

## **Recenzja**

### **rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Barana pt. Temperatura panelu oświetleniowego ze źródłami LED i jej wpływ na wybrane parametry świetlne**

#### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawą wykonania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie prof. dr hab. inż. Kazimierza Buczka z dnia 15 lipca 2019 r. numer RE.530-13/2019 o powołaniu na recenzenta rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Barana zatytułowanej *"Temperatura panelu oświetleniowego ze źródłami LED i jej wpływ na wybrane parametry świetlne"* (zgodnie z Uchwałą Rady Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie z dnia 10 lipca 2019 r.).

Recenzowana rozprawa doktorska z dziedziny nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie naukowej: automatyka, elektronika i elektrotechnika, której zakres obejmuje dotychczasową dyscyplinę elektrotechnika, została wykonana na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie pod kierunkiem naukowym Promotora Pana dr hab. inż. Antoniego Różowicza, prof. PŚk i Promotora pomocniczego Pana dra inż. Henryka Wachty.

#### **2. Treść i zakres rozprawy doktorskiej**

Opiniowana rozprawa doktorska zawiera łącznie 147 stron. Składa się z następujących części: spisu treści, zestawienia ważniejszych oznaczeń, dwunastu ponumerowanych rozdziałów (w tym celu i tezy pracy) oraz literatury. Podstawowy układ pracy nie budzi istotnych zastrzeżeń, a sformułowany problem naukowy, cel i teza naukowa pracy są spójne i logiczne.

W rozdziale wstępnym rozprawy doktorskiej Autor przedstawił w sposób ogólny problematykę stosowania technologii LED i związane z tym zagadnieniem problemy chłodzenia struktury półprzewodnikowej. Jednym z kluczowych elementów projektowania opraw oświetleniowych jest ograniczenie temperatury złącza półprzewodnikowego zastosowanego źródła światła typu Power LED. Właściwe zaprojektowanie i wykonanie układu chłodzenia zapewnia zachowanie założonych parametrów świetlnych oraz wysoką trwałością zaprojektowanej oprawy. Oprócz zjawiska samonagrzewania złącza półprzewodnikowego, związanego bezpośrednio z mocą cieplną pojedynczej diody, w panelach LED należy również uwzględnić wzajemne sprzężenia termiczne pomiędzy wieloma źródłami światła (ciepła) zainstalowanymi na wspólnym radiatorze. Kolejnym ważnym czynnikiem wpływającym na warunki termiczne pracy oprawy jest uwzględnienie warunków środowiskowych, które w zależności od rodzaju zastosowanej oprawy mogą się zmieniać w bardzo szerokich granicach.

W rozdziale drugim, wprowadzając do zagadnienia chłodzenia, Autor omówił budowę wewnętrzną oraz zasadę działania diody elektroluminescencyjnej. Przybliżył zjawisko elektroluminescencji w złączu p-n, problem domieszkowania struktury, metody otrzymywania światła o barwie białej. Następnie dokonał ogólnego podziału diod elektroluminescencyjnych stosowanych w oprawach oświetleniowych ze względu na ich moc i budowę. Autor wskazał, że źródła LED dużej mocy są obecnie jednymi z najbardziej popularnych rodzajów półprzewodnikowych źródeł światła stosowanych do celów oświetleniowych. Stosunkowo duża moc pochodząca z pojedynczego źródła, wysoka skuteczność świetlna, jak również duży wybór układów soczewkowych formujących wymagany rozsył strumienia świetlnego sprawiły, że źródła te są szeroko stosowane w ulicznych oprawach oświetleniowych. Zastosowanie źródeł światła typu LED wymusza uwzględnienie w konstrukcji oprawy oświetleniowej układu chłodzenia, którego zadaniem jest efektywne odprowadzanie ciepła, prowadzące do ograniczenia temperatury złącza p-n. Kolejny podrozdział 2.3 został poświęcony na wyjaśnienie zagadnienia dystrybucji ciepła ze struktury półprzewodnikowej źródła światła typu LED, wyjaśniono także drogi przepływu ciepła dla przypadku pojedynczej diody, jak i układu wieloźródłowego. Następnie w podrozdziale 2.4 Autor oszacował wpływ temperatury złącza półprzewodnikowego na wybrane parametry świetlne, w tym: strumień świetlny, temperaturę barwową oraz wskaźnik oddawania barw.

