Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

Teoria sterowania – zadanie projektowe

Projekt układu optymalizacji produkcji energii elektrycznej poprzez sterowanie położeniem panelu fotowoltaicznego.

Autorzy:

*inż. Emil Bugajski*

*inż. Grzegorz Soch*

Prowadzący:

*mgr inż. Marta Grzyb*

Zawartość

[1. Wprowadzenie 3](#_Toc94569383)

[1.1. Obiekt badań 3](#_Toc94569384)

[2. Wstęp teoretyczny 3](#_Toc94569385)

[2.1. Przegląd dostępnych rozwiązań 4](#_Toc94569386)

[2.2. Założenia projektowe 5](#_Toc94569387)

[3. Projektowany model – część mechaniczna 5](#_Toc94569388)

[4. Projektowany model – Hardware 6](#_Toc94569389)

[4.1. Raspberry Pi Pico 6](#_Toc94569390)

[4.1.1 Problem multipleksowania ADC 6](#_Toc94569391)

[4.2. Napędy 7](#_Toc94569392)

[4.2.1 Napęd osi X 8](#_Toc94569393)

[4.2.2 Napęd osi Y 9](#_Toc94569394)

[4.3. Panel fotowoltaiczny 9](#_Toc94569395)

[4.4. Woltomierz cyfrowy 10](#_Toc94569396)

[4.5. Sensor 11](#_Toc94569397)

[5. Projektowany model – Software 11](#_Toc94569398)

[5.1. Algorytm różnicowy 11](#_Toc94569399)

[5.2. Dobrany regulator 12](#_Toc94569400)

[5.3. Wybrane fragmenty programu 13](#_Toc94569401)

[6. Wnioski 16](#_Toc94569402)

[6.1. Możliwa rozbudowa i udoskonalenia układu 17](#_Toc94569403)

[7. Literatura 17](#_Toc94569404)

# Wprowadzenie

Efekt fotowoltaiczny po raz pierwszy zaobserwowany został w 1839 roku przez Aleksandra Edmunda Becquerel’a. Zjawisko polega na powstaniu siły elektromotorycznej w jednorodnym półprzewodniku pod wpływem oświetlenia i jest wynikiem zachodzących procesów fizycznych. Aby zobrazować wielkość energii pochodzącej ze Słońca należy podkreślić że wynosi ona około 178\* 1015W. Jest więc około 30000 razy większa niż całkowita moc wszystkich urządzeń zainstalowanych na całej kuli Ziemskiej. Panele fotowoltaiczne stają się coraz bardziej powszechne i stanowią istotny punkt we współczesnej technologii. Niniejsza praca zawiera proces projektowania, wykonania i zaimplementowania algorytmu nadążnej regulacji panelu słonecznego o małej mocy.



***Rysunek 1.*** *Rysunek poglądowy panelu fotowoltaiczny.*

## Obiekt badań

Obiektem badań jest próba optymalizacji wielkości wyprodukowanej energii poprzez algorytm ustawiający panel prostopadle do słońca. Według niektórych badań możliwy wzrost energii elektrycznej przy zastosowaniu tego typu układu może wynosić nawet 40% uwzględniając energię potrzebną do poruszania panelem słonecznym. [1] Układy nadążne wraz ze wzrostem popularności paneli stają się coraz bardziej powszechne.

# Wstęp teoretyczny

Celem pracy jest zaprojektowanie platformy dla panelu fotowoltaicznego o dwóch stopniach swobody, samoczynnie podążającej za słońcem. Zadanie obejmuje zarówno projekt mechaniczny jak i algorytm sterowania. Elementem sensorycznym układu będzie czujnik składający się z czterech fotorezystorów oraz prostopadłych ścian przesłonowych szczegółowo opisanych w podrozdziale 4.5. Całość napędzana będzie z wykorzystaniem dwóch serwonapędów. Układem sterował będzie 32-bitowy mikrokontroler z rodziny ARM z serii Cortex M0+ RP2040. W celu minimalizacji kosztów serwonapędu przyjęto, że maksymalny zakres ruchu azymutalnego słońca to 180° z powody wysokiej ceny serw o większym kącie ruchu.

