



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI

PRZEWODNICZĄCY RADY DISCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaża

WYDZIAŁ AUTOMATYKI,
ROBOTYKI I I ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

19-03-2024

WPŁYNEŁO

Katedra Inżynierii Biomedycznej

dr hab. inż. Mariusz Kaczmarek, prof. uczelni
Katedra Inżynierii Biomedycznej
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Gdańsk, 11.03.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Dziarskiego „Termowizyjne pomiary temperatury elementów półprzewodnikowych”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pana magistra inżyniera Krzysztofa Dziarskiego, zatytułowana „Termowizyjne pomiary temperatury elementów półprzewodnikowych”. Recenzowana rozprawa została przygotowana w Politechnice Poznańskiej, pod kierownictwem dr. hab. inż. Grzegorza Wiczyńskiego, prof. uczelni i przedłożona Radzie Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej. Recenzję sporządzono na podstawie pisma sygnowanego przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej, prof. dr. hab. inż. Wojciecha Szelażę, w którym informuje o podjętej przez Radę Dyscypliny uchwale powołującej mnie na recenzenta niniejszej rozprawy doktorskiej.

1. Jaki problem naukowy (teza) został rozwiązany i przedstawiony w rozprawie?

W recenzowanej rozprawie Doktorant podjął się problemu opracowania metody pomiaru rozkładu temperatury na strukturze półprzewodnika. Praca ma charakter badawczo wdrożeniowy. W eksperymentach analizowano rozkład temperatury układów półprzewodnikowych wykonanych na bazie krzemu, węgliku krzemu oraz azotynku galu, zamkniętych w popularnych obudowach TO-220 oraz TO-247. Doktorant sformułował tezę rozprawy w następującym brzmieniu: „Na podstawie odpowiednio wykonanego termogramu obudowy urządzenia półprzewodnikowego, przy znajomości niezbędnych wartości parametrów katalogowych obudowy, możliwe jest wystarczająco dokładne określenie temperatury elementu półprzewodnikowego tego urządzenia”. W związku z tak postawioną tezą rozprawy zaproponowano metodę termowizyjnego pomiaru temperatury

elementów półprzewodnikowych za pomocą niskobudżetowej kamery termograficznej z niechłodzoną matrycą detektorów bolometrycznych. Zaletą przedstawionej metody pośredniego pomiaru temperatury jest możliwość oszacowania temperatury elementu półprzewodnikowego w działającym układzie elektronicznym w trybie ciągłego pomiaru, pod warunkiem dobrej widoczności obudowy elementu półprzewodnikowego. Opracowana procedura pomiarowa składa się z dwóch etapów: termowizyjnego pomiaru temperatury odpowiednio wybranego miejsca na obudowie urządzenia półprzewodnikowego oraz dalszej korekcji wyniku oszacowania temperatury wykorzystując wyniki symulacji rozkładu temperatury w danej strukturze półprzewodnikowej zamkniętej w wybranej obudowie. Otrzymane wyniki szacowania temperatury Doktorant porównał z wynikami otrzymanymi z innych metod stosowanych dotychczas w pomiarach temperatury urządzeń półprzewodnikowych m.in. pomiary stykowe za pomocą czujnika Pt1000, pomiary elektryczne. Zaproponowane podejście, zilustrowane pięcioma konkretnymi przykładami (dioda FFSH10120A, tranzystory C2M0280120, TP90H18PS, IRF9640, IRF9540), można uogólnić na dowolną klasę urządzeń półprzewodnikowych. Analizując całość rozprawy doktorskiej, myślę, że Doktorant mogłaby sformułować ambitniejszą tezę.

2. Struktura rozprawy doktorskiej

Praca składa się z 118 stron i podzielona jest na 5 rozdziałów i Bibliografii. Układ rozdziałów jest poprawny, logiczny. Rozprawa napisana jest starannie, zawiera odwołania do tabel, rysunków i pozycji bibliograficznych, wyszczególnionych w kolejności cytowań w tekście rozprawy.

Rozdział pierwszy zawiera wstęp dotyczący zagadnień pomiarów temperatury przyrządów półprzewodnikowych, motywację podjęcia się tej problematyki w ramach rozprawy doktorskiej oraz zdefiniowano w nim tezę rozprawy.

