



Politechnika Wrocławska

---

**WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY**

**KIERUNEK: AUTOMATYKA I ROBOTYKA**

**Ignacy Rogatty**

**Nr albumu: 250414**

**Autonomiczny tracker solarny**

*Autonomous solar tracker*

**INŻYNIERSKA PRACA  
DYPLOMOWA**

Studia: stacjonarne

*Opiekun:* **dr hab. inż. Jacek Rezmer**

Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii

.....  
*ocena*      *data, podpis opiekuna*

**Wrocław, 2021**

## Spis treści

1. WSTĘP .....	3
2. CEL I ZAKRES PRACY .....	5
3. MODEL .....	6
3.1. Założenia projektu .....	6
3.2. Elementy prototypu .....	6
3.3. Konstrukcja mechaniczna .....	9
3.4. Elektronika .....	9
3.5. Program .....	10
4. TESTY PROGRAMU .....	12
5. BADANIA PRODUKCJI ENERGII .....	14
5.1. Wyznaczenie optymalnego kąta nachylenia .....	16
5.2. Lato .....	17
5.3. Jesień .....	20
5.4. Zima .....	24
6. WNIOSKI .....	28
7. BIBLIOGRAFIA .....	29

## 1. WSTĘP

Panele fotowoltaiczne jako odnawialne źródło energii zyskały na popularności w ciągu ostatnich lat w związku z rozwojem technologii wytwarzania paneli fotowoltaicznych oraz jako źródło energii nieszkodliwe dla środowiska. Sprawność paneli fotowoltaicznych z roku na rok rośnie, a ich cena spada. Przy wykorzystaniu mniejszej ilości paneli fotowoltaicznych i trackera można uzyskać taką samą produkcję energii elektrycznej [4]. Trackery solarne są opłacalne również wtedy, gdy do dyspozycji jest mała ilość przestrzeni. Jeszcze niedawno stosowanie systemów podążających za Słońcem miało duży sens [5]. Dzisiaj panele fotowoltaiczne są na tyle tanie, że bardziej opłacalną inwestycją od systemu nadążnego jest większa ilość paneli fotowoltaicznych.

Stosuje się trackery solarne jednoosiowe oraz dwuosiowe [1]. Trackery dwuosiowe śledzą Słońce bardzo dokładnie w obu osiach (Rys. 1.1) [6]. Osiągają zysk energii w stosunku do paneli stałych powyżej 40 %. Ale co jeżeli zastosuje się tracker jednoosiowy zamiast dwuosiowego? System będzie tańszy, ale jak będzie z produkcją energii?



Rys. 1.1. Dwuosiowy tracker solarny

Trackery jednoosiowe dzielą się na trackery z osią poziomą, z osią pionową i pochylone. Systemy nadążne z jedną osią poziomą są stosowane w okolicach równika, gdzie Słońce przemieszcza się na niebie w pobliżu linii północ-południe. Trackery jednoosiowe z osią pionową stosuje się w okolicach biegunów, gdzie Słońce przemieszcza się nisko nad horyzontem. Trackery jednoosiowe pochylone stosuje się na przykład w Chinach, gdzie Słońce porusza się po linii, którą można odwzorować jedynie przy pomocy trackerów dwuosiowych lub właśnie pochylonych (Rys. 1.2) [3]. Dodatkowo takie trackery mają na celu eliminację zacienienia przez blisko ustawione panele.



Rys. 1.2. Chiński jednoosiowy pochylony tracker solarny [3]

Trackery dwuosiove wymagają zastosowania dwóch precyzyjnych silników krokowych i skomplikowanej konstrukcji. W przypadku trackerów jednoosiowych wystarczający jest jeden silnik krokowy i prosta konstrukcja. Tracker jednoosiowy można pochylić w celu dostosowania jego kierunku do szerokości geograficznej, na której się znajduje. Dodatkowo można regulować to nachylenie wraz ze zmianą pór roku i wysokością osiąganą przez Słońce nad horyzontem w ciągu dnia. W ten sposób jest możliwe uzyskanie bardzo wysokiej sprawności trackera jednoosiowego, bardzo zbliżonej do sprawności trackera dwuosioowego przy znacznie niższym początkowym wkładzie w inwestycję.

## **2. CEL I ZAKRES PRACY**

Celem pracy jest wykonanie systemu podążającego za słońcem (trackera solarne) na mikrokontrolerze i silniku elektrycznym. Zakres pracy obejmuje, opracowanie koncepcji urządzenia, wykonanie części mechanicznej i elektronicznej urządzenia, utworzenie programu sterującego i komunikacyjnego oraz prowadzenie testów i analizę działania systemu.

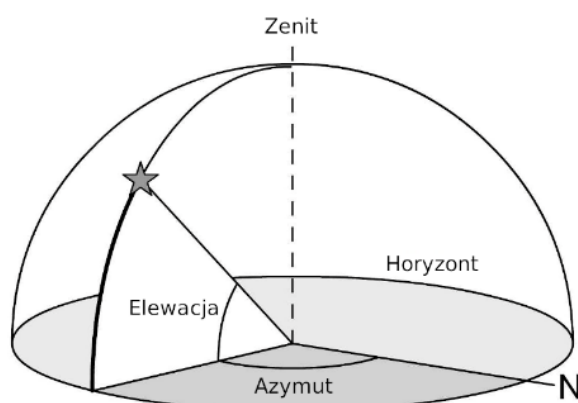
Etapy pracy:

- Dokonanie przeglądu literaturowego na temat systemów nadążnych (Tracker Solarne) stosowanych w układach fotowoltaicznych.
- Analiza stosowanych rozwiązań, wybór koncepcji.
- Przyjęcie założeń dotyczących projektu urządzenia, wybór elementów konstrukcji.
- Wykonanie modelu urządzenia, testy programu sterującego i komunikacyjnego.
- Wykonanie testów działania systemu nadążnego.
- Podsumowanie wykonania pracy.

### 3. MODEL

#### 3.1. Założenia projektu

Zdecydowano, aby zbudować prototyp trackera jednoosiowego pochylonego. Celem badań jest sprawdzenie, czy tracker jednoosiowy pochylony jest w stanie wyprodukować zbliżoną ilość energii do trackera dwuosiowego. Prototyp ma składać się z podstawy, której kąt nachylenia (czyli, pośrednio, maksymalny kąt elewacji (Rys. 3.1.1)) będzie regulowany śrubą na przestrzeni roku – wraz ze zmieniającym się maksymalnym kątem elewacji Słońca, a kąt azymutu i kąt elewacji będą regulowane przy pomocy silnika krokowego na przestrzeni dnia.



Rys. 3.1.1. Wizualizacja kątów azymutu i elewacji, oraz horyzontu i zenitu [2]

Zdecydowano, aby kąt azymutu trackera ustalać na podstawie aktualnej pozycji Słońca na niebie obliczanej w programie na podstawie czasu UTC oraz lokalizacji urządzenia. Jest to dokładniejsza metoda od ustalania pozycji Słońca przy użyciu czujników światła. Pozwala ona również na większą kontrolę nad kątem azymutu trackera.

#### 3.2. Elementy prototypu

Panele fotowoltaiczne wykorzystane do budowy prototypu (Rys. 3.2.1) posiadają maksymalną moc 2 W i napięcie 6 V. Ich wymiary to 136 x 110 mm. Tego typu panele idealnie nadają się do prototypów, ponieważ są nieduże i lekkie, dzięki czemu nawet niewielki silnik krokowy poradzi sobie z ich obracaniem.



Rys. 3.2.1. Panel fotowoltaiczny 136X110-3

Urządzeniem sterującym jest mikrokontroler firmy Atmel ATmega32 umieszczony na „klonie” płytki uruchomieniowej Arduino UNO (Rys. 3.2.2). Wybór padł na tę płytkę, ponieważ jest tania, posiada wystarczającą ilość wejść i wyjść cyfrowych oraz wejść analogowych oraz jest bardzo prosta do oprogramowania.



Rys. 3.2.2. Płytki uruchomieniowa Arduino UNO (klon)

Silnikiem wykorzystanym w prototypie jest silnik krokowy 28BYJ-48 5V (Rys. 3.2.3). Dzięki sterownikowi ULN2003 jest on bardzo prosty do sterowania z pozycji mikrokontrolera. W stanie bezruchu na wszystkie 4 wejścia cyfrowe sterownika należy podać stany niskie. W celu wykonania jednego kroku należy podać stan wysoki na każde z czterech wejść sterownika po kolei. W celu wykonania kroku w przeciwną stronę należy zacząć podawać stan wysoki po kolei na wszystkie 4 wejścia cyfrowe zaczynając od przeciwnej strony. Jeden pełny obrót osi silnika ma miejsce po wykonaniu 512 kroków.

Wybór padł na silnik krokowy, ponieważ ułatwia on bardzo sterowanie nachyleniem panelu. Wystarczy zrobić jeden krok i sprawdzić, czy kąt nachylenia zmierzony żyroskopem jest już wystarczająco zbliżony do kąta zadanego – jeżeli tak, to pomija się krok w następnej iteracji; jeżeli nie, to wykonuje się krok ponownie. Dodatkowo silnik, dzięki współczynnikowi redukcji 1/64, można zasilać bezpośrednio z Arduino UNO co upraszcza konstrukcję całego urządzenia.



Rys. 3.2.3. Silnik krokowy 28BYJ-48 5 V wraz ze sterownikiem ULN2003

Do wyznaczenia dokładnej pozycji Słońca na niebie niezbędny jest bardzo dokładny zegar czasu rzeczywistego. Moduł DS3231 (Rys. 3.2.4) posiada wbudowany kwarc i pamięć. W pamięci zapisany jest dokładny czas UTC, a dzięki zegarowi kwarcowemu jest on aktualizowany co sekundę. Zasilanie jest podtrzymywane przez baterię, dzięki czemu godzina jest aktualizowana nawet po odłączeniu całego urządzenia od zasilania. Moduł komunikuje się z Arduino UNO poprzez magistralę I<sup>2</sup>C. Jest to szeregową dwukierunkową magistralą komunikacyjną, ułatwiająca komunikację mikrokontrolera z wieloma urządzeniami. Do transmisji wykorzystywane są dwie linie dwukierunkowe: SDA (linia danych) i SCL (linia zegara). Do linii można podłączać równolegle wiele urządzeń pod warunkiem, że żaden z adresów urządzeń nie będzie się powtarzał.



