

Politechnika Wrocławska

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

TYTUŁ PRACY:
Wykorzystanie mikrokontrolera w układzie
pozyskiwania energii z promieniowania
słonecznego

AUTOR:
Kamil Góra

PROMOTOR:
dr inż. Wojciech Domski

*Pracę dyplomową dedykuję moim
rodzicom.*

STRESZCZENIE

Celem pracy dyplomowej było zrealizowanie układu wykorzystywanego do ładowania akumulatorów litowo-polimerowych, korzystając z energii słonecznej. Wykonano projekt składający się z elementów elektronicznych, mechanicznych oraz oprogramowania. Przeprowadzono pomiary napięcia, natężenia prądu i natężenia światła w celu utworzenia i analizy charakterystyk pracy ogniwa fotowoltaicznego. Elementy elektroniczne połączono ze sobą przewodami. Zaprogramowano mikrokontroler, który realizuje odczyt danych z czujników, wysyłanie i odbieranie informacji oraz sterowanie serwomechanizmami. Napisano aplikację monitorująco-sterującą, umożliwiającą wizualizację danych i ich zapis do pliku oraz ręczne sterowanie położeniem ogniwa słonecznego. Zaprojektowano elementy konstrukcji mechanicznej i połączono je ze sobą. Zaimplementowano algorytm śledzenia położenia słońca, co przełożyło się na możliwość generowania większej mocy przez układ. Dodatkowo przedstawiono informacje na temat odnawialnych źródeł energii, ogniw fotowoltaicznych i akumulatorów litowo-polimerowych.

SUMMARY

The purpose of the diploma thesis was to implement a system used to charge lithium-polymer batteries using solar energy. A project consisting of electronic, mechanical and software components was made. Voltage, current and light intensity measurements were made in order to create and analyze the operating characteristics of the photovoltaic cell. The electronic components were connected with wires. A microcontroller, which reads data from sensors, sends and receives information and controls servos, was programmed. A monitoring and control application was created, allowing data visualization and saving to a file, as well as manual control of the position of the solar cell. The elements of the mechanical structure were designed and connected together. An algorithm for tracking the position of the sun was implemented, which allowed to generate more power by the system. In addition, information on renewable energy sources, photovoltaic cells and lithium-polymer batteries was presented.

Słowa kluczowe: energia słoneczna, akumulator litowo-polimerowy, ogniwo słoneczne, odnawialne źródło energii, mikrokontroler

Keywords: solar energy, lithium-polymer battery, solar cell, renewable energy source, microcontroller

Spis treści

1	Wstęp	3
1.1	Teza	4
2	Ogniwa słoneczne	5
2.1	Efekt fotowoltaiczny	5
2.2	Krzemowe ogniwa słoneczne	5
2.3	Niekrzemowe ogniwa słoneczne	6
2.4	Pomiar zależności generowanego prądu od natężenia światła	6
2.5	Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej	7
2.6	Wyznaczenie charakterystyki mocy	8
2.7	Wyznaczenie parametrów ogniwa	9
3	Akumulatory litowo-polimerowe	11
3.1	Proces ładowania	12
3.2	Inne rodzaje akumulatorów	12
4	Projekt elektroniki	15
4.1	Ogniwo słoneczne	16
4.2	Mikrokontroler	16
4.3	Czujniki	17
4.3.1	Czujnik prądu	17
4.3.2	Czujnik natężenia światła	17
4.3.3	Fotorezystory	18
4.4	Moduł ładowarki akumulatorów litowych	18
4.5	Serwomechanizmy	19
4.6	Zasilanie	19
5	Sterownik	21
5.1	Aplikacja monitorująco-sterująca	21
5.2	Oprogramowanie mikrokontrolera	22
6	Konstrukcja mechaniczna	27
7	Podsumowanie	31
	Załącznik A	33
	Bibliografia	33

Rozdział 1

Wstęp

W dzisiejszych czasach coraz częściej wykorzystywane są odnawialne źródła energii (OZE). Ich przewagą nad źródłami nieodnawialnymi jest to, że mogą być eksploatowane praktycznie w nieskończoność, a ich negatywny wpływ na środowisko naturalne jest znikomy.

Jednym z odnawialnych (niekonwencjonalnych) źródeł energii jest energia słoneczna, na której opiera się niniejszy projekt. Do atmosfery Ziemi dociera tylko 0.0000002% energii generowanej przez Słońce, a do jej powierzchni średnio mniej niż połowa tej wartości [19]. Moc promieniowania zależy od pory dnia, pory roku, warunków atmosferycznych oraz miejsca, w którym jest mierzona. Metodę pozyskiwania energii elektrycznej z promieniowania słonecznego określa się mianem fotowoltaiki. W tym celu wykorzystywane są ogniwa fotowoltaiczne. Zaletami takiego rozwiązania są brak emisji szkodliwych substancji, niska awaryjność i długa żywotność całej instalacji (jest odporna na trudne warunki atmosferyczne, czyli niskie i wysokie temperatury, śnieg, silny wiatr, dużą wilgotność). W przypadku wad należy wspomnieć o wysokim koszcie produkcji i montażu ogniw fotowoltaicznych oraz bezpośredniej zależności ich wydajności od promieniowania słonecznego. Instalacja fotowoltaiczna dużej mocy składa się z dwóch podstawowych elementów: paneli słonecznych i inwertera, który zamienia prąd stały na prąd zmienny. Oprócz tego w jej skład wchodzi przewody, konstrukcja mechaniczna oraz system zabezpieczeń. Korzystając z fotowoltaiki, energię można pozyskiwać przez cały rok, jednak wydajność takiej instalacji przy zachmurzonym niebie jest ograniczona. W Polsce, w okresie letnim, ilość generowanej energii osiąga maksimum, gdyż w tym czasie moc promieniowania słonecznego jest największa. Fotowoltaika staje się coraz bardziej popularna. Głównym czynnikiem, który na to wpływa, jest możliwość obniżenia rachunków za energię. Po pewnym czasie koszty poniesione w związku z zakupem i montażem instalacji zwrócą się.

Innym popularnym odnawialnym źródłem energii jest energia wody. Najczęściej wykorzystuje się ją w dużych elektrowniach wodnych, które podstawowo dzielą się na przepływowe i regulacyjne [19]. Pierwsze z nich charakteryzują się brakiem możliwości magazynowania wody i regulacji mocy. Elektrownie regulacyjne są natomiast wyposażone w zbiorniki wodne, dzięki którym ilość wytwarzanej energii może się zmieniać według zapotrzebowania. Kolejnym odnawialnym źródłem energii jest wiatr. Nagły rozwój energetyki wiatrowej przypada na lata dziewięćdziesiąte XX wieku [19]. Istnieją dwa podstawowe kierunki tego rozwoju – mała energetyka autonomiczna (np. gospodarstwa domowe) oraz duże elektrownie wiatrowe [19]. Źródło to jest niestabilne, gdyż wydajność turbin wiatrowych w dużym stopniu zależy od warunków atmosferycznych. Za wadę można uznać także hałas generowany przez elektrownie wiatrowe, jednak energia wiatru jest uważana za jedną z najtańszych i najbardziej ekologicznych. Do OZE należy także energia geotermalna. Jej zasoby dzielą się na hydrotermiczne i petrotermiczne [19]. Pierwsze z nich są związane

z pokładami gorącej wody i parą wodną, a do zasobów petrotermicznych należy energia zgromadzona w skałach. W celu pozyskania tego typu energii najczęściej wykonuje się odwierty o głębokości nawet do 5 km. W przypadku gejzerów nie jest to wymagane, gdyż strumień wody i pary wydostaje się na powierzchnię Ziemi. Warto także wspomnieć o biomasie. Tym terminem określa się biodegradowalne produkty pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego i odpady. Do produkcji energii wykorzystywane są między innymi: drewno, słoma, rośliny energetyczne, odpady organiczne, biopaliwa, wodorosty. Biomasa może być bezpośrednio wykorzystana do produkcji energii poprzez spalanie lub przetworzona na biopaliwa. Jej zaletami są niskie koszty produkcji i przetwarzania energii.

Z powodu rosnącego zainteresowania fotowoltaiką i jej zalet, zdecydowano się wykorzystać energię słoneczną w układzie, który realizuje ładowanie akumulatora litowo-polimerowego. Głównymi elementami projektu są: ogniwo słoneczne, magazyn energii i sterownik. Zdecydowano się na użycie mikrokontrolera firmy STMicroelectronics, który zapewnia szybkie wykonywanie operacji i obsługuje wszystkie wymagane interfejsy oraz przetworniki. Istotnymi elementami są także czujniki, które pozwalają na monitorowanie działania systemu wbudowanego. Wykorzystano czujnik prądu oparty na układzie INA219, wykonujący pomiar natężenia prądu płynącego przez układ. Pomiar napięcia jest natomiast wykonywany za pośrednictwem przetwornika ADC wbudowanego w mikrokontroler. Przydatny okazał się także czujnik natężenia światła, zwracający informację o warunkach oświetleniowych. Wykorzystano dwa fotorezystory, które pozwalają na automatyczny obrót ogniwa słonecznego w kierunku Słońca. Czujniki umożliwiły wykonanie pomiarów, na podstawie których utworzono odpowiednie charakterystyki przedstawiające pracę ogniwa. Ładowanie akumulatora litowo-polimerowego realizuje specjalnie dostosowana do tego celu ładowarka. Wybrano taki rodzaj akumulatora ze względu na jego szerokie zastosowanie w różnych urządzeniach elektronicznych (np. telefony komórkowe, aparaty fotograficzne, laptopy, roboty). Jest to spowodowane małymi rozmiarami oraz niewielką masą pojedynczego ogniwa przy stosunkowo dużej pojemności. W celu umożliwienia zmiany położenia ogniwa słonecznego zdecydowano się na zastosowanie serwomechanizmów. Jeden serwomechanizm odpowiada za obrót całej platformy, a drugi za kąt nachylenia samego ogniwa. Interfejsem użytkownika jest aplikacja monitorująco-sterująca, która na bieżąco wyświetla dane zbierane z czujników i pozwala na ręczne sterowanie serwomechanizmami. Komunikacja z mikrokontrolerem następuje poprzez port szeregowy. Oprócz tego, za jej pośrednictwem możliwe jest ręczne sterowanie serwomechanizmami, a także zapis danych (wartości napięcia na zaciskach ogniwa, prądu przepływającego przez układ oraz natężenia światła) do pliku tekstowego. Układ zrealizowany w ramach pracy inżynierskiej jest uniwersalny, to znaczy, że zamiast ładowarki akumulatorów można podłączyć inne obciążenie, a cały system będzie działał poprawnie.

