

Wiktoria KALUS\*, Dariusz ZMARZŁY\*

## ZASTOSOWANIE MIKROPROCESORA NUCLEO DO STEROWANIA NADAŻNYM SYSTEMEM FOTOWOLTAICZNYM

W artykule przedstawiono koncepcję zastosowania modułu mikroprocesorowego do sterowania nadażnym systemem fotowoltaicznym. Opisano użyte elementy niezbędne do zbudowania konstrukcji obracającej panelem fotowoltaicznym w stronę Słońca. Układ zwracał się w kierunku źródła najintensywniejszego światła za pomocą fotorezystorów. Do przechowywania nagromadzonej energii słonecznej przetworzonej na energię elektryczną, posłużył moduł z akumulatorem żelowym. Program sterujący stworzono w języku C++, przy użyciu środowiska Keil.

SŁOWA KLUCZOWE: fotowoltaika, Keil, system nadażny.

### 1. WSTĘP

W związku z palącymi problemami wynikającymi z dynamicznego rozwoju gospodarki człowieka i jej ujemnych skutków, w ostatnich latach nastąpiła potrzeba ochrony środowiska naturalnego. Społeczeństwo zainteresowane jest ochroną zasobów naturalnych, kupowaniem zdrowej żywności, sortowaniem odpadów oraz prowadzeniem aktywnego trybu życia. Wielkie przedsiębiorstwa zainteresowane są czerpaniem energii z odnawialnych źródeł. Budowane są duże elektrownie zasilające potężne aglomeracje miejskie, jak również elektrownie przydomowe, ocieplające lub zasilające gospodarstwa. Mają one wiele zalet. Wykorzystują naturalne, odtwarzalne źródła energii. Zużywają niewielkie ilości energii na potrzeby własne oraz mają niską szkodliwość na środowisko naturalne. Na Instytucie Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej na Politechnice Opolskiej prowadzonych jest wiele badań naukowych związanych z odnawialnymi źródłami energii. Pomiary oraz analiza zjawisk towarzyszącym pozyskiwaniu energii z wiatru czy słońca wykonywane są przez zespoły uznanych specjalistów. Istotnymi czynnikami, które są badane oprócz wydajności urządzeń są również metody optymalizacji pozyskiwania energii w zależności od warunków meteorologicznych czy sprawności systemów sterowania i zarządzania tymi urządzeniami [1, 2].

---

\* Politechnika Opolska

Standardowe ogniwo fotowoltaiczne (PV) składa się z 4 warstw: półprzewodnika typu p naładowanego dodatnio oraz półprzewodnika typu n naładowanego ujemnie. Między nimi wytwarza się pole elektryczne, czyli tak zwana bariera potencjału. Całość chroni specjalne szkło, które przepuszcza promienie słoneczne zamiast je odbijać [3]. Płytkę półprzewodnikową p-n (positive-negative) jest wykonana na bazie krzemu, wewnątrz której powstaje bariera potencjałów, czyli pole elektryczne. Ogniwa mogą być zbudowane z wielu innych pierwiastków takich jak siarczek kadmu (CdS), arsenek galu (GaAs), ellurek kadmu (CdTe), selenek indowo-miedziowy (CIS), związek miedziowo-indowo-galowo-selenowy (CIGS)[4]. Krzem jest jednak najbardziej rozpowszechnionym materiałem na świecie do tworzenia ogniw. Dominuje on z powodu niskiej ceny oraz dostępności. Występuje w postaci monokrystalicznej, polikrystalicznej oraz bezpostaciowo [5].

W literaturze można znaleźć wiele rozwiązań konstrukcyjnych nadążnych systemów PV. System może podążać za słońcem w trybie kalendarzowym, może posiadać regulowany kierunku nachylenia w dwóch osiach lub układ zamieszczony na dachu pod odpowiednim kątem do słońca [6, 7].

