

Dr hab. inż. Barbara SWATOWSKA, prof. AGH
Instytut Elektroniki
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków 04.08.2022

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA UNIWERSYTETU MORSKIEGO W GDYNI**

Tytuł rozprawy:

Modelowanie elementów składowych systemów fotowoltaicznych

Autor rozprawy:

mgr inż. Ewa Krac

Promotor: *prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki*

Promotor pomocniczy: *dr inż. Jacek Dąbrowski*

W świetle obecnej sytuacji na światowym rynku energetycznym, prace nad ulepszeniem metod wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej z odnawialnych źródeł energii (OZE), a także optymalizacja urządzeń do tego służących, bez wątpienia stanowią bardzo istotny element rozwoju naukowego, jak i gospodarczego wielu krajów. Możliwość efektywnego użytkowania ekologicznych źródeł energii, jak np. energii słonecznej, wiatru czy energii geotermalnej, nabiera również dodatkowego znaczenia w aspekcie stabilności energetycznej i niezależności od krajów zasobniejszych w standardowe źródła, jak węgiel, ropa czy gaz ziemny. Prace nad udoskonalaniem instalacji, służących do konwersji wspomnianych zasobów w energię elektryczną bądź ciepłą, z uwzględnieniem konkretnych warunków klimatycznych i geograficznych w miejscu pracy takiej instalacji, stanowią ważny element tych działań.

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Ewy Krac dotyczy procesów modelowania najważniejszych elementów systemów fotowoltaicznych: ogniw słonecznych, akumulatorów, czy też inwerterów, mając na uwadze zjawiska elektryczne, termiczne oraz optyczne w każdym z tych elementów, jakie mają miejsce podczas zamiany promieniowania słonecznego w energię elektryczną. Celem pracy było sformułowanie skupionych modeli elektrotermicznych wspomnianych elementów, a także ich weryfikacja doświadczalna. Bardzo istotne na etapie realizacji pracy były badania wpływu promieniowania słonecznego na temperaturę ogniwa oraz modułu fotowoltaicznego (PV). Ponadto koniecznym było uwzględnienie procesu samonagrzewania się poszczególnych elementów systemów PV podczas ich pracy.

Rozprawa składa się z 13 rozdziałów i stanowi szersze opracowanie powiązanych zagadnień teoretycznych z zakresu podstaw fotowoltaiki, z omówieniem literaturowych modeli ogniw i modułów PV, a także z opisem procesu estymacji wartości parametrów elektrycznych, optycznych i termicznych w opracowanych modelach. Realizacja pracy obejmowała także weryfikację opracowanych modeli oraz przeprowadzenie badań dwóch autonomicznych kompletnych systemów fotowoltaicznych:

laboratoryjnej stacji ładowania laptopów oraz systemu PV, znajdującego się na dachu jednego z budynków Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Aby uwzględnić wpływ zjawisk pogodowych na sprawność analizowanego systemu, wykorzystano zaprojektowaną przez Autorkę pracy stację pogodową LB-480, która pozwala rejestrować temperaturę otoczenia, wilgotność, kierunek i prędkość wiatru oraz gęstość mocy promieniowania słonecznego. Wykonano także modelowanie sezonowych efektywności rzeczywistej instalacji PV – dobowe i sezonowe zmiany natężenia promieniowania oraz temperatury w rejonie Gdyni, a otrzymane rezultaty porównano z wynikami faktycznych pomiarów. Całość zwięźcza podsumowanie, w którym Autorka wymienia najważniejsze osiągnięcia pracy, a także wskazuje możliwe kierunki rozwoju zrealizowanych badań.

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autorkę? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Rozprawa doktorska ma zarówno charakter teoretyczny, jak i doświadczalny. Pierwsze rozdziały (1-4) bazują przede wszystkim na informacjach literaturowych i opisują wprowadzenie do zagadnień fotowoltaiki, generacje ogniw i ich sprawności, charakteryzację elementów fotowoltaicznego systemu zasilającego, przegląd modeli ogniw i modułów PV oraz zagadnienie wpływu temperatury na właściwości i pracę ogniw. Kolejne rozdziały (5-7) odnoszą się do teoretycznych modeli ogniwa oraz modułu, a także estymacji parametrów elektrycznych, optycznych oraz termicznych poszczególnych modeli, aż do weryfikacji opracowanych modeli. Praca zawiera także opis stanowisk do pomiaru charakterystyk elementów systemu PV (rozdział 9) oraz rzeczywiste badania laboratoryjnego systemu fotowoltaicznego i analizy sezonowej efektywności rzeczywistej instalacji PV. Podjęte działania wykazują, że Doktorantka ma świadomość, iż sprawność pojedynczego ogniwa oraz efektywność konwersji całego systemu PV wynika zarówno z rodzaju i jakości jego elementów składowych, jak i procesów termicznych, zachodzących w nich w różnych stopniu.

