

Katedra Mikrosystemów

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów

Politechnika Wroclawska

Recenzja osiągnięcia naukowego dr. inż. Pawła Krzysztofa Góreckiego

pt. „Pomiary i modelowanie właściwości cieplnych elementów półprzewodnikowych na potrzeby projektowania tych elementów i układów je zawierających” oraz całości dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego, sporządzona w związku z postępowaniem w sprawie nadania nadanie stopnia doktora habilitowanego nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika

1. Wprowadzenie

Recenzję sporządziłem na podstawie pisma prof. dr. hab. inż. Krzysztofa Góreckiego, Dziekana Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, z dnia 10 listopada 2022r., w związku z powołaniem mnie przez Radę Naukową Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni (UMG) na recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika, wszczętym na wniosek dr. inż. Pawła Krzysztofa Góreckiego. Do opracowania recenzji wykorzystałem materiały przygotowane przez Habilitanta - dane wnioskodawcy, kopię dyplomu uzyskania stopnia naukowego doktora, autoreferat, wykaz osiągnięć naukowych stanowiących znaczący wkład w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika, dane bibliometryczne, oświadczenie Kandydata o merytorycznym i procentowym wkładzie w publikacjach składających się na osiągnięcie i oświadczenia wszystkich współautorów, określające wkład merytoryczny i procentowy każdego z nich, kopie publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe oraz kopię patentu. W recenzji wykorzystałem także wybrane informacje o Kandydacie dostępne w internecie.

2. Dane ogólne

Dr inż. Paweł Krzysztof Górecki ukończył studia inżynierskie w roku 2015, zaś studia magisterskie w roku 2016. W obu wypadkach były to studia na kierunku **Elektronika i Telekomunikacja** na Wydziale Elektrycznym Akademii Morskiej w Gdyni (obecnie UMG). Już w trakcie studiów Kandydat dał się poznać jako bardzo dobry student, który rozpoczął intensywną działalność naukową na drugim roku studiów I stopnia i jeszcze przed ukończeniem studiów prezentował swoje osiągnięcia na konferencjach krajowych i międzynarodowych (w formie wystąpień ustnych i prezentacji plakatowych) oraz był autorem lub współautorem 8 publikacji naukowych. Tego też okresu dotyczą takie nagrody i wyróżnienia Kandydata jak:

- stypendia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wybitne osiągnięcia dla studentów (2013, 2014),
- stypendium Ministra Infrastruktury i Rozwoju za wybitne osiągnięcia dla studentów (2015),

- stypendium Marszałka Województwa Pomorskiego dla studentów (2015),
- zwycięstwo w *Konkursie o Nagrodę Czerwonej Róży* na najlepszego studenta Trójmiasta (2016),
- zwycięstwo w konkursie *Studencki Nobel 2016* w kategorii *Nauki ścisłe i techniczne*.

W marcu 2019 roku Rada Wydziału Elektrycznego UMG nadała Kandydatowi stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie *elektronika* na podstawie rozprawy „*Modelowanie tranzystorów IGBT z uwzględnieniem zjawisk termicznych na potrzeby komputerowej analizy układów elektronicznych w programie SPICE*”, której promotorem był Pan prof. dr hab. inż. *Janusz Zarębski*. Równocześnie wspomniana Rada wyróżniła tę rozprawę.

Dr inż. Paweł Górecki od września 2016 roku pracuje w Katedrze Elektroniki Morskiej UMG, początkowo jako asystent, zaś po uzyskaniu stopnia doktora jako adiunkt badawczo-dydaktyczny. Warto tu podkreślić, że dr Górecki łączył zatrudnienie na stanowisku asystenta ze studiami doktoranckimi na Wydziale Elektrycznym UMG.

3. Ocena cyklu publikacji stanowiących podstawę do uzyskania stopnia doktora habilitowanego

Dr inż. Paweł Krzysztof Górecki, stosownie do art. 219 ust. 1 pkt 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, jako osiągnięcie naukowe będące podstawą do wszczęcia postępowania habilitacyjnego przedstawił spójny tematycznie cykl zatytułowany *Pomiary i modelowanie właściwości cieplnych elementów półprzewodnikowych na potrzeby projektowania tych elementów i układów je zawierających*. Na cykl ten składa się aż 19 publikacji oraz jeden patent:

A1. **P. Górecki**, K. Górecki, *Methods of Fast Analysis of DC–DC Converters — A Review*, *Electronics* (**IF₂₀₂₁ = 2,69**), Vol. 10 (2021), Art. no. 2920.

A2. **P. Górecki**, K. Górecki, *Measurements and Computations of Internal Temperatures of the IGBT and the Diode Situated in the Common Case*, *Electronics* (**IF₂₀₂₁ = 2,69**), Vol. 10 (2021), Art. no. 210.

A3. K. Górecki, **P. Górecki**, J. Zarębski, *Measurements of parameters of the thermal model of the IGBT module*, *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurements* (**IF₂₀₂₁ = 5,332**), Vol. 68, (2019), p. 4864-4875.

