

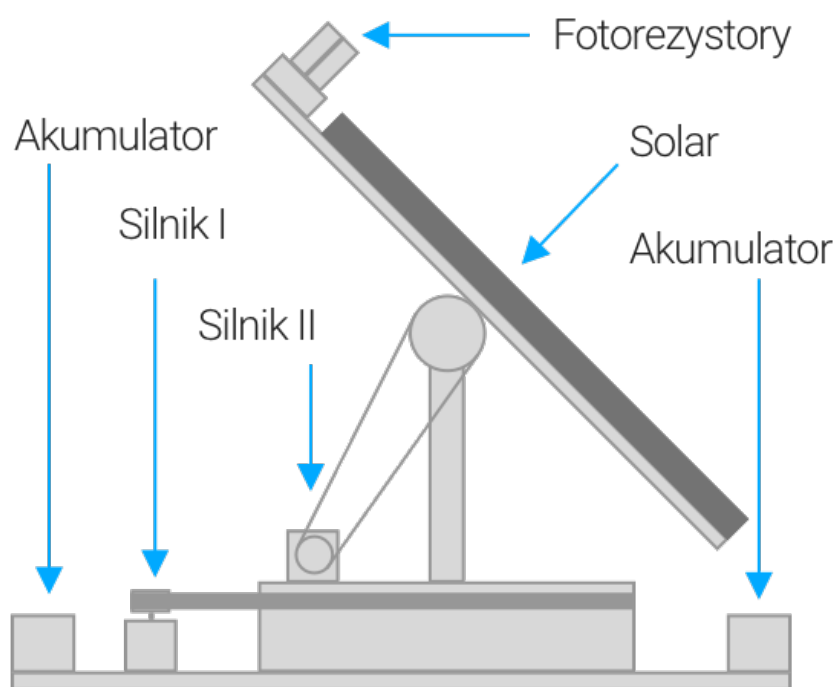
System Paneli Słonecznych

Katarzyna Marek, Maciej Stosio, Grzegorz Marek

31 maja 2019

1 Działanie urządzenia

System Paneli Słonecznych otrzymuje energię elektryczną z energii słonecznej i gromadzi ją w akumulatorach. Jest on wyposażony w mechanizm automatycznego podążania za słońcem, dzięki czemu promienie słoneczne padają na panel słoneczny pod kątem najbliższym 90° , maksymalizując wydajność panelu.