Rys. 3.2.4. Moduł zegara czasu rzeczywistego RTC DS3231

Do pomiaru kąta nachylenia (kąt pomiędzy podstawą urządzenia, a Ziemią) i kąta rotacji (kąt pomiędzy podstawą urządzenia, a panelem) trackera służy moduł 6DOF z akcelerometrem i żyroskopem MPU-6050 (Rys. 3.2.5). Moduł ten, podobnie jak moduł zegara czasu rzeczywistego, komunikuje się z Arduino UNO przez magistralę I<sup>2</sup>C.



Rys. 3.2.5. Moduł 6DOF 3-osiowego akcelerometru i żyroskopu MPU-6050

Funkcję pamięci dla danych pomiarowych pełni karta MicroSD. Jest ona umieszczana w module czytnika kart pamięci (Rys. 3.2.6). Moduł czytnika karty MicroSD komunikuje się z Arduino UNO przez magistralę SPI. Jest to jeden z najczęściej używanych interfejsów szeregowych do komunikacji między mikrokontrolerem, a urządzeniami peryferyjnymi, w tym z czytnikami kart SD. Posiada 3 linie: MOSI – wysyłanie danych do czytnika, MISO – odczytywanie danych z karty i SCLK – linia zegara.



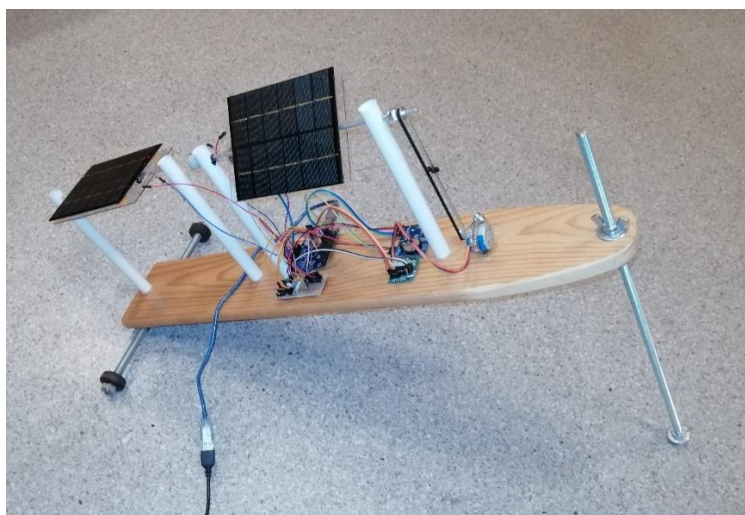


Rys. 3.2.6. Moduł czytnika kart MicroSD

### 3.3. Konstrukcja mechaniczna

Konstrukcja mechaniczna prototypu (Rys. 3.3.1) została wykonana z elementów dostępnych w domowym warsztacie oraz elementów z odzysku ze starych urządzeń. Dwa panele fotowoltaiczne są zamontowane na osiach umiejscowionych w rurkach PCV. Jeden z paneli (lewy na Rys. 10) jest zamontowany na stałe – nie obraca się. Drugi z paneli (prawy) jest zamontowany na obrotowej osi, na którą przenoszony jest moment silnika krokowego poprzez pasek klinowy. Urządzenie posiada długą śrubę do manualnej regulacji kąta nachylenia trackera w zakresie od 0 do 35 °. Silnik krokowy oraz cała elektronika jest przymocowana do deski stanowiącej podstawę całej konstrukcji.

Konstrukcja zawsze powinna być skierowana w kierunku południowym (kąt pomiędzy osiami paneli fotowoltaicznych, a kierunkiem południowym zawsze powinien wynosi 0 °).

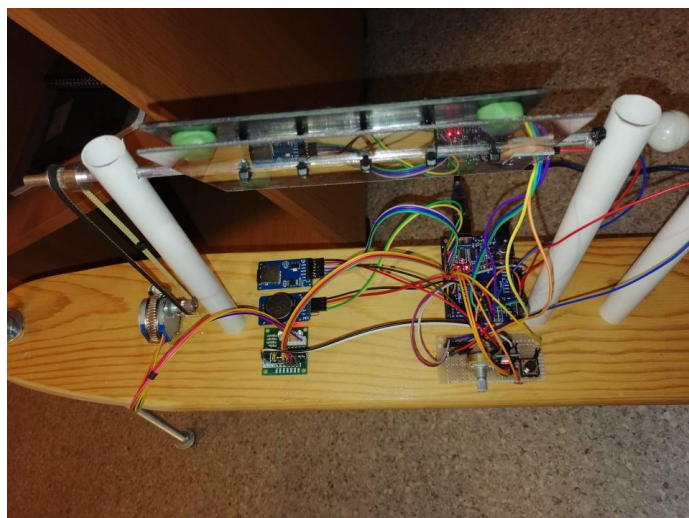


Rys. 3.3.1. Prototyp trackera solarnego jednoosiowego pochylonego wraz z panelem stałym

### 3.4. Elektronika

Urządzeniem sterującym jest mikrokontroler ATmega32 znajdujący się na płytce uruchomieniowej Arduino UNO. Na desce (Rys. 3.4.1) jest również zamontowana płytka prototypowa, na której znajduje się szyna masy oraz szyna napięcia zasilającego 5 V dla wszystkich urządzeń peryferyjnych. Na płytce prototypowej jest też przycisk zmiany trybów, lampka sygnalizująca jeden z czterech trybów, w których może pracować program sterujący oraz potencjometr do regulacji kąta rotacji trackera (czyli kąta pomiędzy panelem, a deską) w trybie manualnym. Potencjometr jest podłączony do wejścia analogowego ATmega32. Silnik

krokowy 28BYJ-48 5V jest sterowany przez sterownik ULN2003. Czas rzeczywisty zapisany jest w module czasu rzeczywistego DS3231. Moduł czytnika karty MicroSD pozwala mikrokontrolerowi na zapisywanie danych na karcie MicroSD. Na płytce poliwęglanowej, do której przymocowano panel fotowoltaiczny trackera, jest umiejscowiony moduł akcelerometru i żyroskopu służący do określania kąta nachylenia i kąta rotacji trackera. Układ jest zasilany przez kabel USB podłączony do płytki Arduino UNO. Kabel USB służy również do komunikacji układu z komputerem PC poprzez port szeregowy.



Rys. 3.4.1. Elektronika modelu trackera solarnego jednoosiowego

Panele fotowoltaiczne są podłączone do wejść analogowych poprzez dzielnik napięcia zbudowany z dwóch rezystorów o wysokiej rezystancji.

### 3.5. Program

Program jest napisany w języku programowania Arduino. Program działa w pętli. Jedna iteracja trwa około 1 s. W każdej iteracji odczytywane jest napięcie na wejściach analogowych, kąty nachylenia akcelerometru w dwóch osiach, obliczana jest pozycja Słońca na niebie dla zadanej w programie lokalizacji oraz czasu rzeczywistego zapisanego w module czasu rzeczywistego (lub czasu testowego w trybie testowym). Informacje o czasie, napięciach, kątach nachylenia i lokalizacji Słońca na niebie są wysyłane do komputera przez port szeregowy oraz zapisywane na karcie MicroSD. Przytrzymanie jednego przycisku powoduje zmianę trybu. Działający tryb sygnalizowany jest jednym z trzech kolorów diody LED RGB: niebieski – tryb manualny; zielony – tryb automatyczny; czerwony – tryb testowy. Niezapalona dioda LED oznacza, że sterowanie jest wyłączone.

Program wykorzystuje regulator dwupołożeniowy, czyli kiedy kąt rotacji trackera wynosi mniej niż zadana wartość kąta rotacji lub kąta azymutu Słońca to wysyła sygnał sterujący do sterownika silnika krokowego oznaczający przesunięcie trackera na wschód, a kiedy kąt azymutu trackera wynosi więcej niż zadana wartość kąta nachylenia to wysyła sygnał sterujący oznaczający przesunięcie trackera na zachód. Dokładność regulacji to  $\pm 1^\circ$ . Aby regulacja kąta nachylenia trackera działała muszą być spełnione dwa warunki: kąt elewacji Słońca w danym momencie musi być dodatni i kąt azymutu Słońca w danym momencie musi zawierać się w przedziale od  $-90^\circ$  do  $90^\circ$ .

W trybie manualnym program odczytuje z wejścia analogowego wartość napięcia na potencjometrze w zakresie od 0 do 5 V i przelicza ją naadaną wartość kąta rotacji trackera w zakresie od  $-75^\circ$  ( $75^\circ$  na zachód) do  $75^\circ$  ( $75^\circ$  na wschód).

W trybie automatycznym program podejmuje decyzje o sterowaniu silnikiem krokowym na podstawie aktualnego rzeczywistego położenia Słońca na niebie oraz aktualnego położenia trackera. Zadany kąt rotacji trackera jest aktualny kąt azymutu położenia Słońca na niebie. Kąt rotacji trackera jest ograniczony od  $-90^{\circ}$  do  $90^{\circ}$ . Większe nachylenie nie miałoby sensu ze względu na konstrukcję trackera – kąt elewacji trackera byłby mniejszy od zera. Kiedy kąt elewacji Słońca jest mniejszy od zera (noc) tracker ustawia się w pozycji poziomej, aby zminimalizować wpływ wiatru na konstrukcję.

W trybie testowym w programie wybrana jest data testów. Test rozpoczyna się o godzinie 00:00 i kończy na 23:59. Najpierw tracker ustawia się w pozycję maksymalnie na wschód. W każdej iteracji obliczana jest pozycja Słońca na niebie, a do licznika dodawana jest jedna minuta. Wartością zadaną kąta rotacji trackera jest kąt azymutu pozycji Słońca na niebie obliczony dla każdej minuty. Kąt rotacji trackera jest ograniczony od  $-90^{\circ}$  do  $90^{\circ}$ .

