

# ZAPROJEKTOWANIE, WYKONANIE I STEROWANIE PANELEM SŁONECZNYM

**Autor: Hubert Sawicki, Robert Piotrowski**

**(„Rynek Energii” – 3/2019)**

**Słowa kluczowe:** automatyka, mechatronika, panel słoneczny, projektowanie, sterowanie

**Streszczenie.** Odnawialne źródła energii stają się coraz bardziej popularne. Rynek fotowoltaiki w ostatnich latach znacznie powiększył swój udział w zaspokajaniu zwiększonego zapotrzebowania na energię wszystkich gałęzi przemysłu oraz gospodarek państw. Obecny etap rozwoju technologicznego dąży do maksymalizowania sprawności przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną. Pręźnie rozwijająca się automatyzacja pozwala na budowę układów, które w sposób optymalny, bez ingerencji operatora, zapewnią ustawienie paneli w kierunku słońca. Wobec powyższego, zadaniem układów nadążnych jest śledzenie ruchu słońca w celu zwiększenia dostarczanej energii słonecznej do panelu, co w efekcie prowadzi do maksymalnej ilości pozyskanej energii elektrycznej. W artykule przedstawiony został proces projektowania, wykonania i oprogramowania panelu słonecznego.

## 1. WPROWADZENIE

W celu zobrazowania wielkości energii, która dociera do Ziemi należy nadmienić, iż strumień energii ze Słońca, równy około  $178 \cdot 10^{15}$  W, jest 30000 razy większy niż całkowita moc wszystkich urządzeń zainstalowanych na całym globie [3], pomimo faktu, iż 30% energii ze Słońca odbija się od atmosfery ziemskiej, 47% pochłaniają morza i oceany, a 23% zużywa się w obiegu hydrologicznym.

Efekt fotowoltaiczny po raz pierwszy zaobserwowany został w 1839 roku przez Aleksandra Edmunda Becquerel’a. Zjawisko polega na powstaniu siły elektromotorycznej w jednorodnym półprzewodniku pod wpływem oświetlenia i jest wynikiem zachodzących procesów fizycznych. Na styku złącza p-n powstaje pole elektryczne zwane barierą potencjałów. Oświetlenie takiego złącza powoduje rozrywanie w złączu par elektron-dziura przez fotony. Ładunki ujemne przesuwały się do obszaru typu n, natomiast ładunki dodatnie do obszaru typu p. W wyniku takiego ruchu ładunków na złączu powstaje stałe napięcie elektryczne.

Materiałem, który najczęściej wykorzystuje się podczas produkcji paneli słonecznych jest krzem. Wyróżnia się trzy generacje ogniw:

- generacja pierwsza na którą składają się ogniwa monokrystaliczne oraz polikrystaliczne,
- generacja druga, której produkcja opiera się m.in. na amorficznym krzemie, przez co ogniwo ma wiśniowy kolor,
- generacja trzecia, która umożliwia instalację ogniw jako szyby okienne oraz pokrycie namiotów.

Sprawność paneli słonecznych zależy przede wszystkim od parametrów samego ogniwa, jednak znaczący wpływ ma również dostępność promieniowania słonecznego na jego powierzchnię, co z kolei uwarunkowane jest orientacją panelu w przestrzeni. Wybrane pozycje literatury [4,5] przedstawiają kierunek południowy jako ten najbardziej korzystny dla ustawienia modułów w Polsce. Optymalny kąt, uwzględniając wszystkie składowe promieniowania słonecznego, podawany jest jako wartość równa szerokości geograficznej danej miejscowości pomniejszonej o około  $5^\circ$ , co daje przedział kątowy od około  $39^\circ$  do około  $44^\circ$ . Oczywiście jest, że powyższe, matematyczne wyliczenia kąta, zawsze powodować będą, iż część promieniowania słonecznego nie będzie wykorzystana. Optymalne położenie panelu słonecznego zależy bowiem nie tylko od położenia geograficznego, ale także od takich czynników jak ukształtowanie terenu oraz stopień zanieczyszczenia powietrza. W celu eliminacji znacznej utraty pozyskiwanej energii przy stałym kącie nachylenia modułu, nieuwzględniającym dobowego ruchu słońca oraz optymalizacji otrzymywanej mocy, stosuje się układy nadążne. Najczęściej stosowane rozwiązania umożliwiają ruch panelu słonecznego w obu osiach. Badania [6] dowodzą, iż możliwe jest zwiększenie o 40% netto konwersji promieni słonecznych na energię elektryczną przy zastosowaniu tego typu układu. Powyższe szacunki uwzględniają również energię niezbędną do poruszania panelem słonecznym. Układy nadążne są coraz częściej spotykane nie tylko na terenie wysoko rozwiniętych krajów Europy Zachodniej ale także w Polsce. W tym miejscu należy nadmienić, że główną barierą takiej inwestycji jest koszt, niejednokrotnie przekraczający cenę 10 tys. zł. Dlatego często przed dokonaniem inwestycji dokonuje się analiz opłacalności. W pracy [11] analiza opiera się na metodzie „najlepszego miesiąca”. Moc instalacji fotowoltaicznej dopasowuje się do miesiąca, w którym stosunek zapotrzebowania na energię elektryczną do zysków słonecznych jest najmniejszy.

Wobec powyższego, niezaprzeczalnym faktem jest, iż panele słoneczne stanowią istotny punkt we współczesnej technologii. Artykuł prezentuje proces projektowania, wykonania oraz nadążnego sterowania panelem słonecznym o niewielkiej mocy.

## **2. PROJEKT I WYKONANIE CZĘŚCI MECHANICZNEJ**

Proces budowy panelu słonecznego rozpoczęto od projektu w programie Autodesk Inventor. Głównym zadaniem podczas projektowania było spełnienie przyjętych założeń, tj. stabilna praca w dwóch osiach oraz możliwość wykorzystania napięcia z panelu. Wobec tak sformułowanego zadania podstawę stanowi drewniana deska o wymiarach: 25x36x4 cm i wadze 2,9 kg, do której przytwierdzono cały układ. Podstawa stanowić będzie również przeciwwagę i zapewni stabilność konstrukcji. Do ustawienia panelu użyto dwóch serwomechanizmów przymocowanych przy pomocy specjalnych uchwytów. Centralny element stanowi drewniana płyta z czujnikami o wymiarach 47x36 cm, do której przytwierdzono panel słoneczny. Wymiary płyty wynikają z rozmiaru panelu słonecznego oraz miejsc, w których rozmieszczono czujniki pomiaru natężenia światła.