1.1 Teza

Wykorzystanie sterownika do maksymalizacji wytwarzania energii elektrycznej pozyskiwanej ze Słońca jest bardziej efektywne niż korzystanie z ogniwa fotowoltaicznego o niezmiennym położeniu.

Rozdział 2

Ogniwa słoneczne

Ogniwo słoneczne jest półprzewodnikowym elementem elektronicznym, który zamienia energię promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Cały proces zachodzi w wyniku zjawiska fotowoltaicznego. Na rynku dostępne są ogniwa, które różnią się od siebie wydajnością, technologią wykonania, kosztem produkcji czy masą. Jednymi z podstawowych parametrów są: napięcie obwodu otwartego, prąd zwarcia, sprawność, punkt mocy maksymalnej, współczynnik wypełnienia charakterystyki prądowo-napięciowej [15].

2.1 Efekt fotowoltaiczny

Działanie ogniw słonecznych opiera się na efekcie fotowoltaicznym. Zjawisko to zostało odkryte w 1839 roku przez Edmonda Becquerela [18]. Konwersja energii przebiega dzięki wykorzystaniu złącza PN zawartego w ogniwie. Złącze to powstaje w miejscu styku półprzewodnika typu P i półprzewodnika typu N. Właściwości danego ciała są związane z pasmową strukturą ciał i zdefiniowane w szczególności przez położenie pasma walencyjnego, pasma przewodzenia i odstęp energetyczny [20]. W paśmie przewodzenia elektron może swobodnie przemieszczać się pomiędzy atomami, natomiast w paśmie walencyjnym jest to niemożliwe. W półprzewodnikach elektron może przemieścić się z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia i stać się elektronem swobodnym. Wymaga to dostarczenia energii, w przypadku ogniw fotowoltaicznych – świetlnej. Gdy tak się stanie, pozostawia on w paśmie walencyjnym obszar zwany dziurą lub defektem elektronowym [20]. Minimalna energia, która spowoduje migrację elektronu, jest nazywana energią aktywacji. W wyniku padania promieni słonecznych o energii promieniowania większej niż energia aktywacji na złącze PN, powstają pary elektron–dziura. Pole elektryczne w półprzewodniku powoduje przemieszczanie elektronów do obszaru N i dziur do obszaru P, w wyniku czego na złączu PN powstaje napięcie [19]. W celu obniżenia energii potrzebnej do wybicia elektronu stosuje się domieszkowanie, czyli wprowadzanie do sieci krystalicznej danego materiału, np. krzemu, obcych atomów (o charakterze donorów – np. fosfor lub akceptorów elektronów – np. bor) [19].

2.2 Krzemowe ogniwa słoneczne

Są to najczęściej wykorzystywane na szeroką skalę rozwiązania [18]. Jednym z rodzajów krzemowych ogniw słonecznych są ogniwa monokrystaliczne o sprawności na skalę masową wynoszącej 24,7% [17]. Charakteryzują się dużą czystością krzemu (99,99%) [17]. Powoduje to, że są drogie w produkcji. Złącze PN zastosowane w tych ogniwach odbiera

tylko część promieniowania słonecznego, ze względu na zbyt małą lub zbyt dużą energię fotonów. Konsekwencją jest grzanie się ogniwa i obniżenie jego sprawności. Kolejny rodzaj to ogniwa polikrystaliczne. Są tańsze od ogniw monokrystalicznych, jednak charakteryzują się mniejszą wydajnością. Ich maksymalna sprawność na skalę masową wynosi 20,3% [17]. Produkowane są także cienkowarstwowe ogniwa słoneczne na bazie krzemu amorficznego. Charakteryzują się niskim kosztem i stosunkowo niską wydajnością w porównaniu do innych rodzajów ogniw krzemowych. Ich sprawność na skalę masową wynosi 12% [17]. W przypadku tych ogniw występuje efekt Stablera–Wronskiego, który powoduje spadek sprawności do 40% wartości początkowej [17]. Jest on spowodowany zrywaniem wiązań pomiędzy wodorem i krzemem pod wpływem światła.

2.3 Niekrzemowe ogniwa słoneczne

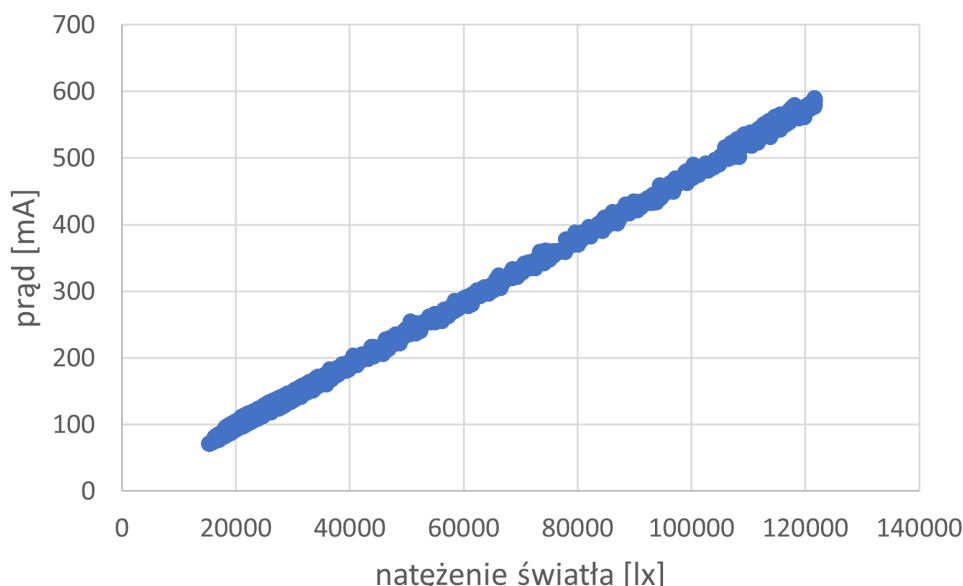
Do produkcji tych ogniw wykorzystuje się pierwiastki inne niż krzem. Jednymi z nich są ogniwa z tellurku kadmu, które bardzo dobrze absorbują światło, zatem nie wymagają grubej warstwy materiału [17]. Wadą jest ryzyko wystąpienia pożaru. Ich sprawność w powszechnych rozwiązaniach wynosi 8% [17]. Ogniwa z arsenku galu charakteryzują się dużą wydajnością. Takie rozwiązanie jest wykorzystywane np. do zasilania stacji kosmicznych, sond lub sztucznych satelitów [22]. Ich sprawność na skalę masową wynosi 26% [17]. Kolejną grupę stanowią ogniwa organiczne. Charakteryzują się elastycznością, niskimi kosztami produkcji i małą masą. Rozwiązania jednowarstwowe cechują się bardzo niską sprawnością, jednak dla rozwiązań dwuwarstwowych wynosi ona około 5% [17]. Należą do nich np. ogniwa barwnikowe, do których produkcji stosuje się dwutlenek tytanu i barwnik absorbujący światło. Ogniwa typu tandem to konstrukcje wykonane z warstw, każda posiada inne charakterystyki widmowe. Powoduje to zwiększenie możliwości absorpcyjnych ogniw. Na początku pochłaniane jest promieniowanie o najkrótszej długości fali, gdyż warstwy ułożone są tak, że wraz z przejściem od wierzchniego do tylnego ogniwa przerwa energetyczna maleje [17].

2.4 Pomiar zależności generowanego prądu od natężenia światła

Pomiar charakterystyki miał na celu zbadanie, w jaki sposób generowany przez ogniwo prąd zależy od natężenia światła. W tym celu do ogniwa został podłączony opornik o rezystancji 1Ω i maksymalnej mocy 10W, aby przez układ pomiarowy płynął największy możliwy prąd. Oprócz tego wykorzystano czujnik prądu i czujnik natężenia światła. Pomiaru były wykonywane co pewien czas (0.5 sekundy) i zapisywane do pliku przez aplikację monitorująco–sterującą. Wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 2.1). Pomiaru wykonano w pewnym zakresie natężenia światła. Wynika z nich, że badana zależność jest w przybliżeniu liniowa. Charakterystykę można aproksymować funkcją liniową. Jej wzór wyznaczono za pomocą oprogramowania Microsoft Excel:

$$y = 0.0047x + 3.4 \quad (2.1)$$

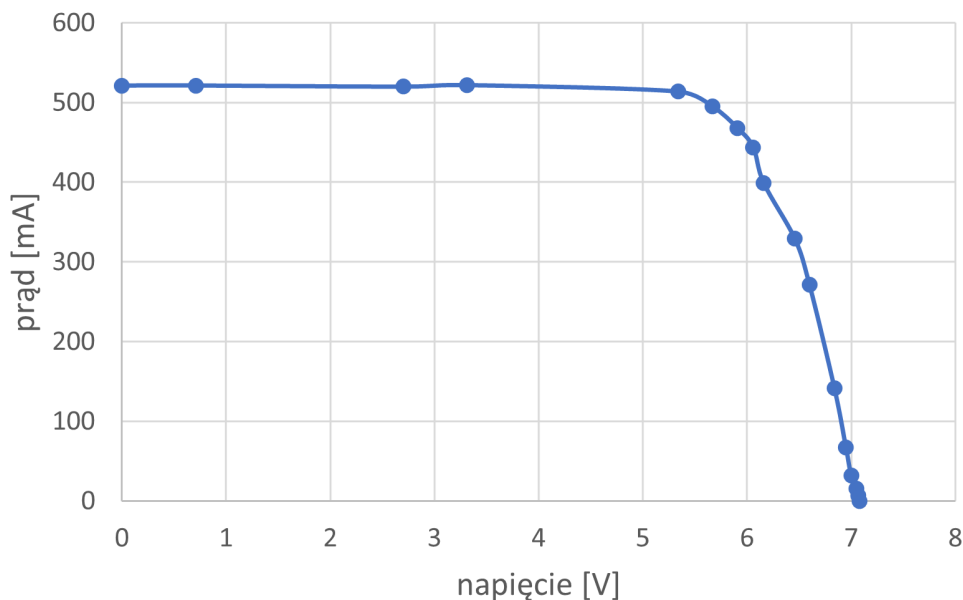
Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie jednej wartości na podstawie drugiej.