O ile lektura wstępnych podrozdziałów rozdziału drugiego prezentuje wiedzę ogólnodostępną, tak kolejne podrozdziały istotnie poszerzają zasób informacji o wpływie temperatury na parametry emisyjne diody elektroluminescencyjnej. Należy uznać, że informacje zawarte w rozdziale drugim porządkują i systematyzują wiedzę czytelnika. Pozwalają także uzasadnić podjęte prace badawcze.

W rozdziale trzecim Autor dokonał szczegółowej analizy stanu zagadnienia, jakim jest chłodzenie półprzewodnikowych źródeł światła. Doktorant szczegółowo omówił mechanizmy przepływu ciepła w półprzewodnikowych źródłach światła. Wskazał na problem wymiany ciepła generowanego przez złącze półprzewodnikowe, które w pierwszej kolejności wymieniane jest przez przewodnictwo cieplne (kondukcję), następnie przepływa do radiatora, skąd przez konwekcję i radiację (promieniowanie cieplne) zostaje przekazane do otoczenia. Następnie Autor przedstawił stosowane układy chłodzenia półprzewodnikowych źródeł światła. Doktorant szczegółowo omówił zależności analityczne odnoszące się do typowych, pasywnych układów chłodzenia. Kolejny podrozdział poświęcony został na przegląd stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych układów chłodzenia w oprawach oświetlenia drogowego.

Na podstawie dokonanego przeglądu dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych dotyczących układów chłodzenia w oprawach oświetlenia drogowego, Autor niniejszej rozprawy stwierdził, że możliwe są działania modelowe, a następnie konstrukcyjne, poprawiające efektywność dotychczas stosowanych układów chłodzenia. Zastosowanie nowego rozwiązania opartego na otwartej konstrukcji systemu chłodzenia będzie umożliwiać swobodny przepływ powietrza wokół powierzchni radiatora, przyczyniając się do efektywniejszego odprowadzania ciepła z radiatora i ze złącz poszczególnych źródeł LED. Autor założył, że zaproponowane rozwiązanie umożliwi zredukowanie całkowitej masy systemu chłodzenia i oprawy oświetleniowej, przy jednoczesnym zapewnieniu efektywnego odprowadzania ciepła, przekładając się tym samym na ograniczenie wpływu temperatury złącza źródeł LED na podstawowe parametry świetlne.

W dalszej części pracy w rozdziale czwartym Autor opisuje stosowane metody modelowania termicznego. Tematyka modelowania i obliczeń cieplnych obejmuje szeroki zakres problemów. Zagadnienia termiczne dotyczące odprowadzania ciepła i ograniczenia temperatury wpływającej na parametry elektryczne są rozpatrywane łącznie w procesie projektowania elementów, podzespołów i układów stosowanych w elektrotechnice i elektronice. Do opisu zjawisk cieplnych tworzone są modele termiczne, które z odpowiednim przybliżeniem umożliwiają ocenę temperaturowych warunków pracy. Problemy cieplne dotyczą również układów elektronicznych

w tym półprzewodnikowych źródeł światła, w których temperatura istotnie wpływa na ich parametry emisyjne. Doktorant wskazuje, że ze względu na przyjęte liczne uproszczenia, przeanalizowane i wykorzystywane powszechnie modele mogą być stosowane jedynie do przybliżonej oceny temperaturowych warunków pracy źródeł Power LED. Uproszczenia te są związane m.in. z możliwością analizy prostej geometrii źródeł i systemów radiacyjnych, z jednowymiarowym przepływem ciepła lub brakiem uwzględnienia w obliczeniach niektórych procesów termicznych, np. promieniowania cieplnego, co może prowadzić finalnie do znacznych błędów obliczeniowych. Na podstawie przeglądu literaturowego Autor stwierdza, że opisane metody modelowania termicznego źródeł LED stanowią uproszczone sposoby analizy termicznej półprzewodnikowych źródeł światła. Metody te odnoszą się głównie do nieskomplikowanych układów o prostej strukturze i geometrii. W przypadku paneli czy opraw oświetleniowych do wiarygodnej analizy termicznej uwzględniającej wszystkie czynniki wpływające na wartość temperatury złącza jest wymagany model termiczny umożliwiający definiowanie złożonej geometrii i struktury materiałowej złącza półprzewodnikowego, obwodów drukowanych i systemu radiacyjnego. Model ten powinien uwzględniać łącznie wszystkie mechanizmy transportu ciepła.