Biblioteka *SolarPosition.h* pozwala na obliczenie pozycji Słońca na niebie w zależności od czasu i lokalizacji. Zawiera ona klasę *SolarPosition*, która w konstruktorze pobiera lokalizację w postaci koordynatów określających położenie na mapie świata urządzenia oraz funkcję *setTimeProvider*, która przyjmuje jako argument czas i datę jako typ danych *time\_t*. Po utworzeniu obiektu program oblicza pozycję Słońca przy pomocy metody *getSolarPosition*. Kąt azymutu i elewacji pozycji Słońca jest zapisany w zmiennych składowych *azimuth* i *elevation*.

Biblioteka *DS3231.h* umożliwia oprogramowanie modułu zegara czasu rzeczywistego. Pozwala ona na zapisanie daty i godziny w module, i odczyt tych samych danych w dowolnym momencie w czasie trwania programu.

Biblioteka *SD.h* umożliwia zapis i odczyt danych z karty MicroSD. Klasa *SD* posiada metodę *open*, która otwiera plik o wybranej nazwie w wybranym trybie. Metoda *print* pozwala na zapisywanie danych na karcie MicroSD w postaci ciągu znaków. Metoda *println* po wydrukowaniu ciągu znaków w pliku tekstowym dodaje na końcu znak nowej linii. Metoda *close* zamyka plik i uniemożliwia dalszy zapis.

Biblioteka *SPI.h* umożliwia komunikację pomiędzy Arduino, a urządzeniami poprzez szeregową magistralę komunikacyjną SPI. Korzysta z niej moduł czytnika karty MicroSD.

Biblioteka *Wire.h* umożliwia komunikację pomiędzy Arduino, a urządzeniami poprzez szeregową magistralę komunikacyjną I<sup>2</sup>C. Korzysta z niej moduł zegara czasu rzeczywistego oraz moduł akcelerometru z żyroskopem.

## 4. TESTY PROGRAMU

Program po uruchomieniu przechodzi w tryb „wyłączony”, w którym urządzenie pobiera dane z akcelerometru i żyroskopu oraz paneli fotowoltaicznych, i zapisuje je na karcie MicroSD oraz wysyła do komputera PC poprzez port szeregowy. Po przytrzymaniu przycisku zmiany trybu program przechodzi do trybu manualnego, a następnie do trybu automatycznego. Po wybraniu odpowiedniego portu COM i otwarciu monitora portu szeregowego w środowisku programistycznym Arduino IDE widać wysyłane co sekundę ramki danych z urządzenia do komputera (Rys. 12). Pojedyncza ramka danych zawiera informacje o tym, który z czterech trybów urządzenia jest aktualnie uruchomiony (wyłączony/manualny/automatyczny/testowy), o dacie i godzinie, według której program oblicza aktualne położenie Słońca, o napięciach na panelach fotowoltaicznych (panel 1 jest umieszczony na badanym trackerze, a panel 2 jest nieruchomy), o wartościach kątów dotyczących pozycji paneli i pozycji Słońca. „Wartość zadana azymutu trackera” to wartość kąta rotacji trackera ustalona przy pomocy potencjometru (kąt rotacji trackera nie został przeliczony na kąt azymutu trackera – jest to błąd, który nie wpływa znacznie na działanie programu, ale zostanie opisany w dalszej części pracy). W trybie manualnym wartość kąta azymutu trackera jest regulowana w celu osiągnięcia wartości zadanej.

```
*****
Tryb automatyczny
18.12.2021 -- 16:34:19
Napięcie na panelu 1: 2.64
Napięcie na panelu 2: 3.05
Wartość zadana azymutu trackera: -30.18
Kąt azymutu Słońca:   -57.81
Kąt azymutu trackera: 3.84
Kąt elewacji Słońca:  -3.66
Kąt elewacji trackera: 51.51
Kąt elewacji panelu stałego: 51.67
*****
Tryb automatyczny
18.12.2021 -- 16:34:20
Napięcie na panelu 1: 2.65
Napięcie na panelu 2: 3.10
Wartość zadana azymutu trackera: -30.18
Kąt azymutu Słońca:   -57.81
Kąt azymutu trackera: 3.77
Kąt elewacji Słońca:  -3.66
Kąt elewacji trackera: 52.28
Kąt elewacji panelu stałego: 52.44
*****
```

Rys. 4.1. Dwie ramki danych wysłane z Arduino do komputera PC

Na karcie MicroSD co sekundę zapisywana jest ramka danych, która składa się z 10 wartości ustawionych w jednym wierszu zakończonym znakiem nowej linii (Rys. 4.2). Dane zapisane w taki sposób są bardzo proste do wczytania w skrypcie Matlab'a. Wystarczy funkcja *readmatrix*, aby wczytać z pliku tekstowego wszystkie dane w postaci jednej macierzy co bardzo ułatwia dostęp do każdej z kolumn.

```
21.09.2022 11:03:00 2.23 1.41 -5.67 39.23 39.46 -5.85 39.35 3
21.09.2022 11:04:00 2.21 1.41 -5.27 39.44 39.64 -6.17 39.33 3
21.09.2022 11:05:00 2.23 1.40 -5.46 39.37 39.59 -6.50 39.32 3
21.09.2022 11:06:00 2.24 1.39 -6.64 39.11 39.42 -6.82 39.30 3
21.09.2022 11:07:00 2.23 1.40 -6.47 39.14 39.44 -7.14 39.28 3
21.09.2022 11:08:00 2.26 1.41 -6.55 38.96 39.26 -7.46 39.26 3
21.09.2022 11:09:00 2.24 1.42 -6.18 38.94 39.21 -7.78 39.24 3
21.09.2022 11:10:00 2.20 1.41 -7.17 39.15 39.52 -8.11 39.21 3
21.09.2022 11:11:00 2.21 1.41 -7.66 38.47 38.88 -8.43 39.19 3
21.09.2022 11:12:00 2.22 1.41 -7.55 39.47 39.88 -8.75 39.17 3
21.09.2022 11:13:00 2.20 1.41 -7.88 38.81 39.25 -9.07 39.14 3
21.09.2022 11:14:00 2.23 1.39 -9.45 38.54 39.17 -9.39 39.12 3
```

Rys. 4.2. Przykładowe dane zapisane na karcie MicroSD w postaci pliku tekstowego w 10 kolumnach (1 – data; 2 – godzina; 3 - napięcie na panelu badanego trackera; 4 - napięcie na panelu stałym; 5 – kąt rotacji trackera; 6 – kąt elewacji trackera; 7 - kąt elewacji panelu stałego; 8 – kąt azymutu Słońca; 9 – kąt elewacji Słońca; 10 – tryb [0 – wyłączony, 1 – manualny, 2 – auto, 3 – test])

## 5. BADANIA PRODUKCJI ENERGII

Badania nie mogły zostać przeprowadzone w realnych warunkach ze względu na aktualne, zimowe warunki pogodowe. W celu przeprowadzenia dokładnych badań w warunkach rzeczywistych należałoby przeznaczyć na nie znacznie więcej czasu i wykonać je na przestrzeni całego roku kalendarzowego. Badania zostały przeprowadzone w formie symulacji w środowisku Matlab i z wykorzystaniem trybu testowego programu Arduino.

Jeden test w trybie testowym trwa około 24 minut. Program wybiera przykładową datę wpisaną w kodzie źródłowym Arduino. Rozpoczynając od godziny 00:00 i kończąc na godzinie 23:59 program oblicza pozycję Słońca na niebie w każdej minucie i reguluje kąt rotacji trackera. Na karcie MicroSD zapisywana jest godzina, pozycja Słońca na niebie obliczona w programie na podstawie daty, godziny i lokalizacji, i wszystkie kąty potrzebne do określenia kątów nachylenia obu paneli w dwóch osiach pobrane z akcelerometru i żyroskopu (przy założeniu, że kąt pomiędzy osiami paneli, a kierunkiem południowym zawsze wynosi  $0^\circ$ ). Lokalizację ustawiono na: szerokość geograficzna –  $51,12^\circ$ , długość geograficzna –  $17,05^\circ$ , wysokość nad poziomem morza (tylko w Matlab'ie) – 120 m (Wrocław, Polska).

Skrypt Matlab'a wczytuje dane z pliku tekstowego pobrane z karty MicroSD. Na początku obliczane są wszystkie kąty potrzebne do określenia pozycji obu paneli fotowoltaicznych w przestrzeni oraz kierunku, w którym są skierowane:

- kąt elewacji panelu stałego (kąt azymutu zawsze wynosi  $0^\circ$ ),
- kąt elewacji i kąt azymutu trackera,

Następnie wykreślony zostaje na jednym wykresie kąt elewacji, a na drugim kąt azymutu od czasu dla panelu stałego, pochylonego trackera jednoosiowego oraz pozycji Słońca na niebie. Wykresy dla Słońca na niebie są odpowiednikami teoretycznych wykresów dla idealnego trackera dwuosiowego. Dzięki znajomości elewacji i azymutów było możliwe połączenie ich w jeden wykres trójwymiarowy, który w inny, przystępny sposób obrazuje linie rysowane przez kierunek wskazywany przez panele oraz pozycję Słońca.