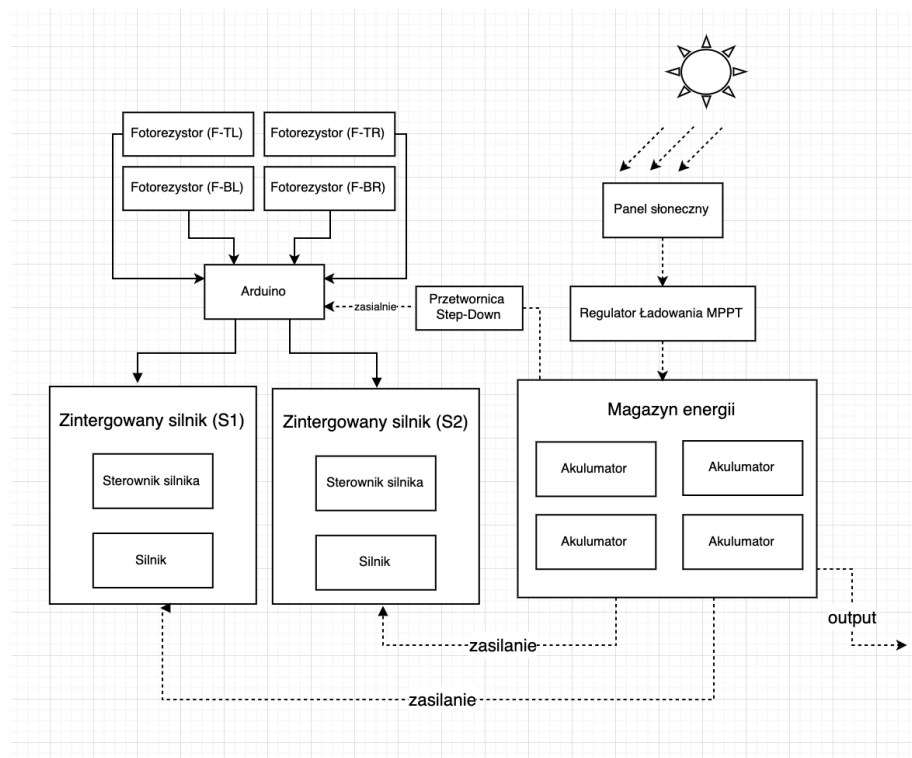


Rysunek 1: Schemat konstrukcyjny

2 Opis systemu

Na rysunku 2 widać schemat blokowy systemu. System składa się z panelu słonecznego umożliwiającego zamianę energii świetlnej na energię elektryczną. Panel podłączony jest do kontrolera ładowania MPPT, który dobiera optymalne parametry ładowania. Dodatkowo system jest wyposażony w układ obracający

panel w stronę słońca. Mikrokontroler czytuje informację dotyczącą naświetlenia z czterech fotorezystorów umieszczonych powyżej panelu i przesyła sygnał do odpowiedniego silnika, nakazując mu obrót o pewien kąt, gdy jest to wymagane. Zarówno mikrokontroler jak i silniki są zasilane z akumulatorów, które magazynują energię wyprodukowaną przez panel słoneczny.



Rysunek 2: Schemat blokowy systemu.

3 Elementy systemu

3.1 Akumulator

Akumulator służy jako magazyn energii. Spośród wielu typów akumulatorów skupimy się na akumulatorach żelowych, ponieważ są stosunkowo tanie, mają niski współczynnik samorozładowywania, mają wysoki prąd rozładowywania, są niewrażliwe na głębokie rozładowywanie oraz bezobsługowe w porównaniu do tradycyjnych akumulatorów kwasowych, w których okresowo trzeba uzupełniać wodę. Ich wadą są duże rozmiary, dlatego wykorzystywane są najczęściej jako awaryjne zasilanie szpitali, zakładów przemysłowych czy przy instalacjach energii odnawialnej - co jest naszym celem.

Do naszej instalacji bierzemy 4 akumulatory o napięciu 12V oraz pojemności 100Ah co daje nam możliwość przechowywania 4,8kWh energii elektrycznej. Taka konfiguracja jest spowodowana problemami ze znalezieniem akumulatora żelowego o napięciu 24V, wagą (trudności w dostawie, transporcie) oraz ceną tych pojemniejszych (przykładowy koszt 12V/200Ah wynosi 1600zł).

Parametry wybranego przez nas akumulatora

Maksymalny prąd ładowania	30 A
Maksymalny prąd rozładowania	800 A (5 sekund)
Masa	29,30 kg

Cena jednej baterii wynosi około 600zł

3.2 Panel Fotowoltaiczny

Panele fotowoltaiczne dzielimy na monokrystaliczne i polikrystaliczne. Te pierwsze cechują się wyższą wydajnością, większą mocą z tej samej powierzchni oraz niższym współczynnikiem temperaturowym, natomiast polikrystaliczne mają niższą cenę.

Słowniczek:

1. Wyższa wydajność - procent energii słonecznej zamieniony na energię elektryczną; różnica 14-16%, a 16-20%
2. Współczynnik temperaturowy - spadek sprawności wraz ze wzrostem temperatury

Uwzględniając powyższe różnice, do naszej instalacji weźmiemy panel firmy LG model NeON2 LG330N1C-A5, ze względu na renomę firmy LG oraz wysoką sprawność.

Cena panelu około 1000zł.