Rozdział drugi (24 strony) dotyczy szczegółowego przeglądu współczesnych metod pomiaru temperatury elementów półprzewodnikowych. Doktorant charakteryzuje w nim budowę, a w zasadzie sposób umieszczenia struktury półprzewodnikowej w obudowie ochronnej (analizowane w pracy są dwa typy obudowy: TO-220, TO-247) oraz opisuje metody pomiaru temperatury przyrządów półprzewodnikowych, z podziałem na metody elektryczne wykorzystujące zjawiska fizyczne w złączu półprzewodnikowym (thermal sensitive parameter – TSP), metody stykowe wykorzystujące termopary, technologie ciekłych kryształów i na koniec metody bezstykowe pomiaru temperatury: termografia, termorefleksja, luminescencja. W rozprawie zacytowano ostatecznie 116 pozycji bibliograficznych, w tym karty katalogowe przyrządów półprzewodnikowych oraz publikacje Doktoranta (5 prac współautorskich i jedna praca autorska).

Rozdział trzeci (56 stron) jest zasadniczym rozdziałem, w którym Doktorant zaprezentował warsztat badawczy wykorzystany podczas realizacji rozprawy doktorskiej. W rozdziale tym opisano budowę

opracowanego stanowiska pomiarowego, procedurę i konfigurację pomiarowe przyrządów półprzewodnikowych, implementację modelu numerycznego do przeprowadzenia symulacji metodą elementów skończonych (FEM) oraz zawarto dyskusję wyników pomiarów.

Rozdział czwarty to zestawienie przykładowych wyników pomiarów temperatury struktur półprzewodnikowych w otwartej przestrzeni i umieszczonych na radiatorze.

Całościowe osiągnięcia prowadzonych badań Doktorant podsumował w rozdziale piątym „Podsumowanie”.

Wrażenie ogólne po przeczytaniu rozprawy jest bardzo dobre. Rozprawa została przygotowana starannie, z użyciem poprawnej polszczyzny, a opracowane rysunki zasługują na wyróżnienie. Po zakończeniu czytania pozostaje jednak pewien niedosyt, bowiem Doktorant nie pokusił się o zarysowanie chociażby dalszych prac i możliwych zastosowań rozważanych metod (ograniczył się do jednego zdania dotyczącego dalszego kierunku prac). Taki rozdział przyszłościowy byłby niewątpliwie inspiracją dla kolejnych doktorantów, a może planem dalszej kariery naukowej Doktoranta. W ocenie recenzenta brakuje elementu spinającego osiągnięte rezultaty w postaci zintegrowanej aplikacji, która umożliwiałaby w sposób przyjazny dla użytkownika wykonywanie pomiarów temperatury przyrządów półprzewodnikowych – byłby to niewątpliwie element przybliżający opracowaną koncepcję do wdrożenia.

3. W jaki sposób Doktorant rozwiązał problem, jakich użył metod i jakich to wymagało umiejętności?

Aby udowodnić postawioną w rozprawie tezę konieczne było zrealizowanie celów/zadań cząstkowych:

- opracowanie koncepcji i realizacja stanowiska pomiarowego z kamerą termograficzną i systemem sterowania,
- opracowanie koncepcji i implementacja modeli numerycznych (FEM) wybranych przyrządów półprzewodnikowych, zgodnych z danymi katalogowymi i strukturą wewnętrzną elementu półprzewodnikowego,
- opracowanie koncepcji korekty oszacowania temperatury wewnętrznej przyrządu półprzewodnikowego na podstawie pośredniego pomiaru termograficznego na obudowie przyrządu półprzewodnikowego,
- wykonanie pomiarów z użyciem metod referencyjnych,
- zaprezentowanie i omówienie uzyskanych wyników pomiarów i symulacji.

Realizacja celów cząstkowych wymagała od Doktoranta zdobycia szczegółowej wiedzy o budowie wybranych przyrządów półprzewodnikowych, metodach pomiarów elektrycznych i termowizyjnych,

opracowywaniu modeli FEM do symulacji numerycznych oraz wiedzy o metodach analiz statystycznych, w szczególności szacowania niepewności pomiaru.

