Opole, 16 marzec 2016

Prof. dr hab. inż. Tomasz BOCZAR, prof. zw. PO
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej
Katedra Wysokich Napięć

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 22-03-2016
DZIEKAN
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. PP

# Recenzja
# rozprawy doktorskiej mgra inż. Artura Bugały
# pt. *„Analiza efektywności konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną w wyniku stosowania układów nadążnych dla warunków klimatycznych Polski"*

## Podstawa formalna wykonania recenzji:

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana dr hab. inż. Zbigniewa NADOLNEGO, prof. nadzw. PP, zgodnie z uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej w Poznaniu, z dnia 26 stycznia 2015.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Grażyna JASTRZĘBSKA.

## 1. Ocena aktualności podjętej tematyki

W ostatniej dekadzie energetyka słoneczna i wiatrowa stanowią dwa najbardziej dynamicznie rozwijające się rodzaje odnawialnych źródeł wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej i cieplnej. W chwili obecnej dynamika przyrostu nowych mocy wytwórczych zainstalowanych w instalacjach fotowoltaicznych i elektrowniach wiatrowych przewyższyła w krajach członkowskich UE rozwój konwencjonalnych źródeł energii. Biorąc pod uwagę aktualne trendy rozwojowe eksperci International Renewable Energy Agency uważają, że do 2020 r. energetyka wiatrowa i słoneczna będą produkowały podobną ilość energii co hydroenergetyka, a udział odnawialnych źródeł energii w bilansie energetycznym świata zwiększy się z obecnych 9% do ponad 20%.

Z raportu Instytutu Fraunhofer ISE zatytułowanego *„Current and Future Cost of Photovoltaics"* wynika, że w już 2025 roku fotowoltaika będzie najtańszym źródłem pozyskiwania energii elektrycznej, przy prognozowanym jednostkowym koszcie jej wytworzenia w krajach środkowej i południowej Europy ok. 4-6 eurocentów/kWh, a który dodatkowo według przyjętych założeń zmniejszy się do poziomu ok. 2-4 eurocenty/kWh w 2050 roku. Według Global Solar Council i Solar Power Europe Association łączna moc zainstalowanych na świecie ogniw słonecznych do końca bieżącego roku będzie wynosić ponad 300 GW, a produkowana w ten sposób energia elektryczna będzie w stanie zaspokoić ok. 1 % światowego zapotrzebowania energetycznego. Rozwój energetyki słonecznej, w tym fotowoltaiki, zauważalny jest również w Polsce, gdzie sumaryczna moc zainstalowana w 268 elektrowniach solarnych podłączonych do polskiego systemu elektroenergetycznego wynosi 71 MW (stan na 15 marca 2016, według danych URE), a pod względem wielkości

sprzedanych ogniw fotowoltaicznych w 2015 roku na rynku krajów UE znajdowaliśmy się na drugim miejscu za Niemcami.

Obecnie prowadzone na świecie prace naukowe i badawczo-rozwojowe dotyczące ogólnie rozumianej konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną koncentrują się m.in. na: zwiększeniu sprawności i eliminowaniu czynników zewnętrznych, które mogą mieć wpływ na sprawność przetwarzania produkowanych modułów fotowoltaicznych (kolejne generacje ogniw: I, II, III; ogniwa wielozłączowe – Sharpa; Quantum dot cells; Double bifacial solar panels), zastosowaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych i stosowanych materiałów (np. ogniwa z perwoskitów), doskonaleniu technologii i zmniejszeniu kosztów ich wytwarzania z jednoczesnym dopasowaniem do lokalnych warunków klimatycznych, wydłużenia czasu ich bezawaryjnej eksploatacji, doskonalenia możliwości wykorzystania instalacji hybrydowych, zastosowania układów zwierciadlanych i soczewkowych w celu ogniskowania i tym samym zwiększenia stopnia koncentracji wiązki promieniowania słonecznego (CPV-Concentrated Photovoltaics i HCPV- High Concentration Photovoltaic), rozwiązaniu problemu skutecznego obniżania temperatury ogniw i związanego z tym doborem skutecznego sposobu ich chłodzenia. Ponadto prowadzone są badania związane z doborem rozwiązań i parametrów zwiększających efektywność instalacji fotowoltaicznych nadążnych za słońcem. W tym zakresie doskonalone są algorytmy i systemy sterujące ruchem modułów, optymalizujące kąty przestrzennego ustawienia fotoogniw (kąt pochylenia i azymutu), a tym samym zwiększające dostępności promieniowania słonecznego na ich powierzchni roboczej.

Dlatego założone w rozprawie cele i podjęta w rozprawie tematyka, które poświęcone są przeprowadzeniu kompleksowych, usystematyzowanych i wielowariantowych badań oraz analiz zmierzających do wykonania kompleksowej oceny zasadności, pod względem efektywności energetycznej i rachunku ekonomicznego, stosowania układów nadążnych przestrzennego pozycjonowania modułów fotowoltaicznych dla warunków klimatycznych charakterystycznych dla obszaru Polski, są aktualne i ważne pod względem merytorycznym. W mojej ocenie uzyskane w ramach realizacji rozprawy wyniki mają duże znaczenie naukowe i poznawcze, a także mogą znaleźć implementację techniczną w szeroko rozumianej energetyce słonecznej. Należy również podkreślić, że otrzymane rezultaty mogą zostać wykorzystane w procesie podejmowania decyzji inwestycyjnych, głównie przez osoby indywidualne, w zakresie wykorzystania instalacji fotowoltaicznych.