A4. **P. Górecki**, M. Myśliwiec, K. Górecki, R. Kisiel, *Influence of packaging processes and temperature on characteristics of Schottky diodes made of SiC*, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* (**IF₂₀₂₁ = 1,922**), Vol. 9 (2019), p. 633-641.

A5. **P. Górecki**, K. Górecki, M. Myśliwiec, R. Kisiel, *Thermal parameters of monocrystalline GaN Schottky diodes*, *IEEE Transactions on Electron Devices* (**IF₂₀₂₁ = 3,221**), Vol. 66 (2019), p. 2132-2138.

A6. K. Górecki, **P. Górecki**, *Compact electrothermal model of laboratory made GaN Schottky diodes*, *Microelectronics International* (**IF₂₀₂₁ = 0,942**), Vol. 37 (2020), p. 95-102.

A7. **P. Górecki**, K. Górecki, R. Kisiel, M. Guziewicz, E. Brzozowski, J. Bar, *Investigation of an influence of the assembling method of the die to the case on the thermal parameters of IGBTs*, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* (**IF₂₀₂₁ = 1,922**), Vol. 11 (2021), p. 1988-1996.

- A8. A. Pietruszka, **P. Górecki**, S. Wroński, B. Illes, A. Skwarek, *The Influence of Soldering Profile on the Thermal Parameters of Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs)*, *Applied Sciences* (**IF**₂₀₂₁ = **2,838**), Vol. 11 (2021), Art. No. 5583.
- A9. **P. Górecki**, K. Górecki, J. Zarębski, *Modelling the temperature influence on dc characteristics of the IGBT*, *Microelectronics Reliability* (**IF**₂₀₂₁=**1,418**), Vol. 79 (2017), p. 96-103.
- A10. **P. Górecki**, K. Górecki, *Modelling a Switching Process of IGBTs with Influence of Temperature Taken into Account*, *Energies* (**IF**₂₀₂₁ = **3,252**), Vol. 12 (2019), Art. No. 1894.
- A11. **P. Górecki**, K. Górecki, J. Zarębski, *Accurate Circuit-Level Modelling of IGBTs with Thermal Phenomena Taken into Account*, *Energies* (**IF**₂₀₂₁ = **3,252**), Vol. 14, No. 9 (2021), Art. No. 2372.
- A12. **P. Górecki**, K. Górecki, *Modelling dynamic characteristics of the IGBT with thermal phenomena taken into account*, *Microelectronics International* (**IF**₂₀₂₁ = **0,942**), Vol. 34 (2017), p.160-164.
- A13. K. Górecki, **P. Górecki**, *Nonlinear Compact Thermal Model of the IGBT Dedicated to SPICE*, *IEEE Transactions on Power Electronics* (**IF**₂₀₂₁ = **5,967**), Vol. 35 (2020), p. 13420-13428.
- A14. **P. Górecki**, *Application of the Averaged Model of the Diode-transistor Switch for Modelling Characteristics of a Boost Converter with an IGBT*, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, Vol. 66 (2020), p. 555-560.
- A15. **P. Górecki**, K. Górecki, *Electrothermal Averaged Model of a Diode-Transistor Switch Including IGBT and a Rapid Switching Diode*, *Energies* (**IF**₂₀₂₁ = **3,252**), Vol. 13 (2020), Art. No. 3033.
- A16. **P. Górecki**, K. Górecki, *Analysis of the Usefulness Range of the Averaged Electrothermal Model of a Diode-Transistor Switch to Compute the Characteristics of the Boost Converter*, *Energies* (**IF**₂₀₂₁ = **3,252**), Vol. 14 (2021), Art. No. 154.
- A17. **P. Górecki**, *Electrothermal averaged model of a diode-IGBT switch for a fast analysis of DC-DC converters*, *IEEE Transactions on Power Electronics* (**IF**₂₀₂₁ = **5,967**), vol.37 (2022), p.13003-13013 (podczas przygotowywania autoreferatu praca A17 miała status przyjętej do druku, DOI: 10.1109/TPEL.2022.3180170)
- A18. **P. Górecki**, D. Wojciechowski, *Accurate Computation of IGBT Junction Temperature in PLECS*, *IEEE Transactions on Electron Devices* (**IF**₂₀₂₁ = **3,221**), Vol. 67 (2020), p. 2865-2871.
- A19. **P. Górecki**, D. Wojciechowski, *Accurate electrothermal modelling of high frequency DC-DC converters with discrete IGBTs in PLECS software*, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (**IF**₂₀₂₁ = **8,162**) - przyjęty do druku, DOI: 10.1109/TIE.2022.3189102.
- P1. K. Górecki, J. Zarębski, **P. Górecki**, *Sposób i układ do pomiaru rezystancji termicznych w module elektroizolowanym*, Patent RP nr 234141, udzielony dnia 05.02.2020.

