**POLITECHNIKA LUBELSKA**

**Wydział Mechaniczny**

**Kierunek Mechatronika**

****

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

**Model autonomicznego systemu fotowoltaicznego podążającego za słońcem**

**Model of an autonomous photovoltaic system following the sun**

Autor: Promotor:

**Wojciech Chruściel**  **Dr inż. Andrzej Kociubiński**

nr albumu: MEI 90400

**Lublin 2021**

SPIS TREŚCI

[1. Wstęp 3](#_Toc85478894)

[2. Cel i zakres pracy inżynierskiej 4](#_Toc85478895)

[3. Systemy Fotowoltaiczne 5](#_Toc85478896)

[3.1. Generatory PV 5](#_Toc85478897)

[3.1.1 Budowa modułu fotowoltaicznego 5](#_Toc85478898)

[3.1.2 Parametry ogniw PV 6](#_Toc85478899)

[3.2. Falowniki 7](#_Toc85478900)

[3.2.1 Falowniki transformatorowe 7](#_Toc85478901)

[3.2.2 Falowniki beztransformatorowe 8](#_Toc85478902)

[3.2.3 Inne podziały falowników 9](#_Toc85478903)

[3.3. Odbiorniki energii elektrycznej 9](#_Toc85478904)

[3.3.1 Instalacja podłączona do sieci 10](#_Toc85478905)

[3.3.2 Instalacja wyspowa 10](#_Toc85478906)

[4. Układy nadążne 11](#_Toc85478907)

[5. Zakończenie 12](#_Toc85478908)

[6. Literatura 13](#_Toc85478909)

[7. Streszczenie 14](#_Toc85478910)

# Wstęp

Wykonanie pracy dyplomowej powinno ukształtować umiejętności oceny dorobku teoretycznego w danej dziedzinie, samodzielnego poszukiwania materiałów źródłowych w istniejących opracowaniach naukowych, projektowania nowych rozwiązań lub modyfikacji istniejących, stosowania odpowiedniego warsztatu badawczego, a w szczególności stosowania metod pracy naukowej, czynnego posługiwania się nabytą w czasie studiów wiedzą i wykorzystaniem jej w zastosowaniach praktycznych lub do wnioskowania teoretycznego, formułowania właściwych wniosków, prowadzenia logicznego toku wywodów, posługiwania się jasnym i precyzyjnym językiem dla danej dyscypliny.

# Cel i zakres pracy inżynierskiej

Cel pracy: Wykazanie efektywności zastosowania systemu realizującego operacje podążania za słońcem dla ogniw słonecznych w celu uzyskania jak największej ilości energii elektrycznej.

Zakres pracy:

1. Przegląd literatury i źródeł internetowych związanych z uzyskiwaniem energii przy użyciu paneli fotowoltaicznych oraz ich efektywności
2. Projekt modelu autonomicznego systemu podążającego za słońcem sterowanego przez mikrokontroler Arduino
3. Wykonanie rzeczywiste

obejmuje przedstawienie zasady działania ogniw słonecznych, ich podstawowych parametrów oraz możliwości zastosowania w celu jak najefektywniejszej przemiany energii słonecznej w energię elektryczną. W dalszej części pracy opisano projekt modelu autonomicznego systemu podążającego za słońcem sterowanego przez mikrokontroler Arduino. W następnych rozdziałach opisano budowę i zasadę działania systemu nadążnego. Następnie skupiono się na własnych wynikach badań oraz sporządzeniu dziennych i godzinowych charakterystyk energii oraz mocy.

# Systemy Fotowoltaiczne

Systemem fotowoltaicznym nazywa się elektrownię słoneczną zamieniającą energię słoneczną w energię elektryczną przy wykorzystaniu modułów fotowoltaicznych. Instalacje fotowoltaiczne oprócz samych modułów PV muszą spełniać również funkcję magazynującą, transformującą, przesyłającą oraz kontrolującą uzyskaną energie. Każdy system fotowoltaiczny składa się z generatora PV zbudowanego z zestawu modułów PV, falownika zmieniającego wytworzone przez generator PV napięcie stałe na napięcie przemienne (którego napięcie oraz częstotliwość odpowiada napięciu sieci obiektu do którego zainstalowano system fotowoltaiczny), przyłącza do sieci energetycznej w przypadku instalacji typu on-grid, magazynów energii w postaci akumulatorów w przypadku instalacji typu off-grid lub obu w przypadku instalacji hybrydowych [2]. Schemat przedstawiający podział systemu fotowoltaicznego na elementy składowe wykorzystywane w obu konfiguracjach (on-grid i off-grid) został przedstawiony na rysunku 3.1.