## 2. KONSTRUKCJA MECHANICZNA

Głównym celem wykonanych prac było wykonanie nadążnego systemu z panelem fotowoltaicznym. Konstrukcja opierała się o panel PV zamontowany na aluminiowej ramie, która podtrzymywana była na szynach z kółeczkami dla łatwiejszego i płynniejszego obrotu w azymucie. Posłużył do tego silnik krokowy z przekładnią ślimakowa, który obracał się o określony krok, co pozwalało na dokładniejszy obrót oraz stabilniejsze ruchy konstrukcji. Do obrotu w osi pionowej posłużyły serwomechanizmy. Aby cała konstrukcja mogła się obracać, odszukać najlepsze źródło światła, zapisać pomiary oraz magazynować energię w akumulatorze, zostało opracowane kompleksowe oprogramowanie na module mikroprocesorowym Nucleo. Program obsługiwał sterowanie serwomodułami oraz przekładnią ślimakową silnika krokowego. Dodatkowo za pomocą enkodera optycznego wyznaczał kąt obrotu konstrukcji w azymucie. Pozwalał na sprawne określenie fotorezystorów, z której strony znajduje się najintensywniejsze źródło światła. W programie zawarto również funkcję inicjalizacji licznika TIM3 obsługującego impulsator z przyciskiem, funkcję inicjalizacji licznika TIM16 do pracy w trybie PWM, funkcję inicjalizacji przetwornika analogowo-cyfrowego, oraz funkcję pomiaru napięcia przetwornikiem A/C i wiele innych.

## 2.1. Panel fotowoltaiczny

Panel o wymiarach 36 cm na 30 cm ważący 1,5 kg potrafi wytworzyć maksymalną moc do 10 W oraz zasilić system autonomiczny o napięciu 12 V (połączony równolegle) oraz 24 V przy połączeniu szeregowym dwóch baterii. Podstawowe parametry zostały zawarte w tabeli 1. Wykonany jest z cel krzemu polikrystalicznego, którego sprawność wynosi 13,7%. Panel może służyć, jako odrębna jednostka lub połączona w większy system fotowoltaiczny.

Tabela 1: Parametry panelu fotowoltaicznego.

<b>Moc max.:</b>	10 W
<b>Napięcie max.:</b>	17,49 V
<b>Prąd max.:</b>	0,57 A
<b>Napięcie rozwarcia <math>V_{oc}</math>:</b>	21,67 V
<b>Prąd zwarcia <math>I_{sc}</math>:</b>	0,61 A
<b>Tolerancja mocy:</b>	$\pm 3\%$
<b>Max. napięcie systemu:</b>	1000 V
<b>Zakres temp. pracy:</b>	Od $-40$ do $85^{\circ}\text{C}$
<b>Długość:</b>	360 mm
<b>Szerokość:</b>	300 mm
<b>Głębokość:</b>	28 mm
<b>Waga:</b>	1,5 kg
<b>Terminal:</b>	MC4

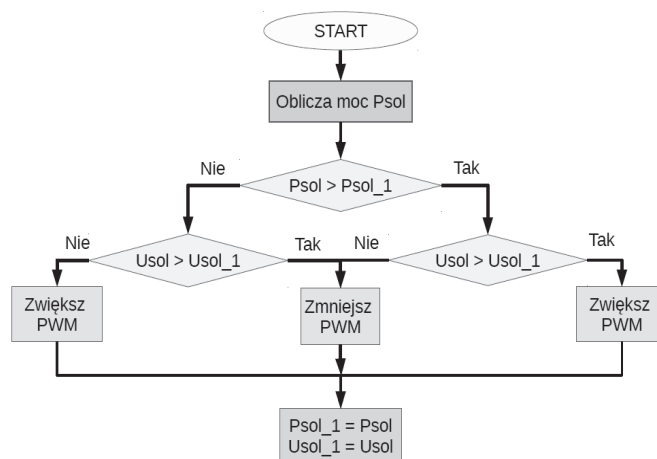
## 2.2. Serwomechanizmy

Do zmiany kąta elewacji zastosowano dwa serwomechanizmy zamocowane w osi poziomej. W tym celu wykorzystane zostały SERVO TowerPro MG995 ze względu na duży moment ( $15 \text{ kg/cm}$ ). Bardzo mocne serwo typu „standard”, wyposażone w podwójne łożyska oraz metalowe tryby, uniesie ważący 1,5 kg panel fotowoltaiczny. Dodatkowo moment obrotowy jednego serwa wynosi  $15 \text{ kg}$ , napięcie zasilania jest w zakresie między  $4,8 \text{ V}$ , a  $6 \text{ V}$ , a zakres obrotu serwa wynosi od  $0^{\circ}$  do  $180^{\circ}$ .