Autorka rozprawy definiuje cel i tezy pracy w osobnym podrozdziale (1.3) na stronach 19-20. Celem pracy było sformułowanie i eksperymentalna weryfikacja skupionych elektrotermicznych modeli głównych elementów systemów fotowoltaicznych. Na potrzeby realizacji pracy postawiono następującą tezę:

Zjawiska termiczne w istotny sposób wpływają na właściwości elementów składowych fotowoltaicznego systemu zasilającego, a wpływ ten można efektywnie modelować przy wykorzystaniu skupionych elektrotermicznych modeli elementów składowych takiego systemu, pracującego przy różnych warunkach atmosferycznych.

Problemy naukowe oraz zakres prac eksperymentalnych zostały trafnie i jasno sprecyzowane.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącej o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Autorka w bibliografii przytacza 17 prac ze swoim współautorstwem oraz 162 źródła, z których najstarsza jest z roku 1981, a ponad połowa z lat 2012-2021. Ranga wielu z cytowanych czasopism jest bardzo wysoka, a zakres tematyczny objęty przez cytowane czasopisma jest w pełni adekwatny do tematu rozprawy. Świadczy to o rzetelnym ujęciu w rozprawie aktualnych doniesień literaturowych i potwierdza znajomość Doktorantki współczesnej literatury, związanej z tematyką rozprawy.

Pośród 17 prac z okresu 2012-2021, w których Pani mgr inż. Ewa Krac jest współautorką, znajdują się zarówno artykuły w czasopismach z listy JCR, jak i w czasopismach krajowych oraz materiałach konferencyjnych. Z załączonego wykazu prac wynika ponadto, że wyniki swoich badań

prezentowała na sześciu konferencjach.

Mając powyższe na uwadze, można stwierdzić, że Autorka posiada bardzo dobre rozeznanie w tematyce związanej z doktoratem.

3. Czy autorka rozwiązała postawione zagadnienia, czy użyła właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Zaplanowany i konsekwentnie realizowany przez Autorkę program badań w świetle sformułowanej tezy jest uzasadniony. Opracowane modele, a także pomiary rzeczywiste laboratoryjnego stanowiska fotowoltaicznego oraz instalacji na dachu budynku Uniwersytetu Morskiego udowadniają postawioną tezę i zostały także szczegółowo opisane w publikacjach Doktorantki. Zastosowane narzędzie symulacyjne (SPICE) oraz stanowiska pomiarowe pozwoliły zweryfikować i porównać efektywności rzeczywistych systemów, pracujących w warunkach klimatycznych Gdyni, z modelem symulacyjnym. Forma prezentacji uzyskanych rezultatów zarówno w rozprawie, jak i publikacjach, jest czytelna i jednoznaczna.

Wobec powyższego, z całą pewnością można stwierdzić, że Doktorantka zastosowała właściwe metody symulacyjno-pomiarowe, a tym samym, że posiada umiejętności planowania i prowadzenia eksperymentów i analiz naukowych.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Za oryginalne osiągnięcie Autorki należy uznać sformułowanie modeli elektrotermicznych ogniwa i modułu fotowoltaicznego, a także akumulatora oraz impulsowych przekształtników energii elektrycznej. Ponadto Autorka zaprojektowała i skonstruowała trzy stanowiska pomiarowe. Pierwsze z nich służy do przeprowadzenia pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych ogniw fotowoltaicznych. Drugie ze stanowisk dedykowane jest do wyznaczania charakterystyk paneli fotowoltaicznych. Ostatnie natomiast służy do wyznaczania zależności elektrycznych charakterystyk ogniw od kąta padania na nie promieni światła.

