

## Mikroprocesorowy sterownik położenia kolektorów i baterii słonecznych\*

**Streszczenie:** Od kiedy w 1767 r. Szwajcar Horace-Bénédict de Saussure zbudował pierwszy kolektor słoneczny, nazwany „gorącą skrzynią”, rozpoczęła się era pozyskiwania energii promieniowania słonecznego na potrzeby ludzkości.

Po wielu latach po raz pierwszy zjawisko fotoelektryczne zaobserwował francuski fizyk Aleksander Edmond Becquerel w 1839 r., przeprowadzając badanie baterii elektrochemicznej. Burzliwy rozwój technologii półprzewodników na przełomie XX i XXI w. i w efekcie spadek cen ogniw solarnych skutkuje intensywnym rozwojem energetyki solarnej, w tym również realizacją prac mających na celu optymalizację procesu konwersji energii solarnej na energię elektryczną.

Artykuł poświęcony został opracowaniu systemu nadążnego umożliwiającego optymalne, ze względu na zysk energetyczny, ustawienie ogniwa solarnego w odniesieniu do kierunku padających promieni słonecznych. Przedstawiony został w nim system, algorytm jego pracy oraz wyniki wykonanych badań porównujących trzy tryby pracy modelu systemu śledzącego dzienny ruch Słońca.

**Słowa kluczowe:** promieniowanie słoneczne, system nadążny, energia odnawialna, mikrokontroler, ogniwo słoneczne, kalendarz astronomiczny, najjaśniejszy punkt.

### **Microprocessor controller of the solar tracking system**

**Summary:** Since 1767 when the Swiss scientists Horace-Bénédict de Saussure built the first solar collector, called the “hot box”, mankind’s attempts to harness solar energy began. Many years later in 1839 for the first time the photoelectric phenomenon was observed by the French physicist Alexander Edmond Becquerel while conducting scientific research on electrochemical battery. Rapid development in semiconductor technology at the turn of the XXI century and the subsequent drop in solar cell prices resulted in intensive solar energy evolution and growth, including projects that strived at optimizing the conversion of solar energy into electric one. This work aims at developing a solar tracker system that enables the most energy-efficient solar cell positioning towards sunlight. It describes the system itself along with its work algorithm and presents the results under three operation modes of the solar tracker system.

**Keywords:** solar radiation, tracker system, renewable energy, microcontroller, solar cell, astronomical calendar, brightest point.

## 1. Wstęp

Od początku XX w. obserwujemy gwałtowny rozwój techniki, a co za tym idzie – również rozwój przemysłu. Wspomniany rozwój ma głównie na celu podniesienie standardu życia człowieka. Powstające nowe urządzenia usprawniają i polepszają warunki życiowe, a tym samym jakość codziennego życia. Po kilkudziesięciu latach obserwujemy, że owszem, standard życia się poprawia, ale płacimy za to wysoką cenę. Działalność człowieka związana z pozyskiwaniem i przetwarzaniem energii to pasmo sukcesów, które niestety są porównywalne z poniesionymi porażkami. Najważniejsza to degradacja naturalnego środowiska spowodowana przez: kwaśne deszcze, emisję szkodliwych spalin, ścieki, odpady radioaktywne. Wprawdzie źródeł energii nieodnawialnej typu: węgiel, ropa, gaz nie zabraknie jeszcze przez kilka pokoleń, ale ilości odpadów generowanych przy ich wydobyciu i w procesach poprodukcyjnych środowisko naturalne bez ujemnych skutków już nie wchłonie. „Szacuje się, że nasza cywilizacja zużyła energię, która odpowiada ok. 500 mld tpu (tona paliwa umownego), przy czym ok. 2/3 tej energii zużyliśmy w ciągu ostatniego stulecia” [1].

Celem pracy było zaprojektowanie, zbudowanie i zaprogramowanie urządzenia sterującego opartego na mikrokontrolerze, śledzącego dzienny ruch Słońca oraz ustalającego optymalne położenie baterii i kolektorów słonecznych, prostopadle do padającego promieniowania.

Koncepcja budowy modelu zakłada „podążanie” ogniwa solarne za promieniowaniem słonecznym dzięki użyciu jednej z dwóch metod – metody bazującej na danych uzyskanych z kalendarza astronomicznego lub danych uzyskanych z układu śledzącego najjaśniejszy punkt na niebie. Panel solarny podąża za słońcem, dzięki temu, że posiada możliwość zmiany położenia w zakresie  $300^\circ$  w pozycji poziomej (azymut Słońca) oraz od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  w pozycji pionowej (elewacja Słońca). Badania wykonanego modelu przeprowadzono w Polkowicach w miejscu o współrzędnych: szerokość geograficzna  $51.502313^\circ$ , długość geograficzna  $16.054685^\circ$ . Przyjęto, że system ma działać w pełni automatycznie i zasilany będzie z sieci energetycznej.

Całość prac została podzielona na cztery etapy, jakimi są: projektowanie i budowa modelu, programowanie mikrokontrolera, opracowanie kalendarza astronomicznego dla wybranych współrzędnych geograficznych oraz – co najważniejsze – przeprowadzenie pomiarów kontrolnych.

Po określeniu struktury urządzenia i wstępnym dobraniu wszystkich elementów projekt mechaniczny został wykonany w programie Autodesk Inventor. Jako jednostkę sterującą wybrano mikrokontroler NUCLEO-F446RE ARM Cortex M4, który steruje dwoma silnikami krokowymi ustalającymi położenie ogniwa solarne w pionie i poziomie. W opracowanym oprogramowaniu założono możliwość wyboru przez użytkownika jednego z trzech trybów pracy, jakimi są: praca według kalendarza astronomicznego, śledzenie najjaśniejszego punktu na niebie, ustawienie nieruchome.

