

# Metoda pomiarów parametrów orientowanego ogniwa słonecznego

Janusz Teneta, Mieczysław Zaczyk, Krzysztof Oprzędkiewicz,  
Łukasz Więckowski, Witold Głowacz

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Katedra Automatyki

**Streszczenie:** W pracy omówiono metodę pomiaru parametrów opisujących dynamikę i zużycia energii podczas sterowania doświadczalnego, orientowanego ogniwa słonecznego. Omówiono zasady konstrukcji systemu pomiarowego i metodykę badań z użyciem oprogramowania dSPACE i środowiska MATLAB/Simulink oraz sformułowano wnioski dotyczące wykorzystania wyników badań podczas budowy modeli matematycznych rozważanego systemu.

**Słowa kluczowe:** orientowane ogniwa słoneczne, systemy pomiarowe, dSPACE

## 1. Uwagi wstępne

Podczas syntezy układu sterowania dla dowolnego systemu dynamicznego kluczowym zagadnieniem jest znajomość modelu matematycznego opisującego cechy obiektu istotne z punktu widzenia sterowania. W przypadku zespołu autonomicznych, orientowanych ogniw słonecznych modele matematyczne powinny opisywać nie tylko dynamikę obiektu, lecz również zużycie energii podczas realizacji sterowania. Należy się także spodziewać, że parametry tych modeli będą zależne od wielu czynników – częściowo losowych (np. warunki atmosferyczne), a częściowo trudnych do opisu i bardzo komplikujących model (np. nieliniowości wynikające z konstrukcji części ruchomej ogniwa).

Należy dodać, że prezentowane zagadnienia nie są zbyt często omawiane w literaturze. Jako przykłady zbliżonej tematyki można podać pozycje [4, 10]. W pracy zostaną omówione następujące zagadnienia:

- konstrukcja rozważanego układu ogniw,
- układ pomiarowy,
- wyniki pomiarów i ich interpretacja,
- podsumowanie i zarys dalszych badań rozważanej problematyki.

## 2. Konstrukcja układu ogniw

Omawiany system fotowoltaiczny powstał w Laboratorium Automatyki, Robotyki i Systemów Fotowoltaicznych w 2006 r. jako praca magisterska [1]. Determinowało to zastosowane w nim rozwiązania techniczne ograniczone możliwościami warsztatowymi AGH. Jego widok przedstawiono na rys. 1, natomiast uproszczony schemat konstrukcyjny na rys. 2. Jest to dwuosiowy układ nadążny, pozwalający na ustawianie modułów fotowoltaicznych prostopadle do padających promieni słonecznych niezależnie od pory dnia przez cały rok.

Zakresy ruchu w osiach azymutu i elewacji pozwalają na pełne śledzenie pozornego ruchu Słońca po nieboskłonie dla położenia geograficznego Krakowa. Do zmiany położenia w osi azymutu (obrót wschód-zachód) wykorzystano silnik prądu stałego o mocy ok. 20 W, sprzężony z przekładnią ślimakową. Przekładnia redukuje obroty silnika, zapewniając odpowiedni moment obrotowy oraz gwarantuje samohamowność i odpowiednią wytrzymałość statyczną w osi azymutu. Silnik wyposażono w prosty enkoder zapewniający odczyt pozycji z dokładnością ok.  $0,15^\circ$ .