Dwie z tych publikacji (A14, A17) to publikacje jednoautorskie, dziesięć - dwuautorskie, cztery – przygotowane przez trzech autorów, dwie - czteroautorskie, jedna z udziałem pięciu autorów i jedna sześćoautorska. Publikacje zgłoszone jako osiągnięcie habilitacyjne zostały opublikowane w czasopismach wydawanych przez IEEE (A3, A4, A5, A7, A13, A17, A18, A19), Elsevier (A9), Emerald (A6, A12), MDPI (A1, A2, A8, A10, A11, A15, A16) i PAN (A14). W wypadku publikacji wieloautorskich Kandydat jest pierwszym autorem w 12 publikacjach. Jego udział procentowy w tych publikacjach wynosi od 20 do 76%. Do dokumentacji dołączone są oświadczenia o indywidualnym wkładzie merytorycznym tak Kandydata jak i wszystkich współautorów.

Główne zainteresowania naukowe Kandydata zaliczają się do obszaru elektroniki mocy i energoelektroniki, gdzie dużą rolę odgrywają przekształtniki energetyczne z elementami przełącza-

jącymi, którymi są półprzewodnikowe przyrządy mocy. Te przyrządy mocy są powszechnie stosowane w impulsowych układach zasilających jak też w analogowych układach elektronicznych o działaniu ciągłym. W zakresie wysokich napięć i prądów powszechnie stosuje się tranzystory IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), czyli tranzystory bipolarne z izolowaną bramką. Łączą one łatwość sterowania tranzystorów polowych oraz wysokie napięcie przebicia i szybkość przełączania tranzystorów bipolarnych. Do wad tych tranzystorów można zaliczyć znaczny spadek napięcia na nich w stanie przewodzenia, ograniczoną temperaturę pracy (dla krzemowego złącza *p-n* jest to 150°C) i występowanie tzw. „ogona prądowego” w procesie wyłączania tranzystora. Obecnie na rynku są dostępne tranzystory IGBT z węgla krzemu (SiC) oraz z azotku galu (GaN), które zapewniają większą szybkość działania i wyższą dopuszczalną temperaturę złącza. Po wprowadzeniu w obiekt badań Habilitanta pora na zgrubne przedstawienie stosowanej przez niego metody badań. Otóż do określenia właściwości termicznych przyrządów półprzewodnikowych, w tym półprzewodnikowych przyrządów mocy wykorzystuje się rezystancję termiczną, która określa stosunek przyrostu temperatury wnętrza przyrządu do wydzielanej w nim mocy. Najbardziej pożądane są przyrządy o możliwie małej wartości tego parametru. Na etapie charakteryzacji eksperymentalnej ważne jest precyzyjne wyznaczenie wartości rezystancji termicznej. Natomiast przy komputerowym projektowaniu układów elektronicznych konieczne jest właściwe modelowanie tego parametru. Jeżeli w modelu przyrządu półprzewodnikowego są uwzględnione zjawiska termiczne to jest to model elektrotermiczny, w którym pojawiają się dwa podstawowe bloki – blok zawierający model elektryczny, gdzie wyznacza się wartości napięć i prądów zaciskowych w przyrządzie i blok zawierający model termiczny wraz z modelem generacji ciepła, w którym wyznacza się wartość temperatury wewnątrz przyrządu przy uwzględnieniu zjawiska samonagrzewania.

Zaprezentowany cykl publikacji przedstawia osiągnięcia Autora związane z:

- oryginalnymi metodami pomiaru parametrów cieplnych dla dyskretnych i zintegrowanych przyrządów półprzewodnikowych,
- analizą wpływu technik montażu półprzewodnikowych przyrządów mocy na ich parametry cieplne,
- oryginalnym modelem elektrotermicznym tranzystora IGBT,
- metodami szybkiej analizy elektrotermicznej układów impulsowego przekształcania energii.

Szczegółowe zestawienie różnych metod komputerowych symulacji układów elektronicznych i ich możliwości pokazuje publikacja [A1].

Tak dla dyskretnych tranzystorów IGBT jak i dla modułów IGBT w danych katalogowych brakuje informacji o wzajemnych oddziaływaniach cieplnych między strukturami umieszczonymi we wspólnej obudowie. Dlatego w pracy [A2] dr Górecki przedstawił nową metodę pomiaru właściwości cieplnych dyskretnych tranzystorów IGBT, która uwzględnia oddziaływania cieplne między strukturami tranzystora IGBT i diody, znajdującymi się we wspólnej obudowie. Przy pomiarze własnej przejściowej impedancji termicznej dyskretnego tranzystora IGBT jako parametr termoczuły wykorzystano napięcie bramka-emiter (U_{GE}). Natomiast przy pomiarze własnej przejściowej impedancji termicznej diody i wzajemnej przejściowej impedancji termicznej między diodą odwrótnie równoległą i tranzystorem IGBT – napięcie na przewodzącej diodzie. Wyniki tych

pomiarów pozwoliły opracować skupiony model termiczny tranzystora IGBT, który we wspólnej obudowie zawiera struktury tranzystora i diody, i który pozwala obliczyć temperaturę obu struktur przy uwzględnieniu zjawiska samonagrzewania obu struktur oraz wzajemnego oddziaływania cieplnego między nimi. Na podobnej zasadzie Habilitant opracował metodę pomiarową dla modułów IGBT, w których są umieszczone dwa tranzystory IGBT i dwie diody [A3, P1]. Podczas pomiaru wykorzystano układ pozwalający na wydzielanie mocy tylko w jednym segmencie półprzewodnikowym modułu przy przepływie prądu w drugim. W tym wypadku opracowany został model termiczny modułu IGBT, który uwzględnia samonagrzewanie się każdej struktury półprzewodnikowej zawartej w module oraz wzajemne sprzężenia termiczne między każdą parą struktur modułu [A3].