## 2. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska mgra inż. Artura BUGAŁY jest bardzo obszerna, ponieważ liczy aż 387 stron. Składa się z 12 rozdziałów głównych obejmujących 196 stron, streszczeń w języku polskim i angielskim, spisu tabel i rysunków, wykazu załączników i wykorzystanych w pracy oznaczeń oraz skrótów - bardzo użytecznego ze względu na ich dużą liczbę – a także spisu literatury zawierającego 246 pozycji opublikowanych w formie papierowej oraz 16 adresów stron internetowych. Na podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorant jest współautorem, aż 23 cytowanych pozycji, w tym artykułów naukowych publikowanych m.in. w: Energies (1) - lista filadelfijska, Przeglądzie Elektrotechnicznym (5) oraz w Wiadomościach Elektrotechnicznych (2), co pośrednio świadczy o wysokim poziomie i wartości merytorycznej rezultatów uzyskanych w ramach realizacji recenzowanej dysertacji.

W mojej ocenie przegląd doniesień literaturowych, który jest bardzo obszerny, został przygotowany rzetelnie, jest wystarczający i zawiera wiele aktualnych pozycji

obcojęzycznych zarówno z zakresu elektroenergetyki, a w szczególności dotyczących problematyki pozyskiwania energii słonecznej dla potrzeb produkcji energii elektrycznej, ale również związanych z rachunkiem ekonomicznym i oceną opłacalności inwestycyjnej, a także z szeroko pojętą statystyką oraz modelowaniem matematycznym. Treść rozprawy została poszerzona o sześć załączników, które w znacznym stopniu uzupełniają bardzo szeroką bazę wyników dwuletnich pomiarów i ich wielowariantowych analiz przeprowadzonych przez Doktoranta.

Rozdział **pierwszy** stanowi ogólne wprowadzenie do zaproponowanej w pracy tematyki. W rozdziale tym brakuje mi bardziej szczegółowego i jednoznacznego uzasadnienia wyboru podjętej problematyki oraz przedstawienia genezy wykonanych prac naukowo-badawczych.

W rozdziale **drugim** zostały przedstawione podstawowe cele rozprawy, został określony jej zakres, a przede wszystkim Doktorant sformułował dwie następujące tezy:

1. *Zaznacza się silny wpływ warunków zewnętrznych: geograficznych i czasowych na dostępność energii promieniowania słonecznego, co w znacznej mierze możliwe jest do zniwelowania w wyniku zmiany orientacji przestrzennej odbiornika.*
2. *Zastosowanie rozwiązań nadążnych w układach fotowoltaicznych zwiększa efektywność konwersji energii słonecznej w elektryczną i jest ekonomicznie uzasadnione, także w warunkach klimatycznych Polski.*

W moim przekonaniu Doktorant prawidłowo i w sposób przemyślany sformułował tezy rozprawy, które następnie konsekwentnie, w logicznym ciągu pracy udowodnił.

Uważam jednak, że w pierwszej tezie można byłoby użyć wyrażeń ściśle technicznych i bardziej precyzyjnych, w miejsce następujących sformułowań: *„zaznacza się silny wpływ"* i *„co w znacznej mierze możliwe jest do zniwelowania"*, a także *„odbiornika"* (uszczegółowić: np. fotoodbiornika, odbiornika fotowoltaicznego czy modułu fotowoltaicznego). Ponadto, w moim odczuciu, w obecnej formie teza ta wydaje się dosyć oczywista. W celu podkreślenia aspektu naukowo-poznawczego rozprawy można było tezę tą powiązać z doborem optymalnego modelu matematycznego opisującego rozkład promieniowania słonecznego na dowolnie zorientowanej kątowo płaszczyźnie fotoodbiornika dla warunków klimatycznych Polski, ponieważ zagadnieniom tym poświęcono znaczną część dysertacji, a uzyskane w tym zakresie wyniki uważam za duże osiągnięcie Doktoranta.

Rozdział **trzeci** ma charakter przeglądowy, w którym Doktorant w sposób bardzo szczegółowy przedstawił aktualny stan rozpatrywanych w rozprawie zagadnień tematycznych zarówno w Polsce, jak również na świecie. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu doniesień literaturowych zostały scharakteryzowane modele matematyczne wykorzystywane do opisu wielkości natężenia promieniowania słonecznego na dowolnie zorientowanej płaszczyźnie fotoodbiornika. Następnie przedstawiono wykorzystywane obecnie sposoby doboru optymalnej wartości kątów ustawienia przestrzennego odbiorników fotowoltaicznych, mając na uwadze maksymalizację efektywności przetwarzania energii słonecznej na elektryczną. W rozdziale 3.3 scharakteryzowano mające aktualnie zastosowanie jedno- i dwuosiowe fotowoltaiczne układy nadążne, a w rozdziale 3.4 przedstawiono inne metody zwiększenia efektywności pracy ogniw fotowoltaicznych. Należy przy tym podkreślić, że Doktorant, powołując się każdorazowo na adekwatne cytowania literaturowe, przedstawił w sposób jednoznaczny wady, zalety i ograniczenia w praktycznym zastosowaniu każdego z opisywanych modeli izotropowych, anizotropowych oraz pseudoizotropowych, a także rozwiązań konstrukcyjno-technicznych układów nadążnych.