**Rys. 1.** Orientowany system ogniw używany podczas badań  
**Fig. 1.** The oriented PV system applied during the tests

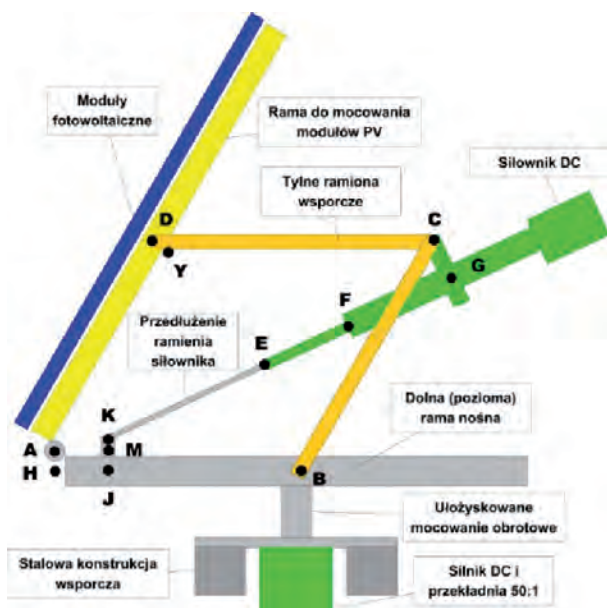
Za zmianę kąta elewacji modułów PV (pochylenie – ruch góra/dół) odpowiada siłownik elektryczny zasilany napięciem stałym 28 V i mocy ok. 60 W. Maksymalny wysuw ramienia siłownika to 18" (45,7 cm). Wbudowany enkoder dostarcza 48 impulsów na każdy cal ruchu siłownika. Siłownik umieszczony jest na przekątnej rombu utworzonego przez tylne ramiona wsporcze, ramę do montażu modułów i dolną ramę nośną. Takie umieszczenie siłownika zabezpiecza go przed niebezpieczeństwem wybooczenia, ponieważ cały czas działają na niego wyłącznie siły rozciągające. Niestety, rozwiązanie to powoduje również nieliniową zależność między wysuwem siłownika a kątem pochylenia (elewacji) modułów PV. Ponieważ pomiar pozycji w obu osiach odbywa się z użyciem impulsatorów, a nie enkoderów, dlatego przed przeprowadzaniem testów pomiarowych (oraz cyklicznie w czasie normalnej pracy) należy przeprowadzać pozycjonowanie układu, wykorzystując wyłączniki krańcowe. Są one umieszczone w stałych miejscach, definiując zakres obrotu w każdej osi.

Kąt azymutu  $\alpha$  jest opisany prostym liniowym wzorem:

$$\alpha = \text{Imp} * \text{const}_{AZ} \quad (1)$$

gdzie: Imp – liczba impulsów z silnika,  $\text{const}_{AZ}$  – stała wyliczona eksperymentalnie.

W przypadku kąta elewacji znalezienie zależności matematycznej wymaga szczegółowej analizy konstrukcji mechanicznej. Analiza ta jest zbyt obszerna, aby szczegółowo ją tu prezentować, dlatego poniżej przedstawiono tylko jej założenia oraz otrzymany wzór końcowy.



Rys. 2. Uproszczony schemat konstrukcyjny rozważanego systemu PV

Fig. 2. The simplified construction scheme of considered PV system

Opis poszczególnych punktów konstrukcyjnych:

- A – oś obrotu rama do montażu modułów PV względem dolnej rama nośnej,
- B – obrotowe mocowanie ramion wsporczych do dolnej rama nośnej,
- C – obrotowe połączenie ramion wsporczych z mocowaniem silownika,
- D – obrotowe połączenie ramion wsporczych z ramą do montażu modułów PV,
- E – koniec ramienia silownika,
- F – koniec obudowy silownika,
- K – zaczepienie ramienia silownika (wraz ze sztywną przedłużką) do rama nośnej,
- G, H, M, J, Y – punkty otrzymane w wyniku rzutowania wymienionych wcześniej punktów konstrukcyjnych na różne płaszczyzny; punkty te są niezbędne przy precyzyjnej analizie zależności kąta elewacji od wysuwu silownika.

Znalezienie kąta pochylenia modułów fotowoltaicznych względem płaszczyzny horyzontalnej sprowadza się do obliczenia wartości kąta  $MAY = \beta$ . Kąt ten można obliczyć odejmując od kąta  $BAD$  wartości kątów  $DAY$  oraz  $ABH$ . Ze względu na sztywność konstrukcji jedynym zmieniającym się podczas pracy silownika wymiarem będzie długość odcinka  $EF$ . Dodatkową trudność sprawia fakt, iż ze względu na konstrukcyjne oś silownika nie pokrywa się z przekątną rombu. Wzór końcowy otrzymano stosując wzór cosinusów do wielu elementarnych trójkątów wyznaczanych przez punkty konstrukcyjne. Dwuliterowe skróty oznaczają długości poszczególnych odcinków.

