

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Mateusza Bartczaka

pt.

„Dobór algorytmów MPPT w systemie fotowoltaicznym w warunkach częściowego zacinienia z wykorzystaniem oddziaływań impulsowych”

1. Zagadnienia formalne

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie zlecenia (pismo nr RDN-AEE/133/2022 z dnia 27.07.2022 roku) wystawionego przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Dziedzica. Ze zlecenia wynika, że przewód doktorski wszczęty został w dyscyplinie *Elektronika*, co aktualnie wg klasyfikacji określonej w rozporządzeniu MNiSW z dnia 20 września 2018 roku w sprawie dziedzin i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. 2018, poz. 1818) odpowiada dyscyplinie *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika*. Na przynależność do tej dyscypliny wskazuje również zawartość przedstawionej do oceny rozprawy.

2. Wstęp i ocena tematyki rozprawy

Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny i nawiązuje do zagadnień związanych z elektrotechniką, odnawialnymi źródłami energii (szczególnie z energetyką słoneczną), elektroniką, ale też z zagadnieniami będącymi w zakresie zainteresowania automatyki i sterowania oraz informatyki. Autor podjął temat niezwykle ważny dla współczesnej energetyki wykorzystującej źródła odnawialne, a szczególnie mający na celu poprawę efektywności wykorzystania w praktyce istniejących systemów fotowoltaicznych, głównie tych stacjonarnych, bez systemów śledzenia położenia Słońca.

Podjął się opracowania nowatorskich metod (algorytmów) śledzenia maksymalnego punktu mocy takich systemów. Szczególny nacisk położył na problem poszukiwania takiego punktu pracy w systemach, w których zachodzi duże prawdopodobieństwo zacinienia paneli, a tym samym istotne ograniczenie produkowanej energii i wychodzenie poza optymalny punkt pracy systemu. Badania eksperymentalne Autora wykazały, że zjawisko zacinienia jest zjawiskiem o dużej dynamice zmian nasłonecznienia (rzędu minut a nawet sekund), a charakter tych zmian jest bardzo różnorodny (od zmian skokowych po powolne zmiany liniowe).

Tematyka rozprawy jest niezwykle aktualna, biorąc pod uwagę nacisk jaki kładziony jest w skali globalnej na wdrażanie systemów pozyskiwania tzw. energii odnawialnej i gwałtowny rozwój (szczególnie w Polsce) rynku „zielonej energii” w tym, szczególnie systemów fotowoltaicznych niewielkiej mocy, montowanych najczęściej jako systemy stacjonarne.

Istotność tej pracy wynika też stąd, że najbardziej rozpowszechniona i dostępna (również ze względów na koszty) dla powszechnego użytkownika technologia ogniw monokrystalicznych charakteryzuje się niezbyt dużą sprawnością. Sprawności ogniwa nie można poprawić bez ingerencji w technologię materiałów i procesu jego produkcji (co dzieje się obecnie w laboratoriach badawczych). Dlatego, z punktu widzenia użytkownika, istotne jest zapewnienie

ogniwom takich warunków pracy, aby maksymalnie wykorzystać ich możliwości. Można to uzyskać jedynie przez zwiększanie ilości promieniowania słonecznego padającego na panel, ustabilizowanie warunków pracy ogniwa np. wpływu temperatury, monitorowanie stopnia zabrudzenia panelu oraz optymalizacji punktu pracy ogniwa PV (który może ulegać zmianie ze względu na warunki w jakich pracują ogniwa, np. zacielenie paneli). Ten ostatni aspekt jest przedmiotem niniejszej rozprawy. Ma on również bardzo praktyczny wymiar, bowiem metody opracowanie w tej rozprawie możliwe są do wdrożenia w układach współpracujących z panelami fotowoltaicznymi. Zagadnienie to nie jest proste ze względu na wiele możliwych scenariuszy i przyczyn zacielenia paneli i ich reakcji na takie zjawiska. Trudność polega też na tym, że dostępne aktualnie modele, które można wykorzystać w projektowaniu algorytmów poszukiwania MPPT, nie uwzględniają niektórych zjawisk zachodzących w systemie, szczególnie związanych z szybkimi zmianami oświetlanej powierzchni i poziomu promieniowania. Do rozwiązania tego problemu Autor musiał przeprowadzić intensywne badania literaturowe oraz wstępne eksperymentalne badania paneli PV, które pozwoliły na określenie zjawisk niezbędnych do uwzględnienia w modelu (jak np. pojemności panelu i jej nieliniowego charakteru).