Rysunek 2.1 Wykres zależności generowanego przez ogniwo prądu od natężenia światła

2.5 Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej

Pomiar charakterystyki prądowo-napięciowej miał na celu zbadanie zależności generowanego prądu od napięcia na zaciskach ogniwa. W tym celu do zacisków ogniwa zostały podłączane rezystory o różnym oporze, co wymuszało przepływ prądu przez układ pomiarowy. Dane były zapisywane do pliku przez aplikację monitorująco-sterującą, a na ich podstawie utworzono charakterystykę. Wszystkie pomiary wykonano przy bezchmurnym niebie, zatem natężenie światła podczas wykonywania całej serii pomiarów zmieniało się nieznacznie i wynosiło około 110000 lx. W celu zwiększenia wiarygodności wyników, każdy pomiar wykonywano przez kilka sekund, a następnie obliczono średnią arytmetyczną wszystkich zebranych próbek napięcia i prądu. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że podłączenie obciążenia rezystancyjnego powoduje spadek napięcia na ogniwie, co przedstawiono na wykresie (rys 2.2). Jego wartość jest tym większa, im mniejsza jest rezystancja obciążenia. Kształt charakterystyki jest ściśle związany z natężeniem światła. Wraz z jego wzrostem proporcjonalnie rośnie natężenie prądu, natomiast nieznacznie zmienia się napięcie na zaciskach ogniwa [15]. Napięcie, które definiuje punkt maksymalnej mocy, także zmienia się w niewielkim zakresie.

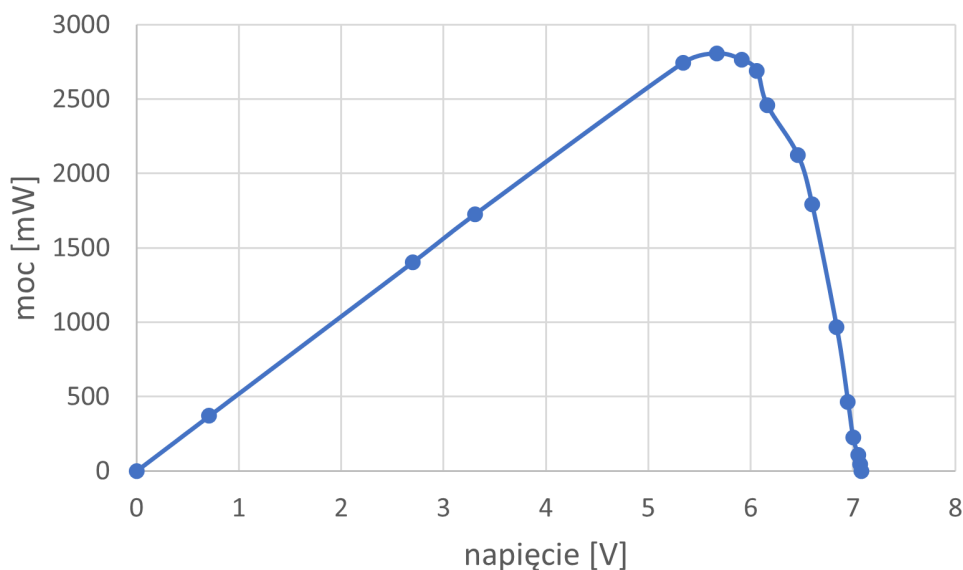


Rysunek 2.2 Charakterystyka prądowo–napięciowa ogniwa słonecznego

2.6 Wyznaczenie charakterystyki mocy

Posiadając wartości prądów i napięć można obliczyć moc wydzieloną na obciążeniu, korzystając z (2.2), gdzie U to napięcia ogniwa, a I to prąd przepływający przez obciążenie. Obliczenia przeprowadzono dla każdej pary danych prąd–napięcie, a wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 2.3).

$$P = U \cdot I \quad (2.2)$$



Rysunek 2.3 Charakterystyka mocy w zależności od napięcia ogniwa

Z charakterystyki wynika, że moc wzrasta liniowo wraz z napięciem praktycznie do momentu osiągnięcia punktu maksymalnej mocy, a następnie występuje jej nagły spadek. W celu generowania maksymalnej możliwej mocy dla danych warunków świetlnych stosuje się układy elektroniczne z funkcją MPPT (Maximum Power Point Tracking), czyli śledzenia punktu maksymalnej mocy. Ich działanie polega na odpowiednim obciążaniu ogniwa słonecznych. Układ jest częścią inwertera.

2.7 Wyznaczenie parametrów ogniwa

Na podstawie utworzonych charakterystyk można wyznaczyć parametry mierzonego ogniwa dla danych warunków, w których pomiary były wykonywane. Wartość prądu zwarcioowego wynosi około 520 mA, a napięcie obwodu otwartego 7.05V. Oszacowano wartości prądu i napięcia dla punktu mocy maksymalnej, które wynoszą odpowiednio 490mA i 5.7V. Współczynnik wypełnienia charakterystyki jest zdefiniowany jako

$$FF = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}, \quad (2.3)$$

gdzie:

I_{max} = prąd w punkcie mocy maksymalnej [A],

V_{max} = napięcie w punkcie mocy maksymalnej [V],

I_{SC} = prąd zwarcioowy [A],

V_{OC} = napięcie w układzie otwartym [V].

Określa on stosunek mocy maksymalnej (dla MPP) do mocy teoretycznej w układzie zwartym i rozwartym [15]. Obliczono jego wartość, która wynosi około 0.76. Sprawność ogniwa dla warunków rzeczywistych wyraża się jako

$$\eta = \frac{P_N}{M_e \cdot A} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

gdzie:

P_N = moc znamionowa ogniwa [W],

M_e = moc promieniowania słonecznego [W/m^2],

A = powierzchnia ogniwa [m^2].

Nie jest możliwe obliczenie tej wartości, gdyż w układzie nie zastosowano czujnika mocy promieniowania słonecznego, natomiast można ją przedstawić w zależności od parametru jako

$$\eta = \frac{157.126}{M_e} \cdot 100\%. \quad (2.5)$$

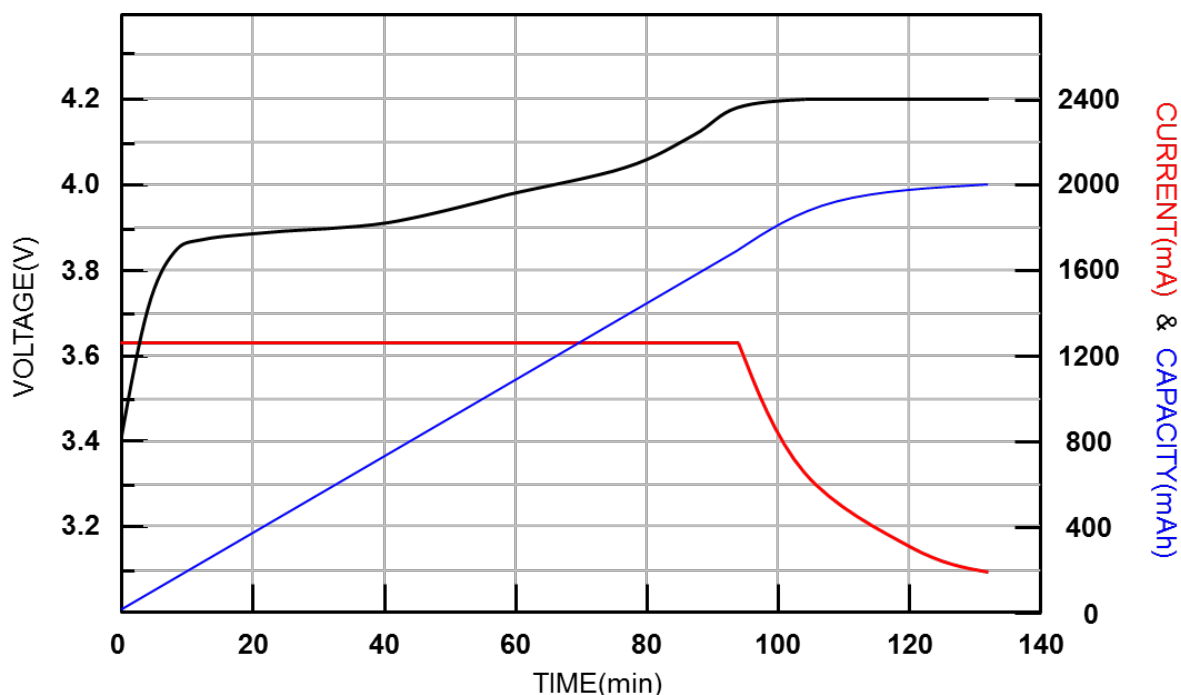
Rozdział 3

Akumulatory litowo–polimerowe

Akumulator jest urządzeniem, które magazynuje energię elektryczną i może być ładowane w przeciwieństwie do baterii. Na rynku istnieje wiele różnych rodzajów akumulatorów, każde z nich różni się od siebie właściwościami i budową. Jednymi z najbardziej popularnych są akumulatory litowe. Energia jest w nich gromadzona na zasadzie ruchu jonów litu w elektrolicie pomiędzy anodą a katodą [16]. Pierwsze akumulatory litowe (litowo–jonowe) posiadały ciekły elektrolit. Pojawiły się na rynku w 1991 roku i służyły do zasilania kamer firmy Sony [16]. Zastąpienie elektrolitu ciekłego elektrolitem stałym spowodowało powstanie akumulatorów litowo–polimerowych, które są wariantem akumulatorów litowo–jonowych. Zastosowanie takiego rozwiązania zwiększyło bezpieczeństwo użytkownika i stabilność termiczną, gdyż elektrolit stały stanowi barierę oddzielającą elektrody od siebie i zapobiega nadmiernej emisji ciepła [21]. Pozwoliło to też na produkcję akumulatorów o praktycznie dowolnych kształtach. Najczęściej spotykane są ogniwa w wersji cylindrycznej (oznaczane jako 18650) lub o płaskim, prostokątnym kształcie. Przy wyborze akumulatora litowo–polimerowego i jego eksploatacji należy kierować się parametrami. Jednym z najważniejszych jest napięcie akumulatora. Należy je dobrać w zależności od przyłożonego obciążenia. Kolejnym ważnym parametrem jest pojemność, która określa czas, przez jaki możliwe jest pobieranie prądu z akumulatora. Podawana jest najczęściej w miliamperogodzinach (mAh). Podczas ładowania nie należy przekraczać maksymalnego prądu ładowania podawanego przez producenta w postaci parametru C. Jest on związany z pojemnością akumulatora i określa jego wydajność prądową. Gdyby dla akumulatora o pojemności 2000mAh wartość maksymalnego prądu ładowania wynosiła 2C, to największy prąd jakim można go ładować wynosi 4A. W takiej samej postaci podawany jest maksymalny prąd rozładowania, który określa maksymalny możliwy prąd pobierany z akumulatora podczas pracy. Akumulator może składać się z jednego ogniwa lub z ogniw połączonych ze sobą. Napięcie znamionowe pojedynczego ogniwa wynosi 3.7V. W celu zwiększenia napięcia całego pakietu stosuje się połączenie szeregowo. Dwa takie ogniwa połączone szeregowo pozwalają na otrzymanie akumulatora o napięciu znamionowym 7.4V, który oznacza się jako 2S. Maksymalną pojemność można zwiększyć łącząc ze sobą ogniwa równolegle. Połączenie trzech ogniw o pojemności 1000mAh pozwala na otrzymanie pakietu o pojemności 3000mAh, który oznacza się jako 3P. Spotyka się także połączenie mieszane, co jednocześnie zwiększa napięcie i pojemność akumulatora.