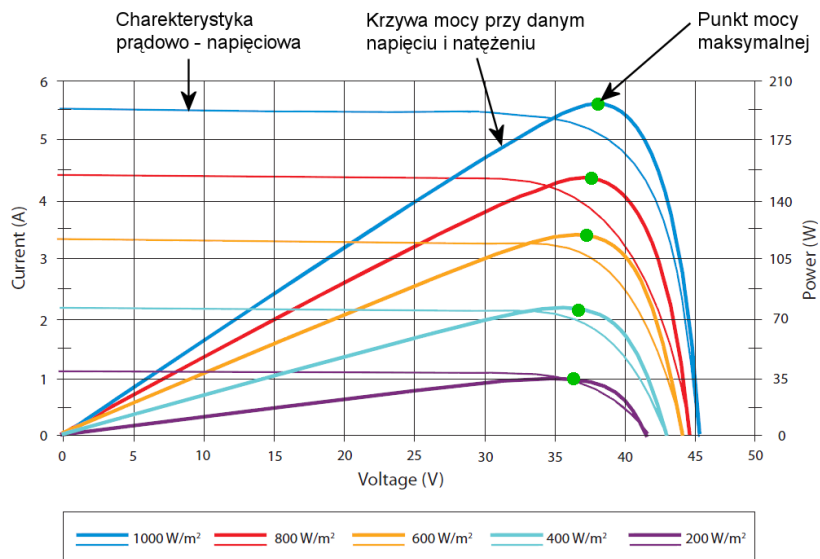
3.3 Regulator Ładowania MPPT

Regulatory ładowania dbają o to, żeby akumulatory nie zostały nadmiernie rozładowane ani przeładowane. W naszej instalacji użyjemy regulatora MPPT, ponieważ pozwalają one na uzyskanie od 20% do 30% więcej mocy niż regulatory PWM. Regulator ładowania MPPT wykorzystuje w tym celu algorytm śledzenia punktu mocy maksymalnej panelu (maximum power point tracking).

Punkt mocy maksymalnej jest wyznaczany na charakterystyce prądowo-napięciowej panelu fotowoltaicznego. MPP to punkt, gdzie wartości napięcia V_{MPP} i prądu I_{MPP} osiąganego w danej chwili przez panel fotowoltaiczny dają największą moc. Moc wejściowa i wyjściowa jest zoptymalizowana w punkcie, gdzie różniczka dI/dU charakterystyki prądowo-napięciowej jest równa stosunkowi I/U (wtedy $dP/dU = 0$). Opór $R = U/I$ równy odwrotności tej wartości pozwala na osiągnięcie maksymalnej mocy.

Punkt mocy maksymalnej zależy od czynników takich jak poziom naświetlenia czy temperatura i wiek komórek fotowoltaicznych. Regulator MPPT dba o

to, żeby panel dawał optymalną moc poprzez częste mierzenie prądu i napięcia oraz odpowiednie zmiany impedancji.



Rysunek 3: Charakterystyka prądowo-napięciowa panelu fotowoltaicznego z zaznaczonymi punktami mocy maksymalnej (<http://solaris18.blogspot.com>)

W naszej instalacji wykorzystamy regulator ładowania AZO Digital MPPT 12/24 - 20A, ponieważ ma odpowiednie parametry dla naszych potrzeb (napięcie wejściowe od 12 V do 65 V, wyjściowe 12 V/24 V i maksymalny prąd 20 A). Kosztuje on 239 zł¹.

3.4 Fotorezystor

Element światłoczuły. Gdy na fotorezystor pada dużo światła to jego opór jest mały (przepływa więcej prądu), a gdy znajduje się w cieniu to jego opór się zwiększa (przepływa mniej prądu).

W naszym systemie może to być Fotorezystor 5-10kΩ GL5616 o następujących parametrach:

rezystencja jasna	5-10kΩ
rezystencja ciemna	800kΩ
napięcie maksymalne	150V
moc maksymalna	100mW

Cena takiego rezystora to około 1,50 zł².

¹botland.pl

²botland.pl

3.5 Mikrokontroler

Mikrokontroler do zarządzania obrotem panelu słonecznego. Do zastosowania w naszym systemie wystarczy jeden z popularnych modułów Arduino, na przykład Arduino Leonardo A000057 o następujących parametrach:

napięcie zasilania	7-12V
mikrokontroler	ATmega32u4
wyjścia PWM	7
wejścia analogowe	12

Cena około 88zł³.