## Generatory PV

Każdy moduł PV zbudowany jest z zestawu szeregowo połączonych ogniw fotowoltaicznych [1]. Generacja prądu elektrycznego w ogniwach fotowoltaicznych możliwa jest dzięki efektowi fotowoltaicznemu, polegającemu na powstawaniu siły elektromotorycznej pod wpływem padających na ciało stałe fotonów (promieniowania świetlneg). Samo zjawisko fotowoltaiczne opiera się na efekcie fotoelektrycznym wewnętrznym [2]. Pod wpływem promieniowania słonecznego (fotonów o dużej częstotliwości promieniowania), elektrony są wybijane z orbit atomowych co skutkuje tworzeniem nadmiarowego ładunku nośników prądu elektrycznego wewnątrz półprzewodnika z którego zbudowane jest ogniwo fotowoltaiczne.

### Budowa modułu fotowoltaicznego

Konstrukcja modułu PV oprócz samej zamiany energii słonecznej na elektryczną musi zapewniać modułowi również zabezpieczenie przed warunkami zewnętrznymi, umożliwiać prosty montaż w docelowej lokalizacji oraz utrzymywać nieprzerwane połączenie mechaniczne oraz elektryczne ogniw składających się na pojedynczy moduł PV. Budowa typowego modułu fotowoltaicznego opartego na ogniwach z krzemu krystalicznego została przedstawiona na rysunku 3.2.

Głównym elementem składowym modułu PV zapewniającym ochronę mechaniczną i nadającym sztywność konstrukcji jest szyba hartowana. Szyba zapewniać ma odpowiednie właściwości optyczne tzn. takie które zmniejszą odbicia światła w zakresie długości fal odpowiadającym za fotokonwersję. W celu zapewnienia warstwie antyrefleksyjnej odpowiednio niskiego współczynnika odbicia stosuje zamiast zwykłego szkła np. szkło borokrzemowe lub teksturyzuje się powierzchnie szyb. Rozwiązania te mają jednak swoje wady w postaci wysokich kosztów produkcji oraz odkładania się brudu w zagłębieniach teksturyzowanych powierzchni [2].

Zabezpieczenie przed wpływem środowiska oraz długotrwałym naświetleniem światłem słonecznym zapewnia również folia polimerowa EVA (ang. *ethylene-vinyl acetate*). Do zabezpieczenia modułu przed przegrzaniem wykorzystuje się folie poliwinylową umieszczaną od spodu modułu PV o maksymalnej temperaturze pracy równej 190°C [2].

Skrzynka przyłączeniowa znajdująca się zwykle na spodniej części modułu służy do łączenia modułów składowych instalacji fotowoltaicznej poprzez znajdujące się w niej wyprowadzenia przewodów, a także zawiera w sobie terminale oraz bezpieczniki.

### Parametry ogniw PV

O podstawowych parametrach każdego modułu fotowoltaicznego mówi jego charakterystyka prądowo-napięciowa (I-V). Na charakterystyce prądowo-napięciowej wyróżnia się cztery podstawowe parametry elektryczne modułu oraz jeden punkt charakterystyczny [1]. Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa dowolnego modułu fotowoltaicznego została przedstawiona na rysunku 3.5.

Pierwszą wyróżnioną na rysunku 3.5 wielkością jest prąd zwarcia oznaczany *ISC*. Wielkość ta opisuje wartość prądu płynącego przez panel fotowoltaiczny w momencie zwarcia obu biegunów modułu fotowoltaicznego, czyli przy rezystancji obciążenia równej 0 Ω. Drugą wielkością charakterystyczną jest napięcie obwodu otwartego oznaczane *UOC*. Napięcie to występuję na zaciskach danego modułu w momencie pomiaru bez jakiegokolwiek obciążenia, czyli rezystancji dążącej do nieskończoności. Zgodnie z charakterystyką przedstawioną na rysunku 3.5 oraz zależnością na moc elektryczną ze wzoru 3.1, widać że w warunkach zwarcia oraz obwodu otwartego modułu PV, uzyskiwana moc jest równa zeru.