Autor postawił tezę, że **„zastosowanie oddziaływań impulsowych w algorytmie śledzenia maksymalnego punktu mocy pozwala na efektywny wzrost sprawności systemu fotowoltaicznego w warunkach częściowego zacielenia”**.

Uściślenie problemu podane jest przez Autora w „celu pracy”, w którym zakłada opracowanie nowej metody śledzenia punktu mocy maksymalnej, bazującej na odpowiednim doborze algorytmu śledzenia, który będzie wykorzystywał krótkie oddziaływania impulsowe (stan zwarcia lub praca jałowa systemu), prowadzącej do poprawy efektywności systemu PV w warunkach częściowego zacielenia.

Uważam, że tak postawiony cel był niezwykle ambitny, ze względu na to, że wiele systemów PV aktualnie pracujących (głównie stacjonarnych), ze względu na sposób i miejsce instalacji, podlega zjawisku zacielenia w pewnych okresach dnia, a także w związku ze zmianami zachmurzenia. Obecnie znanych jest wiele algorytmów śledzenia punktu pracy takich systemów (Autor przedstawia je w pracy), ale nie uwzględniały one dotychczas efektów bardzo szybkich zmian w warunkach pracy i często „utykały” w lokalnych maksimach charakterystyki mocy, co skutkowało istotnymi stratami energii możliwymi do uzyskania z systemu. Autor zaproponował dzięki swoim badaniom rozwiązanie tego problemu wykazując istotną przewagę swoich rozwiązań w niektórych warunkach pracy systemu i niepogarszania jakości pracy w warunkach „normalnych”.

Autor bardzo precyzyjnie określił również zakres podejmowanych badań, które następnie konsekwentnie realizował, stosując zarówno badania modelowe, jak i eksperymentalne, które w dużej mierze potwierdziły wyniki badań modelowych.

Jestem przekonany, że zagadnienia podjęte w ramach recenzowanej rozprawy są aktualne i ważne, zarówno z poznawczego, jak i praktycznego punktu widzenia, a przyjęta metodologia jest poprawna. Badania prowadzone w tym obszarze i uzyskane wyniki mogą być z powodzeniem podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.

3. Struktura rozprawy

Rozprawa napisana jest w języku polskim, liczy 97 stron, a jej treść została podzielona na 6 rozdziałów (z wyłączeniem wprowadzenia i celu oraz zakresu pracy). Ponadto do rozprawy dołączono wykaz wybranych, najczęściej stosowanych, oznaczeń i skrótów, a także wykaz 83 rysunków. Bibliografia zawiera wykaz liczący 71 pozycji. Wykaz ten zawiera 2 pozycje, których Doktorant jest autorem. Literatura jest dobrana właściwie i poprawnie cytowana w