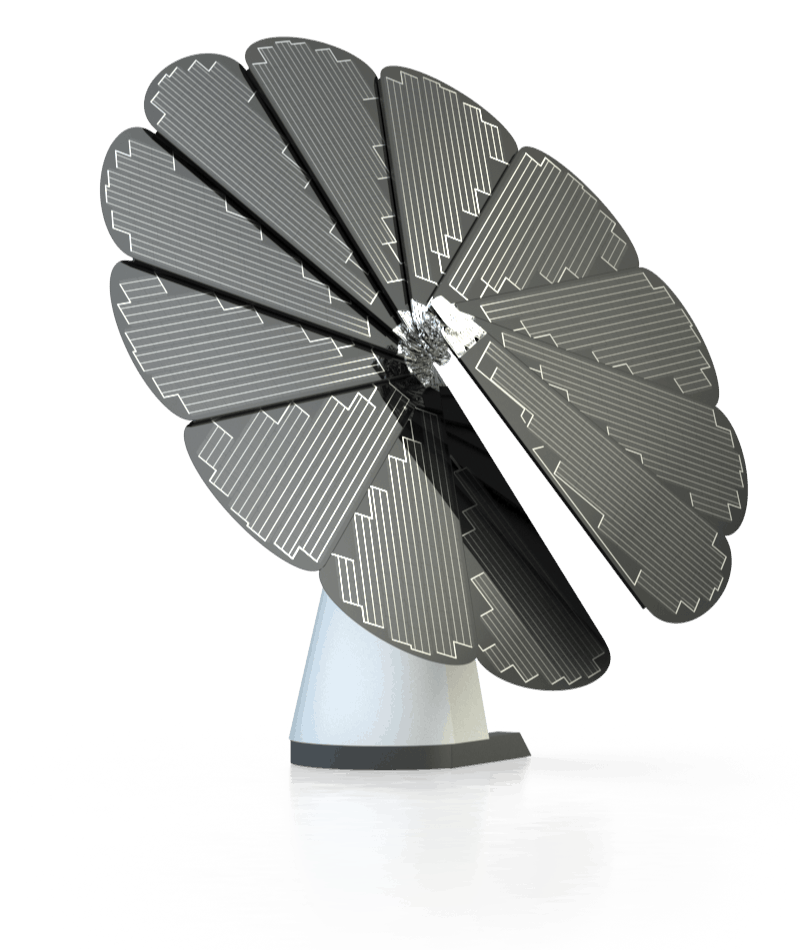
## Przegląd dostępnych rozwiązań

Na rynku dostępnych jest wiele komercyjnych jak i hobbystycznych systemów nadążnych do paneli fotowoltaicznych. Każdy z nich opiera się o jedną z dwóch metod sterowania takim układem. Pierwsza z nich polega na wyliczeniu aktualnej pozycji słońca na niebie, które możliwe jest gdy znane są następujące parametry:

* szerokość geograficzna,
* deklinacja słońca,
* wysokość,
* azymut,
* dzień roku,
* czas.

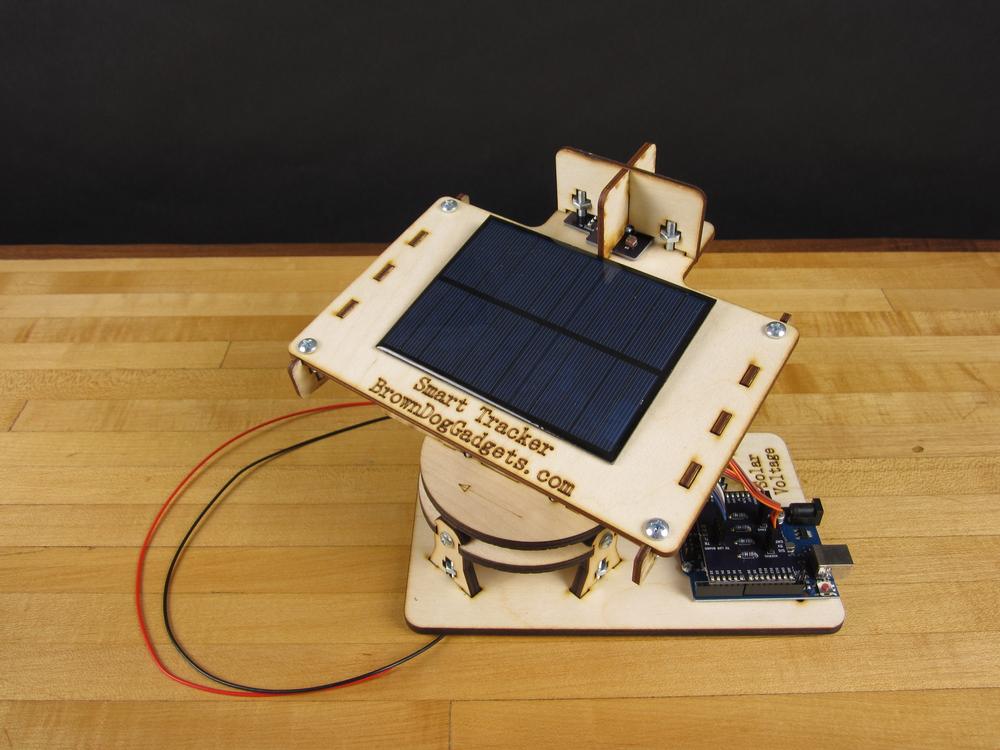
Drugim podejściem jest zastosowanie układu pomiarowego składającego się z czterech fotorezystorów. Są to elementy półprzewodnikowe, których rezystancja ulega zmianie pod wpływem padającego na jego powierzchnię promieniowania elektromagnetycznego na przykład promieniowania widzialnego lub podczerwieni. Rezystancja elementu zależy od natężenia oświetlenia fotorezystora, jego rezystancja w ciemności jest bardzo duża i może osiągnąć wartość rzędu megaomów, przy silnym oświetleniu może zmaleć do kilku omów. Fotorezystory przy zastosowaniu odpowiednich przesłon umożliwiają wyliczenie kąta padającego światła.