Panel słoneczny wybrano zgodnie z przyjętymi założeniami. Zdecydowano się na model Celline CL010-12P składający się z trzydziestu sześciu polikrystalicznych ogniw (rysunek 1).



**Rys.1.** Panel słoneczny Celline CL010-12P  
z ogniwami polikrystalicznymi

Ogniwa umieszczone są na sztywnym, lekkim podłożu kompozytowym i zabezpieczone przed uszkodzeniami twardym szkłem antyrefleksyjnym, które nie stanowi bariery dla widma promieniowania słonecznego. Napięcie produkowane przez panel wyprowadzone jest w formie wodoodpornej skrzynki podłączeniowej.

Drewniana podstawa wykonana została na zamówienie zgodnie z założeniami i projektem. Wymiary dobrane zostały tak, aby po przymocowaniu panelu cały układ był stabilny mechanicznie. W celu umożliwienia optymalnej pracy i uzyskania większego zakresu kąta pracy serwomechanizmów zdecydowano o przymocowaniu napędów na krawędzi podstawy.

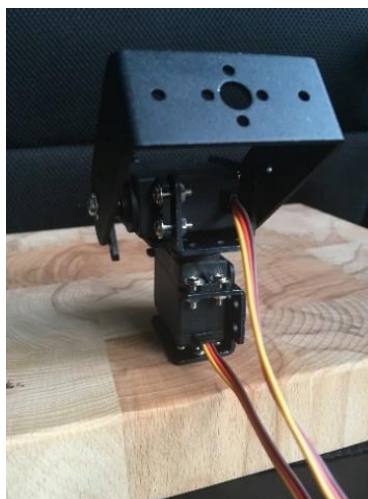
Płytę czujników również wykonano na zamówienie. W dalszej części realizacji przytwierdzono do niej urządzenia pomiarowe oraz panel słoneczny.

W celu umożliwienia zmiany położenia panelu słonecznego niezbędnym jest dobór odpowiedniego napędu. Po analizie zdecydowano się na wykorzystanie dwóch serwomechanizmów MG946R, które odpowiadają za ruch w dwóch osiach: poziomej i pionowej. Umożliwi to uzyskanie optymalnego położenia i szerokiego zakresu ruchu.

Dobór silników wymagał przede wszystkim odpowiedniego momentu siły, który pozwoli na ruch płyty czujników z przymocowanym panelem. W przypadku wykorzystanego modelu maksymalny moment, przy zasilaniu napięciem 6V, wynosi 13 kg/cm. Jednocześnie istotny element stanowi metalowa przekładnia zębata, która umożliwia płynny ruch serwomechanizmu. Sterowanie napędem odbywa się za sprawą wbudowanego sterownika. W zależności od dostarczonego sygnału PWM (ang. *Pulse Width Modulation*) determinuje on ruch silnika. Sterowanie

sygnałem PWM oznacza metodę modulacji sygnału prostokątnego poprzez regulację szerokości impulsu. Pozwala to na uzyskanie dowolnego położenia w zakresie ruchu serwomechanizmu. Typowy sygnał sterujący serwomechanizmem ma okres 20 ms, natomiast szerokość impulsu zmienia się w zakresie od 1ms do 2ms – od minimalnego do maksymalnego wychylenia. Impuls o szerokości 1,5 ms ustawia serwomechanizm w położeniu centralnym.

Pierwszym etapem składania konstrukcji było przytwierdzenie serwomechanizmów do drewnianej podstawy. W tym celu na krawędzi nawiercono otwory do których, za pomocą śrub, przymocowano metalowy uchwyt, w którym zamontowano serwomechanizm odpowiadający za ruch panelu w poziomie. Następnie, analogicznie zamocowano drugi serwomechanizm, który determinował ruch w pionie. Na rysunku 2 przedstawiono podstawę wraz z przytwierdzonym napędem.



**Rys.2.** Serwomechanizmy MG946R przytwierdzone do podstawy



**Rys. 3.** Konstrukcja automatycznego panelu słonecznego

Kolejnym etapem konstrukcji było przytwierdzenie panelu słonecznego do płyty czujników. W tym celu wykorzystano specjalne otwory w metalowej konstrukcji panelu i przykręcono go za pomocą śrub przez otwory wywiercone w płycie. Następnie połączono konstrukcję poprzez przykręcenie płyty czujników do uchwyty serwomechanizmu odpowiadającego za ruch w pionie. Gotową konstrukcję przedstawiono na rysunku 3.

### 3. PROJEKT I WYKONANIE CZĘŚCI ELEKTRONICZNEJ

Główną jednostką sterującą obiektu jest płytka Arduino Leonardo, która posiada wbudowany mikrokontroler ATmega32u4 o maksymalnej częstotliwości zegara wynoszącej 16 MHz. Układ zasilany jest napięciem 5 V z portu szeregowego USB (ang. *Universal Serial Bus*) komputera. Posiada 20 cyfrowych wejść/wyjść, z czego 7 może zostać wykorzystane jako PWM do zasilania serwomechanizmów. Ważną funkcję spełniają wejścia analogowe, które pozwalają na zbieranie i przetwarzanie danych z urządzeń pomiarowych. Płytka pełni rolę regulatora w układzie regulacji. Odpowiedzialna jest za zbieranie pomiarów, przetwarzanie informacji i wystawianie sygnałów sterujących. Jednostka sterująca decyduje o ruchu serwomechanizmów w zależności od wybranego algorytmu oraz odczytu z urządzeń pomiarowych

Odpowiednie zasilanie pełni kluczową rolę w poprawności działania całego układu. Zasilenia wymagają trzy elementy tego obiektu: jednostka sterująca, napęd oraz urządzenia pomiarowe. Zdecydowano się na zastosowanie dogniazdkowego zasilacza impulsowego. Napięcie wyjściowe zasilacza wynosi 12 V, co jest wartością za wysoką dla zastosowanych serwomechanizmów. W celu poprawności działania zastosowano przetwornicę step-down XL4015, która umożliwia obniżenie napięcia uzyskanego z zasilacza. Przetwornica posiada dwa potencjometry, które umożliwiają regulację prądu oraz napięcia wyjściowego.