pracy. Praca napisana jest poprawnym stylistycznie językiem z niewielką liczbą usterek redakcyjnych i dobrze przygotowana pod względem graficznym.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił krótką historię rozwoju technologii fotowoltaicznych, poczynając od zjawisk fizycznych, a kończąc na stosowanych w tym zakresie materiałach. Przedstawił również zagadnienia związane z opisem formalnym dotyczącym promieniowania słonecznego. Wyróżnił składowe promieniowania i matematyczne modele, którymi można je opisać. Przedstawił i zdefiniował podstawowe pojęcia związane z promieniowaniem docierającym do Ziemi, jak również przyczyny tłumienia tego promieniowania. Omówił także zagadnienia związane z optymalnym usytuowaniem paneli fotowoltaicznych w zależności od ich lokalizacji oraz metody maksymalizacji energii padającej na panel, a tym samym pozyskiwanej energii (np. układy nadążne). Omówił szczegółowo charakterystyki jakimi opisuje się ogniwa fotowoltaiczne i charakterystyczne punkty tych charakterystyk (np. prąd zwarcia, napięcie obwodu otwartego czy punkt mocy maksymalnej). Autor omówił też na podstawie badań literaturowych najczęściej stosowane modele ogniw PV, a także zastosowanie tych modeli i ich adekwatność w zależności od warunków pracy ogniwa, ich wymiarów i celu stosowania modelu. Przedstawił wady i zalety tych modeli, np. dokładność odwzorowania charakterystyk ogniw, ale też ich złożoność obliczeniową. Pokazuje jak dodawanie kolejnych elementów do modelu (model z jedną, dwiema i trzema diodami) pozwala na uwzględnianie kolejnych zjawisk fizycznych zachodzących w ogniwie. Wskazuje również na konieczność uwzględnienia zagadnień, które będą analizowane przy pomocy tych modeli i właściwy wybór modelu. Do dalszych badań Doktorant wybrał model jednodiodowy (który potem jeszcze modyfikował w celu uwzględnienia zjawisk impulsowych), wystarczający do analizy zagadnień zacielenia ogniwa, ale umożliwiający wystarczająco szybkie obliczenia. Wskazuje to na dużą orientację Autora w analizowanych zagadnieniach i umiejętność właściwej oceny złożoności rozważanego problemu oraz dobór adekwatnych narzędzi.

W rozdziale drugim Doktorant skupia się na zjawisku częściowego zacielenia paneli, które jest przyczyną znacznej redukcji wydajności systemu PV. Wskazuje na wiele przyczyn zacielenia, które mogą być długotrwałe jak np. zabrudzenie lub krótkotrwałe, np. chmury. Zacielenie choćby tylko części panelu powoduje znaczące pogorszenie efektywności całego systemu, możliwy jest przepływ prądu wstecznego i w konsekwencji przegrzewanie poszczególnych ogniw. Temperatura takich ogniw może dochodzić nawet do 150 °C. Skutkiem jest również odejście systemu od optymalnego punktu pracy, powodując znaczne straty w pozyskiwanej energii. Autor rozważa szczegółowo konieczność stosowania diod bocznikujących (lub tranzystorów FET) zapobiegających prądom wstecznym, analizuje ich umiejscowienie i liczbę. Liczba takich diod jest o tyle ważna, że na charakterystykach takich paneli powstają dodatkowe maksima lokalne, których liczba związana jest z liczbą zastosowanych diod. Dodatkowe ekstrema mogą być przyczyną błędnego ustalenia optymalnego punktu pracy systemu PV. W celu badania warunków zacielenia w warunkach rzeczywistych Autor zbudował własny układ pomiarowy złożony z dwóch paneli i systemu do pomiaru prądu i napięcia (również w charakterystycznych punktach układu – warunki zwarcia i rozwarcia obwodu). Układ ten (jego oprogramowanie) zapewnia możliwość zbierania danych pomiarowych w długich okresach czasu. Doktorant gromadził dane w okresie kilku miesięcy, analizując różne przyczyny zacielenia paneli i wpływ zacielenia na pracę systemu, uzyskując wiele ciekawych wyników przedstawionych w części pracy raportującej dane z systemu rzeczywistego. Najciekawsze są pokazane różnice prądów i napięć obu paneli w różnych warunkach pracy. Dane te mogą być podstawą identyfikacji różnych przyczyn zacielenia z wykorzystaniem pomiarów prądu i napięcia w tym systemie. Bazując na danych zebranych w zbudowanym systemie Doktorant przeprowadził szereg symulacji obrazujących zmienne warunki oświetlenia paneli i wpływ tego zjawiska na zmianę optymalnego punktu pracy

systemu. Udowadnia, że w pewnych warunkach zmian oświetlenia paneli maksimum globalne może w ciągu kilku minut zmienić swoje położenie nawet kilkanaście razy. W symulacjach tych przedstawił kilka scenariuszy zmiany oświetlenia paneli, od jednolitych zmian w natężeniu oświetlenia do lokalnych zacienień paneli. Pokazał również, że stosowane algorytmy śledzenia punktu mocy maksymalnej w przypadkach szybkich zmian położenia tego punktu lub pojawiania się lokalnych ekstremów, albo nie radzą sobie z lokalizacją maksimum globalnego, albo muszą wykonać wiele dodatkowych iteracji, co skutkuje w konsekwencji spadkiem efektywności takiego systemu. Wskazuje jednocześnie na konieczność poszukiwania metod i algorytmów, które mogą poradzić sobie z takimi warunkami pracy systemu.