3.6 Przetwornica Step-Down

Zakładamy, że nasz system będzie przechowywał energię w paczce baterii składającej się z 4 akumulatorów (Sekcja 3.1) podłączonych szeregowo i równolegle co da nam dwa razy większe napięcie i dwa razy większą pojemność niż jednego. Napięcie magazynu energii będzie wynosić DC 24V, zatem dla Arduino (wszystkie pozostałe komponenty mogą pracować z 24V) musimy je obniżyć do max 12V (zalecane napięcie 7-12V, graniczne 6-24V). Wykorzystamy do tego przetwornicę step-down Pololu D24V10F12, gdyż zamienia ona stałe napięcie z przedziału 12-30V na DC 12V (maksymalny prąd wyjściowy to 1A co jest wystarczające dla arduino).

Napięcie IN	od 12,1 V do 36 V
Napięcie OUT	12 V \pm 4 %
Sprawność	80 % - 93 %

Cena wynosi około 30zł

3.7 Silnik

Do tego systemu można zastosować silnik krokowy. Jako przykład użyjemy zintegrowanego silnika krokowego iST-2320 - 2Nm. Należy zwrócić uwagę, że temperatura działania tego silnika jest w przedziale (0°-40°) co będzie niewystarczające do działania w warunkach zewnętrznych. Inne parametry tego silnika:

krok (domyślnie ustawiony)	0.9°
napięcie zasilania	20-50V
moment trzymający	2Nm
napięcie sterujące	5V

Za pomocą tego silnika chcemy obracać 18kg panel oraz część konstrukcji go trzymającej, dlatego przy budowanie należy odpowiednio dobrać przekładnię.

³botland.pl

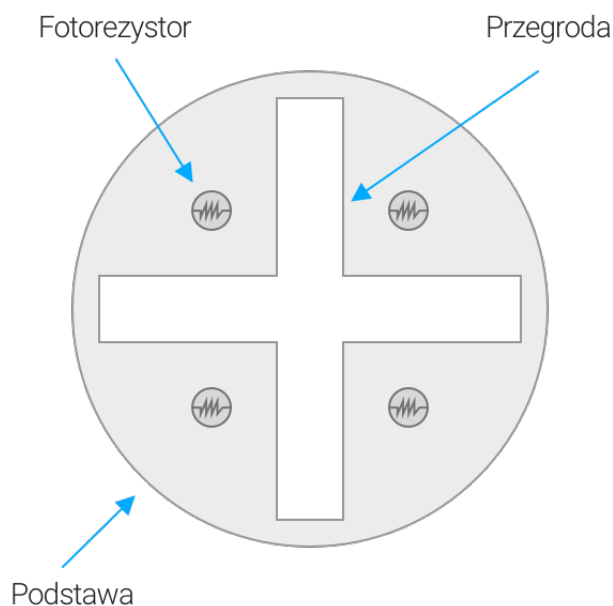
Konektor sygnałów sterujących:

pin	nazwa	I/O	opis
1/2	PUL+/PUL-	I	Sygnał kroku. Krok może być zarówno dla zbocza opadającego jak i narastającego. Napięcie wysokie to 4.5-24V, a niskie 0-0.5V.
3/4	DIR+/DIR-	I	Sygnał kierunku. Sygnał na ten pin zmienia kierunek obrotu silnika. Napięcie wysokie to 4.5-24V, a niskie 0-0.5V.
5/6	ENA+/ENA-	I	Sygnał Enable. Sygnał zezwolenia na pracę. Domyślnie niepodłączony zezwala.
9/10	ALM+/ALM-	O	Wyjście alarmu. Aktywowane, gdy zadziała któreś z zabezpieczeń silnika, zwiększa się wtedy impedancja.

Cena takiego silnika to około 490 zł⁴.