W celu pomiaru aktualnego nasłonecznienia na panelu zdecydowano się na wykorzystanie fotorezystorów GL5616. Zastosowanie urządzeń pomiarowych umieszczonych w rogach płyty czujników umożliwi ustalenie, w którym miejscu panelu nasłonecznienie jest największe, a co za tym idzie, w którą stronę powinny poruszać się serwomechanizmy. Wykorzystany fotorezystor o rezystancji jasnej od 5 k $\Omega$  do 10 k $\Omega$  może pracować w zakresie temperatur od -30°C do +70°C, co zapewnia poprawną pracę przy wykorzystaniu go na zewnątrz. Niewielkie rozmiary wynoszące 5x2 mm umożliwiają łatwy montaż na płycie czujników.

Odbiornik podczerwieni wykorzystano w celu umożliwienia sterowania manualnego za pomocą pilota. Zdecydowano się na pilot IR NEC 38 kHz oraz odbiornik podczerwieni 1838T. Zastosowanie opisywanego modułu umożliwia przede wszystkim bezprzewodową komunikację użytkownika z jednostką sterującą w manualnym trybie sterowania. Zastosowanie komunikacji w paśmie podczerwieni z wykorzystaniem standardu RC5 jest prostym i tanim rozwiązaniem.

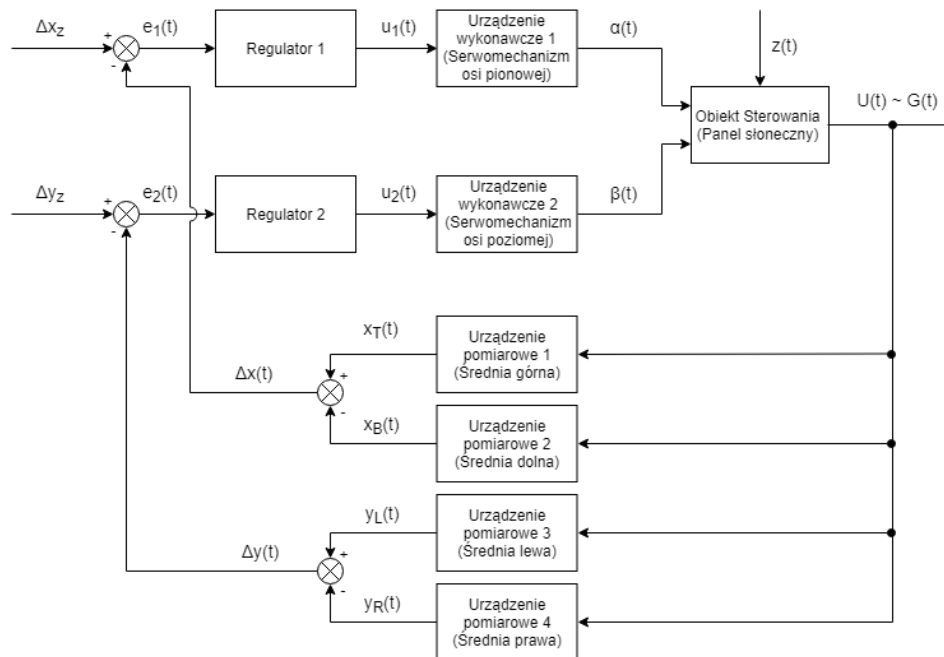
Zegar czasu rzeczywistego zastosowano w celu zrealizowania sterowania szczegółowo opisanego w sekcji czwartej. Wykorzystany moduł zawiera zegar DS1302. Pozwala na odczyt czasu w postaci godziny, minuty i sekundy oraz daty: miesiąc, dzień, rok. Interfejsem komunikacyjnym jest magistrala SPI (ang. *Serial Peripheral Interface*), która służy do dwukierunkowej transmisji danych w układzie master-slave. Magistrala jest trójprzewodowa, składa się z dwóch linii przesyłających dane oraz linii z sygnałem taktującym.

#### 4. PROJEKTOWANIE ALGORYTMÓW STEROWANIA

Najczęściej stosowanymi algorytmami są algorytmy różnicowe oraz zegarowe. Niekiedy jako funkcję diagnostyczną stosuje się także algorytm ręczny. W projekcie zdecydowano się na implementację wszystkich wyżej wymienionych algorytmów.

**Algorytm różnicowy** jest podstawowym automatycznym algorytmem działającym w pętli sprzężenia zwrotnego. Ideą jego działania jest utrzymywanie pozycji panelu słonecznego w taki sposób, aby uzyskać i utrzymać jak największą ilość padającego na niego światła. Dzięki temu możliwa jest stała optymalizacja pracy panelu, co z kolei przekłada się na większą ilość uzyskiwanej energii. Zasadą działania algorytmu różnicowego jest praca w oparciu o dane zbierane przez urządzenia pomiarowe – fotodetektory. Zwykle przyjmuje się, że do najlepszego działania tego algorytmu jest potrzebne po jednej parze czujników na każdą z osi: poziomą i pionową [7]. Taki układ regulacji dzieli się na dwa mniejsze (działające na ten sam obiekt sterowania), w których wartościami zadanymi w idealnym przypadku są zerowe różnice wartości pomiarów urządzeń pomiarowych dla każdej z osi. W praktyce zerowe odchylenie powodowałoby ciągłą pracę układów napędowych, co mogłoby generować dodatkowe straty energii. Ma to związek z określoną czułością fotodetektorów. W celu uniknięcia tych strat, w układzie regulacji stosuje się ograniczenie w postaci histerezy. Ostatecznie układy napędowe mechanizmu są wysterowane w sposób umożliwiający uzyskanie równomiernego rozłożenia natężenia światła na płycie czujnikowej. W roli urządzeń pomiarowych wykorzystano cztery fotorezystory o rezystancji 5-10 k $\Omega$ . Elementy te połączone są w specjalnie zaprojektowanym układzie elektronicznym wraz z rezystorami o wartości rezystancji 100  $\Omega$  (po jednym na każdy z czujników), które pozwalają na stworzenie dzielnika napięcia. Dzięki temu możliwy jest bezpośredni pomiar wartości napięcia na fotodetektorze poprzez podanie go na wejście analogowe jednostki sterującej Arduino. Na podstawie schematu, wymienione elementy fizyczne połączono w układ ze wspólną masą na płycie czujnikowej. Informacje o naświetleniu przetwarzane są w układzie mikroprocesorowym, który posiada wgrany algorytm różnicowy. Ze względu na fakt, iż każde z urządzeń pomiarowych umieszczone jest na innej krawędzi płyty czujnikowej, działanie układu opiera się o programowe obliczanie średnich wartości każdej z par czujników umieszczonych obok siebie. Dzięki takiemu rozwiązaniu otrzymywane są wartości pozwalające na porównywanie danych w osiach pionowej oraz poziomej. Schemat układu regulacji takiego rozwiązania przedstawiono na rysunku 4. Ideą tego schematu jest założenie, że większa wartość napięcia na zaciskach panelu słonecznego jest uzyskiwana w momencie, gdy większa jest rów-

niez wartość natężenia światła padającego na panel fotowoltaiczny. Z kolei natężenie tego światła wpływa na rezystancje urządzeń pomiarowych, których interpretacją jest napięcie powstałe na fotodetektorach. Dla uproszczenia tego schematu założono również, że sygnałami pomiarowymi będą wartości średnie obliczane na podstawie rzeczywistych fizycznych urządzeń, którymi są fotodetektory.