### 2.3. Przetwornica napięcia i układ ładowania

Do uzyskania odpowiedniego napięcia zasilania serwomodułów zastosowano osobną przetwornicę napięcia [8]. Moduł miniaturowej przetwornicy o regulowanym napięciu wyjściowym, użyto by przetwarzać napięcie z 12 V pobierane z akumulatora na napięcie 5 V, potrzebne do zasilania modułu Nucleo. Użyto modułu DC-DC mini 360 MP2307 step-down.

Do magazynowania energii słonecznej użyto akumulatora żelowego. Nie wielki 12 V akumulator o pojemności 4,5 Ah jest przystosowany do pracy buforowej oraz cyklicznej. Wielokrotne ładowanie pozwalało na zasilanie modułu sterującego całym urządzeniem tj. silnikiem krokowym, serwami, wyświetlaczem LCD oraz zasilaniem modułu mikroprocesorowego.

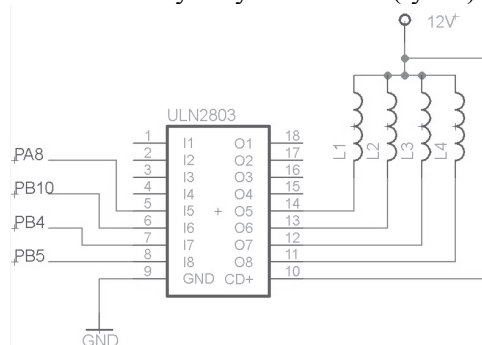


Rys. 1. Algorytm MPPT układu ładowania

Śledzenie maksymalnej mocy ładowania opiera się na pomiarach różnicy mocy oraz napięcia na panelu PV. Na rysunku 1 przedstawiono Algorytm MPPT układu ładowania.  $P_{sol}$  oznacza aktualna moc chwilową, a  $P_{sol\_1}$  poprzednią.  $U_{sol}$  oznacza aktualne chwilowe napięcie, a  $U_{sol\_1}$  napięcie przy poprzednim wywołaniu funkcji MPPT [8, 10]. Na tej podstawie jest określone czy współczynnik wypełnienia impulsu generatora PWM ma się zwiększyć czy zmniejszyć [11]. Na końcu funkcji wartości aktualne mocy i napięcia przypisywane są do wartości poprzednich ( $P_{sol\_1}$ ,  $U_{sol\_1}$ ). Aby zapobiec zbyt częstym zmianom współczynnika wypełnienia, algorytm działa jeżeli różnica mocy aktualnej i poprzedniej jest większa niż 5 mW.

## 2.4. Silnik krokowy

Silnik krokowy unipolarny Mitsumi M35SP-8P o mocy 12 V, służył do obrótu panelem w azymucie. Jest zasilany impulsowym prądem, który powoduje, że obraca się on o ustalony kąt, a nie ruchem ciągłym. Napęd przenoszony jest przez przekładnię ślimakową o przyłożeniu 1:50 czyli jeden krok silnika. Układem sterującym silnikiem krokowym był ULN2803 (rys. 1).