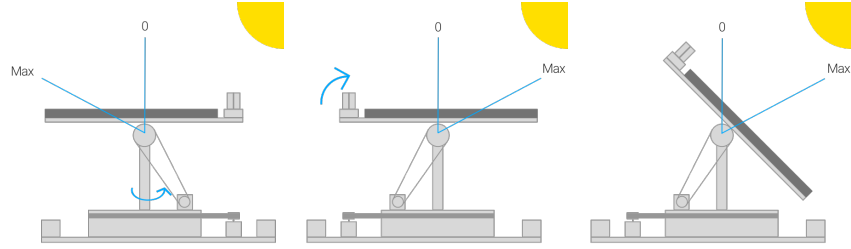
4 System podążania za słońcem

4.1 Opis działania



Rysunek 4: Konstrukcja mechanizmu mierzącego kierunek padania promieni słonecznych

⁴ebmia.pl



(a) Osiągnięcie kąta minimalnego. (b) Konstrukcja obraca się o 180° . (c) Panel dalej nachyla się w stronę słońca.

Rysunek 5: Zachowanie algorytmu przy osiągnięciu kąta minimalnego.

Za pomocą mechanizmu przedstawionego na schemacie 4 odczytujemy kierunek, z którego padają promienie słoneczne (położenie słońca). Jeśli lewa strona jest oświetlona, a prawa zacieniona (dzięki przegrodom) to znaczy, że musimy obrócić panel w lewą stronę aż zminimalizujemy różnicę na przeciwnych czujnikach. Analogicznie robimy dla czujników w osi pionowej. Gdy wszystkie fotorezystory będą równomiernie oświetlone (z dokładnością do δ) to wiemy, że kąt padania promieni słonecznych na panel wynosi 90° .

4.2 Algorytm

Mikrokontroler, na podstawie wartości szczytanych z fotorezystorów, decyduje, jak obracać panelem. Algorytm jego działania przy odpowiednio dobranych parametrach β_1 , β_2 , δ_1 , δ_2 i $waitTime$ widać w pseudokodzie 1.

4.2.1 Input

MAX_ANG	maksymalny kąt nachylenia
d_1	proporcja obrotu silnika do kąta obrotu panelu
d_2	proporcja obrotu silnika do zmiany nachylenia panelu
δ_1	najmniejsza różnica odczytu między fotorezystorami lewymi i prawymi potrzebna do wykonania obrotu
δ_2	najmniejsza różnica odczytu między fotorezystorami górnymi i dolnymi potrzebna do zmiany kąta nachylenia
β_1	najmniejszy kąt, o jaki panel obraca się w prawo i w lewo
β_2	najmniejszy kąt, o jaki panel obraca się w górę i w dół
$waitTime$	czas, jaki system czeka między pomiarami

Tabela 1: Wszystkie opisane wyżej dane są w poniższym programie traktowane jako zmienne globalne.

4.2.2 Pseudokod

```

 $angle_1 := 0$  ;           // zmienna mówiąca o kącie obrócenia panelu
 $angle_2 := 0$  ;           // zmienna mówiąca o kącie nachylenia panelu
while true do
     $ftl := \text{measure}(\text{F-TL})$ ;
     $ftr := \text{measure}(\text{F-TR})$ ;
     $fbl := \text{measure}(\text{F-BL})$ ;
     $fbr := \text{measure}(\text{F-BR})$ ;

    obracanie panelem dookoła
    if  $ftr - ftl \geq \delta_1 \wedge fbl - fbr \geq \delta_1$  then
        | obrót w prawo traktujemy jako zmniejszanie miary kąta
        |  $angle_1 := \text{turnRight}(angle_1)$ ;
    else
        | if  $ftr - ftl \geq \delta_1 \wedge fbr - fbl \geq \delta_1$  then
            | obrót w lewo traktujemy jako zwiększanie miary kąta
            |  $angle_1 := \text{turnLeft}(angle_1)$ ;
        | end
    end

    zmiana kąta nachylenia panelu
    if  $ftr - fbl \geq \delta_2 \wedge ftr - fbr \geq \delta_2$  then
        |  $angle_2 := \text{turnDown}(angle_2)$ ;
    else
        | if  $fbl - ftr \geq \delta_2 \wedge fbr - ftr \geq \delta_2$  then
            |  $(angle_2, angle_1) := \text{turnUp}(angle_2, angle_1)$ ;
        | end
    end
     $\text{wait}(\text{waitTime})$ ;
end

```

Algorithm 1: Algorytm podążania za słońcem.