Kąt elewacji  $\beta$  można w dużym przybliżeniu wyliczyć ze wzoru:

$$\beta = a \cos \left[ \frac{AB^2 - BC^2 + \left( \sqrt{CG^2 + (KE + FG + EF)^2} + \sqrt{AM^2 + KM^2} \right)^2}{2 * AB * \left( \sqrt{CG^2 + (KE + FG + EF)^2} + \sqrt{AM^2 + KM^2} \right)} \right] + a \cos \left[ \frac{AD^2 - DC^2 + \left( \sqrt{CG^2 + (KE + FG + EF)^2} + \sqrt{AM^2 + KM^2} \right)^2}{2 * AD * \left( \sqrt{CG^2 + (KE + FG + EF)^2} + \sqrt{AM^2 + KM^2} \right)} \right] - \arcsin \left( \frac{DY}{AD} \right) - a \sin \left( \frac{AH}{AB} \right) \quad (2)$$

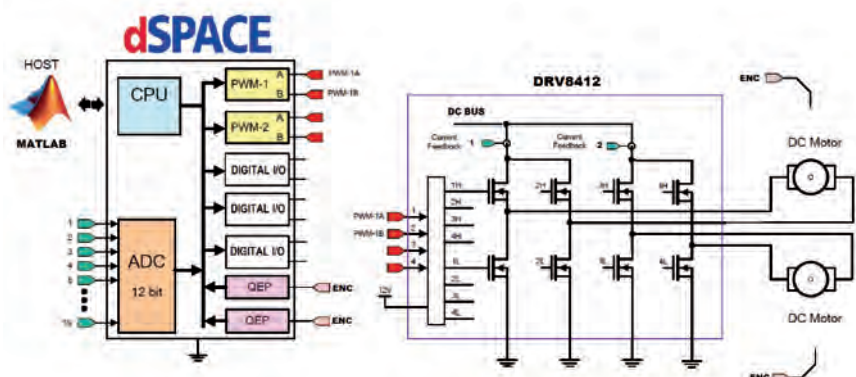
gdzie:  $EF = 25 + (\text{Imp}_{\text{elev}} * 0,529)$ ,

$\text{Imp}_{\text{elev}}$  – liczba impulsów z enkodera.

## 2. Sprzętowa realizacja sterowania i pomiarów

W celu bezpiecznego przeprowadzania eksperymentów zaprojektowano i wykonano specjalną końcówkę mocy pozwalającą na sterowanie silnikami bezpośrednio z systemu dSPACE. Uproszczony schemat układów elektronicznych pokazano na rys. 3.

Silnik i siłownik zasilane są w układzie mostków tranzystorowych. Kierunek obrotów wybierany jest sygnałami dyskretnymi, natomiast prędkość obrotów regulowana jest sygnałem PWM. Prądy płynące przez silnik i siłownik mierzone są za pomocą precyzyjnych rezystorów mocy, a następnie odpowiednio wzmacniane. W celu zabezpie-



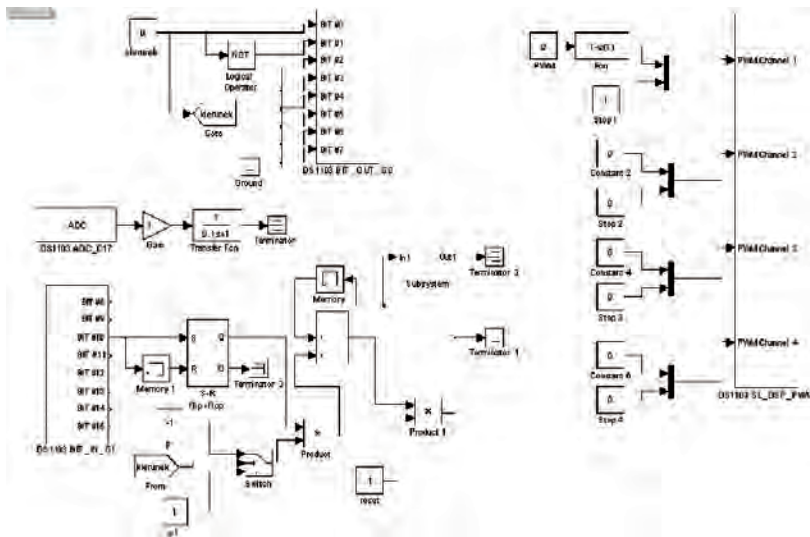
Rys. 3. Uproszczony schemat elektryczny układu pomiarowego i sterującego