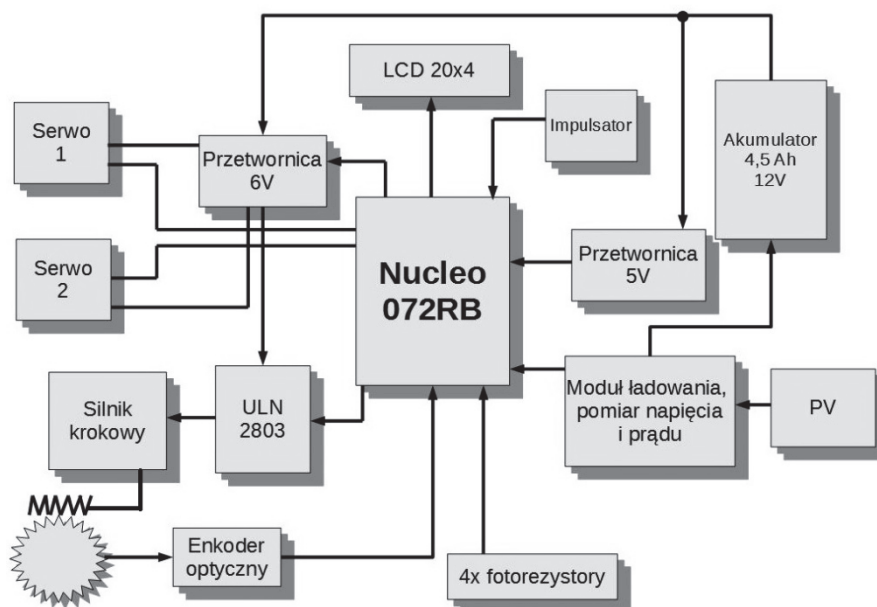
Rys. 2. Schemat układu ULN2803

## 3. STEROWANIE

### 3.1. Koncepcja sterowania

Na schemacie blokowym (rys. 2) przedstawiono w jaki sposób połączone są elementy sterowania oraz pozostałe urządzenia wykorzystane w projekcie. Podstawowe elementy sterowania to:

- Nucleo - 072RB - jako główny moduł sterujący,
- układ ULN2803 sterujący silnikiem krokowym,
- układ fotorezystorów do detekcji natężenia światła,
- przetwornica 6 V do zasilania serwomechanizmów kąta elewacji,
- przetwornica obniżająca napięcie akumulatora do 5 V zasilająca moduł Nucleo,
- panel fotowoltaiczny 10 W,
- akumulator 12 V, 4,5 Ah oraz moduł ładowania akumulatora z pomiarami napięcia i prądu ładowania,
- enkoder optyczny mierzący kąt azymutu,
- alfanumeryczny wyświetlacz LCD.



Rys. 3. Schemat blokowy sterowania

### 3.2. STM32 NUCLEO-072RB

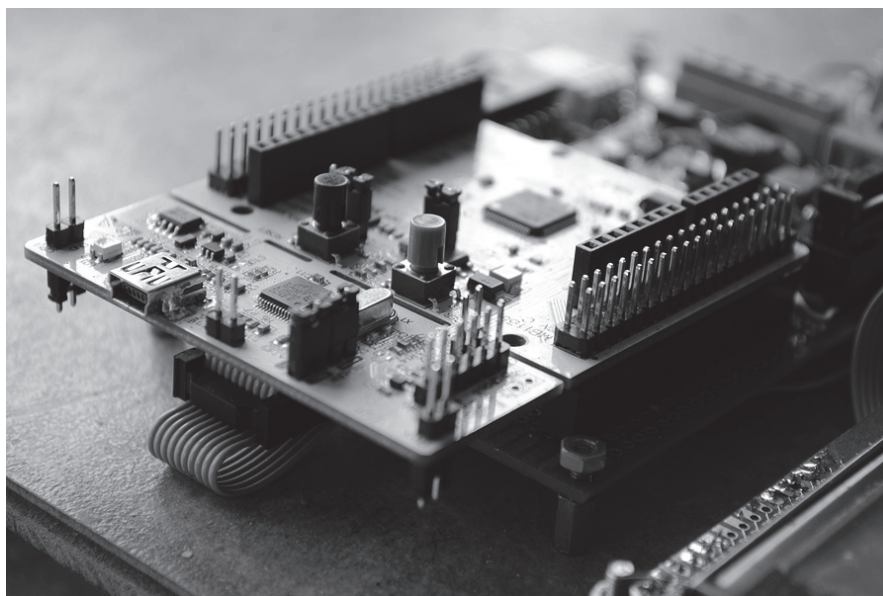
Do obrotu niezbędny jest układ sterujący oparty o mikrokontroler. Układ powinien mieć możliwość pomiarów z co najmniej 7 źródeł oraz możliwość sterowania silnikiem krokowym i serwomechanizmami. Do realizacji wybrano moduł Nucleo-072RB (rys. 3).