Przykładem komercyjnego zastosowania układu sterowania położeniem panelu jest *Smart Flower* wyprodukowany przez firmę *Smartflower Solar*. Rozwiązanie to oparte jest na wyliczaniu położenia słońca z zależności matematycznej.



***Rysunek 2.*** *Smart Flower wyprodukowany przez firmę Smartflower Solar. [2]*

Temat ten jest popularny wśród hobbystów i możemy znaleźć wiele rozwiązań opartych głownie na mikrokontrolerach i zastosowaniu układu pomiarowego na bazie fotorezystorów.



***Rysunek 3.*** *Przykładowy układ nadążny za słońcem. [3]*

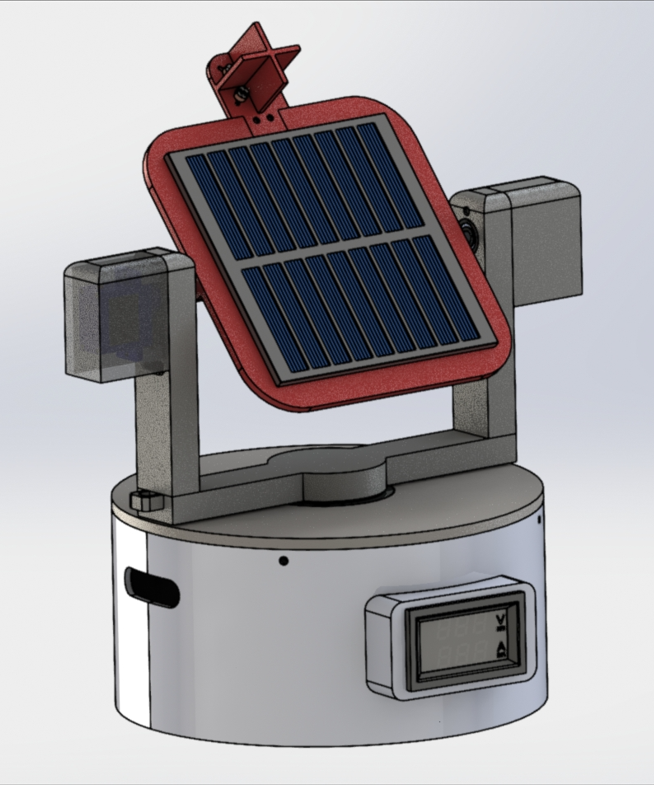
Pokazany na rysunku 3 projekt wykorzystuje 4 fotorezystory do wykrywania kąta padania światła. Platforma na której umiejscowiony jest panel fotowoltaiczny sterowana jest w dwóch osiach za pomocą dwóch serwonapędów. Cały układ sterowany jest za pomocą mikrokontrolera Arduino.

## Założenia projektowe

Założono, że słońce porusza się o maksymalny kąt w poziomie 180º. W praktyce kąt ten jest dużo większy w lecie, jednak ograniczał nas zakres ruchu serwa. Nie wpływa to w żaden sposób na algorytm sterowania. Przyjęto również, że układ w momencie uruchamiania ustawiony będzie w kierunku południowym, tak aby zakres ruchu serwomechanizmu obejmował jak największy przedział czasu padania promieni słonecznych.

# Projektowany model – część mechaniczna

Wszystkie elementy konstrukcyjne z wyłączeniem łożysk zostały zaprojektowane w programie SOLIDWORKS, a następnie wykonane w technologii druku 3D. Celem konstrukcji było zapewnienie dwóch stopni swobody platformy panelu, umożliwienie przekazania napędu oraz poprawienie walorów wizualnych projektu przez prowadzenie przewodów i schowanie elektroniki. Trójwymiarowy model projektowanego układu zaprezentowano na rysunku 4.



***Rysunek 4.*** *Wizualizacja układu stworzona w oprogramowaniu SOLIDWORKS.*

# Projektowany model – Hardware

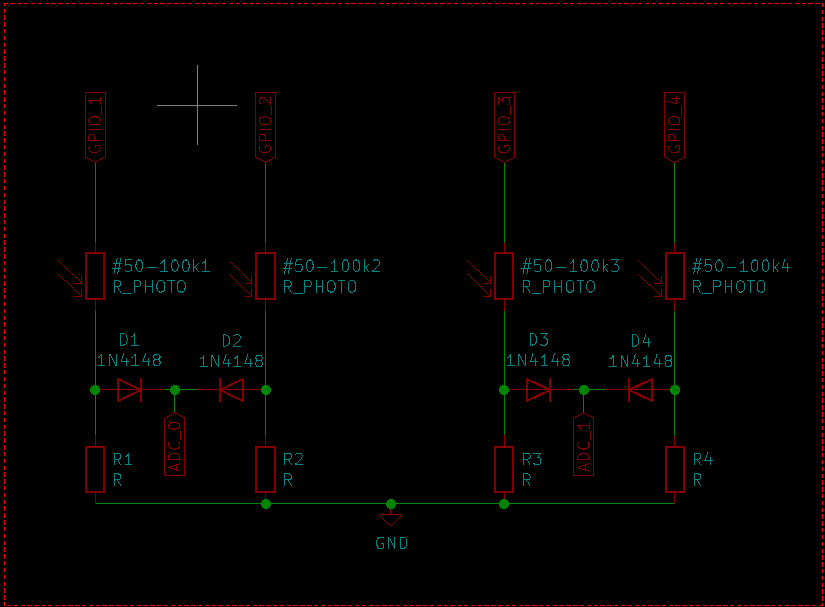
Układ elektryczny zmontowano na płytce prototypowej oraz umieszczono w podstawie modelu. Przewody poprowadzono po jednym z ramion obrotnicy tak aby znajdowały się jak najbliżej osi obrotów i były jak najmniej podatne na zginanie.