Function $\text{turnRight}(angle)$:

```

     $newAng := angle - \beta_1$ ;
    if  $newAng \geq 0^\circ$  then
        |  $\text{turnS1Right}(\beta_1 * d_1)$ ;
    else
        |  $\text{turnS1Left}((360^\circ - \beta_1) * d_1)$ ;
    end
    return  $newAng \bmod 360^\circ$ ;

```

Algorithm 2: Funkcja obracania w prawo.

Function turnLeft(*angle*):

```

    newAng := angle +  $\beta_1$ ;
    if newAng  $\leq 360^\circ$  then
        | turnS1Left( $\beta_1 * d_1$ );
    else
        | turnS1Right( $(360^\circ - \beta_1) * d_1$ );
    end
    return newAng mod  $360^\circ$ ;

```

Algorithm 3: Funkcja obracania w lewo.

Function turnUp(*angle*₂, *angle*₁):

```

    ma dwa argumenty i zwraca parę uporządkowaną, bo może zmieniać
    zarówno nachylenie, jak i obrót
    if angle2 -  $\beta_2 \geq 0^\circ$  then
        | turnS2Up( $\beta_2 * d_2$ );
        | return (angle2 -  $\beta_2$ , angle1);
    else
        | zbliżanie się nachyleniem panelu do kąta minimalnego;
        if angle1 +  $180^\circ < 360^\circ$  then
            | turnS1Left( $180^\circ * d_1$ );
        else
            | turnS1Right( $180^\circ * d_1$ );
        end
        | return (angle2, (angle1 +  $180^\circ$ ) mod  $360^\circ$ );
    end
end

```

Algorithm 4: Funkcja obracania w górę.

Function turnDown(*angle*):

```

    if angle +  $\beta \leq MAX\_ANG$  then
        | turnS2Down( $\beta_2 * d_2$ );
        | return angle +  $\beta_2$ ;
    else
        | zbliżanie się nachyleniem panelu do kąta maksymalnego;
        turnAng := MAX_ANG - angle;
        if turnAng > 0 then
            | turnS2Down(turnAng *  $d_2$ );
            | return MAX_ANG;
        else
            | return angle;
        end
    end
end

```

Algorithm 5: Funkcja obracania w dół.

MAX_ANG , d_1 , d_2 są parametrami systemu. MAX_ANG mówi o maksymalnym nachyleniu. d_1 to proporcja obrotu silnika S2 do obrotu panelu, tzn.

jeżeli obrócimy silnik o kąt $\beta_1 * d_1$ to panel zostanie poruszony o kąt β_1 (analogicznie d_2). Ponieważ korzystamy z silnika krokowego, to możemy mierzyć te kąty bardzo precyzyjnie.

Obracając panelem dookoła staramy się, by nigdy nie przekraczał kąta 0° kręcąc się w prawo oraz 360° kręcąc się w lewo. Jeśli jest na kącie bliskim zeru i chce obrócić się o kąt α , to nakazujemy obrót o $360^\circ - \alpha$ w lewo. Dzięki temu zapobiegniemy ciągłemu obracaniu się układu w jedną stronę mogącego prowadzić do wyrwania kabli prowadzących do panelu.

Szczególnym przypadkiem przy śledzeniu słońca jest ranek, gdy potencjalnie słońce może znaleźć się dokładnie z drugiej strony panelu. Wtedy jeśli słońce będzie bardziej oświetlało górne fotorezystory to panel nachyli się do poziomu (rysunek 5a), a następnie obróci o 180° (rysunek 5b), by dalej móc się nachylać w stronę słońca (rysunek 5c).

Wciąż w tej sytuacji słońce musiałoby wejść odpowiednio wysoko. Nie jest to jednak szczególnym problemem, ponieważ rzadko słońce zachodzi dokładnie na zachodzie i wschodzi dokładnie na wschodzie. Jednak można by się zastanowić, czy w ogóle praca w ciągu nocy ma sens, skoro i tak słońce nie świeci. Lepszym rozwiązaniem może być usypianie całego systemu na noc i rano ustawianie go w optymalnej pozycji poziomej umożliwiającej najlepsze mierzenie pozycji słońca.

