

Zielona Góra, 20 grudnia 2022 r.

Dr hab. inż. Robert Smoleński, prof. UZ
Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki
Uniwersytet Zielonogórski

Recenzja

osiągnięcia naukowego pt.

„Pomiary i modelowanie właściwości cieplnych elementów półprzewodnikowych na potrzeby projektowania tych elementów i układów je zawierających”

oraz aktywności naukowej

dr. inż. Pawła Krzysztofa Góreckiego

1. Podstawa prawna

Recenzja została przygotowana na wniosek Rady Naukowej Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni związany z uchwałą nr 22/2022 z dnia 10 listopada 2022 r. w sprawie powołania Komisji habilitacyjnej w postępowaniu o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika wszczętym na wniosek dr. Pawła Krzysztofa Góreckiego, zwanego dalej Wnioskodawcą.

2. Przesłanki warunkujące nadanie stopnia doktora habilitowanego

Zgodnie z art. 219 Prawa o szkolnictwie wyższym i nauce z 20 lipca 2018 r., stopień doktora habilitowanego nadaje się osobie, która spełnia trzy następujące warunki:

- posiada stopień doktora,
- posiada w dorobku osiągnięcia naukowe lub artystyczne stanowiące znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny,
- wykazuje się istotną aktywnością naukową lub artystyczną.

Dr inż. Paweł Krzysztof Górecki otrzymał stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie Elektronika, nadany z wyróżnieniem przez Radę Wydziału Elektrycznego Akademii Morskiej w Gdyni dnia 21.03.2019 r. po obronie rozprawy doktorskiej: „Modelowanie tranzystorów IGBT z uwzględnieniem zjawisk termicznych na potrzeby komputerowej analizy układów elektronicznych w programie SPICE”.

Załączone przez Wnioskodawcę dokumenty dotyczące nadania stopnia doktora potwierdzają, że pierwszy warunek wymagany do nadania stopnia doktora habilitowanego został spełniony.

3. Ocena osiągnięcia naukowego

Zgodnie z regulacjami ustawowymi, przedstawione do oceny osiągnięcie naukowe powinno stanowić znaczący wkład w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika. O znaczeniu i wpływie wyników pracy naukowej prezentowanej w czasopismach świadczyć może renoma danego czasopisma określona parametrycznie, powszechnie akceptowanymi w środowisku naukowym, współczynnikami wpływu. Istotne, a według wielu opinii, nawet istotniejsze od rangi czasopisma znaczenie ma liczba cytowań publikacji, która jest odzwierciedleniem rzeczywistego wpływu publikacji na środowisko naukowe.

Ocena bibliometryczna cyklu publikacji

Oceniany cykl obejmuje 19 artykułów, opublikowanych w czasopismach, które w roku publikacji prac Wnioskodawcy były indeksowane w bazie Journal Citation Reports (JCR) odpowiadających tematycznie dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika (Tabela 1).

Tabela 1. Zestawienie parametrów bibliometrycznych dla publikacji w czasopismach według bazy Web of Science (WoS).

Nr	Czasopismo	IF w 2021 roku	Kwartył
1	IEEE Transactions on Industrial Electronics	8.162	Q1
2-3	IEEE Transactions on Power Electronics (x 2)	5.967	Q1
4	IEEE Transactions on Instrumentations and Measurements	5.332	Q1
5-6	IEEE Transactions on Electron Devices (x 2)	3.221	Q2
7-8	IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing (x 2)	1.922	Q3
9	Applied Sciences	2.838	Q2
10-13	Energies (x 4)	3.252	Q3
14-15	Electronics (x 2)	2.690	Q3
16	Microelectronics Reliability	1.418	Q4
17-18	Microelectronics International (x 2)	0.942	Q4
19	International Journal of Electronics and Telecommunications	0.140	Q4

Wykazane we wniosku prace stanowią monotematyczny cykl i lokują się ściśle w obszarze merytorycznym wniosku. Wszystkie publikacje indeksowane są w bazie WoS. Cztery publikacje zostały opublikowane w czasopiśmie lokującym się w pierwszym kwartylu bazy JCR (Q1), w dwóch z nich Wnioskodawca jest tzw. pierwszym autorem. Trzy publikacje zostały opublikowane w czasopismach z Q2, osiem z Q3 i cztery z Q4.