## Raspberry Pi Pico

Mikrokontroller sterujący układem to moduł Raspberry Pi Pico wyposażony w dwurdzeniowy układ RP2040. Jest to oparty na architekturze ARM Cortex M0+ o taktowaniu maksymalnym do 133 MHz.

### Problem multipleksowania ADC

Zaprojektowany czujnik kąta padania promienie świetlnych zbudowany jest z 4 fotorezystorów. Konieczna jest możliwość odczytu każdego z osobna. Niestety dobrany mikrokontroler posiada jedynie 3 piny mogące obsłużyć przetwornik analogowo – cyfrowy. W związku z powyższym niezbędne było zaprojektowanie multipleksera ADC. To rozwiązanie pozwala na obsłużenie kilku fotorezystorów jednym kanałem. Schemat układu wykorzystującego prosty dzielnik napięcia oraz układ multipleksowania przedstawiono na rysunku 5.



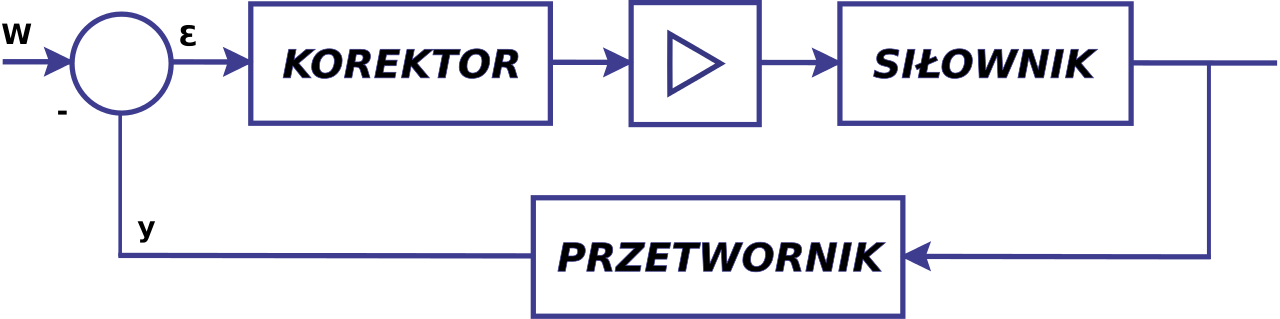
***Rysunek 5.*** *Układ multipleksowania pomiarów analogowych.*

Każdy fotorezystor (xR\_PHOTO) zasilany jest bezpośrednio z pinu mikrokontrolera (GPIO\_x). Pozwala to na softwareowe wybranie czujnika z którego chcemy dokonać pomiaru. Układ wyposażono w cztery diody (D1-D4) w kierunku zaporowym tak aby w trakcie pomiaru prąd płynął wyłącznie przez zasilany sensor. Trzeba mieć jednak świadomość wady takiego rozwiązania. Na diodzie występuje spadek napięcia, dodatkowo każda dioda jak i rezystor posiada pewną tolerancję wykonania. Wprowadza to więc szum pomiarowy.

## Napędy

Mając na uwadze charakterystykę pracy napędów wykorzystanych do sterowania poszczególnymi osiami, którego zakresy przemieszczenia kątowego wahają się w granicach ±90° i nie mają potrzeby rozwijania dużych prędkości jak i momentów obrotowych. Działające na napęd siły są stosunkowo niewielkie, zachodzi jedynie potrzeba precyzyjnego pozycjonowania. Zdecydowano się więc na serwomechanizmy.

Serwomechanizm jest to zamknięty układ sterowania (układ regulacji) ze sprzężeniem zwrotnym, w którym sygnałem wejściowym jest położenie, prędkość czy przyspieszenie. Wartość wzorcowa porównywana jest z przetworzonym przez przetwornik bieżącym sygnałem wyjściowym i powstały w ten sposób uchyb podawany jest na człon korekcyjny, a dalej na wzmacniacz. Wzmocniony sygnał trafia do siłownika (może to być odpowiedni silnik elektryczny), którego przemieszczenie jest wartością wyjściową układu. Zadaniem serwomechanizmu jest likwidacja błędów regulacji (uchybu przemieszczenia), powstających na skutek zmian wielkości wzorcowej, a więc klasyfikujemy go jako układ nadążny. Serwomechanizm ma strukturę typowego układu regulacji, nie steruje jednak obiektem technologicznym, lecz siłownikiem w celu usprawnienia działania toru wykonawczego. [4] Schemat blokowy serwomechanizmu pokazany jest na rysunku 6.