Nucleo to moduł posiadający 32-bitowy mikrokontroler z rdzeniem ARM Cortex M0, pracujący z częstotliwością 48 MHz. Układ posiada pamięć Flash o pojemności 128 kB, 16 kB pamięci SRAM, 9 liczników oraz interfejsy SPI, I2C i USART. Moduł wyposażono w dwa typy złączy: Arduino oraz ST\_Morpho dla wszystkich pinów mikrokontrolera. Wspierany jest przez platformy oparte na kompilatorze GCC i środowiskach takich jak IAR, Keil oraz ARM.

Dodatkowym atutem Nucleo jest odczytywanie impulsu z enkodera. Posiada wbudowany programator podłączany kablem USB mini oraz port szeregowy wykorzystujący łącze USB programatora.

Tabela 2: Parametry STM32 Nucleo-072RB.

<b>Rdzeń:</b>	ARM Cortex M032-bit
<b>Częstotliwość taktowania:</b>	48 MHz
<b>Pamięć programu Flash:</b>	128 kB
<b>Pamięć SRAM:</b>	16 kB
<b>Przetwornik analogowo-cyfrowy:</b>	12 – bitowy, 16 – kanałów
<b>Ilość Timerów:</b>	9
<b>Ilość programowalnych wejść/wyjść:</b>	51
<b>Interfejsy:</b>	2x I2C, 4x USART, 2x SPI
<b>Diody LED:</b>	sygnalizująca napięcia zasilania, sygnalizująca komunikację, do dyspozycji użytkownika
<b>Przyciski:</b>	RESET, do dyspozycji użytkownika
<b>Trzy różne interfejsy poprzez złącze miniUSB (USB re-enumeration):</b>	wirtualny port COM, pamięć masowa, port do programowania/debuggowania



Rys. 4. Moduł NUCLEO-072RB

### 3.3. Czujniki światła

Aby panel fotowoltaiczny obracał się w stronę słońca należało zastosować czujniki światła. Najczęściej stosowane są fotorezystory podłączone jako dzielniki napięcia.

Moduł z czterema fotorezystorami został przymocowany do górnej krawędzi panela. Czujniki zostały od siebie odseparowane ściankami, które rzucają cień. Gdy czujniki znajdują się w maksymalnym nasłonecznieniu konstrukcja jest prawidłowo ustawiona względem słońca i pobiera wówczas najwięcej energii słonecznej. Czujniki wykonują cykliczny pomiar w konsekwencji czego, cała konstrukcja obraca się powoli w stronę słońca. Istnieje kilka sposobów rozmieszczenia fotorezystorów, aby umożliwiały najlepszy pomiar położenia względem słońca.

### 3.4. Enkoder optyczny

Do ustalenia azymutu wykorzystany został enkoder optyczny Agilent HEDS-9711. To mały moduł z czujnikiem pozwalający na dokładne zmierzenie kątów obrotu konstrukcji. Dzięki tarczy z zaznaczonymi punktami, można dokładnie obliczyć kąt azymutu. Enkoder oblicza 4800 impulsów na pełny obrót.

Wewnątrz enkodera znajdują się wzmacniacze operacyjne w układzie całkującym. Służą one do formowania sygnałów z fototranzystorów. Na wyjściach enkodera generowany jest sygnał kwadraturowy przesunięty w fazie o 90°. Sygnały te podawane są na wejścia PC6 i PC7 licznika TIM3, który skonfigurowany jest do pracy z takim enkoderem. Licznik zlicza impulsy uwzględniając kierunek obrotu.