**Rys.4.** Schemat układu regulacji algorytmu różnicowego

Wgrany program różnicowy porównuje informacje pomiarowe dla obu osi niezależnie od siebie. Wcześniej obliczone średnie z przeciwległych stron płyty porównywane są ze sobą poprzez obliczenie ich różnicy bezwzględnej. Jeśli ta różnica jest większa od założonej wartości histerezy, algorytm znajduje większą wartość z dwóch porównywanych. Kolejno serwomechanizm dla odpowiedniej osi zostaje wysterowany o określony kąt w stronę wyższej wartości pomiarowej. Proces ten trwa do momentu wyrównania obu porównywanych wartości z uwzględnieniem histerezy. Model rzeczywisty charakteryzuje się tym, że wszelkie bodźce środowiskowe mogą znacznie wpływać na pracę układu. Biorąc pod uwagę fakt, iż taki panel zwykle znajduje się na zewnątrz budynku, jest on narażony na wszelkie wpływy warunków atmosferycznych. Wynikające z warunków pogodowych siły zewnętrzne, spowodowane np. wiatrem lub deszczem mogą utrudniać pracę układu, powodować straty energii związane z dużą czułością serwomechanizmów na przykładany do nich moment siły. Algorytm sterujący nie uwzględnia wynikającej z powyższych aspektów dynamicznej zmiany wartości pomiarowych. Histereza działania w takim momencie jest identyczna, jak przy działaniu klasycznym, co może powodować ich nieustanne ustalanie się w prawidłowej pozycji powodując straty. Na zakłócenia podatne są również urządzenia pomiarowe, które charakteryzują się wysokim zakresem odbieranych fal elektromagnetycznych światła widzialnego. Z tego powodu reagują na częste zmiany światła, które w praktyce są nieodłącznym elementem funkcjonowania takiego układu. Przesłonięcia

oraz większe lub mniejsze zachmurzenia mogą zafałszować praktyczne ułożenie Słońca względem teoretycznego, które jest identyfikowane poprzez urządzenia pomiarowe.

Kolejnym zaimplementowanym algorytmem był **algorytm zegarowy**, który daje możliwość stworzenia sterowania nadążnym układem sterowania panelem słonecznym bez potrzeby stosowania sprzężenia zwrotnego. Takie rozwiązanie eliminuje wszelkie zakłócenia związane z niedokładnością urządzeń pomiarowych, ponieważ ich nie posiada. Działanie układu opiera się o obliczenia matematyczne zawarte we wnętrzu regulatora.

Na podstawie podanych parametrów takich jak szerokość geograficzna, dzień oraz godzina, zaimplementowane w algorytmie sterowania, wzory pozwalają na obliczenie parametrów położenia słońca, co daje pełną możliwość wysterowania układu w obu osiach. Znaczną wadą takiego rozwiązania jest konieczność bardzo precyzyjnego montażu panelu, który będzie zapewniał fizyczną możliwość podążania za ruchem słońca [8].

Pełne położenie słońca opisują dwie zależności: jego wysokość nad horyzontem  $h$  oraz azymut  $\alpha_h$ . Wysokość  $h$  w rzeczywistości jest kątem między płaszczyzną horyzontu a słońcem, natomiast azymut  $\alpha_h$  jest kątem między rzutem kierunku Słońca na płaszczyznę horyzontu a kierunkiem północnym [8].

Przyjmuje się, że północ jest zerowym stopniem azymutu, natomiast pozostałe kierunki to kąty rosnące przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, tj.: wschód to  $90^\circ$ , południe  $180^\circ$ , zachód  $270^\circ$ . Ze względu na fakt, iż sterowanie odbywa się w pętli otwartej konieczne jest obliczanie pozycji słońca za którą podążać ma panel słoneczny. Niezbędne wzory przeniesione zostały do jednostki sterującej [7]:

$$S = 2\pi * \frac{\varphi}{180} \quad (1)$$

$$t = 2\pi * \frac{(\text{dzień}-1)}{365} \quad (2)$$

$$D = ((0,322003 - 22,971 * \cos(t) - 0,357898 * \cos(2t) - 0,14398 * \cos(3t) + 3,94683 * \sin(t) + 0,019334 * \sin(2t) + 0,05928 * \sin(3t)) * \frac{\pi}{180} \quad (3)$$



$$W \quad (4)$$

$$= \arcsin(\sin(D) \sin(S) + \cos(D) \cos(S) \cos(15(czas - 12))) * \frac{\pi}{180}$$

$$A = (\arccos((\cos(S) \sin(D) - \cos(D) \sin(S) \cos(15(czas - 12))) * \frac{\pi}{180}))) / \cos(W) \quad (5)$$

gdzie:

S – szerokość geograficzna w radianach,

D – deklinacja Słońca,

W – wysokość,

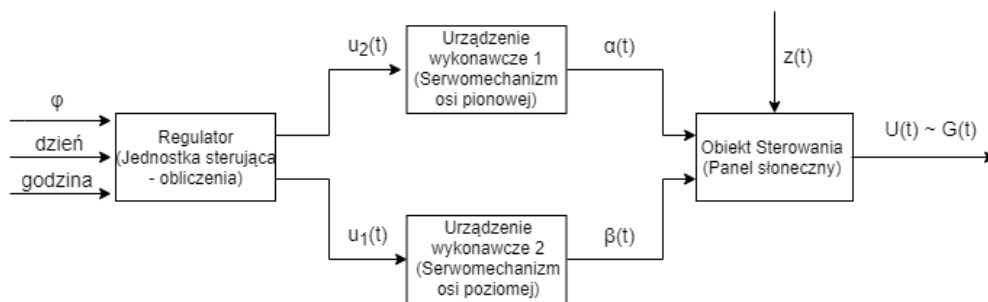
A – azymut,

Dzień – dzień roku (1-365),

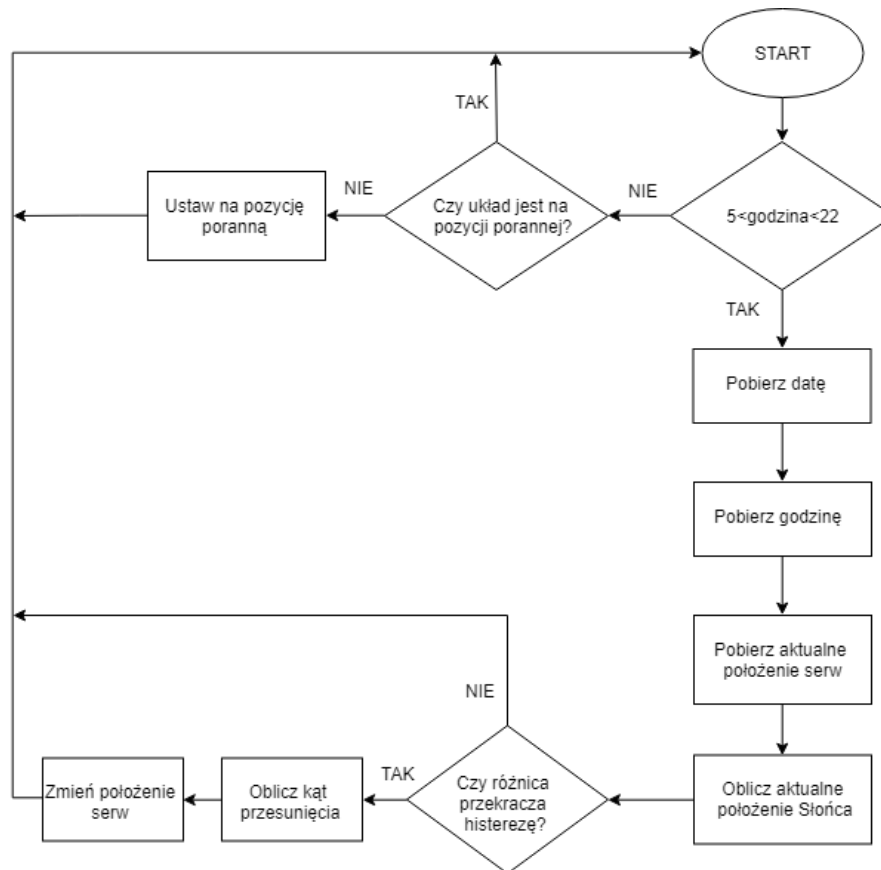
Czas – w godzinach (0-23),

$\varphi$  – szerokość geograficzna w stopniach (dla Gdańska stała wartość  $54^\circ$ ).

W konstrukcji paneluysterowanie układu odbywa się za pomocą dwóch serwomechanizmów sterowanych w osi pionowej oraz poziomej (patrz rysunek 5). Jako stałe parametry przyjęto wartość okresu, co jaki zmieniany jest kątysterowania oraz szerokość geograficzną dla Gdańska, wynoszącą  $54^\circ$ . Zmiennymi są czas i dzień, które odczytywane są przy pomocy specjalnego modułu zegara czasu rzeczywistego opisanego w sekcji trzeciej. Poza tym układ nie wymagał montażu dodatkowej elektroniki oraz przyrządów pomiarowych, co dla elektrowni większych skali może znacznie zmniejszyć koszt inwestycji.



**Rys. 5.** Schemat układu regulacji algorytmu zegarowego



**Rys. 6.** Schemat blokowy algorytmu zegarowego

Ostatecznie opracowano program, działający w pętli zawierającej wszystkie równania pozwalające na obliczenie kątów sterowania serwonapędów. Pętla wykonywana jest co stały okres określony parametrycznie, jednak nie trwający mniej niż jedna godzina ze względu na specyfikę równań. Zasadę działania algorytmu przedstawiono na schemacie blokowym na rysunku 6.

Umieszczenie panelu słonecznego należy rozważać jako centrum układu horyzontalnego [8]. Bardzo istotnym elementem jest odpowiednie jego umieszczenie tak, aby położenie serwomechanizmów w pełni odzwierciedlało położenie Słońca.

W warunkach, w których układ został stworzony oraz testowany, zrealizowano to przedstawieniem płyty panelu razem z podstawą. Po zaimplementowaniu i wgraniu algorytmu do jednostki sterującej, układ wysterował się na pozycję dla danego dnia oraz godziny. Następnie panel przesunięto w taki sposób, aby jego powierzchnia znajdowała się w możliwie najbardziej równoległym położeniu w stosunku do tarczy słońca. Taki sposób może powodować nieoptymalne efekty pracy ze względu na niedokładność ułożenia konstrukcji, która do osiągnięcia najlepszych wyników potrzebuje bardzo dużej precyzji, co w praktyce dla większych elektrowni często wiąże się ze wzrostem kosztów montażu. Wadą takiego rozwiązania jest również fakt, iż konstrukcje w taki sposób można ustawić wyłącznie

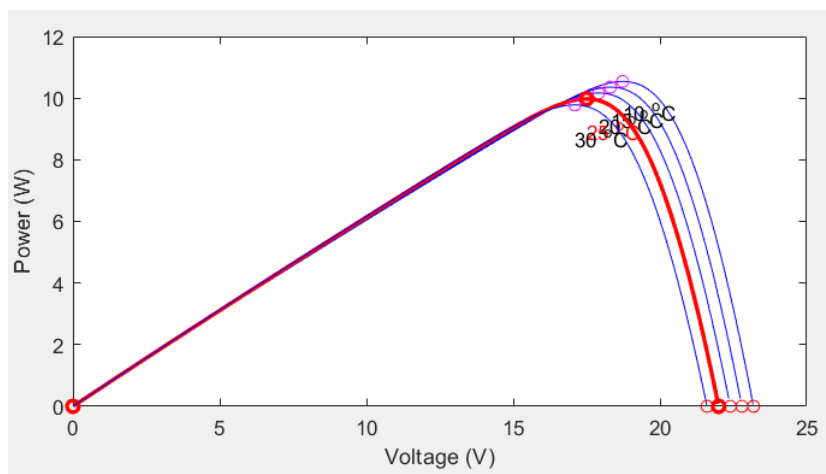
w trakcie dnia słonecznego, kiedy widoczne jest dokładne położenie słońca. Natomiast dokładniejszym sposobem jest wysterowanie serwonapędu osi pionowej w punkcie charakterystycznym dla danego kierunku geograficznego. Następnie przy pomocy urządzenia precyzyjnie wskazującego dany kierunek (np. kompas) należy ustawić panel w dokładnie tym kierunku.

