



Wiktor Czechowski

nr albumu: 41344

kierunek studiów: Informatyka

forma studiów: studia stacjonarne

specjalność: Systemy zorientowane na człowieka

**Cyfrowe algorytmy sterowania pozycji panelu fotowoltaicznego ze
śledzeniem pozycji Słońca**

**Digital control algorithms of the solar panel position with a sun position
tracking**

Praca dyplomowa magisterska

napisana pod kierunkiem:

dr inż. Sławomir Jaszczałk, prof. ZUT

Katedra Sztucznej Inteligencji i Matematyki Stosowanej

Data wydania tematu pracy: 26.11.2021 r.

Data dopuszczenia pracy do egzaminu:

Szczecin, 2022

OŚWIADCZENIE
AUTORA PRACY DYPLOMOWEJ

Oświadczam, że praca dyplomowa magisterska pn. *Cyfrowe algorytmy sterowania pozycji panelu fotowoltaicznego ze śledzeniem pozycji Słońca* napisana pod kierunkiem dr. inż. Sławomira Jaszczaka, prof. ZUT jest w całości moim samodzielnym autorskim opracowaniem sporządzonym przy wykorzystaniu wykazanej w pracy literatury przedmiotu i materiałów źródłowych. Złożona w dziekanacie Wydziału Informatyki treść mojej pracy dyplomowej w formie elektronicznej jest zgodna z treścią w formie pisemnej.

Oświadczam ponadto, że złożona w dziekanacie praca dyplomowa ani jej fragmenty nie były wcześniej przedmiotem procedur procesu dyplomowania związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w uczelniach wyższych.

Podpis autora: ..*Gedlonski Niktor*.....

Szczecin, dnia: *14.11.2022*.....

Streszczenie pracy

Celem niniejszej pracy było skonstruowanie urządzenia zdolnego do nakierowania zestawu paneli słonecznych względem pozycji Słońca, opracowanie sposobu pomiaru energii generowanej przez panele fotowoltaiczne oraz przeprowadzenie stosownych badań pozwalających odpowiedzieć na pytanie czy ciągłe nakierowywanie ogniw fotowoltaicznych prostopadle do pozycji Słońca spowoduje zwiększenie generowanej przez nie energii. W ramach pracy skonstruowano ww. układ wykonawczo-nastawczy. Opracowano niezależny algorytm wytyczania pozycji Słońca oraz opracowano miernik prądowy wykorzystany do realizacji pomiarów energetycznych. Przeprowadzone badania potwierdziły występowanie korzyści płynących z nakierowywania ogniw fotowoltaicznych prostopadle do kąta padania Słońca oraz pozwoliły określić warunki pogodowe, które muszą nastąpić, aby wystąpił nastąpił przyrost generowanej energii.

Słowa kluczowe

Oprogramowanie sterujące, mikrokontroler, system sterowania

Abstract

The goal of this thesis was to construct a device that can direct solar panel to the sun position, to develop a method of measuring the energy generated by photovoltaic panels, and to carry out relevant tests to answer the question of whether constantly directing photovoltaic panels to the position of the sun, will increase the energy they generate. As part of the work, an actuating and adjusting system was assembled. An independent algorithm for delineating the position of the Sun was developed, and a current meter used to realize energy measurements. The conducted tests confirmed the existence of the benefits of directing photovoltaic cells perpendicular to the Sun's, and made it possible to determine the weather conditions that must occur for an increase in the generated energy to occur.

Keywords

Control software, microcontroller, control system

Spis treści

WPROWADZENIE	5
1. KONWERSJA ENERGII W OGNIWIE SŁONECZNYM	6
1.1. PÓŁPRZEWODNIK ZE ZŁĄCZEM P-N	6
1.2. EFEKT FOTOWOLTAICZNY.....	7
1.3. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA SPRAWNOŚĆ OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH	7
1.4. BUDOWA ORAZ RODZAJE OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH.....	10
1.5. POZORNA WĘDRÓWKA SŁOŃCA.....	12
2. KONSTRUKCJA URZĄDZEŃ WYKONAWCZYCH ORAZ URZĄDZEŃ POMIAROWYCH.....	16
2.1. UKŁAD WYKONAWCZO-NASTAWCZY	17
2.2. MIERNIK PRĄDOWY	22
3. INTEGRACJA OPROGRAMOWANIA	26
3.1. SKRYPT WYTYCZAJĄCY POZYCJE SŁOŃCA	29
3.2. STEROWANIE UKŁADEM WYKONAWCZYM	31
3.3. MIERNIK PRĄDOWY	37
4. BADANIA.....	40
4.1. TEST 1.....	41
4.2. TEST 2.....	44
4.3. TEST 3.....	47
4.4. TEST 4.....	50
4.5. PODSUMOWANIE BADAŃ	51
5. DYSKUSJA	52
5.1. OGÓLNA OCENA	52
5.2. WYKORZYSTANIE ZEBRANYCH DOŚWIADCZEŃ W ROZWOJU PROJEKTU	52
BIBLIOGRAFIA.....	53
SPIS TABEL.....	55
SPIS RYSUNKÓW.....	55

Wprowadzenie

Opracowanie jest kontynuacją pracy inżynierskiej „Stacja ładowania z wykorzystaniem układu nakierowującego panel fotowoltaiczny na kąt padania Słońca”. Urządzenie skonstruowane na potrzeby wyżej wymienionej pracy miało zostać udoskonalone. Ze względu na wykorzystanie nowych elementów nastawczo-wykonawczych oraz innego sposobu wytyczania pozycji Słońca, całość urządzenia została opracowana od nowa a jego forma została uproszczona. Funkcjonalność urządzenia ogranicza się jedynie do wytyczania pozycji Słońca oraz wykonywania ruchu, zrezygnowano z modułu magazynującego energię, modułu ładującego zewnętrzne urządzenia, możliwości ręcznego sterowania a także rozwiązań ograniczających pobór prądu w stanie czuwania. Baza kodowa została całkowicie zmieniona, składa się ona z dwóch współpracujących ze sobą programów. Pierwszy program to napisany w języku Python, algorytm wytyczający kąt padania Słońca na podstawie lokalizacji i czasu oraz wysyłający dane za pośrednictwem uniwersalnej magistrali szeregowej. Drugi program to napisany w języku Arduino to zestaw procedur odpowiadających za sterowanie silnikami i odczyt informacji z sensorów tak jak: fotorezystory oraz czujniki położenia wałów. Odbiera on dane dotyczące aktualnej pozycji Słońca za pomocą portu USB. Komunikacja z użytkownikiem również została przemodelowana, odbywa się za pomocą wyświetlacza LCD a samo urządzenie jest w pełni autonomiczne. Jego obsługa ogranicza się jedynie do podłączenia zasilania oraz ręcznego uruchomienia programu wytyczającego kąt padania Słońca. Na potrzeby badań opracowany został miernik prądowy wykorzystujący do działania sterownik z rodziny Arduino oraz bocznik prądowy.

Cel pracy

Opracowanie, implementacja i praktyczna weryfikacja wybranych algorytmów sterowania cyfrowego z wykorzystaniem układu regulacji pozycji zestawu paneli słonecznych, tak aby maksymalizować ilość uzyskiwanej energii.

Zakres pracy

W ramach pracy opracowano i wykonano prototyp hardware (konstrukcja, elementy automatyki) urządzenia zdolnego do wytyczenia pozycji Słońca oraz prostopadłego ustawiania zestawu paneli fotowoltaicznych względem wytyczonej pozycji. Przygotowano dokumentację techniczną dla konstrukcji oraz instalacji elektrycznej, opracowano i zaimplementowano oprogramowania odpowiedzialne za automatyczne sterowanie w osiach X i Y. Wykonano urządzenie pozwalające na pomiar prądu, za jego pomocą przeprowadzono pomiary ilości uzyskanej energii w układzie bez systemu śledzącego pozycję Słońca i z aktywnym układem śledzenia. Przeanalizowano jakość i stabilność sterowania oraz wytyczania pozycji Słońca. Wykonano dokumentację oprogramowania.

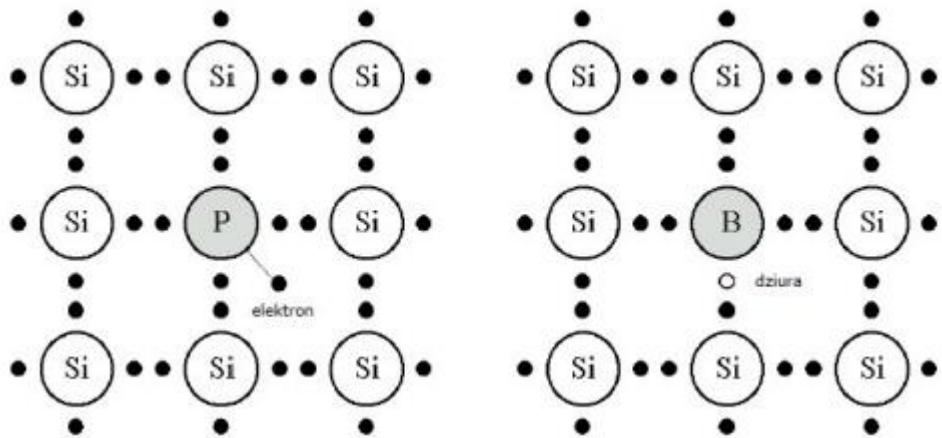
1. Konwersja energii w ogniwie słonecznym

W ogniwie słonecznym dochodzi do przemiany energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną, co za tym idzie ilość generowanej energii będzie zależna od energii zaabsorbowanej przez ognisko. Ta natomiast pochodząca bezpośrednio z gwiazdy centralnej układu Słonecznego, przechodzi długą i skomplikowaną drogę, zanim dotrze do powierzchni Ziemi. Aby rozpocząć dyskusję nad sprawnością instalacji fotowoltaicznych i zaproponować rozwiązania, które mogłyby zwiększyć ich wydajność konieczne jest zapoznanie się ze zjawiskami, które fala elektromagnetyczna napotyka na swojej drodze ze Słońca do powierzchni ziemi oraz zjawiskami i mechanizmami zachodzącymi w ogniwie słonecznym w trakcie konwersji energii. W wypadku tego drugiego niezbędne jest zatem zapoznani się budową ogniska słonecznego, które w istocie jest półprzewodnikową diodą. Do pełnego zrozumienia tematu należy odwołać się zatem do podstaw elektroniki półprzewodnikowej oraz fizyki.

1.1. Półprzewodnik ze złączem p-n

Półprzewodnikiem określane jest ciało stałe, którego opór elektryczny zależny jest od warunków zewnętrznych i może przybierać zarówno wartości oporu charakterystyczne dla metali, jak i dielektryków. Warunki zewnętrzne wpływające na przewodnictwo materiału to np. pole elektryczne, temperatura lub natężenie światła. [6,7]

Złącze p-n to złącze dwóch półprzewodników o różnych typach przewodnictwa. Najczęściej różnice w przewodnictwie otrzymuje się poprzez odpowiednie domieszkowanie półprzewodnika. Złącze n wzbogacane jest atomami pierwiastków o większej liczbie elektronów niż materiał, z którego wykonano półprzewodnik. Złącze p natomiast domieszuje się atomami o mniejszej liczbie elektronów. Zabieg ten sprawi, że w obrębie złącza n pojawią się elektrony nieprzywiązane do żadnego jądra atomowego. Elektrony posiadają ujemny ładunek elektryczny. Odwrotny proces nastąpi na złączu p, gdzie ze względu na niższą liczbę elektronów powstaną dziury, czyli braki elektronów w powłoce wokół atomów. [6,7]



Rysunek 1.1. Krzemowa struktura półprzewodnika domieszkowana fosforem na złączu n (po lewej) oraz borem na złączu p (po prawej). W obrębie złącza n pojawiają się wolne elektrony, a w obszarze złącza p dziury

Źródło: Na podstawie [3]

Za sprawą dyfuzji, dojdzie do rekombinacji na styku złącz p i n. Powstała w ten sposób warstwa zubożona jest obszarem, w którym elektrony wypełniają dziury. Obszar ten nazywany również pasmem zabronionym. Staje się separatorem dla dwóch typów złącz. [3]

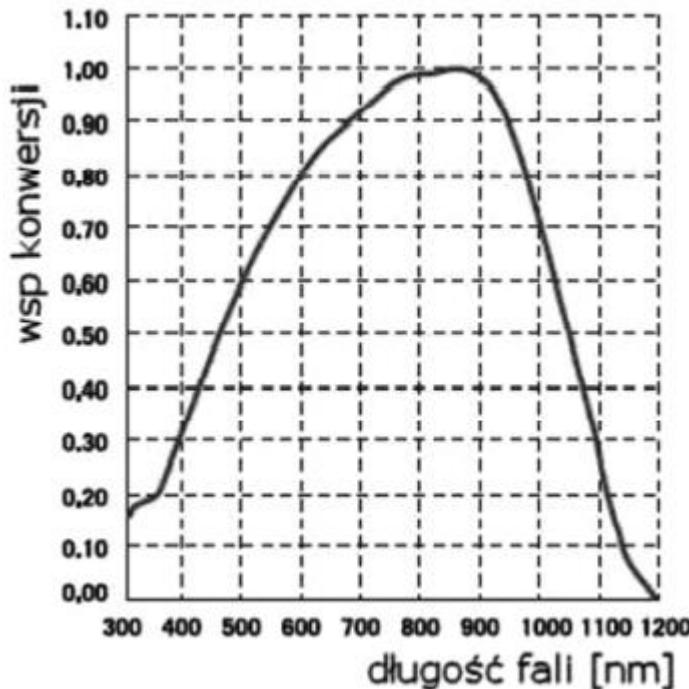
1.2. Efekt fotowoltaiczny

Bezpośrednią przyczyną powstawania energii elektrycznej w panelach słonecznych jest absorpcja promieniowania światelnego poprzez strukturę półprzewodnika o złączu p-n. Kwantowa teoria promieniowania światelnego zakłada, że światło to strumień fotonów. Każdy z fotonów niesie ze sobą określony kwant energii. Foton o dostatecznie dużej energii jest w stanie wybić elektron z powłoki atomu, co skutkuje powstaniem dziury. Pole elektryczne powstające wokół półprzewodnika przesuwa wybite wcześniej ujemnie naładowane elektrony w stronę złącza n, a nowo powstałe dodatnio naładowane dziury w stronę obszaru p. W ten sposób na złączach półprzewodnika odkładają się różne potencjały energetyczne a co za tym idzie napięcie. Jeżeli złącza p i n zostaną zamknięte obwodem różnica potencjałów na złączach doprowadzi do uporządkowanego ruchu ładunków ze złącza p do złącza n, czyli prądu elektrycznego. [3,5,6,8,13]

1.3. Czynniki wpływające na sprawność ogniw fotowoltaicznych

Aby doszło do wybitia elektronu w ogniwie fotowoltaicznym energia fotonu, musi być większa niż szerokość pasma zabronionego oraz nie powinna być większa niż energia bariery potencjału, ponieważ w takim wypadku energia fotonu nie zostanie w pełni wykorzystana. Im więcej fotonów będzie miało taką energię, tym więcej elektronów zostanie wybitych a na złączach półprzewodnika utworzy się większa różnica

potencjałów. Większa różnica potencjałów oznacza większe napięcie elektryczne. [3,5,6,8,13]

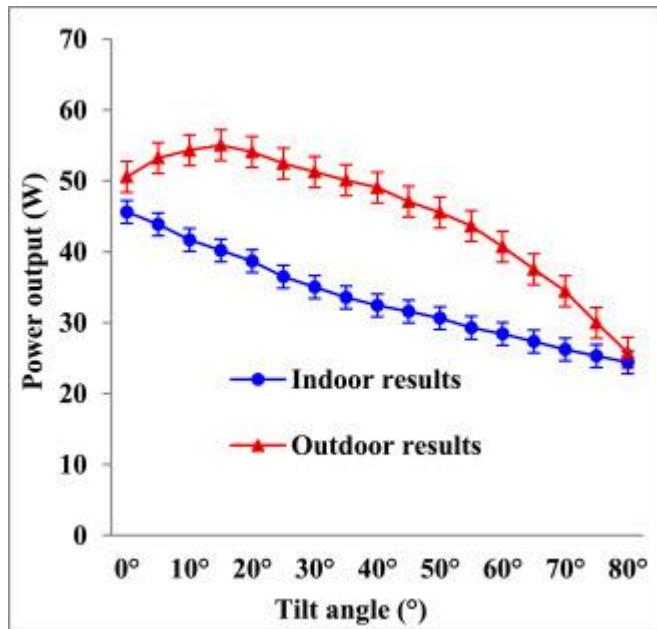


Rysunek 1.2 Wykres przedstawia zdolność do wybijania elektronów w zależności od długości fali
 Źródło: [6]

Zgodnie z powyższym rysunkiem efekt fotowoltaiczny zachodzi w całym spektrum światła widzialnego, jednak największą zdolność do wybijania elektronów ma światło bliskie podczerwieni i niewielki zakres światła podczerwonego. Jedynie około 30% światła słonecznego docierającego do ziemi to fale w zakresie 700-950 nm. Po uwzględnieniu wszystkich czynników okazuje się, że nawet najwydajniejsze ogniwa fotowoltaiczne osiągają sprawność rzędu zaledwie 20%. W praktyce głównym czynnikiem wpływającym na maksymalną sprawność ogniw jest materiał, z którego wykonano półprzewodnik. Aspekt ten poruszany jest w większym stopniu w rozdziale 1.4 Budowa oraz rodzaje ogniw fotowoltaicznych. [3,6]

Innymi czynnikami zewnętrznymi, które wpływają na ilość energii generowanej przez panel fotowoltaiczny są:

- **Intensywność promieniowania** - wielkość strumienia promieniowania wysyłana w jednostkowy kąt bryłowy.
- **Przejrzystość atmosfery** – Na przejrzystość wpływa ilość pary wodnej, pyłów i zanieczyszczeń w powietrzu.
- **Kąt padania promieni słonecznych** - Na kąt padania promieni słonecznych wpływapora roku jak i pora dnia.

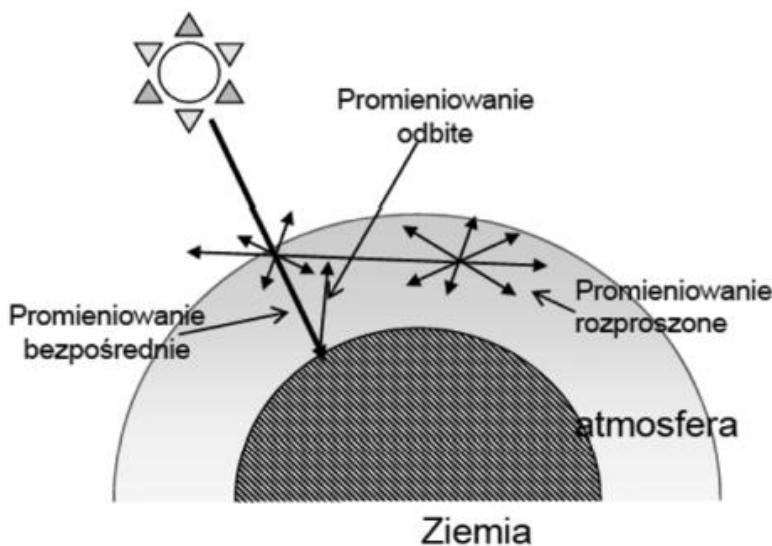


Rysunek 1.3 Ilość energii generowanej przez panel słoneczny w zależności od nachylenia
 Źródło: [11]

Badania przeprowadzone przez M.A.A. Mamun i współpracowników, w warunkach laboratoryjnych, gdzie źródło światła było umieszczone równolegle do płaszczyzny panelu słonecznego pokazują, że wraz ze zwiększeniem kąta pochylenia paneli, ilość generowanej przez nie energii malała. W przypadku pomiarów na zewnątrz najwięcej energii generowane było, gdy panel ustawiony był prostopadle do kierunku padania promieni słonecznych. Kąt ten wynosił około 20° . Odchylenie od tego kąta skutkowało spadkiem ilości generowanej energii. Należy jednak pamiętać, że panel powinien być ustawiony prostopadle zarówno w osi X, jak i osi Y. [11]

Kąt padania promieni słonecznych, a właściwie ustawienia urządzenia tak, aby kąt padania sprzyjał efektywności, jest jedynym parametrem, na który można wpływać w łatwy sposób.