(3.1)

Dwoma pozostałymi wielkościami bezpośrednio związanymi ze wspomnianym punktem charakterystyki prądowo-napięciowej są prąd oraz napięcie nominalne oznaczane kolejno *IMPP* oraz *UMPP*. Wartości prądu oraz napięcia równe prądowi oraz napięciu nominalnemu generowane są przy takim obciążeniu, które zapewnia uzyskanie maksymalnej możliwe mocy przy danych warunkach zewnętrznych. Sam punkt charakterystyczny MPP (ang. *Maximum Power Point*) nazywany jest punktem mocy maksymalnej jest punktem na charakterystyce o odciętej równej napięciu nominalnemu oraz rzędnej równej prądowi nominalnemu. Maksymalną moc uzyskiwaną z danego modułu fotowoltaicznego oblicza się ze wzoru 3.2 [1][2][3].

(3.2)

Współczynnikiem który łącze ze sobą wszystkie wymienione parametry danego ogniwa PV jest współczynnik wypełnienia charakterystyki oznaczany *FF* (ang. *Fill Factor*) [3]. Współczynnika wypełniania oblicza się ze wzoru 3.3.

(3.3)

Współczynnik *FF* określa bezpośrednio procent maksymalnej mocy uzyskiwanej z danego ogniwa do pozornej mocy maksymalnej będącej iloczynem prądu zwarcia oraz napięcia obwodu otwartego. Współczynnik wypełnienia określa również jakość danego ogniwa co bezpośrednio sprowadza się do przypisania mu jednej z trzech klas: A – ogniwa bez skazy o *FF* większym niż 75%, B – ogniwa z małymi skazami o *FF* w przedziale 70÷75% oraz klasa C – ogniwa z dużymi skazami o *FF* w przedziale 60÷70% [3].

## Falowniki

Uzyskana energia przy pomocy modułów PV nie nadaje się bezpośrednio do podłączenia pod sieć energetyczną, dlatego kluczowe jest przekształcenie prądu stałego płynącego w generatorze PV do postaci prądu przemiennego, którego parametry są zgodne z siecią energetyczną (w Polsce napięcie 230 V oraz częstotliwość 50 Hz) [3]. Urządzeniem które przekształca energię uzyskaną z generatora PV jest falownik (*ang. inverter*). Sam falownik oprócz swojej podstawowej funkcji transformującej energię, odpowiedzialny jest również za kontrolę i prowadzenie statystyk energii produkowanej przez system fotowoltaiczny. Podziału dostępnych na rynku falowników można dokonać według różnych kryteriów: ze względu na sposób współpracy z siecią (wyspowe, sieciowe oraz hybrydowe), ze względu na budowę wewnętrzną (transformatorowe oraz beztransformatorowe) oraz ze względu na wielkość (mikrofalowniki, falowniki szeregowe oraz falowniki centralne) [1][3]. Wygląd zewnętrzny falownika beztransformatorowego oraz transformatorowego został przedstawiony na rysunku 3.6.

### Falowniki transformatorowe

Schemat ideowy budowy falownika transformatorowego „wysokiej częstotliwości” *HF* został przedstawiony na rysunku 3.3.

Na wejściu falowników *HF* znajdują się układy stabilizujące poziom napięcia, elektroniczne moduły śledzenia punktu mocy maksymalnej *MPPT* (ang. *Maximum Power Point Tracking*) których zadaniem jest obciążenie modułów w generatorze PV w taki sposób, aby generowały największą moc oraz zabezpieczenia wejściowe w postaci bezpieczników i ograniczników [1]. Zadaniem przetwornicy DC/AC jest przekształcenie prądu stałego na wejściu do przemiennego o przebiegu prostokątnym dużej częstotliwości. Dzięki tej operacji możliwa jest praca transformatora z częstotliwością 20÷24 kHz [3]. Układ prostowniczy ponownie wyprostowuje prąd o przebiegu prostokątnym, który następnie jest przekształcany w mostku kluczy półprzewodnikowych (ang. *H-Bridge*) do oczekiwanego na wyjściu prądu o przebiegu sinusoidalnym. Sam mostek H jest najważniejszym elementem składowym każdego falownika, ponieważ to on bez względu na sygnał wejściowy wytwarza odpowiedni sygnał wyjściowy. Na wyjściu falownika instalowane są również układy filtrujące zbudowane z dławików i kondensatorów których celem jest wyeliminowanie zakłóceń . Kontrolę nad sterowaniem oraz odpowiednią pracą falownika sprawują elektroniczne układy sterujące i monitorujące parametry pracy falownika oraz ilość wyprodukowanej energii. W przypadku falowników transformatorowych *„niskiej częstotliwości” LF*, w ich budowie nie występuje przetwornica DC/AC oraz pośredni układ prostowniczy, a miejsce transformatora pracującego z częstotliwością 50 Hz jest na końcu falownika, tuż za filtrami sieciowymi [3]. Schemat przestawiający budowę falownika transformatorowego *LF* został przedstawiony na rysunku 3.4.