Autor opisując informacje zawarte w rozdziałach 2, 3 i 4 często odnosił się do aktualnej literatury branżowej, ściśle związanej z rozważanymi w dysertacji zagadnieniami.

Dokonany przez Doktoranta przegląd literatury oraz przeprowadzona analiza stanu zagadnienia pozwoliła na określenie *problemu naukowego, który obejmuje związane ze sobą dwa zagadnienia: badania wpływu czynników konstrukcyjnych i środowiskowych na temperaturowe warunki pracy źródeł panelu LED oraz skalę oddziaływania temperatury złącza na wybrane parametry świetlne*. Następnie Doktorant sformułował tezę pracy:

*Możliwe są działania w obszarze modelowania i konstrukcji panelu ze źródłami LED, zmierzające do uzyskania jak najniższej temperatury złącza, przy ograniczonej masie panelu, a tym samym wpływające na poprawę parametrów świetlnych.*

W dalszej kolejności określony został cel pracy, którym było:

*Opracowanie szczegółowego modelu termicznego panelu LED, dokonanie na jego podstawie analizy wpływu czynników konstrukcyjnych i warunków środowiskowych na temperaturę złącza źródeł panelu oraz ocena jej wpływu na wybrane parametry świetlne.*

Cel dysertacji określony przez Doktoranta wpisuje się w aktualną problematykę prowadzonych na świecie prac naukowych nad zagadnieniami poprawy efektywności energetycznej układów oświetleniowych. Osiągnięcie wysokiej skuteczności świetlnej źródeł Power LED związane jest z zachowaniem właściwych parametrów termicznych złącza półprzewodnikowego. Opracowanie modelu termicznego pozwoli na określenie zależności temperaturowych i umożliwi zachowanie wysokich, założonych parametrów oświetleniowych.

W rozdziale szóstym Doktorant słusznie zauważył, że wyznaczenie rozkładu temperatury panelu LED i określenie temperatury złącza poszczególnych źródeł wiąże się koniecznością uwzględnienia wielu czynników wpływających na jej wartość. Pierwszym i zarazem głównym elementem decydującym o dokładności otrzymanych wyników jest struktura półprzewodnikowego źródła światła. Kolejnymi elementami modelu termicznego są: zastosowane podłoże (MCPCB) oraz system radiacyjny. Czynnikiem decydującym o dokładności uzyskanych wyników są: poprawne zdefiniowanie mocy cieplnej badanego źródła LED oraz określenie warunków środowiskowych. Uwzględnienie tych elementów daje możliwość pełnej analizy zjawiska odprowadzania ciepła na drodze złącze–otoczenie. Przeprowadzone przez Doktoranta badania symulacyjne na podstawie wyznaczonego modelu termicznego będą prowadzić do opracowania konstrukcji panelu, umożliwiającego uzyskanie jak najniższej temperatury złącza zainstalowanych na nim źródeł, wpływając tym samym na poprawę wartości parametrów świetlnych docelowej oprawy. W przypadku analizy termicznej z wieloma źródłami LED, gdzie pożądanym jest trójwymiarowy rozkład temperatury na całej powierzchni badanego panelu czy oprawy oświetleniowej, mogą być zastosowane zaawansowane narzędzia obliczeniowe, oparte



m.in. na metodzie elementów skończonych (ang. Finite Element Method-FEM) czy obliczeniowej mechanice płynów (ang. Computational Fluid Dynamics- CFD).

Doktorant w celu zdefiniowania wiarygodnego modelu termicznego źródeł LED, przeprowadził badania związane z wyznaczeniem rzeczywistej wewnętrznej rezystancji termicznej wybranych źródeł światła. Wyznaczona wartość rezystancji termicznej była podstawą modelu termicznego 2R, zaimplementowanego następnie w oprogramowaniu FloEFD 16.2 firmy Mentor Graphics, opartym na obliczeniowej mechanice płynów. Pozwoliło to na przeprowadzenie szczegółowych obliczeń temperaturowych dla złożonej geometrii oprawy oświetleniowej. Zastosowanie modelu termicznego źródła opartego na wyznaczonej rzeczywistej rezystancji termicznej oraz uwzględnienie czynników wpływających na rozkład temperatury panelu (podłoże MCPCB, układ radiacyjny, warunki środowiskowe) umożliwiło Doktorantowi wyznaczenie temperatury złącz poszczególnych źródeł światła.