Podczas przejścia światła przez atmosferę ziemską następuje szereg zjawisk, które mają bezpośredni wpływ na ilość promieniowania, które dociera do powierzchni ziemi. Zjawiska te to między innymi absorpcja i rozpraszań. [1,6,12]



Rysunek 1.4 Grafika obrazuje przechodzenie promieniowania słonecznego przez atmosferę
 Źródło: [6]

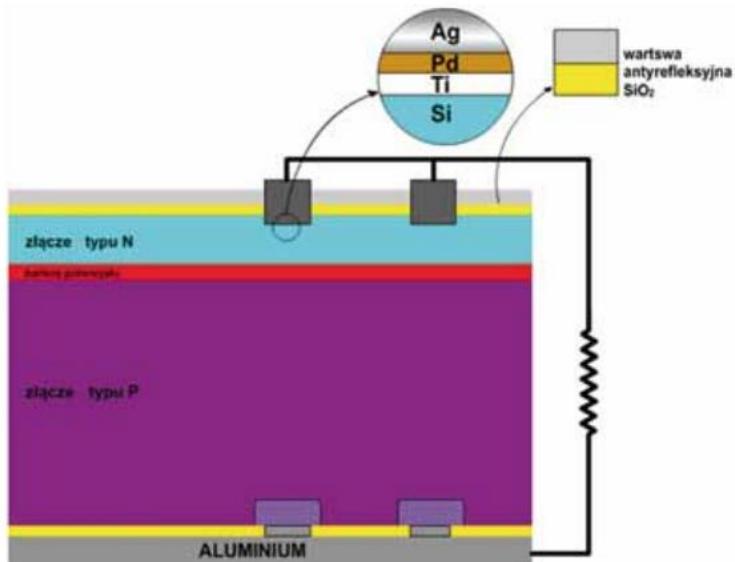
Wszystkie te zjawiska sprawiają, że promieniowanie dociera do ziemi w jednej z trzech form:

- **Promieniowanie bezpośrednie:** Posiada największy potencjał energetyczny. Kierunek jego padania ma wpływ na działanie ogniw fotowoltaicznych.
- **Promieniowanie dyfuzyjne (rozproszone):** Pochodzi z całej hemisfery nieba, fale są rozproszone. Posiada mniejszy potencjał energetyczny niż promieniowanie bezpośrednie. Kierunek padania ma mniejsze znaczenie a zjawisko pozwala na działanie ogniw w pochmurne dni.
- **Promieniowanie odbite:** Promieniowanie powstałe w wyniku obicia fali od powierzchni ziemi. Posiada praktycznie zerowy potencjał energetyczny ze względu na niemożliwy do określania kierunek.

Na to, jaki rodzaj promieniowania dotrze do powierzchni ziemi wpływa droga przebyta przez światło słoneczne. Ta zmienia się wraz z porą dnia, rokiem, pod wpływem lokalnych zmian w atmosferze oraz punktem położenia na powierzchni ziemi. [1,6,12]

1.4. Budowa oraz rodzaje ogniw fotowoltaicznych

Ognivo fotowoltaiczne jest specjalnym rodzajem półprzewodnika ze złączem p-n, technicznie diody. Wybijanie elektronów poza pasmo walencyjne odbywa się za sprawą energii promieniowania świetlnego. [3,6]



Rysunek 1.5 Budowa ogniwa fotowoltaicznego
Źródło: [6]

Ogólnie przyjęta klasyfikacja ogniw fotowoltaicznych dzieli je na generacje:

Generacja I - ogniwa, w których rolę półprzewodnika pełni krystaliczna struktura krzemu. Są to najczęściej produkowane rodzaje ogniw oraz oferują jeden z największych współczynników sprawności. Głównymi zaletami materiału, jakim jest krzem są: jego dostępność, nietoksyczność oraz ogólna charakterystyka półprzewodnika, która tworzy pasmo walencyjne dobrze nadające się do konwersji fotowoltaicznej. Cały czas trwają badania nad wykorzystaniem w produkcji ogniw alternatywnych materiałów, które pozwolą na zwiększenie sprawności energetycznej paneli fotowoltaicznych oraz obniżenie kosztów ich produkcji. [3,6,8,13]

Krzem użyty do wytworzenia ogniw może występować w postaci jednego kryształu. Określone są one mianem ogniw **monokrystalicznych**. Taki rodzaj materiału nie występuje w naturze a jego otrzymanie możliwe jest za pomocą złożonego procesu produkcyjnego. Wytworzony kryształ ma formę walca, który cięty jest na cienkie płatki. Monokrystaliczne ogniwa najczęściej przyjmują formę ośmiokątów, jest to efekt wycinania ich z walca. Materiał ten nie potrzebuje domieszkowania a różnice w typach przewodnictwa otrzymuje się poprzez dyfuzję fosforu w obszarze złącza n. Wysoki współczynnik odbicia światła krzemu sprawia, że konieczne jest pokrycie ogniwa warstwą przeciw-odbiciową lub specjalne teksturowanie powierzchni ogniwa. Współczynnik sprawności takich ogniw plasuje się granicach 18-22%. Produkcja monokrystalicznych ogniw jest jednak droga, tańszą alternatywą mogą być ogniva **polikrystaliczne**. Te wytarzane są z bloku krzemu w procesie topnienia oraz krystalizacji ukierunkowanej. Procesem tym towarzyszy etap domieszkowania, jego wprowadzenie jest konieczne w tym rodzaju ogniw. Dalszą częścią obróbki jest szlifowanie materiału oraz użycie metody serigrafii do nałożenia elektrod. Podobnie jak w przypadku ogniw monokrystalicznych na ogniwo polikrystaliczne nakładana jest warstwa antyrefleksyjna. Gotowe panele mają bardzo charakterystyczną strukturę z wyraźnymi, nachodzącymi na

siebie kryształami krzemu oraz niebieski kolor. Ten sposób produkcji oprócz obniżenia ceny niesie za sobą spadek sprawności ogniw, który wynosi od 14 do 18%. Polikrystaliczne ogniwa krzemowe pierwszej generacji są najczęściej używanym i najłatwiej dostępnym rodzajem ogniw. [3,6,8,13]



Rysunek 1.6 Wygląd paneli fotowoltaicznych I generacji. Monokrystaliczne (po lewej) posiadają charakterystyczne ścięte brzegi a polikrystaliczne różnobarwną strukturę

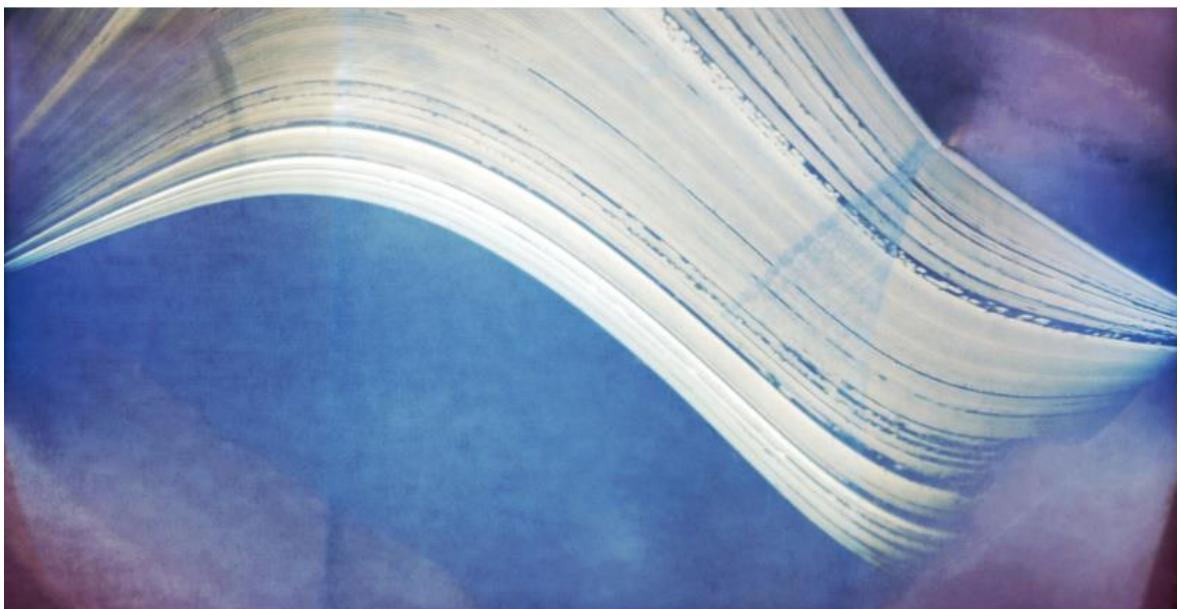
Źródło: [<https://www.prostarsolar.net/blog/differences-monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels.html>]

Generacja II – ogniwa tej generacji, w głównej mierze starają się ograniczyć koszty produkcji. Często zabieg ten niesie za sobą obniżenie sprawności, jednak w większości wypadków ilość uzyskanej energii w stosunku do ceny jest większa od ogniw pierwszej generacji. Materiały wykorzystywane do produkcji ogniw drugiej generacji to krzem amorficzny, polikrystaliczny telurek kadmu (CdTe), czy też polikrystaliczne warstwy CIS. [3,6,13]

Generacja III – generacja będąca wciąż w trakcie badań. Bardzo często rezygnuje się w niej z klasycznego złącza p-n. Oprócz prób obniżenia kosztów produkcji oraz zwiększenia wydajności, poszukuje się rozwiązań pozwalających produkować przeźroczyste ogniwa, które można by zamontować wewnątrz okien. [3,6]

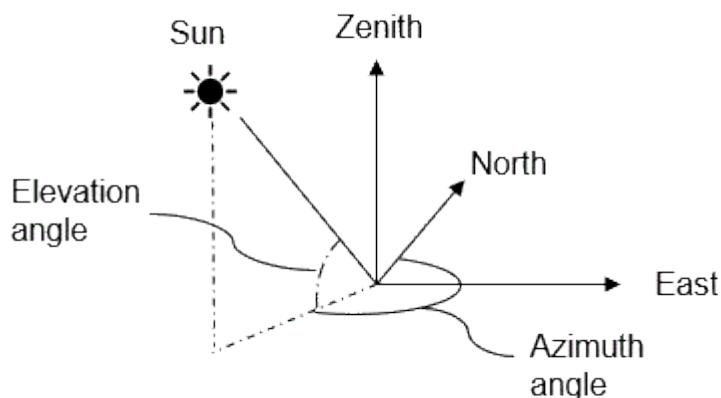
1.5. Pozorna wędrówka Słońca

Pozorna wędrówka Słońca jest konsekwencją ruchu obrotowego ziemi w cyklu dobowym oraz ruchu obiegowego w cyklu rocznym. Kierunek geograficzny, na którym można obserwować Słońce zmienia się w ciągu dnia, podobnie jak wysokość Słońca nad horyzontem. [4,6,9,10,11,12]



Rysunek 1.7 Zdjęcie przedstawia wędrówkę Słońca w okresie 6 miesięcy od przesilenia letniego do przesilenia zimowego
Źródło: ESO/R. Fosbury/T. Trygg/D. Rabanus

Pozycja Słońca dla zadanej lokalizacji i godziny jest możliwa do wyliczenia. Na reprezentacje pozycji Słońca składają się dwie zmienne: kąt elewacji oraz azymut. [4,9,10,11,12]



Rysunek 1.8 Graficzna reprezentacja azymutu (ang. Azimuth Angle) oraz kąta elewacji (ang. Elevation angle)

Źródło: [<https://keisan.casio.com/exec/system/1224682331>]

Kąt elewacji (ang. Elevation Angle) - odległość kątowa pomiędzy obserwatorem na ziemi a Słońcem. W uproszczeniu jest to wysokość Słońca nad horyzontem. Kąt elewacji będzie przyjmował największe wartości w południe oraz najmniejsze podczas wschodu i zachodu słońca. Ujemna wartość kąta elewacji oznacza, że Słońce nie jest widoczne (nie doszło jeszcze do wschodu lub miał miejsce zachód). Kąt elewacji obliczany jest w następujący sposób:

$$\alpha = \sin^{-1} [\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos h]$$

Gdzie: α - kąt elewacji, δ - deklinacja Słońca, φ - szerokość geograficzna lokalizacji, h - kąt godzinny.

Azymut (ang. Azimuth Angle) - kąt pomiędzy kierunkiem północnym a pozycją Słońca. Stopnie rosną zgodnie ze wskazówkami zegara. Azymut obliczany jest następujący sposób:

$$\gamma = \cos^{-1} \left[\frac{\sin \delta \cos \varphi - \cos \delta \sin \varphi \cos h}{\cos \alpha} \right]$$

Deklinacja (ang. Declination Angle) – miara kąta nachylenia ziemi w stosunku do orbity. Przyjmuje ona wartości od -23.45 do 23.45. Wielkość kąta zależna jest od dnia i przyjmuje ona wartość 0 w dniach 20/21 marca oraz 22/23 września. Kąt deklinacji oblicza się w następujący sposób:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{(N - 81)360}{365} \right]$$

N to ilość dni począwszy od 1stycznia.

Szerokość geograficzna (ang. Latitude) - jedna z dwóch współrzędnych geograficznych. Reprezentowana w stopniach, przedstawia kąt pomiędzy równikiem a zadaną lokalizacją. Określana w przedziale od -90° do 90° . Wartość -90° oznacza, że zadana lokalizacja znajduje się na południowym biegunie ziemi, a 90° na północnym.

Długość geograficzna (ang. Longitude) - jedna z dwóch współrzędnych geograficznych. Jest to kąt pomiędzy półpłaszczyzną południka zerowego a półpłaszczyzną przechodzącą przez zadaną lokalizację. Określana w przedziale od 0° do 360° , kąt wzrasta z zachodu na wschód, Południk 0 przecina dzielnicę Greenwich w Londynie.

Kąt godzinny (ang. Hour Angle) - kąt pomiędzy aktualną pozycją Słońca a pozycją Słońca w południe. Jedna godzina lokalnego czasu odpowiada 15° kąta godzinowego. Przed południem kąt przyjmuje wartości z zakresu od -180° do 0° , natomiast wartość kąta w przedziale 0° - 180° oznacza, że górowanie Słońca miało już miejsce. Kąt godzinny wyliczany jest ze wzoru:

$$h = 15^\circ(LST - 12)$$

LST (ang. Local Solar Time) - lokalny czas słoneczny:

$$LST = \left(LT + \frac{TC}{60} \right)$$

LT (ang. Local Time) - czas lokalny.

TC (ang. Time Correction Factor) - współczynnik korekcji czasu.

$$TC = 4(Długość Geograficzna + LSTM) + EoT$$

LSTM (ang. Local Standard Time Median) - Wartość bezwzględna różnicy pomiędzy czasem lokalnym a czasem uniwersalnym (GMT):

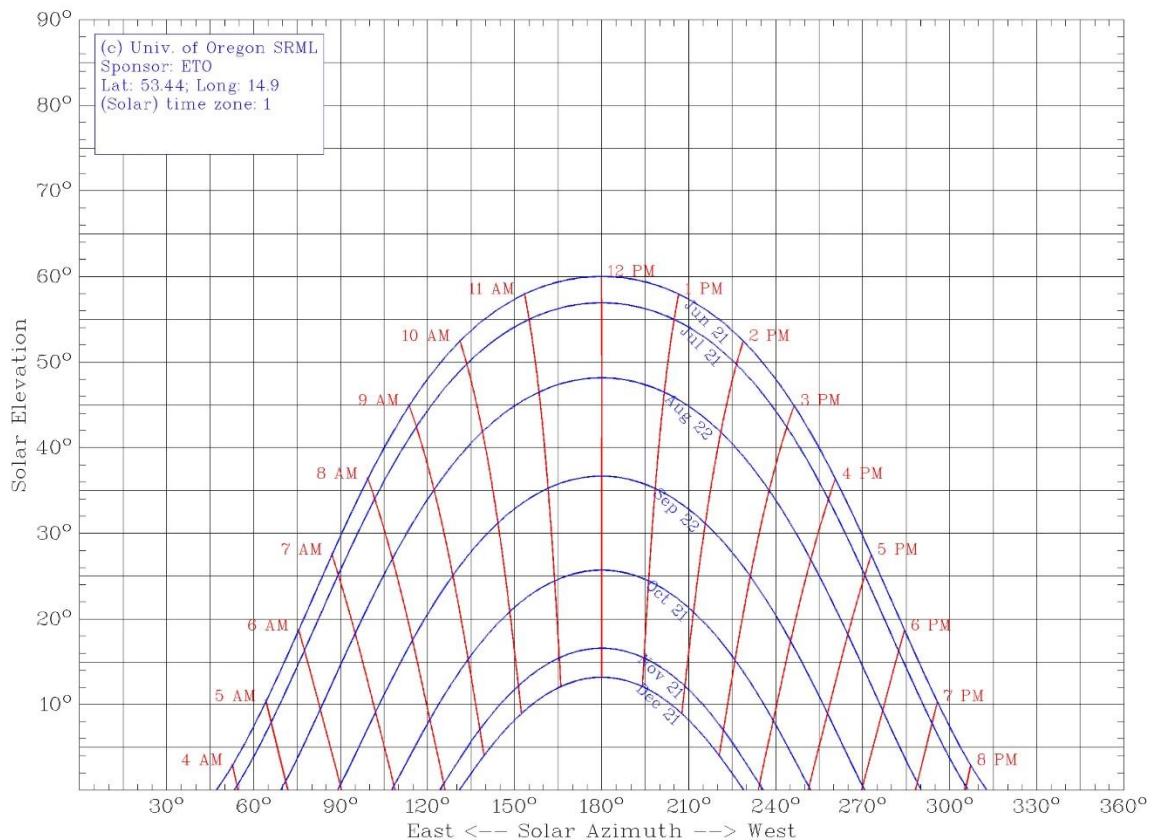
$$LSTM = 15(|Czas\ loka\ ln\ y - GMT|)$$

EoT (Equation of Time) - Równanie czasu:

$$EOT = 9.87 \sin(2B) - 7.52 \cos(B) - 1.5 \sin(B)$$

gdzie:

$$B = \frac{(numer\ dnia - 81)360}{365}$$

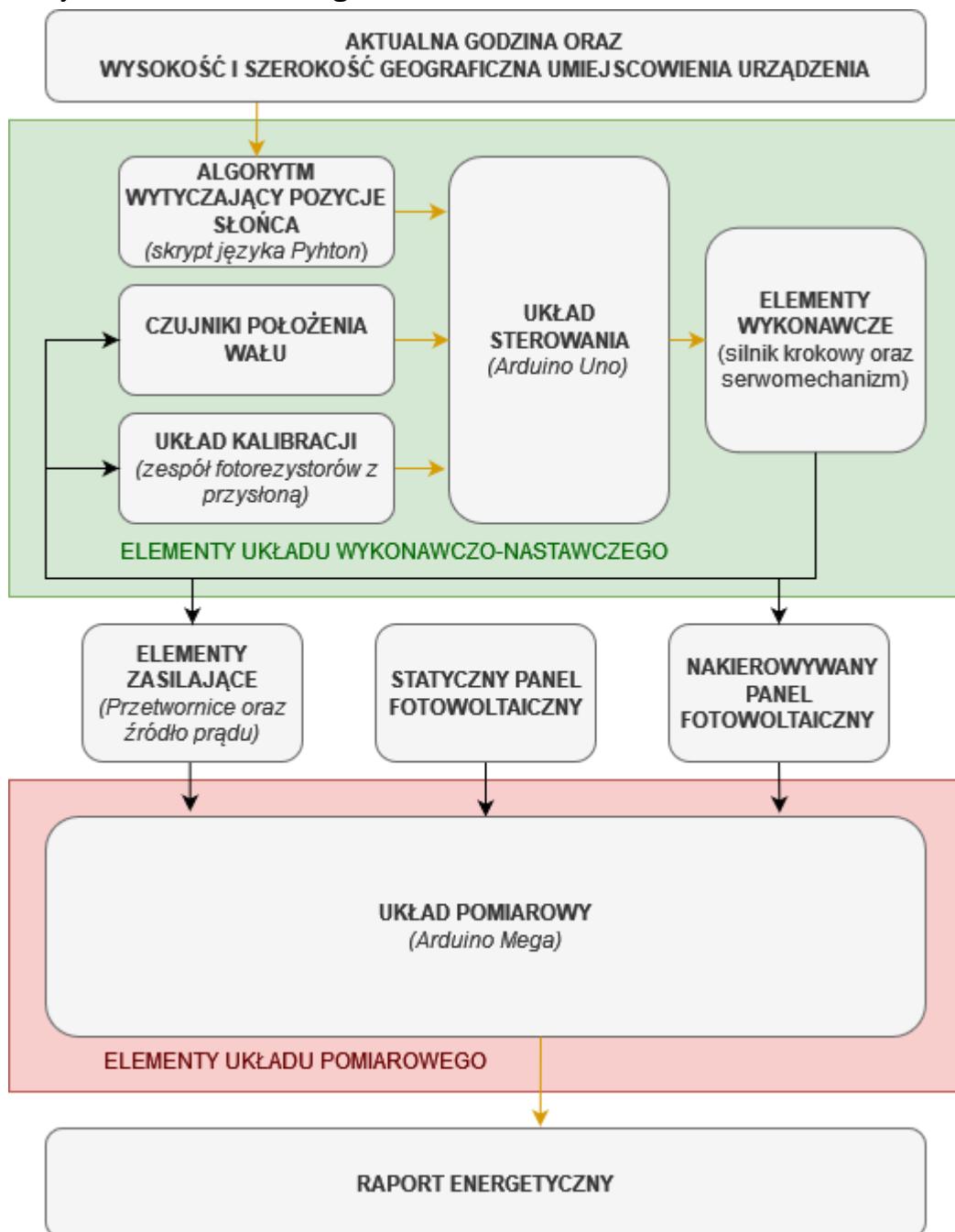


Rysunek 1.9 Azymut oraz kąt elewacji Słońca w okresie od przesilenia letniego do przesilenia zimowego dla współrzędnych: 53.44N, 14.9E (Szczecin)

Źródło: Wygenerowany przy użyciu aplikacji „Sun Path Chart Program” opracowanej przez University of Oregon. [<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>]

2. Konstrukcja urządzeń wykonawczych oraz urządzeń pomiarowych.

Na potrzeby pracy opracowano dwa urządzenia. Układ wykonawczo-nastawczy współpracujący z programem obliczającym kąt elewacji oraz azymut Słońca, oraz urządzenie pomiarowe (analizator sieci) mierzące napięcie oraz natężenie prądu generowanego przez panele fotowoltaiczne i prądu wykorzystywanego do zasilania układu wykonawczo-nastawczego.