W zakresie analizy wpływu technik montażu półprzewodnikowych przyrządów mocy na ich parametry cieplne badania Habilitanta przyczyniły się do:

- Zbadania wpływu sposobu montażu struktury diody Schottky'ego z SiC w obudowie ceramicznej na rezystancję termiczną złącze-obudowa oraz określenie temperatury wnętrza diody na podstawie wartości temperatury obudowy i zmierzonej wcześniej rezystancji termicznej [A4]; w analizowanej pracy pokazano, że obudowa ceramiczna zachowuje się poprawnie nawet przy temperaturze SiC przekraczającej 300°C.
- Zbadania wpływu siły docisku struktury półprzewodnikowej (tym razem diody Schottky'ego z GaN) do podłoża DBC na parametry termiczne przyrządu półprzewodnikowego; niespodziewanie uzyskano mniejszą rezystancję termiczną przy mniejszych siłach docisku co prawdopodobnie jest uzyskania grubszej warstwy srebrowej bez porów powietrznych między GaN i podłożem DBC przy mniejszej sile docisku [A5]. Wyniki eksperymentalne z pracy [A5] habilitant wykorzystał do opracowania skupionego elektrotermicznego modelu diod mocy z azotku galu [A6].
- Zbadania wpływu techniki montażu struktury półprzewodnikowej tranzystora IGBT do klasycznej obudowy TO-220 na rezystancję termiczną konfiguracji struktura półprzewodnikowa - obudowa; najmniejszą rezystancję termiczną uzyskano dla połączenia za pomocą lutowania stopem SAC 305 (95,5% wag. Sn, 3,0% wag. Ag, 0,5% wag. Cu) [A7].
- Analizy wpływu parametrów połączenia lutowanego między tranzystorem IGBT w obudowie do montażu powierzchniowego a tzw. padem termicznym na płycie obwodu drukowanego [A8]. Do lutowania użyto tej samej pasty lutowniczej ale aż czterech pieców lutowniczych. Najmniejszą rezystancją termiczną charakteryzowały się struktury lutowane w piecu komorowym, gdyż w tym wypadku uzyskano największe grubości warstw międzymetalicznych.

Badania Kandydata dotyczące elektrotermicznego modelowania tranzystorów IGBT na potrzeby symulacji obwodowych zostały opisane w publikacjach [A9 – A13]. Były one prowadzone wspólnie z prof. K. Góreckim i J. Zarębskim przy czym wg stosownych oświadczeń i pomijając przygotowanie maszynopisu artykułów rola habilitanta polegała na współdziałaniu w przygotowaniu koncepcji tych prac, współautorstwa analitycznych postaci równań dla proponowanego modelu, wykonaniu obliczeń symulacyjnych, konstrukcji odpowiednich układów pomiarowych i wykonaniu pomiarów weryfikujących opracowane modele. Jak wykazał Kandydat modele tranzystora IGBT wbudowane

w program SPICE charakteryzują się stosunkowo małą dokładnością. Dotyczy to napięć U_{GE} niższych od napięcia progowego i przy temperaturze przekraczającej $50^{\circ}C$ [A9]. Duże niedokładności dotyczą także tranzystora IGBT pracującego impulsowo [A10]. Dlatego w publikacjach [A11, A12] Kandydat opracował własny elektrotermiczny model tranzystora IGBT przeznaczony do programu SPICE. Ten model składa się z trzech submodeli – elektrycznego, generacji ciepła i termicznego. W submodelu elektrycznym równania opisujące stałoprądowe właściwości tranzystora IGBT zostały uzupełnione o pojemności pasozytnicze występujące w strukturze tranzystora – pojemność wejściowej struktury MOS, pojemność złączowej diody odwrotnie równoległej i pojemności bramka-emiter tranzystora bipolarnego oraz dren-bramka tranzystora MOS. W submodelu generacji ciepła wyznaczono przebiegi czasowe mocy wydzielanej w tranzystorze i diodzie. Natomiast submodel termiczny sformułowano w oparciu o nieliniową sieć Cauera, w której uwzględniono nieliniowość zależności rezystancji termicznej od temperatury, która wynika z zależności efektywności mechanizmów odprowadzania ciepła drogą przewodnictwa i konwekcji od temperatury wnętrza i otoczenia [A12, A13].