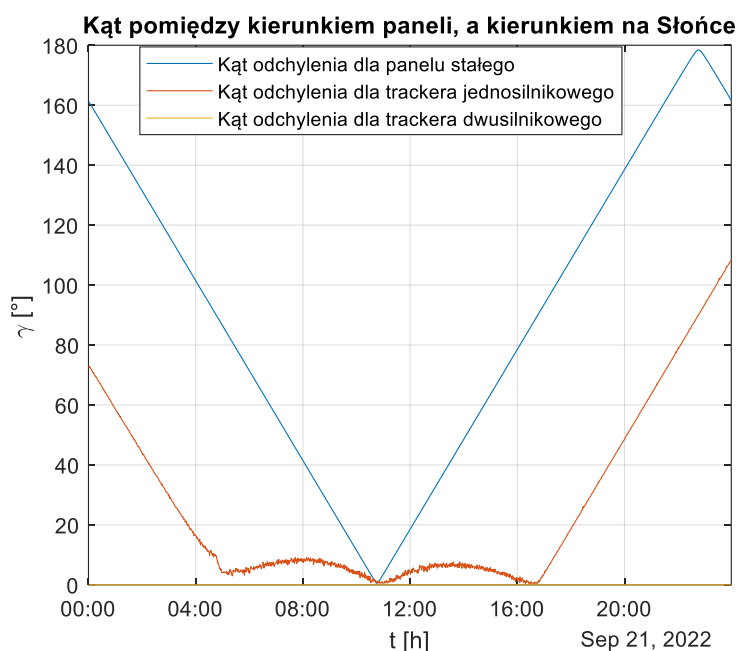
Następnie w skrypcie dokonywane są obliczenia mające na celu wyznaczenie wykresu teoretycznej wartości mocy wytwarzanej przez panele od czasu dla panelu stałego, trackera jednoosiowego pochylonego oraz trackera dwuosiowego. Wykorzystano do tego celu bibliotekę *PVLIB* [7], która oblicza teoretyczną moc na panelach na podstawie wymienionych wartości:

- kąt odchylenia kierunku paneli fotowoltaicznych od kierunku na Słońce;
- parametry przykładowego rzeczywistego komercyjnego modułu fotowoltaicznego pobrane z bazy modułów;
- przeformatowany czas symulacji;
- lokalizacja, dla której zostały przeprowadzone badania;
- obliczone składowe nasłonecznienia (bezpośrednia, rozproszona i odbita);
- przyjęte warunki pogodowe;
- oddzielne od obliczeń w Arduino dokładne obliczenia pozycji Słońca na niebie z uwzględnieniem lokalizacji badań, czasu, ciśnienia oraz temperatury;
- obliczona masa powietrza pomiędzy urządzeniem, a Słońcem;
- współczynnik zabrudzenia;
- obliczona temperatura modułów;
- charakterystyka  $U(I)$  modułu.

Najważniejszym parametrem w badaniach trackera jednoosiowego pochylonego jest kąt odchylenia kierunku paneli fotowoltaicznych od kierunku na Słońce (Rys. 5.1). Pokazuje on jak bardzo kierunek trackera jednoosiowego odbiega od idealnego kierunku trackera



dwuosioowego i jaka jest poprawa w stosunku do panelu stałego. Wpływa on na najważniejszą składową promieniowania – składową bezpośrednią.



Rys. 15.1. Przykładowy wykres kąta odchylenia kierunku paneli od kierunku na Słońce od czasu dla 21 września 2022

W kolejnym kroku wykreślona zostaje moc generowana przez moduł fotowoltaiczny na montażu stałym, na badanym pochylonym trackerze jednoosiowym i na teoretycznym trackerze dwuosiowym. Jako cała trapezoidalna mocy w czasie zostaje obliczona teoretyczna energia elektryczna wyprodukowana przez wszystkie trzy panele.

Do badań wybrano 3 przykładowe dni. 21 czerwca, 21 września i 21 grudnia 2022 roku. 21 czerwca charakteryzuje się tym, że należy do najdłuższych dni w roku i do dni, w których maksymalna elewacja Słońca osiąga najwyższe wartości. 21 czerwca kąt azymutu pomiędzy wschodem, a zachodem Słońca należy do największych w roku. 21 grudnia z kolei charakteryzuje się tym, że należy do najkrótszych dni w roku i do dni, w których maksymalna elewacja Słońca osiąga najniższe wartości. 21 grudnia kąt azymutu pomiędzy wschodem, a zachodem Słońca należy do najmniejszych w roku. 21 września to dzień, w którym kąt azymutu, na którym wschodzi i zachodzi Słońce wynosi w przybliżeniu odpowiednio 90 ° na wschód i 90 ° na zachód.

Kąt nachylenia podstawy, a co za tym idzie kąt nachylenia osi trackera w stosunku do poziomu został dobrany tak, aby maksymalny kąt elewacji trackera (równy stałemu kątowi elewacji panelu stałego) równał się maksymalnemu kątowi elewacji Słońca w danym dniu. Kąt elewacji panelu stałego jest obliczany według wzoru (5.1).

$$\alpha_s = 90^\circ - \alpha_n \quad (5.1)$$

gdzie:

$\alpha_s$  – kąt elewacji panelu stałego  
 $\alpha_n$  – kąt nachylenia podstawy urządzenia

Aby obliczyć kąt elewacji trackera pochylonego [9] na podstawie dwóch kątów z żyroskopu wykorzystano wzór (5.2).

$$\alpha_t = 90^\circ - \arccos [\cos(R) \cos(\alpha_n)] \quad (5.2)$$

gdzie:

$\alpha_t$  – kąt elewacji trackera  
 $R$  – kąt rotacji trackera wokół osi  
 $\alpha_n$  – kąt nachylenia podstawy urządzenia

Aby obliczyć kąt azymutu trackera pochylonego [9] na podstawie dwóch kątów z żyroskopu wykorzystano wzór (5.3).

$$b_t = \arcsin \left[ \frac{\sin(R)}{\sin(90^\circ - \alpha_t)} \right] \quad (5.3)$$

gdzie:

$b_t$  – kąt azymutu trackera  
 $R$  – kąt rotacji trackera wokół osi  
 $\alpha_t$  – kąt elewacji trackera

Badania zostały wykonane przy założeniu, że punkt, na który jest skierowany tracker dwuosiowy przemieszcza się po tym samym torze co położenie Słońca na niebie. Pogoda przyjęta w skrypcie to pogoda idealna - brak zachmurzenia, stałe ciśnienie, wilgotność i temperatura.

## 5.1. Wyznaczenie optymalnego kąta nachylenia

Przy wyznaczaniu optymalnego kąta nachylenia paneli (podstawy całego urządzenia) wykonano badanie teoretycznej energii wyprodukowanej przez tracker jednoosiowy i tracker dwuosiowy. W badaniu został wykorzystany przykładowy dzień – 21 września 2022 roku. Urządzenie przeszło 7 testów w trybie testowym urządzenia dla różnych kątów nachylenia deski (podstawy urządzenia). W Tab. 5.1.1 zebrano wyniki obliczeń teoretycznej energii wyprodukowanej przez tracker jednoosiowy w stosunku do teoretycznej energii wyprodukowanej przez tracker dwuosiowy w zależności od zmieniającego się nachylenia podstawy urządzenia.

Tab. 5.1.1. Wyniki pomiarów do określenia optymalnego nachylenia osi trackera

$\alpha$ [°]	70	63	52	45	40	34	29
$\alpha_n$ [°]	20	27	38	45	50	56	61
$I_{os}/I_{dos}$ [%]	93,3	96	98,3	98,9	99,2	98,9	98,5

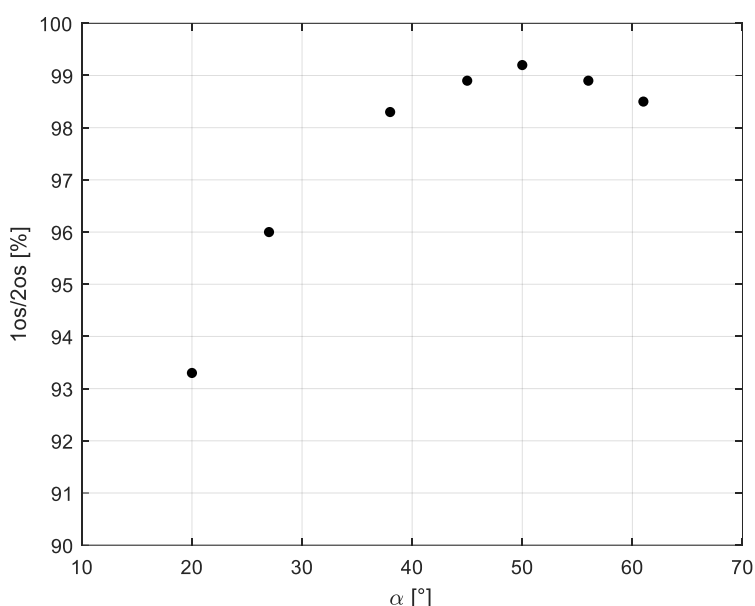
$\alpha$  [°] – kąt elewacji panelu stałego

$\alpha_n$  [°] – kąt nachylenia podstawy urządzenia

$I_{os}/I_{dos}$  [%] – stosunek teoretycznej energii wyprodukowanej przez tracker jednoosiowy do teoretycznej energii wyprodukowanej przez tracker dwuosiowy



Na podstawie wyników obliczeń z Tab. 5.1.1 utworzono wykres reprezentujący zależność wartości  $I_{os}/2os$  od zmiennego nachylenia podstawy trackera (Rys. 5.1.1).

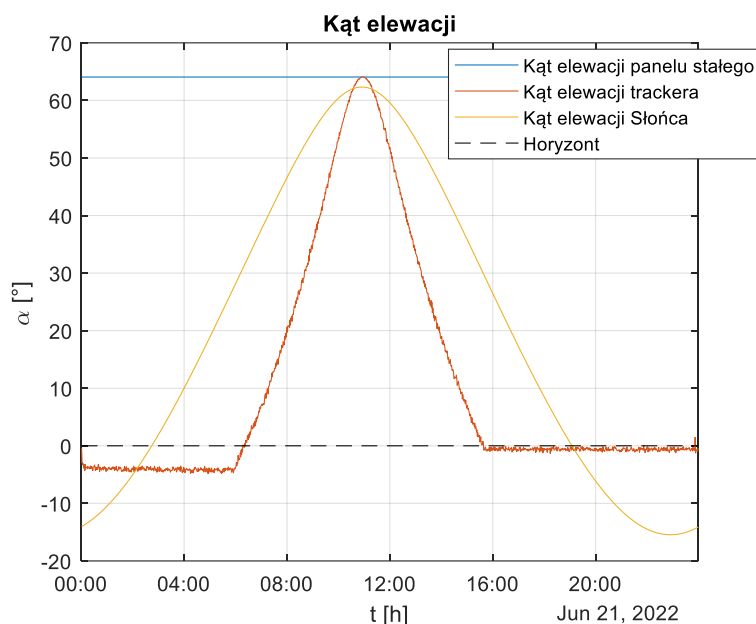


Rys. 5.1.1. Punkty pomiarowe ustalone w trakcie badań optymalnego kąta nachylenia podstawy trackera

Jak widać optymalnym nachyleniem podstawy urządzenia dla 21 września 2022 roku jest kąt  $50^\circ$ , ponieważ wartość  $I_{os}/2os$  przy tym kącie nachylenia jest największa i wynosi 99,2 %. Zgadza się to z teorią, ponieważ kąt elewacji Słońca ma osiągnąć tego dnia w zenicie około  $40^\circ$  (według danych ze *Stellarium* [8]), a ze wzoru (1) wynika, że kąt nachylenia deski przy elewacji  $40^\circ$  jest równy  $50^\circ$ .