***Rysunek 6.*** *Schemat blokowy działania serwomechanizmu [4]*

Typowe serwomechanizmy modelarskie, które zostały zastosowane w projekcie sterowane są przez mikrokontroler przy pomocy regulacji sygnału napięciowego PWM (*ang. Pulse-Width Modulation*). Jest to sygnał o stałej amplitudzie i częstotliwości a zmiennym wypełnieniu. Serwomechanizm posiada wbudowany sterownik silnika (analogowy lub cyfrowy), który odczytuje wysyłany przez mikrokontroler sygnał sterujący i na podstawie szerokości dostarczanego impulsu ustawia swoją pozycję.

### Napęd osi X

Jako napęd osi X dobrano serwomechanizm *PowerHD HD-1160A*. Wybrano je ze względu na zwiększony moment obrotowy wynoszący *2 [kg∙cm]*. Serwonapęd pokazany jest na rysunku 7, a jego podstawowe parametry zebrane są w tabeli 1.



***Rysunek 7.*** *Serwonapęd PowerHD HD-1160A. [5]*

|  |  |
| --- | --- |
| Napięcie zasilania | 4.8 – 6.0 V |
| Zakres ruchu | 0 – 180 ° |
| Moment | 2.0 kg∙m (0.19 Nm) |
| Prędkość | 0.12 s/60° |
| Maksymalny pobór prądu | 680 mA |
| Typ | Analogowe |
| Częstotliwość sygnału sterującego | 50 Hz |
| Maksymalny zakres impulsów | 800 – 2200 µs |
| Wymiary | 29 x 12 x 30.2 mm |
| Masa | 16 g |

***Tabela 1.*** *Specyfikacja serwonapędu PowerHD HD-1160A.*

### Napęd osi Y

Napęd osi Y stanowi serwonapęd *Tower Pro SG-90*. Wybrany został ze względu na mniejsze wymiary gabarytowe oraz małą wagę. Serwomechanizm pokazany jest na rysunku 8, a jego podstawowe dane techniczne zebrane są w tabeli 2.



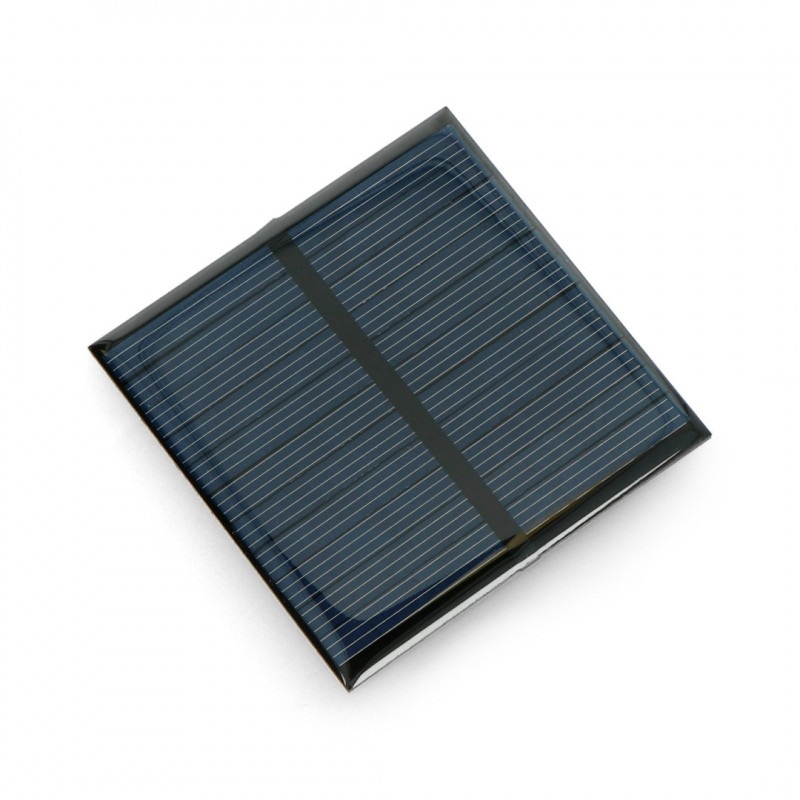
***Rysunek 8.*** *Serwonapęd Tower Pro SG-90. [6]*

|  |  |
| --- | --- |
| Napięcie zasilania | 4.8 – 6.0 V |
| Zakres ruchu | 0 – 180 ° |
| Moment | 1.8 kg∙m (0.18 Nm) |
| Prędkość | 0.12 s/60° |
| Typ | analogowe |
| Wymiary | 22 x 12 x 27 mm |
| Masa | 9 g |

***Tabela 2.*** *Specyfikacja serwonapędu Tower Pro SG-90.*

## Panel fotowoltaiczny

Dobrano ogniwo słoneczne małej mocy, którego aktualne napięcie wyjściowe jest mierzone i wyświetlane za pomocą woltomierza cyfrowego. Podstawowe parametry ogniwa przedstawiono w tabeli 3.