Kolejne publikacje włączone w osiągnięcie habilitacyjne dotyczą metod szybkiej analizy elektrotermicznej impulsowych przekształtników energoelektronicznych. Nie nadają się do tego program SPICE - klasyczny program do analizy układów elektronicznych. Rozwiązanie mogą dać specjalne algorytmy symulacyjne przeznaczone do implementacji w programie SPICE (osiągnięcia dr. Góreckiego w tym zakresie omówiłem powyżej) lub nowe dedykowane programy do analizy elektrotermicznej przekształtników energoelektronicznych. Okazuje się, że obliczenia, szczególnie w odniesieniu do analizy stanów przejściowych, prowadzone w oparciu o niektóre algorytmy symulacji właściwości tranzystorów IGBT zaimplementowane do programu SPICE mogą trwać aż kilkanaście dni. Skrócenie czasu obliczeń jest możliwe przez zastosowanie modeli uśrednionych, które pozwalają na wykonanie analiz elektrotermicznych układów przekształtnikowych w stanie ustalonym w uwzględnieniu zjawisk cieplnych. Kandydat zauważył, że w literaturze przedmiotu brakuje modelowania uśrednionego przekształtników DC-DC zawierających tranzystory IGBT i w związku z tym zajął się tą tematyką. W pierwszej kolejności opracował model zbliżony do znanych w literaturze modeli przekształtników DC-DC z tranzystorami MOSFET. Taki model, przedstawiony w pracy [A14] dobrze odwzorowywał charakterystykę przekształtnika w zakresie niskich częstotliwości i stosunkowo wysokich prądów ale brakowało w nim modeli termicznych elementów składowych przekształtnika. Dlatego w kolejnym kroku został sformułowany [A15] i zweryfikowany doświadczalnie [A16] elektrotermiczny uśredniony model przełącznika IGBT-dioda do analiz przekształtników DC-DC. Pozwala on m.in. wyznaczyć temperatury wnętrza tranzystora i diody pracujących w przekształtniku DC-DC. Ale pomiary pokazały, że do uzyskania wysokiej dokładności modelowania charakterystyk rozważanego przekształtnika w modelu niezbędne jest uwzględnienie kilku dodatkowych zjawisk, np. strat związanych z przełączaniem struktur półprzewodnikowych w modelu termicznym czy też zależności rezystancji termicznej tranzystora i diody od temperatury wnętrza przyrządu półprzewodnikowego. Dlatego w pracy [A17] przedstawiono model ujmujący również te zjawiska, który dobrze się sprawdził w szerokim zakresie zmian częstotliwości

przełączania, współczynnika wypełnienia sygnału sterującego oraz prądu obciążenia przy dwóch różnych warunkach chłodzenia przyrządów półprzewodnikowych w przekształtniku.

Drugą metodą skracania czasu obliczeń jest wykorzystanie specjalizowanych programów symulacyjnych. Kandydat w sposób twórczy wykorzystał program PLECS (*Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation*). Oznacza to, że Kandydat, wspólnie z dr. hab. inż. Danielem Wojciechowskim z PG, wprowadzili algorytm precyzyjnie modelujący straty energii tranzystora IGBT tak podczas przewodzenia jak i przełączania. Te problemy zostały przedstawione w publikacjach [A18, A19] dla tranzystora IGBT pracującego z obciążeniem rezystancyjnym lub rezystancyjno-indukcyjnym.

Reasumując mogę stwierdzić, że dr inż. Paweł Krzysztof Górecki, pracując nad różnymi zagadnieniami związanymi z modelowaniem i symulacją właściwości elektrycznych i termicznych jak też ich charakteryzacją doświadczalną tranzystorów dyskretnych i modułów IGBT oraz urządzeń wykorzystujących te przyrządy półprzewodnikowe, wniósł wkład w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika m.in. przez:

- Opracowanie układów pomiarowych własnych i wzajemnych przejściowych impedancji termicznych w dyskretnych tranzystorach IGBT i modułach IGBT, gdyż w obudowie rozpatrywanych przyrządów półprzewodnikowych pojawiają się nierówności w rozkładzie temperatury ale równocześnie wzajemne oddziaływania cieplne w przyrządzie wpływają na temperaturę obu zawartych w nim struktur;
- Opracowanie i weryfikację doświadczalną elektrotermicznego modelu tranzystora IGBT dla programu SPICE uwzględniającego nieliniowość zjawisk cieplnych oraz wykorzystanie programu SPICE z zaimplementowanymi modelami uśrednionymi do modelowania przekształtników DC-DC;
- Opracowanie algorytmów umożliwiających precyzyjne obliczanie temperatury tranzystora IGBT pracującego w układach impulsowych przy wykorzystaniu programu PLECS;
- Zbadanie wpływu parametrów montażu przyrządów mocy do obudowy lub do płytki obwodu drukowanego na rezystancję termiczną tych przyrządów.