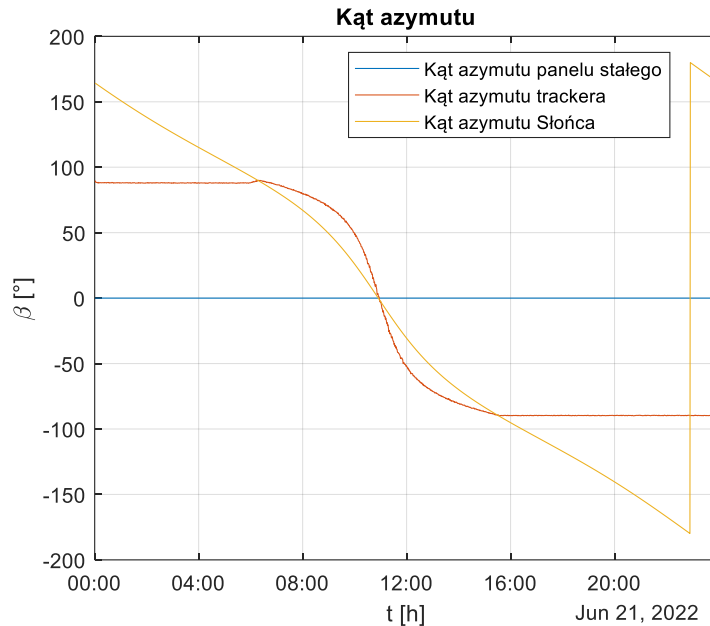
## 5.2. Lato

W pierwszym badaniu ustawiono datę badań w trybie testowym programu Arduino na 21 czerwca 2022. Dzień ten należy do najdłuższych w roku. Wartość energii produkowanej tego dnia należy do największych w roku. Zakładano, że tego dnia energia produkowana przez panel na trackerze jednoosiowym będzie mocno odbiegać od maksymalnej teoretycznej energii wyprodukowanej przez panel na trackerze dwuosiowym, ponieważ tracker pochylony zawsze rozpoczyna pracę na kącie azymutu  $90^\circ$  na wschód i kończy pracę na kącie azymutu  $90^\circ$  na zachód, a w dniu 21 czerwca kąt azymutu wschodu i zachodu Słońca należą do największych (na półkuli północnej, na półkuli południowej dzień ten należy do najkrótszych).



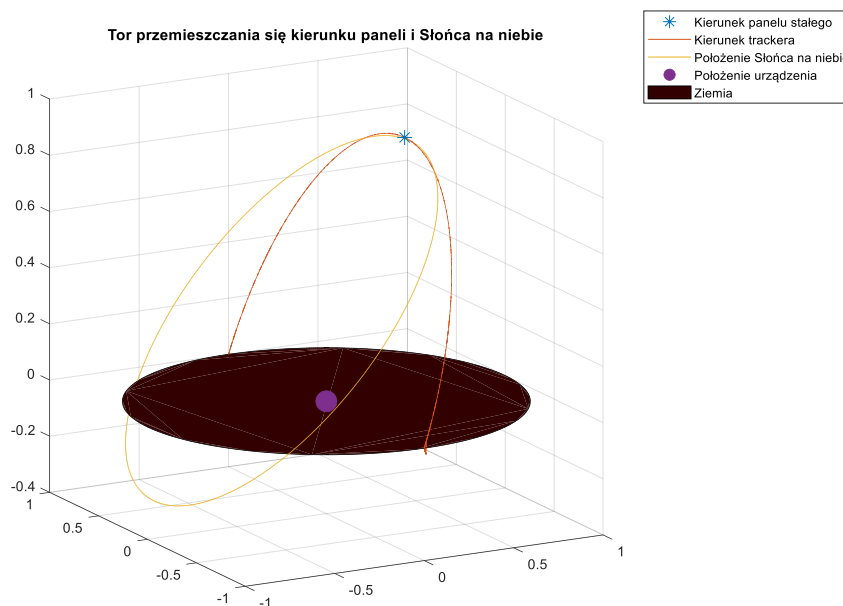
Rys. 5.2.1. Kąt elewacji  $\alpha$  paneli i pozycji Słońca zmieniający się w czasie dla dnia 21 czerwca 2022

Jak widać na Rys. 5.2.1 kąt elewacji panelu stałego nie zmienia się. Wynosi on około  $64^\circ$ . Został dobrany tak, aby był zbliżony do maksymalnego kąta elewacji Słońca tego dnia. Kąt elewacji panelu stałego jest równy maksymalnemu kątowi elewacji trackera pochylonego jednoosiowego zamontowanego na tej samej podstawie. Kąt elewacji badanego trackera na początku doby został ustawiony na około  $-4^\circ$ . Jest to błąd, który wynika z niedokładnego działania programu. W założeniu kąt elewacji na początku doby powinien wynosić  $0^\circ$ , ale to odchylenie od założenia nie ma dużego wpływu na teoretyczną wyprodukowaną energię, ponieważ rano i wieczorem, kiedy Słońce znajduje się nisko nad horyzontem produkcja energii i tak jest bardzo niska. Jest tak, ponieważ rano i wieczorem promienie słoneczne muszą pokonać grubszą warstwę atmosfery, bo są skierowane niemalże równoległe do powierzchni Ziemi. Produkcja energii jest tym większa im bliżej zenitu znajduje się Słońce, czyli wtedy, promienie słoneczne są skierowane niemalże prostopadle do Ziemi. Wtedy właśnie dokładność podążania trackera za Słońcem ma największe znaczenie. Następnie tracker oczekiwał w pozycji zbliżonej do  $0^\circ$  kąta elewacji aż do momentu, w którym azymut pozycji Słońca zrównał się z azymutem trackera (czyli około  $90^\circ$  na wschód, Rys. 5.2.2). W trackerach pochylonych konieczne jest ograniczenie azymutu do  $90^\circ$  w obie strony, aby elewacja nie była mniejsza od  $0^\circ$ . Elewacja kierunku trackera podążała za elewacją Słońca aż do osiągnięcia maksymalnej wartości kąta równej około  $64^\circ$ , a następnie aż do wartości kąta  $0^\circ$  po osiągnięciu przez azymut Słońca wartości kąta  $90^\circ$  na zachód.



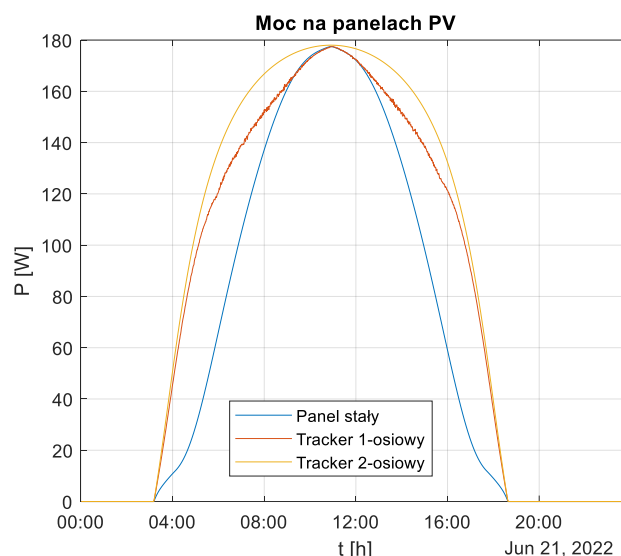
Rys. 5.2.2. Kąt azymutu  $\beta$  paneli i pozycji Słońca zmieniający się w czasie dla dnia 21 czerwca 2022

Na Rys. 5.2.2 widać, że kąt azymutu panelu stałego wynosi zawsze  $0^\circ$ . Kąt azymutu badanego trackera podąża za azymutem Słońca, lecz nie pokrywa wykresu azymutu Słońca dokładnie. Jest to wynikiem przyrównania kąta nachylenia trackera w stosunku do podstawy z kątem azymutu Słońca bez przeliczania kąta nachylenia na kąt azymutu. Tracker rozpoczyna podążanie za azymutem Słońca w momencie, kiedy kąt azymutu Słońca zrówna się z maksymalnym kątem nachylenia trackera na wschód równym  $90^\circ$ . Kąt nachylenia trackera podąża za kątem azymutu Słońca aż do osiągnięcia maksymalnego kąta nachylenia trackera na zachód.



Rys. 5.2.3. Wykres toru przemieszczania się kierunku paneli i Słońca na niebie dla dnia 21 czerwca 2022

Na Rys. 5.2.3 widać w jaki sposób tracker podąża za Słońcem. Im bliżej zenitu znajduje się Słońce tym dokładniej jest śledzone przez badany system nadążny jednoosiowy, ponieważ tym mniejszy jest kąt pomiędzy kierunkiem na Słońce, a kierunkiem trackera.