Publikacje będące przedmiotem wniosku uzyskały znaczne liczby cytowań, pomimo, że zostały opublikowane w większości po 2019 roku (dwie w 2017 r.). Na przykład publikacja A3. w IEEE Transactions on Instrumentation & Measurements uzyskała 32 cytowania na liście WoS od 2019 roku a publikacja A.13 w IEEE Transactions on Power Electronics uzyskała 27 cytowań od 2020 roku, co pomimo autocytowań potwierdza duży wpływ badań Wnioskodawcy na dyskurs naukowy w podejmowanej tematyce badawczej.

Zgodnie z Web of Science, łączna liczba cytowań prac habilitanta w momencie przygotowania recenzji wynosi 395 (210 bez autocytowań), a indeks Hirscha jest równy 11.

Z punktu widzenia parametrycznej oceny bibliometrycznej cyklu publikacyjnego, całkowity wynik można uznać za bardzo dobry, a biorąc pod uwagę czas uzyskania osiągnięcia nawet za wybitny, wskazujący na duże zaangażowanie, dojrzałość naukową Wnioskodawcy, dobry warsztat badawczy oraz organizację prac.

Ocena merytoryczna osiągnięcia naukowego

Tematyka recenzowanego osiągnięcia naukowego jest kontynuacją prac związanych z rozprawą doktorską i koncentruje się na pomiarach i modelowaniu właściwości cieplnych elementów półprzewodnikowych na potrzeby projektowania tych elementów i układów, które je zawierają. W ocenie recenzenta tematyka cyklu publikacyjnego lokuje się w obszarze wiedzy związanej z dyscypliną automatyka, elektronika i elektrotechnika.

- *Publikacja [1]:* w artykule zaprezentowano metody „szybkiej analizy” przekształtników DC-DC. Omówiono uproszczenia przyjęte na etapie opracowywania tych metod oraz wskazano ich wpływ na dokładność obliczeń. Szczególną uwagę poświęcono analizie zjawisk termicznych w przyrządach półprzewodnikowych, co odpowiada tematyce recenzowanego osiągnięcia naukowego. Przedstawiono przykładowe wyniki dla przekształtnika DC-DC typu boost uzyskane wybranymi metodami, omówiono zakres zastosowania poszczególnych metod obliczeniowych oraz czasu ich trwania.
- *Publikacja [2]:* w pracy zaproponowano metody pomiaru i obliczeń temperatury wewnętrznej struktur tranzystora bipolarnego z izolowaną bramką (IGBT) oraz diody zintegrowanej we wspólnej obudowie. W artykule zaproponowano nieliniowy model termiczny rozważanego urządzenia. Model ten uwzględnia zarówno zjawiska samonagrzewania w obu matrycach, jak i wzajemne sprzężenia termiczne między nimi. W zaproponowanym modelu uwzględniono wpływ temperatury wewnętrznej urządzenia na opory cieplne. Opisano metody pomiaru impedancji termicznej oraz omówiono wybrane wyniki ilustrujące właściwości termiczne badanych urządzeń.
- *Publikacja [3]:* w artykule przedstawiono opis właściwości termicznych modułu tranzystora IGBT za pomocą „kompaktowego” modelu termicznego. Model umożliwia obliczenie temperatury wewnętrznej każdego elementu półprzewodnikowego wchodzącego w skład zintegrowanego modułu z uwzględnieniem zjawisk samonagrzewania i wzajemnych sprzężeń termicznych między poszczególnymi elementami. Zaproponowano autorską metodę pomiaru parametrów modelu termicznego urządzeń wchodzących w skład modułu oraz

przedstawiono wyniki analizy dokładności metody. Przedstawiono wyniki pomiaru badanych parametrów oraz oceniono nierównomierność rozkładu temperatury w module.