***Rysunek 9.*** *Panel fotowoltaiczny. [7]*

|  |  |
| --- | --- |
| Moc | 0.7 W |
| Napięcie wyjściowe | 5.5 V |
| Wymiary | 95 x 95 x 3 mm |

***Tabela 3.*** *Dane techniczne panelu fotowoltaicznego.*

## Woltomierz cyfrowy

Wyświetlanie aktualnego napięcia wyjściowego ogniwa słonecznego odbywa się przy pomocy miernika cyfrowego z wyświetlaczem. Pozwala on na pomiar napięcia oraz natężenia prądu z częstotliwością 2 Hz.

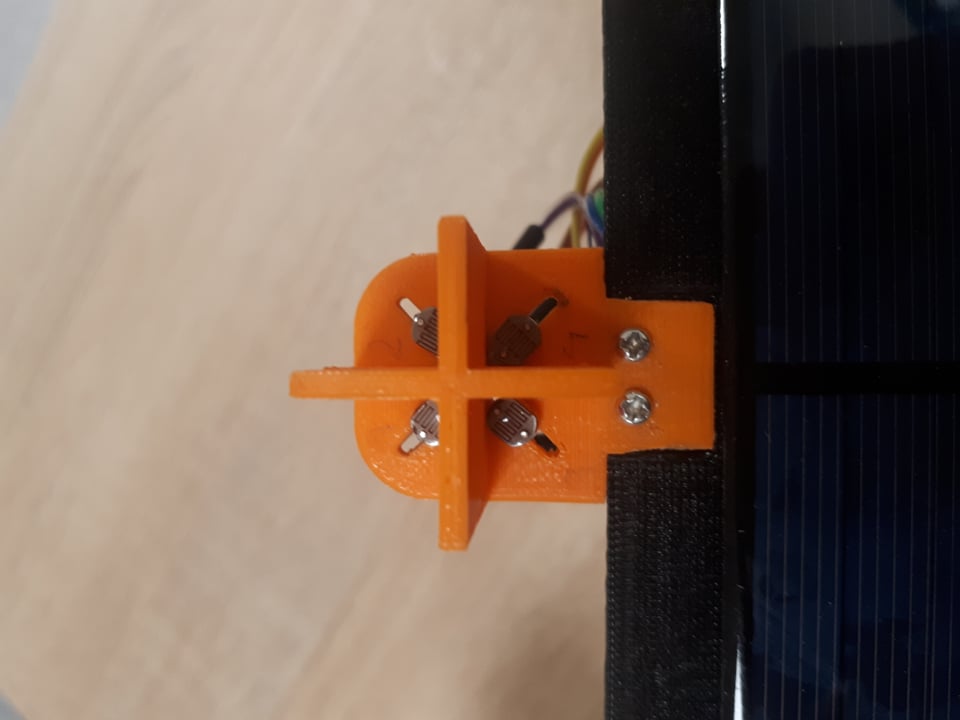


***Rysunek 10.*** *Miernik cyfrowy [8]*

Miernik pozwala na pomiar napięcia stałego w zakresie 0 – 99.9 V oraz natężenia prądu od 0 do 50 A. Zasilanie części logicznej waha się od 4.5 – 30 V. Deklarowana dokładność pomiarowa wynosi 1%.

## Sensor

W celu wyznaczenie kierunku padania promieni świetlnych zaprojektowano czujnik składający się z 4 jednakowych fotorezystorów przedzielonych przegrodami. Przegrody mają na celu rzucenie cienia na fotorezystory co z kolei wytworzy różnicę ich wskazań. Będzie to nasz sygnał sterujący do zaimplementowanego regulatora.



***Rysunek 11.*** *Układ pomiarowy złożony z czterech fotorezystorów oddzielonych przegrodami.*

Bardzo ważnym aspektem jest aby czujnik zamontowany był równolegle do panelu. Każda odchyłka równoległości płaszczyzn spowoduje niedokładność regulacji.

Wadą takiego sensora jest fakt, że uszkodzenie jednego fotorezystora spowoduje zakłócenie pracy układu. Dodatkowo fotorezystory posiadają swoją dokładność. Korzystna byłaby ich kalibracja jednak wymaga to stworzenia idealnych warunków oświetleniowych, co nie jest łatwe.