Rys. 5.2.4. Teoretyczna moc produkowana przez panel stały, na trackerze jednoosiowym i na trackerze dwuosiowym dla dnia 21 czerwca 2022

Na Rys. 5.2.4 widać, że teoretyczna moc produkowana przez panel na trackerze jednoosiowym jest znacznie większa od tej produkowanej przez panel stały w szczególności rano i wieczorem. Moc produkowana przez panel na badanym trackerze w okresie przejściowym pomiędzy godzinami porannymi, a południem oraz pomiędzy południem, a godzinami wieczornymi jest nieznacznie wyższa od mocy panelu stałego prawdopodobnie przez nieoptymalne śledzenie pozycji Słońca.

```
Energia wyprodukowana przez panel stały: 1.512kWh
Energia wyprodukowana przez tracker 1-osiowy: 1.936kWh
Energia wyprodukowana przez tracker 2-osiowy: 2.077kWh
Zysk energii trackera 1-osiowego w stosunku do panelu stałego: 28.1%
Zysk energii trackera 2-osiowego w stosunku do panelu stałego: 37.4%
Stosunek energii z trackera 1-os. do energii z trackera 2-os.: 93.2%
```

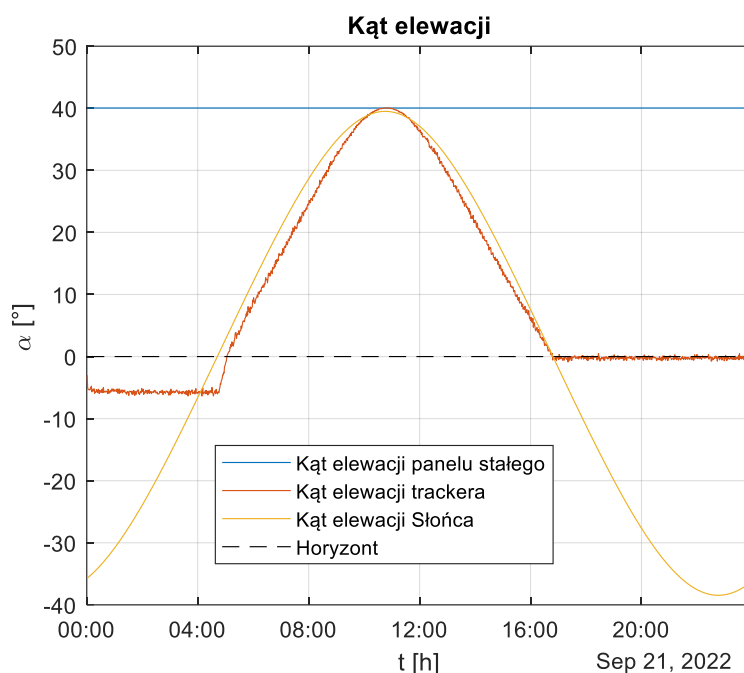
Rys. 5.2.5. Teoretyczna energia wyprodukowana przez wszystkie 3 panele fotowoltaiczne dla dnia 21 czerwca 2022

Teoretyczna energia wyprodukowana przez tracker jednoosiowy (Rys. 5.2.5) była znacznie większa od teoretycznej energii wyprodukowanej przez panel stały (o 28,1 %). Wyniosła 93,2 % teoretycznej wartości energii wyprodukowanej przez tracker dwuosiowy.

### 5.3. Jesień

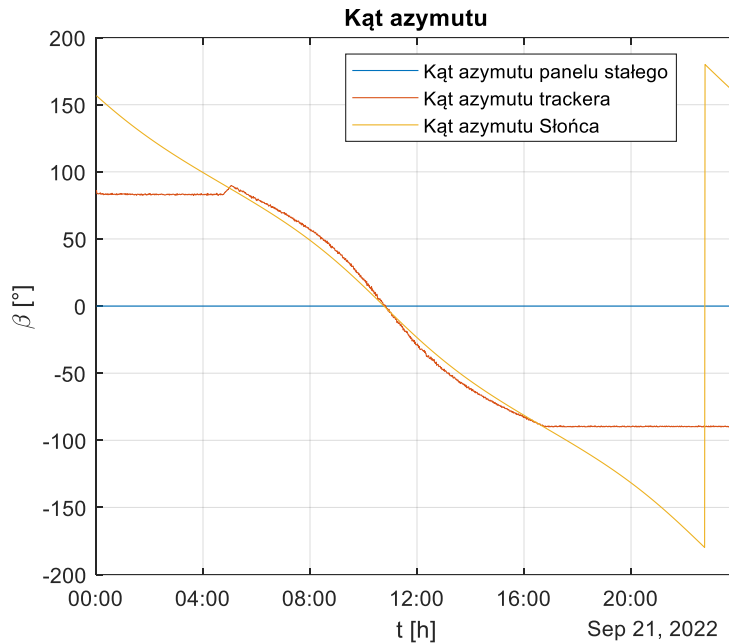
W drugim badaniu ustawiono datę badań w trybie testowym programu Arduino na 21 września 2022. W tym okresie roku dzień i noc trwają po około 12 godzin. Zakładano, że tego dnia energia produkowana przez panel na trackerze jednoosiowym będzie pokrywać się z teoretyczną energią produkowaną przez panel dwuosiowy na tyle dokładnie, że będzie można przyjąć, że są one sobie równe, a rozbieżność w produkcji energii wynikać będzie z niedokładności regulacji prototypu trackera jednoosiowego. Optymalny kąt nachylenia

podstawy urządzenia tego dnia to  $50^\circ$ . Zakres regulacji nachylenia podstawy urządzenia to zaledwie  $35^\circ$  dlatego konieczne było podłożenie pod śrubę regulacyjną kilku przedmiotów.



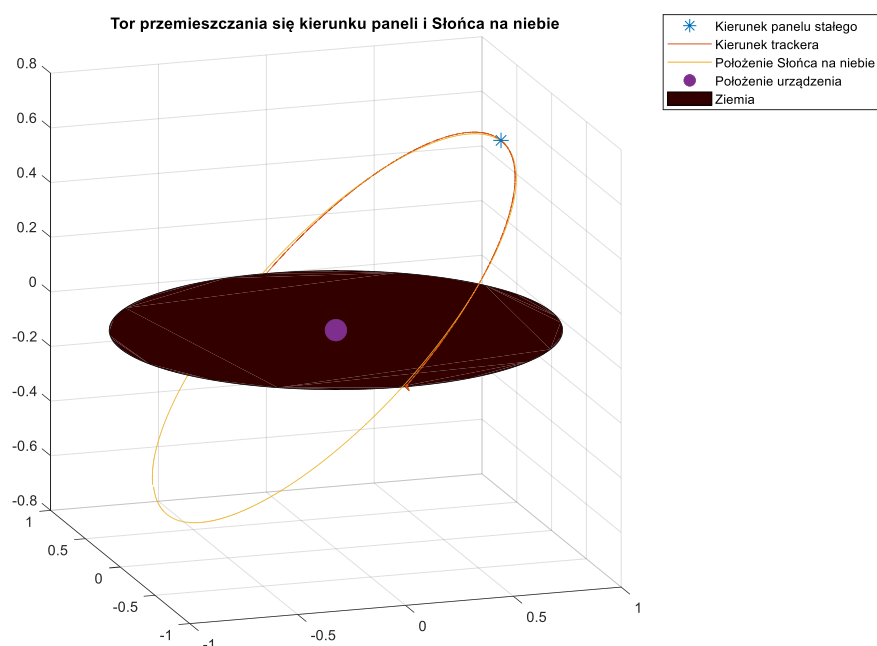
Rys. 5.3.1. Kąt elewacji  $\alpha$  paneli i pozycji Słońca zmieniający się w czasie dla dnia 21 września 2022

Jak widać na Rys. 5.3.1 kąt elewacji panelu stałego nie zmienia się. Wynosi on około  $41^\circ$ . Został dobrany tak, aby był zbliżony do maksymalnego kąta elewacji Słońca tego dnia. Kąt elewacji badanego trackera na początku doby został ustawiony na około  $-6^\circ$ . Jest to błąd, który wynika z niedokładnego działania programu. W założeniu kąt elewacji na początku doby powinien wynosić  $0^\circ$ , ale to odchylenie od założenia nie ma dużego wpływu na teoretyczną wyprodukowaną energię, ponieważ rano i wieczorem, kiedy Słońce znajduje się nisko nad horyzontem produkcja energii i tak jest bardzo niska. Następnie tracker oczekiwał w pozycji zbliżonej do  $0^\circ$  kąta elewacji aż do momentu, w którym azymut pozycji Słońca zrównał się z azymutem trackera (czyli około  $90^\circ$  na wschód, Rys. 5.3.2) oraz elewacja Słońca osiągnęła wartość kąta większą od zera, czyli nastął dzień. Elewacja kierunku trackera podążała za elewacją Słońca aż do osiągnięcia maksymalnej wartości kąta równej około  $41^\circ$ , a następnie aż do wartości kąta  $0^\circ$  po osiągnięciu przez azymut Słońca wartości kąta  $90^\circ$  na zachód, czyli kąta azymutu, na którym zachodzi Słońce tego dnia.



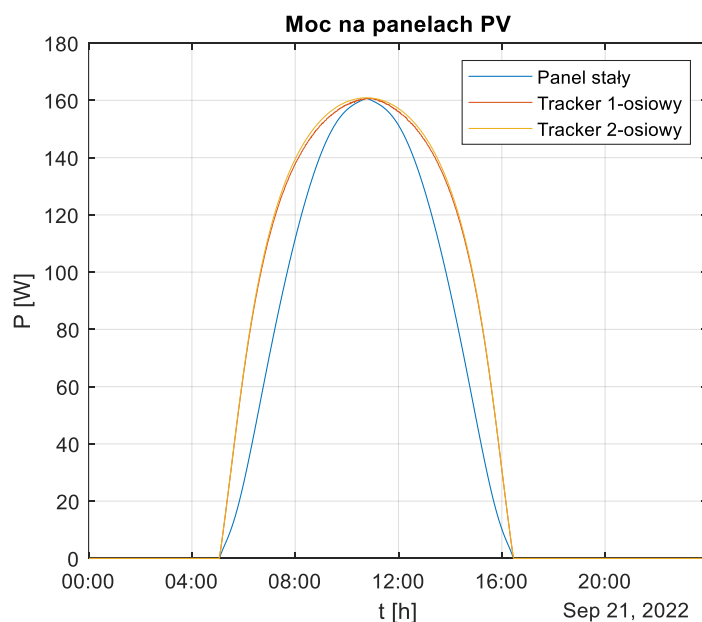
Rys. 5.3.2. Kąt azymutu  $\beta$  paneli i pozycji Słońca zmieniający się w czasie dla dnia 21 września 2022

Na Rys. 5.3.2 widać, że kąt azymutu panelu stałego wynosi zawsze  $0^\circ$ . Kąt azymutu badanego trackera podąża za azymutem Słońca, lecz nie pokrywa wykresu azymutu Słońca dokładnie. Tracker rozpoczyna podążanie za azymutem Słońca w momencie, kiedy kąt azymut Słońca zrówna się z maksymalnym kątem nachylenia trackera na wschód równym  $90^\circ$  oraz kiedy kąt elewacji Słońca osiągnie wartość dodatnią (w przypadku 21 września oba warunki zostają spełnione w zbliżonym punkcie w czasie). Kąt nachylenia trackera podąża za kątem azymutu Słońca aż do osiągnięcia maksymalnego kąta nachylenia trackera na zachód oraz kąt elewacji Słońca osiągnie wartość ujemną (w przypadku 21 września oba warunki zostają spełnione w zbliżonym punkcie w czasie).