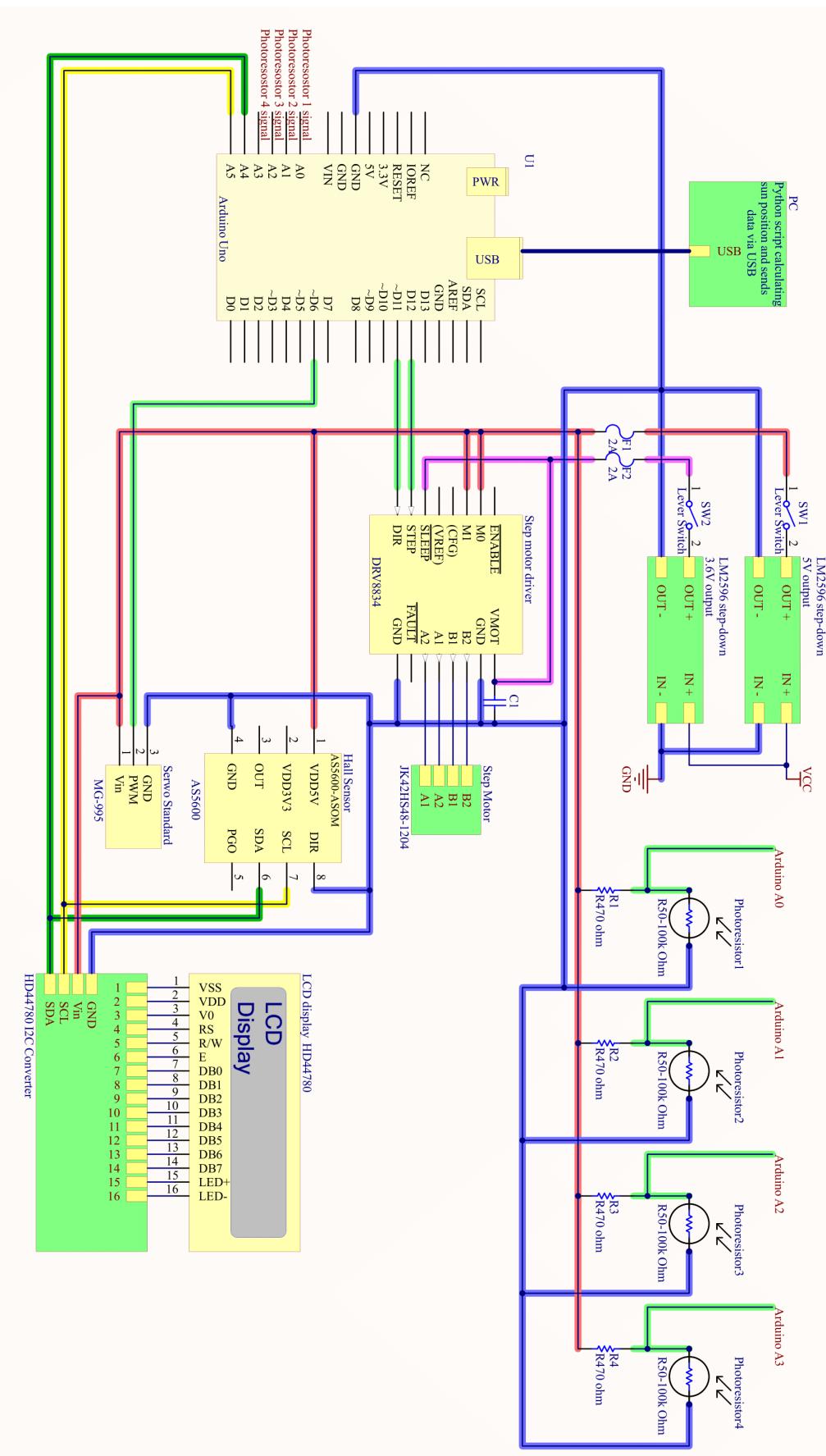


Rysunek 2.1 Zestawienie elementów funkcjonalnych
Źródło: Opracowanie własne

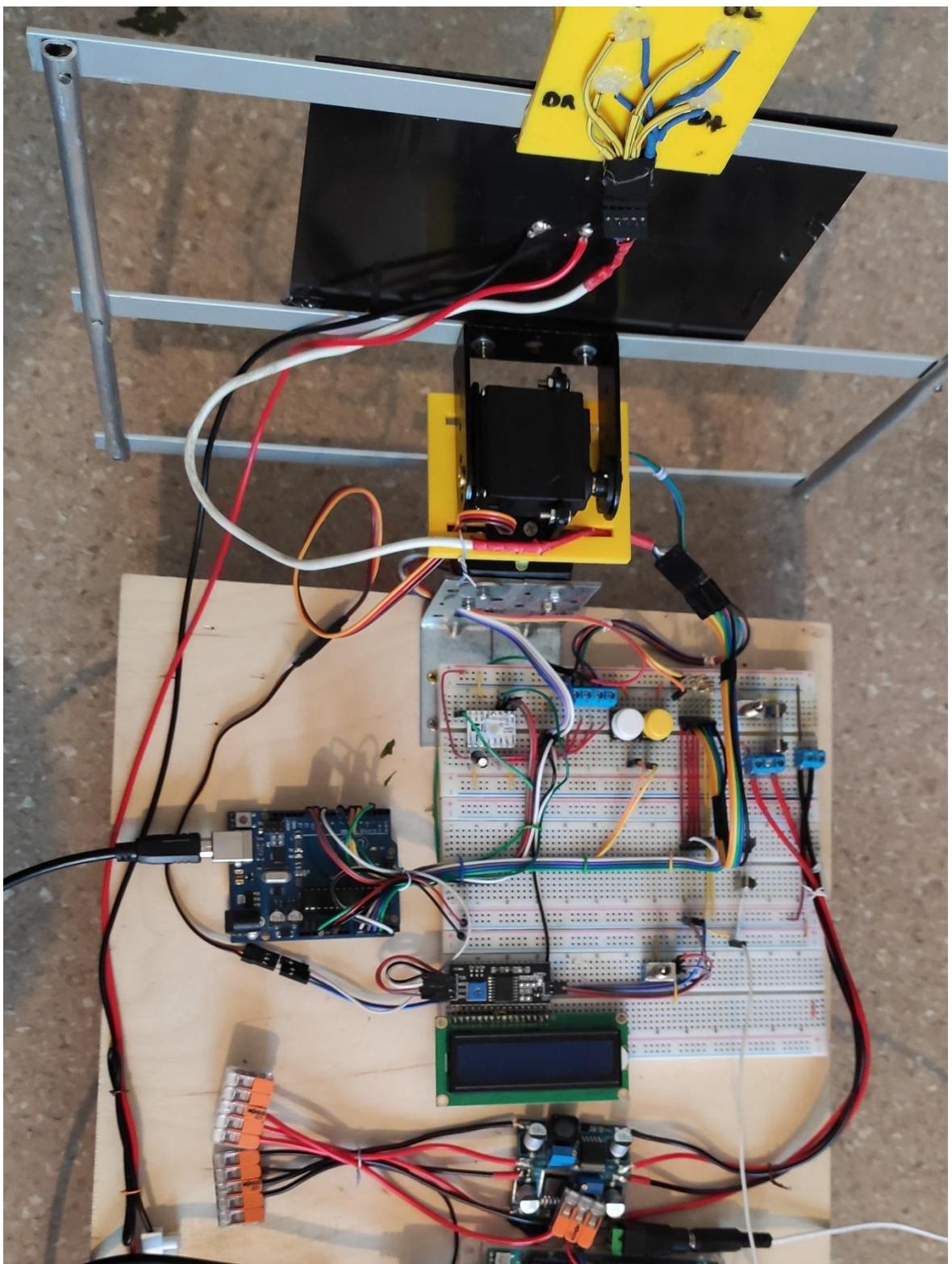
Zamieszczany diagram przedstawia przesył informacji pomiędzy elementami układów (strzałki koloru pomarańczowego) oraz wzajemne oddziaływanie urządzeń (strzałki koloru czarnego). Elementem centralnym układu wykonawczo-nastawczego jest układ sterowania. Ten otrzymuje informacje dotyczące położenia Słońca dla aktualnej godziny i współrzędnych geograficznych (w trakcie procedury kalibracji dane dotyczące położenia Słońca pochodzą również z fotorezystorów) oraz informacje dotyczące pracy silników. Dane te są przetwarzane i na ich podstawie wykonywany jest odpowiedni ruch elementami wykonawczymi. Elementy wykonawcze wpływają na stan czujników położenia wału. W takiej formie urządzenie stanowi układ regulacji nadążnej. Praca silników wpływa również na pobór prądu przez urządzenie a konsekwencją wykonywania ruchu jest zmiana ilości energii generowanej przez panel fotowoltaiczny zamontowany na ramieniu układu wykonawczo-nastawczego. Ilość energii generowanej przez nakierowywany jak i statyczny panel fotowoltaiczny oraz energii pobieranej przez układ wykonawczy, analizowana jest przez układ pomiarowy. Ten znacznie prostszy od układu wykonawczo-nastawczego, nie posiada w swojej strukturze dodatkowych elementów, na które mógłby oddziaływać. Jego działanie polega na nieustannej analizie prądu i przygotowaniu końcowego raportu energetycznego. Ten postuży później do analizy charakterystyki prądowej ogniw fotowoltaicznych i potwierdzenia lub zaprzeczenia tezy o korzyściach płynących z nakierowywania ogniw fotowoltaicznych prostopadle do Słońca.

2.1. Układ wykonawczo-nastawczy

Układ zbudowany na bazie mikrokontrolera Arduino. Do prawidłowego działania wymagane jest połączenie za pomocą uniwersalnej magistrali szeregowej z komputerem z uruchomionym skryptem napisanym w języku Python. Co pięć sekund skrypt wysyła informacje o aktualnej pozycji Słońca (azymut oraz kąt elewacji), za pomocą wyżej wymienionej magistrali. Szczegółowe działanie programu omówione jest w rozdziale 3.1 *Skrypt wytyczający pozycje Słońca*.



Rysunek 2.2 Schemat elektryczny układu wykonawczo-nastawczego
 Źródło: Opracowanie własne przy użyciu programu CircuitMaker



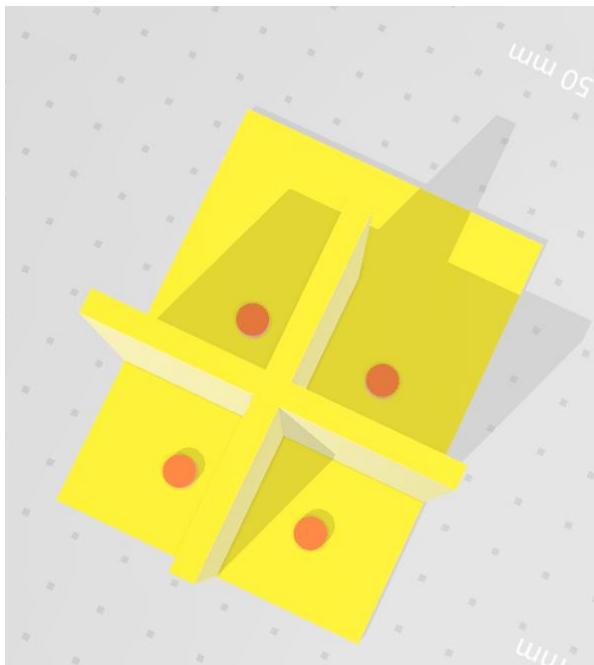
Rysunek 2.3 Zdjęcie układu wykonawczo-nastawczego
 Źródło: Opracowanie własne

Układ wykonawczy dla osi X – składa się z silnika krokkowego JK42HS48-1204. Urządzeniem sterującym jest układ DRV8834. Na wale silnika znajduje się magnes będący elementem czujnika położenia wału. Układ AS5600 będący czujnikiem Halla nieustannie przekazuje informacje o położeniu wału silnika krokkowego za pomocą

magistrali I2C. Dane z czujnika porównywane są z wyliczonym azymutem w celu poprawnego nastawianie ramienia z panelami fotowoltaicznymi. Silnik krokowy charakteryzuje się dużą precyzją ruchu: 200 kroków na obrót, minimalny sygnał sterownika silnika krokowego to 1/32 kroku. Daje to nawet do 6400 kroków na obrót, przekraczając tym samym 12 bitową dokładność czujnika położenia wału (jest to 4096 pozycji przypadających na obrót wału).

Układ nastawczy dla osi Y – elementem wykonawczym jest Serwo TowerPro MG-995. Zaletą serwomechanizmów jest automatyczny dobór mocy. Taki układ będzie pobierał minimalną wymaganą ilość prądu, aby utrzymać wał w zadanej pozycji, przy czym jego moment trzymający wynoszący $15 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, jest 3 krotnie większy od momentu trzymającego silnika krokowego. Jako parametr wejściowy podawany jest docelowy kąt. Jednak sam układ, mimo posiadania czujnika położenia wału w postaci rezystora nastawnego, nie zwraca tej informacji do sterownika. Oznacza to, że nie sterownik nie jest w stanie potwierdzić wykonania ruchu. Dokładność serwomechanizmu wynosi 1° . Sterowanie odbywa się za pomocą biblioteki serwo.h oraz generatora PWM będącego jedną z funkcjonalności mikrokontrolera.

Układ pozycjonujący – autorski zestaw 4 fotorezystorów z przysłoną przymocowany nad stelażem z panelami fotowoltaicznymi. Pozwala na określenie pozycji Słońca w przestrzeni. Przysłona w kształcie krzyża rzuca cień na część fotorezystorów, jeżeli światło nie pada na nią prostopadle, zacienione rezystory generują mniejszy opór. Różnica w oporze fotorezystorów pozwala określić położenie Słońca. Wadą takiego rozwiązania jest konieczność wystąpienia promieniowania bezpośredniego. Promieniowanie dyfuzyjne nie pozwala na poprawne wytyczne azymutu oraz kąta elewacji Słońca. Układ pozycjonujący wykorzystywany jest tylko po uruchomieniu urządzenia, w trakcie procedury kalibracji. W późniejszym czasie nie pełni żadnej funkcji. Dokonanie kalibracji koniecznie jest każdorazowo przy włączeniu urządzenia.

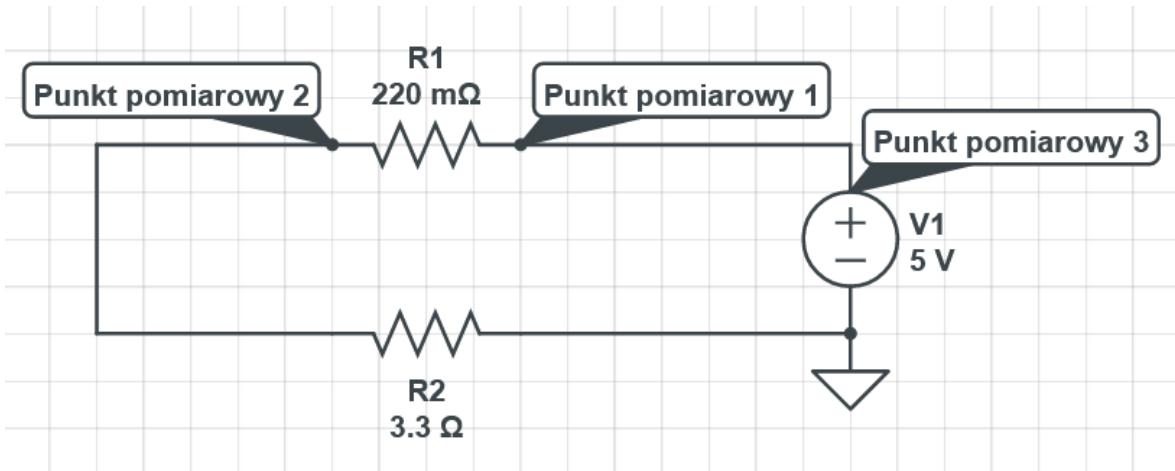


Rysunek 2.4 Model 3D przysłony fotorezystorów
Źródło: Opracowanie własne przy użyciu programu Paint3D

Zasilanie wszystkich układów odbywa się za pomocą zewnętrznego źródła zasilania w postaci zasilacza 12V 2A lub akumulatora żelowego 6V 12Ah. Urządzenia stabilizujące napięcie to impulsowe przetwornice typu step-dwon. Układ LM2596 pozwala regulować napięcie w zakresie 3,2 do 32V przy prądzie do 3A. Ze względu na różnicowane napięcie potrzebne do zasilania poszczególnych urządzeń konieczne jest użycie dwóch tego typu przetwornic. Jedna (5V) do zasilania serwomechanizmu, konwertera I2C i współpracującego z nim wyświetlacza LCD a także układu pozycjonującego. Druga przetwornica (3,6 V) wykorzystywana jest do zasilania silnika krokkowego, sterownika silnika krokkowego oraz czujnika położenia wału. Wyświetlacz LCD umożliwia sprawdzanie poprawności działania poszczególnych układów. Nie jest on nieodłączoną częścią a jedynie dodatkiem ułatwiającym pracę z prototypowym urządzeniem.

Na całość układu wykonawczo-nastawczego składa się jeszcze kilka dodatkowych urządzeń pełniących rolę zabezpieczeń prądowych oraz elementów biernych których działanie nie ma związku z programem, są one jednak elementami niezbędnymi do poprawnej pracy wszystkich modułów.

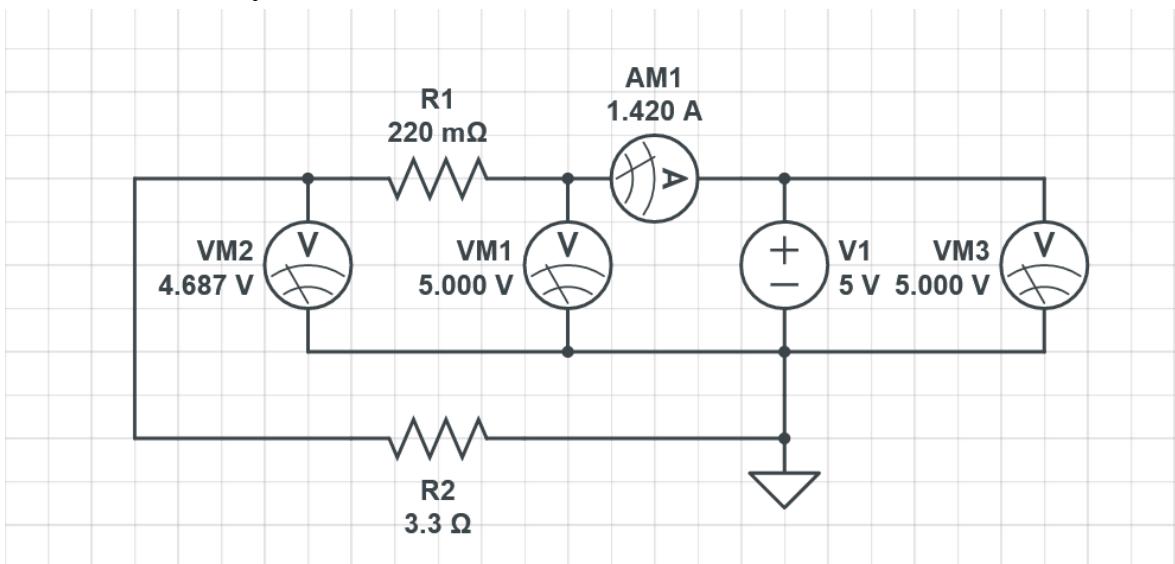
2.2. Miernik prądowy



Rysunek 2.5 Schemat bocznika wykorzystanego w układzie pomiarowym z zaznaczonymi punktami pomiarowymi

Źródło: Opracowanie własne przy użyciu oprogramowania CircuiLab

Opracowany miernik do działania wykorzystuje bocznik prądowy. Do obliczenia prądu w obwodzie potrzebne jest dokonanie pomiaru napięcia w punktach nr 1 i 2. Dokonanie pomiaru napięcia w punkcie nr 3 pozwala dodatkowo obliczyć moc wykorzystywaną do zasilania układu wyrażoną w Wattach.