Tematyka podjęta w rozdziale ***czwartym*** dotyczy problemu modelowania promieniowania słonecznego na dowolnie zorientowanej przestrzennie płaszczyźnie fotoodbiornika. W szczególności zostały zaprezentowane w formie graficznej dane źródłowe dotyczące wielkości gęstości mocy promieniowania słonecznego na płaszczyźnie horyzontalnej dla miasta Poznań, które były następnie wykorzystywane podczas dokonywanych przez Doktoranta obliczeń z wykorzystaniem zaproponowanych i scharakteryzowanych w rozdz. 4.2 modeli matematycznych. W rozdziale 4.3 przedstawiono cel i zakres zaproponowanej modyfikacji izotropowego modelu Liu-Jordana, a także sposób wyznaczania wartości współczynników korekcyjnych składowej dyfuzyjnej dla określonego kąta pochylenia płaszczyzny modułu fotoelektrycznego dla warunków polskich. Natomiast w rozdz. 4.4 przedstawiono w formie tabelarycznej (tabl. 4.3), a następnie omówiono wyniki przeprowadzonych analiz statystycznych z wykorzystaniem wartości: błędu średniokwadratowego, błędu średniego oraz współczynnika korelacji Pearsona, które wykonano w celu oceny stopnia przeszacowania lub odpowiednio niedoszacowania wartości natężenia promieniowania słonecznego wyznaczonych na podstawie wybranych modeli matematycznych w stosunku do wartości uzyskanych z pomiarów.

W rozdziale ***piątym*** przedstawiono zagadnienia związane z oceną wpływu wybranych parametrów charakteryzujących warunki meteorologiczne na wielkość produkcji energii elektrycznej w układach fotowoltaicznych. W tym zakresie, w kolejnych podrozdziałach, scharakteryzowano sposób wyboru uzyskanych danych pomiarowych, które zostały następnie wykorzystane w przeprowadzonych analizach statystycznych (rozdz. 5.3) i przy doborze sztucznej sieci neuronowej (rozdz. 5.4). Ich celem było określenie wpływu wybranych czynników zewnętrznych na wielkość produkowanej energii elektrycznej przez badany moduł fotowoltaiczny w układzie dwuosiowo nadążnym. Uzyskane wyniki przedstawiono w zbiorczej tabeli oraz w formie diagramów punktowych, a także reprezentatywnych przebiegów czasowych wielkości irradiacji. Ponadto w celach porównawczych zamieszczono wykresy słupkowe obrazujące wielkość dobowej produkcji energii elektrycznej, dla wybranych dni roku, dla układu stacjonarnego nadążnego dwuosiowego. Zamieszczono również zestawienia tabelaryczne uwzględniające istotność poszczególnych wielkości wejściowych i parametry jakościowe charakteryzujące opracowany model prognostyczny oparty na sztucznej sieci neuronowej. Natomiast w rozdz. 5.5 określono wpływ zmiany wartości temperatury pracy ogniw fotowoltaicznych na wartość produkowanej energii elektrycznej. Jako wyniki zaprezentowano charakterystyki prądowo-napięciowe i mocy w funkcji napięcia, obliczone dla różnych wartości irradiacji, które wyznaczono na podstawie wyników symulacji wykonanych w programie Matlab dla dwudiodowego układu zastępczego ogniwa fotowoltaicznego.

W rozdziale **szóstym** przedstawiono wyniki analizy porównawczej charakterystyk prądowo-napięciowych i obciążenia wybranych modułów fotowoltaicznych poli- i monokrystalicznych, które otrzymano na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych oraz pomiarów wykonanych w warunkach naturalnego promieniowania słonecznego na przygotowanym przez Doktoranta stanowisku badawczym.

W rozdziale **siódmym** Doktorant przedstawił sposób wykonania, wykorzystanych podczas badań porównawczych, stanowisk pomiarowych. W szczególności został scharakteryzowany sposób realizacji i opisane poszczególne elementy składowe zbudowanych układów: nadążnego jednoosiowego wykorzystującego czujnik diodowy i obrotnicę mechaniczną, stacjonarnego (rozdz. 7.1) oraz nadążnego dwuosiowego, działającego w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego (rozdz. 7.2). Opis zastosowanych rozwiązań został uzupełniony materiałem fotograficznym, a także grafikami przedstawiającymi komputerowe wizualizacje projektowanych elementów. Przy czym,

największą uwagę w tym zakresie poświęcono charakterystyce układu nadążnego dwuosiowego.

Tematyka rozdziału **ósmego** dotyczy opracowania bilansu energetycznego, który wykonano w celach porównawczych dla układu jednoosiowego nadążnego i stacjonarnego (rozdz. 8.1) wyposażonych w polikrystaliczne moduły fotowoltaiczne oraz odpowiednio dwuosiowego układu nadążnego i układu stacjonarnego (rozdz. 8.2). W tym zakresie przedstawiono charakterystyki prądowo-napięciowe i obciążenia oraz zależności czasowe dobowej oraz skumulowanej energii elektrycznej produkowanej przez porównywane konfiguracje modułów fotowoltaicznych stacjonarne i nadążne jednoosiowo. Na podkreślenie zasługuje sformułowanie przez Doktoranta szeregu istotnych z punktu widzenia poznawczego oraz implementacyjnego wniosków dotyczących ograniczeń i wad zastosowanego sterowania różnicowego w układzie nadążnym jednoosiowym. Natomiast dla układu stacjonarnego i nadążnego dwuosiowego zaprezentowane zostały, reprezentatywne dla dni słonecznych oraz pochmurnych, wykresy obrazujące zmienność dobową, a także wartości średnie wielkości produkowanej energii elektrycznej z dodatkowym uwzględnieniem wartości średnich godzin słonecznych. Na podstawie analizy uzyskanych wyników pomiarowych zostały sformułowane wnioski związane z oceną opłacalności energetycznej stosowania układów automatycznego pozycjonowania fotoodbiorników, które określono oddzielnie dla różnych warunków pogodowych. Dodatkowo w rozdz. 8.2.2 przedstawiono rezultaty analiz porównawczych zależności zmian wielkości produkcji elektrycznej w ujęciu miesięcznym, które powiązano ze zmianami dobowego nasłonecznienia na obu płaszczyznach pomiarowych, dla układu stacjonarnego i nadążnego w konfiguracji dwuosiowej. Przy czym charakterystyki zostały wyznaczone oddzielnie z i bez uwzględnienia wielkości energii elektrycznej niezbędnej do zasilania układów napędowych i poprawnego działania układu nadążnego. Natomiast w rozdz. 8.2.3 Doktorant w sposób syntetyczny przedstawił wyniki analizy porównawczej wielkości rocznej produkcji energii elektrycznej przez moduł fotowoltaiczny w konfiguracji nadążnej dwuosiowej i stacjonarnej. W szczególności w ujęciu tabelarycznym zostały porównane wyniki otrzymane dla badanych układów w postaci procentowego uzysku energetycznego oraz wartości produkowanej energii elektrycznej, w ujęciu netto i brutto. Ponadto zostały przedstawiono wykresy obrazujące zmienność produkowanej energii elektrycznej przez badane moduły fotowoltaiczne w konfiguracji stacjonarnej i nadążnej dwuosiowej dla dwuletniego okresu pomiarowego oraz skumulowanej wartości uwzględniającej jej zużycie dla potrzeb zasilania elementów wykonawczych.