W rozdziale trzecim Doktorant szczegółowo zajmuje się problemem modelowania systemu fotowoltaicznego. Wskazuje na fakt, że jakość modelu systemu zależna jest głównie od wybranego modelu paneli i ich konfiguracji. Omawia różne konfiguracje paneli wskazując, że aktualnie coraz częściej sięga się po dynamicznie rekonfigurowane struktury w zależności od aktualnych warunków pracy poszczególnych paneli. Dość dokładnie rozważa złożoność modeli paneli i wynikającą stąd ich dokładność oraz wymaganą moc i czas obliczeń w zależności od wyboru modelu. Ze względu na stosunkowo dobre odwzorowanie charakterystyk U-I, na których Autor się skupia w tej rozprawie, a jednocześnie mniejsze wymagania co do mocy obliczeniowej, do dalszej analizy Doktorant wybrał model z jedną diodą. Do analizy Autor wybrał model panelu składający się z trzech grup połączonych szeregowo, zawierających po 20 ogniw w grupie. Każda grupa zawiera jedną diodę bocznikującą. Badania modelowe prowadzone były w środowisku Matlab-Simulink. Aby uprościć analizy i je przyspieszyć Autor zaproponował zastąpienie modeli szeregowo łączonych ogniw w grupie zmodyfikowanym, pojedynczym modelem ogniwa. Szczegółowo opisuje te modyfikacje i wyprowadza równania opisujące model zastępczego ogniwa. Należy podkreślić bardzo dobre wykorzystanie badań literaturowych, szczególnie na etapie estymacji parametrów zaproponowanych modeli. Estymacje parametrów modeli Autor przeprowadził na podstawie danych dostarczanych przez producentów ogniw, odnoszących się do tzw. standardowych warunków testowych. Niektóre parametry modeli nie są dostępne wprost w danych producentów, dlatego doktorant opracował algorytmy wyznaczające je z dostępnych danych. Warto podkreślić, że Autor podszedł krytycznie do dostępnych w literaturze algorytmów wyznaczania dodatkowych parametrów, odpowiednio je modyfikując dla poszerzonych warunków pracy ogniwa, np. obniżenia natężenia promieniowania padającego na panel. Dzięki wprowadzonym modyfikacjom algorytmu estymacji parametrów, Autor uzyskuje znacząco lepsze wyniki (lepsze dopasowanie charakterystyk), dla szerszego zakresu pracy ogniwa, niż algorytmy dostępne wprost w literaturze. Wyniki estymacji przy użyciu zmodyfikowanego autorskiego algorytmu i algorytmów literaturowych przedstawiono w tabeli 4 i na rys. 43-45. Przy okazji przeprowadzono testy algorytmu autorskiego i algorytmu Stornelliego w warunkach niskich wartości fotoprądów (np. ogniwa o małych wymiarach) i stwierdzono, że algorytm literaturowy jest rozbieżny i w efekcie zwraca ujemne wartości rezystancji używanych w modelu. Jest to niezwykle cenna informacja dla kolejnych badaczy zajmujących się modelowaniem ogniw PV. Zwykle w modelach ogniw PV nie uwzględnia się pojemności ogniwa. Efekt pojemnościowy jest jednak niezwykle ważny, kiedy analizowane są stany przejściowe w ogniwie (np. współpraca z przetwornicami DC/DC lub szybkie pomiary charakterystyk I-U metodą krótkich impulsów światła). Dla Autora efekt ten jest istotny ze względu na analizowanie pracy ogniw w warunkach zacienienia, często zmieniającego się bardzo szybko (a wtedy efekty pojemnościowe mają już znaczenie). Również sytuacje kiedy impulsowo oddziałuje się na ogniwo (np. zwieranie ogniwa w celu bardzo szybkiego pomiaru prądu zwarcia) wymagają uwzględnienia pojemności. Autor wskazuje również na fakt nieliniowości tej pojemności w funkcji napięcia ogniwa. Autor zbudował układ pomiarowy do badania nieliniowości pojemności ogniw. Badania te polegały na pomiarze odpowiedzi ogniwa na pobudzenie