Rysunek 2.6 Symulacja działania bocznika wykorzystanego w układzie pomiarowym

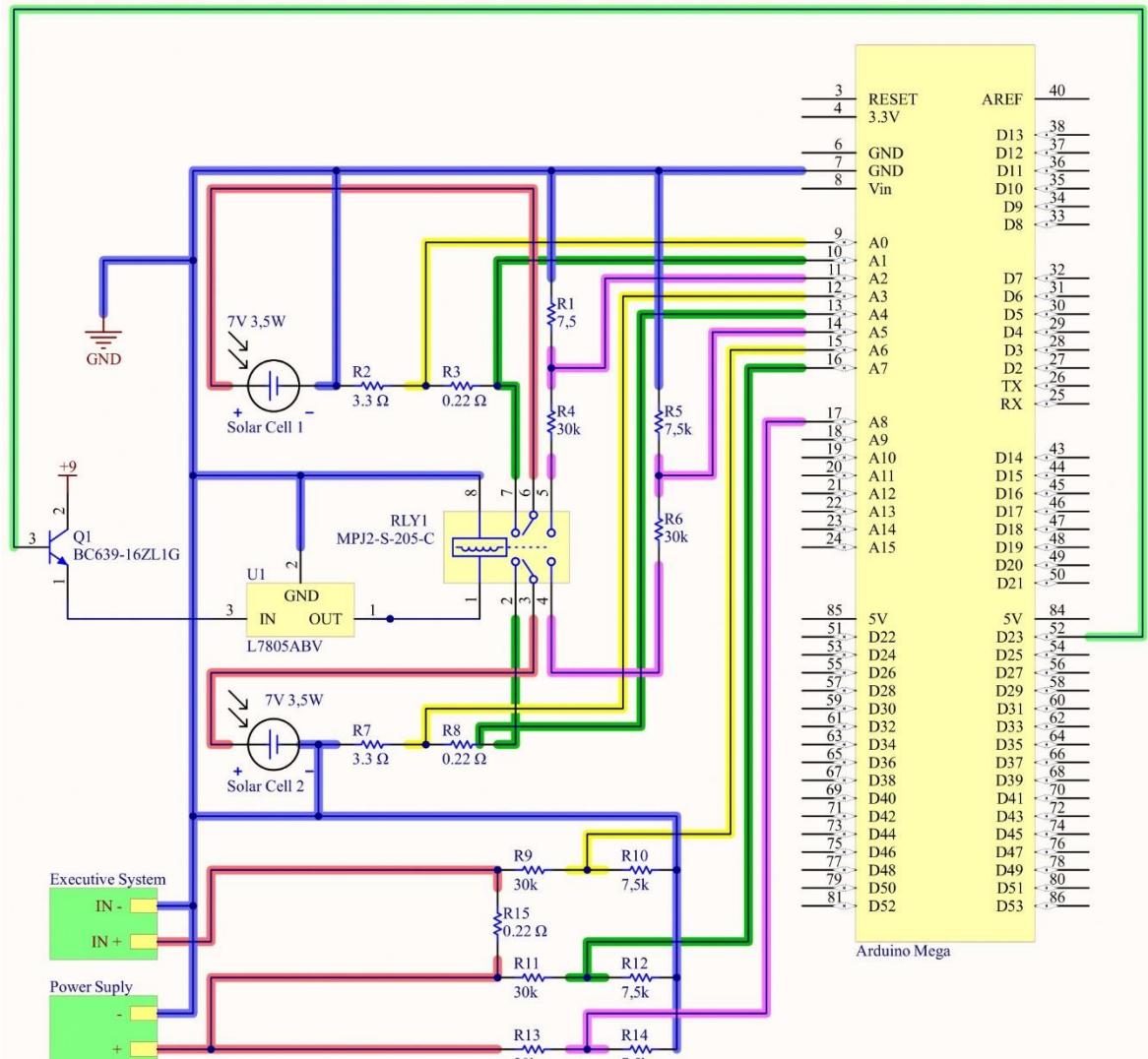
Źródło: Opracowanie własne przy użyciu oprogramowania CircuiLab

Symulacja przedstawia pomiar prądu dla układu zbudowanego z bocznika (R_1) 0.22Ω oraz rezystora obciążenowego (R_2) 3.3Ω . Symulowany pomiar amperomierzem (AM1) informuje, że natężenie w obwodzie wynosi 1.420A przy zasilaniu napięciem 5V . Taki sam wynik uzyskać można dokonując pomiaru napięcia w punktach pomiarowych 1 i 2. Na rysunku 2.6 jest to kolejno VM1 i VM2.

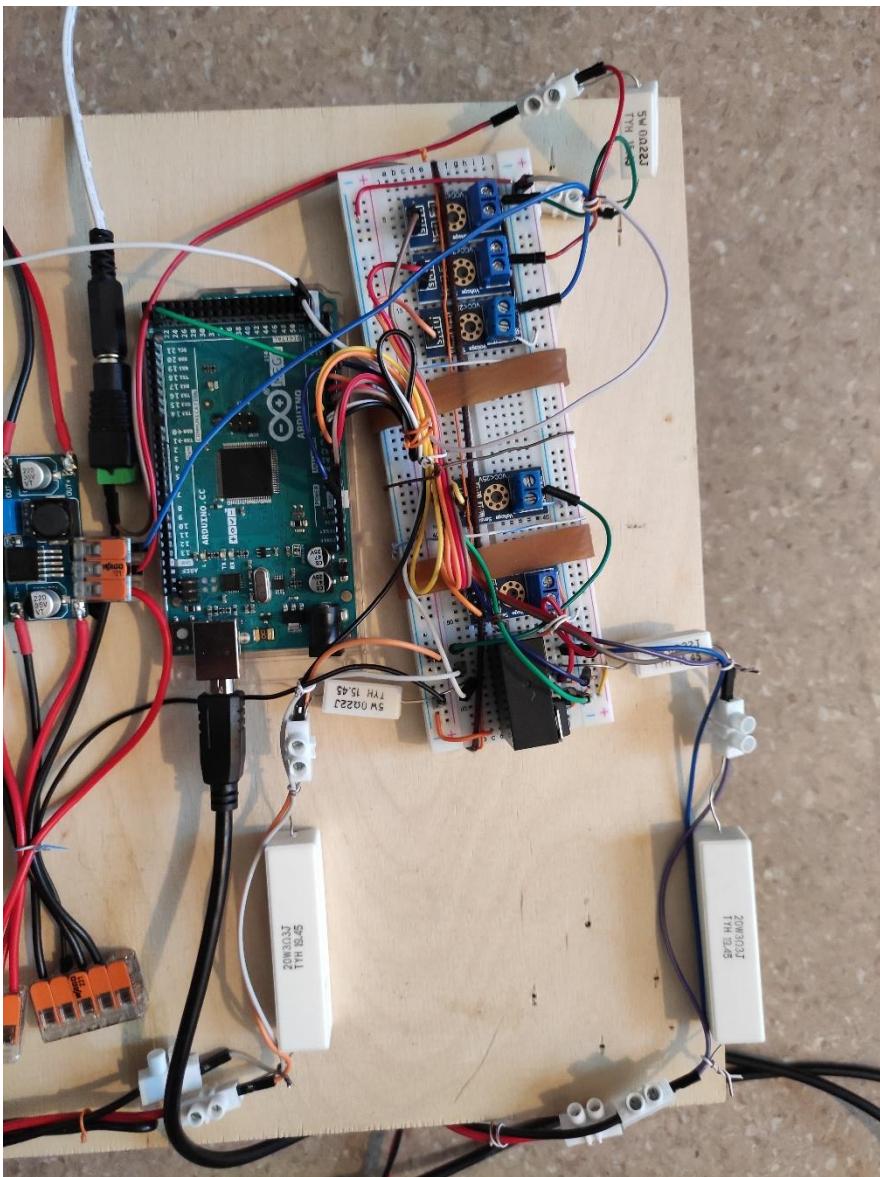
$$\text{Napięcie odłożne na rezystorze } R1 = VM1 - VM2 = 5V - 4.687V = 0.313V$$

$$\text{Natężenie w obwodzie} = \frac{\text{Napięcie odłożne na rezystorze } R1}{\text{Opor rezystora } R1} = \frac{0.313V}{0.22\Omega} = 1.422A$$

Wynik obliczony jest niemal identyczny z symulowanym pomiarem natężenia. Wykorzystując dodatkowo wynik z punktu pomiarowego nr 3 i mnożąc go przez obliczone natężne prądu w obwodzie, obliczyć można moc wykorzystywaną do zasilania układu wyrażoną w Wattach.



Rysunek 2.7 Schemat elektryczny miernika prądowego
Źródło: Opracowanie własne przy użyciu programu CircuitMaker



Rysunek 2.8 Zdjęcie miernika prądowego

Źródło: Opracowanie własne

Panel fotowoltaiczny obciążony jest rezystorem 3.3Ω 20W. Przed nim wpięty jest drugi rezistor 0.22Ω 5W. Pomiaru prądu odłożonego na rezystorze dokonuje się za pomocą złącz analogowych mikrokontrolera Arduino Mega. Pomiar dokonywany jest bezpośrednio przed oraz za rezystorem. Różnica w wartościach napięcia pozwala określić jaki prąd odłożył się na rezystorze a znając opór rezystora i korzystając z prawa Ohma można obliczyć natężenie prądu w obwodzie. Znając napięcie generowane przez panel fotowoltaiczny można dodatkowo obliczyć moc jaką generuje przedstawioną w Wattach. Ze względu na duży spadek napięcia po podłączeniu obciążenia, niemożliwe jest odczytanie rzeczywistego napięcia generowanego przez ogniwa fotowoltaiczne. W celu rozwiązania tego problemu zastosowano sterowany przekaźnik, który okresowo otwiera obwód i pozwala na pomiar napięcia generowanego przez ogniwa fotowoltaiczne. Przekaźnik zasilany jest napięciem 5V i pobiera do 100 mA prądu. Jest to wartość przewyższająca możliwości zasilania z portów mikrokontrolera, dlatego też

konieczne jest użycie zewnętrznego źródła zasilania. Aby zapewnić odpowiednie napięcie do zasilania przekaźnika użyto stabilizatora L7805ABV o napięciu wyjściowym 5V oraz bipolarnego tranzystora NPN BC639. Tranzystor podłączony jest kolektorem z zewnętrznym zasilaniem oraz emiterem z stabilizatorem. Baza połączona jest z cyfrowym złączem Arduino.

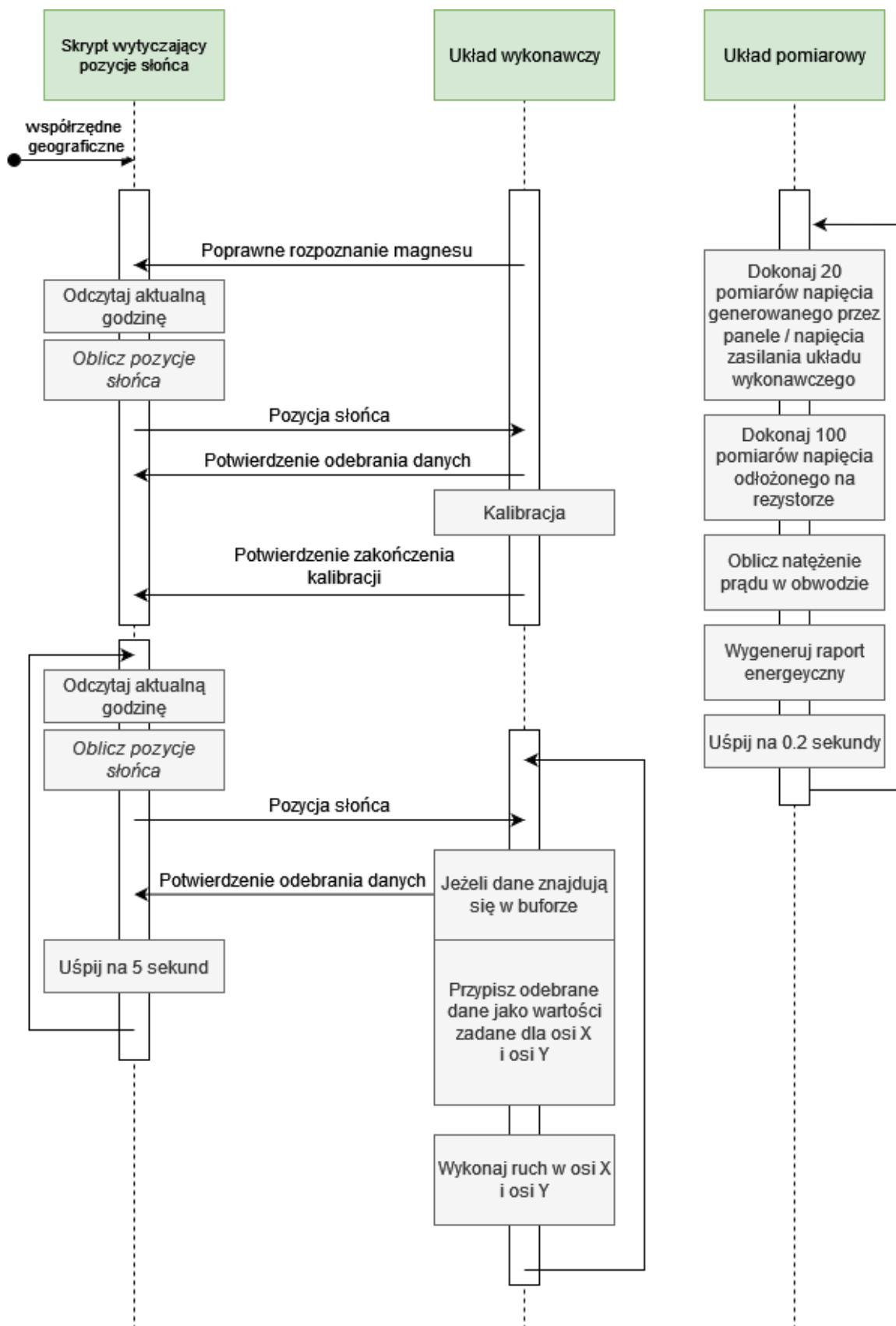
W trakcie jednego okresu pomiarowego, który trwa około 48 sekund, dokonywanych jest 20 pomiarów napięcia, podczas gdy przełącznik ustawiany jest tak, aby dodatnie wyprowadzenie ogniw podłączone było ze złączem analogowego Arduino a wyprowadzenie ujemne spięte z masą mikrokontrolera. Takie połączenie pozwala odczytać rzeczywiste napięcie generowane przez panele fotowoltaiczne. Uśredniony pomiar zapisywany jest w pamięci urządzenia. Następnie poprzez zmianę stanu przełącznika obwód zostaje zamknięty i mierzone jest napięcie odkładające się na rezystorze. W tym czasie dokonywanych jest 100 pomiarów napięcia. Maksymalny prąd generowany przez panel fotowoltaiczny może przewyższać 7V, podczas gdy złącze analogowe mikrokontrolera pozwala na odczyt do napięcia 5V. Konieczne więc jest zastosowanie odpowiedniego dzielnika napięcia. Dwa rezystory o oporze $30\text{k }\Omega$ oraz $7,5\text{k }\Omega$ pozwalały prowadzić pomiar do napięcia nawet do 25V. Niestety zastosowanie dzielnika napięcia znacząco zmniejsza dokładność pomiarów, która spada z poziomu 0,0048V do 0,0244V. Dokładność na poziomie 0,0048V zachowana jest przy pomiarach napięcia odłożonego na rezystorze, gdyż napięcie w zamkniętym obwodzie nie przekracza 5V. Dodatkowa trzecia sekcja pomiarowa nie używa przekaźnika oraz nie posiada rezystora obciążeniowego. Sekcja ta używana jest do pomiarów energii wykorzystywanej przez układ wykonawczy.

Dokładność miernika jest wystarczająco duża, aby wykazać istotne różnice w ilości generowanej energii, co jest podstawą do potwierdzenia lub zaprzeczenia tezy o korzyściach płynących z nakierowywania ogniw fotowoltaicznych prostopadle do Słońca. Dokładność nie pozwala jednak na prowadzenie precyzyjnych badań wydajnościowych. Dodatkowo niewielka wydajność paneli fotowoltaicznych sprawia, że w godzinach wczesno-porannych oraz późno-wieczornych napięcie odłożone na rezystorze jest mniejsze od 4,8 mV co przekracza granice dokładności miernika. W takim przypadku jako wynik pomiaru zwracana jest wartość 0. W przypadku potwierdzenia zadanej tezy oraz rozwoju badań, w celu przeprowadzenia dokładnych badań wydajnościowych konieczne będzie zastosowanie wysokiej klasy urządzeń pomiarowych, przebudowanie systemu nastawczego, a także wykorzystanie w tym celu oszczędnych energetycznie urządzeń, oraz wytrzymalszej mechanicznie platformy. Dopiero wtedy możliwa będzie odpowiedź na pytanie, czy ciągłe poruszanie paneli fotowoltaicznych nie będzie wymagało większych nakładów energetycznych niż korzyści płynące z nastawiania paneli.

3. Integracja oprogramowania

Na potrzeby pracy napisano 3 programy. 2 z nich to kod sterownika Arduino odpowiedzialny za działanie układu wykonawczo-nastawczego i układu pomiarowego. Ostatni będącym skryptem języka Python odpowiedzialny jest za poprawne wytyczanie pozycji Słońca w przestrzeni.

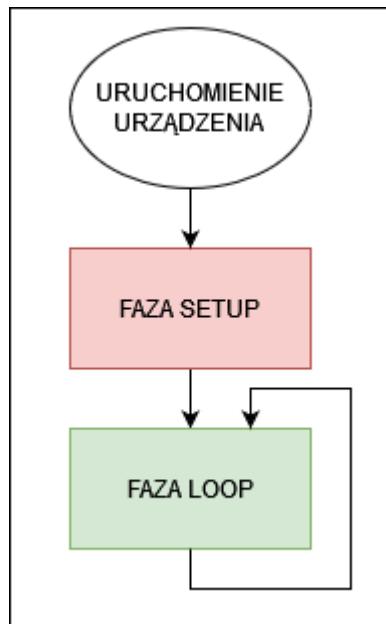
Jak widać na załączonym poniżej diagramie wymiana danych następuje tylko pomiędzy skryptem wytyczającym pozycje Słońca a układem wykonawczym. Układ pomiarowy działa niezależnie. Pamiętać należy, że konsekwencją wykonywania kodu dla układu wykonawczego są zmiany położenia paneli fotowoltaicznych. Działanie to nie wpływa bezpośrednio na program miernika prądowego, ale wpływa na generowane przez niego dane. Więcej informacji o zależnościach niezwiązanych bezpośrednio z programami znaleźć można w rozdziale *2 Konstrukcja urządzeń wykonawczych oraz urządzeń pomiarowych*.