Natomiast w rozdziale **dziewiątym i dziesiątym** przedstawiono wyniki przeprowadzonych analiz o charakterze ekonomicznym związanych z opracowaniem bilansu finansowego i wyznaczeniem jednostkowego kosztu produkcji energii elektrycznej przez stacjonarne oraz dwuosiowe układy nadążne ogniw fotowoltaicznych dla polskich warunków klimatycznych. Jako uzupełnienie rozważań o charakterze ekonomicznym zamieszczono informacje o możliwościach dofinansowania i rozliczania inwestycji fotowoltaicznych w ramach programu „Prosument" NFOŚiGW. Ponadto przedstawiono wyniki analizy porównawczej wielkości przewidywanych rocznych dochodów, dla dwóch założonych wariantów rozliczania energii elektrycznej przez odbiorców indywidualnych, które zilustrowano porównawczo dla badanych instalacji stacjonarnej i nadążnej. Dla każdego z rozważanych przypadków wskazano, wyrażony liczbą lat, punkt opłacalności inwestycji. Dodatkowo w rozdz. 9.3 zaprezentowano wyniki przeprowadzonych analiz opłacalności, w ujęciu dwuwariantowym sposobu rozliczenia wyprodukowanej energii elektrycznej, według obecnie zawieszonej ustawy o odnawialnych źródłach energii, przez moduły fotowoltaiczne w obu badanych konfiguracjach. W tym zakresie wyznaczono charakterystyki ilustrujące wielkość skumulowanego rocznego dochodu, wynikającego z

przyjętych sposobów rozliczania wyprodukowanej energii elektrycznej, na których wskazano punkty opłacalności inwestycji. Jako uzupełnienie zostały opracowane wykresy słupkowe przedstawiające wielkość różnicy między wartością skumulowanego rocznego dochodu i kosztu rozważanych instalacji fotowoltaicznych. Dokonano także porównania uzyskanych wyników z innymi technologiami wytwarzania energii elektrycznej w sposób konwencjonalny i przy zastosowaniu odnawialnych źródeł energii w Polsce. Zaprezentowano także przewidywane tendencje zmian jednostkowych kosztów produkcji energii elektrycznej przy zastosowaniu metody UNPEDE, stosowanej przez UE oraz LCOE, a otrzymane w tym zakresie wyniki zostały przedstawione w rozdz. 10 dysertacji.

**Za najważniejsze w rozprawie uważam, z punktu widzenia wartości naukowo-poznawczej, jak również pośrednio związanej z możliwościami praktycznej implementacji uzyskanych wyników, rozdziały: czwarty, piąty, ósmy, dziewiąty i dziesiąty.**

Ogólne podsumowanie prac przeprowadzonych, w ramach realizacji recenzowanej rozprawy doktorskiej, zostało przedstawione w rozdziale **jedenastym**, w którym Doktorant w sposób syntetyczny wyszczególnił Swoje najważniejsze osiągnięcia o charakterze naukowym i związanych z możliwością ich praktycznego zastosowania w energetyce solarnej.

Na podstawie uzyskanych i zaprezentowanych w rozprawie rezultatów Doktorant sformułował szereg wniosków zarówno o charakterze ogólnym, jak również szczegółowym, które przedstawił w rozdziale **dwunastym**.

Pomimo tego, że Doktorant nie wskazał, które z przytaczanych wniosków końcowych potwierdzają założone tezy rozprawy, to w mojej opinii uzyskane rezultaty końcowe stanowią ich potwierdzenie.

Treść rozprawy można byłoby uzupełnić o wskazanie propozycji dotyczących możliwych, przyszłych kierunków prowadzenia prac naukowo-badawczych w podjętej przez Doktoranta tematyce, które tylko jednozdaniowo zostały zasygnalizowane w rozdz. 11.

