05.2014.].

Szymczak, P., Barański, J., Wawrowicz, M., Prajzendanc, P., 2014, Wybrane rozwiązania energooszczędnych napędów do obiektów nawodnych i podwodnych, Materiały VIII Konferencji Naukowo-Technicznej – i-MITEL, Lubniewice, [Dostęp: 09. - 11. 04. 2014.].

Blogspot, <http://all-renewable-energy.blogspot.com/2010/02/pmsmbldc-as-generators-in-renewable.html> [Dostęp: 05.2014.].

Bavariayachts.com, <http://www.bavariayachts.com/bavaria-cruiser-56.php> [Dostęp: 05.2014.].

Designboom, <http://www.designboom.com/technology/ms-turanor-planet-solar-worlds-largest-solar-powered-boat/> [Dostęp: 05.2014.].

Komel, <http://www.komel.katowice.pl/pdf/instrukcja%20JSW.pdf> [dostęp: 05.2014.].

Żagle.com [http://www.zagle.com.pl/wydarzenia/nagrody-gwozdzie-targow-wiatr-i-woda-2014-pryznane,1\\_12338.html](http://www.zagle.com.pl/wydarzenia/nagrody-gwozdzie-targow-wiatr-i-woda-2014-pryznane,1_12338.html) [Dostęp: 06.2014.].

Texas Instruments, <http://www.ti.com/lit/an/slva446/slva446.pdf> [Dostęp: 05.2014.].

Analog Devices Inc. Blackfin® processors: <http://www.analog.com/en/processors-dsp/blackfin/products/index.html> [Dostęp: 05.2014.].



Z-IPM, Preliminary Technical Note, ALFINE-TIM, <http://analog.alfine.pl/oferta/produkty-alfine> [Dostęp: 05.2014].

Autorzy:

Dr hab. inż. Michał Gwóźdź

Zakład Energoelektroniki i Sterowania,  
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki  
Przemysłowej, Wydział Elektryczny, Poli-  
technika Poznańska, adiunkt;

Dr inż. Michał Krystkowiak

Zakład Energoelektroniki i Sterowania,  
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki  
Przemysłowej, Wydział Elektryczny, Poli-  
technika Poznańska, adiunkt;

Mgr inż. Adam Gulczyński – Zakład  
Energoelektroniki i Sterowania, Instytut  
Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej,  
Wydział Elektryczny, Politechnika  
Poznańska, asystent.

## OPEN ACCESS

Bezpłatne książki naukowe dla Czytelników dostępne w formie OPEN ACCESS ONLINE [www.wydawnictwoivg.pl](http://www.wydawnictwoivg.pl).

Tytuł książki:

Funkcjonowanie Regionalnego Systemu Innowacji w Województwie Zachodniopomorskim - Analizy i Prognozy

Autorzy: Dr hab. Arkadiusz Świadek  
prof. UZ, Dr Barbara Czerniachowicz,  
Dr Katarzyna Szopik-Depczyńska,  
Dr Marek Tomaszewski

Tytuł książki:

Rachunkowość i finanse w podmiotach gospodarczych

Autorzy: Mgr Agnieszka Kuś,  
Mgr inż. Stanisław Lewiński vel Iwański,  
Mgr Tomasz Szemraj, Mgr Rafał Rydzak

## IV KONFERENCJA NAUKOWA

**“Gospodarka Światowa i Krajowa  
jej wyzwania we współczesnych czasach”**

**w dniach 24-26 października  
2014 roku w Szczecinie**

**[www.naukowa.konferencja.org](http://www.naukowa.konferencja.org)**

**Konferencja adresowana jest przede wszystkim do przedstawicieli świata naukowego oraz praktyków różnych dziedzin biznesu zajmujących się aspektami gospodarki światowej i krajowej. Celem Konferencji jest utworzenie interdyscyplinarnej przestrzeni współpracy i wymiany doświadczeń praktyków życia gospodarczego z przedstawicielami nauki reprezentującymi różne dyscypliny naukowe, a także wykazanie konieczności ciągłej współpracy świata praktyki gospodarczej i świata nauki. Podczas konferencji odbędzie się prezentacja wyników badań naukowych, otwarte panele dyskusyjne, prezentacja przedsiębiorstw.**

**Zgłoszenia udziału**

**[biuro@wydawnictwoivg.pl](mailto:biuro@wydawnictwoivg.pl)**