4.3 Komunikacja

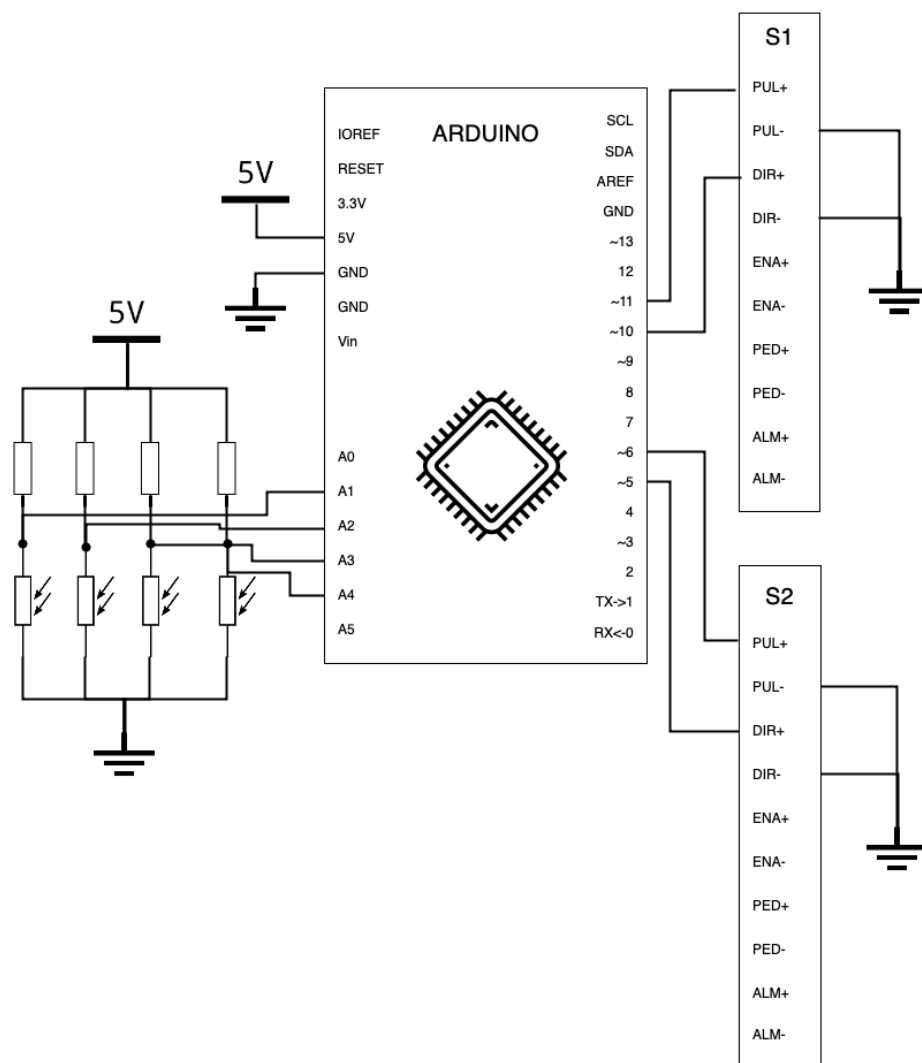
Na rysunku 6 widzimy schemat elektryczny, który obrazuje komunikację między Arduino, fotorezystorami i silnikami.

Fotorezystory

Arduino czytuje na wejściach analogowych (piny A1-A4) wartości z fotorezystorów.

Silnik

Jeżeli chcemy poruszać silnikiem pierwszym do przodu to nadajemy sygnał prostokątny na PUL+ (CW), który jest podłączony do pinu 11. Obrót o jeden krok następuje przy każdym zboczu opadającym (lub narastającym, zależnie od konfiguracji), zatem możemy kontrolować prędkość silnika zmieniając okres sygnału. Jeżeli chcemy poruszać silnikiem w stronę przeciwną, to w trybie Step/Dir zmieniamy stan z LOW na HIGH (bądź z HIGH na LOW) na pinie 10, do którego podłączone jest wejście DIR+. W trybie CW/CCW przestajemy nadawać na PUL+ (CW) i zaczynamy nadawać sygnał prostokątny na DIR+ (CCW). Dodatkowo można by jeszcze podłączyć ALM+/ALM-, które informują o tym,



Rysunek 6: Schemat elektryczny.