Rysunek 3.1 Diagram zależności pomiędzy wszystkimi programami. Na potrzeby przejrzystości realizowane funkcje zostały uproszczone. Szczegółowe informacje na temat działania programów opisane są w kolejnych rozdziałach

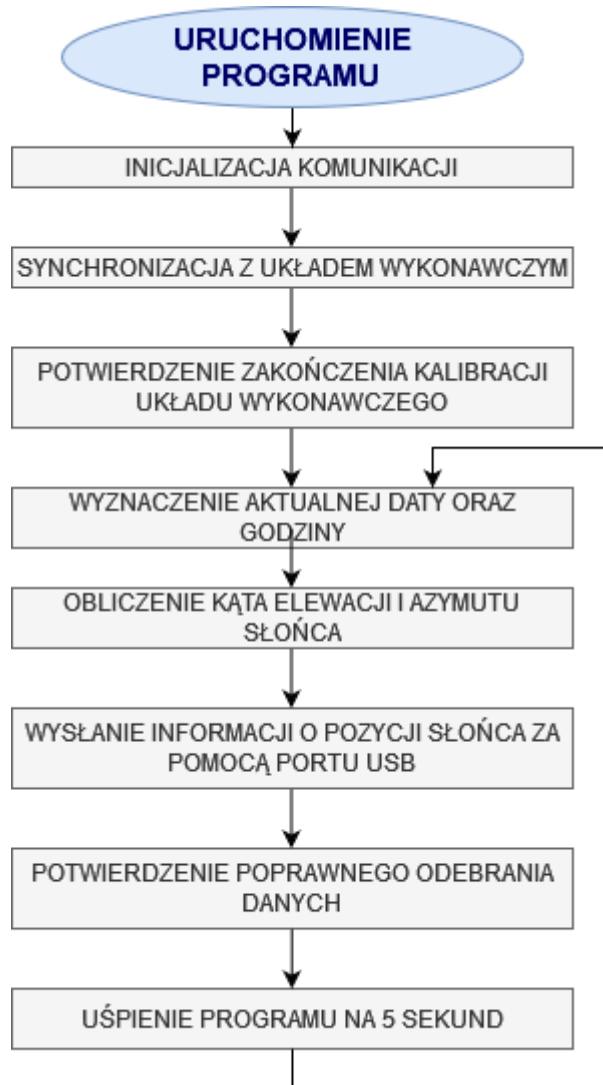
Źródło: Opracowanie własne

Język Arduino wykorzystany do zaprogramowania sterowników użytych w układzie wykonawczym oraz mierniku prądowym jest rozwinięciem języków C/C++. Wykonywanie kodu odbywa się w dwóch fazach, które są standardową procedurą wykonywania kodu mikrokontrolera Arduino. Pierwsza faza to: „void setup()” Wszystkie instrukcje zawarte w tej części programu wykonywane są tylko raz. Drugą fazą jest „void loop”. Jest to nieskończona pętla.



Rysunek 3.2 Graficzna reprezentacja faz wykonywania kodu urządzeń z serii Arduino
Źródło: Opracowanie własne

3.1. Skrypt wytyczający pozycje Słońca



Rysunek 3.3 Uproszczony schemat blokowy procedur skryptu obliczającego pozycje Słońca

Źródło: Opracowanie własne

Skrypt napisano przy użyciu języka Python. Poprzez obliczenie lub wytycznie pozycji Słońca rozumie się obliczenie kąta elewacji oraz azymutu na podstawie wzorów przedstawionych w rozdziale 1.5 Pozorna wędrówka Słońca. Jego głównym zadaniem jest synchronizacja z mikrokontrolerem oraz obliczenie pozycji Słońca dla godziny systemowej i ustalonych współrzędnych geograficznych. Kąt azymutu będzie stanowił później wartość zadaną (czyli taką którą układ będzie starał się nieustannie osiągnąć) dla układu wykonawczego realizującego ruch w osi X, analogicznie kąt elewacji będzie stanowił wartość zadaną dla układu realizującego ruch w osi Y. Obliczone dane przesyłane są w okresie 5 sekund do mikrokontrolera za pomocą Uniwersalnej

Magistrali Szeregowej. W celu wymiany danych przez port szeregowy użyto biblioteki *Serial*, do ustalenia daty systemowej wykorzystano bibliotekę *datatime* a w celu usprawnienia obliczeń bibliotekę *math*. Określenie długości i szerokości geograficznej leży po stronie użytkownika. Takowe dane można znaleźć w internetowych serwisach oferujących możliwość przeglądania map satelitarnych. Przykładami taki stron są mapy.geoportal.gov.pl lub www.google.com/maps. Współrzędne geograficzne deklarowane są bezpośrednio w kodzie programu. Program za pomocą terminala informuje o postępie w nawiązywaniu komunikacji. Po jej zakończeniu wraz z przesłaniem kolejnej paczki danych wyświetla informacje o obliczonym azymucie i kącie elewacji. Wyświetlana jest również informacja o wędrówce Słońca, przebytej od uruchomienia programu, aktualna godzina i data oraz ramka wiadomości. Po wysłaniu paczki danych program każdorazowo oczekuje potwierdzenia ich otrzymania. Ta informacja również jest wyświetlana.

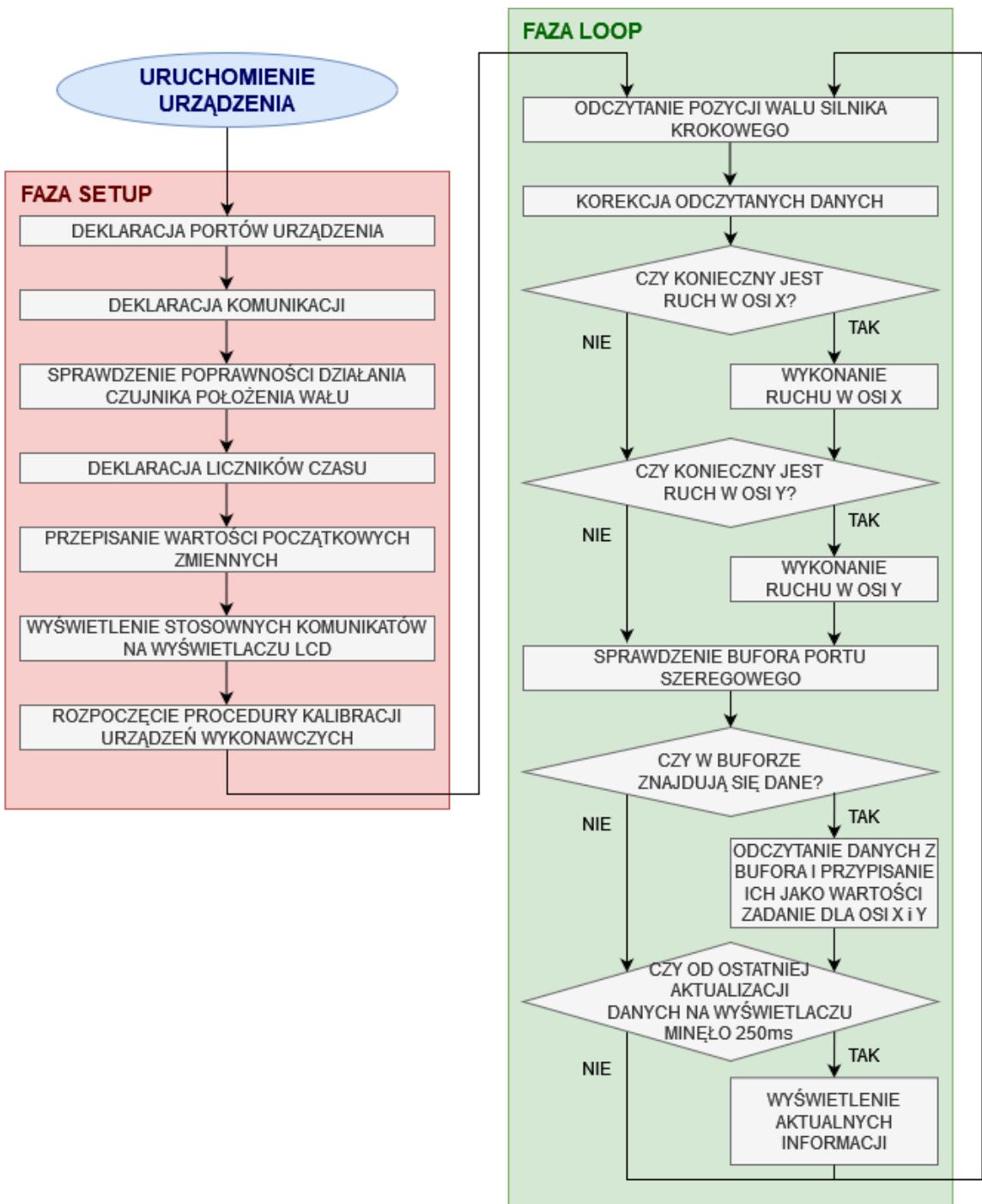
```
-----
day: 10 month: 10 hour: 12 : 10
Running time: 01:25:20:099970
Azimuth: 186.01
Elevation: 29.74
diff from start: azimuth= 24.14 elevation= 1.32
Message to send: 2138,49
-----Data received correctly
-----
```

Rysunek 3.4 Przykładowy wyciąg z terminala skryptu wytyczającego pozycję Słońca

Źródło: Opracowanie własne, zrzut ekranu terminala środowiska programistycznego

Spyder

3.2. Sterowanie układem wykonawczym



Rysunek 3.5 Graficzna reprezentacja procedur fazy setup oraz głównej pętli programu układu wykonawczego
 Źródło: Opracowanie własne

Schemat działania układu:

Faza setup:

- Deklaracja portów urządzenia
- Deklaracja komunikacji za pomocą magistrali I2C oraz magistrali USB
- Sprawdzenie poprawności działania czujnika położenia wału – wysłanie zapytania za pomocą magistrali I2C do czujnika położenia wału o poprawne wykrycie magnesu. Jeżeli ten nie wykryje magnesu, zwraca komunikat błędu a mikrokontroler przetwarza tę informację i zwraca stosowny komunikat. Potwierdzenie wykrycia magnesu jest konieczne do nawiązania komunikacji ze skryptem obliczającym azymut oraz kąt elewacji
- Deklaracja liczników czasu
- Przepisanie wartości początkowych zmiennych
- Wyświetlenie stosownych komunikatów na wyświetlaczu LCD
- Rozpoczęcie procedury kalibracji urządzeń wykonawczych

Faza loop:

- Odczytanie pozycji wału silnika krokowego
- Korekcja odczytanych danych
- Walidacja konieczności wykonania ruchu w osi X
• Jeżeli to konieczne wykonanie ruchu w osi X
- Walidacja konieczności wykonania ruchu w osi Y
• Jeżeli to konieczne wykonanie ruchu w osi Y
- Sprawdzenie bufora portu szeregowego
- Jeżeli w buforze znajdują się dane, odczytanie ich i przypisanie danych do odpowiednich zmiennych.
- W okresie 250 ms wyświetlenie aktualnych informacji o: zadanym położeniu w osi X oraz Y, realnym położeniu w osi X oraz Y, wartości korekcji kąta dla osi X i Y wytyczonych podczas procedury kalibracji, a także informacji o odczytaniu danych z bufora



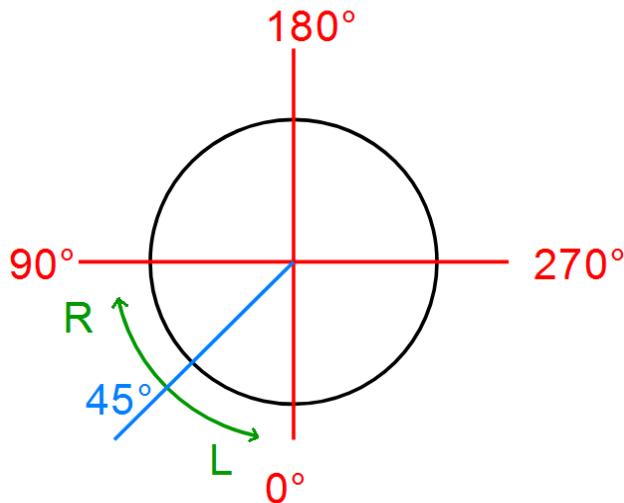
*Rysunek 3.6 Schemat blokowy modelu sterowania
 Źródło: Opracowanie własne*

Model sterowania: jest to układ regulacji nadążnej. Algorytm realizuje przebieg wielkości sterowanej, przy czym ten nie jest znany. W praktyce oznacza to, że przyjmując pewną wartość celu układ będzie starał się ją osiągnąć. Wartościami zadanymi są dla niego azymut oraz kąt elewacja Słońca, czyli dwie wartości określające pozycje gwiazdy w dwuwymiarowej przestrzeni. Proces kalibracji pozwala przyjąć pewne wartości początkowe, charakteryzujące pozycję układu sterowania. Po jednorazowej kalibracji rozpoczyna się cykliczna praca, która polega na porównaniu aktualnej pozycji układu z pozycją zadaną. Jeżeli te się nie pokrywają wykonywany jest ruch w odpowiednim kierunku. Proces porównywania pozycji powtarzany jest w nieskończoność, a każde jego wystąpienie wiąże się z potencjalnym wykonaniem ruchu. Układ sterowania posiada informacje tylko o aktualnej pozycji układu oraz zadanej pozycji. Wytyczanie wartości zadanej odbywa się poza układem, jej zmiana nie zależy od procesów zachodzących w jego wnętrzu. Układ sterownia w takiej formie nie jest w stanie określić jaką drogę

przebył, jak daleko znajduje się cel oraz czy zbliża się do niego. Tak mała ilość analizowanych przez układ informacji może generować błędy oraz niedokładności. Aby zapobiec błędnej pracy konieczne jest sprecyzowanie szeregu przypadków i zależności a następnie przed wykonaniem ruchu sprawdzanie czy nie nastąpił któryś z zdefiniowanych przypadków. Przykładem takiego przypadku jest konieczność zdefiniowania maksymalnych, wartości granicznych obrotu układu oraz ich nieustanna analiza. Poprzez różnice w dokładności pracy silników oraz czujników położenia wału, a także faktu występowania szumu w analogowym charakterze pracy urządzeń i czujników, istnieje ryzyko pojawiania się zjawiska oscylacji układu wokół wartości zadanej. Konieczne jest więc wprowadzenia akceptowalnej różnicy dla funkcji porównującej pozycję wału z pozycją zadaną. Sprawia to, że jako osiągnięcie celu, układ traktuje osiągnięcie wartości zadanej +/- 0.435°. Jednym ze sposobów zminimalizowania ryzyka wystąpienia oscylacji oraz zwiększenia precyzyji, może być zastosowanie w modelu sterowania regulatora proporcjonalno-całkującoczo-różniczkującego (PID). Ten na podstawie wcześniejszych oraz aktualnych uchybów, czyli różnic pomiędzy wartością zadaną a aktualnym położeniem wału, pozwala obliczyć i zniwelować przyszły uchyb. Przyjęcie akceptowalnej różnicy w osiągnięciu wartości zadanej nie ma miejsca przy realizacji ruchu w osi Y. Tam ze względu na użycie urządzenia (serwomechanizmu) z własnym systemem sterowania nie dokonuje się programowego sprawdzenia osiągnięcia celu. Dokładność pracy serwomechanizmu nie jest znana jednak określanie wartości celu odbywa się z dokładnością do 1°. W przypadku realizacji ruchu w osi Y, opisywany model sterowania służy do ograniczenia prędkości obrotowej.

Brak informacji o odległości do celu sprawia, że niemożliwa jest płynna regulacja prędkości obrotowej. Ta mogłoby zostać zrealizowane przy zastosowaniu do modelu sterowania działającego w oparciu o logikę rozmytą, określonego najczęściej algorytmem lub regulatorem fuzzy. Ten na podstawie odległości do celu oraz stanów wewnętrznych pozwoliłby na automatyczną regulację prędkości obrotowej, która malałaby wraz ze zbliżaniem się do osiągnięcia wartości zadanej. Jednak w wypadku opisywanej pracy, czas w którym układ osiągnie cel nie jest szczególnie istotny, dlatego też może on działać z minimalną wymaganą prędkością.

W przypadku obrotu w osi X, którego zakres wynosi 450°, realizacja ruchu okazała się niemożliwa bez wprowadzenia dodatkowego parametru określającego ilość pełnych obrotów. Przyczyną tego jest sposób pracy czujnika położenia wału, który określa jego pozycję w zakresie 0-359.9°. W określonych przypadkach taka sama pozycja wału będzie charakteryzowała dwa różne przypadki sterowania.



Rysunek 3.7 Graficzna reprezentacja położenia wału oraz możliwość jego sterowania.

Koloriem niebieskim oznaczano aktualną pozycję wału

Źródło: Opracowanie własne

Zgodnie z powyższym rysunkiem, osiągniecie pozycji 45° pozwala na obrót o 90° w kierunku L i 360° w kierunku R. Jednak po wykonaniu takiego ruchu, pozycja wału nie zmieni się, ale jakikolwiek ruch w kierunku R będzie niedozwolony, podczas gdy możliwość ruch w kierunku L wynosić będzie 450° . Do rozróżniania takich przypadków służy siedmiopozycyjna maszyna stanu. Ta sprawdza aktualny stan oraz aktualne położenie wału. Przekraczanie odpowiednich kątów obrotu zmienia aktualny stan, a jeżeli ten osiągnie ostatni stopień, ruch będzie możliwy tylko w kierunku przeciwnym. Przypuszcza się, że zatrzymanie układu w pozycjach odpowiadając za zmianę stanu maszyny może sprawić, że ta błędnie określi aktualny stan co niesie ze sobą ryzyko późniejszego przekroczenia przez układ wartości przyjętych jako graniczne. Konsekwencją takiego stanu rzeczy może być mechaniczne uszkodzenie podzespołów całego urządzenia. W trakcie realizacji badań oraz testów nie zaobserwowano ani jednego błędного określania stanu maszyny.

Stan wysoki: napięcie +5V

Stan niski: napięcie 0V (masa)

Stan nieokreślony (floating): stan, w którym pin nie jest spięty ani z masą ani z zasilaniem

Obrót w osi X: odbywa się przy użyciu silnika krokowego, czujnika położenia wału oraz sterownika silnika krokowego. Od strony programowej ruch silnikiem odbywa się za pomocą dwóch sygnałów. Pierwszy sygnał określa kierunek obrotu, drugi sygnalizuje wykonanie ruchu. Ruch odbywa się poprzez zmianę stanu na przeciwną na pinie STEP sterownika silnika krokowego. Każda zmiana stanu to wykonanie ruchu w kierunku zadeklarowanym za pomocą podania stanu wysokiego (obrót zgodnie ze wskazówkami zegara) lub stanu niskiego (obrót przeciwnie do wskazówek zegara) na wyprowadzenie DIR sterownika silnika krokowego. Sterownik silnika krokowego umożliwia dodatkowo

określenie rozdzielczości pracy w zakresie od 1 do 1/32 kroku na impuls. Deklaracji rozdzielczości pracy dokonuje się za pomocą podania odpowiedniego stanu (wysokiego, niskiego lub nieokreślonego) na wyprowadzenia *M0* i *M1*. Przypisanie deklarowanego stanu na odpowiednie wyprowadzenie mikrokontrolera odbywa się za pomocą funkcji *digitalWrite(pin, stan)*. W projekcie rozdzielcość ruchu ustawiona jest na 1/32 za pomocą bezpośredniego połączenia wyprowadzeń z odpowiednim napięciem.

Odczytanie wartości z czujnika położenia wału: Komunikacja z układem AS5600 odbywa się przy użyciu biblioteki AS5600 dostępnej do pobrania: https://github.com/Seeed-Studio/Seeed_Arduino_AS5600. Zawarta w bibliotece funkcja *ams5600.getRawAngle()* zwraca aktualną pozycję położenia wału w zakresie 0-4095.

Automatyczny ruch w osi X: polega na cyklicznym sprawdzaniu, czy aktualne położenie wału pokrywa się z tym zadeklarowanym jako położenie końcowe. W przypadku osi X jest to azymut Słońca, aktualizowany co 5 sekund. Jeżeli aktualna pozycja wału nie pokrywa się z zadana pozycją, analizowany jest kierunek, w którym silnik powinien wykonać ruch. Walidacja kierunku ruchu nie nastąpi w momencie, gdy od ostatniego ruchu nie upłynęło 10 ms oraz gdy położenie wału przekroczyło wartości graniczne. W trakcie całej procedury wykonywane są również funkcje przetwarzania postaci danych i ich korekcja.

Obrót osi Y: odbywa się przy użyciu serwomechanizmu. Do sterowania użyto biblioteki *serwo.h*. Sterowanie polega na podaniu do funkcji *servoClass.write()* docelowej pozycji podanej w stopniach. Biblioteka przetwarza tę informację do postaci wypełniania sygnału prostokątnego i za pośrednictwem złącza PWM wysyła sygnał sterujący serwomechanizmem. Zakres obrotu został programowo ograniczony do 100°.