**Reasumując, zaproponowany układ pracy jest czytelny, kolejne rozdziały tworzą logiczną oraz zamkniętą całość, a podjęte w rozprawie zagadnienia zostały sprecyzowane jednoznacznie i w mojej ocenie mają rangę naukową odpowiadającą rozprawom doktorskim.**

## 3. Główne osiągnięcia rozprawy

**Za najważniejsze osiągnięcia o charakterze naukowym, poznawczym i implementacyjnym Doktoranta uważam:**

- przeprowadzenie bardzo dokładnej oraz rzetelnej analizy doniesień literaturowych, głównie w oparciu o publikacje zagraniczne i na tej podstawie dokonanie syntetycznej oceny aktualnego stanu wiedzy dotyczącego poruszanej w rozprawie tematyki;
- opracowanie zmodyfikowanego modelu Liu-Jordana opisującego wielkość dostępnego natężenia promieniowania słonecznego dla polskich warunków klimatycznych na dowolnie zorientowanej przestrzennie płaszczyźnie, poprzez wprowadzenie zaproponowanego przez Doktoranta współczynnika korekcyjnego dla składowej dyfuzyjnej;
- dokonanie oceny, na podstawie wyników przeprowadzonych analiz statystycznych, modeli matematycznych umożliwiających wyznaczenie wielkości promieniowania

słonecznego, pod kątem ich dopasowania i praktycznej przydatności dla warunków klimatycznych charakterystycznych dla naszego kraju;

- wykonanie wielowariantowych analiz statystycznych w celu określenia wpływu podstawowych parametrów charakteryzujących wielkość zasobów energii słonecznej na wartość produkowanej, w wyniku konwersji fotowoltaicznej, energii elektrycznej;
- dokonanie doboru modelu sztucznej sieci neuronowej o radialnych funkcjach bazowych RBF 6:6-5-1:1, przy wykorzystaniu środowiska programowego Statistica, dla potrzeb predykcji wielkości produkcji energii elektrycznej w układach fotowoltaicznych, przy równoczesnym wskazaniu najbardziej istotnych jej parametrów wejściowych (dobowa wartość nasłonecznienia, usłonecznienia, ciśnienia i temperatury maksymalnej powietrza);
- określenie wpływu zmian wartości temperatury pracy ogniw fotowoltaicznych na wartość produkowanej przez nie energii elektrycznej na podstawie wyników symulacji komputerowych wykonanych w programie Matlab dla dwudiodowego obwodu zastępczego ogniwa fotowoltaicznego;
- opracowanie algorytmu obliczeniowego i napisanie aplikacji komputerowej w środowisku Microsoft C#, umożliwiającej wyznaczanie optymalnej pod względem bilansu energetycznego wartości kąta pochylenia płaszczyzny modułów fotowoltaicznych stacjonarnych, w którym zastosowano zmodyfikowany przez Doktoranta izotropowy model matematyczny Liu-Jordana;
- przeprowadzenie dwuletnich pomiarów wartości całkowitego promieniowania słonecznego na dowolnie zorientowanej kątowo płaszczyźnie modułu polikrystalicznego w ustawieniu stacjonarnym i porównawczo nadążnym jedno –i dwuosiowo na przygotowanym przez Doktoranta stanowisku badawczym zlokalizowanym na dachu Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej w Poznaniu;
- wykonanie w celach porównawczych bilansu energetycznego i ekonomicznego dla stacjonarnych i nadążnych ogniw fotowoltaicznych na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów parametrów elektrycznych i nieelektrycznych oraz wskazanie szeregu szczegółowych wniosków o charakterze naukowo-poznawczym oraz zaleceń praktycznym w zakresie możliwości implementacji badanych układów, w szczególności dla polskich warunków klimatycznych;
- wskazanie, na podstawie wyników przeprowadzonych wielowariantowych analiz ekonomicznych, optymalnych pod kątem opłacalności finansowej rozwiązań w zakresie sposobów praktycznego wykorzystania modułów fotowoltaicznych przez inwestorów indywidualnych;
- oszacowanie wielkości jednostkowego kosztu produkcji energii elektrycznej dla układu stacjonarnego i nadążnego dwuosiowego z uwzględnieniem rachunku dyskonta i ich porównanie z innymi technologiami wytwarzania energii elektrycznej w sposób konwencjonalny oraz przez odnawialne źródła energii.

**W moim przekonaniu, przedstawione wyżej osiągnięcia Doktoranta uzasadniają jego kompetencje naukowe i rekomendują Go do stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej elektrotechnika.**

## 4. Uwagi do rozprawy

Uwagi i zastrzeżenia dotyczące ocenianej rozprawy podzieliłem na cztery podstawowe grupy:

- ogólne uwagi merytoryczne (**13**),
- szczegółowe uwagi merytoryczne (**17**),
- ogólne uwagi redakcyjne (**4**),
- szczegółowe uwagi redakcyjne (**7**).

### 4.1 Ogólne uwagi merytoryczne

**1.** W drugiej tezie rozprawy Doktorant użył sformułowania: *„także w warunkach klimatycznych Polski"*, co może sugerować, że *„zastosowanie rozwiązań nadążnych w układach fotowoltaicznych zwiększa efektywność konwersji energii słonecznej w elektryczną i jest ekonomicznie uzasadnione"* w innych krajach, w których wykorzystywana jest energia słoneczna. Czy w związku z tym, znane są Doktorantowi publikacje naukowe lub/i referaty konferencyjne, w których tego typu analizy były przeprowadzane i jakie są w tym zakresie doświadczenia innych państw ?

**2.** W rozdziale 3 dysertacji Doktorant w sposób bardzo szczegółowy scharakteryzował aktualny stan wiedzy bazując na głównie na przeprowadzonym przeglądzie doniesień literaturowych. Uważam, że celu zwiększenia przejrzystości i usystematyzowania przedstawianych w sposób opisowy, często bardzo szczegółowych, informacji można było wprowadzić zestawienia porównawcze np. w formie zbiorczych tabeli syntetyzujących prezentowany stan wiedzy. Brakuje mi także podsumowania i sformułowanych wniosków, na podstawie przeprowadzonego przeglądu, a także zasygnalizowania, w jaki sposób stanowi on punkt wyjścia oraz genezę podjętych prac badawczych w ramach realizacji recenzowanej rozprawy doktorskiej.