Fig. 3. The simplified electric scheme of measuring and control system

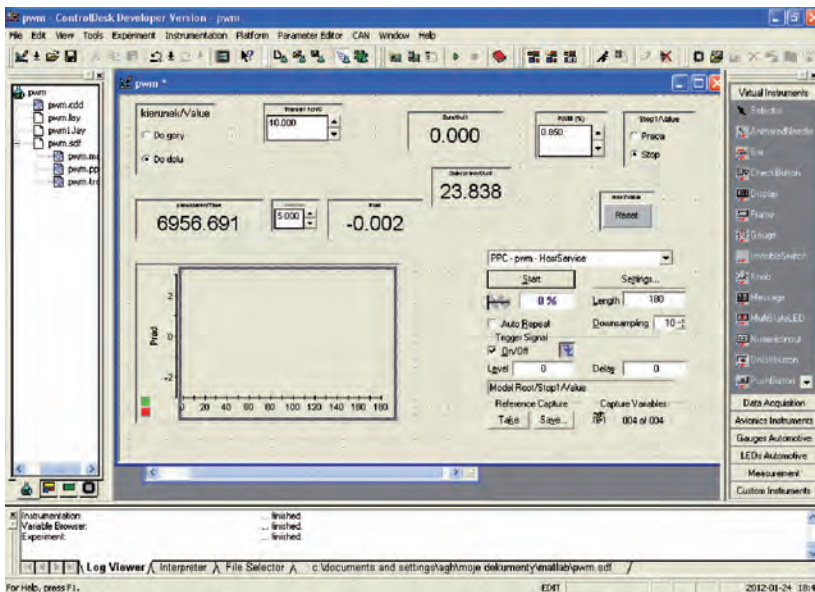
czenia karty dSPACE wszystkie sygnały sterujące (dyskretne) jak i pomiarowe (dyskretne i analogowe) mają optyzowaną izolację.

#### 4. Układ pomiarowy i metodyka pomiarów

Do realizacji pomiarów wykorzystano środowisko do szybkiego prototypowania, obejmujące kartę DS1103 systemu dSPACE [2] oraz oprogramowanie MATLAB/Simulink. Układ pomiarowy, zrealizowany jako schemat blokowy w Simulink, przedstawiono na rys. 4. Za pomocą narzędzia do automatycznego generowania kodu (Real-Time Interface) ze schematu blokowego układu, wygenerowana została aplikacja czasu rzeczywistego uruchamiana na karcie DS1103 z zadanyim okresem próbkowania.



Rys. 4. Schemat blokowy aplikacji w Simulink  
Fig. 4. The block diagram of the Simulink application



Rys. 5. Interfejs użytkownika systemu pomiarowego  
Fig. 5. The user interface of measuring system

Sygnał sterujący (PWM o zadawanym współczynniku wypełnienia) dla napędów układu jest generowany z wykorzystaniem bloku DS1103 SL\_DSP\_PWM.

Sygnał ten, poprzez zrealizowany układ mocy, podawany jest do napędów.

Kierunek obrotów ustalany jest na wyjściu cyfrowego bloku DS1103 BIT\_OUT\_GO. Z impulsatorów umieszczonych na wałach silników pobierana jest informacja o kącie obrotu. Zliczona liczba impulsów (wejścia cyfrowe bloku DS1103 BIT\_IN\_G1) jest przeliczana na kąt obrotu – zależności (1) i (2) zaimplementowane w bloku *Subsystem*.

Pomiar prądu realizowany jest w bloku przetwornika DS1103 ADC\_C17.

Wygenerowana aplikacja była uruchamiana z okresem próbkowania 0,0001 s.

Interfejs użytkownika (rys. 5), zrealizowany z wykorzystaniem oprogramowania ControlDesk [3], pozwala na sterowanie działaniem aplikacji w czasie rzeczywistym, wyświetlanie i rejestrowanie przebiegów.

#### 5. Wyniki pomiarów i ich interpretacja

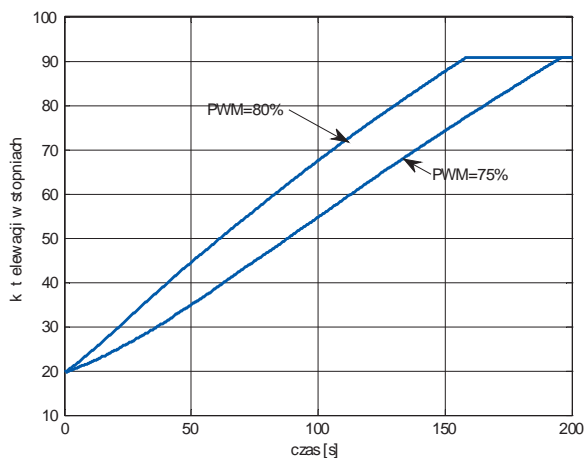
System pomiarowy opisany w poprzednim punkcie został wykorzystany do realizacji wielu eksperymentów identyfikacyjnych dla obu osi ruchu rozważanego zespołu ogniw, spośród których zostaną dokładniej omówione następujące:

- wyznaczenie odpowiedzi składowej przy różnych amplitudach sygnału wejściowego,
- wyznaczenie zużycia energii podczas przejścia ogniwa z jednego skrajnego położenia w drugie.