W rozdziale siódmym Doktorant na drodze eksperymentu dokonał pomiarów wewnętrznej rezystancji termicznej wybranych źródeł LED. Pomiary przeprowadzono opierając się na międzynarodowych standardach opracowywanych przez Komitet JEDEC JC-15 „Thermal Characterization Techniques for Semiconductor Packages”. Pomiary rezystancji termicznej badanych źródeł LED wykonano za pomocą przejściowego testera termicznego T3Ster firmy Mentor Graphics, znajdującego się w Katedrze Mikroelektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Łódzkiej. Na podkreślenie zasługuje wykorzystanie przez Doktoranta potencjału badawczego innej niż macierzysta jednostka naukowej.

Ustalone przez Doktoranta wartości rezystancji termicznej zbadanych źródeł LED, uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań w warunkach laboratoryjnych, w sposób istotny odbiegają od wartości prezentowanych w dostępnej literaturze. Wymienione różnice wynikają z faktu niejednoznacznie określonych przez producentów warunków pomiarowych, dla których została wyznaczona rezystancja termiczna. Ustalona w drodze eksperymentu wartość rezystancji termicznej stanowi podstawę opracowanego przez Doktoranta modelu termicznego, który umożliwia określenie temperatury złącza źródła LED. Model ten został zaimplementowany w oprogramowaniu CFD i posłużył do analizy termicznej panelu LED.

W rozdziale ósmym Doktorant przeprowadził analizę termiczną poszczególnych elementów opracowanego panelu LED. Przeanalizowano wpływ poszczególnych czynników tj. mocy każdego ze źródeł LED, liczby zainstalowanych źródeł, ich konfiguracji i geometrii rozmieszczenia na temperaturę złącz półprzewodnikowych źródeł światła tworzących panel LED. W analizach Doktorant uwzględnił strukturę podłoża, rodzaj materiału wykorzystywanego do budowy radiatora i geometrię układu radiacyjnego. Przeprowadzona analiza symulacyjna uwzględniała warunki środowiskowe: temperaturę otoczenia i przepływ powietrza. Uzyskane wyniki badań potwierdziły słuszność założeń związanych z konstrukcją panelu LED. Na podstawie wyników badań modelowych opracowano i wykonano aluminiowy odlew prototypu panelu LED, który posłużył do weryfikacji przyjętych na wstępie pracy założeń. W warunkach laboratoryjnych, za pomocą ośmiokanałowej specjalistycznej aparatury pomiarowej wykonano pomiary temperatury w wybranych punktach rozmieszczonych na powierzchni panelu LED oraz temperatury otoczenia. Zarejestrowane wyniki pomiarów odniesiono do wartości obliczonych w środowisku symulacyjnym. Uzyskano wysoką zgodność wyników analiz symulacyjnych i pomiarów laboratoryjnych. Przedstawione w dysertacji porównanie wyników (s. 101, tab. 8.5) świadczy o dużej zgodności modelu termicznego panelu LED ze zbudowanym prototypem.

W rozdziale dziewiątym Autor wykonał w warunkach laboratoryjnych badania wpływu temperatury na wybrane parametry świetlne pojedynczego źródła LED. Badania przeprowadzono dla czterech typów źródeł LED na specjalistycznym stanowisku pomiarowym, w skład którego wchodziła: kula całkująca, spektrometr, programowalny zasilacz prądu stałego oraz moduł Peltiera z kontrolerem temperatury. Badano wpływ parametrów termicznych na parametry świetlne:

strumień świetlny, temperaturę barwową, współczynnik oddawania barw Ra, rozkład widmowy oraz moc promieniowania. Docelowo wyznaczono sprawność optyczną badanych źródeł światła.