**3.** Prosiłbym o jednoznaczne wskazanie wkładu własnego w zaprojektowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego wykorzystanego przez Doktoranta do analizy porównawczej układów nadążanych i stacjonarnego, ponieważ w rozdz. 7.1 i przede wszystkim w rozdz. 7.2 brak tego typu informacji. Natomiast w mojej ocenie stanowi to znaczące osiągnięcie Doktoranta.

**4.** W rozdziale 5 Doktorant prezentuje wyniki wielowariantowych analiz statystycznych, a także przeprowadzonych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych. W tym zakresie brakuje mi bardziej jednoznacznego określenia celu ich wykonania, zbiorczego zestawienia uzyskanych rezultatów, a następnie sformułowania na ich podstawie syntetycznych wniosków oraz ich powiązania z założonymi tezami rozprawy. Dla przykładu Doktorant w rozdz. 5.2 (str. 64-67) przedstawia kolejno wykorzystane w przeprowadzonych obliczeniach statystycznych wzory, częściowo je charakteryzując. Natomiast czytelnikowi brakuje dokładnego zdefiniowania celu ich wykonania. Na początku znajduje się tylko jedno ogólne sformułowanie: *„... zadanie polegało na wyznaczeniu czynników, które mogą mieć bezpośredni wpływ na wielkość produkowanej energii elektrycznej przez badany układ fotowoltaiczny..."* (przy czym nie widomo jaki jest to układ ?).

**5.** Doktorant w ramach przeprowadzonych analiz statystycznych, których wyniki są prezentowane w rozdz. 4.4 dysertacji, zastosował współczynnik korelacji Pearsona w celu określenia poziomu zależności między wartościami zmierzonymi promieniowania słonecznego i wyznaczonymi przy zastosowaniu modeli matematycznych. Czy w celu sprawdzenia czy badane wielkości są skorelowane Doktorant wykorzystywał diagramy korelacyjne i testy istotności współczynnika korelacji liniowej Pearsona, stosując

metody wnioskowania statystycznego (w zależności od liczebności próby test istotności z użyciem statystyki „z" lub odpowiednio „t") ?

**6.** Proszę o bardziej szczegółowe wyjaśnienie sposobu wyznaczenia równania 5.4 (str. 66) opisującego wielkość produkcji energii elektrycznej przez moduł fotowoltaiczny, w którym uwzględniono cztery zmienne objaśniające, tj.: nasłonecznie, usłonecznienie, zachmurzenie i maksymalną temperaturę powietrza. W szczególności, w jaki sposób zostały dobrane wartości poszczególnych współczynników wagowych zmiennych niezależnych, a także jaki rodzaj usłonecznienia jest rozpatrywany (możliwe, rzeczywiste czy względne) ?

**7.** Doktorant bardzo umiejętnie wykorzystuje narzędzia wielowymiarowej analizy statystycznej, natomiast komentując wykresy przedstawione na rys. 5.8-5.11 pisze, że: *„ ... największa symetria względem godzin południowych i powtarzalność przebiegu jest obserwowana dla okresu letniego ... "*, podobnie w przypadku analizy wykresów zilustrowanych w rozdz. 8.2.1, tj.: *„... przedstawione przypadki, z wyjątkiem miesiąca maja, cechowały się dobrą powtarzalnością godzin szczytowych ... "*. Mając powyższe stwierdzenia na uwadze mam pytanie czy w celu określenia powtarzalności uzyskiwanych zależności zostały zastosowane metody wnioskowania statystycznego oparte na testach istotności ? W tym zakresie brakuje mi także szerszego komentarza i wniosków do przedstawianych zależności na wykresach słupkowych.

**8.** Doktorant na podstawie przebiegów charakterystyk prądowo-napięciowych i obciążenia (rys. 6.7-6.8) stwierdza, że *„... uzyskano dużą zgodność między wynikami symulacji i wynikami pomiarów ... "* (rozdz. 6.4 str. 90), co ma charakter oceny jakościowej. Czy została w tym zakresie wykonana ocena ilościowa na przykład poprzez obliczenie wartości współczynnika determinacji $R^2$ ? Ponadto, brak jest jakiegokolwiek komentarza w tym zakresie dla analogicznych wykresów zilustrowanych odpowiednio na rys. 6.9-6.10 i uzyskanych dla modułu polikrystalicznego.

**9.** Mając na uwadze porównywanie wyników symulacji dla przyjętego dwudiodowego obowdu zastępczego ogniwa fotowoltaicznego z rezultatami pomiarów interesujące jest wykonanie oceny niepewności opracowanego układu pomiarowego, co umożliwia określenie jakości otrzymywanych w tym zakresie wyników. Natomiast w dysertacji brak informacji o specyfikacji technicznej i błędach zastosowanych przyrządów pomiarowych, w tym mierników gęstości promieniowania słonecznego HT 204 i temperatury DT-8833 (rozdz. 6.4, str. 90). Nie ma także informacji dotyczących wyznaczenia budżetu niepewności zastosowanego układu pomiarowego. Brak jest również informacji dotyczącej samej metodyki wykonanych badań, określenia ich celu i zakresu, zastosowanych procedur pomiarowych, a uzyskane wnioski ograniczają się do jednego wyżej wymienionego stwierdzenia dotyczącego komentarza wykresów zilustrowanych na rys. 6.7-6.8.

**10.** Według przyjętych w dysertacji założeń przy wyznaczeniu wartości współczynnika korelacji Pearsona, jako zmienną zależną (objaśnianą) przyjęto wielkość produkowanej energii elektrycznej przez badany moduł fotowoltaiczny dla analizowanego okresu pomiarowego. Natomiast, jako zmienne niezależne (objaśniające) wskazano m.in.: dobowe usłonecznienie, stopień zachmurzenia nieba oraz dobowe nasłonecznie. Czy zdaniem Doktoranta wielkości dobowego nasłonecznienia i stopień zachmurzenia nieba nie są od siebie wzajemnie zależne, podobnie jak nasłonecznienie i usłonecznienie ? Czy w związku z tym można je oddzielnie poddać analizom statystycznym ?