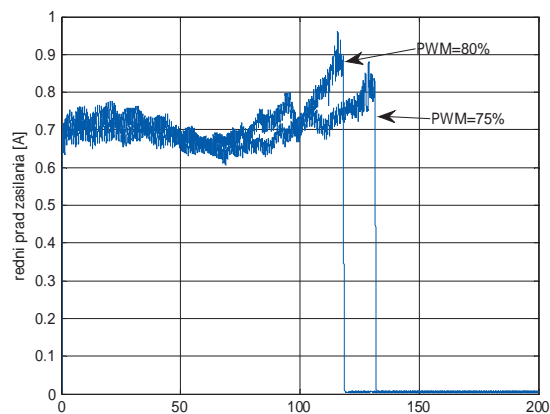
Obydwa eksperymenty zostały wykonane dla ruchów obu osi w obu kierunkach: dla ruchów w górę i w dół – dla sterowania kątem elewacji ogniwa oraz w prawo i w lewo – w przypadku sterowania kątem azymutu.

##### Kąt elewacji

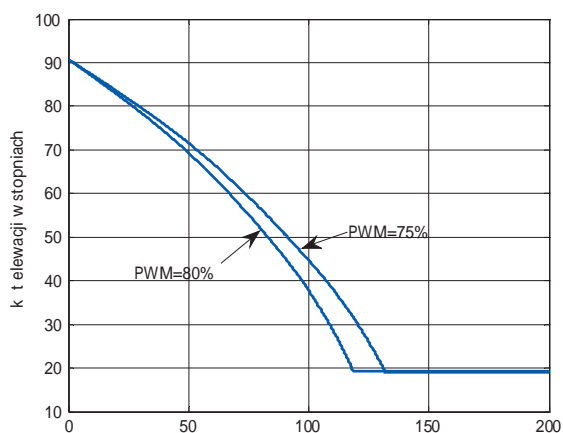
Wyniki pomiarów dla kąta elewacji są przedstawione na rys. 6, 7, 8 i 9. Podczas wykonywania wszystkich pomiarów dla kąta elewacji, napięcie zasilające napędy było stałe i równe 28,2 V. Współczynniki wypełnienia sygnału PWM przyjęto równe 75 % oraz 80 %. Na rys. 6 i 7 przedstawiono przebiegi czasowe kąta podniesienia ogniwa, a na rys. 8 i 9 przedstawiono uśrednione prądy zasilające napęd podczas dyslokacji w obu kierunkach.



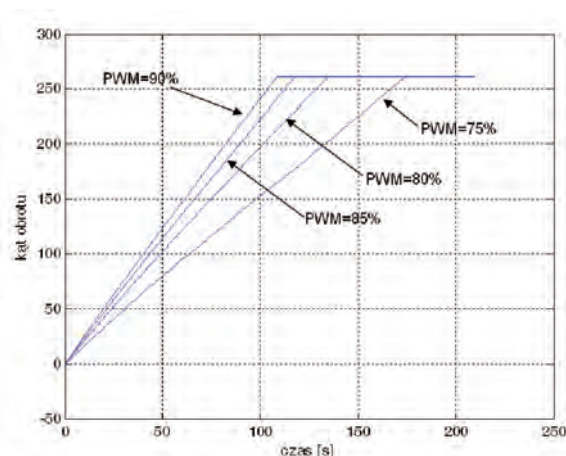
**Rys. 6.** Kąt elewacji w funkcji czasu – podnoszenie  
**Fig. 6.** The elevation angle in the time function – moving up