3.1 Proces ładowania

Ładowanie akumulatorów litowo-polimerowych jest realizowane za pomocą specjalnych ładowarek. Standardową metodą ładowania jest metoda CCCV (constant current constant voltage), która składa się z dwóch faz [16]. W pierwszej fazie akumulator jest ładowany prądem o niezmiennej wartości, aż do momentu osiągnięcia napięcia 4.2V na ogniwie. Następnie napięcie jest utrzymywane na stałym poziomie, a prąd ładowania samoczynnie maleje. Proces kończy się, gdy wartość tego prądu spadnie poniżej pewnej wartości. Krzywe ładowania są przedstawione na wykresie (rys. 3.1).



Rysunek 3.1 Charakterystyka ładowania akumulatora jonowego [10]

Z powyższego wykresu wynika, że po osiągnięciu napięcia końcowego (4.2V) na ogniwie, akumulator nie jest w pełni naładowany. Proces ładowania należy kontynuować. Zostanie on automatycznie zakończony przez ładowarkę. Przekroczenie maksymalnego dopuszczalnego prądu ładowania podawanego przez producenta może spowodować uszkodzenie ogniwa. W przypadku akumulatorów składających się z kilku ogniw połączonych szeregowo, podczas ładowania wykorzystuje się układ zwany balanserem, który zapewnia, że wartość napięcia na każdym ogniwie po naładowaniu będzie taka sama. Ogniwo nie powinno się rozładowywać do napięcia poniżej 2.5V. Może to spowodować nieodwracalną utratę pojemności [16]. Akumulatory litowo-polimerowe mogą być wyposażone w układ zabezpieczający PCM, który chroni przed nadmiernym rozładowaniem, przeładowaniem i zwarcie.

3.2 Inne rodzaje akumulatorów

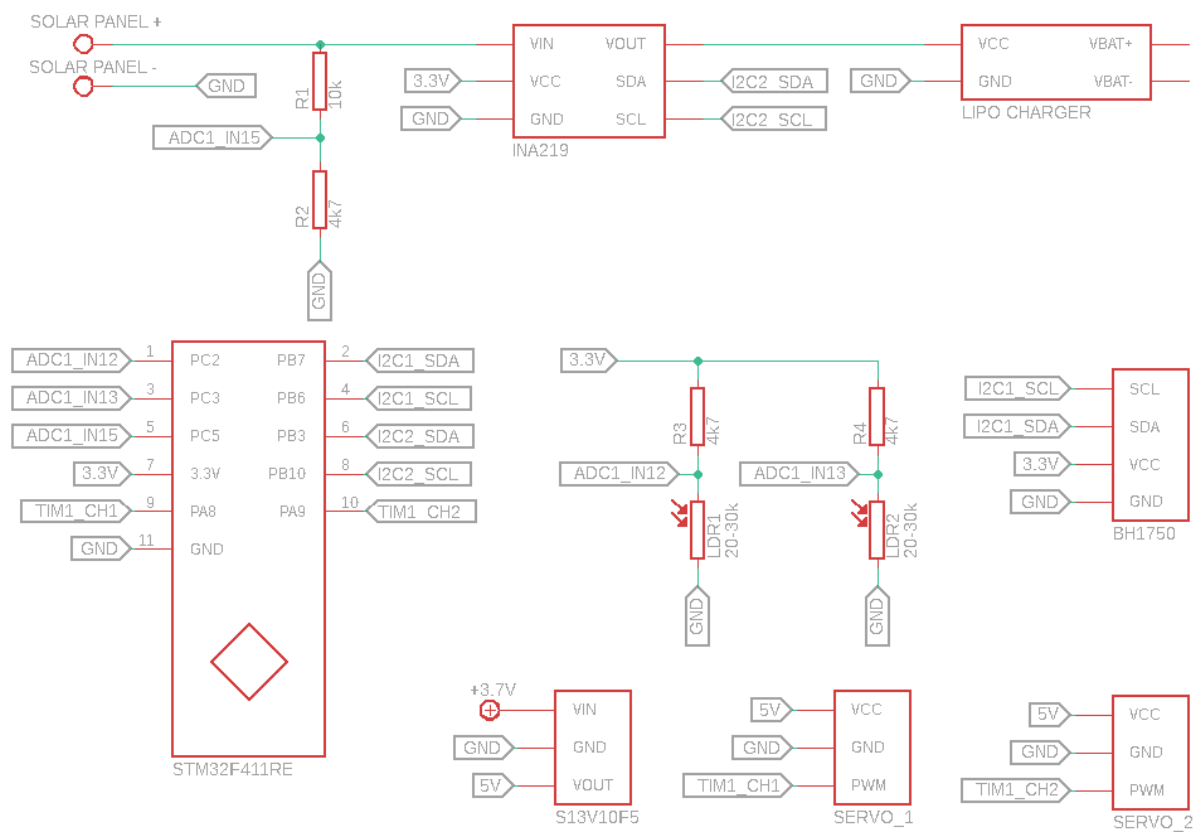
Oprócz akumulatorów litowo-jonowych i litowo-polimerowych często stosuje się akumulatory kwasowo-ołowiowe, które skonstruowano w 1859 roku [9]. Anodę stanowi ołów, natomiast katodę dwutlenek ołowiu. Obie elektrody są zanurzone w roztworze kwasu siarkowego, którego gęstość zmienia się w miarę rozładowywania akumulatora. Tę cechę

wykorzystuje się do określenia stopnia jego naładowania. Najczęściej stosowane są w motoryzacji. Odmianą tych akumulatorów są akumulatory żelowe, gdzie elektrolitem jest kwas siarkowy w formie żelu. Eliminuje to możliwość wypłynięcia elektrolitu i potrzebę jego uzupełniania. Dawniej popularne były akumulatory niklowo-kadmowe. Powstały w 1899 roku [9]. Katodą jest wodorotlenek niklu, a anodą mieszanina kadmu i żelaza. Charakteryzuje je długa żywotność, duża wydajność prądowa i niska awaryjność. Muszą być jednak ładowane i rozładowywane do końca, inaczej utracą część swojej pojemności (tzw. efekt pamięci). Można go ograniczyć wykorzystując do ich ładowania duży prąd (np. rzędu 3C), co powoduje jednak nagrzewanie się akumulatora. Obecnie zostały wyparte przez inne rodzaje akumulatorów ze względu na efekt pamięci oraz stosowanie kadmu, który jest szkodliwy dla środowiska. Zastąpiły je podobne pod względem konstrukcyjnym akumulatory wodorkowe. Katodą jest wodorotlenek niklu, a anodą stop metaliczny [9]. Charakteryzują się większą pojemnością od akumulatorów niklowo-kadmowych i nie posiadają efektu pamięci. Do wad należy stosunkowo szybkie samorozładowanie. Kolejnym rodzajem są akumulatory wysokotemperaturowe. Ogniwa te pracują w temperaturze przewyższającej temperaturę otoczenia [9]. Cechują się niskimi kosztami produkcji, ze względu na użycie tanich surowców (głównie sodu i litu) i dużą żywotnością (do 1500 cykli ładowanie–rozładowanie). Wadą natomiast jest wysoka temperatura pracy i potrzeba zapewnienia dodatkowego bezpieczeństwa, ze względu na stosowanie bardzo aktywnych chemicznie substancji. Jednymi z najnowszych rozwiązań są akumulatory litowo–żelazowo–fosforanowe. Charakteryzują się bardzo dużą pojemnością maksymalną (powyżej 100Ah) i szybkim ładowaniem, ze względu na tolerowanie wysokich wartości prądu ładowania. Dzięki temu mogą być stosowane w autach z napędem elektrycznym. Dodatkowo utrata pojemności wraz ze wzrostem cykli ładowania jest stosunkowo mała. Do wad należy wysoka cena tego rozwiązania.

Rozdział 4

Projekt elektroniki

Schemat połączeń elektrycznych między elementami układu został przedstawiony na rysunku 4.1. Wykorzystano mikrokontroler, ogniwo słoneczne, czujnik prądu, czujnik natężenia światła, fotorezystory, serwomechanizmy, przetwornicę step-up/step-down, moduł ładowarki akumulatorów litowo-polimerowych oraz rezystory tworzące dzielnik napięcia, wykorzystywany do pomiaru napięcia ogniwa słonecznego oraz pośredniego pomiaru natężenia światła w układzie z fotorezystorem.



Rysunek 4.1 Schemat połączeń elektrycznych

4.1 Ogniwo słoneczne

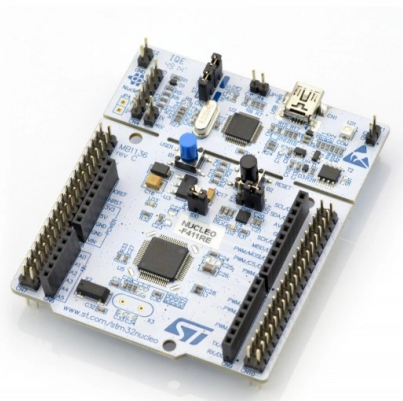
W projekcie zostało wykorzystane ogniwo słoneczne (rys. 4.2) o napięciu wyjściowym 6V i mocy 3.5W. Zastosowanie elementu o takich parametrach powoduje, że akumulator jest ładowany maksymalnym prądem (prąd ten został ograniczony do 200mA) nawet przy zachmurzonym niebie. Małe rozmiary i waga ogniwa pozwalają na umieszczenie go w uchwycie na platformie i zmianę jego położenia. Do zacisków zostały przylutowane szeregowo połączone rezystory R1 i R2 tworzące dzielnik napięcia, co umożliwiło pomiar napięcia ogniwa poprzez ADC mikrokontrolera, gdyż maksymalne napięcie możliwe do zmierzenia to 3.3V. Ich rezystancja jest na tyle duża, że płynący przez dzielnik napięcia prąd jest znikomy (nieprzekraczający 0.5mA) i nie wpływa na działanie pozostałej części systemu.