**11.** Doktorant na rys. 5.2 (str. 69) posługuje się czterostopniową skalą dla oznaczenia stopnia zachmurzenia nieba (oś odciętych). W literaturze w celu określenia zachmurzenia czyli stopnia pokrycia nieba przez chmury, spotyka się najczęściej skalę od 0 do 8 (gdzie 8 oznacza pełne zachmurzenia, a 0 – brak chmur) lub skalę 9 a nawet 10

stopniową. Proszę o skomentowanie przyjętej skali. Co oznacza wartość „0" ? Ponadto, jak była realizowana procedura oceny stopnia zachmurzenia nieba ?

**12.** W jaki sposób można skomentować rozbieżność w czynnikach mających wpływ na wielkość produkcji energii elektrycznej w wyniku konwersji fotoelektrycznej, które uzyskano przy zastosowaniu narzędzi analizy statystycznej (nasłonecznienie, usłonecznienie zachmurzenie i maksymalna temperatura powietrza) oraz odpowiednio sztucznych sieci neuronowych (nasłonecznienie, usłonecznienie ciśnienie i maksymalna temperatura powietrza) ?

**13.** Mając na uwadze różny stopień nasłonecznienia obszaru Polski, jak Doktorant ocenia reprezentatywność uzyskanych wyników, które dotyczą miasta Poznań.

## 4.2 Szczegółowe uwagi merytoryczne

**1.** W wzorach 4.3 (str. 51); 4.7 (str. 52); 4.13 (str. 53); 4.20 (str. 55); 4.27-4.32 (str. 58-59) Doktorant do oddzielenia części całkowitej liczby od dziesiętnej stosuje znak kropki, natomiast w tekście (np. str. 53, tabela 4.2; wzór 5.4 na str. 66 itd.) niekonsekwentnie wykorzystuje znak przecinka.

**2.** Moim zdaniem w rozdz. 3.2 można byłoby umieścić rysunek poglądowy, na którym zostałyby zaznaczone rozpatrywane w treści kąty ($\beta$, $\varphi$, $\delta$, $\gamma$, $\zeta$, $\theta$), co w znacznym stopniu ułatwiłoby czytelnikowi analizę i interpretację przekazywanych treści merytorycznych.

**3.** Brak adekwatnego cytowania do akapitu na str. 60 (poniżej wzoru 4.37), w którym Doktorant opisuje współczynnik korelacji Pearsona k.

**4.** Brak w wykazie skrótów i oznaczeń: PV; OŹE (jak również OZE); MPP. Ponadto pomimo wcześniej wykorzystywanych w tekście skrótów: RMSE i MBE ich objaśnienie znajduje się dopiero na str. 56 dysertacji. Podobnie, dotyczy to wykorzystania pojęcia energii netto i brutto.

**5.** Czy wykorzystana na str. 65 litera „*u*" jest tożsama z oznaczeniem usłonecznienia w wzorze 5.4 (str. 66). Jeżeli tak to jak należy interpretować ujemną wartość „u", która wyraża czas podany w godzinach, podczas którego na określone miejsce na powierzchni Ziemi padają bezpośrednio promienie słoneczne ?

**6.** Te same litery „*m*" i „*n*" wykorzystano w przypadku wzorów 5.4 i 5.5, przy czy oznaczają one inne zmienne.

**7.** Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 5.2 (str. 68) wskazano cztery parametry, dla których wartości współczynnika korelacji Pearsona są znaczące i istotne z punktu widzenia prognozowania. Należy do nich według Doktoranta wartość temperatury maksymalnej powietrza (0,442). Zatem dlaczego w dalszej części rozdz. 5.3., gdzie są prezentowane wyniki uzyskane odpowiednio dla usłonecznienia, nasłonecznienia i stopnia zachmurzenia, pominięto ten czynnik (zmienną objaśniającą) ?

**8.** Brak komentarza do zależności zilustrowanych na rys. 5.4-5.7.

**9.** Moim zdaniem, w tytule rozdz. 5.3 można byłoby pominąć wyraz „statystyczna", ponieważ dotyczy on zastosowania sztucznych sieci neuronowych.

**10.** Co oznaczają wielkości: $V_T$; q; $I_s$; $U_{MPP}$; $J_o$, $I_{sc1}$; $I_{sc2}$, które nie zostały zdefiniowane, odpowiednio w opisie wzorów: 6.2 i 6.3 (str. 82); 6.9 (str. 83); 6.10 (str. 83); 6.13 (str. 86); 6.16 (str. 87) ? Ponadto wielkość $I_o$ powinna zostać określona w miejscu jej pierwszego zastosowania (tj.: wzór 6.1 str. 81), a nie dopiero w wzorze 6.3 (str. 82).

**11.** Jaka jest różnica między: $\alpha$ – współczynnikiem doskonałości diody (wzór 6.1, str. 81) i $\alpha$ – współczynnikiem jakości diody (wzór 6.3, str. 82) ?

12. W jaki sposób chłodzono badane ogniwo fotowoltaiczne podczas pomiarów (rozdz. 6.3), jaka była stała wartość temperatury utrzymywanej podczas rejestracji i w jaki sposób dokonywano pomiarów jej wartości (rozdz. 6.3) ?

13. W wzorach: 4.33 i 4.35 (str. 59) brak objaśnienia zastosowanej wielkości – $C_i$.

13. Przy wykorzystaniu, jakich funkcji aproksymujących zostały wykreślone m.in. przebiegi charakterystyk prądowo-napięciowych i obciążenia (np. rys. 8.1-8.9) ?