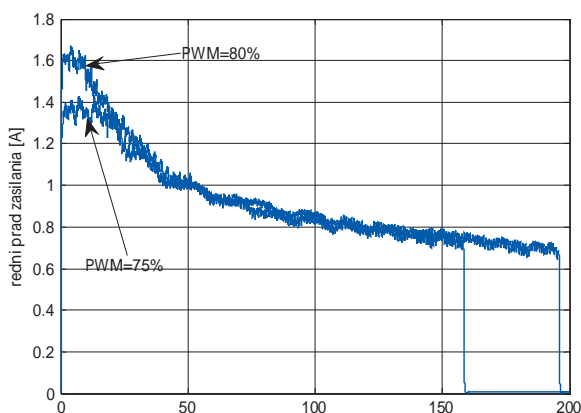
**Rys. 9.** Uśredniony prąd – opuszczanie  
**Fig. 9.** The averaging current – moving down



**Rys. 7.** Kąt elewacji w funkcji czasu – opuszczanie  
**Fig. 7.** The elevation angle in the time function – moving down



**Rys. 10.** Kąt azymutu w funkcji czasu, ruch w prawo  
**Fig. 10.** The vectorial angle in the time function – moving to the right



**Rys. 8.** Uśredniony prąd – podnoszenie  
**Fig. 8.** The average current, moving up

**Tab. 1.** Zużycie energii podczas sterowania kątem elewacji [W·s]  
**Tab. 1.** The energy consumption during elevation angle control [W·s]

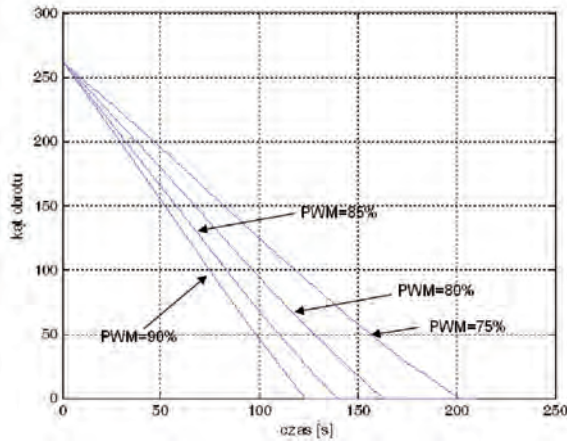
Współczynniki wypełnienia PWM	Ruch w górę	Ruch w dół
75 %	5,0675e +003	2,5884e +003
80 %	4,3503e +003	2,4361e +003

### Kąt azymutu

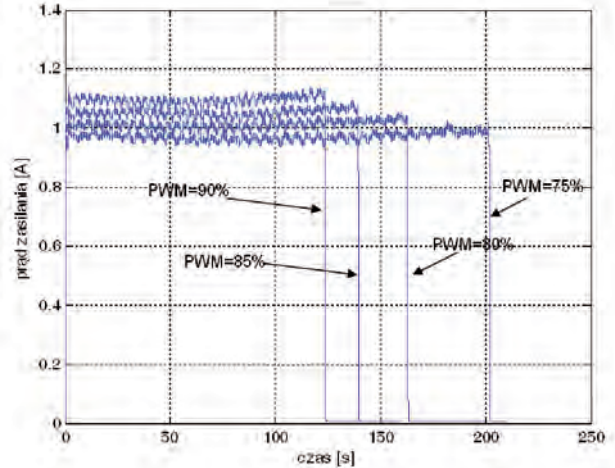
Wyniki pomiarów dla kąta azymutu są przedstawione na rys. 10 i 11. Podczas wykonywania wszystkich pomiarów dla kąta azymutu, napięcie zasilające napędy było stałe i równe 13,5 V. Współczynniki wypełnienia sygnału PWM były równe 75 %, 80 %, 85 % oraz 90 %. Na rys. 10 i 11 przedstawiono przebiegi czasowe kąta azymutu ogniwa, a na rys. 12 i 13 przedstawiono uśrednione prądy zasilające napęd podczas dyslokacji w obu kierunkach.

Na podstawie pomiarów prądu pokazanych na rys. 12 i 13 wyznaczono zużycie energii podczas dyslokacji ogniwa (tab. 2).