### 3.5. Problemy konstrukcyjne

Pierwszym problemem jaki pojawił się podczas realizowania konstrukcji był zbyt duży ciężar panela fotowoltaicznego. Podtrzymywały go dwa serwomechanizmy umieszczone w aluminiowej ramie. Zastosowane serwomechanizmy HD 6001HB były zbyt słabe, a dodatkowo posiadały plastikowe tryby. Podczas prób uruchamiania obu serw wraz z zamontowanym panelem, w jednym z nich pękły zębatki. Zamontowano inne modele serwomechanizmów (MG996R), które miały zbyt duży rozrzut ustawiania kąta.

Ostatecznie zastosowano serwomechanizmy TowerPro MG995 o metalowych zębatkach, przez co konstrukcja stała się stabilniejsza i silniejsza.

Drugim problemem był obrót względem osi pionowej. W pierwszej wersji rama była przymocowana bezpośrednio do osi silnika krokowego. W tym wy-



padku silnik musiałby stale być podłączony do napięcia, gdyż niewielki podmuch wiatru powodował obrót.

W drugiej wersji napęd miał być realizowany również poprzez serwomechanizm. Niestety bezwładność konstrukcji powodowała trudności z dokładnym ustawieniem, a cała konstrukcja chwiała się na boki. Zastosowano, więc, dodatkowe zabezpieczenie w postaci szyn z plastikowymi kółeczkami po bokach ramy, co spowodowało ustabilizowanie się konstrukcji. Dla uzyskania samohamowności zastosowano przekładnię ślimakową, napędzaną przez silnik krokowy. Przez co uzyskano zwiększenie dokładności ustawiania kąta azymutu. Wał napędowy został osadzony w trzech łożyskach, które następnie zamontowano w podstawie, a łączenia wzmocniono klejem. Dodano również enkoder optyczny do odczytu kąta azymutu. Skutkiem wszystkich tych zmian były liczne poprawki związane ze starowaniem z płytki mikroprocesorowej Nucleo oraz okablowaniem płytki stykowej.

### 3.6. Istotne fragmenty oprogramowania

W programie napisanym w języku C++, przedstawiono działanie fotorezystorów, inicjalizację licznika obsługującego enkoder optyczny kąta azymutu, inicjalizację licznika do pracy w trybie PWM oraz funkcję pomiaru napięcia przetwornikiem A/C.

– Fragment pliku `stm32f0xx_it.c` zawierającego funkcję obsługi przerwań

```
void SysTick_Handler(void)
{ ii++;
  if(ii==7)
    { ii=0; jj++;
      if(jj==64)
        { jj=0;
          frez1=frez1p>>6; frez2=frez2p>>6; frez3=frez3p>>6;
          frez4=frez4p>>6;
          Uaku=Uakup>>2; Usol=Usolp>>2; Isol=Isolp>>2;
          frez1p=frez2p=frez3p=frez4p=0;
          Uakup=Usolp=Isolp=0;
          f_pom=1;
          ww++; if(ww==22) {ww=0; f_wyp=1;}}
          if(ii==0) frez1p=frez1p+ADC1_rd( 9); //górný pb1
          if(ii==1) frez2p=frez2p+ADC1_rd( 7); //dolny pa7
          if(ii==2) frez3p=frez3p+ADC1_rd(14); //lewy pc5
          if(ii==3) frez4p=frez4p+ADC1_rd(15); //prawy pc5
          if(ii==4) Uakup=Uakup+ADC1_rd(4);
          if(ii==5) Usolp=Usolp+ADC1_rd(0);
          if(ii==6) Isolp=Isolp+ADC1_rd(1); }
```

- Funkcja inicjalizacji licznika TIM2 obsługującego enkoder optyczny kąta azymutu

```

__INLINE void TIM2_init(void)
{ RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_TIM2EN;      // TIM3 clock enable
  gpio_pin_cfg(GPIOB, PB3, AF_PP_HS_No);
  gpio_pin_cfg(GPIOA, PA15, AF_PP_HS_Down);
  gpio_af_cfg(GPIOB, PB3, 2);                //ustawienie numeru funkcji
  gpio_af_cfg(GPIOA, PA15, 2);                //alternatywnej pinów
  TIM2->SMCR = TIM_SMCR_SMS_1 | TIM_SMCR_SMS_0; //tryb encoder nr2
  TIM2->CCMR1 = TIM_CCMR1_IC1F | TIM_CCMR1_IC2F; //wł filtry wejściowe
  TIM2->CCER = TIM_CCER_CC1P;                //polaryzacja we \_;
  TIM2->ARR = 65535;                          //rejestr repetycji
  TIM2->CR1 = TIM_CR1_CEN;                    //włącz licznik}