Automatyczny ruch w osi Y: Ruch serwomechanizmu jest bardzo szybki, dlatego aby nie uszkodzić pozostałych elementów układu, jego szybkość musi zostać ograniczona. W tym celu do funkcji sterującej nie jest podawany finalnie zadany kąt, a kąt o 1 większy od aktualnego, aż do osiągnięcia zadanej pozycji. Pomiędzy każdym wykonaniem ruchu musi upływać 200 ms. Przed wykonaniem ruchu sprawdzana jest aktualna pozycja w celu określenia poprawnego kierunku ruchu. Proces ten trwa aż do momentu pokrycia się aktualnej pozycji wału z zadana pozycją. Podobnie jak ma to miejsce w przypadku ruchu w osi X. W trakcie całej procedury wykonywane są również funkcje przetwarzania postaci danych i ich korekcja.

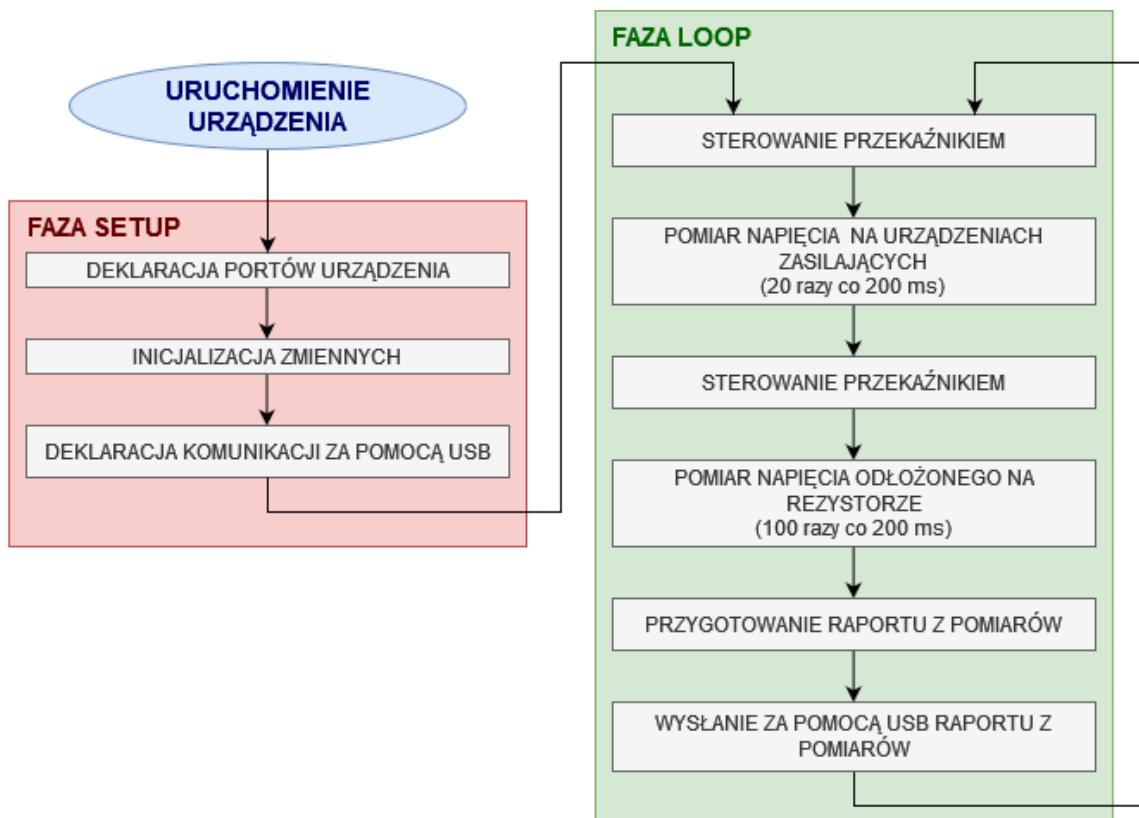
Transmisja danych za pomocą USB: Korzystanie z funkcji komunikacyjnych umożliwia biblioteka *Serial*. Otrzymane dane automatycznie zapisywane są w buforze. W każdym cyklu za pomocą funkcji *serial.available()* sprawdzane jest zapełnienie bufora. Jeżeli w buforze znajdują się dane, wywoływana jest niezwiązana z biblioteką, funkcja *ReadFromSerialPort()*. Ta znak po znaku odczytuje dane z bura i deserializuje je. Przyjmowane parametry oddzielone są przecinkiem. Zdeserializowane dane przypisywane są do odpowiednich zmiennych i stanowią finalną zadana wartość dla układów realizujących ruch w osi X i Y. Po poprawnym zdeserializowaniu informacji z bufora wysyłane jest potwierdzenie otrzymania danych. Służy do tego funkcja *Serial.println()*.

Kalibracja: Etap, w którym kalibrowany jest układ. W tym celu wykorzystywany jest układ fotorezystorów z przysłoną. Na fotorezystor podawane jest napięcie +5V a jego wyprowadzenie połączone jest ze złączem analogowym mikrokontrolera. Przysłona rzuca cień na część czujników a jedyna sytuacja, w której wszystkie czujniki będą generowały taki sam opór to ta, w której promienie słoneczne padają prostopadle na układ kalibrujący. Aby doszło do takiej sytuacji, konieczny jest odpowiednie ułożenie ramienia układu wykonawczego. Różnice w generowanym oporze oraz wiedza o umiejscowieniu danego fotorezystora pozwalają określić kierunek padania promieni słonecznych. Za pośrednictwem tych danych wykonywany jest odpowiedni ruch w osi X i Y aż do momentu, gdy wszystkie fotorezystory będą generowały identyczny opór. Po osiągnięciu takiego stanu wysyłane jest zapytanie do skryptu obliczającego azymut i kąt elewacji, o przysłanie aktualnych danych. Końcowe położenie w osi X i Y odpowiada danym obliczanym przez skrypt. Różnica w wartościach stanowi podstawę do obliczenia wartości korekcji kąta. Niestacjonarny charakter urządzenia wymusza wykonanie procedury kalibracji z każdym uruchomieniem programu.

Określanie pozycji Słońca: Powodem, dla którego wykorzystano matematyczną formułę obliczania pozycji Słońca jest wysoka stabilność obliczanych danych. Układ kalibracyjny działa tylko, w momencie występowania promieniowania bezpośredniego. Nawet niewielkie zachmurzenie sprawia, że układ nie jest w stanie poprawnie określić pozycji Słońca. Dlatego też opieranie się na danych z realnych czujników, których poprawne działanie może być zakłócone, ogranicza się jedynie do niezbędnego minimum. Konsekwencją przyjmowania danych w postaci stopni jest konieczność odpowiedniego przeskalowania danych na potrzeby działania programu oraz ciągłe monitorowanie aktualnych pozycji wałów za pomocą specjalnych czujników lub wykorzystanie urządzeń dających dużą gwarancję wykonania ścisłe określonego ruchu.

3.3. Miernik prądowy

Miernik napięcia zbudowany z użyciem mikrokontrolera Arduino Mega. Powodem użycia takiego mikrokontrolera jest duża ilość portów analogowych. W celu zmierzenia energii w obwodzie konieczne jest wykonanie pomiaru napięcia w 3 punktach. Pomiar energii w trzech obwodach wymaga użycia łącznie 9 portów analogowych.



Rysunek 3.8 Graficzna reprezentacja procedur fazy setup oraz głównej pętli programu układu pomiarowego
 Źródło: Opracowanie własne

Schemat działania układu:

Faza setup:

- Deklaracja portów
- Inicjalizacja zmiennych
- Deklaracja komunikacji przy pomocy uniwersalnej magistrali szeregowej

Faza loop:

- Sterowanie przekaźnikiem
- Pomiar napięcia na urządzeniach zasilających
- Pomiar napięcia odłożonego na rezystorze
- Przygotowanie raportu z pomiarów
- Wysłanie raportu z pomiaru

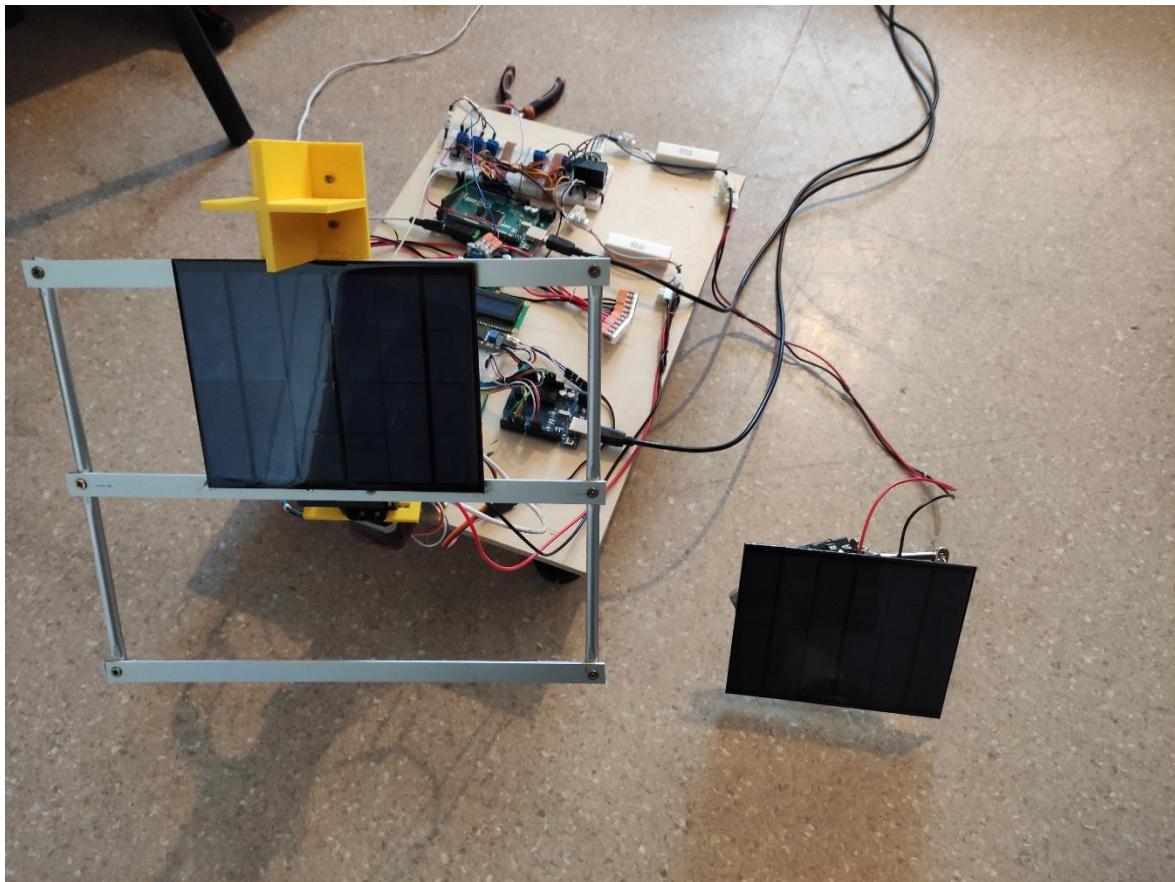
Pomiary odbywają się co 200 ms. Każdy wygenerowany raport składa się z uśrednionej wartości z 20 pomiarów napięcia generowanego poprzez panele fotowoltaiczne oraz 100 pomiarów napięcia odłożonego na rezystorze. W identyczny sposób wygląda sposób pomiaru energii pobieranej przez układ wykonawczy: 20 pomiarów napięcia zasilania, 100 pomiarów napięcia odłożonego na rezystorze. Pomiar energii potrzebnej do zasilania układu odbywa się niezależnie od pracy przekaźnika. Obwód podczas zasilania układu wykonawczego nie może zostać otwarty a użycie stabilnego źródła zasilania sprawia, że nie pojawia się spadek napięcia który mógłby

wpływając na dokładność pomiarów. Napięcie generowane przez panele lub zasilacz nie zmienia się tak często, jak napięcie te odłożone na rezystorze, jest to przyczyną znacznie większej ilości pomiarów napięcia na boczniku. Uśrednione wyniki zapisywane są do zmiennej typu String a następnie wysyłane za pomocą magistrali USB. Odbierane raporty zapisywane są do pliku za pomocą programu CoolTerm.

Poprawność odczytu napięcia porównywana była z pomiarami dokonywanymi za pomocą multimetru UNI-T UT61C. Różnice w pomiarach nie przekraczały 50 mV. Dodatkowo porównywane były pomiary wykonane za pomocą miernika z energią generowaną przez zasilacz laboratoryjny Zhaoxin RXN-305D. W trakcie testów różnice pomiędzy pomiarem a energią generowaną przez zasilacz nie przekraczały 0.2 W.

4. Badania

Badania odbywały się w porze jesiennej. Do testów wykorzystano dwa identyczne panele fotowoltaiczne 3,5W, 6V marki OEM. Jeden z nich zamontowany na ramieniu urządzenia wykonawczego, drugi ustawiony pod kątem 40° w kierunku południowym. Jest to azymut i kąt elewacji zalecany jako optymalny przy montażu statycznych paneli fotowoltaicznych [6]. Drugi panel pełnił formę próby kontrolnej i stanowił odniesienie pozwalające obliczyć przyrost energii uzyskanej poprzez ciągłe nakierowywanie paneli prostopadle do Słońca. Obydwa panele podłączone były do miernika opisanego w rozdziałach: 2.2 Miernik prądowy oraz 3.3 Miernik prądowy. Testy miały różnych czas trwania oraz przeprowadzane były w różnych warunkach pogodowych. Zadbano, aby obydwa panele były równo obciążone, potencjalnie negatywnymi dla ich działania, czynnikami niezależnymi od użytkownika. Nie udało się jednak całkowicie wyeliminować ryzyka pojawienia się takich czynników. W dalszej części rozdziału przedstawiono kilka wybranych badań.

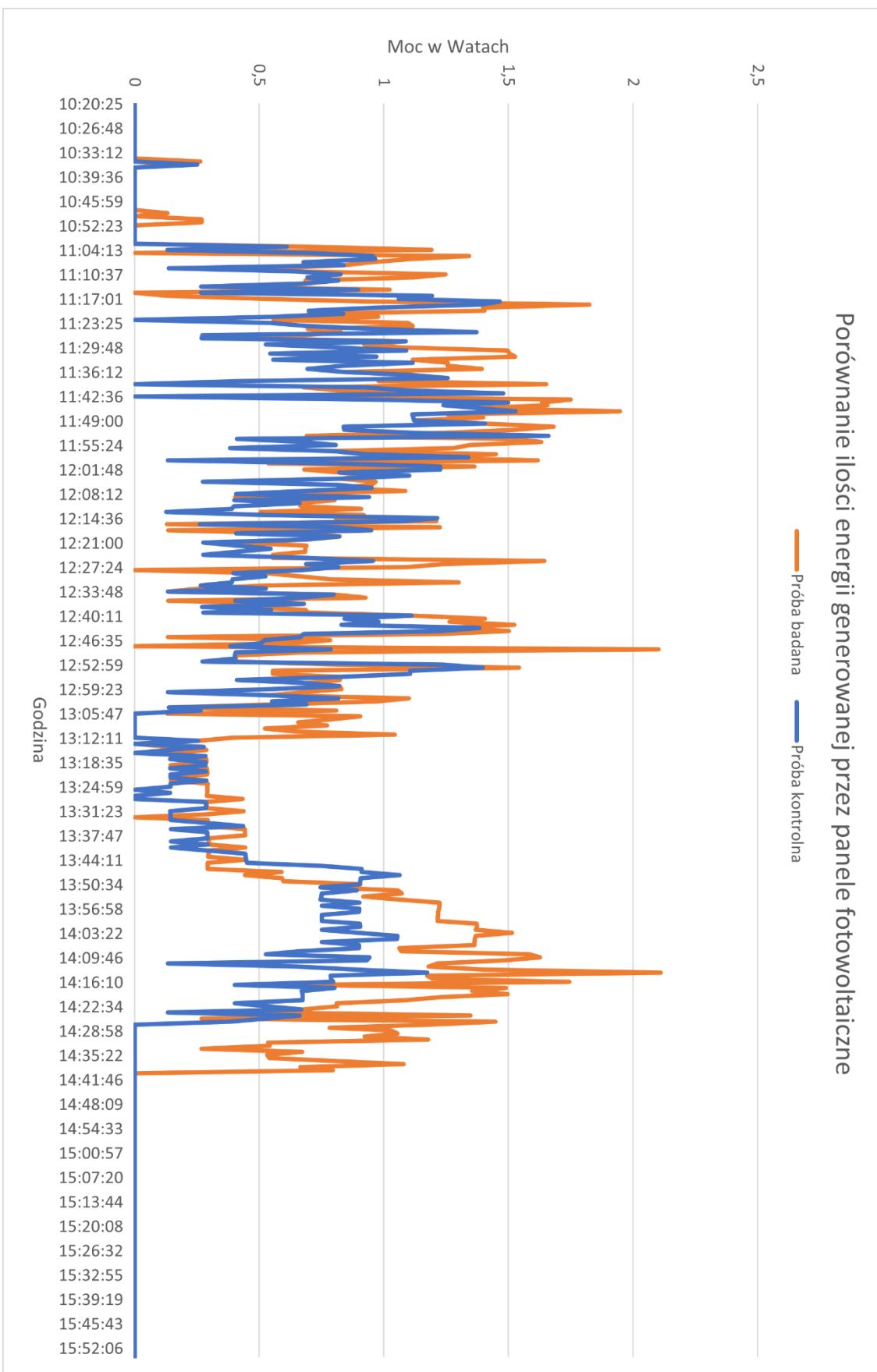


Rysunek 4.1 Zdjęcie przedstawiające urządzenie wykonawczo-nastawcze wraz z miernikiem w pełni gotowe do działania
 Źródło: Opracowanie własne

4.1. Test 1

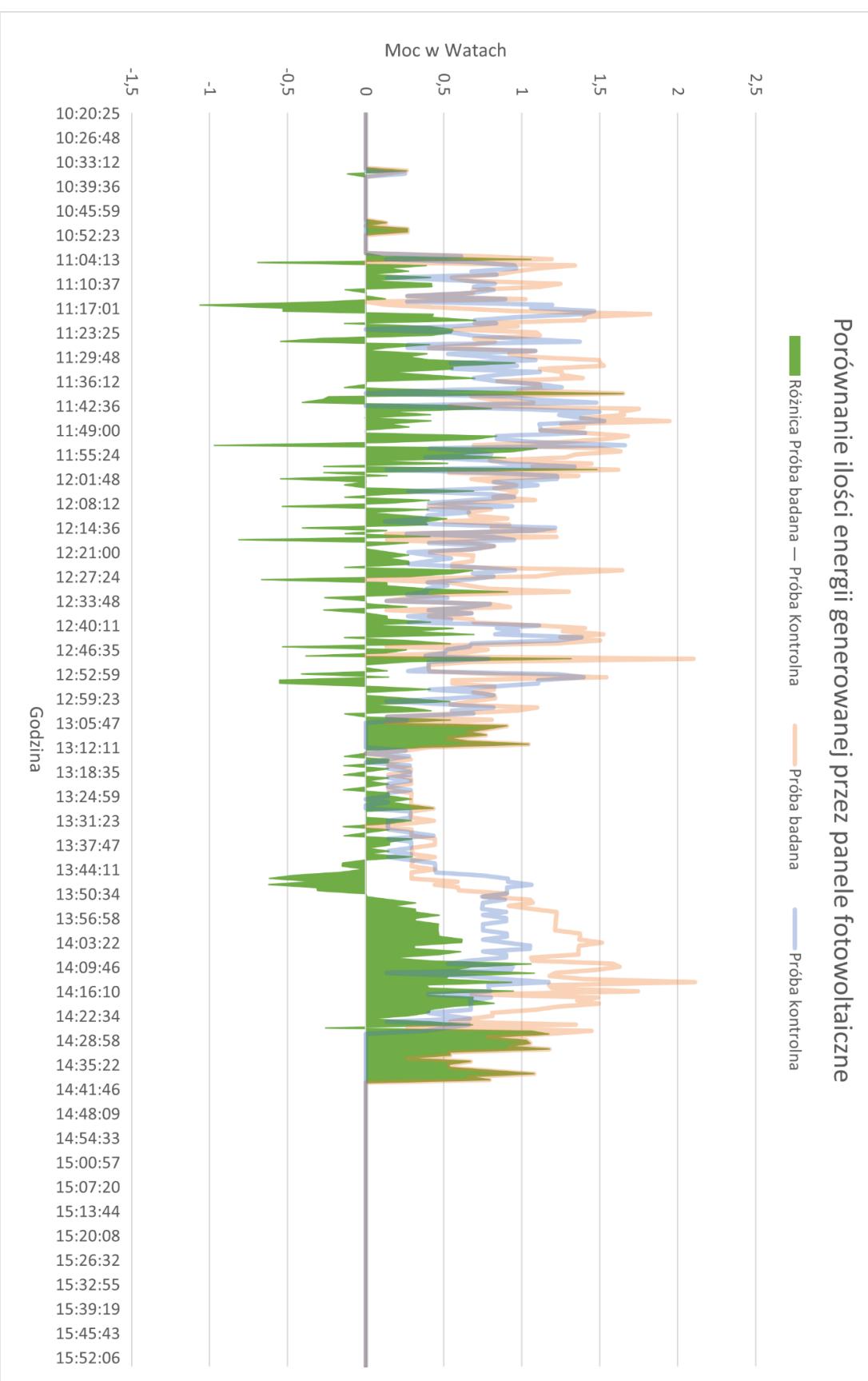
Tabela 1 Informacje na temat wybranych parametrów zebrane podczas badania nr 1

	Próba Kontrolna	Próba Badawcza
Czas badania	05:34:05	
Godzina rozpoczęcia badania	10:19:37	
Godzina zakończenia badania	15:54:30	
Średnia generowana moc (W)	0,39	0,56
Różnica w średniej generowanej mocy (W)	0,164912567	
Różnica w średniej generowanej mocy (%)	29,65%	
Wydajność (%)	11,18%	15,89%
Ilość wygenerowanej energii (Wh)	2,18	3,10
Średnie napięcie prądu (V)	5,98	6,05
Średnie natężenie prądu (A)	0,063	0,090
Średni pobór prądu przez układ wykonawczy (W)	5,68	
Ilość energii pobranej przez układ wykonawczy (Wh)	31,65	
Największe zarejestrowane napięcie (V)	6,85	6,90
Godzina największego zarejestrowanego napięcia	13:04:22	13:09:10
Największy zarejestrowany prąd (A)	0,266	0,355
Godzina największego zarejestrowanego prądu	11:09:12	12:05:11
Największa zarejestrowana moc (W)	1,66	2,11
Godzina największej zarejestrowanej mocy	11:09:12	13:29:58
Wydajność w momencie największej zarejestrowanej mocy (%)	47%	60%
Ilość raportów	412	
Pogoda	Słoneczna	
Zachmurzenie	Chwilowe	
Kalibracja	Bezproblemowa	
Dodatkowy opis: Pomiędzy godziną 13:40 a 13:50 panel badawczy znajdował się w cieniu, podczas gdy panel kontrolny był oświetlony. Ilość energii potrzebnej do zasilenia układu wykonawczego była kilkukrotnie większa niż ilość energii wygenerowanej przez panel próby badawczej.		