- *Publikacja [4]*: w pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych diod Schottky'ego wykonanych z węgliku krzemu. Szczególną uwagę zwrócono na wpływ procesu montażu struktur diodowych w obudowach opracowanych na Politechnice Warszawskiej oraz wpływ temperatury otoczenia i zjawisk samonagrzewania na charakterystyki statyczne badanych diod. Wykazano, że wysokotemperaturowe zabiegi technologiczne mogą wpływać na charakterystyki diod oraz że zjawiska samonagrzewania mogą w sposób istotny wpływać na odstępstwa od tych charakterystyk.
- *Publikacja [5]*: przedstawiono wyniki analiz budowy diod GaN Schottky'ego oraz omówiono wybrane wyniki pomiarów parametrów termicznych. Wskazano, że najniższe wartości oporu cieplnego pomiędzy złączem a obudową uzyskuje się stosując technologię SLID (Solid-Liquid InterDiffusion), mimo że proces ten prowadzono w niższej temperaturze.
- *Publikacja [6]*: w pracy wykazano, że temperatura wpływa na charakterystyki diod GaN Schottky'ego w sposób mniej znaczący niż w przypadku klasycznych diod krzemowych. Wykorzystano zaproponowany w artykule model do opisu właściwości wykonanych laboratoryjnie diod GaN Schottky'ego.
- *Publikacja [7]*: w artykule przedstawiono wyniki badań opisujących wpływ sposobu montażu matrycy tranzystora bipolarnego z izolowaną bramką (IGBT) do podstawy ramki wyprowadzeniowej TO-220 na jej parametry cieplne. Opisano również zastosowaną pośrednią metodę pomiarową należącą do pośrednich metod elektrycznych. Analizowano wpływ sposobu montażu mocowania matrycy do obudowy na efektywność odprowadzania ciepła.
- *Publikacja [8]*: zbadano wpływ wykonania złącza lutowniczego na właściwości termiczne tranzystorów IGBT lutowanych na podłożu szklano-epoksydowym. Zmierzono impedancję cieplną raz rezystancję cieplną próbek. Wskazano, że parametry cieplne tranzystorów IGBT mogą ulegać zmianie ze względu na znaczną przewodność cieplną warstwy międzymetalicznej w porównaniu z przewodnością cieplną masy lutowniczej.
- *Publikacja [9]*: w artykule przedstawiono wyniki analiz właściwości wybranych modeli literaturowych tranzystorów IGBT. Na tej podstawie zaproponowano autorski obwodowy model tranzystorów IGBT o parametrach skupionych dedykowany dla oprogramowania SPICE. Przedstawiono również sposób wyznaczania parametrów modelu.
- *Publikacja [10]*: w pracy opisano problemy modelowania procesu przełączania tranzystorów IGBT z wykorzystaniem środowiska SPICE. Przedstawiono rekomendację modelu tranzystora IGBT, w którym uwzględniono wpływ temperatury na charakterystykę statyczną i dynamiczną. Przedstawiono również wyniki weryfikacji eksperymentalnej dla tranzystora IRG4PC40UD.
- *Publikacja [11]*: w artykule zaproponowano model elektrotermiczny tranzystorów IGBT dedykowany środowisku SPICE, który umożliwia obliczenie nieizotermicznej charakterystyki stałoprądowej uwzględniając nieliniowość zjawisk termicznych w tym urządzeniu. Otrzymane wyniki porównano z wynikami obliczeń

przeprowadzonych z wykorzystaniem klasycznego modelu dostępnego w literaturze przedmiotu.