Uzyskane rezultaty są potwierdzeniem, a także uzupełnieniem stanu wiedzy w zakresie zjawisk termicznych, zachodzących w ogniwach słonecznych oraz innych elementach składowych systemów fotowoltaicznych. Mają one szczególne znaczenie w pracach nad zwiększaniem efektywności takich systemów.

5. Czy autorka wykazała umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Poprawna i estetyczna redakcja rozprawy umożliwia łatwe zrozumienie prezentowanej treści. Zauważalne są jedynie pewne braki interpunkcyjne i parę literówek, a część wykresów mogłaby być większa w celu poprawienia czytelności (np. Rys. 1.5, 4.1, 7.4, 11.10 czy 12.1). Ponadto w niektórych miejscach wyjaśnienia nowo wprowadzanych terminów są trochę ogólnikowe. Obecne w pracy niedociągnięcia nie wpływają na całościową ocenę rozprawy, nie umniejszając wysokiej staranności i rzetelności w przygotowaniu tekstu, wykresów i tabel.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

W rozprawie nie zauważono istotnych błędów rzeczowych. Jednakże Autorka nie ustrzegła się kilku niedomówień czy drobnych pomyłek. Oto ich wykaz:

- ✓ Str. 8 – pierwsze ogniwo cynowo-selenowe zbudowano w 1843 roku, a nie w 1841.
- ✓ Str. 10 – przy analizie wykresu 1.4 Autorka wspomina o nieciągłościach widm dla różnych wartości współczynnika masy optycznej AM, ale nie daje żadnego komentarza z czego te nieciągłości wynikają.
- ✓ Str. 11 – niewłaściwa pisownia nazwy tellurek kadmu.
- ✓ Str. 14 – po raz pierwszy we wzorze pojawia się q – ładunek elementarny oraz k – stała Boltzmanna. Wskazane byłoby podać wartości tych parametrów, jako stałych.
- ✓ Na tej samej stronie Autorka opisuje zjawisko fotowoltaiczne. Myślę, że wskazane byłoby wspomnieć, iż jest to rodzaj zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego.
- ✓ Str. 15 – pomyłka w numeracji wykresu – powinno być Rys. 1.7. Ogniwa zabezpiecza się czterema warstwami zabezpieczającymi, a nie pięcioma.
- ✓ Str. 16 – Doktorantka wspomina, że wartości kluczowych parametrów modułów, podawane przez producentów, odnoszą się do warunków STC. Nie tylko – większość modułów ma także podawane parametry dla warunków NOTC. Czym różnią się one od STC?
- ✓ Str. 17 – pomyłka w numeracji wykresu – powinno być Rys. 1.8.
- ✓ Korzystając z programu SPICE wskazane byłoby podać wersję, z jakiej korzystano w procesie modelowania.
- ✓ Str. 29 – właściwe byłoby porównywać krzywe na wykresach 4.1 a) i b) dla takich samych temperatur 20 i 100°C. Poza tym, jeśli mówimy o charakterystyce prądowo-napięciowej ogniwa I(U), to prąd powinien być na osi Y, a napięcie na osi X.
- ✓ Str. 30 – jeśli mowa o zależności parametrów ogniwa od temperatury, to oczywistym jest iż ilość generowanej mocy będzie zmniejszała się ze wzrostem temperatury przede wszystkim z powodu obniżania się napięcia. Autorka powinna lepiej wyjaśnić zasadność rysowania i interpretacji zależności mocy generowanej przez ogniwo od prądu.
- ✓ Str. 31 – Autorka napisała: „Jak pokazano w rozdziale 4, temperatura ogniwa fotowoltaicznego, a w konsekwencji również paneli fotowoltaicznych, w czasie ich pracy może być znacznie wyższa od temperatury otoczenia”. To prawda, ale czy w ramach realizacji pracy przeprowadzono jakiegokolwiek równoczesne pomiary temperatury otoczenia i temperatury modułu, aby eksperymentalnie to potwierdzić?
- ✓ Str. 32 – pojawia się oznaczenie T_0 jako temperatura odniesienia. Czym tak naprawdę jest temperatura odniesienia, do jakiej sytuacji się odnosi?
- ✓ Czy model opisywany na stronie 35 odnosi się tylko do modułu z szeregowo połączonymi ogniwami, czy też do takiego z ogniwami łącznie szeregowo-równoległe?
- ✓ Str. 43 – pomyłka w numeracji wykresów – powinno być Rys. 6.3 i Rys. 6.4. Na rysunku 6.4 przedstawiono fotografie ogniw oraz podano ich parametry. Powierzchnia ogniw jest niespójna z wartościami prądu – prąd powyżej 8 A generują ogniwa o powierzchni 0,0227 m², a nie mm².
- ✓ Str. 44 – pomyłka w numeracji wykresu – powinno być 6.5
- ✓ Str. 45 – stwierdzenie, że „Duża powierzchnia paneli fotowoltaicznych pozwala na uzyskanie lepszych warunków chłodzenia dla paneli PV niż dla ogniw PV” nie do końca jest słuszne (nie w każdym warunkach i nie każdy typ ogniw).
- ✓ Str. 50 – Rys. 7.4 – warto podać na podstawie jakiego źródła przyjęto zakres światła widzialnego od 400 do 700 nm. Literaturowo jest on podawany różnie od 380 do 780 nm.
- ✓ Str. 53 – Rys. 7.7 – wykresy prądowo-napięciowe narysowane odwrotnie.
- ✓ Str. 54 – Autorka pisze, że wraz ze zmniejszaniem wartości kąta następuje spadek wartości napięcia obwodu otwartego na ogniwie – to prawda, ale dopiero od pewnej wartości kąta, a nie w całym zakresie zmian ϕ od 10 do 90°.
- ✓ Na dole tej samej strony podane są wartości procentowe o ile zmienia się prąd zwarcia dla