Rys. 5.3.3. Wykres toru przemieszczania się kierunku paneli i Słońca na niebie dla dnia 21 września 2022

Na Rys. 5.3.3 widać w jaki sposób tracker podąża za Słońcem. Linia kreślona przez tracker jednoosiowy pokrywa się z linią kreśloną przez Słońce na niebie bardzo dokładnie.



Rys. 2. Teoretyczna moc produkowana przez panel stały, na trackerze jednoosiowym i na trackerze dwuosiowym dla dnia 21 września 2022

Na Rys. 5.3.4 widać, że teoretyczna moc produkowana przez panel na trackerze jednoosiowym jest znacznie większa od tej produkowanej przez panel stały i pokrywa się bardzo dokładnie z teoretyczną mocą produkowaną przez panel na trackerze dwuosiowym.

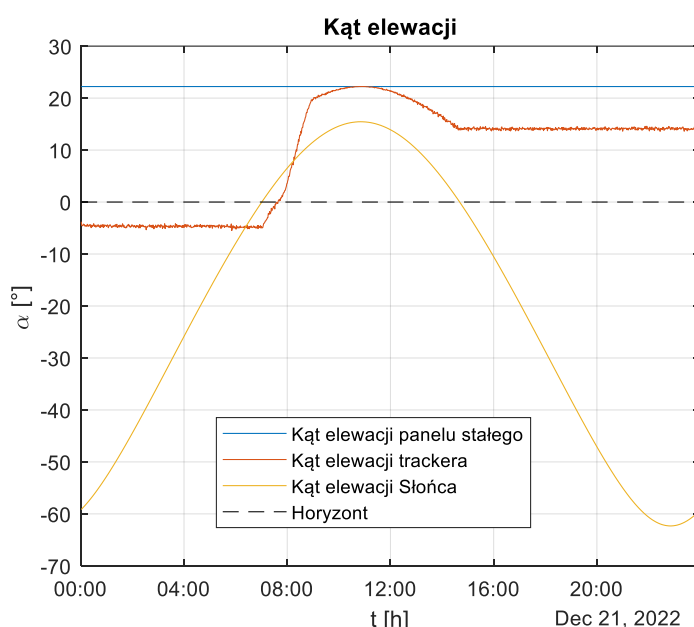
Energia wyprodukowana przez panel stały: 1.1kWh  
 Energia wyprodukowana przez tracker 1-osiowy: 1.34kWh  
 Energia wyprodukowana przez tracker 2-osiowy: 1.351kWh  
 Zysk energii trackera 1-osiowego w stosunku do panelu stałego: 21.9%  
 Zysk energii trackera 2-osiowego w stosunku do panelu stałego: 22.9%  
 Stosunek energii z trackera 1-os. do energii z trackera 2-os.: 99.2%

Rys. 5.3.5. Teoretyczna energia wyprodukowana przez wszystkie 3 panele fotowoltaiczne dla dnia 21 września 2022

Teoretyczna energia wyprodukowana przez tracker jednoosiowy (Rys. 5.3.5) była znacznie większa od teoretycznej energii wyprodukowanej przez panel stały (o 21,9 %). Wyniosła aż 99,2 % teoretycznej wartości energii wyprodukowanej przez tracker dwuosiowy. Ta rozbieżność może być spowodowana niedokładną regulacją kąta azymutu prototypowego trackera, dlatego możemy założyć, że teoretyczna energia wyprodukowana przez tracker jednoosiowy w okolicach równonocy jesiennej i wiosennej jest równa teoretycznej energii wyprodukowanej przez tracker dwuosiowy w tym samym czasie.

## 5.4. Zima

W trzecim badaniu ustawiono datę badań w trybie testowym programu Arduino na 21 grudnia 2022. W tym okresie roku dzień trwa najkrócej. Zakładano, że tego dnia teoretyczna energia wyprodukowana przez panel na trackerze jednoosiowym będzie znacznie niższa od teoretycznej energii wyprodukowanej przez tracker dwuosiowy. Optymalny kąt nachylenia podstawy urządzenia tego dnia to aż 75 °. Zakres regulacji nachylenia podstawy urządzenia to zaledwie 35 ° dlatego konieczne było podłożenie pod śrubę regulacyjną kilku przedmiotów.

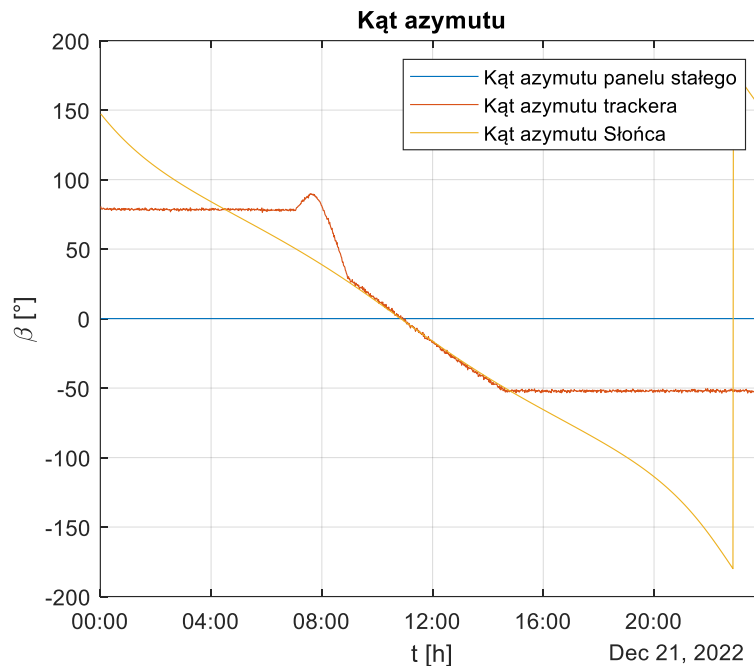


Rys. 5.4.1. Kąt elewacji  $\alpha$  paneli i pozycji Słońca zmieniający się w czasie dla dnia 21 grudnia 2022

Jak widać na Rys. 5.4.1 kąt elewacji panelu stałego nie zmienia się. Wynosi on około 22 °. Został dobrany tak, aby był zbliżony do maksymalnego kąta elewacji Słońca tego dnia. Kąt elewacji badanego trackera na początku doby został ustawiony na około -4 °. Jest to błąd, który wynika z niedokładnego działania programu. W założeniu kąt elewacji na początku doby

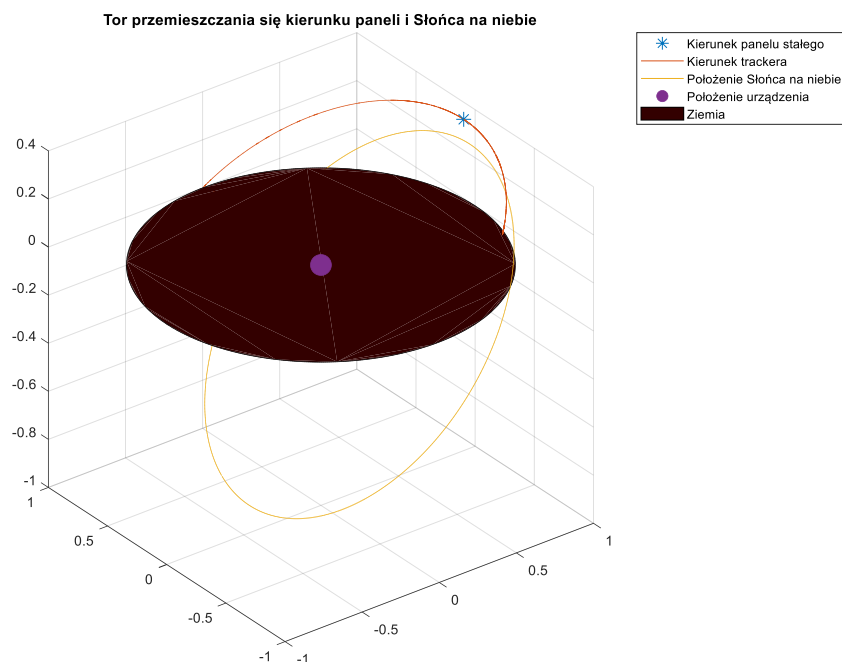


powinien wynosić  $0^\circ$ , ale to odchylenie od założenia nie ma dużego wpływu na teoretyczną wyprodukowaną energię, ponieważ rano i wieczorem, kiedy Słońce znajduje się nisko nad horyzontem produkcja energii i tak jest bardzo niska. Następnie tracker oczekiwał w pozycji zbliżonej do  $0^\circ$  kąta elewacji aż do momentu, w którym elewacja Słońca osiągnęła wartość kąta większą od zera, czyli nastął dzień. Elewacja kierunku trackera podążała za elewacją Słońca aż do osiągnięcia maksymalnej wartości kąta równej około  $22^\circ$ , a następnie aż do wartości kąta  $0^\circ$  po osiągnięciu przez azymut Słońca wartości kąta około  $50^\circ$  na zachód, czyli kąta azymutu, na którym zachodzi Słońce tego dnia.