- *Publikacja [12]*: w pracy uwzględniono wpływ bezwładności elektrycznej i cieplnej na przebiegi napięć na zaciskach rozpatrywanego tranzystora IGBT pracującego w obwodzie impulsowym oraz na przebiegi temperatury wewnętrznej tego urządzenia.
- *Publikacja [13]*: w artykule zaproponowano model obwodowy, w którym uwzględniono wpływ temperatury wewnętrznej tranzystora IGBT na efektywność odprowadzania ciepła. Opisano metodę estymacji parametrów tego modelu. Poprawność opracowanego modelu zweryfikowana została eksperymentalnie dla różnych warunków chłodzenia oraz zmiennej wartości temperatury otoczenia. Dodatkowo niektóre wyniki obliczeń porównano z wynikami obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem wybranych modeli rekomendowanych w literaturze.
- *Publikacja [14]*: w pracy zaproponowano uśredniony model przełącznika diodowo-tranzystorowego zawierającego tranzystor IGBT oraz przedstawiono porównanie wyznaczonej na podstawie modelu charakterystyki przekształtnika DC/DC typu boost z charakterystyką obliczoną w SPICE przy użyciu analizy stanów nieustalonych i modeli literaturowych diody i tranzystora IGBT.
- *Publikacja [15]*: w artykule zaproponowano model mający postać podukładów przeznaczonych do programu symulacyjnego SPICE, umożliwiając obliczanie charakterystyk przekształtników DC-DC w stanie ustalonym z uwzględnieniem zjawisk samonagrzewania, zarówno w diodzie, jak i w tranzystorze IGBT.
- *Publikacja [16]*: w artykule przeanalizowano dokładność obliczeń charakterystyki przekształtnika DC/DC typu boost w stanie ustalonym z wykorzystaniem elektrotermicznego uśrednionego modelu tranzystora IGBT i diody szybkiej. Poprawność wyników obliczeń została zweryfikowana doświadczalnie.
- *Publikacja [17]*: w pracy zaprezentowano koncepcję elektrotermicznego modelu przełącznika energoelektronicznego bazującego na tranzystorze IGBT do modelowania przekształtników DC/DC. Rekomendowany model ma postać obwodową, umożliwiając obliczenia charakterystyk elektrycznych przekształtnika oraz temperatur złączy elementów półprzewodnikowych. Poprawność sformułowanego modelu została potwierdzona doświadczalnie dla wybranego arbitralnie przekształtnika.
- *Publikacja [18]*: w artykule opisano metodę poprawy dokładności obliczeń temperatury złącza tranzystora IGBT w oprogramowaniu PLECS (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation), która umożliwia obliczenie temperatury złącza przy użyciu nieliniowego modelu termicznego. Przydatność metody została zweryfikowana eksperymentalnie. Wskazano na poprawę dokładności obliczeń i skrócenie ich czasu.
- *Publikacja [19]*: zaproponowano metodę obliczania temperatury złącza IGBT w oprogramowaniu symulacyjnym PLECS. Przedstawiono opis proponowanej metody oraz procedurę estymacji parametrów. Metoda została zweryfikowana eksperymentalnie dla przypadku przekształtnika DC/DC typu boost. Przedstawiono dyskusję rozbieżności pomiędzy wynikami symulacyjnymi a eksperymentalnymi.

Obszar wyzwań badawczych podejmowanych przez Wnioskodawcę obejmuje zagadnienia aktualne i ważne, zarówno w kontekście poznawczym, jak i aplikacyjnym. Chronologia publikacji, pomimo, że dotyczy relatywnie krótkiego czasu, potwierdza rozwój naukowy Wnioskodawcy oraz ewolucję prezentowanych zagadnień od głównie opisowych, poprzez budowę własnych modeli i analizy teoretyczne i symulacyjne, do walidacji eksperymentalnej opracowanych modeli oraz ich optymalizacji zarówno pod względem dokładności jak i złożoności obliczeniowej.

Jako wiodące osiągnięcie naukowe uznać można opracowanie metod pomiaru parametrów cieplnych dyskretnych i zintegrowanych przyrządów półprzewodnikowych, uwzględnienie wpływu techniki montażu na parametry cieplne przyrządów półprzewodnikowych, propozycję autorskiego modelu elektrotermicznego tranzystora IGBT oraz metody analizy elektrotermicznej układów impulsowego przekształcania energii, której użyteczność potwierdzono eksperymentalnie dla wybranego przekształtnika.