impulsem zwarcia i powrotu do stanu normalnego w jednorodnych, ale różnych warunkach oświetlenia. Na podstawie odpowiedzi układu ewidentnie wykazano, że wartość pojemności ulega zmianie (rys. 49). Badania eksperymentalne poparto symulacjami w aplikacji SCAPS, i na rys. 51 i 52 pokazano zależność zmian pojemności od napięcia dla założonej wartości przerwy energetycznej i od liczby nośników w układzie. W efekcie opracowano zmodyfikowany model jednodiodowy z nieliniową pojemnością. Doktorant przeprowadził badania weryfikujące ten model, poprzez porównanie wyników modelowych z wynikami badań eksperymentalnych, uzyskując zgodność na poziomie poniżej 3% (rys. 54 i 55). Stwierdził też jednoznacznie, że modelu nie można uprościć poprzez zastosowanie pojemności o stałej wartości i że zależność pojemności od napięcia musi być eksponencjalna. Pokazuje również dlaczego nie można przyjąć liniowej zależności pojemności od napięcia (w takim przypadku model odzwierciedla warunki rzeczywiste jedynie dla niskich wartości natężenia promieniowania). W modelu uzyskano też inne efekty znane dla ogniw PV, jak np. zmniejszanie napięcia ze wzrostem temperatury, ale też zmiana pojemności zależnie od napięcia i temperatury.

Autor wykonał także szereg eksperymentów z zacienianiem paneli, między innymi zwarcie takiego układu i obserwacja powrotu do stanu ustalonego. W warunkach zacienienia jednego z paneli widać wyraźnie na przebiegu (rys. 59) charakterystyczne załamania związane z szeregowym połączeniem dwóch paneli pracujących w różnych warunkach oświetlenia. Autor planuje wykorzystanie w dalszej części pracy efektu impulsowego (szybkie, chwilowe zwarcie układu) i analizę pochodnej sygnału do wykrywania stanu zacienienia paneli.

W rozdziale czwartym Autor skupił się na analizie znanych i budowie autorskich algorytmów umożliwiających śledzenia punktu mocy maksymalnej systemu PV. Chodzi tu nie o systemy nadążające za zmianą położenia słońca, a raczej o metody przeznaczone dla systemów stacjonarnych, a mających za zadanie dobór optymalnego punktu pracy w zależności od stanu pracy systemu (nasłonecznienie, zacienienia, itp.). Zwykle realizowane jest to poprzez odpowiedni dobór impedancji obciążenia systemu. Większość z nich to obecnie algorytmy cyfrowe bazujące na wynikach pomiaru prądu i napięcia w systemie, choć czasami tylko samego napięcia lub samego prądu. Doktorant wykonał ogromną pracę związaną z badaniami literaturowymi metod śledzenia MPPT. W pracy przeanalizował ok. 40 metod znanych z literatury, traktując je jako punkt wyjścia do opracowania własnych zmodyfikowanych algorytmów o lepszych zazwyczaj parametrach. Wśród rozważanych metod znaleźć można metody bazujące na stałych parametrach ogniw, metody działające na zasadzie prób i błędów, metody wykorzystujące dodatkowe czujniki, a także metody nawiązujące do logiki rozmytej czy uczenia maszynowego. Autor w pracy omówił kilka najbardziej obiecujących metod śledzenia, oceniając je pod kątem wad i zalet oraz analizował ich działanie w oparciu o przygotowane wcześniej scenariusze. Wśród wybranych znalazły się:

- algorytm P&O, jeden z najczęściej obecnie stosowanych. Działa on na zasadzie prób i błędów szukając odpowiedniego kierunku śledzenia punktu mocy maksymalnej. Bazuje na pomiarze prądu i napięcia systemu. Następnie zaburza punkt pracy poprzez zmianę napięcia, obserwując kierunek zmiany mocy wyjściowej. Jego wadą jest możliwość utknięcia w lokalnym maksimum. Wymaga on wykonywania ciągłych prób, aby stwierdzić, czy ekstremum nie uległo zmianie. Występują więc ciągłe oscylacje wokół punktu optymalnego. Często stosuje się w tym algorytmie zmienną wartość kroku obserwacji.
- algorytm IC (Incremental Conductance) działa podobnie jak P&O śledząc zmianę pochodnej mocy względem zmian napięcia i w ten sposób zmienia kierunek poszukiwania punktu optymalnego. Metoda ta jednak nie cechuje się oscylacjami w

punkcie optymalnym. Jeśli jednak zachodzą szybkie zmiany oświetlenia paneli, może utknąć w lokalnym ekstremum.

- algorytm PSO (Particle Swarm Optimization), jest elementem zbioru technik optymalizacyjnych inspirowanych zachowaniem zwierząt żyjących w grupach. W algorytmie tym każda z cząstek roju modyfikowana jest w taki sposób aby przemieszczać się w kierunku innych cząstek o lepszych pozycjach, poszukując najlepszego globalnego położenia wszystkich cząstek.
- Algorytm CS (Cuckoo Search) działający podobnie jak PSO generuje zbiór rozwiązań, a naśladując zachowanie ptaków, poszukuje najlepszego rozwiązania. W większości przypadków wyszukuje poprawnie maksimum globalne, jednak przy istnieniu ekstremów lokalnych o znaczących wartościach wymaga dodatkowych iteracji, przez co traci na efektywności, nawet w dobrych warunkach oświetlenia.
- Algorytm FSC (Fractional Short-Circuit Current), bazuje na przyjęciu liniowej zależności wartości prądu zwarcia panelu od wartości prądu w punkcie mocy maksymalnej. W tym algorytmie wykorzystywane są oddziaływania impulsowe (krótkotrwałe zwarcie wyjścia panelu), pomiar prądu zwarcia i wyliczenie wartości prądu w punkcie optymalnym. Stała proporcjonalności dobiera się na podstawie technologii wykonania panelu. Algorytm ten wybiera zwykle najbliższe ekstremum (w lewo od aktualnego punktu pracy) na charakterystyce (niekoniecznie globalne).
- Algorytm FOV (Fractional Open-Circuit Voltage) bazuje na pomiarze wartości napięcia otwartego obwodu. I przyjęciu liniowej zależności tego napięcia od napięcia w punkcie optymalnym. Podobnie jak w algorytmie FSC stała proporcjonalności zależy od technologii wykonania ogniw. Algorytm ten wybiera zwykle najbliższe ekstremum (w prawo od aktualnego punktu pracy) na charakterystyce (niekoniecznie globalne).

W związku z faktem, że każdy z przedstawionych algorytmów charakteryzuje się istotnymi wadami, Doktorant zaproponował rozwiązanie autorskie. Proponowany algorytm poszukiwania punktu mocy maksymalnej jest połączeniem dwóch algorytmów tj. P&O oraz CS. Algorytm ten wykorzystuje oddziaływanie impulsowe w celu pozyskania informacji o potencjalnym częściowym zacieleniu paneli. Realizuje to poprzez chwilową zmianę impedancji obciążenia i obserwację narastającego zbocza sygnału napięciowego (jak na rys. 59). Jeśli stwierdzone zostanie zacielenie, algorytm realizuje strategię CS. Jeśli jednak stwierdzone zostaną korzystne warunki oświetlenia idzie on ścieżką algorytmu P&O. Każdy z algorytmów przerywa działanie jeśli kolejny krok nie przynosi poprawy parametrów. Zapamiętywane są aktualne nastawy i utrzymywane do kolejnego kroku (zapobiega to oscylacjom). Następnie algorytm śledzi wartość mocy. Jeśli nastąpi jej zmiana, interpretuje to jako zmianę warunków pracy i uruchamia poszukiwanie kolejnego optymalnego punktu. W celu poprawności wykonania pomiarów Autor zmodyfikował układ współpracujący z panelami, tak aby pojemność wejściowa przetwornicy DC/DC nie zaburzała jakości pomiaru. W zależności od warunków zacielenia szybkość działania algorytmu jest zmienna ale w każdym z tych przypadków nie przekracza 1s. Autor porównał opracowany algorytm z algorytmami literaturowymi P&O oraz CS dla różnych profili nasłonecznienia metodami symulacyjnymi. Przy skokowej zmianie nasłonecznienia algorytm autorski uzyskał efektywność lepszą od obu literaturowych algorytmów, tj. o 5.5% lepszą od P&O i o 2.8% lepszą od CS. W sytuacji powolnych zmian nasłonecznienia, algorytm P&O utykał w maksimach lokalnych natomiast algorytm autorski radził sobie równie dobrze jak CS. Przy sprawdzeniu takiego scenariusza algorytm zaproponowany przez Autora wykazał o 10% lepszą efektywność niż P&O oraz o 3.3% lepszą niż CS. Średni czas znalezienia maksimum dla autorskiego algorytmu był mniejszy niż 0.5s. Testy przeprowadzono również dla przypadku równomiernego oświetlenia paneli (bez efektów zacielenia), symulując liniowy wzrost nasłonecznienia. W takich warunkach algorytm autorski i P&O działały niemal identycznie, a