14. Prosiłbym o komentarz dotyczący zależności, która została zilustrowana na rys. 5.1 (str. 68), a w szczególności, jak można wytłumaczyć tak duże różnice (w zakresie od 0 do ponad 1000 Wh) w wielkości produkowanej energii elektrycznej przez moduł fotowoltaiczny w 2-osiowym układzie nadążnym przy zerowej wartości dobowego usłonecznienia.

15. W kilku przypadkach brak jest odniesienia się w tekście do prezentowanych wykresów (np. rys. 6.2, 6.3, 6.4 itd.).

16. Co na rys. 5.1-5.3 oznaczają linie proste i w jakim celu je wprowadzono ? Czy są to przebiegi funkcji regresji ?

## 4.3 Ogólne uwagi redakcyjne

Moim zadaniem rozprawa została zredagowana bardzo dobrze i zawiera tylko nieliczne, błędy redakcyjne, interpunkcyjne, niezręczności językowe, czy sformułowania nietechniczne, które zaznaczyłem bezpośrednio w tekście dysertacji. Przy czym należy podkreślić, że nie wpływają one na moją pozytywną ocenę merytoryczną recenzowanej dysertacji.

1. W tekście rozprawy znajduje się bardzo duża liczba zdań wielokrotnie złożonych (często obejmujących 1/3 strony A4) utrudniających czytelnikowi zrozumienie przekazywanych treści merytorycznych, a które w prosty sposób można byłoby podzielić na zdania pojedyncze lub mniej złożone. Jest to uwaga na przyszłość i dotyczy także problemu tłumaczenia testów z języka polskiego na język angielski.

2. Na podkreślenie zasługuje fakt, że pomimo dużej ilości zdań wielokrotnie złożonych nie stwierdziłem występowania powtórzeń pojedynczych wyrazów lub całych sformułowań.

3. Doktorant sporadycznie wykorzystuje znak spacji przy oddzielaniu numerów cytowanych pozycji literaturowych.

4. Brak spacji oddzielającej skrót Rys. od numerów rysunków, uwaga ta dotyczy całej pracy, spisu rysunków oraz załączników.

## 4.4 Szczegółowe uwagi redakcyjne

1. Brak konsekwencji w zastosowanych oznaczeniach prądów dyfuzyjnego i rekombinacyjnego prądu ciemnego (wzory: 6.11 oraz 6.18).

2. Doktorant często nie używa przecinka przed wyrazami: „który"; „których" (np.: str. 49); „dla których" (np.: str. 49, 134); „w którym" (np.: str. 100).

3. Należało wprowadzić skrót OZE dla odnawialnych źródeł energii, ponieważ sformułowanie to często powtarza się w rozdz. 9 i 10.

4. Błędny zapis (str. 163): [78][79], powinno być: [78, 79].

5. Brak opisu wielkości H i SA wykorzystanych we wzorach 8.1-8.3 (str. 107).

6. Brak jest spacji w cytowanych wzorach (np. 4.19 na str. 55).

7. Zastosowana na rys. 8.12- 8.35 kolorystyka linii punktowych obrazujących odpowiednio: średnią dobową – układ nadążny dwuosiowy oraz średnią godzin słonecznych w układzie stacjonarnym jest bardzo zbliżona kolorystycznie co utrudnia ich właściwe rozpoznanie i jednoznaczną interpretację.

**Podsumowując, zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia merytoryczne i redakcyjne, nie wpływają w sposób znaczący na wartość merytoryczną rozprawy, proszę jednak Doktoranta o odniesienie się do nich przed obroną. W związku z powyższym recenzowana praca nie wymaga zmian ani uzupełnień.**

## 5. Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy aktualnego i oryginalnego zagadnienia naukowego o silnym charakterze implementacyjnym. Należy do prac doskonalących metody modelowania matematycznego wykorzystywane przy predykcji dostępności energii słonecznej na powierzchniach dowolnie zorientowanych przestrzenie oraz wspomagających procesy decyzyjne związane z inwestycjami prowadzonymi w sektorze energetyki słonecznej, a w szczególności w zakresie mikro i małych instalacji fotowoltaicznych. Uzyskane wyniki, mają duże znaczenie poznawcze i naukowe, a przede wszystkim duże możliwości praktycznego zastosowania uzyskanych zależności przy określaniu opłacalności ekonomicznej fotowoltaicznych układów stacjonarnych nadążnych dla danej lokalizacji na obszarze Polski.

Główne cele rozprawy były konsekwentnie realizowane i w mojej ocenie zostały osiągnięte. Doktorant wykazał się zdolnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów o charakterze naukowym, dobrym opanowaniem wiedzy teoretycznej z zakresu szeroko rozumianej energetyki solarnej, a w szczególności fotowoltaiki, modelowania matematycznego, analizy statystycznej, narzędzi sztucznej inteligencji, w tym sieci neuronowych, informatyki stosowanej i ekonometrii, a także umiejętnością programowania w środowisku Microsoft C# oraz praktycznego wykorzystania nowoczesnych narzędzi obliczeniowych tj. środowiska Matlab i Statistica. Ponadto posiada umiejętność planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych. Na podkreślenie zasługuje również fakt, że Doktorant zaprojektował w programie Autodesk Inventor większość elementów wchodzących w skład zaproponowanych stanowisk pomiarowych, które następnie wykorzystał podczas realizacji zaplanowanych prac naukowo-badawczych.

Uważam, że przedłożona praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, określone w obowiązującej *Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki*. Dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie przez Radę Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej w Poznaniu, mgra inż. Artura BUGAŁĘ do publicznej obrony przedłożonej rozprawy.