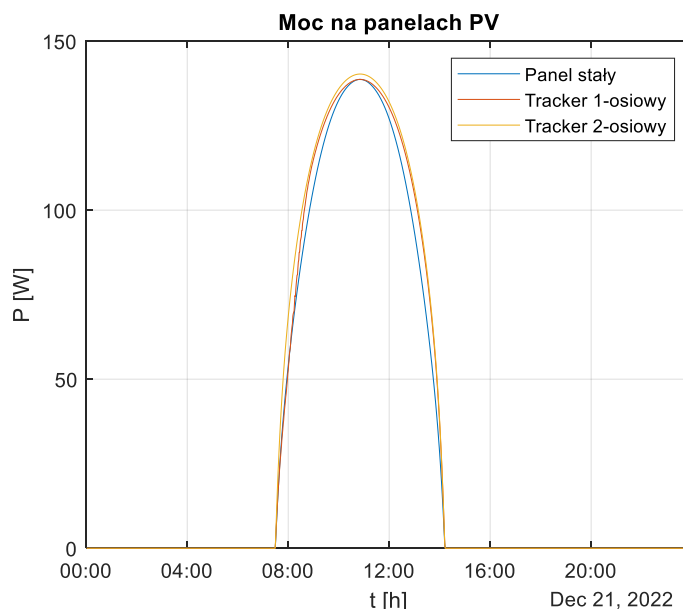
Rys. 5.4.2. Kąt azymutu  $\beta$  paneli i pozycji Słońca zmieniający się w czasie dla dnia 21 grudnia 2022

Na Rys. 5.4.2 widać, że kąt azymutu panelu stałego wynosi zawsze  $0^\circ$ . Kąt azymutu badanego trackera podąża za azymutem Słońca, lecz nie pokrywa wykresu azymutu Słońca dokładnie. Jest to wynikiem niedokładnego działania programu w przyspieszonym trybie testowym (regulacja nie nadążała za symulowanym Słońcem przemieszczającym się po niebie) i niedokładnego elektronicznego żyroskopu. Tracker rozpoczyna podążanie za azymutem Słońca w momencie, kiedy kąt elewacji Słońca osiągnie wartość dodatnią (Rys. 5.4.1). Kąt nachylenia trackera podąża za kątem azymutu Słońca aż do zachodu Słońca, czyli momentu, w którym elewacja Słońca osiągnie ujemną wartość kąta.



Rys. 5.4.3. Wykres toru przemieszczania się kierunku paneli i Słońca na niebie dla dnia 21 grudnia 2022

Na Rys. 5.4.3 widać w jaki sposób tracker podąża za Słońcem. Im bliżej zenitu znajduje się Słońce tym dokładniej jest śledzone przez badany system nadążny jednoosiowy, ponieważ tym mniejszy jest kąt pomiędzy kierunkiem na Słońce, a kierunkiem trackera.



Rys. 5.4.4. Teoretyczna moc produkowana przez panel stały, na trackerze jednoosiowym i na trackerze dwuosiowym dla dnia 21 grudnia 2022

Na Rys. 5.4.4 widać, że teoretyczna moc produkowana przez panel na trackerze jednoosiowym i dwuosiowym jest nieznacznie większa od tej produkowanej przez panel stały, ponieważ zimą Słońce na niebie przemieszcza się po krótkiej trasie i śledzenie go nie przynosi zadowalających efektów.

Energia wyprodukowana przez panel stały: 0.6715kWh  
Energia wyprodukowana przez tracker 1-osiowy: 0.7043kWh  
Energia wyprodukowana przez tracker 2-osiowy: 0.7253kWh  
Zysk energii trackera 1-osiowego w stosunku do panelu stałego: 4.88%  
Zysk energii trackera 2-osiowego w stosunku do panelu stałego: 8.01%  
Stosunek energii z trackera 1-os. do energii z trackera 2-os.: 97.1%

Rys. 5.4.5. Teoretyczna energia wyprodukowana przez wszystkie 3 panele fotowoltaiczne dla dnia 21 grudnia 2022

Teoretyczna energia wyprodukowana przez tracker jednoosiowy (Rys. 5.4.5) była nieznacznie większa od teoretycznej energii wyprodukowanej przez panel stały (o 4,88 %). Teoretyczna energia wyprodukowana przez tracker dwuosiowy również była nieznacznie większa od teoretycznej energii wyprodukowanej przez panel stały (o 8,01 %). Teoretyczna energia wyprodukowana przez tracker jednoosiowy wyniosła 97,1 % teoretycznej wartości energii wyprodukowanej przez tracker dwuosiowy.

## 6. WNIOSKI

Tracker jednoosiowy pochyłony z możliwością manualnej regulacji kąta nachylenia w trakcie roku produkuje bardzo zbliżoną ilość energii w porównaniu do układu z trackerem dwuosiowym przy znacznym zmniejszeniu kosztów inwestycji. Przy zastosowaniu jednego silnika i prostej konstrukcji, według przeprowadzonych badań, generuje od około 93 do 99 % teoretycznej energii wyprodukowanej przez tracker dwuosiowy. Jednak należy zauważyć, że w badaniach porównano nieidealny prototyp trackera jednoosiowego pochyłonego z idealnym trackerem dwuosiowym, więc w rzeczywistości wyniki osiągnięte przez badany tracker byłyby jeszcze bardziej zbliżone. Można założyć, że tracker jednoosiowy w okolicach równonocy wiosennej oraz jesiennej osiąga wyniki równie dobre co tracker dwuosiowy, a różnica 0,8 % wynika z niedokładności prototypu badanego trackera, którą posiadałby również tracker dwuosiowy.

W badaniach założono zerowe zachmurzenie i niezmienną pogodę. Sprawność badanego trackera w stosunku do trackera dwuosiowego nie powinna spaść pod wpływem wysokiego zachmurzenia, ale przy obliczeniach całorocznych należałoby uwzględnić większe zachmurzenie w niektórych okresach roku.

W badaniach dla dni zimowych, podczas których maksymalna elewacja Słońca osiągała nieduże wartości konieczne jest ulepszenie konstrukcji - zwiększenie zakresu regulacji nachylenia podstawy urządzenia z  $35^\circ$  do nawet  $75^\circ$  w celu zmaksymalizowania produkcji energii w tym okresie dla badanej lokalizacji (Wrocław, Polska). Ważna jest jak najdokładniejsza regulacja kąta nachylenia podstawy przez cały rok.

W programie sterującym zastosowano niedokładny sposób śledzenia Słońca przyrównując kąt rotacji trackera do kąta azymutu pozycji Słońca. Efekty niepoprawnego podążania za Słońcem najdokładniej widać na wykresie kątów azymutu dla 21 czerwca 2022 (Rys. 17), czyli dla dnia, w którym produkcja energii elektrycznej ze Słońca teoretycznie jest największa. W celu zminimalizowania kąta odchylenia kierunku trackera od kierunku na Słońce (Rys. 14) należałoby zastosować wzory (2, 3) do przeliczania kąta nachylenia i kąta rotacji trackera na kąt elewacji i kąt azymutu trackera [9]. Samą poprawką wprowadzoną do programu sterującego można podnieść produkcję energii w najważniejszym okresie w roku dla fotowoltaiki.

Z badań wynika, że ogólnie dla wszystkich trackerów solarnych okres, w którym zysk produkcji energii elektrycznej w stosunku do paneli stałych jest największy to okres letni, w którym Słońce osiąga największy kąt azymutu na niebie zarówno na wschód jak i na zachód – przemieszcza się po niebie w największym zakresie. W dniu 21 czerwca 2022 roku dla trackera jednoosiowego teoretyczny zysk energii wynosi 28,1 %, a dla trackera dwuosiowego 37,4 %. W okresie zimowym zysk produkcji energii elektrycznej jest najniższy, ponieważ osiągnięty kąt azymutu zarówno na wschód jak i na zachód jest najmniejszy. Słońce przemieszcza się po niebie w najmniejszym zakresie. W dniu 21 grudnia 2022 roku dla trackera jednoosiowego teoretyczny zysk energii wynosi 4,88 %, a dla trackera dwuosiowego 8,01 %.

Cel i zakres pracy zostały zrealizowane, a badania dowiodły, że przy zastosowaniu trackera jednoosiowego pochyłonego jest możliwe uzyskanie produkcji energii na bardzo zbliżonym poziomie do trackera dwuosiowego przy zmniejszonych kosztach inwestycji.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] David Cooke, „Single vs. Dual Axis Solar Tracking”, Alternate Energy eMagazine, April 2011.
- [2] *ebvalaim.log*  
<https://ebvalaim.pl/2020/05/19/mierzenie-pozycji-iss/>
- [3] *ecplaza* - Tilted single-axis solar Tracking System  
[https://www.ecplaza.net/products/tilted-single-axis-solar-tracking-system\\_3724850](https://www.ecplaza.net/products/tilted-single-axis-solar-tracking-system_3724850)
- [4] Emila Biernaciak - „Fotowoltaika na trackerach – kiedy warto w nią zainwestować?”  
<https://enerad.pl/aktualnosci/fotowoltaika-na-trackerach/>
- [5] Ignacio Luque-Heredia et al., „The Sun Tracker in Concentrator Photovoltaics” in Cristobal, A.B., Martí, A., and Luque, A. Next Generation Photovoltaics, Springer Verlag, 2012 ISBN 978-3642233692.
- [6] Kelly Pickerel - „What is a dual-axis solar tracker?”  
<https://www.solarpowerworldonline.com/2017/09/dual-axis-solar-tracker/>
- [7] *PVPerformance* - PVLIB Toolbox for Matlab Function Documentation and Help  
[https://pvpmc.sandia.gov/PVLIB\\_Matlab\\_Help/](https://pvpmc.sandia.gov/PVLIB_Matlab_Help/)
- [8] *Stellarium*  
<https://stellarium-web.org/>
- [9] William F. Marion and Aron P. Dobos – „Rotation Angle for the Optimum Tracking of One-Axis Trackers”, July 2013, <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58891.pdf>