Ostatnim algorytmem zaimplementowanym w jednostce sterującej jest algorytm **sterowania ręcznego**. Umożliwia on bezpośrednio ustawienie położenia panelu bez konieczności wykorzystywania automatycznych algorytmów regulacji. Niezbędny jest wyłącznie odpowiedni układ elektryczny z prostym algorytmem sterowania ręcznego. Nie jest to tryb, który będzie samodzielnie zapewniał optymalną pracę panelu. Jego celem jest natomiast naniesienie ewentualnych poprawek przy innych algorytmach. Sterowanie powinno być zapewnione we wszystkich kierunkach dla obu osi: dla osi pionowej (góra i dół), dla osi poziomej (prawo i lewo). W celu spełnienia powyższego założenia i zaimplementowania algorytmu sterowania ręcznego w jednostce sterującej, należało w pierwszej kolejności dokonać wyboru metody sterowania. Zdecydowano, że w tym celu zostanie wykorzystany moduł podczerwieni połączony z jednostką sterującą, który odbierając sygnały z synchronizowanego pilota, prześle je do jednostki sterującej z zaimplementowanym algorytmem. Wybrano moduł podczerwieni 1838T wraz z dopasowanym do niego pilotem serii IR NEC 38kHz. Komunikacja między komponentami odbywa się za pomocą protokołu RC5. Sterowanie odbywa się przy pomocy czterech przycisków dla każdego z kierunków. Przyciski zostały dobrane tak, aby sterowanie odbywało się intuicyjnie dla operatora stojącego z tyłu panelu: przyciski 1 i 2 zostały użyte do sterowania osią pionową, gdzie 1 – góra, 2 – dół, natomiast przyciski 3 i 4 do sterowania osią poziomą: 3 – lewo, 4 – prawo.

## 5. BADANIA TESTOWE

Badania panelu słonecznego Celine CL010-12P rozpoczęto od wyznaczenia charakterystyk. W tym celu wykorzystano bibliotekę Simscape w oprogramowaniu Matlab/Simulink, która umożliwia badanie paneli słonecznych, uprzednio wprowadzając parametry ogniwa takie jak napięcie obwodu otwartego, napięcie przy maksymalnej mocy, liczba ogniw w panelu, prąd zwarcia oraz prąd w punkcie mocy maksymalnej.

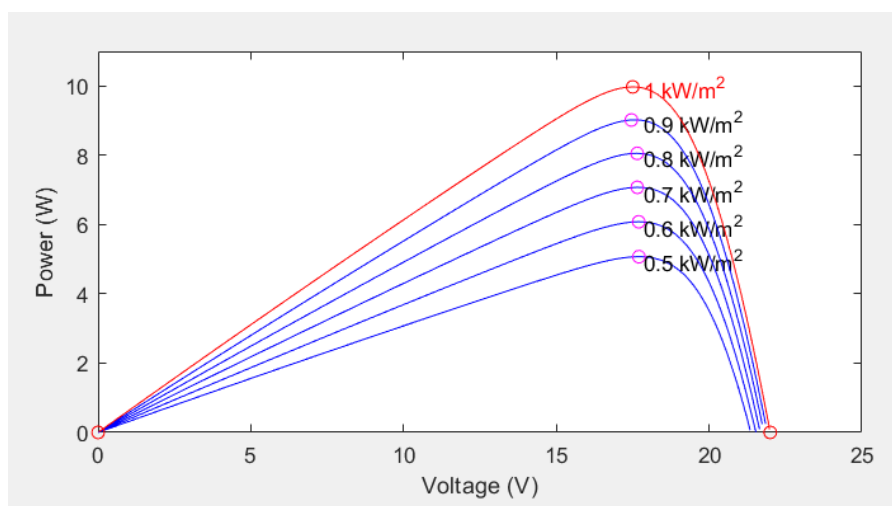
Oprogramowanie Matlab/Simulink umożliwia wybór warunków atmosferycznych dla których wykreślone będą charakterystyki. W celu zbadania wpływu temperatury ogniwa na jego moc wykreślono charakterystyki dla nasłonecznienia  $1000 \text{ W/m}^2$  oraz temperatur z zakresu od  $10^\circ\text{C}$  do  $30^\circ\text{C}$  co  $5^\circ\text{C}$  (rysunek 7).



**Rys. 7.** Charakterystyki moc-napięcie panelu słonecznego dla różnych temperatur

Moc otrzymywana z panelu rośnie liniowo do pewnego momentu niezależnie od temperatury. Następnie krzywa osiąga ekstremum. Punkty maksymalnej mocy zaznaczone zostały czerwonym kółkiem. Chcąc uzyskać maksymalną moc, należy z wykresu odczytać wartość napięcia dla którego funkcja osiąga maksimum. Z charakterystyk można odczytać również wpływ temperatury na moc ogniwa – wraz ze spadkiem temperatury ogniw rośnie moc maksymalna [9]. Wobec powyższego bardzo częstą praktyką jest stosowanie odpowiedniego chłodzenia paneli słonecznych.