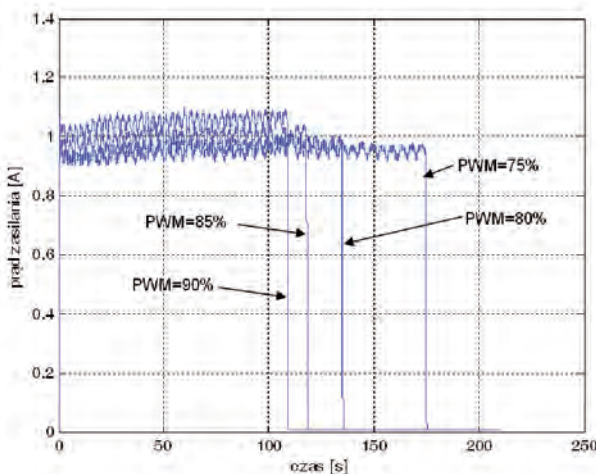
Na podstawie wyników pomiarów prądu pokazanych na rys. 8 i 9 wyznaczono zużycie energii podczas dyslokacji ogniwa (tab. 1).



Rys. 11. Kąt azymutu w funkcji czasu, ruch w lewo  
 Fig. 11. The vectorial angle – moving to the left



Rys. 13. Uśredniony prąd, ruch w lewo  
 Fig. 13. The averaging current – moving to the left



Rys. 12. Uśredniony prąd – ruch w prawo  
 Fig. 12. The averaging current – moving to the right

Tab. 2. Zużycie energii podczas sterowania kątem azymutu [W·s]  
 Tab. 2. The energy consumption during vectorial angle control [W·s]

Współczynniki wypełnienia PWM	Ruch w prawo	Ruch w lewo
75 %	2,2495e +003	2,6479e +003
80 %	1,7642e +003	2,2296e +003
85 %	1,5939e +003	1,9816e +003
90 %	1,5462e +003	1,8271e +003

Na podstawie wyników pomiarów można sformułować wnioski ogólne dotyczące konstrukcji modeli matematycznych modeli rozważanego obiektu:

- Wyniki badań są w pełni zgodne z intuicją oraz wcześniejszymi doświadczeniami autorów.
- Analiza konstrukcji oraz analiza wszystkich zaprezentowanych przebiegów odpowiedzi skokowych wskazują, że przybliżonym modelem liniowym opisującym ogniwo słoneczne jest transmitancja obiektu całkują-

cego z inercją I rzędu lub równanie stanu II rzędu opisujące tego typu obiekt.

- Oba kierunki ruchu dla każdej z osi powinny być opisane osobnymi modelami.
- Trudniejszy do zamodelowania jest obwód sterowania kątem elewacji ze względu na silne nieliniowości oraz znaczne różnice między charakterystykami dla przypadków podnoszenia i opuszczania ogniwa. Dodatkowo należy zauważyć, że moc niezbędna do dyslokacji ogniwa w pionie jest zależna od kąta elewacji.
- Obwód sterowania kątem azymutu jest prostszy do zamodelowania ze względu na duże podobieństwo przebiegów czasowych dla sterowania w obie strony oraz niezależność mocy niezbędnej do sterowania od kąta obrotu. Niewielkie różnice występujące między dyslokacjami w lewo i w prawo wynikają ze specyfiki zastosowanego silnika – jest on konstrukcyjnie przystosowany do ruchu w jedną tylko stronę.
- Podczas dyslokacji ogniwa zarówno w pionie, jak i w poziomie mniejsze zużycie energii zapewnia stosowanie sygnału o większym współczynniku wypełnienia.

## 6. Uwagi końcowe

Uwagi końcowe do pracy mogą być sformułowane następująco:

- Wyniki przedstawionych eksperymentów pomiarowych są w pełni zgodne z intuicją i oczekiwaniami.
- Spektrum dalszych badań związanych z kontynuacją omawianej tematyki jest szerokie i obejmuje między innymi:
  - konstrukcję i weryfikację modeli matematycznych rozważanego systemu. Modele mają opisywać zarówno dynamikę rozważanego systemu, jak i zużycie energii podczas dyslokacji ogniwa. W szczególności przewiduje się budowę modeli przedziałowych i nieliniowych oraz planuje się opracowanie nowych modeli bazujących na funkcjach sklepanych.
  - konstrukcję algorytmów sterowania optymalnego z wykorzystaniem wyników prezentowanych w pracy.

Praca została sfinansowana ze środków NCN, umowa Nr 6693/B/T02/2011/40.