Falownik transformatorowy *LF* w porównaniu z *HF* wyróżnia się mniejszą sprawnością, większą wagą oraz rozmiarem, ale jest także mniej awaryjny oraz prostszy w budowie. Wadą jest falownika transformatorowego *HF* jest bardziej złożona budowa niż w przypadku *LF* ze względu na dwustopniowy układ zamieniający napięcie stałe w przemienne prostokątne, następnie prostujący sygnał prostokątny oraz ponownie zamieniający napięcie stałe w przemienne sinusoidalne [1][3].

### Falowniki beztransformatorowe

Urządzeniami łączącymi zalety obu typów falowników transformatorowych są falowniki beztransformatorowe. Budowa falownika beztransformatorowego została przedstawiona na rysunku 3.5

Budowa falownika beztransformatorowego ogranicza się do układów wejściowych, mostka H, układów wyjściowych, oraz układów sterujących. Falowniki beztransformatorowe ze względu na swoją budowę są lżejsze, tańsze, cechują się wysoką sprawnością w bardzo szerokim zakresie obciążenia. Wadą układów beztransformatorowych jest brak separacji galwanicznej strony AC od strony DC. Ze względu na swoje zalety falowniki beztransformatorowe są najczęściej wybierane przez projektantów systemów fotowoltaicznych [1].

### Inne podziały falowników

Przy podziale falowników ze względu na sposób współpracy z siecią wyróżnia się falowniki wyspowe, sieciowe oraz hybrydowe. Urządzenia wyspowe nie oddają energii bezpośrednio do sieci energetycznej, jednak dostarczają energie do sieci lokalnej, a jej nadwyżką ładują akumulatory. W przypadku falowników sieciowych, układ zsynchronizowany jest z siecią energetyczną. Instalacje hybrydowe mogą działać jednocześnie jako sieciowe i wyspowe.

Falowniki w zależności od mocy nominalnej oraz sposobu połączenia dzielimy na mikrofalowniki, falowniki szeregowe i falowniki centralne. Koncepcja wymienionych typów falowników została przedstawiona na rysunku 3.7.

Mikrofalowniki mogą współpracować z jednym modułem fotowoltaicznym o mocy ok. 0,3 kW, falowniki szeregowe z szeregiem modułów od mocy łącznej od 1 do 50 kW, a falowniki centralne obsługują całe farmy fotowoltaiczne o dużych mocach.

## Odbiorniki energii elektrycznej

Kluczowym elementem składowym zapewniającym funkcjonalność systemowi fotowoltaicznemu jest miejsce gdzie wykorzystana będzie energia elektryczna wytworzona przez generator PV. Wyróżnia się trzy podstawowe typy instalacji fotowoltaicznych przy podziale ze względu na dołączone do niej odbiorniki: instalacje sieciowe, instalacje autonomiczne (inaczej „wyspowe”) oraz instalacje hybrydowe będą połączeniem dwóch pierwszych [3].

### Instalacja podłączona do sieci

W przypadku instalacji podłączonej do zewnętrznej sieci energetycznej, nazywanej *ON-GRID*, energia wprowadzana jest do wewnętrznej sieci budynku wraz z możliwością doprowadzenia energii do zewnętrznej sieci publicznej. Podpodział systemów sieciowych realizowany jest poprzez kryterium stosowanych falowników i został przedstawiony w rozdziale 3.2.3 [3]. Przeważającą część montowanych instalacji fotowoltaicznych na świecie są to instalacje sieciowe. Wynika to bezpośrednio z braku konieczności stosowania akumulatorów w instalacji sieciowej co przekłada się na mniejszy koszt tego typu instalacji [1]. Schemat ideowy instalacji sieciowej został przedstawiony na rysunku 3.8.