```

- Funkcja inicjalizacji licznika TIM16 do pracy w trybie PWM

```

__INLINE void TIM16_init(void)
{RCC->APB2ENR |= RCC_APB2ENR_TIM16EN;      //taktowanie TIM16
  gpio_pin_cfg(GPIOB,PB8,AF_PP_HS_No);      //konfig PB8 w tryb
  gpio_af_cfg(GPIOB, PB8, 2);                //funkcji alternatywnej
  TIM16->PSC = 239;                          //preskaler f=1kHz
  TIM16->ARR = 3999;
  TIM16->CCMR1 = TIM_CCMR1_OC1PE | TIM_CCMR1_OC1M_2 |
  TIM_CCMR1_OC1M_1;
  TIM16->CCER = TIM_CCER_CC1E; //włączenie wyjścia output enable
  TIM16->EGR = TIM_EGR_UG;
  TIM16->CCR1 = 230;                          //wartość do porównania z CNT
  TIM16->BDTR = TIM_BDTR_MOE;
  TIM16->CR1 = TIM_CR1_CEN;                  //włączenie licznika TIM16}

```

- Funkcja inicjalizacji przetwornika analogowo-cyfrowego

```

void ADC1_init(void)
{RCC->APB2ENR|=RCC_APB2ENR_ADC1EN;        //włącz taktowanie ADC
  ADC1->CFGR2=0x80000000;                   //taktowanie z PCLK/4 -> 12MHZ
  ADC1->SMPR=4;                             //próbkiowanie 41.5 cykla
  ADC1->CR=ADC_CR_ADCAL;                    //włącz kalibrację
  while((ADC1->CR & ADC_CR_ADCAL)==ADC_CR_ADCAL); //czekaj na ko-
  niec kalibracji
  ADC1->DR;//porzuć pierwszy pomiar
  ADC1->CR=ADC_CR_ADEN;//włącz ADC
  while((ADC1->ISR&ADC_ISR_ADRDY )!=1);    //czekaj aż będzie gotowy}

```

- Funkcja pomiaru napięcia przetwornikiem A/C

```
uint16_t ADC1_rd(uint8_t ch)
{ADC1->CHSELR=1<<ch;           //ustawienie kanału pomiarowego
while((ADC1->ISR&ADC_ISR_ADRDY)!=1); // adc ready
ADC1->CR=ADC_CR_ADSTART; //start conv ADC,kasowany sprzetowo
while((ADC1->CR&ADC_CR_ADSTART)!=0);
return( (uint16_t)(ADC1->DR)); //zwraca pomiar}
```

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W ramach wykonanych badań zaprojektowano system z panelem fotowoltaicznym, nadążającym za Słońcem. Konstrukcję oparto o moduł mikroprocesorowy Nucleo-F072RB, do którego stworzono program sterujący. Zaprojektowano urządzenie tak, aby panel fotowoltaiczny obracał się w stronę słońca, dzięki dwóm serwomechanizmom zamontowanym po bokach. Do precyzyjnego ustalenia położenia słońca wykorzystano fotorezystory znajdujące się na ramie panelu fotowoltaicznego. Silnik krokowy umożliwił obrót panela w kącie azymutu, a serwomoduly w kącie horyzontalnym. Dodatkową zaletą było użycie enkodera optycznego wyznaczającego dokładne kąty nachylenia. Panel przekazywał pobraną energię do akumulatora żelowego, który zasilał moduł Nucleo, sterowanie serwami i silnikiem krokowym oraz wyświetlacz LCD, na którym wyświetlały się dane akumulatora, paneli oraz kąty nachylenia.