Rysunek 4.2 Ogniwo słoneczne [1]

4.2 Mikrokontroler

Za działanie całego układu odpowiada mikrokontroler STM32F411RET6 (rys. 4.3), umieszczony na płytce deweloperskiej NUCLEO-F411RE. Jest oparty na rdzeniu ARM Cortex M4 i zapewnia wystarczającą wydajność do sterowania systemem. Wykorzystano różne peryferia układu: liczniki (generowanie przerwań i sygnału PWM), przetwornik analogowo-cyfrowy (pomiar napięć) i skonfigurowano interfejs I²C oraz UART do komunikacji z czujnikami i aplikacją monitorująco-sterującą. Zdecydowano się na układ firmy STM ze względu na wcześniejsze wykorzystywanie mikroprocesorów tego producenta do realizacji projektów, co przekłada się na znajomość obsługi urządzenia i środowiska programistycznego STM32CubeIDE, które oferuje graficzny interfejs umożliwiający konfigurację pinów mikrokontrolera, edytor kodu i debugger. Dodatkowo, programowanie układu odbywa się za pomocą wbudowanego programatora ST-LINK/V2, dzięki czemu do przesłania oprogramowania wystarczy podłączenie układu do gniazda USB komputera.



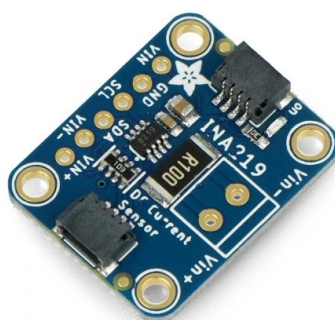
Rysunek 4.3 Mikrokontroler [2]

4.3 Czujniki

Czujniki stanowią nieodłączną część systemu. Pozwalają na monitorowanie jego działania, pomiar charakterystyk i realizowanie śledzenia położenia słońca.

4.3.1 Czujnik prądu

Do pomiaru prądu służy czujnik (rys. 4.4) oparty na układzie INA219, wyprodukowany przez firmę Adafruit. Komunikacja z mikrokontrolerem przebiega poprzez interfejs I²C. Jego działanie polega na pomiarze spadku napięcia na rezystorze bocznikującym i obliczaniu prądu płynącego w układzie na podstawie prawa Ohma. Układ ten po odpowiedniej konfiguracji zapewnia pomiar wartości prądu z dokładnością do 1%, co pozwala na gromadzenie wiarygodnych danych. Jest ważnym elementem projektu, a jego wykorzystanie pozwoliło na pomiar i analizę charakterystyk pracy ogniwa fotowoltaicznego.



Rysunek 4.4 Czujnik prądu [3]

4.3.2 Czujnik natężenia światła

Wartość natężenia światła jest mierzona przez czujnik BH1750 (rys. 4.5). Komunikacja z mikrokontrolerem przebiega poprzez interfejs I²C. Czujnik został skonfigurowany tak, aby mierzył natężenie światła z zakresu 1 – 121556 lx. Pozwala to na pokrycie praktycznie całego zakresu natężenia światła słonecznego. Podczas bezchmurnego, słonecznego dnia,

kiedy pomiary przeprowadzano w okresie letnim, zakres ten nie był wystarczający. Taka sytuacja ma miejsce jednak rzadko i przez większość czasu działania układu nie występuje. Ze względu na liniowość charakterystyki (rys. 2.1), wartość natężenia światła powyżej zakresu pomiarowego można wyznaczyć przekształcając (2.1).



Rysunek 4.5 Czujnik natężenia światła [4]

4.3.3 Fotorezystory

Fotorezystor zmienia swoją rezystancję w zależności od natężenia światła. Wykorzystano dwa fotorezystory o rezystancji z zakresu 20–30k Ω (rys. 4.6), każdy z nich został połączony szeregowo z rezystorem o oporze 4.7k Ω , aby możliwe było zmierzenie napięcia poprzez ADC mikrokontrolera z wykorzystaniem dzielnika napięcia. Za ich pomocą zostało zrealizowane śledzenie położenia słońca.



Rysunek 4.6 Fotorezystory [5]

4.4 Moduł ładowarki akumulatorów litowych

Ładowanie akumulatora litowo-polimerowego realizuje moduł Lipo Charger firmy DFRobot (rys. 4.7), oparty na układzie TP4056. Zdecydowano się na wybór tego modułu, gdyż wykorzystuje standardową metodę ładowania CCCV i umożliwia wybór jednego z trzech poziomów prądu ładowania ogniwa: 50mA, 200mA lub 500mA. Na podstawie analizy charakterystyki prądowo-napięciowej (rys. 2.2), prąd ten został ograniczony do 200mA, aby nie występował znaczny spadek napięcia na ogniwie przy zachmurzonym niebie. Proces

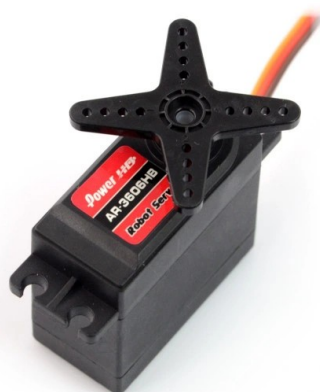
ładowania kończy się, kiedy wartość prądu ładowania spadnie poniżej jednej dziesiątej wartości początkowej.



Rysunek 4.7 Moduł ładowarki [6]

4.5 Serwomechanizmy

Położenie ogniwa może być zmieniane dzięki dwóm serwomechanizmom PowerHD AR-3606HB (rys. 4.8). Jeden z nich odpowiada za obrót platformy, a drugi za kąt nachylenia ogniwa. Prędkość obrotowa jest zmieniana za pomocą wypełnienia sygnału PWM. Zastosowane serwomechanizmy posiadają duży moment obrotowy, co pozwala na rotację całej platformy z ustaloną, małą prędkością. Są przystosowane do montażu za pomocą śrub. Producent dostarcza zestaw nakładek o różnych kształtach, które zostały wykorzystane do przytwierdzenia wałów serwomechanizmów do odpowiednich elementów konstrukcji mechanicznej.

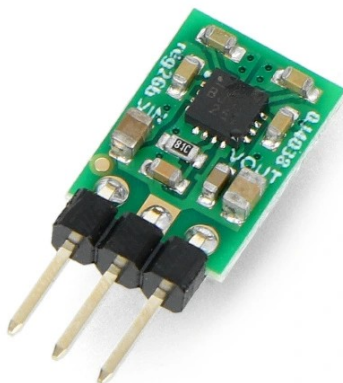


Rysunek 4.8 Serwomechanizm [7]

4.6 Zasilanie

Do działania układu wymagane są zewnętrzne źródła zasilania. Zestaw startowy z mikrokontrolerem jest zasilany napięciem 5V pochodzącym z gniazda USB, co umożliwia także programowanie układu. Źródłem zasilania czujnika prądu i natężenia światła jest złącze mikrokontrolera dostarczające napięcie 3.3V. Do tego samego złącza podłączono foto-

rezystory. Do zasilania serwomechanizmów wykorzystano akumulator litowo-polimerowy o napięciu 3.7V oraz przetwornicę step-up/step-down S13V10F5 firmy Pololu (rys. 4.9), która podnosi to napięcie do wartości 5V.



Rysunek 4.9 Przetwornica step-up/step-down [8]

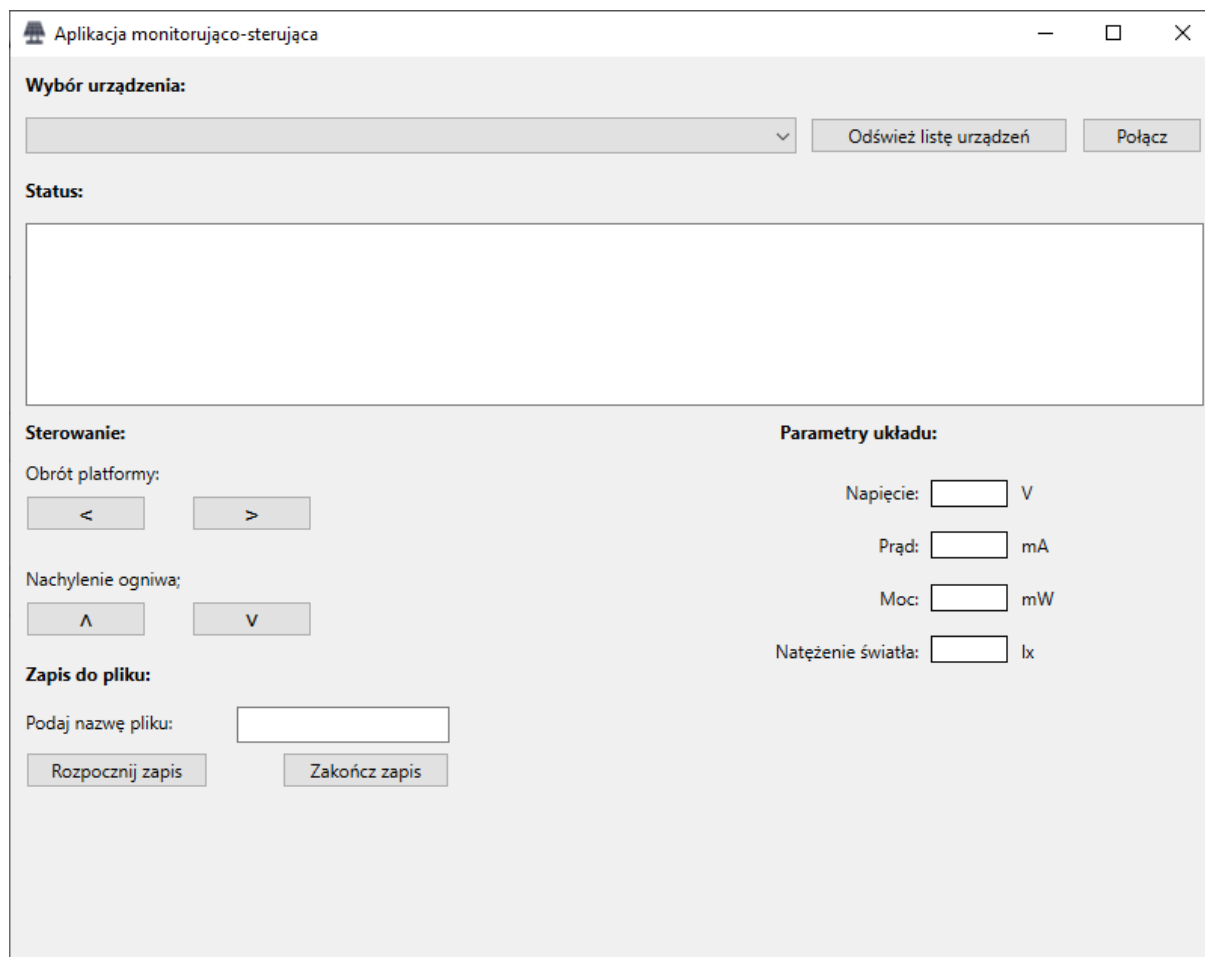
Rozdział 5

Sterownik

Sterownik odpowiada za prawidłową pracę całego systemu. Składa się z dedykowanej aplikacji i oprogramowania mikrokontrolera. Każdy z elementów systemu został omówiony osobno. W przypadku aplikacji komputerowej skupiono się na wizualizacji danych pomiarowych oraz możliwości ręcznego sterowania serwomechanizmami. Drugi z elementów jakim jest oprogramowanie mikrokontrolera różni się znacząco od aplikacji komputerowej. Ze względu na ograniczone zasoby mikrokontrolera, oprogramowanie wbudowane nie przewiduje bezpośredniej wizualizacji wyników. Główną rolą aplikacji systemu wbudowanego jest odczytywanie danych z czujników, wysyłanie ich do aplikacji oraz zarządzanie ruchem serwomechanizmów.