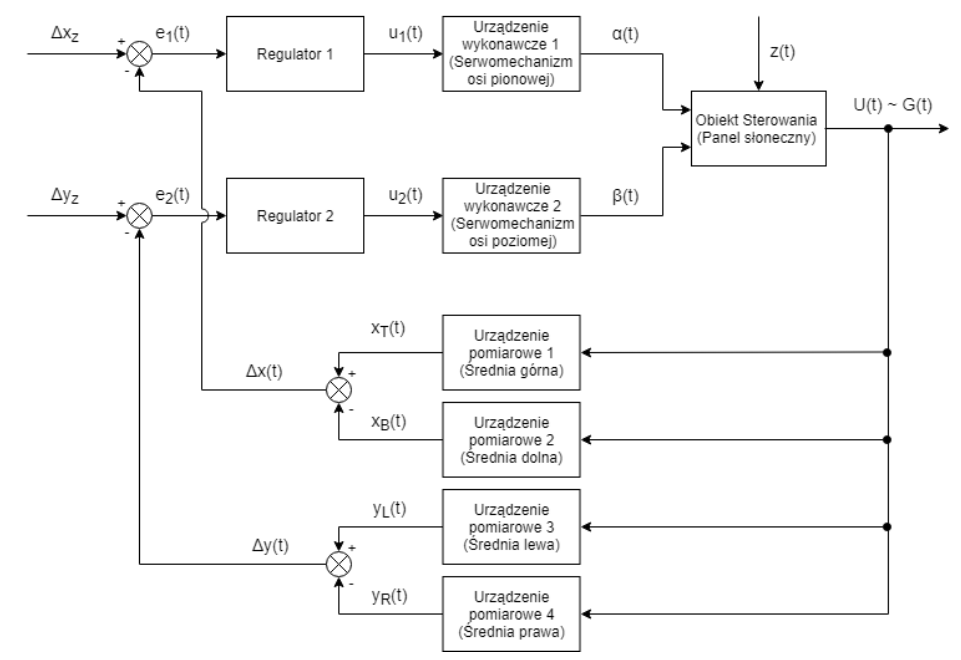
# Projektowany model – Software

Najczęściej stosowanymi algorytmami sterowania położenia panelu fotowoltaicznego są algorytmy różnicowe i zegarowe. W realizowanym projekcie zdecydowano się na implementację algorytmu różnicowego. Skrypt napisano w języku *microPython*.

## Algorytm różnicowy

Algorytm różnicowy jest podstawowym automatycznym algorytmem działającym w pętli sprzężenia zwrotnego. Ideą jego działania jest utrzymywanie pozycji panelu słonecznego w taki sposób, aby uzyskać i utrzymać jak największą ilość padającego na niego światła. Dzięki temu możliwa jest stała optymalizacja pracy panelu, co z kolei przekłada się na większą ilość uzyskiwanej energii. Zasadą działania algorytmu różnicowego jest praca w oparciu o dane zbierane przez urządzenia pomiarowe – fotorezystory. Przyjęto po jednej parze czujników na każdą z osi: pionową i poziomą. Układ ten możemy więc podzielić na dwa mniejsze układy regulacji dla każdej osi.

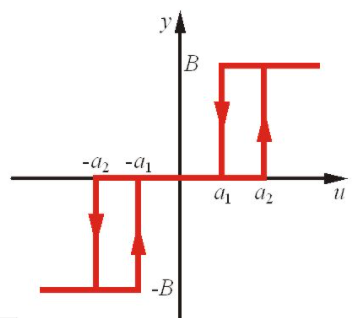
Największa produkcja energii elektrycznej jest wtedy gdy promienie świetlne padają prostopadle do płaszczyzny PV. W idealnym przypadku wskazania wszystkich fotorezystorów byłby więc jednakowe. W praktyce zerowa różnica wskazań powodowałoby ciągłą pracę układów napędowych, co generowałoby niepotrzebne straty energii. Ma to związek z określoną czułością fotodetektorów. Aby temu zapobiec wprowadzono histerezę. Algorytm regulacji różnicowej przedstawiono na rysunku 12.



***Rysunek 12.*** *Schemat blokowy przedstawiający zasadę działania układu.*

## Dobrany regulator

Serwonapęd sam w sobie jest zamkniętym układem regulacji. Do sterowania położeniem serw zaimplementowano w mikrokontrolerze dwa regulatory trójstanowe, mogący przyjmować stany: zmiany położenia w lewo, braku ruchu, zmiany położenia w prawo po jednym dla każdej osi (x,y). Taki regulator powoduje pracę krokową układu, ale w założeniu prędkość obrotu słońca jest niewielka. Nastawę histerezy przyjęto doświadczalnie.



***Rysunek 13.*** *Zasada działania histerezy.*

## Wybrane fragmenty programu

Poniższy kod programu zawiera funkcję obsługującą odczyt wartości napięcia z przetworników analogowo – cyfrowych z zastosowaniem softwarowego multipleksowania. Dla każdego czujnika wartość uśredniana jest z 1000 pomiarów.