## 2. Energia promieniowania słonecznego

Perspektywa zmniejszających się zasobów nośników energii nieodnawialnej w skali światowej nie napawa optymizmem. Rozwój techniki i przemysłu stwarza coraz większe zapotrzebowanie na energię. Szacuje się, że naturalnych źródeł nieodnawialnych (węgla, ropy i gazu) wystarczy jeszcze na kilka pokoleń, ale w końcu się wyczerpią (tab. 1).

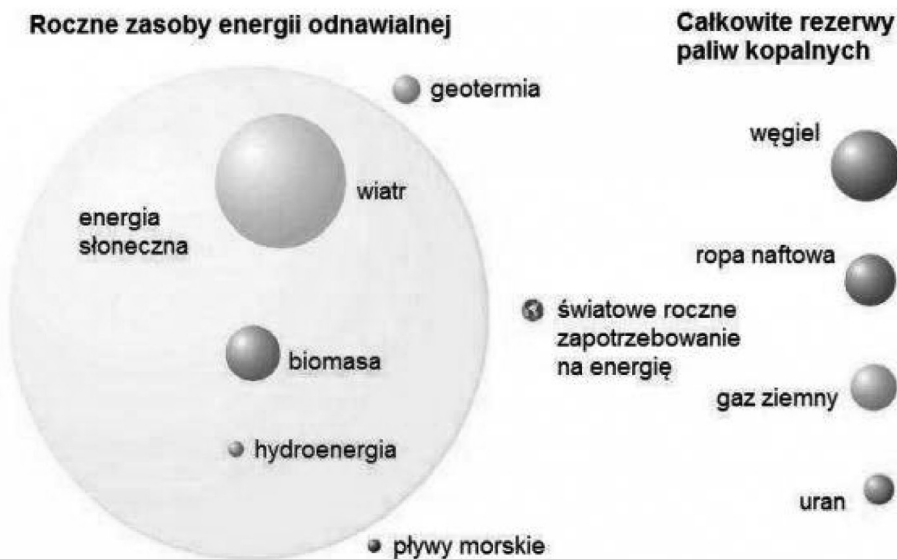
Tab. 1. Światowe udokumentowane zasoby przemysłowe konwencjonalnych surowców energetycznych i ich wystarczalność w 2005 r.

Surowce	Zasoby [mln toe]	Struktura zasobów [%]	Zużycie zasobów [mln toe]	Struktura zużycia [%]	Wystarczalność zasobów (R/P) [lata]
Węgiel	469 298	59,6	2 957,0	31,7	158
Ropa naftowa	159 644	20,3	3 861,3	41,4	41
Gaz ziemny	158815	20,1	2512,2	26,9	63

[toe] – tona oleju ekwiwalentnego

Źródło: [2].

Mając na uwadze, jak drogie i szkodliwe dla środowiska jest pozyskiwanie energii ze źródeł nieodnawialnych, należy stwierdzić, że jedyną i słuszną drogą okazują się być źródła energii odnawialnej z „liderującą” energią słońca. Jest to z naszej perspektywy niewyczerpalne źródło darmowej i ekologicznej energii.

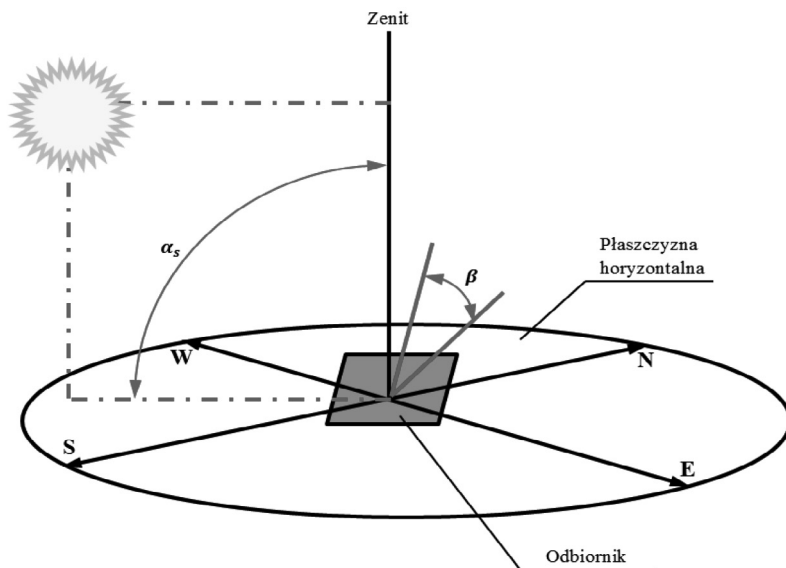


Rys. 1. Dostępne na świecie źródła energii [3]

Źródło: [3].

Moc strumienia energii słonecznej docierającego do naszej planety jest do 30 tys. razy większa (rys. 1) od mocy wszystkich urządzeń aktualnie zainstalowanych na Ziemi.

Urządzenie odbiorcze, na które pada promieniowanie słoneczne powinno zawsze być ustawione pod optymalnymi kątami, zarówno w płaszczyźnie pionowej (elewacja), jak i w płaszczyźnie poziomej (azymut), w taki sposób aby uzyskać maksymalny zysk energetyczny. Aby prawidłowo wyznaczyć optymalny kąt nachylenia odbiornika  $\beta_{opt}$ , należy wziąć pod uwagę, że kąt  $\beta$  zmienia się każdego dnia i w każdej godzinie (rys. 2) wraz ze zmianą położenia kąтового Słońca  $\alpha$ .