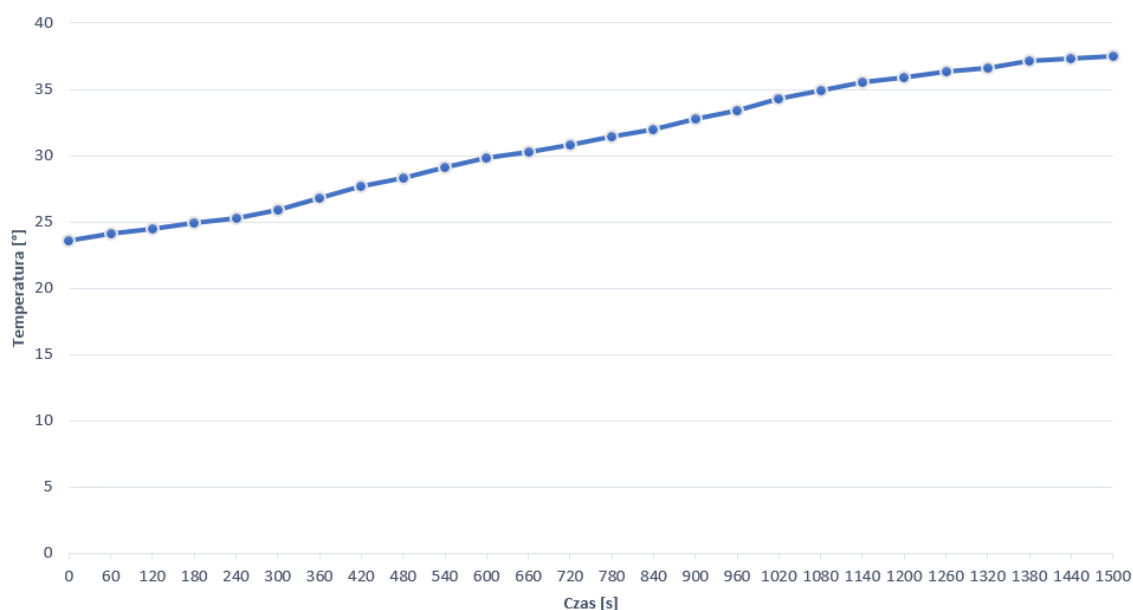
Istotnym czynnikiem mającym wpływ na pracę panelu słonecznego jest również nasłonecznienie. W celu zbadania zmian wyznaczono charakterystyki pokazane na rysunku 8. Zdecydowano się na badanie symulacyjne przy temperaturze 25°C oraz wzrastającym nasłonecznieniu zaczynając od 500 W/m<sup>2</sup> do 1000 W/m<sup>2</sup> co 100 W/m<sup>2</sup>.



**Rys. 8.** Charakterystyki moc-napięcie panelu słonecznego dla różnego nasłonecznienia

Z wyznaczonych charakterystyk można wywnioskować, iż punkt maksymalnej mocy dla każdego z przypadków osiągany jest dla takiej samej wartości napięcia. Różnica natomiast polega na różnej wartości mocy w punkcie maksymalnym. Nasłonecznienie ma więc istotny wpływ na moc otrzymaną z panelu słonecznego.

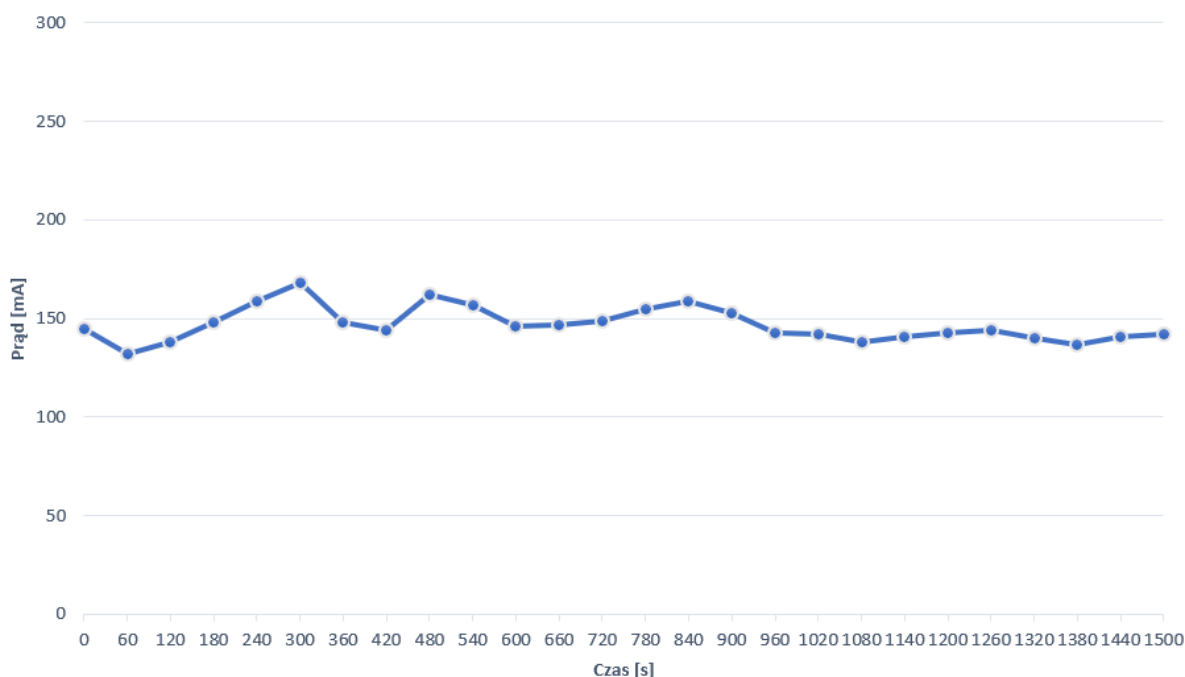
Badania i testy dotyczyły kilku istotnych parametrów, wpływających na jakość pracy ogniwa fotowoltaicznego. Ze względu na niesprzyjającą badaniom porę roku, w trakcie której poziom naturalnego nasłonecznienia jest bardzo ograniczony, zdecydowano się na użycie lamp oświetleniowych. Warunki pozwoliły na stworzenie skupionego oświetlenia o natężeniu światła o mocy około  $120 \text{ W/m}^2$ . Temperatura otoczenia wynosiła około  $25^\circ\text{C}$ . Każde z badań czasowych wykonywano przez około 1500 sekund w odstępach czasowych wynoszących około 60 sekund. Badania zostały przeprowadzone równolegle w taki sposób, aby zaobserwować zmiany różnych typów parametrów w tych samych warunkach, co mogłoby pozwolić na porównanie zależności między nimi. W pierwszej kolejności zbadano proces nagrzewania się fotoogniwa. Przebieg zmian przedstawia rysunek 9.



**Rys. 9.** Wykres nagrzewania fotoogniw

Fotoogniwo przez około 1500 sekund nagrzało się o około  $15^\circ\text{C}$ . Proces ten przez cały czas trwania badania jest zbliżony do liniowego, temperatura stabilizuje się przy około  $37^\circ\text{C}$ . W stosunku do względnie niewielkiego odstępu czasu wzrost temperatury jest znaczny, stąd można wysunąć wniosek, iż warto proces chłodzenia wdrożyć jak najszybciej po wystawieniu fotoogniwa na działanie światła. Ponieważ jak wynika z testów symulacyjnych, wzrost temperatury fotoogniwa ma znaczny wpływ na moc wytwarzaną przez panel, chłodzenie go jest istotnym czynnikiem w procesie optymalizacji pracy.