W rozdziale dziesiątym Autor kontynuował badania wpływu temperatury na wybrane parametry świetlne, rozszerzając je na opracowany panel LED. Prototyp posłużył do weryfikacji wyników badań symulacyjnych. Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, w skład którego wchodziła kula Ulbrichta o średnicy 2 m oraz wysokiej klasy spektrometr. Autor dokonał pomiarów: strumienia świetlnego, temperatury barwowej oraz współczynnika oddawania barw Ra. Pomiarów przeprowadzono dla wybranych prądów przewodzenia. Doktorant uzyskał zgodność wyników badań symulacyjnych z wynikami badań eksperymentalnych, co dowodzi o słuszności przyjętych założeń i wiarygodności opracowanego modelu.

W rozdziale jedenastym Doktorant przedstawił użyteczny efekt przeprowadzanych w sprawie badań i analiz. Aplikacja dotyczy opracowanego modelu termicznego do budowy prototypu oprawy oświetlenia drogowego. Opracowana konstrukcja została przeanalizowana pod względem termicznym oraz poddana laboratoryjnym badaniom fotometrycznym.

Zaprezentowana konstrukcja oprawy oświetlenia drogowego, jak również zastosowany w niej sposób odprowadzania ciepła, zostały zgłoszone we wniosku do Urzędu Patentowego o udzielenie patentu na przedstawiony wynalazek. Zgłoszenie pt. „Oprawa oświetleniowa z półprzewodnikowymi źródłami światła LED” zostało zarejestrowane numerem P.421711.

Rozdział dwunasty stanowi podsumowanie rozprawy, w którym Doktorant w sposób syntetyczny dokonał opisu zrealizowanych symulacji, przeprowadzonych badań i wykonanych analiz. Doktorant prawidłowo interpretuje wyniki uzyskane podczas przeprowadzonych badań. Słusznie stwierdza, iż postawiona teza naukowa rozprawy doktorskiej *„możliwe są działania w obszarze modelowania i konstrukcji panelu ze źródłami LED, zmierzające do uzyskania jak najniższej temperatury złącza, przy ograniczonej masie panelu, a tym samym wpływające na poprawę parametrów świetlnych”* została udowodniona.

Uzyskane wyniki wskazują, że cel pracy został osiągnięty, a teza została w pełni udowodniona. Następnie wskazano na osiągnięcia własne Doktoranta i kierunek przyszłych badań.

Na końcu dysertacji zamieszczono spis literatury, który składa się z 80 pozycji publikacyjnych (69 w języku angielskim, 24 wydanych po 2015 roku), 6 norm oraz standardów pomiarowych, kart katalogowych oraz danych technicznych w liczbie 28 pozycji, 13 aktualnych odnośników do stron internetowych oraz jednej pozycji odnoszącej się do dokumentacji technicznej producenta oprogramowania. Nadmienić należy, że wśród wymienionych pozycji w zamieszczonym wykazie znajduje się 10 pozycji, w których Doktorant był autorem (3) lub współautorem (7) publikacji.

Dobór pozycji bibliograficznych jest trafny, a sposób cytowania prawidłowy. Doktorant wykazał się umiejętnością doboru literatury naukowej, niezbędnej do opracowania tematu rozprawy doktorskiej.

Rozprawa doktorska jest napisana językiem poprawnym, z użyciem prawidłowego słownictwa i terminologii technicznej z omawianego obszaru.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej**

Zapewnienie odpowiednich warunków temperaturowych elementom i układom elektronicznym jest jednym z kluczowych czynników wpływających ich sprawność, trwałość i niezawodność. Powszechność stosowania półprzewodnikowych źródeł światła typu LED dużej mocy zmusiła konstruktorów opraw oświetleniowych do poszukiwania efektywnych metod projektowania układów chłodzenia struktury półprzewodnikowej. Konieczność chłodzenia półprzewodnikowych źródeł światła nie przełożyła się na opracowanie ogólnodostępnych i gotowych narzędzi, wspomagających proces doboru radiatora do zastosowanej struktury diody i obwodu drukowanego. W procesie projektowym należy uwzględnić warunki pracy

projektowanej oprawy drogowej, które mogą się istotnie zmieniać zarówno w zależności od miejsca jej eksploatacji jak i pory roku.