4. Na czym polega oryginalny dorobek autora i jakie jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?

Doktorant w rozprawie zaproponował system i metodę pomiaru bezstykowego temperatury przyrządów półprzewodnikowych mogących pracować w docelowym układzie pracy. Metoda ma przewagę nad dotychczas stosowanymi ponieważ umożliwia pomiar ciągły, niezaburzający procesu użytkowania układu w którym pracuje przyrząd półprzewodnikowy oraz jako metoda bezkontaktowa nie zaburza rozkładu temperatury na powierzchni jak to może się dzieć w przypadku zastosowania metod stykowych. W systemie pomiarowym wykorzystano stosunkowo tanią kamerę termograficzną wyposażoną w niechłodzoną matrycę detektorów mikrobolometrycznych. Szczególnie na wyróżnienie zasługuje staranność w opracowaniu i przygotowaniu eksperymentów pomiarowych oraz modeli do symulacji numerycznych FEM.

5. Jaka jest szansa dalszego wykorzystania wyników rozprawy?

Badania nad wiarygodnymi i nieinwazyjnymi pomiarami temperatury, w tym temperatury pracujących przyrządów półprzewodnikowych są kontynuowane na świecie. Opracowywane są np. nowe typy detektorów do kamer termograficznych, nowe metody analizy, w tym z zastosowaniem uczenia maszynowego. W przypadku recenzowanej rozprawy należałoby przygotować narzędzia do opracowania modeli FEM do symulacji numerycznych innych przyrządów półprzewodnikowych niż analizowane w rozprawie, tak by możliwe było rozszerzenie metody i jej uogólnienie na inne elementy elektroniczne. Opracowany system mógłby znaleźć zastosowanie w działach kontroli jakości jako szybka i tania metoda weryfikacji parametrów termicznych pracy urządzeń elektrycznych zwłaszcza pracujących w krytycznych instalacjach, gdzie wymagana jest wysoka niezawodność.

6. Jakiej wiedzy, umiejętności oraz kompetencji i na jakim poziomie nabył Doktorant w wyniku realizacji rozprawy?

W trakcie prac nad tematyką doktoratu Doktorant musiał uzupełnić wiedzę zarówno z metrologii jak i konstrukcji przyrządów półprzewodnikowych. Należy również mieć na uwadze nabycie umiejętności związanych z zagadnieniami symulacji numerycznych metodą FEM i obsługą środowiska do modelowania Solidworks 2020. Niewątpliwie podczas realizacji pracy Doktorant wykazał się umiejętnościami konstruktorskimi, wynikiem czego jest powstanie zautomatyzowanego i izolowanego od otoczenia stanowiska pomiarowego wyposażonego w kamerę termograficzną. Na

stanowisku przewidziano regulację systemu zobrazowania – ustawienie odległości obiekt-kamera, tak by zapewnić jak najlepszą ostrość obrazu, regulację kąta nachylenia obiektu względem płaszczyzny detektora kamery termograficznej. Na uznanie zasługuje kompleksowość podejścia do zagadnienia celem udowodnienia postawionej tezy: eksperyment pomiarowy, wsparcie symulacją komputerową, pomiary referencyjne (Pt1000 i metoda elektryczna) i na koniec krytyczna analiza otrzymanych wyników.

Opracowane dane pomiarowe, implementowane algorytmy oraz uzyskane wyniki były publikowane w czasopismach (z katalogu MDPI) oraz na konferencjach (QIRT, Int. Conf. on Measurements), których materiały były recenzowane i otrzymały rekomendację do publikacji, co świadczy o dobrym poziomie oraz oryginalności prac. Po złożeniu rozprawy pojawiło się kilka kolejnych publikacji (MDPI) co świadczy o dalszej aktywności badawczej Doktoranta.

7. Czy rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

Rozprawa dotyczy zagadnień metrologicznych wykorzystujących nowoczesną aparaturę pomiarową, co ważne coraz bardziej dostępną, co może przyczynić się do upowszechnienia zaproponowanej metody w działach kontroli jakości aparatury elektronicznej. Zastosowano w rozprawie współczesne metody modelowania FEM oraz analizy danych. Zaowocowało to propozycją autorskiego systemu do wyznaczania temperatury wewnątrz przyrządu półprzewodnikowego łączącego pomiary oraz wyniki modelowania numerycznego. Doktorant w rozprawie cytuje 116 pozycji bibliograficznych. Są to publikacje aktualne, z ostatnich lat, istotne dla rozważanych w rozprawie zagadnień, jak również publikacje z lat wcześniejszych, co daje możliwość prześledzenia postępów w zakresie tematycznym rozprawy. Pozwala to stwierdzić, iż Doktorant zdobył wiedzę z dyscypliny naukowej i zagadnień, których dotyczy niniejsza rozprawa doktorska.