4. Ocena pozostałych osiągnięć naukowych

Kandydat na dzień złożenia dokumentacji w Radzie Doskonałości Naukowej był autorem 61 publikacji naukowych i dwóch patentów (obecnie jest to 69 publikacji). Blisko połowa z nich to artykuły w czasopiśmie z listy JCR. Sumaryczny wskaźnik wpływu (*IF*) publikacji Habilitanta na dzień 01.07.2022 wynosił 74,327 w tym publikacji stanowiących osiągnięcie publikacyjne – 57,021 (wg wartości *Impact Factor* w roku 2021). Indeks Hirscha, *H* na dzień składania dokumentacji w Radzie Doskonałości Naukowej był równy 11 wg wszystkich trzech baz. Bez autocytowań ten indeks wynosił 8. Natomiast aktualnie jest on równy 11 wg bazy WoS i 12 wg baz Scopus oraz Google Scholar. Dwa pierwsze artykuły współautorstwa dr. Góreckiego zostały opublikowane w 2012 roku, gdy był on studentem II roku studiów inżynierskich. W dniu 01.07.2022 48 tych publikacji było odnotowanych w bazie Web of Science, 52 w bazie Scopus i 61 w bazie Google Scholar. W ciągu ostatniego półrocza nastąpiło wyraźne liczbowe zwiększenie dorobku naukowego dr. Góreckiego i

na dzień 12.01.2023 w bazie WoS odnotowano 55 publikacji Kandydata, w bazie Scopus - 59 i w bazie Google Scholar – 69.

Spójny tematycznie cykl, złożony z dziewiętnastu artykułów i jednego patentu i zatytułowany „*Pomiary i modelowanie właściwości cieplnych elementów półprzewodnikowych na potrzeby projektowania tych elementów i układów je zawierających*”, który dr Górecki przedstawił jako osiągnięcie naukowe będące podstawą do wszczęcia postępowania habilitacyjnego, został omówiony powyżej. Jeżeli idzie o pozostałe publikacje to dotyczą one:

a) Tematyki wprowadzającej lub uzupełniającej osiągnięcie habilitacyjne, w tym m.in. analizy porównawczej kilku dostępnych w literaturze przedmiotu modeli tranzystora IGBT – klasycznego modelu wbudowanego w program SPICE i modeli dostępnych na stronach producentów tych tranzystorów (International Rectifier, Infineon) wraz z wykazaniem ich niedostatków i konieczności opracowania modeli własnych, uwzględniających zjawisko samonagrzewania i wzajemne sprzężenia cieplne. Zagadnieniem uzupełniającym osiągnięcie habilitacyjne jest opracowanie zwartego modelu termicznego krzemowej diody mocy z uwzględnieniem skutków obniżonego ciśnienia atmosferycznego. Tak symulacje numeryczne jak i pomiary eksperymentalne pokazały, że przy obniżeniu ciśnienia z 1000 hPa do 50 hPa rezystancja cieplna złącze-otoczenie wzrasta dwukrotnie, czyli właściwości termiczne diody mocy znacząco się pogarszają. Sformułowany model może być użyteczny dla projektantów układów elektronicznych, które mają pracować w warunkach obniżonego ciśnienia atmosferycznego, np. w stratosferze.

b) Przeanalizowania elektrolizera alkalicznego z punktu widzenia źródła zasilania. W tym podejściu elektrolizer może być traktowany jako nieliniowy obwód RC lub RLC. Kandydat uczestniczył w opracowaniu dziewięcioelementowej reprezentacji obwodowej modelu elektrolizera, która pozwala uwzględnić zmiany stężenie poddawanego elektrolizie roztworu alkalicznego na potrzeby programu SPICE. Poprawność modelu została zweryfikowana doświadczalnie.

c) Określenia sposobu modelowania charakterystyk statycznych i dynamicznych wybranych przyrządów półprzewodnikowych, pozwalającego na uwzględnienie wpływu zewnętrznego pola magnetycznego na pracę układu elektronicznego. Takie podejście jest możliwe dzięki opracowaniu tzw. modeli hybrydowych, które pozwalają uwzględnić dodatkowe zjawiska fizyczne, pomijane w standardowych modelach wbudowanych do programu SPICE, który powszechnie stosuje się do analizy układów elektronicznych.

d) Określenia wpływu modeli elementów biernych (rezystorów, kondensatorów i cewek) na charakterystyki filtrów sieciowych.

e) Charakteryzacji źródeł światła opartych na diodach elektroluminescencyjnych.

Prace Kandydata są obecne w międzynarodowym obiegu informacji naukowej. Świadczą o tym poniższe dane o cytowaniach tych prac wg stanu na dzień 01-07.2022 i 12.01.2023:

- baza WoS (Web of Science) - liczba uwzględnionych prac – 48/55, ogólna liczba cytowań – 344/397, liczba cytowań bez autocytowań – 176/212, liczba cytowań prac z cyklu przedstawionego jako osiągnięcie naukowe – 160/197;

- baza Scopus - liczba uwzględnionych prac – 52/59, ogólna liczba cytowań – 368/446, liczba cytowań bez autocytowań – 189/238, liczba cytowań prac z cyklu przedstawionego jako osiągnięcie naukowe – 175/215;
- baza Google Scholar – liczba uwzględnionych prac – 61/69, ogólna liczba cytowań – 424/498, liczba cytowań prac z cyklu przedstawionego jako osiągnięcie naukowe – 188/231.

W początkowym okresie sporo było autocytowań, ale aktualnie obserwując wzrost liczby cytowani Kandydata można zauważyć coraz większy udział cytowań obcych.