Problem stanowił dobór serwomechanizmów. Niektóre modele serw były zbyt słabe, by utrzymać panel fotowoltaiczny, przez co pękały plastikowe zębatki. Ostatecznie zamontowano serwo o dużej mocy z metalowymi zębatkami, co poprawiło precyzyjność obrotów. Pojawiły się również problemy konstrukcyjne, mianowicie ciężar ramy z panelem, który osadzony był na silniku krokowym nie pozwalał na utrzymanie całości w pionie. Dostosowano odpowiednie szyny z kółeczkami, aby konstrukcja stała się stabilniejsza.

Cel pracy został osiągnięty dzięki łatwej obsłudze środowiska programowania Nucleo oraz programowi EAGLE, w którym zostały narysowane schematy. Stworzenie systemu nadążnego pozwoliło na przetwarzanie energii słonecznej na energię elektryczną. W prosty sposób otrzymaliśmy darmowe źródło energii, które można wykorzystać do ładowania akumulatorów, telefonów czy innych małych urządzeń elektrycznych. Projektowanie tego typu małych elektrowni słonecznych jest łatwe, stosunkowo tanie i pozwala obniżyć rachunki za zużycie prądu elektrycznego pobieranego z sieci. Warto inwestować w odnawialne źródła energii, przydomowe elektrownie wiatrowe i słoneczne, gdyż sprzyja to ochronie środowiska.

## LITERATURA

- [1] Boczar T., Szczyrba T., Ocena wpływu warunków meteorologicznych na sprawność turbin wiatrowych, *Pomiary Automatyka Kontrola* nr 12/2012, s. 1044-1047 (in Polish).
- [2] Szmechta M., Boczar T., Szczyrba T.: Analiza porównawcza możliwości systemów Scada w wersji off-line i on-line na przykładzie turbiny wiatrowej Tacke TW600, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, No 74, pp. 219-226 (in Polish).
- [3] Technology, A. Photovoltaics II: flat panels, 75, 32–33 (1980)
- [4] Taguchi, M. et al. 24.7% Record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer. *IEEE J. Photovoltaics* 4, 96–99 (2014).
- [5] Green, M. A. Thin-film solar cells: Review of materials, technologies and commercial status. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 18, 15–19 (2007).
- [6] Frydrychowicz-Jastrzębska, G., Bugała, A., Comparison of the efficiency of solar modules operating with a two-axis follow-up system and with a fixed mount system. *Prz. Elektrotechniczny* 63–65 (2014), doi:10.12915/pe.2014.01.15 (in Polish).
- [7] Zhen, Z. et al. The Effects of Inclined Angle Modification and Diffuse Radiation on the Sun-Tracking Photovoltaic System. 1–6 (2017).
- [8] Cen, Z. & Stewart, P. Condition Parameter Estimation for Photovoltaic Buck Converters Based on Adaptive Model Observers. *IEEE Trans. Reliab.* 66, 148–160 (2017).
- [9] Pandey, A., Dasgupta, N. & Mukerjee, A. K. High-performance algorithms for drift avoidance and fast tracking in solar MPPT system. *IEEE Trans. Energy Convers.* 23, 681–689 (2008).
- [10] Mutoh, N., Matuo, T., Okada, K. & Sakai, M. Prediction-data-based maximum-power-point-tracking method for photovoltaic power generation systems. *Power Electron. Spec. Conf. 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annu.* 3, 1489–1494 vol.3 (2002).
- [11] Masoum, M. a. S., Dehbonei, H. & Fuchs, E. F. Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking. *IEEE Trans. Energy Convers.* 17, 514–522 (2002).

### APPLICATION OF NUCLEO MICROPROCESSOR FOR CONTROL OF THE PHOTOVOLTAIC TRACKING SYSTEM

The article presents the concept of using a microprocessor module to control the following solar systems. Elements used to build a structure that rotates the solar panel towards the sun are described. A system with a panel directed towards the source of the most intense light using photoresistors. To collect the accumulated solar energy transformed into electricity, a module with a gel accumulator was used. The control program was created in C++ using the Keil environment.

*(Received: 31.01.2018, revised: 12.03.2018)*