Rys. 2. Zależność pomiędzy kątem wysokości Słońca  $\alpha$  a kątem nachylenia odbiornika  $\beta$

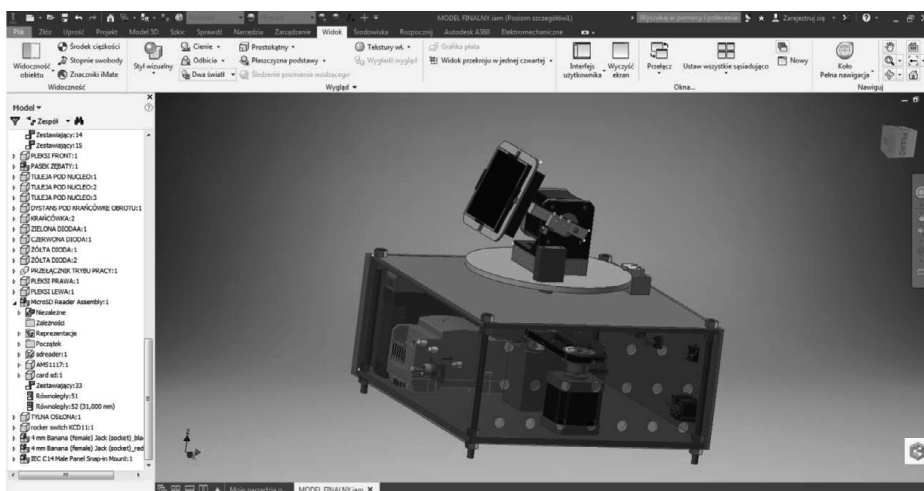
Źródło: [4].

Zmiana kąta  $\beta_{opt}$  w ciągu roku odbywa się w szerokim zakresie. Przyjmuje się, że wartość minimalna ( $25^\circ$ ) przypada na okres maj-lipiec, natomiast maksymalna ( $75^\circ$ ) w miesiącach zimowych. Z reguły kąt nachylenia odbiornika nieruchomego w okresie letnim wynosi  $15 \div 30^\circ$ , natomiast dla całego roku  $15 \div 45^\circ$ . Wskazane zależności pokazują dość spore rozbieżności w kwestii ustalenia najlepszego kąta. Niestety należy się liczyć z tym, że w przypadku systemów stacjonarnych (nieruchomych) energia promieniowania słonecznego nie zostanie wykorzystana w optymalny sposób. Aby uzyskać zadowalające wyniki, wykorzystuje się systemy nadążne (śledzące), które podążają za Słońcem, w formie jedno- lub dwuosiowej.

### 3. Budowa urządzenia

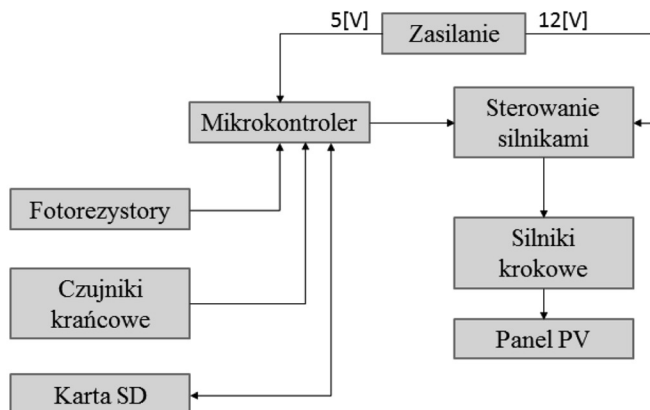
Źródłem zasilania są dwa zasilacze, z których pierwszy (5 V) jest odpowiedzialny za zasilanie mikrokontrolera, natomiast drugi (12 V) ma za zadanie zasilac silniki krokowe (schem. 1). Urządzeniem odpowiedzialnym za sterowanie jest mikrokontroler wraz ze sterownikiem silników krokowych. Dwie pary czujników optycznych, po dwa fotorezystory użyte w modelu, są odpowiedzialne za wykrywanie najjaśniejszego punktu na niebie. W opracowanym modelu zastosowano inkrementowany system sterowania silników, co przy wyłączeniu zasilania silników krokowych skutkuje utratą informacji o aktualnym położeniu i powoduje konieczność ustalenia pozycji odniesienia wyznaczonej przez dwa czujniki krańcowe, które określają odpowiednio dla silnika osi X (azymut) pozycję odniesienia równą  $180^\circ$  oraz dla silnika osi Z (elewacja) pozycję odniesienia równą  $0^\circ$ . Są to wartości, dzięki którym układ na podstawie aktualnej godziny i daty ustawia w odpowiednim położeniu panel fotowoltaiczny. Karta pamięci SD użyta w układzie odpowiedzialna jest za przechowywanie danych kalendarza astronomicznego. Głównym urządzeniem jest panel fotowoltaiczny PV zastosowany jako odbiornik promieniowania słonecznego.

W pierwszej kolejności został zaprojektowany model 3D urządzenia w programie Autodesk Inventor (rys. 3).



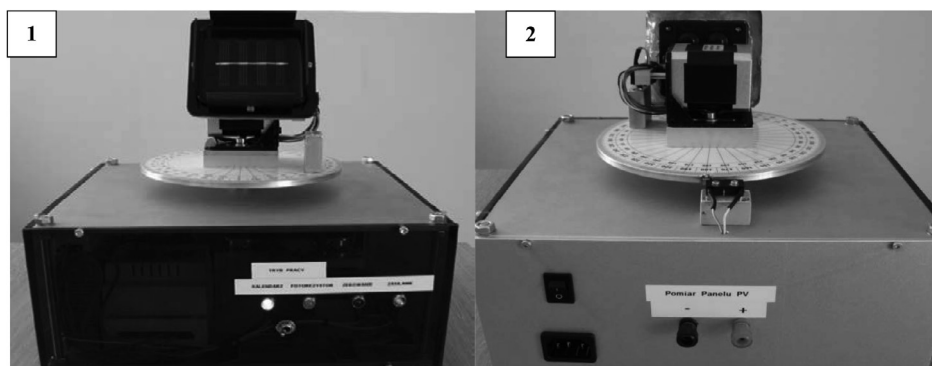
Rys. 3. Rzut przestrzenny modelu 3D wykonanego w programie Autodesk Inventor Professional 2017

Źródło: oprac. własne.