że zadziałało jedno z zabezpieczeń sterownika. Wtedy na przykład możemy zapalić odpowiednią diodę i zawiesić pracę systemu podążania za słońcem.

5 Użytkowanie

5.1 Środowisko

System paneli słonecznych jest przeznaczony do użytkowania na zewnątrz. W związku z tym jest on narażony na warunki pogodowe. Wymaga to odpowiedniego zabezpieczenia elementów elektrycznych przed wilgocią i opadami atmosferycznymi. Dodatkowo, każdy z elementów musi być w stanie pracować w temperaturach od -20°C do 50°C . System paneli słonecznych może też być narażony na działanie wiatru i nacisk spowodowany pokrywą śnieżną. Oba te czynniki wymagają, aby ramię obrotowe, na którym jest zamontowany panel słoneczny było odpowiednio silne.

5.2 Potencjalne zastosowanie

Ponieważ opisany system paneli słonecznych jest off-grid, to może być szczególnie przydatny w miejscach, gdzie nie ma doprowadzonej sieci elektrycznej.

Literatura

- [1] Panele słoneczne:
<https://sklepsoltech.pl/pl/p/Panel-fotowoltaiczny-LG-NeON2-LG330N1C-A5-330Wp/716>
- [2] Artykuł o panelach fotowoltaicznych:
<https://fotowoltaikaonline.pl/panele-monokrystaliczne-czy-polikrystaliczne>
- [3] Akumulatory:
<https://botland.com.pl/pl/zasilacze-awaryjne-ups/11430-akumulator-bezobslugowy-ap12-100-12v-100ah-vrla-agm-5905279203082.html>
- [4] Artykuł o akumulatorach:
<https://circuitdigest.com/article/different-types-of-batteries>
- [5] Przetwornica:
<https://botland.com.pl/pl/przetwornice-step-down/3022-pololu-d24v10f12-przetwornica-step-down-12v-1a.html>
- [6] Dokładniejsza specyfikacja Arduino:
<https://www.pololu.com/product/2192>

- [7] Regulator ładowania MPPT:
<https://botland.com.pl/pl/akcesoria-do-paneli-slonecznych/12980-solarny-regulator-ladowania-azo-digital-mppt-1224-20a-5905279203884.html>
- [8] Artykuł o regulatorach ładowania MPPT:
<http://systemy-fotowoltaika.pl/dziala-regulator-ladowania-mppt/>
- [9] Step/Dir a CW/CCW:
<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z0000019ZTySAM&l=pl-PL>
- [10] Zintegrowany silnik krokowy iST-2320 - 2Nm:
<https://www.ebmia.pl/zintegrowany-silnik-krokowy-ist2320-p-195388.html>
- [11] Arduino Leonardo - A000057:
<https://botland.com.pl/pl/arduino-moduly-glowne/1213-arduino-leonardo-a000057-8058333491141.html>
- [12] Podłączenie fotorezystorów do Arduino:
<https://botland.com.pl/pl/content/158-fotorezystor-i-arduino>
- [13] Fotorezystor 5-10k Ω GL5616:
<https://botland.com.pl/pl/fotorezystory/1564-fotorezystor-5-10k-gl5616.html>
- [14] Filmik o systemie podążania za słońcem dla paneli słonecznych:
https://www.youtube.com/watch?v=_6QIutZfsFs
- [15] Artykuł o systemie podążania za słońcem dla paneli słonecznych:
https://www.pc-control.co.uk/howto_tracksun.html
- [16] Pełna dokumentacja silnika iST-2320:
https://mecheltron.com/sites/default/files/webresources/MechanicalElectroMech/StepperMotors_IntegratedDriver/pdf/iST23XXen.pdf