Prezentowane przez Doktoranta w dysertacji zagadnienie chłodzenia źródeł światła typu LED jest znane i jest przedmiotem prac badawczych prowadzonych w środowisku naukowym. Uzasadnia to zresztą sam Autor powołując się na wybrane publikacje. Jednak przeprowadzona analiza stanu zagadnienia umożliwiła sformułowanie tezy naukowej rozprawy doktorskiej i zakresu pracy, który obejmuje komplementarny szereg zrealizowanych zagadnień badawczych.

Należy podkreślić systemowe ujęcie problemu przez Doktoranta, spójność i zaproponowane podejście badawcze które pozwoliło na systemowe spojrzenie na cały proces projektowania układu chłodzenia dla wysokosprawnego panelu LED.

Omówione i analizowane w dysertacji zagadnienia zostały przez Doktoranta przemyślane i ułożone w logiczny ciąg działań, zmierzających do rozwiązania zagadnienia naukowego oraz realizacji celu użytecznego, jakim było opracowanie nowej oprawy drogowej.

Doktorant w sposób racjonalny stosuje zaawansowane narzędzia analityczne i projektowe, popierając efekty analiz teoretycznych wynikami przeprowadzonych badań laboratoryjnych. Świadczy to o nabyciu umiejętności zaplanowania i rozwiązania postawionego problemu badawczego oraz samodzielnym przeprowadzeniu interdyscyplinarnych prac badawczych.

Rozprawa doktorska pt. „*Temperatura panelu oświetleniowego ze źródłami LED i jej wpływ na wybrane parametry świetlne*” wpisuje się w obecne działania środowisk badawczych (uczelnia, instytutów badawczych i jednostek przemysłowych). Autor słusznie wskazał na problem kontroli temperatury półprzewodnikowego złącza źródła LED i konieczność stosowania nowych koncepcji i rozwiązań do chłodzenia coraz to wydajniejszych półprzewodnikowych struktur emisyjnych.

Zagadnienia omówione w rozprawie stanowią kompendium wiedzy na temat badania pod względem termicznym struktur LED oraz podejścia do projektowania układów chłodzenia.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:

- wyznaczenie rzeczywistej wewnętrznej rezystancji termicznej dla wybranych półprzewodnikowych źródeł światła,
- określenie czynników wpływających na temperaturę złącza oraz rozkład temperatury panelu LED,
- opracowanie modelu i wyznaczenie temperatury złącza sprzężonych ze sobą termicznie źródeł światła zainstalowanych na panelu LED,
- wyznaczenie wpływu temperatury złącza na wybrane parametry świetlne dla wybranych źródeł dużej mocy,
- budowa prototypu oprawy oświetleniowej z efektywnym układem odprowadzania ciepła, ograniczającym wpływ temperatury na wybrane parametry świetlne.
- dokonanie zgłoszenia patentowego.

Poza rozważanymi przez Doktoranta aspektami naukowymi i technicznymi polegającymi na ustaleniu relacji termiczno-emisyjnych w oprawie LED pragnę podkreślić, że istnieje dużo ważniejszy i wymierny, a często lekceważony aspekt ekologiczny. Wszystkie działania zmierzające do stosowania wysokoefektywnych układów oświetleniowych należy traktować jako pilną potrzebę, związaną z koniecznością globalnego ograniczenia zużycia energii elektrycznej na cele oświetleniowe i jednoczesnym ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych w tym CO<sub>2</sub>.

Zatem działania podjęte przez Autora należy uznać za zasadne naukowo i potrzebne społecznie.

Doktorant skupił się na problemie termicznym, zasilając badane układy za pomocą wyspecjalizowanych, laboratoryjnych zasilaczy. Docelowo w opracowanej oprawie zastosowano rozwiązanie zasilacza komercyjnego.



Nasuwa się zatem pytanie:

1. Jak parametry zasilacza komercyjnego i sposób sterowania mocą (zakładając regulację mocy oprawy) mogą wpłynąć na temperaturę źródła Power LED?

Weryfikacja poprawności obliczeń numerycznych została przeprowadzona na stanowisku laboratoryjnym, wyposażonym w 8-kanałowy laboratoryjny miernik temperatury, który posiada 8 niezależnych wejść na termopary, a dołączone oprogramowanie umożliwia wyświetlenie i rejestrację zmierzonych wartości. Uzyskane wartości zarejestrowano w wybranych punktach, odnosząc wyniki do wskazanych lokalizacji na modelu obliczeniowym. Pomiarów wykonano podając stałą temperaturę otoczenia rejestrowaną w punkcie (8 czujnik) przez cały czas pomiarów.