5. *Współpraca międzynarodowa i krajowa*

W zakresie działalności naukowej prowadzonej w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub podmiocie gospodarczym aktywność dr. inż. Pawła Krzysztofa Góreckiego można uznać za spełniającą całkowicie wymagania określone przez Ustawodawcę. I tak:

- Kandydat odbył dwa średniookresowe staże naukowe na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (odpowiednio w okresie od 01.07.2019 do 30.09.2019 i od 01.07.2021 do 31.08.2021, czyli łącznie pięć miesięcy; efektem tych staży są 3 wspólne publikacje z dr. hab. inż. Danielem Wojciechowskim, prof. PG;
- Kandydat odbył dwie krótkoterminowe wizyty studyjne w Uniwersytecie Technicznym w Tallinie (Tallin University of Technology) i w Uniwersytecie w Neapolu (University of Naples Federico II). Druga z tych wizyt zaowocowała przygotowaniem projektu *Elektrotermiczne uśrednione modelowanie inercji elektrycznej w tranzystorze MOSFET do szybkiej analizy przekształtników DC-DC* w ramach projektu NAWA im. Mieczysława Bekkera. Dr Górecki został laureatem tego projektu i w okresie od 01.09.2022 do 01.12.2022 (a więc już po złożeniu wniosku habilitacyjnego do Rady Doskonałości Naukowej) odbył trzymiesięczny staż naukowy w tej instytucji;
- Dr Górecki uczestniczy w pracach kilku krajowych lub międzynarodowych zespołów badawczych, w skład których wchodzi naukowcy z Uniwersytetu Technologii i Ekonomii w Budapeszcie (Budapest University of Technology and Economics), Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Politechniki Warszawskiej oraz Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Mikroelektroniki i Fotoniki; tematyka tej współpracy dotyczy badania wpływu wybranych czynników związanych z procesem lutowania na właściwości cieplne elementów do montażu powierzchniowego, wpływu technologii montażu struktury półprzewodnikowej w standardowej obudowie TO-220 na właściwości termiczne przyrządów półprzewodnikowych oraz analizy wybranych metod montażu struktur półprzewodnikowych z nowoczesnych materiałów półprzewodnikowych do odpowiednich podłoży ceramicznych celem podwyższenia górnej dopuszczalnej temperatury pracy półprzewodnikowych przyrządów mocy;
- Habilitant był wykonawcą w dwóch projektach badawczo-rozwojowych na rzecz gospodarki:
 - a) projektu finansowanego przez przedsiębiorstwo SESCOM *Optymalizacja zasilania generatora wodoru i tlenu z punktu widzenia maksymalnej sprawności energetycznej procesu produkcji wodoru i tlenu,*

- b) projektu finansowanego przez przedsiębiorstwo Pol-Spec-Tech-Service Sp. z o.o. *Opracowanie i wykonanie wybranych układów impulsowych w wersji do badań eksperymentalnych dotyczących skuteczności ochrony układów elektronicznych przed impulsami HPM wraz z metodyką oceny negatywnego oddziaływania powyższych impulsów na te układy.*

Ponieważ przed chwilą wspomniałem o projektach badawczych realizowanych na rzecz przedsiębiorstw to chcę dodatkowo wspomnieć o innych projektach badawczych, którymi kierował lub w których realizacji uczestniczył dr inż. Paweł Górecki. Kierował on projektem finansowanym przez MNiSW w ramach programu Diamentowy Grant, projektem finansowanym przez NCN w ramach programu Preludium i projektem finansowanym przez NAWA w ramach programu im. Mieczysława Bekkera. Natomiast jako wykonawca uczestniczył w projekcie finansowanym przez NCBiR w ramach programu Patent PLUS oraz w projekcie realizowanym na rzecz firmy Domat Consulting, który był finansowany w ramach programu Bony na innowację MŚP. Niestety, w autoreferacie brakuje informacji o wielkościach finansowania tych projektów i o tym, w jaki sposób zostały one wykorzystane przez Zleceniodawców. Ponadto dr inż. Paweł Górecki był kierownikiem czterech indywidualnych projektów badawczych uzyskanych w konkursach wydziałowych, czterech małych zadań badawczych i grantu aparaturowego w ramach projektu realizowanego przez Wydział Elektryczny UMG w programie Regionalna Inicjatywa Doskonałości.

Reasumując część dotyczącą działalności naukowej Kandydata, w tym cykl publikacji stanowiących podstawę do uzyskania stopnia doktora habilitowanego, inną działalność naukową oraz krajową i międzynarodową współpracę naukową chcę wyraźnie podkreślić, że osiągnięcia naukowe przedstawione przez dr. inż. Pawła Krzysztofa Góreckiego spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.). Ponadto dr inż. Paweł Krzysztof Górecki jest bardzo aktywnym naukowcem i ma niekwestionowany dorobek naukowy, zauważalną współpracę z otoczeniem gospodarczym przy wielu zagadnieniach związanych z automatyką, elektroniką i elektrotechniką. W twórczy sposób podejmuje skomplikowane tematy badań i realizuje je w jasno określonym celu. Uważam, że dr inż. Paweł Krzysztof Górecki posiada pełne predyspozycje do pracy jako samodzielny pracownik naukowy.