**Schem. 1.** Schemat blokowy urządzenia śledzącego dzienny ruch Słońca

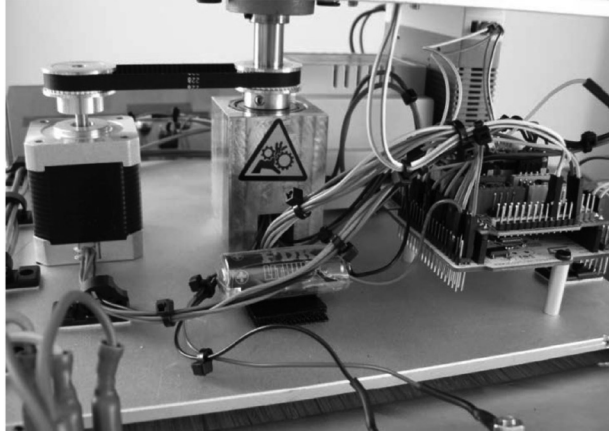
Źródło: oprac. własne.



**Fot. 1 i 2.** Finalna wersja urządzenia: 1 – przód urządzenia z wyborem trybu pracy; 2 – tył urządzenia z gniazdami do pomiaru napięcia na zaciskach panelu solarnego

Źródło: oprac. własne.

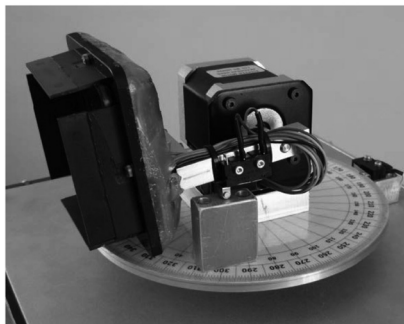
Elementem wykonawczym (fot. 3) nastawiającym położenie kątowe osi X (azymut) jest silnik krokowy, na wałku którego została zamontowana zębátka GT2 40/5. Następnie na środku dolnej płyty modelu został zamontowany, wykonany z aluminium, blok do osadzenia wałka napędowego  $\varnothing 12$  wraz z łożyskiem kulkowym. W łożysko został wpraszony wałek stalowy o średnicy zewnętrznej  $\varnothing 12$ , oraz o wewnętrznej średnicy  $\varnothing 10$ . Przez otwór przelotowy o średnicy  $\varnothing 10$  w wałku zostały poprowadzone przewody z górnej części modelu, aby uniknąć uszkodzenia przewodów podczas obrotu. Dodatkowo na wałku stalowym została zamontowana zębátka GT2 40/12. Obydwie zębátki zostały połączone paskiem zębátym GT2 o szerokości 6 mm.



**Fot. 3.** Napęd nastawiający położenie kątowe osi X (azymut)

Źródło: oprac. własne.

Na wystający poza obrys górnej płyty wałek stalowy  $\varnothing 12$  została zamontowana tuleja o średnicy wewnętrznej odpowiadającej średnicy wałka. Następnie do tulei został zamontowany talerz obrotowy (fot. 1 i 2). Na wierzchnią warstwę talerza została naniesiona podziałka kąтова w formie naklejki, pozwalająca określić aktualne położenie panelu PV, jak również ustawić pozycję początkową (zerową) silnika obrotu osi X (azymut). Na talerzu (fot. 4) został zamontowany element dystansowy, a następnie mocowanie stalowe typu L do silnika krokowego, do którego został przykręcony silnik krokowy odpowiedzialny za ruch w osi Z (elewacja). W kolejnym etapie na wałku silnika krokowego zostało zamontowane ramię łączące silnik z panelem PV w kształcie litery L, wykonane z aluminium, do którego docelowo został zamontowany panel fotowoltaiczny PV. Dodatkowo został wykonany i zamontowany na talerzu obrotowym element dystansowy współpracujący z wyłącznikiem krańcowym ustalającym położenie odniesienia w pionie.