Rysunek 4.2 Wykres wartości mocy (W) zarejestrowanych podczas badania nr 1
Źródło: Opracowanie własne

Porównanie ilości energii generowanej przez panele fotowoltaiczne



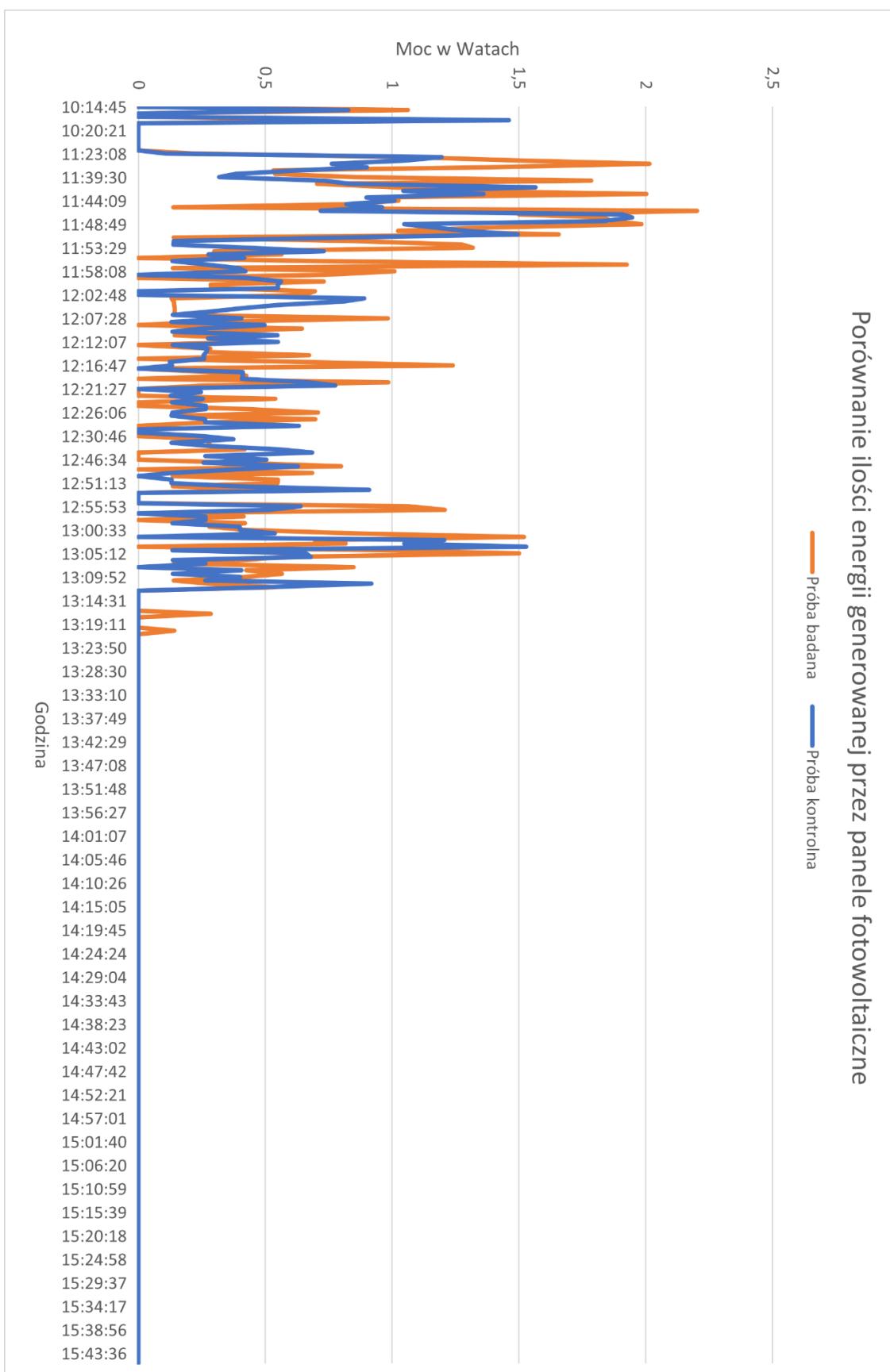
Rysunek 4.3 Wykres wartości mocy (W) z wyszczególnioną różnicą badanych przypadków, zarejestrowanych podczas badania nr 1
 Źródło: opracowanie własne

4.2. Test 2

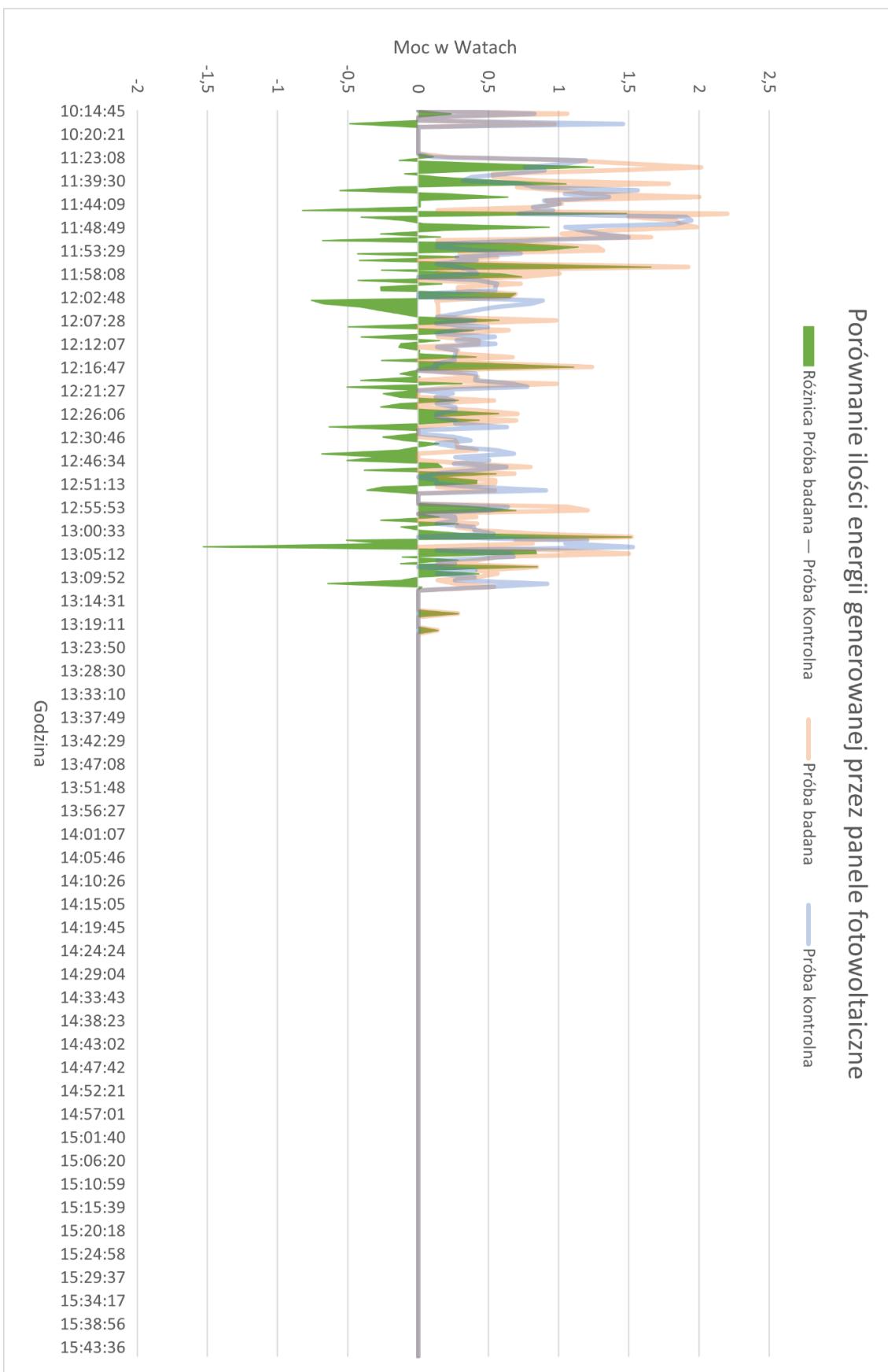
Tabela 2 Informacje na temat wybranych parametrów zebrane podczas badania nr 2

	Próba Kontrolna	Próba Badawcza
Czas badania	05:30:51	
Godzina rozpoczęcia badania	10:13:57	
Godzina zakończenia badania	15:45:36	
Średnia generowana moc (W)	0,17	0,20
Różnica w średniej generowanej mocy (W)	0,031956722	
Różnica w średniej generowanej mocy (%)	15,63%	
Wydajność (%)	4,93%	5,84%
Ilość wygenerowanej energii (Wh)	0,95	1,13
Średnie napięcie prądu (V)	5,74	5,86
Średnie natężenie prądu (A)	0,030	0,035
Średni pobór prądu przez układ wykonawczy (W)	8,88	
Ilość energii pobranej przez układ wykonawczy (Wh)	48,96	
Największe zarejestrowane napięcie (V)	6,88	7,01
Godzina największego zarejestrowanego napięcia	10:14:29	10:22:36
Największy zarejestrowany prąd (A)	0,289	0,333
Godzina największego zarejestrowanego prądu	10:21:16	10:20:36
Największa zarejestrowana moc (W)	1,95	2,20
Godzina największej zarejestrowanej mocy	10:21:56	10:20:36
Wydajność w momencie największej zarejestrowanej mocy (%)	56%	63%
Ilość raportów	375	
Pogoda	Słoneczna/pochmurna	
Zachmurzenie	Chwilowe	
Kalibracja	Bezproblemowa	
Dodatkowy opis:	Przez pierwsze 2 godziny testu panowała mglisty aura. Słońce widoczne, aczkolwiek przysłonięte rzadką mgłą. Cień blady o gładkich krawędziach. Poprawna kalibracja udała się dopiero po kilku próbach. Po około 2 godzinach i chwilowym przejaśnieniu pogoda stała się pochmurna. Energia generowana przez panele fotowoltaiczne spadła poniżej minimalnej dokładności miernika. Ilość energii potrzebnej do zasilenia układu wykonawczego była kilkukrotnie większa niż ilość energii wygenerowanej przez panel próby badawczej.	

Porównanie ilości energii generowanej przez panele fotowoltaiczne



Rysunek 4.4 Wykres wartości mocy (W) zarejestrowanych podczas badania nr 2
 Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 4.5 Wykres wartości mocy (W) z wyszczególnioną różnicą badanych przypadków, zarejestrowanych podczas badania nr 2

Źródło: Opracowanie własne

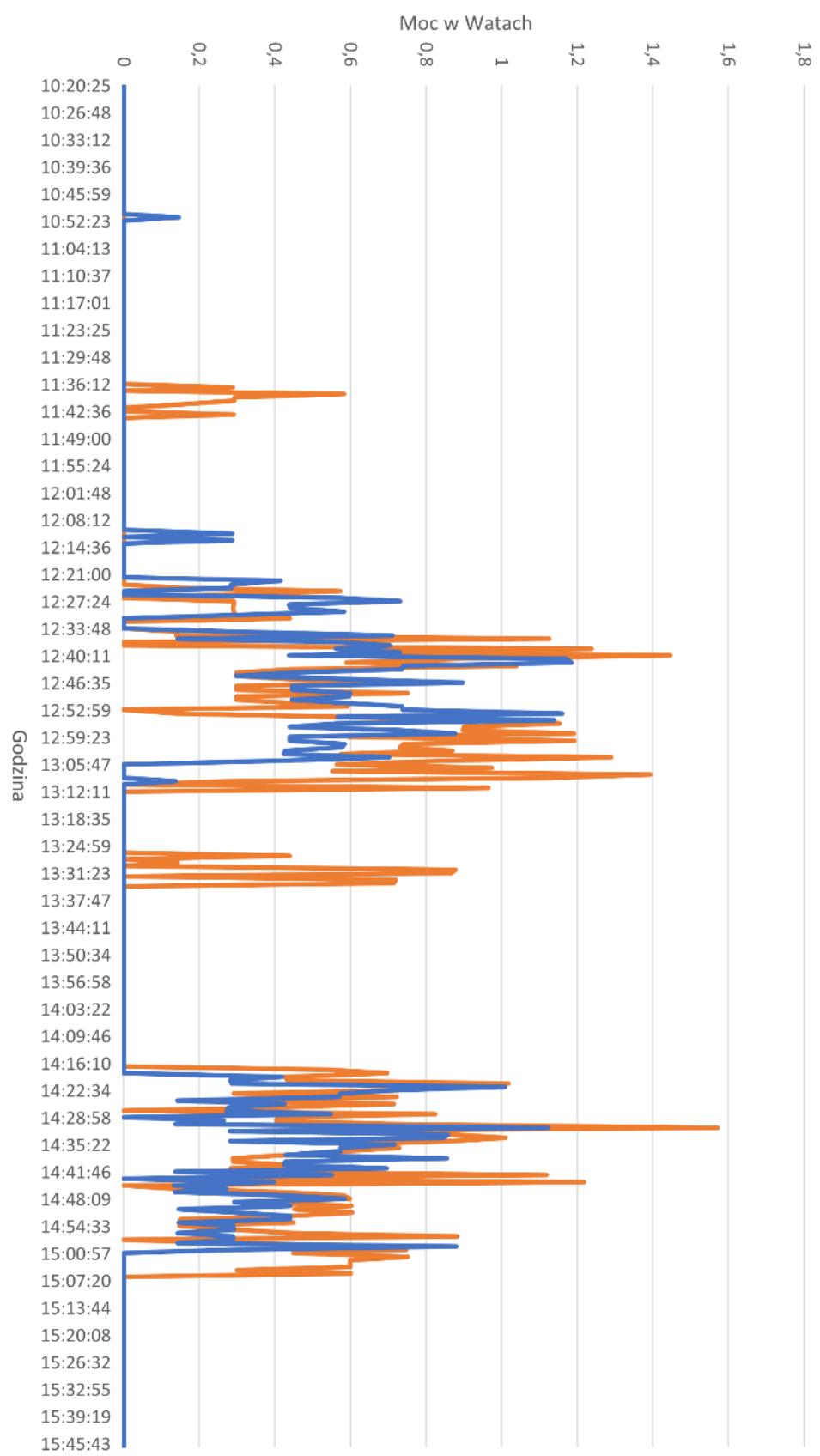
4.3. Test 3

Tabela 3 Informacje na temat wybranych parametrów zebrane podczas badania nr 3

	Próba Kontrolna	Próba Badawcza
Czas badania	04:30:29	
Godzina rozpoczęcia badania	11:09:17	
Godzina zakończenia badania	15:40:26	
Średnia generowana moc (W)	0,13	0,18
Różnica w średniej generowanej mocy (W)	0,052792147	
Różnica w średniej generowanej mocy (%)	29,50%	
Wydajność (%)	3,61%	5,11%
Ilość wygenerowanej energii (Wh)	0,57	0,81
Średnie napięcie prądu (V)	6,24	6,33
Średnie natężenie prądu (A)	0,019	0,027
Średni pobór prądu przez układ wykonawczy (W)	6,87	
Ilość energii pobranej przez układ wykonawczy (Wh)	30,97	
Największe zarejestrowane napięcie (V)	6,74	6,81
Godzina największego zarejestrowanego napięcia	13:08:25	11:37:55
Największy zarejestrowany prąd (A)	0,178	0,244
Godzina największego zarejestrowanego prądu	13:01:45	11:21:16
Największa zarejestrowana moc (W)	1,18	1,57
Godzina największej zarejestrowanej mocy	13:02:25	11:21:16
Wydajność w momencie największej zarejestrowanej mocy (%)	34%	45%
Ilość raportów	402	
Pogoda	Mglista/Słoneczna/ Pochmurna	
Zachmurzenie	Do godziny 12:20 - częściowe Od godziny 13:12 do 14:15 -duże z przejaśnieniami	
Kalibracja	Początkowo niewykonalna. Po godzinie 12:20 bezproblemowa	
Dodatkowy opis: Przez pierwsze dwie godziny testu panowała mglista aura wraz z umiarkowanym zachmurzeniem, w tym czasie pojawiło się kilka chwilowych przejaśnień. Dokonanie automatycznej kalibracji było niemożliwe, ta została wykonana za pomocą kompasu i kątomierza. Po godzinie 12:20 pogoda stała się słoneczna a automatyczna kalibracja została wykonana ponownie, tym razem z sukcesem. Od godziny 13:20 ponownie zapanowała pochmurna aura z chwilowym przejaśnieniem. Po godzinie 15:00 Słońce znajdowało się bardzo nisko. Energia generowana przez panele fotowoltaiczne spadła poniżej minimalnej dokładności miernika. Ilość energii potrzebnej do zasilenia układu wykonawczego była kilkukrotnie większa niż ilość energii wygenerowanej przez panel próby badawczej.		