Równolegle zbadano przebieg zmian wartości prądu na fotoogniwie (rysunek 10).



**Rys. 10.** Wykres natężenia prądu podczas nagrzewania

W pierwszej części wykresu widoczne są niewielkie wahania wartości natężenia wytwarzanego prądu. Przed ustabilizowaniem temperatury fotoogniw, prąd uzyskiwany na nich oscyluje wokół wartości około 150 mA, natomiast po około 900 sekundach stabilizuje się na wartości około 140 mA.

## 6. PODSUMOWANIE

Celem powyższego artykułu było przedstawienie procesu powstawania automatycznego panelu słonecznego. Automatyczne panele słoneczne w coraz większej ilości publikacji przedstawiane są jako przyszłość OZE, co z pewnością przełoży się na wzrost liczby podobnych konstrukcji. Proces budowy składał się z kilku etapów. Początkowo prace skupiały się na zaprojektowaniu całej konstrukcji. Następnie skupiono się na dobraniu odpowiednich komponentów mechanicznych oraz elektronicznych. W kolejnych sekcjach artykułu przedstawiono proces powstawania konstrukcji wraz z częścią elektroniczną. Ostatnim krokiem było zaimplementowanie wybranych algorytmów sterowania w jednostce sterującej. Wykonana konstrukcja umożliwia ruch w dwóch płaszczyznach: pionowej oraz poziomej. Dzięki temu maksymalizuje się wykorzystanie natężenia promieniowania słonecznego.

W projekcie w pełni zrealizowano wszystkie założone algorytmy sterowania i potwierdzono poprawność ich działania. Ponadto wykonano także badania symulacyjne obejmujące wyznaczenie charakterystyk panelu.

Dalsze prace nad projektem zakładają modyfikację założeń konstrukcyjnych, które aktualnie nie pozwoliły na osiągnięcie maksymalnej sprawności układu. Pomimo obliczeń teoretycznych, konstrukcja fizyczna okazała się nieoptymalnie wyważona, co spowodowało zbyt duże straty powstałe przez energię pobieraną przez napędy osi. Poza tym, w celu usprawnienia jakości wykonywanych ruchów przez układy napędowe oraz implementacji innych algorytmów sterowania planuje się także wymienić jednostkę sterującą na mikroprocesor o większej mocy obliczeniowej.

W najbliższej przyszłości przeprowadzone zostaną testy sprawności działania układu pod kątem mocy wytwarzanej przez panel. W momencie, gdy nasłonecznienie jest zbyt niskie, osiągi tak małego panelu są adekwatnie niewielkie, dlatego tego typu badania, dla uzyskania mierzalnych wyników, warto przeprowadzać w lepszych warunkach nasłonecznienia.

## LITERATURA

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy nr 2009/28/WE
- [2] Instytut Energetyki Odnawialnej, Nowy raport IEO – Rynek fotowoltaiki w Polsce 2018
- [3] W. Janik, H. Kaproń, A. Paździor: *Uwarunkowania rozwoju produkcji energii elektrycznej na bazie źródeł odnawialnych*, Rynek Energii – 2/2018
- [4] Łotocki H.: *ABC systemów fotowoltaicznych sprzężonych z siecią energetyczną. Poradnik dla instalatorów*. Wydawnictwo KaBe, Krosno 2011
- [5] Sarniak M.: *Podstawy fotowoltaiki*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008
- [6] Trzasko W.: *Analiza wydajności dwuosiowego solarnego układu nadążnego*. Pomiary Automatyka Robotyka Nr 1/2018
- [7] Bogalecka E., Kołodziejek P.: *Układy śledzenia pozycji słońca*, Laboratorium Układów Sterowania Niekonwencjonalnymi Źródłami Energii
- [8] Wytryszczak I.: *Wykład z podstaw astronomii* [on-line] <https://vesta.astro.amu.edu.pl/Staff/Iwona/geograf.pdf> (data dostępu 27.11.2018)
- [9] Phywe: *Characteristic curves of a solar cell*. [on-line] <https://www.phywe.com/en/characteristic-curves-of-a-solar-cell.html>
- [10] Pstraś L.: *Metodyka analizy rentowności inwestycji fotowoltaicznych*. Rynek Energii 2014, Nr 1(110)
- [11] Chwieduk B.: *Analiza energetyczna i ekonomiczna współpracy instalacji fotowoltaicznej z pompą ciepła*. Rynek Energii – 10/2017

# DESIGN, REALIZATION AND PROGRAMMING OF THE PHOTOVOLTAIC PANEL

**Keywords:** mechatronics, photovoltaic panel, designing, controlling

**Summary.** Renewable energy sources are becoming more and more popular. The photovoltaic market in recent years has significantly increased its share in meeting the increased energy demand of all industries and national economies. The current stage of technological development seeks to maximize the efficiency of converting solar energy into electricity. The dynamically developing automation allows for the construction of systems, that in an optimal manner, without operator intervention, will ensure the setting of panels towards the sun. Therefore, the task of tracking systems is to track the movement of the sun in order to increase the solar energy provided to the panel, which in effect leads to the maximum amount of electricity acquired. The purpose of the following work is to present the process of making a solar panel equipped with an automatic follow-up system.

**Hubert Sawicki**, inż., Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, absolwent inżynierskich studiów I stopnia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (automatyka i robotyka). Główne obszary zainteresowań dotyczą zaawansowanych metod sterowania procesami przemysłowymi przy pomocy komputerowych systemów sterowania oraz projektowania i wykonywania paneli operatorskich.

E-mail: sawickihk@gmail.com

**Robert Piotrowski**, dr hab. inż., Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Elektrotechniki, Systemów Sterowania i Informatyki, absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. W roku 2005 uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka i robotyka. W roku 2018 uzyskał stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie naukowej automatyka i robotyka. Zawodowo związany z Katedrą Elektrotechniki, Systemów Sterowania i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Główne obszary zainteresowań dotyczą modelowania i zaawansowanych metod sterowania procesami przemysłowymi. E-mail: robert.piotrowski@pg.edu.pl