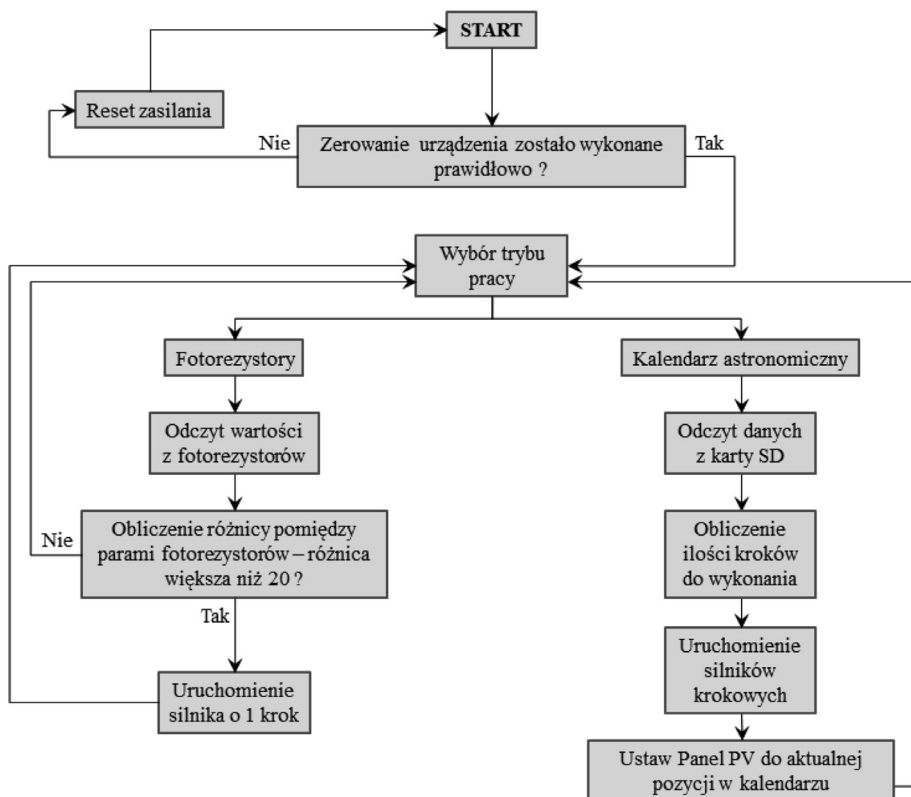
**Fot. 4.** Napęd nastawiający położenie kątowe osi Y (elewacja)

Źródło: oprac. własne.

## 4. Sterowanie i algorytm pracy

Ze względu na dużą uniwersalność i w konsekwencji możliwości rozbudowy, jako jednostkę sterującą wybrano mikrokontroler STM32 NUCLEO, który posiada wbudowany zegar czasu rzeczywistego (RTC), znacznie ułatwiający pracę. Istotna jest również funkcja odczytu danych z karty SD, która jest nieodzownym elementem projektu, przechowującym dane kalendarza astronomicznego. Przy pomocy programu STM32 CubeMX została ustawiona konfiguracja portów i urządzeń peryferyjnych a następnie program sterujący pracą modelu został napisany w języku C przy użyciu narzędzia Eclipse IDE for C/C++ Developers.

Na mikrokontrolerze zainstalowany został sterownik silników krokowych: nakładka CNC Shield wraz ze sterownikami Pololu A4988.



Schem. 2. Schemat blokowy algorytmu pracy modelu śledzącego dzienny ruch Słońca

Źródło: oprac. własne.



Algorytm pracy systemu został oparty na dwóch metodach śledzenia dziennego ruchu Słońca. Pierwsza metoda opiera się na obliczeniach położenia panelu w oparciu o kalendarz astronomiczny, natomiast druga polega na podążaniu panelu za najjaśniejszym punktem na niebie. Schemat blokowy algorytmu pracy modelu został przedstawiony na rysunku 8. Dodatkowo w programie mikrokontrolera została dodana trzecia metoda, tzw. stacjonarna, która posłużyła jedynie do wykonania badań. Stacjonarny tryb pracy jest wymuszany w programie na potrzeby badań, nie wchodzi w skład algorytmu jako wybór. W metodzie stacjonarnej panel ustawia się pod kątem  $35^\circ$  w osi Z (elewacja) oraz jest on skierowany bezpośrednio na południe w osi X (azymut).

Przetwornik analogowo-cyfrowy w wybranym mikrokontrolerze jest 12-bitowy i posiada zakres przetwarzania 0–3 V, co oznacza, że rejestr wyjściowy przetwornika przyjmuje 4096 stanów, co daje rozdzielczość przetwornika  $\Delta U_x = 0,7324$  mV. Sygnał z fotorezystancyjnego czujnika promieniowania przetwarzany jest na napięcie elektryczne w zakresie 0–3 V. Dla szybszej pracy urządzenia w programie zostało pominięte przeliczenie wartości napięcia przetwornika na natężenie światła. Optymalne ustawienie panelu występuje zatem przy maksymalnym napięciu sygnału uzyskiwanego z czujnika. W algorytmie pracy przyjęto dokonywanie zmian położenia silników wykonawczych o 1 krok po wystąpieniu różnicy 20 jednostek zawartości rejestrów przetwornika, co odpowiada wartości różnicy napięć 14,6 mV.

#### 4.1. Praca w oparciu o kalendarz astronomiczny

Zależności pozwalające na wyliczenie aktualnej pozycji Słońca, w określonym dniu, godzinie a nawet minucie są bardzo skomplikowane. Na potrzeby projektu skorzystano z istniejącego rozwiązania dostępnego bezpłatnie do prowadzenia badań. Plik o nazwie „NOAA\_Solar\_Calculations” został pobrany oraz dostosowany do ustalonej w pracy długości i szerokości geograficznej, wraz z uwzględnieniem strefy czasowej [5]. Plik przygotowany w taki sposób (tab. 2) został wgrany na kartę pamięci SD i zaimplementowany poprzez moduł czytnika kart microSD dla mikrokontrolera. W przygotowanym pliku kąt osi X (azymut) oraz osi Z (elewacja) zmienia się co 6 min. Jak można zauważyć, zmienność kąta we wskazanym odstępie czasu dla osi X wynosi średnio  $1,15^\circ$ , natomiast dla osi Z średnio  $0,91^\circ$ .