8. Słabe strony pracy i uwagi krytyczne

Praca prezentuje wysoki poziom merytoryczny, charakteryzuje ją również pokaźny potencjał wdrożeniowy. Zdaniem recenzenta istnieją aspekty, których zabrakło w rozprawie, a które mogą przyczynić się do optymalizacji systemu i procedury pomiarowej. Zaproponowana przez Doktoranta procedura pomiarowa bierze pod uwagę jedynie rozkład temperatury na obudowie przyrządu półprzewodnikowego w stanie ustalonym. Zastosowana w systemie kamera termograficzna umożliwia pomiar ciągły, co daje szansę na analizę procesów przejściowych. Czy Doktorant rozważał zatem możliwość zastosowania/modyfikacji swojej metody o analizę stanów przejściowych i na tej podstawie szacować wartość temperatury struktury półprzewodnikowej? W przypadku takiej modyfikacji możliwe byłoby skrócenie procesu pomiarowego.

Czy Doktorant analizował wartości stałych czasowych badanych zjawisk zarówno podczas modelowania numerycznego FEM jak również w eksperymentach pomiarowych? Jakiego rzędu są to wartości?

W zaproponowanej metodzie pomiarów termograficznych wartość temperatury obudowy przyrządu półprzewodnikowego odczytywano z jednego punktu (piksela obrazu) i na jednym termogramie (w wybranej chwili czasu po osiągnięciu stanu ustalonego). Czy Doktorant próbował szacować temperaturę średnią z większego ROI (regionu zainteresowania) – uśredniona wartość z kilku sąsiednich pikseli lub z kilku następujących po sobie obrazów termograficznych?

Dla przygotowanych modeli numerycznych przyrządów półprzewodnikowych (str. 68, Podrozdział 3.4.2) przyjęto „arbitralnie” długość oczka siatki równą 1mm argumentując to faktem, że różnica wyznaczonej temperatury elementu pomiędzy kolejnymi momentami czasu jest „niewielka”. Określenie „niewielka różnica” jest mało precyzyjnym, nieinżynierskim pojęciem. Praktycznie zmiana z 0,2 na 0,1 jest zmianą o 100%.

Biorąc również pod uwagę rozmiary modelowanego elementu rzędu pojedynczych milimetrów, a w przypadku analizowania struktury wewnętrznej – średnice drucików zmierzono w przedziale od 0,06 mm do 0,4mm (Tabela 2, str. 61) - jak w przypadku takich wymiarów ma się ustalony rozmiar oczka siatki FEM. Poproszę o ilustrację podziału modelu na elementy skończone.

Jak zamodelowano strukturę wewnętrzną przyrządów półprzewodnikowych – w pracy nie ma adekwatnej ilustracji. Doktorant zamieścił tylko wizualizację modelu – widok obudowy, także wyniki symulacji obrazują rozkład temperatury na zewnątrz obudowy.

Na rysunku 36 (str. 53) zaprezentowano kształt użytego w eksperymentach odbłyśnika do pomiarów temperatury odbitej. Jaka była motywacja do zastosowania akurat takiego kształtu.

Poproszę również o plan dalszych prac związanych z omawianą tematyką. Dyskusję czy Doktorant wyczerpał temat czy też należałoby go kontynuować? Jeśli tak to w jakich obszarach warto byłoby go rozwijać.

Strona edycyjno-redakcyjna pracy

Praca napisana jest poprawnym językiem. W kilku miejscach Doktorant stosuje mało inżynierskie określenia „niewielka różnica”, „zbliżone wyniki pomiarów”. Razi natomiast w pracy wiele błędów edycyjnych, związanych z pominięciem zastosowania polskich znaków diakrytycznych (końcówek wyrazów wynikających z odmiany np. przez przypadki). Wymienię niektóre z nich:

- str. 11, wiersz 10: jest – „zagrożenia związane z **praca** elementu”; powinno być – „**pracą** elementu”,
- str. 12, wiersz 28: jest – „pomiędzy **obudowa** elementu”; powinno być – „**obudową** elementu”,