W szczególności Wnioskodawca uzyskał szereg wartościowych wyników badań z zakresu modelowania tranzystorów IGBT stosowanych w przekształtnikach energoelektronicznych, metod pomiaru przejściowych impedancji termicznych tranzystorów IGBT oraz wpływu montażu półprzewodnikowych przyrządów mocy na charakterystyki elektrotermiczne, takich jak:

- opracowanie układów do pomiaru własnych i wzajemnych przejściowych impedancji termicznych w tranzystorach IGBT oraz modułach IGBT,
- określenie wpływu nierównomierności rozkładu temperatury w obudowie tranzystora IGBT na jego parametry,
- przedstawienie wzajemnego oddziaływania termicznego struktur półprzewodnikowych zintegrowanych we wspólnej obudowie,
- opis wpływu sposobu montażu struktury półprzewodnikowej SiC w obudowie ceramicznej na rezystancję termiczną elementu,
- zbadanie wpływu siły docisku struktury półprzewodnikowej podczas montażu do podłoża oraz wpływu parametrów połączenia lutowanego na parametry termiczne elementu,
- opracowanie i weryfikacja eksperymentalna elektrotermicznego modelu tranzystora IGBT uwzględniającego nieliniowość zjawisk cieplnych zaimplementowanego w środowisku SPICE,
- opracowanie algorytmów do precyzyjnego obliczania temperatury tranzystora IGBT pracującego w układach impulsowych dedykowanych środowisku PLECS oraz ich eksperymentalna weryfikacja w arbitralnie wybranym układzie.

Pomimo zdecydowanie pozytywnej oceny recenzowanego cyklu publikacji, podczas jego lektury powstały następujące uwagi natury ogólnej:

- jako obiekt eksperymentalnej walidacji we wszystkich publikacjach wybrano przekształtnik DC/DC typu boost, który jest jednym z najprostszych przekształtników energoelektronicznych, dlatego Wnioskodawca nie pokusił się o walidację w bardziej skomplikowanych topologiach,
- w pracach wykazano wzajemne oddziaływania termiczne struktury tranzystora IGBT oraz diody szybkiej zintegrowanych we wspólnej obudowie, czy można zatem stosować niezależnie proponowane modele obwodowe dla poszczególnych tranzystorów zintegrowanych w module IPM np. tranzystorów z diodami w układzie mostka trójfazowego,

- czy uwzględnienie oddziaływań pomiędzy elementami w modułach IPM jest zasadne, realizowalne oraz jak zwiększyłoby to złożoność obliczeniową modelu,
- we wzorze (1) przyjmuje się stałą temperaturę otoczenia, natomiast np. przy projektowaniu układów wentylacji przekształtnika symuluje się takie zjawiska jak turbulencje i cienie aerodynamiczne spowodowane elementami o znacznych gabarytach (np. kondensatory elektrolityczne) przy chłodzeniu wymuszonym, jaki procentowy wpływ mają tego typu warunki zewnętrzne na analizowane zjawiska,
- istotne z poznawczego i aplikacyjnego punktu widzenia wyniki dotyczące wpływu np. metod lutowania na rezystancję termiczną wskazują, że opracowanie wiarygodnego modelu elektrotermicznego rzeczywistego przekształtnika wymaga uwzględnienia wielu parametrów, czy możliwe jest opracowanie takiego modelu dla rzeczywistego przekształtnika, czy rekomendowane modele służą raczej do analizy poszczególnych, wybranych aspektów elektrotermicznych?

Powyższe uwagi ogólne mają jedynie charakter dyskusyjny i nie wpływają zasadniczo na zdecydowanie pozytywną ocenę recenzowanego cyklu publikacji.