Tab. 2. Przykładowy plik zawierający obliczenia kalendarza astronomicznego

	A	B	C	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP
	<b>NOAA Solar Calculations - Change any of the highlighted cells to get solar position data for that location and date.</b>			Liczba porządkowa	Miesiąc	Dzień	Godzina	Minuta	Elewacja	Azymut
1				LP	MIEŚ	DZIEŃ	GODZ	MIN	K1	K2
2				1	5	13	6	0	6,63	68,54
3	Szerokość (+ to N)	51,5		2	5	13	6	6	7,49	69,67
4	długość (+ to E)	16,05		3	5	13	6	12	8,36	70,8
5	Time Zone (+ to E)	2		4	5	13	6	18	9,24	71,93
6				5	5	13	6	24	10,12	73,05
7	Date	2018-05-13		6	5	13	6	30	11,01	74,18
8				7	5	13	6	36	11,91	75,3
9				8	5	13	6	42	12,81	76,42
10				9	5	13	6	48	13,71	77,55
11				10	5	13	6	54	14,62	78,67
12				11	5	13	7	0	15,54	79,8
13				12	5	13	7	6	16,46	80,93
14				13	5	13	7	12	17,38	82,06
15				14	5	13	7	18	18,3	83,2
16				15	5	13	7	24	19,23	84,33
17				16	5	13	7	30	20,16	85,48
18				17	5	13	7	36	21,09	86,63
19				18	5	13	7	42	22,02	87,78
20				19	5	13	7	48	22,95	88,94
21				20	5	13	7	54	23,88	90,11
22				21	5	13	8	0	24,82	91,29
23				22	5	13	8	6	25,75	92,48
24				23	5	13	8	12	26,68	93,68
25				24	5	13	8	18	27,61	94,89
26				25	5	13	8	24	28,54	96,11

Źródło: oprac. własne.

## 5. Badania

Po uruchomieniu programu w pierwszej kolejności zostały sprawdzone prawidłowości nastaw kątów w osi X (azymut) oraz osi Z (elewacja). Układ zgodnie z założeniami przyjął położenie  $180^\circ$  w osi X oraz  $35^\circ$  w osi Z. Następnie potwierdzono prawidłowość kątów ustawionych w programie z realnymi wskazaniem na modelu.

Po potwierdzeniu prawidłowości działania modelu przystąpiono do wykonania niezbędnych pomiarów, które miały na celu pokazanie różnic pomiędzy trzema metodami podążania za Słońcem, które są stosowane dzięki trzem systemom. Są to:

- system stacjonarny (nieruchomy) ustawiony pod kątem  $180^\circ$  (południe) w osi X oraz pod kątem  $35^\circ$  w osi Z,
- system nadążny oparty na kalendarzu astronomicznym,
- system nadążny wykrywający najjaśniejszy punkt na niebie z wykorzystaniem fotorezystancyjnych czujników promieniowania.

W celu lepszego porównania wyników pomiaru dokonano w dwa różne dni, przy czym jeden dzień był słoneczny, natomiast drugi pochmurny. W pierwszej kolejności ustawiono model w kierunku południowym za pomocą kompasu.

Pierwszym dniem badań był 25 lutego 2018 r. (dzień słoneczny). Od godziny 7:30 rano do godziny 17:30 po południu dokonywano pomiarów (tab. 3) w odstępach półgodzinnych za pomocą woltomierza mierzącego siłę elektromotoryczną na zaciskach fotoogniwa dla każdej z trzech metod.



Fot. 5 i 6. Pomiar napięcia na zaciskach panelu fotowoltaicznego PV

Źródło: oprac. własne.

Tab. 3. Dane pomiarowe zebrane 25 lutego 2018 r.

Lp	Godzina pomiaru	System Stacjonarny	System Kalendarza astronomicznego	System najjaśniejszego punktu na niebie (fotorezystor)
	[gg:mm]	[V]	[V]	[V]
1	7:00	0	0	0
2	7:30	1,254	1,686	1,679
3	8:00	1,611	1,924	1,916
4	8:30	1,816	2,115	2,097
5	9:00	2,087	2,284	2,273
6	9:30	2,227	2,349	2,341
7	10:00	2,316	2,397	2,389
8	10:30	2,369	2,413	2,425
9	11:00	2,395	2,416	2,413
10	11:30	2,421	2,433	2,428
11	12:00	2,438	2,445	2,45
12	12:30	2,436	2,44	2,448
13	13:00	2,44	2,45	2,44
14	13:30	2,415	2,43	2,425
15	14:00	2,389	2,403	2,4
16	14:30	2,334	2,411	2,401
17	15:00	2,301	2,367	2,349
18	15:30	2,215	2,312	2,321
19	16:00	2,01	2,238	2,231
20	16:30	1,698	2,057	2,054
21	17:00	1,213	1,924	1,916
22	17:30	0,521	0,816	0,827
23	18:00	0	0	0

System Stacjonarny	System Kalendarza astronomicznego	System najjaśniejszego punktu na niebie (fotorezystor)	
[V]	[V]	[V]	
średnia	2,043	2,205	2,201
średnia od 7:30 do 10:30	1,954	2,167	2,160
średnia od 10:30 do 14:00	2,413	2,429	2,429
średnia od 14:00 do 17:30	1,855	2,066	2,062

średnia ogólna	procentowy wzrost napięcia z Panelu PV
Kalendarz vs. Stacjonarny	7,4%
Fotorezystor vs. Stacjonarny	7,2%
Kalendarz vs. Fotorezystor	0,2%

średnia od 7:30 do 10:30	procentowy wzrost napięcia z Panelu PV
Kalendarz vs. Stacjonarny	9,8%
Fotorezystor vs. Stacjonarny	9,5%
Kalendarz vs. Fotorezystor	0,3%