poszczególnych kątów padania światła na ogniwo – nie do końca jest jasne jak wyliczono te zmiany, gdyż już z wykresu 7.9 widać, że wynoszą one znacznie więcej niż 5,5 czy 13%.

- ✓ Rysunek 7.9, 7.11 – wykresy I(U) czy U(I)?
- ✓ Str. 58 – „Dla panelu polikrystalicznego uzyskane wartości napięcia wyjściowego panelu PV są wyższe niż dla monokrystalicznego panelu PV nawet o około 1,5 V.” – z czego to wynika skoro typowo ogniwa monokrystaliczne generują wyższe napięcie niż polikrystaliczne?
- ✓ Str. 67 – mowa o rysunku 8.7, a w pracy nie ma takiego.
- ✓ Str. 68 – czy pomiar gęstości mocy promieniowania, realizowany za pomocą stacji pogodowej LB-480, dotyczy promieniowania całkowitego czy też z uwzględnieniem składowej dyfuzyjnej osobno?

Wymienione usterki nie wpływają na wysoką ocenę redakcji całej rozprawy.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Praca Mgr inż. Ewy Krac ma bardzo wyraźny charakter aplikacyjny, gdyż sformułowane modele oraz zrealizowane badania jednoznacznie wskazują na możliwość wykorzystania uzyskanych rezultatów przy projektowaniu rzeczywistych systemów fotowoltaicznych, pracujących w różnych warunkach klimatycznych. Dodatkowo perspektywa modelowania właściwości dynamicznych instalacji fotowoltaicznych, wynikających ze skokowych zmian gęstości mocy promieniowania słonecznego lub rezystancji obciążenia czy też opracowania modelu instalacji fotowoltaicznej, pozwalającego na ocenę jakości produkowanej energii elektrycznej, otwiera nowe możliwości dalszego udoskonalania efektywnych systemów PV. Ten fakt w pełni uzasadnia przydatność rozprawy dla nauk technicznych.

8. Ocena końcowa

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa prezentuje wymagany poziom naukowy, a przedstawione wyniki badań są oryginalnym dorobkiem Doktorantki. Mgr inż. Ewa Krac właściwie i rzetelnie rozwiązała postawione sobie zadania, a jednocześnie wykazała się odpowiednią wiedzą oraz umiejętnościami, wymaganymi dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w obszarze automatyki, elektroniki i elektrotechniki.

Cel pracy został osiągnięty i recenzowana rozprawa doktorska w pełni **spełnia wymagania** wynikające z Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z 14 marca 2003 roku, wraz z późniejszymi zmianami i na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Ewy Krac do publicznej obrony.

Dr hab. inż. Barbara Swatowska, prof. AGH