5.1 Aplikacja monitorująco–sterująca

Aplikacja monitorująco–sterująca posiada graficzny interfejs użytkownika, który przedstawiono na rysunku 5.1. Umożliwia monitorowanie działania systemu, sterowanie serwomechanizmami i zapis danych sensorycznych do pliku tekstowego. Aplikację zaprojektowano przy pomocy środowiska Qt Creator. Jej działanie opiera się na funkcjach zwanych sygnałami i slotami – określona akcja zdefiniowana w slotcie wykonuje się po wystąpieniu konkretnego zdarzenia zdefiniowanego w sygnale. Umożliwia to np. realizację danego zadania po naciśnięciu przycisku. Korzystając z dostępnych bibliotek zaimplementowano funkcjonalności, które wspomagają pozyskiwanie energii z promieniowania słonecznego. Aplikacja została przystosowana do łączenia się z wybranym przez użytkownika, dostępnym mikrokontrolerem poprzez port szeregowy. W tym celu należy nacisnąć przycisk *Odśwież listę urządzeń*, wybrać urządzenie z listy, a następnie skorzystać z przycisku *Połącz*, aby nawiązać łączność. Została zastosowana dwustronna komunikacja – możliwe jest odbieranie, jak i wysyłanie danych przez aplikację. Po połączeniu aplikacja oczekuje na ramkę danych wysyłaną przez mikrokontroler co 0.5 sekundy, która zawiera wartość napięcia na zaciskach ogniwa, prądu płynącego przez obciążenia i natężenia światła. Aplikacja odpowiednio przetwarza odebrany ciąg znaków, aby otrzymać użyteczne wartości, które pojawiają się w polach tekstowych. Moc obliczana jest z (2.2). Transmisja danych do mikrokontrolera następuje w momencie przytrzymania i zwolnienia jednego z przycisków przeznaczonych do sterowania kierunkiem obrotu serwomechanizmów. Dane przysyłane są w postaci ramki danych zawierającej dwa bajty (jeden bajt odpowiada za ruch jednego serwa), każdy z nich może przyjąć wartość 0, 1 lub 2. Są one interpretowane przez mikrokontroler, co wywołuje określoną reakcję. Aplikacja umożliwia zapis danych sensorycznych do pliku tekstowego o wybranej przez użytkownika nazwie, w następującym



Rysunek 5.1 Aplikacja monitorująco-sterująca

formacie: 'data'; 'napięcie'; 'prąd'; 'natężenie światła'. Zawartość wygenerowanego przez aplikację pliku przedstawiono poniżej:

```

1 14.12.2022 14:34:10; 0.22; 35.1; 6643
2 14.12.2022 14:34:10; 0.24; 35.1; 6643
3 14.12.2022 14:34:11; 0.22; 35.0; 6643
4 14.12.2022 14:34:11; 0.23; 35.2; 6643
5 14.12.2022 14:34:12; 0.35; 35.2; 6645
6 14.12.2022 14:34:12; 0.22; 35.3; 6645
7 14.12.2022 14:34:13; 0.22; 35.2; 6645
8 14.12.2022 14:34:13; 0.22; 35.1; 6645
9 14.12.2022 14:34:14; 0.23; 35.2; 6647

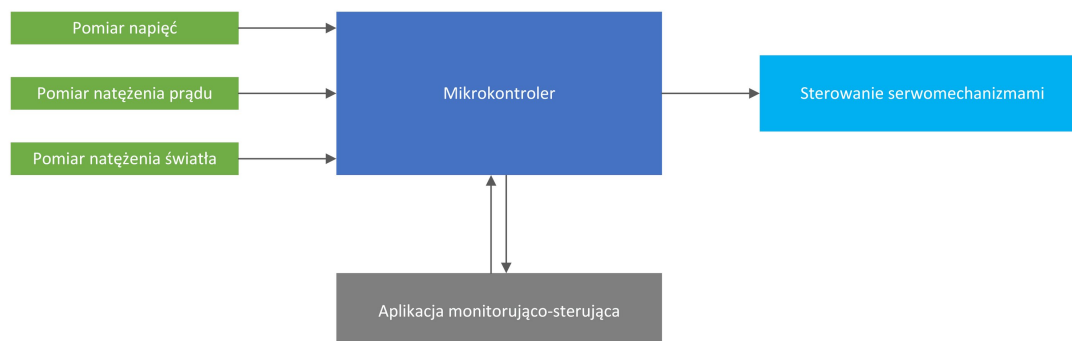
```

Dzięki tej funkcjonalności wykonano pomiar charakterystyk pracy ogniwa. Pole tekstowe znajdujące się pod napisem *Status* służy do wyświetlania komunikatów, takich jak informacja o udanym połączeniu z urządzeniem i rozpoczęciu oraz zakończeniu zapisu do pliku.

5.2 Oprogramowanie mikrokontrolera

Oprogramowanie mikrokontrolera zostało wytworzone w środowisku STM32CubeIDE. Wykorzystano język C, który jest jednym z najbardziej popularnych języków wykorzystywanych do programowania mikrokontrolerów [14]. Skorzystano z biblioteki HAL (*Hardwa-*

re *Abstraction Layer*), która zawiera gotowe funkcje ułatwiające implementację funkcjonalności. Mikrokontroler realizuje następujące zadania: sterowanie serwomechanizmami, odbiór danych z czujnika prądu i natężenia światła, pomiar napięcia na zaciskach ogniwa i wyprowadzeniach fotorezystorów, dwustronna komunikacja z aplikacją monitorująco-sterującą oraz realizowanie algorytmu śledzenia położenia słońca. Diagram przepływu danych przedstawiono na rysunku 5.2.



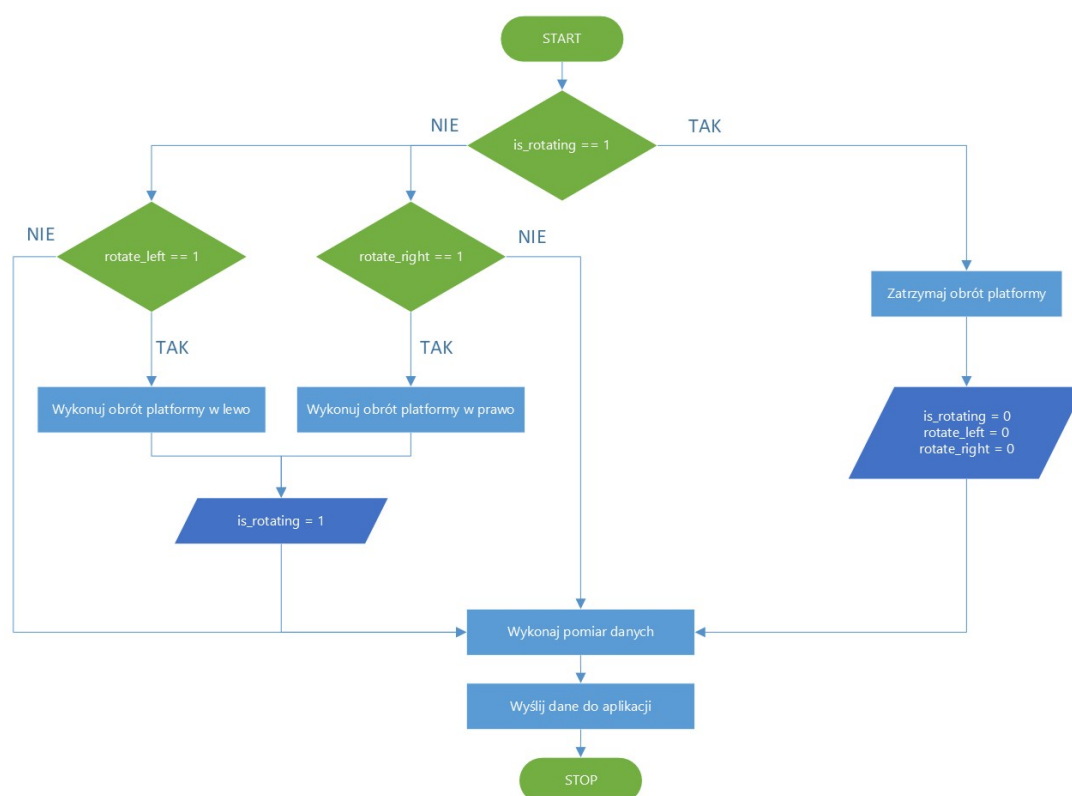
Rysunek 5.2 Diagram przepływu danych

Do pomiaru napięć wykorzystano przetwornik analogowo-cyfrowy (z ang. *ADC* – *analog to digital converter*), który wynik pomiaru zwraca w postaci liczby całkowitej z określonego przedziału zależnego od rozdzielczości przetwornika [12]. Zastosowano rozdzielczość 12 bitów w celu otrzymania największej możliwej dokładności wskazań. ADC skonfigurowano w trybie DMA (z ang. *Direct Memory Access*), aby cały proces przebiegał bez udziału procesora. Uruchomiono trzy kanały przetwornika w celu wykonywania pomiarów trzech różnych napięć. Do komunikacji z aplikacją wykorzystano interfejs szeregowy UART (z ang. *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), który wykorzystuje dwie linie oznaczane często jako RXD (odbieranie danych) oraz TXD (wysyłanie danych) [11]. Transmisję informacji do aplikacji zrealizowano za pomocą przekierowania wyjścia funkcji `printf()` [13]. W tym celu zdefiniowano funkcję `_write()` jak poniżej.