2. Dlaczego pomiarów weryfikacyjnych nie wykonano w komorze termicznej?
3. Czy zdaniem Doktoranta możliwe jest wyznaczenie temperatury panelu LED z wykorzystaniem technik termograficznych?
4. Proszę omówić i uzasadnić wybór rozmieszczenia kanałów pomiarowych temperatury na prototypie oprawy LED. Zagadnienie dotyczy rysunku 8.33, zamieszczonego na stronie 96.

Na stronie 62 w rozdziale 8.1. „Sprężenia termiczne pomiędzy źródłami LED”, Doktorant stwierdził:

„Wielkość domeny obliczeniowej dobrano na podstawie uwzględnienia charakterystyki przenoszenia ciepła oraz czasu obliczeniowego. Wysokość domeny została ustalona jako  $7W_p$ , szerokość i długość domeny obliczeniowej jako  $2S_p$  oraz  $2D_p$ , gdzie  $W_p$ ,  $S_p$  oraz  $D_p$  oznaczają odpowiednio wysokość, szerokość oraz długość panelu LED (rys. 8.3a).”

5. Proszę wyjaśnienie zasady doboru wielkości domeny obliczeniowej.

Na stronie 63 i kolejnych, na których zamieszczono rysunki o numerach 8.4, 8.5, 8.10, 8.14, 8.21, 8.26, 8.28, 10.2, 11.2 do prezentacji wyników przyjęto różne zakresy temperatury maksymalnej, utrudnia to porównanie uzyskanych rozkładów temperatury.

6. Proszę wyjaśnić, czy była możliwość wygenerowania wyników z uwzględnieniem jednolitej skali temperaturowej.

Na stronie 86 w rozdziale 8.4 „Wpływ środowiska zewnętrznego na rozkład temperatury panelu LED”, Autor stwierdził:

„Półprzewodnikowe źródła światła często pracują w określonych warunkach środowiskowych, które wpływają na temperaturowe warunki pracy źródeł LED. Przykładem może być tutaj np. oprawa oświetlenia drogowego, pracująca przy zmieniających się warunkach otoczenia, gdzie zarówno sezonowa, miesięczna, jak i dobową temperatura otoczenia  $T_o$  może się zmieniać w szerokich granicach od  $-30$  do  $45^{\circ}\text{C}$  [35].”

7. Dlaczego zatem do obliczeń symulacyjnych przyjęto temperatury  $T_o$  w zakresie:  $-25$ ;  $0$ ;  $25^{\circ}\text{C}$ ?

W rozdziale końcowym dysertacji wskazano jeden potencjalny kierunek badań, związany z zastosowaniem nowych materiałów.

8. Proszę o wskazanie innych kierunków badań, które odnosiłyby się wprost do zrealizowanej rozprawy.

Proszę Doktoranta o pisemne odniesienie się do zgłoszonych powyżej uwag i wątpliwości.

#### 4. Uwagi ogólne i szczegółowe

Recenzowana rozprawa ma charakter teoretyczno-praktyczny. Do wykonania jej niezbędna była bardzo dobra znajomość zagadnień związanych z elektrotechniką, oświetleniem, a w szczególności z zagadnieniami termicznymi i modelowaniem przestrzennym. Na podkreślenie

zasługuje fakt, iż dla przedstawionych rozważań Autor widzi praktyczne zastosowanie, które dokumentuje złożonym wnioskiem patentowym.