## Bibliografia

1. Chylaszek D., *Orientowany system fotowoltaiczny sterowany autonomicznym sterownikiem*, praca magisterska pod kierunkiem dr. inż. J. Tenety, AGH Wydział EAIiE, Kraków 2006.
2. *DS1103 PPC Controller Board*, dSPACE GmbH, Paderborn, Germany, 2007.
3. *ControlDesk Experiment Guide*, dSPACE GmbH, Paderborn, Germany, 2007.
4. Oprzędkiewicz K., Teneta J., Zaczyk M., Garbacz M., Więckowski Ł., *Laboratory of Automatics, Robotics and PV systems – areas of research*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, 12/2011, 137–143.
5. Oprzędkiewicz K., Teneta J., *Problems of optimal control for oriented photovoltaic systems*, Automatyka: półrocznik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, t. 15, z. 2, 2011, 381–388.
6. Głowacz Z., Piech K., Głowacz W., *Overview of modern technologies to obtain electricity from renewable sources*. Czasopismo Naukowo-Techniczne „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa (MIAG)”, Katowice, Nr 11, 2011, 48–60.
7. Marańda W., *Daytime Lighting using Photovoltaic System with Short-term Energy Storage*, „Przegląd Elektrotechniczny” (Electrical Review), R. 87, Nr 12a, 2011, 220–224.
8. Grzesiak W., Cież M., Maj T., Molenda J., *Modelowanie i monitorowanie autonomicznych instalacji fotowoltaicznych dla potrzeb mobilnych stacji pomiarowych*, „Przegląd Elektrotechniczny” (Electrical Review), R. 87, Nr 9a, 2011, 172–175.
9. Angulo N., Pulido A., Diaz F., Deniz F., Sanchez E., Sanchez R.: *Roof Integrated Grid Connected PV Systems Capacity in Gran Canaria Island*, „Przegląd Elektrotechniczny” (Electrical Review), R. 88, Nr 1a, 2012, 181–183.
10. Frydrychowicz-Jastrzębska G., Tadaszak M., *Modelling characteristics of photovoltaic module load for various light intensity and wavelength*, „Przegląd Elektrotechniczny” (Electrical Review), R. 87, Nr 7, 2011, 167–169. ■

### Parameters identification of an oriented PV system

**Abstract:** Paper presents an identification dynamics and an energy consumption problem for oriented PV system. The construction of a measuring system and a measure method with the use of dSPACE and MATLAB/Simulink were presented. Conclusions about applications results to build mathematical models of considered system were also formulated.

**Keywords:** oriented PV systems, dSPACE, measurement systems

### dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz

Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie z 1988 r. (Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki, kierunek studiów: Elektronika, specjalność Automatyka). Aktualnie zatrudniony w Katedrze Automatyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH na stanowisku adiunkta oraz w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Tarnowie na stanowisku profesora nadzwyczajnego. Zainteresowania naukowe: problemy sterowania systemami dynamicznymi o niepewnych parametrach, sterowanie cyfrowe, automatyka przemysłowa.

e-mail: [kop@agh.edu.pl](mailto:kop@agh.edu.pl)



### dr inż. Mieczysław Zaczyk

Absolwent Wydziału EAIiE AGH. Obecnie zatrudniony w Katedrze Automatyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH. Zainteresowania naukowe: wyznaczanie maksymalnego błędu w liniowych systemach dynamicznych, szybkie prototypowanie sterowników robotów, algorytmy nawigacji dla robotów mobilnych.

e-mail: [mza@ia.agh.edu.pl](mailto:mza@ia.agh.edu.pl)



### mgr inż. Łukasz Więckowski

Absolwent Wydziału EAIiE AGH specjalność Automatyka i Robotyka. Od 2006 r. pracuje w Katedrze Automatyki na stanowisku asystenta. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół zagadnień sterowania systemów fotowoltaicznych.

e-mail: [wieckow@regent.uci.agh.edu.pl](mailto:wieckow@regent.uci.agh.edu.pl)



### dr inż. Janusz Teneta

Absolwent AGH od 1995 r. zatrudniony w Katedrze Automatyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH w Krakowie. Obecnie na stanowisku adiunkta. Zainteresowania badawcze: systemy fotowoltaiczne, monitoring wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, systemy automatyki i pomiarów przemysłowych.

e-mail: [romus@.agh.edu.pl](mailto:romus@.agh.edu.pl)



### mgr inż. Witold Głowacz

Absolwent kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale EAIiE AGH. Od 2011 r. zatrudniony na stanowisku asystenta w Laboratorium ARiSF Katedry Automatyki. Interesuje się systemami fotowoltaicznymi i dialogowymi.

e-mail: [wglowacz@agh.edu.pl](mailto:wglowacz@agh.edu.pl)