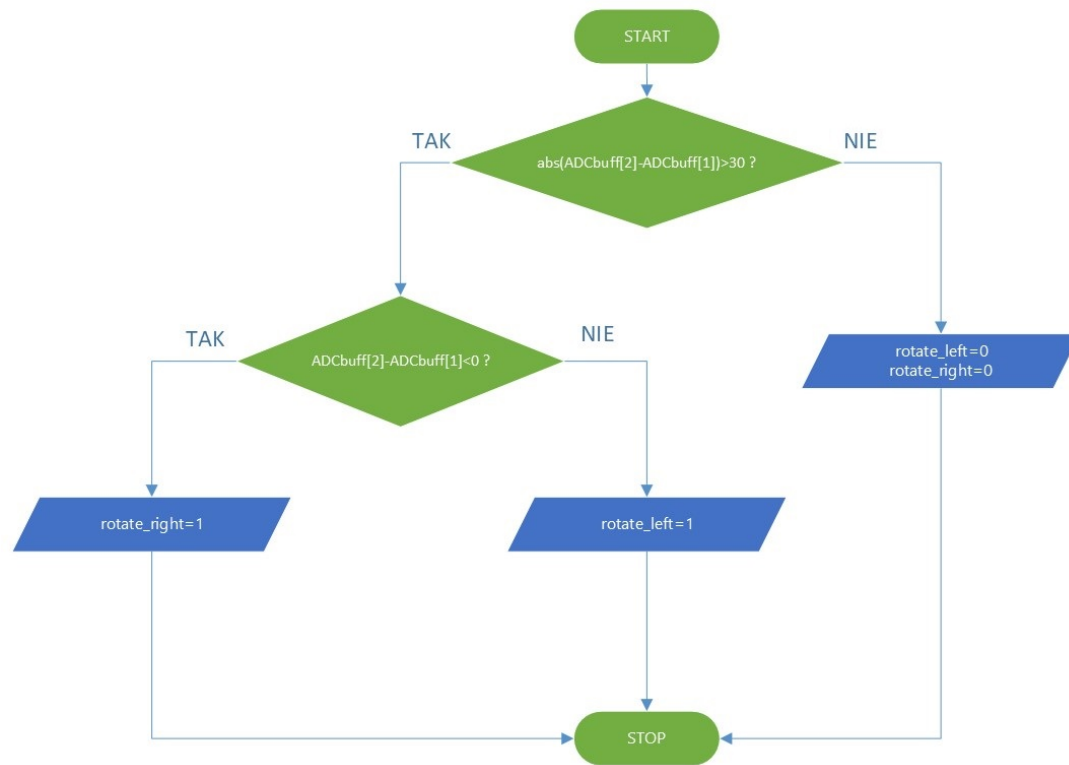
```
1 int _write(int file, char *ptr, int len)
2 {
3     HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)ptr, len, 50);
4     return len;
5 }
```

Powoduje to, że dane sensoryczne wysyłane są w postaci ciągu znaków. Wymaga to jedynie utworzenia ramki danych, co zrealizowano za pomocą funkcji `snprintf()`. Oprócz tego skonfigurowano interfejs I²C oraz zaimplementowano funkcje umożliwiające komunikację z czujnikami. Jest to także interfejs szeregowy, który do komunikacji wykorzystuje linię zegarową (SCL) i linię danych (SDA). Dane są odczytywane z odpowiednich rejestrów pamięci czujników, a następnie przetwarzane zgodnie z dokumentacją techniczną, aby otrzymać wartości w określonych jednostkach. Uruchomiono trzy liczniki. TIM1 (dwukanałowy) generuje sygnał PWM (z ang. *Pulse Width Modulation*) o częstotliwości 50 Hz do sterowania serwomechanizmami. Zmiana prędkości obrotowej jest możliwa poprzez przypisywanie odpowiednich wartości do rejestru CCR timera, zawierającego informację o wypełnieniu sygnału PWM. Jego wartość mieści się w zakresie 1–2ms. Serwomechanizmy obracają się z bardzo małą prędkością, aby możliwe było precyzyjne sterowanie położeniem ogniwa słonecznego. Moment obrotowy jest wystarczający do zrealizowania przemieszczenia ogniwa. Pozostałe dwa liczniki zostały skonfigurowane tak, aby genero-

wały przzerwania. Jest to mechanizm pozwalający na wykonywanie się kodu w funkcji zwrotnej z określoną częstotliwością po otrzymaniu sygnału od peryferium mikrokontrolera, w tym przypadku jest to przepełnienie licznika [12]. TIM2 generuje przerwanie co 0.5 sekundy. W obsłudze przzerwania dla tego licznika wywoływana jest funkcja realizująca odczyt wartości z czujnika prądu i natężenia światła oraz wysyłająca dane pomiarowe do aplikacji. Zastosowano trzy flagi, które pozwalają na określony ruch serwomechanizmu odpowiedzialnego za obrót platformy (w wyniku działania algorytmu śledzenia położenia Słońca). Uruchomiony serwomechanizm zatrzymywany jest po wygenerowaniu następnego przzerwania przez licznik, zatem obrót trwa 0.5 sekundy. Schemat blokowy obsługi przzerwania od tego licznika przedstawiono na rys. 5.4. TIM3 generuje przerwanie co 30 sekund. W obsłudze przzerwania zaimplementowano algorytm śledzenia położenia Słońca. Algorytm ten działa w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego. Co 30 sekund porównywane są wartości zwracane przez ADC, związane z napięciami na zaciskach fotorezystorów. Jeżeli moduł ich różnicy jest większy niż wartość ustawionej histerezy, zmienia się wartość jednej z flag definiujących kierunek obrotu serwomechanizmu i wykonywany jest obrót. Kierunek ten zależy od tego, czy ta różnica jest dodatnia, czy ujemna. Wartość histerezy została dobrana eksperymentalnie. Platforma nie wykonuje nieoczekiwanych ruchów spowodowanych błędami pomiarowymi. Schemat blokowy obsługi przzerwania od tego licznika przedstawiono na rys. 5.3. W pętli głównej programu realizowany jest ruch serwomechanizmów spowodowany otrzymaniem sygnału z aplikacji. Odbierane dane zapisywane są do dwuelementowej tablicy. Wartość 0 oznacza zatrzymanie serwomechanizmu, natomiast wartości 1 i 2 ruch w określonym kierunku.



Rysunek 5.3 Schemat blokowy obsługi przzerwania dla TIM2

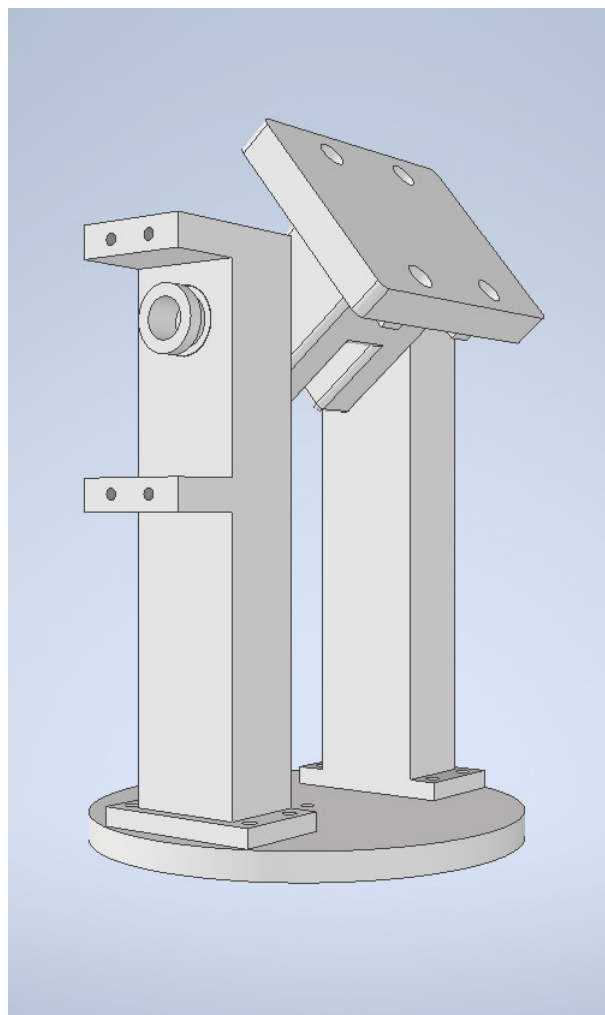


Rysunek 5.4 Schemat blokowy obsługi przerwania dla TIM3

Rozdział 6

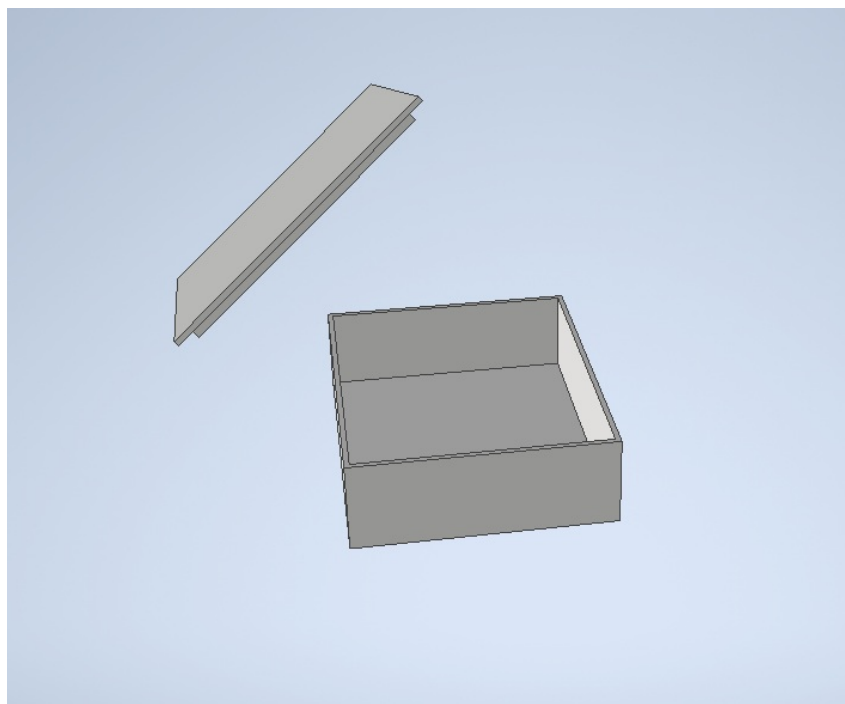
Konstrukcja mechaniczna

Częścią projektu jest konstrukcja mechaniczna, która pozwala na umieszczenie ogniwa słonecznego w uchwycie. Do jej wykonania wykorzystano technologię druku 3D ze względu na możliwość wytworzenia elementów o praktycznie dowolnych kształtach. W środowisku Inventor zaprojektowano elementy konstrukcji oraz połączono je ze sobą. Wykonano symulację ruchu w celu weryfikacji poprawności modelu. Złożenie przedstawiono na rysunku 6.1.