6. Charakterystyka dorobku dydaktycznego, organizacyjnego i popularyzującego naukę

Kandydat prowadzi zajęcia na Wydziale Elektrycznym Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, głównie na kierunku *Elektronika i Telekomunikacja* i w niewielkim stopniu na kierunku *Informatyka*. Są to wykłady i laboratoria z *Symulacji komputerowych*, laboratoria z *Metrologii*, *Elementów półprzewodnikowych i Półprzewodnikowych przyrządów mocy*, ćwiczenia audytoryjne i laboratoria z *Podstaw elektroniki i Analogowych układów elektronicznych*, laboratoria i projekty z *Elektronicznych elementów i układów mocy* oraz projekty z *Zasilania urządzeń elektronicznych*. Prowadził też zajęcia warsztatowe dla uczniów szkół średnich z Gdyni i Wejherowa. Do większości tych zajęć dr Górecki opracował materiały dydaktyczne, w tym jest współautorem skryptu *Symulacje komputerowe – laboratorium*. Na tym tle stosunkowo skromnie wygląda promotorstwo obronionych

prac dyplomowych inżynierskich – Kandydat był promotorem dwóch takich prac. Natomiast jest promotorem pomocniczym w jednym przewodzie doktorskim.

Dr Górecki w latach 2020-21 był członkiem Rady Tematycznej czasopisma *Applied Sciences* oraz edytorem dwóch numerów specjalnych w czasopiśmie *Energies*. Uczestniczył w Komitecie organizacyjnym Krajowej Konferencji Elektroniki 2020. Recenzował 48 artykułów dla czasopism z listy filadelfijskiej, 3 artykuły spoza tej listy i 9 referatów lub komunikatów konferencyjnych. Jest członkiem IEEE oraz Stowarzyszenia Czerwonej Róży. Na macierzystym wydziale Kandydat był opiekunem roku studentów kierunku *Elektronika i Telekomunikacja* i koordynatorem przygotowań Wydziału Elektrycznego UMG do ewaluacji działalności naukowej za lata 2017-21.

Habilitant otrzymał wiele różnych nagród i wyróżnień, m.in.:

- w roku 2020 znalazł się na liście TOP 2% najbardziej wpływowych naukowców, przygotowywanej przez Uniwersytet Stanforda;
- jest członkiem zespołu nagrodzonego przez Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej (2020);
- jest dwukrotnym laureatem nagrody *Outstanding Paper Award* na międzynarodowej konferencji MIXDES i dwukrotnym laureatem wyróżnienia na KKE w ramach konkursu *Młodzi pracownicy nauki*;
- jest pięciokrotnym laureatem Nagrody Rektora Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, sześciokrotnym zdobywcą Premii Rektora UMG za dorobek naukowy, trzykrotnym – za doskonałość naukową i czterokrotnym – za kierowanie projektami.

Uważam, że dr inż. Paweł Krzysztof Górecki aktywnie uczestniczy w realizacji zadań dydaktycznych i organizacyjnych.

7. Podsumowanie i wniosek końcowy

Dr inż. Paweł Krzysztof Górecki legitymuje się znaczącym i wyróżniającym się dorobkiem naukowym, aktywną współpracą z krajowymi i międzynarodowymi ośrodkami naukowymi i przemysłowymi. Jego prace z zakresu *automatyki, elektroniki elektrotechniki* mają dużą wartość poznawczą i użyteczną oraz wnoszą istotny wkład w rozwój tej dyscypliny naukowej. Kandydat rozwija przy tym współpracę z wieloma ośrodkami w kraju i za granicą. Ma spore doświadczenie w prowadzeniu i realizacji projektów badawczych oraz we współpracy z otoczeniem gospodarczym. Posiada też doświadczenie w pracy dydaktycznej. Aktywnie uczestniczy w działaniach organizacyjnych na rzecz Wydziału Elektrycznego UMG. Uważam, że zarówno poziom naukowy cyklu publikacji, jak i pozostały dorobek naukowy, a także dorobek dydaktyczny i organizacyjny dr. inż. Pawła Krzysztofa Góreckiego spełniają wymagania stawiane kandydatowi do stopnia naukowego doktora habilitowanego nauk technicznych. Pozwolę sobie także powtórzyć konkluzję, którą sformułowałem już wcześniej, że dr inż. Paweł Krzysztof Górecki jest już w pełni ukształtowanym, samodzielnym pracownikiem naukowym.

Stwierdzam zatem, że w świetle obowiązującej Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami Pan dr inż. Paweł Krzysztof Górecki spełnia wszystkie kryteria wymagane do uzyskania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk

inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika (obecnie, w myśl rozporządzenia Ministra Edukacji i Nauki z dn. 11 października 2022 (Dz.U. 2022 r. poz. 2202) – automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne) i dlatego z pełnym przekonaniem wnoszę o nadanie Kandydatowi stopnia doktora habilitowanego.