1. def read\_ADC(photo\_resostor\_number):
2. mean=0
4. if photo\_resostor\_number == 1:
5. photo\_res\_1.on()
6. photo\_res\_2.off()
7. photo\_res\_3.off()
8. photo\_res\_4.off()
9. sleep(0.001)
10. for i in range (1,1000):
11. mean+=ADC\_0.read\_u16()/1000
13. return mean
15. if photo\_resostor\_number == 2:
16. photo\_res\_1.off()
17. photo\_res\_2.off()
18. photo\_res\_3.off()
19. photo\_res\_4.on()
20. sleep(0.001)
21. for i in range (1,1000):
22. mean+=ADC\_0.read\_u16()/1000
23. return mean
25. if photo\_resostor\_number == 3:
26. photo\_res\_1.off()
27. photo\_res\_2.off()
28. photo\_res\_3.on()
29. photo\_res\_4.off()
30. sleep(0.001)
31. for i in range (1,1000):
32. mean+=ADC\_1.read\_u16()/1000
34. return mean
36. if photo\_resostor\_number == 4:
37. photo\_res\_1.off()
38. photo\_res\_2.on()
39. photo\_res\_3.off()
40. photo\_res\_4.off()
41. sleep(0.001)
42. for i in range (1,1000):
43. mean+=ADC\_1.read\_u16()/1000
45. return mean
46. def check\_rotate(a,b,c,d):
47. global histerese
48. global position\_X
49. if (a+c-histerese) > (b+d):
50. if position\_X <  90:position\_X -=1
51. if (b+d-histerese) > (a+c):
52. if position\_X > -90:position\_X +=1
53. print('a+c',a+c,'   ?    b+d',b+d)
54. return 0
55. def check\_decline(a,b,c,d):
56. global histerese
57. global position\_Y
58. if (a+b-histerese) > (c+d):
59. if position\_Y <  90:position\_Y +=1
60. if (c+d-histerese) > (a+b):
61. if position\_Y >   0:position\_Y -=1
62. print('a+b',a+b,'   ?    c+d',c+d)
63. return 0
64. while True:
66. ph1=read\_ADC(1)
67. ph2=read\_ADC(2)
68. ph3=read\_ADC(3)
69. ph4=read\_ADC(4)
71. maximum = max\_value(ph1,ph2,ph3,ph4)
72. minimum = min\_value(ph1,ph2,ph3,ph4)
73. srednia = mean\_value(ph1,ph2,ph3,ph4)
74. rozstep = maximum - minimum
76. histerese = 800
78. check\_rotate(ph1,ph2,ph3,ph4)
79. check\_decline(ph1,ph2,ph3,ph4)
81. print('RES\_1',ph1)
82. print('RES\_2',ph2)
83. print('RES\_3',ph3)
84. print('RES\_4',ph4)
85. print('\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_')
86. print('srednia',srednia)
87. print('max    ',maximum)
88. print('min    ',minimum)
89. print('rozstep',rozstep)
90. print('\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_')
91. work\_rotate(position\_X)
92. work\_decline(position\_Y)

# Wnioski

Istnieje kilka metod sterowania położeniem panelu fotowoltanicznego. W niniejszej pracy zastosowano algorytm różnicowy. Badania modelu wykazały poprawność działania zaimplementowanego algorytmu. Dużą wadą tego rozwiązania jest fakt, że uszkodzenie jednego fotorezystora wprowadza duże zakłócenia pracy układu.

Zaproponowane przełożenie napędu osi poziomej wymaga przeprojektowania lub wykonania z bardziej odpornego na skręcanie materiału.

Gotowy model różni się nieco od projektu za sprawą finezji osób obsługujących drukarkę 3D, które do każdej części użyły innego koloru filamentu.

Układ może być w łatwy sposób rozbudowywany na wielu płaszczyznach.

## Możliwa rozbudowa i udoskonalenia układu

Układ zaprojektowano tak aby łatwo mógł być rozbudowywany. Pozostawione jeden wolny kanał przetwornika analogowo- cyfrowego może być w przyszłości wykorzystany do przyłączenia potencjometru którym zmieniana byłaby by wartość histerezy. Byłoby to bardzo edukacyjne rozwiązanie móc zaobserwować zachowanie układu zmieniając w trakcie jego pracy histerezę.

Warto w przyszłości rozbudować układ o algorytm sterowania zegarowego, wymaga to jednak dołączenia zegara czasu rzeczywistego.

W przypadku dalszych badań tego typu układów bardzo dobrym rozwiązaniem byłoby zaproponowanie wewnętrznego prowadzenia przewodów elektrycznych w osiach obrotu wykorzystując złącza rotacyjne. Umożliwiłoby to pozbycie się nieestetycznych i podatnych na uszkodzenia przewodów elektrycznych będących poza obrysem urzędzenia.

# Literatura

[1] Trzasko W.: Analiza wydajności dwuosiowego solarnego układu nadążnego. Pomiary Automatyka Robotyka Nr 1/2018

[2] <https://smartflower.com/>

[3] https://www.browndoggadgets.com/products/dual-axis-smart-solar-tracker

[4] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Serwomechanizm>

[5] <https://botland.com.pl/serwa-typu-medium/2303-serwo-powerhd-hd-1160a->medium-6953524540047.html

[6] <https://botland.com.pl/serwa-typu-micro/16561-serwo-okystar-sg-90-micro-180-5904422326159.html>

[7] <https://botland.com.pl/panele-sloneczne-malej-mocy/3695-ogniwo-sloneczne-07w55v-95x95x3mm-5904422302856.html>

[8] https://a.allegroimg.com/s720/1120e2/2acd76034f8f982e852ad468781e/Miernik-napiecia-amperomierz-0-100V-50A-Woltomierz