4. Ocena aktywności naukowej i organizacyjnej habilitanta

Wymagania dla kandydatów do stopnia naukowego doktora habilitowanego wymieniają jako znaczący element oceny aktywność w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej. Jako szczególnie istotne elementy dorobku Wnioskodawcy w tym zakresie należy wymienić:

- dwa średniookresowe staże naukowe na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w okresach od 01.07.2019 r. do 30.09.2021 r. oraz 01.07.2021 r. do 31.08.2021 r. realizowane pod opieką dr hab. inż. Daniela Wojciechowskiego, prof. PG a finansowane w ramach programu „Regionalna Inicjatywa Doskonałości”, których wymiernym efektem były trzy publikacje, m. in. w czasopiśmie IEEE Transactions on Electron Devices,
- międzynarodową współpracę w ramach zespołu badawczego, w skład którego wchodził naukowcy z: Budapest University of Technology and Economics, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, której efektem jest publikacja w czasopiśmie Applied Sciences,
- współpracę w ramach zespołu badawczego, w którego skład wchodzi naukowcy z Politechniki Warszawskiej, Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki oraz Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, której efektem są artykuły opublikowane w czasopismach IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology oraz IEEE Transactions on Electron Devices.

Istotnym aspektem aktywności Wnioskodawcy w partnerskich instytucjach naukowych, w tym zagranicznych, jest fakt, że znajduje ona odzwierciedlenie w przedstawionym do oceny dorobku publikacyjnym.

Dodatkowo należy zaznaczyć, że Wnioskodawca prowadził szeroką gamę zajęć dydaktycznych, m.in.: Symulacje komputerowe, Elektroniczne elementy i układy mocy,

Analogowe układy elektroniczne, Podstawy elektroniki, Zasilanie urządzeń elektronicznych, Metrologia.

Dr Paweł Krzysztof Górecki od 2019 do 2021 roku był promotorem 2 obronionych prac inżynierskich a także był recenzentem 2 prac inżynierskich, jest również promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim mgr inż. Adriana Pietruszki.

Działalność organizacyjną Wnioskodawcy, szczególnie na tle wybitnych osiągnięć naukowych, należy ocenić jako przeciętną, lecz wystarczającą. W tym kontekście zaskakujący jest również brak informacji o aktywności dojrzałego badacza w stowarzyszeniach branżowych krajowych i zagranicznych.

Osiągnięcia przedstawione przez Wnioskodawcę w zakresie aktywności naukowej należy uznać za bardzo dobre, natomiast działalność organizacyjną należy uznać za wystarczającą.

5. Wnioski końcowe

W wyniku całościowej oceny osiągnięć naukowych oraz aktywności naukowej, które przedstawił dr inż. Paweł Krzysztof Górecki we wniosku o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego z dnia 4 lipca 2022 r. należy stwierdzić, że Wnioskodawca jest aktywnym i kreatywnym naukowcem. Jego osiągnięcia naukowe po uzyskaniu stopnia naukowego doktora stanowią niewątpliwie znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika. W szczególności, cykl publikacji zaprezentowanych we wniosku zawiera oryginalne i wartościowe, zarówno w kontekście poznawczym jak i aplikacyjnym, koncepcje świadczące jednoznacznie o dojrzałości naukowej i samodzielności badawczej habilitanta. Znaczenie osiągnięć potwierdzają wskaźniki bibliometryczne, według Web of Science, łączna liczba cytowań prac Wnioskodawcy w momencie przygotowania recenzji wynosi 395 (210 bez autocytowań), a indeks Hirscha jest równy 11. W przypadku kandydata do stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, powyższe wskaźniki należy uznać za bardzo wysokie. Osiągnięcie oraz aktywność naukowa zostały dobrze udokumentowane przez Wnioskodawcę, co jest szczególnie istotne w postępowaniu administracyjnym. Oznacza to, że wniosek o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika, który złożył dr Paweł Górecki spełnia wymagania określone w odnośnych przepisach, tzn. należy uznać go za uzasadniony. Podsumowując, wniosek końcowy oraz konkluzja przeprowadzonej recenzji są jednoznacznie pozytywne.

Zielona Góra, 20.12.2022 r.