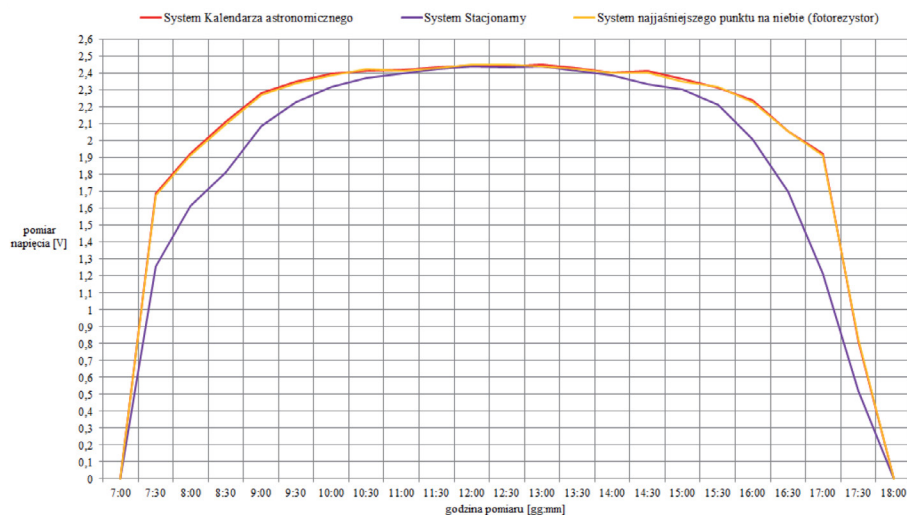
  

średnia od 10:30 do 14:00	procentowy wzrost napięcia z Panelu PV
Kalendarz vs. Stacjonarny	0,7%
Fotorezystor vs. Stacjonarny	0,6%
Kalendarz vs. Fotorezystor	0,0%

średnia od 14:00 do 17:30	procentowy wzrost napięcia z Panelu PV
Kalendarz vs. Stacjonarny	11,2%
Fotorezystor vs. Stacjonarny	11,0%
Kalendarz vs. Fotorezystor	0,2%

Źródło: oprac. własne.

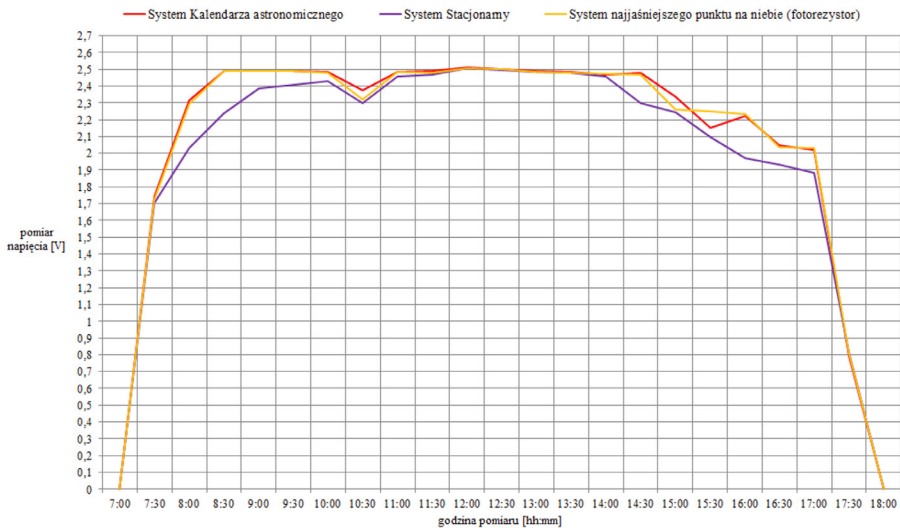


Wyk. 1. Dane pomiarowe w postaci wykresu zebrane 25 lutego 2018 r.

Źródło: oprac. własne.

Z zebranych danych (wyk. 1.) można wywnioskować jednoznacznie, że w dzień słoneczny systemy nadążne największą przewagę mają w godzinach przed- i popołudniowych. Różnice odpowiednio dla godzin przedpołudniowych wynoszą ok. 10%, a dla godzin popołudniowych ok. 11% na korzyść systemów nadążnych. W przedziale czasowym od 10:30 do 14:30 różnice są niezauważalne i są zaledwie o ok. 0,6% większe w przypadku systemów nadążnych.

W drugim dniu wykonania pomiarów – 27 lutego 2018 r. w dzień pochmurny sytuacja wygląda znacznie ciekawiej.



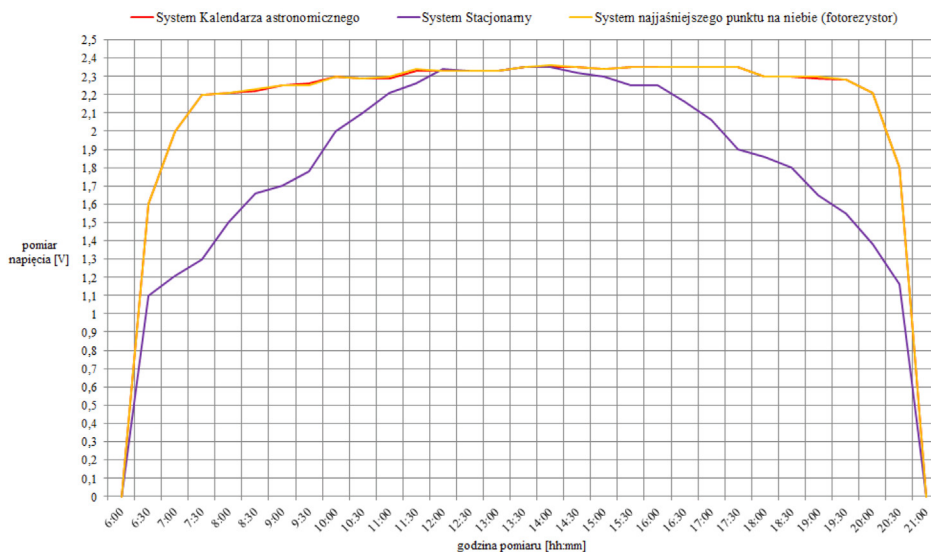
Wyk. 2. Dane pomiarowe w postaci wykresu zebrane 27 lutego 2018 r.