Rozprawa doktorska jest napisana językiem komunikatywnym. Rysunki są czytelne, ujednolicone i bardzo estetycznie wykonane. Strona edycyjna pracy reprezentuje dobry poziom i świadczy o znajomości techniki składu komputerowego. Drobnym mankamentem są nieliczne błędy edytorskie, ale nie wpływają one znacząco na odbiór treści merytorycznej przez czytelnika. Są to m.in.:

- niejasność interpretacji wypowiedzi, np.:

- s. 95: nie wyjaśniono pojęcia temperatura rzeczywista, tj. „Do pomiaru rzeczywistej temperatury panelu LED ...”,
- s. 12, s. 13 i inne: stosowanie w opisie zagadnień technicznych uogólnień i języka potocznego np.: „Wymienione rozwiązanie charakteryzuje się stosunkowo niskim kosztem, co jest związane z prostym układem zasilającym i dość prostą technologią produkcji źródła LED. Konwersja światła w pasmowym luminoforze generuje jednak znaczące straty strumienia...”,
- np.: s. 32: w dysertacji przyjęto konwencję opisaną wzorów bez podawania jednostek. W Zestawieniu ważniejszych oznaczeń, s. 4 i s. 5 także nie zamieszczono wykazu jednostek. Takie podejście utrudnia sprawdzenie poprawności przyjętego zapisu,
- s. 139-147, bibliografia: różnorodne formatowanie pozycji bibliograficznych. Przy formatowaniu pozycji bibliograficznych należało zastosować jednolity system interpunkcji oraz skorzystać z informacji zawartych w: „PN-ISO 690:2012. Informacja i dokumentacja - Wytyczne opracowania przypisów bibliograficznych i powołań na zasoby informacji”,
- s. 24, 5 wiersz od dołu, w mojej opinii niedokończone i nieprecyzyjne zdanie: Wartość tego współczynnika może się znacznie różnić w zależności od wielu czynników, m.in. warunków brzegowych, geometrii materiału czy rodzaju,
- s. 34, wzory 4.2 i 4.3, nieprecyzyjny zapis: gdzie:  $g_{j,c}$  – grubość,

- błędy literowe i edycyjne, np.:

- s. 12: brak powołania w tekście pracy Rys. 2.2. i Rys. 2.3,
- s. 17: brak powołania w tekście pracy numerów wzorów. Uwaga dotyczy całej pracy i być może jest związana z decyzją redaktora wydawniczego,
- s. 19: zbędna kropka: (rozd. 6.),
- s. 78: brak powołania w tekście pracy Rys. 8.19,
- s. 79, 8 wiersz od dołu – brak spacji po kropce,
- s. 95, 4 wiersz od góry – brak spacji po kropce,
- s. 126: brak powołania w tekście pracy Tabeli 10.5,
- korzystne dla czytelnika byłoby zamieszczenie w rozprawie takich elementów jak: streszczenia w języku polskim oraz w języku angielskim, spis rysunków, spis tabel, tytuł w języku angielskim, słowa kluczowe zarówno w języku polskim, jak i w angielskim,
- pewnym mankamentem rozprawy jest brak załączników, w których można było zamieścić szczegółowe wyniki pomiarów, dodatkową dokumentację, wyniki wybranych analiz lub np. zeskanowane zgłoszenie wniosku do Urzędu Patentowego, dokumentujące wykonane prace.

**Zawarte w recenzji uwagi i zastrzeżenia nie wpływają w sposób znaczący na wysoką wartość merytoryczną rozprawy. Praca nie wymaga w związku z tym zmian ani uzupełnień.**




## 5. Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy ciekawego i aktualnego zagadnienia badawczego. Stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o znaczeniu praktycznym, z udokumentowanym aspektem nowości.

Mając na uwadze kompleksową ocenę zawartości rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Barana pt. „Temperatura panelu oświetleniowego ze źródłami LED i jej wpływ na wybrane parametry świetlne” stwierdzam, że praca z spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Uważam, że Doktorant wykazał się samodzielnością oraz umiejętnością zaplanowania i rozwiązania postawionego problemu badawczego.

Opiniowaną rozprawę doktorską oceniam jako spełniającą wymagania określone w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (t.j. Dz. U. 2017 r., poz. 1789 ze zm.) w odniesieniu do dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika, której zakres obejmuje dotychczasową dyscyplinę elektrotechnika, określoną w rozporządzeniu MNiSW z 2011 roku, na podstawie którego został wszczęty przewód. Wnioskuje o przyjęcie i dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Po zapoznaniu się z zawartością rozprawy doktorskiej oraz zasadami wyróżniania rozpraw doktorskich przez Radę Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie, składam wniosek o jej wyróżnienie.

  
.....  
dr hab. inż. Piotr Tomczuk, prof. PW