Kluczowym aspektem systemu sieciowego jest zaznaczony na rysunku 3.8 możliwy przepływ prądu do sieci elektroenergetycznej w obu kierunkach. Prąd stały produkowany przez generator PV zamieniany jest na prąd przemienny w falowniku sieciowym, a następnie przetransformowany prąd wykorzystywany jest w instalacji domowej wraz z prądem z sieci elektroenergetycznej [1]. Nadwyżka wyprodukowanej energii przez system fotowoltaiczny w instalacji sieciowej może być odsprzedana dostawcy energii. Zgodnie z wykresem przedstawionym na rysunku 3.9 pokazującym zapotrzebowanie budynku na moc w odniesieniu do mocy produkowanej przez instalację fotowoltaiczną, widać brak synchronizacji zapotrzebowania energetycznego budynku oraz produkcji przydomowej elektrowni słonecznej.

Z powodu braku synchronizacji tych dwóch wielkości korzystna jest współpraca posiadacza instalacji fotowoltaicznej z dostawcą energii elektrycznej. Gdy moc instalacji PV przewyższa zapotrzebowanie mocy budynku, energie jest odsprzedawana do dostawcy oraz analogicznie gdy zapotrzebowanie mocy budynku przewyższa moc instalacji PV, energia do zasilania instalacji domowej pobierana jest z sieci energetycznej. Wadą instalacji sieciowej jest jej nieaktywność w przypadku awarii sieci energetycznej, nawet gdy warunki słoneczne pozwalają na zasilenie instalacji domowej tylko poprzez system fotowoltaiczny [1]. Sprowadza się to do stwierdzenia że system w konfiguracji sieciowej jest całkowicie zależy od zewnętrznego dostawcy energii.

### Instalacja wyspowa

Innym typem instalacji PV jest instalacja autonomiczna, nazywana również wyspową. Schemat ideowy instalacji wyspowej został przedstawiony na rysunku 3.10.

Schemat ideowy instalacji wyspowej na rysunku 3.10 poza zmianą rodzaju falownika na przetwornicę DC/AC, wzbogacony jest o jeden kluczowy element względem schematu instalacji sieciowej przedstawionego na rysunku 3.8 i jest nim akumulator, czyli magazyn energii. Generator PV dla instalacji wyspowej nie będzie przekazywał energii do sieci elektroenergetycznej, a będzie ona wykorzystywana od razu w instalacji domowej lub gromadzona w akumulatorach. W instalacji wyspowej istnieje możliwość podłączenia falownika do sieci energetycznej, jednak w przeciwieństwie do instalacji wyspowej, możliwy jest jedynie przepływ prądu z sieci do falownika, a nie w obie strony. Energia dostarczona z sieci do falownika wykorzystywana jest jako awaryjne doładowanie akumulatorów [1].

Jako magazyny wyprodukowanej energii w instalacjach wyspowych stosuje się akumulatory, które generują największe koszty przy instalacji systemu wyspowego. Do typowych akumulatorów stosowanych w instalacjach fotowoltaicznych zaliczamy np. akumulatory kwasowo-ołowiowe lub akumulatory żelowe [2]. Zmagazynowana w akumulatorach energia wykorzystywana jest w sieci domowej w momencie niewystarczającego poziomu produkowanej chwilowo energii elektrycznej. Aby możliwa była poprawna oraz długa praca zastosowanych akumulatorów potrzebne jest urządzenie nazywane regulatorem ładowania [1][2][3]. Do podstawowych zadań regulatora należy:

* Ochrona akumulatora przed przeładowaniem i rozładowaniem
* Sterowanie szybkością ładowania
* Stabilizacja napięcia
* Zasilanie podłączonych odbiorników
* Współpraca z urządzeniami zewnętrznymi (np. czujnikami)
* Śledzenie punktu MPP (dla regulatorów MPPT)

Regulatory ładowania pracują zwykle z napięciem nominalnym 12 V lub 24 V. Wybór regulatora dyktowany jest nie tylko napięciem przy jakim ma pracować, ale również rodzajem akumulatora przy którym ma pracować [1].

# Układy nadążne

# Zakończenie

# Literatura

1. Szymański B.: Instalacje fotowoltaiczne. GLOBENERGIA., Kraków 2017.

2. Sibiński M., Znajdek K.: Przyrządy i instalacje fotowoltaiczne. PWN., Warszawa 2016.

3. Sarniak M.: Systemy fotowoltaiczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2019

4. Monk S.: Arduino dla początkujących. Podstawy i szkice. Helion., Gliwice 2019

5. Cieślak J.: Półprzewodnikowe elementy optoelektroniczne., Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej., Warszawa 1981.

# Streszczenie