algorytm CS uzyskał wynik o 16% gorszy. Badania przeprowadzono również z wykorzystaniem rzeczywistych profili zmian nasłonecznienia rejestrowanych przez system zbudowany w ramach tej pracy. Dla jednego z wybranych fragmentów, algorytm P&O utknął w maksimum lokalnym i uzyskał wynik o 30% gorszy od autorskiego, natomiast algorytm CS był gorszy o 2%. Badania na innych rzeczywistych profilach nasłonecznienia wskazują, że algorytm autorski jest zawsze nieco lepszy lub w niektórych przypadkach porównywalny z algorytmem CS i zazwyczaj lepszy od P&O.

W rozdziale piątym zebrano najważniejsze wnioski podsumowujące wyniki badań zaprezentowane w rozdziałach poprzedzających.

4. Uwagi do dyskusji i uwagi szczegółowe

Do opiniowanej pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Bartzaka recenzent zgłasza następujące kwestie do wyjaśnienia lub dyskusji:

1. Autor stosuje określenie „maksymalny punkt mocy”, czy nie lepiej byłoby „punkt mocy maksymalnej”?
2. Str. 15, rys. 4 – w jakich jednostkach wrażona jest wielkość przedstawiona na osi Y? Czy rzeczywiście chodzi tu o „masę powietrza”? Jeśli tak to powinna być w [kg]??
3. W pracy pojawiła się pewna niekonsekwencja w stosowaniu pojęć: „ogniwo”, „panel fotowoltaiczny” i „moduł” np. str. 18, 24, 40, Prośba o usystematyzowanie.
4. Rys. 7, 8 i 9 – dlaczego wartości napięć na osi X są tak bardzo różne, pomimo, że wszystkie te rysunki dotyczą ogniwa PV? Skąd takie różnice?
5. Str. 29, fragment pod rysunkiem. Jak często powtarzane są takie sekwencje, czyli jaka jest realna częstotliwość pobierania danych (próbki sygnałów)?
6. Rys. 23 – niepoprawna jednostka zmiennej na osi Y,
7. Str. 35, Dlaczego badania symulacyjne prowadzone są dla panelu o znacząco innych parametrach niż w badaniach eksperymentalnych (str. 29 - tabela)?
8. Rys. 39, w miejscach zaznaczonych strzałkami praktycznie nie widać ekstremów lokalnych.
9. Co to jest „A” i „ε” we wzorze (24), co rozumie się przez „W”?
10. Co to jest „Vg” na rys. 51 i 52? Brak wyjaśnienia – domyślam się, że chodzi o przerwę energetyczną?
11. Wzór (31) jak (w jakich jednostkach) wyrażone jest „N”?
12. Str. 72, linie 4-7 od dołu – proszę o wyjaśnienie, co i kiedy jest mierzone!
13. W pozycji [7] literatury warto zaznaczyć, że chodzi o rozprawę doktorską.