Rysunek 6.1 Projekt platformy

Elementy zostały wykonane z tworzywa sztucznego PLA z wykorzystaniem druku 3D. Jest to metoda wytwarzania trójwymiarowych elementów na podstawie zaprojektowanego modelu. Przed umieszczeniem na platformie ogniwo zostało odpowiednio przygotowane. Do jego środka przyklejono za pomocą kleju dwuskładnikowego zaprojektowaną płytkę, wcześniej umieszczając w otworach osadzone na stałe śruby. Umożliwia to przykręcenie całości do uchwytu i łatwy demontaż ogniwa. Fotorezystory umieszczono na płytkach (podobnie jak czujnik natężenia światła). Zostały odchylone, aby zwiększyć różnicę między wskazaniami podczas względnego ruchu Słońca. Do zacisków ogniwa przylutowano dwa rezystory tworzące dzielnik napięcia w celu pośredniego pomiaru natężenia światła za pomocą napięcia odkładanego na owym dzielniku. Zastosowano przewody wyjściowe o średnicy 1.5mm, aby nie występował na nich zauważalny spadek napięcia. Uchwyt jest utrzymywany przez ramiona za pomocą dwóch tulei. Na jednym z nich umieszczono serwomechanizm. Do połączenia wału z uchwytem wykorzystano zaprojektowaną zaślepkę, do której przyklejono zmodyfikowaną nakładkę dostarczoną przez producenta. Całość umieszczono wewnątrz tulei, co umożliwiło zmianę kąta nachylenia ogniwa. Ramiona przykręcono do podstawy w kształcie koła. Serwomechanizm realizujący obrót platformy przytwierdzono do drewnianej podstawy za pomocą śrub i tulei dystansowych. Podczas testów obrotu platformy okazało się, że konstrukcja podczas rotacji staje się niestabilna. Zdecydowano się na użycie metalowej tulei, na której umieszczono pierścień z kulkami łożyskowymi. Ograniczyło to drgania platformy, gdyż obraca się ona po elementach tocznych. Przewody poprowadzono wzdłuż ramion, a elektronikę umieszczono w obudowie (rys. 6.2).



Rysunek 6.2 Obudowa na elektronikę

Konstrukcję mechaniczną po złożeniu przedstawiono na rysunku 6.3.



Rysunek 6.3 Konstrukcja mechaniczna

Po wydrukowaniu elementów okazało się, że różnią się one od zaprojektowanych, ze względu na niedokładność drukarki 3D. Należało je odpowiednio dostosować, aby możliwe było złożenie konstrukcji mechanicznej. Ramiona konstrukcji poddano obróbce w celu zmniejszenia luzu w otworach, który okazał się zbyt mały do prawidłowej zmiany kąta nachylenia ogniwa. Konieczne okazało się także przewiercenie otworów w podstawie i uchwycie, aby możliwe było umieszczenie w nich śrub. Wykonano także otwory na przewody. Finalnie złożona i przetestowana konstrukcja działa prawidłowo.

Rozdział 7

Podsumowanie

Celem pracy było wykorzystanie mikrokontrolera w układzie pozyskującym energię z promieniowania słonecznego, służącym do ładowania akumulatorów litowo-polimerowych. Założenia zostały wypełnione. Zastosowanie jednostki sterującej pozwoliło na automatyczną zmianę położenia ogniwa słonecznego, co przekłada się na możliwość generowania większej mocy. Największą wydajność można uzyskać kierując ogniwo w stronę Słońca. W takim położeniu wartość generowanego prądu to 31mA. Dla platformy obróconej o kąt 30° wartość ta spadła do 28mA. Po obrocie o 60° płynący prąd był jeszcze mniejszy i wynosił 24mA, zatem wydajność jest ściśle zależna od kąta, pod jakim promienie słoneczne padają na ogniwo. Sterownik realizuje automatyczny obrót platformy, aby zminimalizować ten kąt, zatem jego zastosowanie jest bardziej efektywne od ogniwa o niezmiennym położeniu. W ramach projektu utworzono układ składający się z komponentów elektronicznych, mechanicznych oraz oprogramowania. Wykorzystano mikrokontroler, który zarządza pracą systemu. Wytworzono oprogramowanie wspomagające pozyskiwanie energii – zaimplementowano funkcje umożliwiające odczyt danych z czujników, wysyłanie i odbieranie informacji oraz sterowanie serwomechanizmami. Wykorzystano mechanizm przerwań, liczniki, ADC, DMA oraz skonfigurowano interfejsy UART i I²C. Elementy elektroniczne połączono przewodami zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 4.1. Zaprojektowano oraz wydrukowano elementy, które wykorzystano do wykonania konstrukcji mechanicznej. Połączono je ze sobą i otrzymano obrotową platformę, na której umieszczono ogniwo słoneczne.

Kolejnym elementem pracy było stworzenie dedykowanej aplikacji monitorująco-sterującej, która umożliwia monitorowanie wydajności systemu i sterowanie położeniem ogniwa słonecznego. Za jej pomocą wykonano pomiary, na podstawie których utworzono charakterystyki i poddano je analizie w celu ograniczenia prądu ładowania. Wyznaczono także parametry zastosowanego ogniwa słonecznego.

Podczas realizacji pracy pojawiły się problemy. Pierwszy z nich wystąpił podczas pomiarów charakterystyki prądowo-napięciowej. Pomiary musiały być przeprowadzone w stałym oświetleniu, zatem były zależne od warunków atmosferycznych. Problemem okazał się także dobór dwóch fotorezystorów o zbliżonych charakterystykach w celu dokładnego wykrywania położenia Słońca. Finalnie wybrane fotorezystory posiadają bardzo podobne do siebie parametry, co umożliwia prawidłową pracę systemu. Ostatnim problemem było wyznaczenie wartości histerezy. Została ona dobrana eksperymentalnie, aby zapewnić prawidłową pracę systemu dla warunków, w których testowano układ.

Projekt można poddać dalszym modyfikacjom. Jedną z opcji rozwoju jest zastosowanie dwóch dodatkowych fotorezystorów w celu automatycznej, dwuosiowej regulacji położenia ogniwa. Pozwoli to na osiągnięcie jeszcze większej wydajności. Możliwa jest także modyfi-

kacja konstrukcji mechanicznej, która pozwoli na umieszczenie dwóch ogniw słonecznych, co spowoduje zwiększenie wartości maksymalnej mocy generowanej przez układ.

Załącznik A

Do pracy załączono płytę DVD zawierającą w poszczególnych katalogach:

`/Praca_inzynierska.pdf` — wersja cyfrowa pracy,

`/Kod_zrodlowy_STM32.zip` — kod źródłowy oprogramowania mikrokontrolera,

`/Kod_zrodlowy_Qt.zip` — kod źródłowy aplikacji monitorująco–sterującej,

`/Czesci_mechaniczne.zip` – archiwum z częściami mechanicznymi wykorzystanymi w projekcie.

Literatura

- [1] Botland. <https://botland.com.pl/panele-sloneczne-malej-mocy/6988-ogniwo-sloneczne-35w6v-165x135x3mm-5904422335328.html>, 2022.
- [2] Botland. <https://botland.com.pl/stm32-nucleo/3363-stm32-nucleo-f411re-stm32f411re-arm-cortex-m4-5904422331764.html>, 2022.
- [3] Botland. <https://botland.com.pl/czujniki-pradu/19255-dwukierunkowy-czujnik-pradumocy-ina219-26v-32a-stemma-atqwiic-adafruit-904.html>, 2022.
- [4] Botland. <https://botland.com.pl/czujniki-swiatla-i-koloru/2024-czujnik-natezenia-swiatla-bh1750-5904422373283.html>, 2022.
- [5] Botland. <https://botland.com.pl/fotorezystory/1563-fotorezystor-20-30k-gl5537-1-10szt-5903351245722.html>, 2022.
- [6] Botland. <https://botland.com.pl/moduly-zasilajace/19388-lipo-charger-modul-ladujacy-do-akumulatorow-li-pol-poprzez-microusb-dfrobot.html>, 2022.
- [7] Botland. <https://botland.com.pl/serwa-praca-ciagla-360/1880-serwo-powerhd-ar-3606hb-praca-ciagla-360-stopni-6939360636069.html>, 2022.
- [8] Botland. <https://botland.com.pl/przetwornice-step-up-step-down/21022-s13v10f5-przetwornica-step-upstep-down-5v-1a-pololu-4083.html>, 2022.
- [9] A. Czerwiński. *Akumulatory, baterie, ogniwa*. WKŁ, 2012.
- [10] DNK Power. <https://www.dnkpowers.com/lithium-polymer-battery-guide/charging-curve-for-lithium-polymer-battery/>, 2022.
- [11] W. Domski. Sterowniki robotów, Laboratorium – ADC, DAC i DMA, Przetwoniki analogowo-cyfrowe, cyfrowo-analogowe oraz bezpośredni dostęp do pamięci. 2017.
- [12] W. Domski. Sterowniki robotów, Laboratorium – Liczniki i przerwania, Tryby pracy licznika oraz obsługa przerwań. 2017.
- [13] W. Domski. Sterowniki robotów, Laboratorium – Debugowanie, Zaawansowane techniki debugowania. 2018.

- [14] M. Galewski. *STM32 Aplikacje i ćwiczenia w języku C z biblioteką HAL*. Wydawnictwo BTC, Legionowo, 2019.
- [15] I. Góralczyk, R. Tytko. *Urządzenia, instalacje fotowoltaiczne i elektryczne*. Drukarnia i Wydawnictwo TSP, 2015.
- [16] P. Górecki. Akumulatory litowe. *Elektronika praktyczna*, 2015.
- [17] G. Jastrzębska. *Ogniwa słoneczne*. WKŁ, 2013.
- [18] Katedra Chemii Organicznej. Ćwiczenie nr 4 – Ogniwa fotowoltaiczne. <https://home.agh.edu.pl/jbanas/4.pdf>.
- [19] W. M. Lewandowski. *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. WNT, Warszawa, 2016.
- [20] M. Olszewski. *Podstawy mechatroniki*. REA, 2009.
- [21] P. Yao, H. Yu, Z. Ding, Y. Liu, J. Lu, M. Lavorgna, J. Wu, X. Liu. Review on polymer-based composite electrolytes for lithium batteries. *Front. Chem.*, 7, 2019.
- [22] K. Znajdek, M. Sibiński. Ogniwa fotowoltaiczne różnych typów. *Świat Szkl*a, 2011.