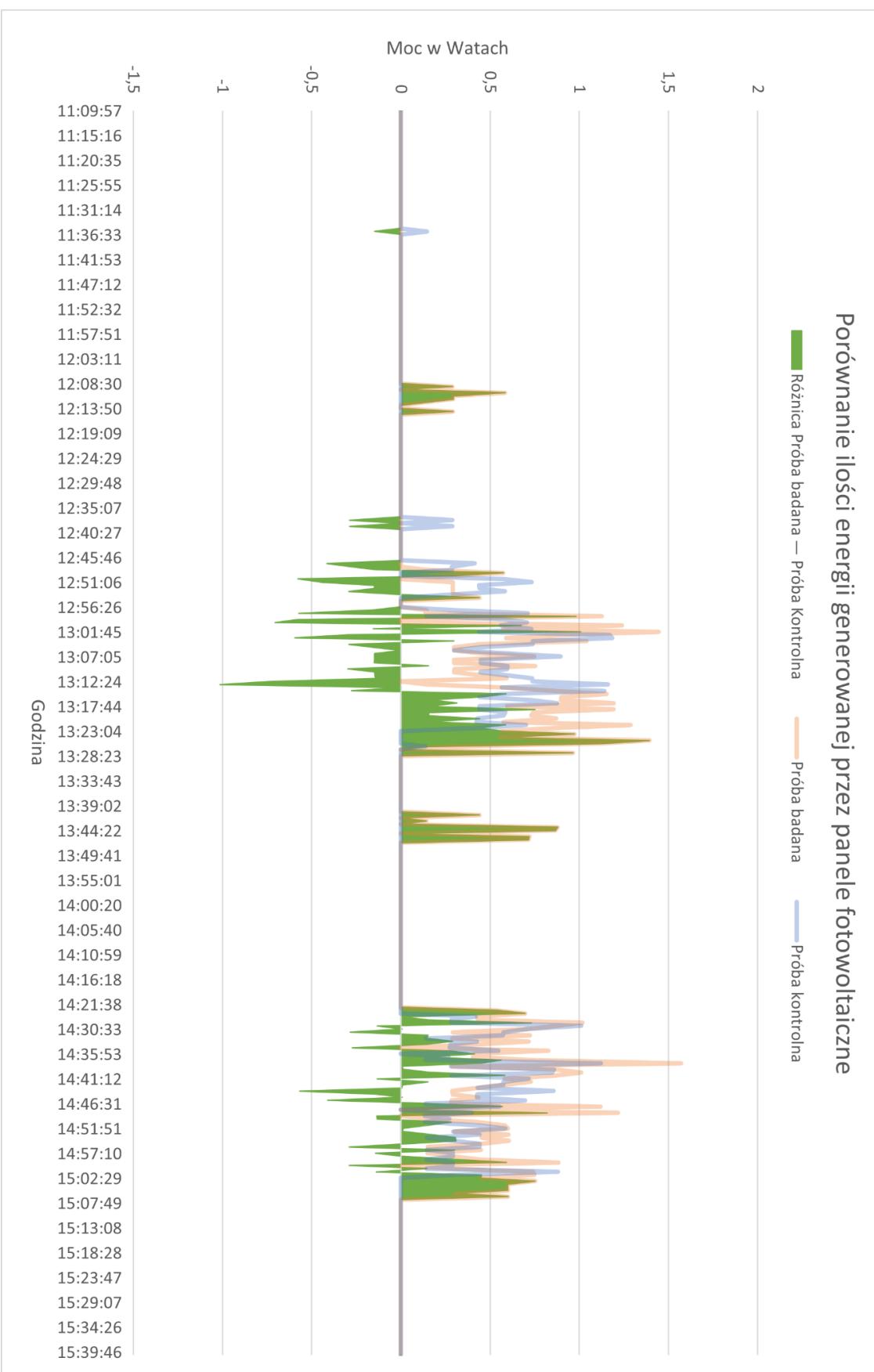
Porównanie ilości energii generowanej przez panele fotowoltaiczne

— Próba badana — Próba kontrolna



Rysunek 4.6 Wykres wartości mocy (W) zarejestrowanych podczas badania nr 3
 Źródło: Opracowanie własne

Porównanie ilości energii generowanej przez panele fotowoltaiczne

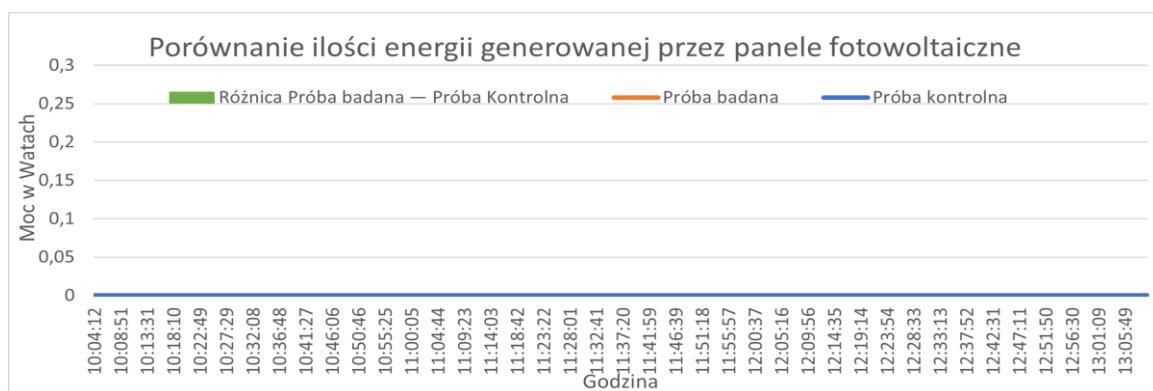


Rysunek 4.7 Wykres wartości mocy (W) z wyszczególnioną różnicą badanych przypadków, zarejestrowanych podczas badania nr 3
 Źródło: Opracowanie własne

4.4. Test 4

Tabela 4 Informacje na temat wybranych parametrów zebrane podczas badania nr 4

	Próba Kontrolna	Próba Badawcza
Czas badania	03:05:36	
Godzina rozpoczęcia badania	10:03:32	
Godzina zakończenia badania	13:09:48	
Średnia generowana moc (W)	0,00	0,00
Różnica w średniej generowanej mocy (W)	0	
Różnica w średniej generowanej mocy (%)	0,00%	
Wydajność (%)	0,00%	0,00%
Ilość wygenerowanej energii (Wh)	0,00	0,00
Średnie napięcie (V)	5,40	5,46
Średnie natężenie prądu (A)	0,000	0,000
Średni pobór prądu przez układ wykonawczy (W)	6,46	
Ilość energii pobranej przez układ wykonawczy (Wh)	19,98	
Największe zarejestrowane napięcie (V)	6,12	6,22
Godzina największego zarejestrowanego napięcia	11:36:00	10:05:32
Największy zarejestrowany prąd (A)	0,000	0,000
Największa zarejestrowana moc (W)	0,00	0,00
Ilość raportów	280	
Pogoda	Pochmurna	
Zachmurzenie	Całkowite	
Kalibracja	Niewykonalna	
Dodatkowy opis: Przez cały czas trwania testu występowało bardzo duże zachmurzenie oraz mgła. Test został przerwany pojawieniem się deszczu. Dokonanie automatycznej kalibracji było niewykonalne, ta została wykonana za pomocą kompasu i kątomierza. Przez cały okres trwania testu energia generowana przez panele fotowoltaiczne była mniejsza minimalnej dokładności miernika.		



Rysunek 4.8 Wykres wartości mocy (W) z wyszczególnioną różnicą badanych przypadków, zarejestrowanych podczas badania nr 4

Źródło: Opracowanie własne

4.5. Podsumowanie badań

Wyniki badań były bardzo zróżnicowane. Głównym wnioskiem, jaki można wyciągnąć to: obserwowany jest przyrost energii w przypadku ciągłego nakierowywania paneli fotowoltaicznych. Przyrost jest tym większy, im Słońce znajduje się dalej od kierunku południowego. Warunkiem uzyskania przyrostu energii jest jednak pojawienie się słonecznego promieniowania bezpośredniego. W momencie pojawiania się promieniowania dyfuzyjnego, które ma miejsce podczas zachmurzenia, przyrost energii znacznie malał, a w przypadku małych paneli fotowoltaicznych ilość generowanej energii spadała praktycznie do 0.

Podczas pracy nie zarejestrowano błędów w działaniu układu wykonawczego. Ruch we wszystkich osiach był płynny i precyzyjny.

Układ kalibracji działał poprawnie tylko w warunkach słonecznych. W pochmurne dni najczęściej nie potrafił, poprawnie zlokalizować kąta padania Słońca a sama procedura trwała w nieskończoność. Wystąpiła również sytuacja, w której w pochmurny dzień układ niepoprawnie określił pozycję Słońca, po czym zakończył procedurę kalibracji.

Pojedyncza kalibracja pozwalała na poprawne działanie systemu przez ponad 5 godzin. Testy nie pozwoliły zweryfikować poprawności działania kalibracji w dłuższym wymiarze czasu.

Precyza układowa w najbardziej optymistycznym przypadku jest tak duża, jak duża jest precyza układowa kalibracji.

We wszystkich badaniach ilość energii pobieranej przez układ wykonawczo-nastawczy była kilkukrotnie większa niż ilość energii generowanej przez panele. Kreuje to negatywną wizję dla przyszłości urządzenia, jednak należy mieć na uwadze, że jest ono jedynie prototypem, który miał w pierwszej kolejności pozwolić potwierdzić lub zaprzeczyć tezie o korzyściach płynących z usytuowania paneli fotowoltaicznych prostopadle do pozycji Słońca, bez uwzględniania nakładów energetycznych potrzebnych do realizacji wymaganego w tym celu ruchu. Dopiero po potwierdzeniu tezy, należy szukać rozwiązań, które pozwolą na uzyskanie przyrostu energetycznego w porównaniu do statycznych paneli słonecznych z uwzględnieniem energii potrzebnej do realizacji wymaganego ruchu. Potwierdzone jest, że w aktualnej formie układ może realizować ruch z nawet czterema panelami o rozmiarach 165x135x3mm, co w optymistycznym przypadku pozwoli wygenerować około 4 razy więcej energii niż ma to miejsce w przeprowadzonych badaniach. Temat dużej ilości energii potrzebnej do zasilenia układu wykonawczo-nastawczego, oraz pomysły na jej ograniczenie omawiane są w rozdziale 5.2 *Wykorzystanie zebranych doświadczeń w rozwoju projektu*.

5. Dyskusja

5.1. Ogólna ocena

Przeprowadzone badania udowodniły, że zastosowanie układów śledzących pozycje Słońca, zwiększa ilość energii generowanej przez panel fotowoltaiczny. Ilość przeprowadzonych badań była zbyt mała, aby przedstawić statystyczny przerost energii. Pozwoliła natomiast określić warunki, w jakich następuje przyrost energii, jaki jest pobór prądu urządzenia, z jakimi czynnikami należy liczyć się podczas projektu podobnych urządzeń oraz które elementy potrzebują dopracowania.

Ilość dodatkowej energii uzyskanej poprzez ciągłe nakierowywanie paneli fotooptycznych będzie:

- Największa, gdy na panel oddziałuje słoneczne promieniowanie bezpośrednie.
- Marginalna, gdy na panel oddziałuje słoneczne promieniowanie dyfuzyjne.

Oznacza to, że przyrostu można spodziewać się tylko w momencie, gdy Słońce będzie wyraźnie widziane na niebie. Zachmurzenie musi być niewielkie a najlepiej, jeżeli nie będzie go wcale.

Badania pokazały również, że mobilny charakter urządzenia ma niewielką rację bytu. Konieczność ciągłej kalibracji oraz fakt, że do uzyskania dodatniego bilansu energetycznego niezbędne jest zastosowanie paneli fotowoltaicznych znacznie większych rozmiarów sprawia, że jedynie stacjonarny charakter urządzenia może przynieść realny przyrost energii.

Należy mieć na uwadze, że badania nie miały na celu przedstawienie statystycznego przyrostu energii. Aby przedstawić takie wyniki, badanie musiałoby trwać co najmniej rok oraz pomiary powinny być dokonywane przez wysokiej klasy sprzęt, a samo urządzenie przetestowane pod kątem niezawodności i poprawności działania.

Wykonane badania miały potwierdzić istnienie takiego zjawiska oraz zrozumieć okoliczności jego występowania. Dodatkowo przetestowany miał zostać algorytm wyznaczania pozycji Słońca, w tym odkrycie jego niedoskonałości. Na podstawie zebranych danych można stwierdzić, że dalsze badania nad wykorzystaniem technologii systemów sterownia i śledzenia pozycji Słońca w instalacjach fotowoltaicznych mają szansę przynieść realną korzyść w postaci dodatkowej ilości wygenerowanej energii.

5.2. Wykorzystanie zebranych doświadczeń w rozwoju projektu

Zmianą, która musiałaby nastąpić przy rozwoju projektu to zmiana używanych paneli fotowoltaicznych oraz stałe ich stałe usytuowanie. W przypadku zmiany wielkości paneli fotowoltaicznych konieczna będzie również zmiana stelaża trzymającego panel oraz zmiana sposobu realizacji ruchu w osi Y. Zwiększyły ciężar, oraz wielkość paneli uniemożliwi działanie aktualnie zaproponowanego rozwiązania. Praktyczny może okazać

się, projekt w której dolna część paneli zamontowana zostanie na zawiasie. Sterowanie kątem realizowane będzie za pomocą obracanego, gwintowanego pręta. Przeniesienie ciężaru na zawias oraz użycie gwintowanego pręta pozwoli na znaczące ograniczenie nakładu energetycznego potrzebnego do utrzymywania zadanej pozycji. Dla osi X konieczne będzie zastosowanie wzmacnień i wsporników tak, aby ciężar urządzenia nie spoczywał bezpośrednio na wale silnika.

Najwięcej dopracowania oraz testów praktycznych wymaga system kalibracji. Pomimo iż statyczny charakter urządzenia teoretycznie ograniczyłby istotność systemu kalibracji, to nieznana jest jego dokładność w wymiarze czasu dłuższym niż 5 godzin. Koncepcje na rozwój systemu kalibracji to umieszczenie małych paneli fotowoltaicznych wewnętrz przysłony, wykonanie całego zakresu ruchu urządzenia w celu znalezienia pozycji, w której panel generuje największą energię lub wykorzystanie żyroskopu.

Pamiętać należy jeszcze o niewielkim przyroście energii podczas pochmurnych dni. W celu minimalizacji zużycia energii potrzebnej do realizacji ruchu, w dni w których nie przyniesie on korzyści, użyteczna może okazać się okresowa rezygnacja z systemu nastawczego. Mogłaby ona następować po negatywnej weryfikacji danych pogodowych. W celu rozwiązania potencjalnego problemu, konieczne jest zabranie dużej ilości danych pomiarowych jak i pogodowych, statystyczne ich powiązanie oraz wykrycie zależności.

Bibliografia

1. Aktaş, A. i Kirçıçek, Y. (2021). *Solar Hybrid Systems*. Academic Press.
2. Bogacz, A., Ciuła, R., Kalinowski, K., Kowalak, T., Pawłowski, A., Sulej, A., Wiśniewski, K. (2022). *Rynek Fotowoltaiki W Polsce*. Warszawa: Raport Instytutu Energetyki Odnawialnej.
3. Chwieduk, B. (2015). *Ogiwa Fotowoltaiczne - Budowa, Działanie, Rodzaje* (Tomy I-IV). Polska Energetyka Słoneczna.
4. Craig, J. C. (2017). *Sun Position: Astronomical Algorithm in 9 Common Programming Languages*.
5. Dixon, A. E. i Leslie, J. D. (1979). *Solar Energy Conversion*.
6. Flizikowski, J. i Mroziński, A. (2016). *Inżynieria Instalacji Fotowoltaicznych*. (A. Mroziński, Red.) Bydgoszcz: Wydawnictwo współfinansowane ze środków funduszy norweskich oraz środków krajowych.
7. Hennel, J. (1986). *Podstawy elektroniki półprzewodnikowej*. WNT.
8. Kalogirou, S. (2017). *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*.
9. Kalogirou, S. A. (2012). *Solar thermal systems: Components and applications - introduction*.
10. Letcher, T. M. (2022). *Comprehensive Renewable Energy*.
11. M.A.A. Mamun, Islam, M. M., Hasanuzzaman, M. i Selvaraj, J. (2022). *Effect of tilt angle on the performance and electrical parameters of a PV module: Comparative indoor and outdoor experimental investigation*.
12. Mousazadeh, H., Keyhani, A., Javadi, A., Mobli, H., Abrinia, K. i Sharifi, A. (2009). *A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output*.
13. Wallace Copeland, A., Black, O. D. i Garrett, A. B. (1941). *The Photovoltaic Effect*. Columbus, Ohio: Department of Chemistry.

Spis tabel

<i>Tabela 1</i> Informacje na temat wybranych parametrów zebrane podczas badania nr 1	41
<i>Tabela 2</i> Informacje na temat wybranych parametrów zebrane podczas badania nr 2	44
<i>Tabela 3</i> Informacje na temat wybranych parametrów zebrane podczas badania nr 3	47
<i>Tabela 4</i> Informacje na temat wybranych parametrów zebrane podczas badania nr 4	50

Spis rysunków

<i>Rysunek 1.1.</i> Krzemowa struktura półprzewodnika domieszkowana fosforem na złączu n (po lewej) oraz borem na złączu p (po prawej). W obrębie złącza n pojawiają się wolne elektrony a w obszarze złącza p dziury	7
<i>Rysunek 1.2</i> Wykres przedstawia zdolność do wybijania elektronów w zależności od długości fali	8
<i>Rysunek 1.3</i> Ilość energii generowanej przez panel słoneczny w zależności od nachylenia	9
<i>Rysunek 1.4</i> Grafika obrazuje przechodzenie promieniowania słonecznego przez atmosferę	10
<i>Rysunek 1.5</i> Budowa ogniska fotowoltaicznego	11
<i>Rysunek 1.6</i> Wygląd paneli fotowoltaicznych I generacji. Monokrystaliczne (po lewej) posiadają charakterystyczne ścięte brzegi a polikrystaliczne różnobarwną strukturę. 12	12
<i>Rysunek 1.7</i> Zdjęcie przedstawia wędrówkę Słońca w okresie 6 miesięcy od przesilenia letniego do przesilenia zimowego.....	13
<i>Rysunek 1.8</i> Graficzna reprezentacja azymutu (ang. Azimuth Angle) oraz kąta elewacji (ang. Elevation angle).....	13
<i>Rysunek 1.9</i> Azymut oraz kąt elewacji Słońca w okresie od przesilenia letniego do przesilenia zimowego dla współrzędnych: 53.44N, 14.9E (Szczecin)	15
<i>Rysunek 2.1</i> Zestawienie elementów funkcjonalnych	16
<i>Rysunek 2.2</i> Schemat elektryczny układu wykonawczo-nastawczego.....	18
<i>Rysunek 2.3</i> Zdjęcie układu wykonawczo-nastawczego	19
<i>Rysunek 2.4</i> Model 3D przysłony fotorezystorów	21
<i>Rysunek 2.5</i> Schemat bocznika wykorzystanego w układzie pomiarowym z zaznaczonymi punktami pomiarowymi	22
<i>Rysunek 2.6</i> Symulacja działania bocznika wykorzystanego w układzie pomiarowym	22
<i>Rysunek 2.7</i> Schemat elektryczny miernika prądowego.....	23
<i>Rysunek 2.8</i> Zdjęcie miernika prądowego.....	24

Rysunek 3.1 Diagram zależności pomiędzy wszystkimi programami. Na potrzeby przejrzystości realizowane funkcje zostały uproszczone. Szczegółowe informacje na temat działania programów opisane są w kolejnych rozdziałach	27
Rysunek 3.2 Graficzna reprezentacja faz wykonywania kodu urządzeń z serii Arduin	28
Rysunek 3.3 Uproszczony schemat blokowy procedur skryptu obliczającego pozycje Słońca	29
Rysunek 3.4 Przykładowy wyciąg z terminala skryptu wytyczającego pozycję Słońca .	30
Rysunek 3.5 Graficzna reprezentacja procedur fazy setup oraz głównej pętli programu układu wykonawczego	31
Rysunek 3.6 Schemat blokowy modelu sterowania	33
Rysunek 3.7 Graficzna reprezentacja położenia wału oraz możliwość jego sterowania. Kolorem niebieskim oznaczano aktualną pozycję wału.....	35
Rysunek 3.8 Graficzna reprezentacja procedur fazy setup oraz głównej pętli programu układu pomiarowego	38
Rysunek 4.1 Zdjęcie przedstawiające urządzenie wykonawczo-nastawcze wraz z miernikiem w pełni gotowe do działania	40
Rysunek 4.2 Wykres wartości mocy (W) zarejestrowanych podczas badania nr 1	42
Rysunek 4.3 Wykres wartości mocy (W) z wyszczególnioną różnicą badanych przypadków, zarejestrowanych podczas badania nr 1	43
Rysunek 4.4 Wykres wartości mocy (W) zarejestrowanych podczas badania nr 2	45
Rysunek 4.5 Wykres wartości mocy (W) z wyszczególnioną różnicą badanych przypadków, zarejestrowanych podczas badania nr 2	46
Rysunek 4.6 Wykres wartości mocy (W) zarejestrowanych podczas badania nr 3	48
Rysunek 4.7 Wykres wartości mocy (W) z wyszczególnioną różnicą badanych przypadków, zarejestrowanych podczas badania nr 3	49
Rysunek 4.8 Wykres wartości mocy (W) z wyszczególnioną różnicą badanych przypadków, zarejestrowanych podczas badania nr 4	50