Źródło: oprac. własne.

Dane zebrane 27 lutego 2018 r. (wyk. 2) pozwalają zauważyć, że do godziny 10:30 sytuacja przedstawiała się podobnie jak w przypadku poprzednich badań. Jednakże o godzinie 10:30 pojawiły się chmury, zasłaniając Słońce całkowicie, co odbiło się negatywnie na wszystkich trzech metodach. W godzinach południowych sytuacja jest powtarzalna i dla wszystkich metod jest identyczna, a różnice wynoszą ok. 0,7%. Najciekawiej wygląda porównanie w godzinach pomiędzy 14:00 a 16:30. Około godziny 15:00 pojawiły się dość znaczne chmury, które całkowicie zasłoniły Słońce. W tej sytuacji najlepiej wypadł system pracujący w oparciu o dane z kalendarza astronomicznego. Pomimo że wcześniej oba systemy nadążne pracowały w zasadzie identycznie, w tym przypadku system podążający za najjaśniejszym punktem nie był w stanie ustawić się optymalnie do promieniowania słonecznego, tracąc swoją skuteczność o ok. 1% w stosunku do kalendarza. Niespodziewana sytuacja wystąpiła ok. godziny 15:30, kiedy to Słońce zostało całkowicie zakryte przez

bardzo ciemne chmury, a jedynie jasne promienie rozchodziły się wokół zarysu chmury. W tym przypadku system oparty na kalendarzu astronomicznym odebrał o ok. 1% mniej promieniowania niż system oparty na fotorezystorach, który ustawił się pod kątem  $90^\circ$  w osi Z (elewacja), bazując na rozproszonym przez ciemną chmurę promieniowaniu słonecznym.

Przeprowadzone badania pozostawiły jednak niedosyt. Dokonano zatem dodatkowego badania w znacznie dłuższym i cieplejszym dniu 13 maja 2018 r. (dzień słoneczny).



Wyk. 3. Dane pomiarowe w postaci wykresu zebrane w dniu 13 maja 2018 r.

Źródło: oprac. własne.

Podobnie jak w przypadku pierwszego badania, można wywnioskować, że w dzień słoneczny systemy nadążne mają ogromną przewagę w godzinach przed- i popołudniowych (wyk. 3). Różnice dla godzin przedpołudniowych wynoszą odpowiednio 28%, a dla godzin popołudniowych ok. 20% na korzyść systemów nadążnych. W zakresie godzin południowych różnice są pomijalne. Średnia z całego dnia wyniosła ok. 16% na korzyść systemów nadążnych.

## 6. Podsumowanie

W przedstawionym projekcie zostały zrealizowane założone cele. Powstał model urządzenia śledzącego dzienny ruch Słońca, który ustawia panel fotowoltaiczny prostopadle do padania promieniowania słonecznego. Pierwsze założenia przewidywały, że podstawowym trybem pracy będzie pozycjonowanie panelu na podstawie kalendarza astronomicznego, a jedynie dodatkowym – podążanie za najjaśniejszym punktem na niebie. Jednak dane zebrane w trzech różnych dniach pokazały, że oba systemy działają praktycznie identycznie. Metoda z wykorzystaniem czujników promieniowania jest jednak znacznie łatwiejsza w opracowaniu niż ta bazująca na kalendarzu astronomicznym. W przypadku kalendarza na potrzeby projektu został utworzony jedynie jeden plik, edytowany na konkretny dzień, w którym przeprowadzono badanie. Obsługa większej liczby plików wymagałaby ogromnego nakładu pracy podczas programowania mikrokontrolera. Oczywiście analizując wyniki badań, można zauważyć, że podczas zachmurzonego nieba lepszą sprawność uzyskuje metoda z użyciem kalendarza astronomicznego. Aby w pełni zdecydować, który system jest bardziej wydajny, należałoby wykonywać badania przez dłuższy okres z uwzględnieniem całego roku. Argumentem przemawiającym za metodą śledzenia najjaśniejszego punktu jest możliwość jej wykorzystania praktycznie w każdej lokalizacji na świecie bez potrzeby wprowadzania współrzędnych i dostosowania plików źródłowych odczytywanych z karty SD. Najważniejszy wniosek płynący z pracy jest taki, że system nadążny z wykorzystaniem którejkolwiek z metod jest wydajniejszy niż system stacjonarny.

Uzyskane wyniki pokazują, że warto temat kontynuować poprzez optymalizację, a następnie wykorzystanie praktyczne. Docelowo zadaniem projektu było pokazanie „czy warto?”. Tak, zdecydowanie warto. Dalsze prace nad projektem mają na celu zastosowanie uzyskanych dla modelu wyników badań w praktyce na obiekcie rzeczywistym. Prace projektowe, konstrukcyjne i badawcze przyniosły Autorom ogromną satysfakcję. Wiedza uzyskana podczas wykonywanych prac jest nieocenioną wartością dodaną.

## Literature

- [1] BLewandowski W.M., *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*, WNT, Warszawa 2001, 2002.
- [2] B[http://www.rynek-ciepla.cire.pl/pliki/2/swiatowe\\_zasoby.pdf](http://www.rynek-ciepla.cire.pl/pliki/2/swiatowe_zasoby.pdf), stan z dnia 31.01.2018.
- [3] BKoldehoff W.B., *The Solar Thermal Market. Status – Technologies – Perspectives*, Inter Solar 2009, San Francisco 2009.
- [4] BJastrzębska G., *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*, WNT, Warszawa 2007.
- [5] <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/calcdetails.html>, stan z dnia 15.09.2017.