Autor nie ustrzegł się również pewnych nieścisłości i niedociągnięć edycyjnych i stylistycznych:

Ogólne:

- Spis wybranych oznaczeń mógłby być bardziej rozbudowany, co ułatwiłoby czytanie pracy,
- Zamiast określenia np. „rezystancja nieskończona”, lepiej byłoby użyć pojęcia „rezystancja o nieskończonej wartości”
- Bardzo różnie pisane jednostki na osiach rysunków, raz prosto, a raz jako „italic”. Warto by ujednoczyć sposób ich pisania. Np. rys 49 – każda oś inaczej.

Szczegółowe (niektóre):

1. Str. 8, linia 5 od góry – powinno być „.. kilku-kilkunastu ..”,
2. Str. 8, linia 18-19 od góry – niedokończone zdanie,
3. Str. 9, linia 1 od góry – powinno być „... opisowi ..”
4. Rys. 9 – oznaczenia np. V_{OC} pisane w różny sposób we wzorze (5) i na rysunku.
5. Str. 20 – indeksy w zmiennych pisane w różny sposób w tekście i na rysunku, np. Rs,
6. Rys. 20, dlaczego symbole woltomierza są ułożone poziomo? Zwykle na schematach tak się nie robi.
7. Str. 31, linia 2 od dołu – powinno być „słonecznym”,
8. Str. 36, linia 4 od góry, powinno być „... minuty..”,
9. Str. 42, Oznaczenie Ki raz pisane z indeksem dużą literą (wzór), a raz małą (tekst),
10. Str. 44, linia 11 od góry – jest „wartość iteracji”, lepiej „liczba iteracji”,
11. Rys. 51 i 52 – różne wielkości czcionek w podpisach,

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Za najważniejsze i oryginalne osiągnięcia Doktoranta uważam:

1. Opracowanie układu pomiarowego i przeprowadzenie badań eksperymentalnych mających na celu ustalenie pojemności ogniwa i stwierdzenie jej nieliniowego charakteru.
2. Opracowanie modelu ogniwa z jedną diodą uzupełnionego pojemnością o charakterystyce eksponencjalnej i wykazanie przewagi tego modelu w niektórych warunkach pracy paneli PV.
3. Opracowanie metodyki estymacji parametrów modelu ogniwa na podstawie danych producenta, zapewniającej lepsze niż dotychczas odwzorowanie tych parametrów.
4. Budowa systemu i zebranie bazy profili zmian oświetlenia paneli w warunkach rzeczywistych.
5. Opracowanie układu i metody (algorytmu) do śledzenia zmian punktu mocy maksymalnej z wykorzystaniem efektów oddziaływania impulsowego.
6. Przeprowadzenie badań symulacyjnych i badań w oparciu o profile rzeczywistych zmian oświetlenia dla różnych algorytmów, w tym autorskiego i porównanie jakości ich działania.
7. Zaproponowanie wykorzystania oddziaływania impulsowego do oceny warunków zacinienia paneli PV (i związana z tym modyfikacja modelu ogniwa – uwzględnienie nieliniowej pojemności).

Docenić również należy duże wyczucie, znajomość metod i umiejętność wykorzystania cech różnych, znanych, metod śledzenia MPPT, co dało efekt w postaci opracowania własnej propozycji algorytmu śledzenia, pozwalającego na uzyskanie wyników lepszych niż w efekcie zastosowania znanych dotąd algorytmów. W kontekście zastosowanych metod, opracowanego algorytmu i przedstawionych wyników stwierdzam, że teza pracy została udowodniona.

Biorąc pod uwagę wszystkie wcześniej sformułowane uwagi krytyczne, jak również oryginalne osiągnięcia Doktoranta i jakość uzyskanych wyników, z całym przekonaniem stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Bartzaka pt. „Dobór algorytmów MPPT w systemie fotowoltaicznym w warunkach częściowego zacinienia z wykorzystaniem oddziaływań impulsowych” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w odniesieniu do postawionego problemu i umiejętności jego

samodzielnego rozwiązania przez obowiązujące aktualnie przepisy. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Mateusza Bartczaka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, cursive letters, likely representing the name of the applicant or a representative.