- str. 12, wiersz 32: jest - „obserwowaną **powierzchne**”; powinno być - „obserwowaną **powierzchnię**”,
- str. 17, wiersz 5 od dołu: „wykorzystuje się **są** następujące wielkości”,
- str. 22, wiersz 6 od dołu: jest - „Spoinę **pomiarowa** należy”; powinno być: „Spoinę **pomiarową** należy”. Dalszych przykładów już nie będę wymieniał ale jest ich naprawdę dużo (strony: 27, 30, 33, 34, 46, 49, 67, 89).
- zauważone nieścisłości we wzorach:
 - równanie (4) – str. 19 – brak nawiasu zamykającego wyrażenie,
 - równanie (7) – str. 20 – brak indeksu przy etykiecie T w wykładniku potęgi,
 - równanie (14) – str. 31 – błędny indeks w pierwszym wyrażeniu w nawiasie,
 - równanie (15) – str. 31 – błędnie skopiowany wzór (14),
- zauważone nieścisłości na rysunkach:
 - rysunek 1b – str. 14 – rzut z boku rysunku obudowy: brak wymiaru szerokości obudowy,
 - rysunek 2 – str. 15 – dla zobrazowania kształtu obudowy przydałyby się pozostałe rzuty,
 - rysunek 3 – str. 16 – ostatni blok decyzyjny algorytmu: o jaką temperaturę chodzi?
 - rysunek 19, 22 – str. 42 i 44 – niezbyt fortunne oznaczenie rzeczywistej temperatury badanego przyrządu półprzewodnikowego $T_c = 66,8C$ na diagramie i jako etykieta osi Y.
 - rysunek 37 – str. 55 – tło pod elementami półprzewodnikowymi jest na tyle absorbujące/rozpraszające, że trudno dopatrzeć się detali. Warto było na czas robienia zdjęcia przestłonić płytkę PCB (metalowe przelotki) białą kartką papieru,
 - jest też grupa rysunków, dla których nie podano źródła np.: Rysunki: 4, 5, 6, 7, 8. Jeśli jest to opracowanie własne, należałoby to podkreślić.
 - dla serii zamieszczonych charakterystyk brakuje komentarza i interpretacji Doktoranta, co z przedstawionych pomiarów wynika w praktyce dla dalszych prac, np. Rysunki 19, 21, 22, 26, 27, 28.

W tekście zdarzają się trywialne stwierdzenia, jak np.: str. 25, pierwszy akapit w podrozdziale 2.4.1.2: „ W metodzie bezstykowej, wykorzystującej kamerę termowizyjną wartość temperatury odczytanej z termogramu jest zależna od warunków panujących w chwili pomiaru.” Stwierdzenie to jest prawdziwe również dla każdej innej metody pomiarowej.

Wnioski końcowe

Rozprawa została sumiennie przygotowana i zredagowana. Doktorant poprawnie sformułował problem naukowy i zaproponował jego rozwiązanie opracowując własny system i procedurę oszacowania temperatury przyrządu półprzewodnikowego, która charakteryzuje się osiągnięciem porównywalnych wyników wyznaczania temperatury struktury półprzewodnikowej, co stosowane

dotychczas metody, a jest pozbawiona ich wad i umożliwia pomiar ciągle w warunkach normalnej pracy urządzenia elektronicznego. Zaproponowane rozwiązanie, mimo kilku krytycznych uwag, jest cenne i stanowi punkt wyjścia do dalszych prac nad wdrożeniem metody do codziennej praktyki. Należy zatem stwierdzić, iż Doktorant dowiódł postawionej tezy oraz zrealizował założone cele pracy.

Podsumowując, pomimo dostrzeżonych mankamentów edycyjno-redakcyjnych (nie merytorycznych) uważam, że przedstawiona rozprawa mgr inż. Krzysztofa Dziarskiego spełnia wymagania zawarte w regulujących kwestie przeprowadzania przewodów doktorskich dokumentach (Dz. U. 2018 poz. 1668, art. 186, 187 Ustawa z dnia 20 lipca 2018, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce) i wnoszę o jej dalsze procedowanie, czyli dopuszczenie rozprawy doktorskiej pana magistra inżyniera Krzysztofa Dziarskiego do publicznej obrony.



Gdańsk, 11.03.2024

dr hab. inż. Mariusz Kaczmarek,
prof. PG