

*Prof. dr hab. inż. Jan Dorosz  
Politechnika Białostocka  
Wydział Elektryczny  
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok*

## RECENZJA

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Barana p.t.: „Temperatura panelu oświetleniowego ze źródłami LED i jej wpływ na wybrane parametry świetlne”**

Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Barana poświęcona jest problemom związanym z wpływem temperatury panelu oświetleniowego zbudowanego ze źródeł LED na jego parametry świetlne. Licząca 147 stron, edytorsko staranna praca jest napisana jasno i podzielona na 12 logicznie następujących po sobie rozdziałów. Zawiera ona, poprzedzoną zestawieniem stosowanych oznaczeń, analizę stanu wiedzy (rozdziały 2-4) oraz badania własne (rozdziały 5-12). Taki układ pracy jest poprawny - pozwala na jednoznaczną ocenę własnych osiągnięć jej Autora.

Temat pracy jest jak najbardziej aktualny. Parametry produkowanych diod elektroluminescencyjnych sprawiły, że są one coraz częściej stosowane w układach oświetleniowych wypierając tradycyjne żarówki (ponad 60% w 2020 roku), w sprzęcie powszechnego użytku, jako źródła promieniowania w urządzeniach diagnostycznych i pomiarowych w medycynie, w optoelektrycznych czujnikach wielkości nieelektrycznych, w telekomunikacji optycznej, czy też jako elementy wzmacniaczy i laserów włóknowych (pompy optyczne). Parametry diod elektroluminescencyjnych zależą od technologii użytych do ich wytwarzania, a także warunków ich eksploatacji. Źródła LED, mimo stałego i dynamicznego rozwoju technologicznego w zakresie osiągnięcia coraz lepszych parametrów energetyczno-fotometrycznych, posiadają również pewne ograniczenia - w tym związane głównie z temperaturą złącza półprzewodnikowego. Struktura fizyczna oraz geometria warstw materiału LED powodują wewnętrzne odbicia oraz załamania promieniowania optycznego, co skutkuje tym, że tylko część energii zostaje wypromieniowana na zewnątrz. Pozostała część jest tracona w postaci ciepła w materiale półprzewodnikowym. Coraz wyższe moce źródeł LED przy stosunkowo małej powierzchni złącza powodują występowanie dużych gęstości cieplnych a więc i problemów z odprowadzaniem ciepła do otoczenia konsekwencją czego jest wzrost temperatury złącza. Ciepło w złączu diody musi być w sposób szybki i efektywny odprowadzone do otoczenia. W przeciwnym wypadku temperatura złącza wzrasta, powodując spadek wydajności rekombinacji elektronów w warstwie aktywnej i obniżenie wewnętrznej wydajności kwantowej - w konsekwencji spadek wartości emitowanego strumienia świetlnego, zmianę długości fali emitowanego promieniowania, jak również ograniczenie żywotności źródła LED. W skrajnym przypadku, przekroczenie dopuszczalnej temperatury złącza prowadzi do zniszczenia tego źródła.

Z tego względu, zagadnienie stabilizacji temperatury złącza zapewniające stałość parametrów świetlnych oraz dłuższą żywotność, jest jednym z kluczowych elementów projektowania źródeł LED i opraw oświetleniowych z budowanych z ich użyciem. W tym ostatnim

przypadku, oprócz zjawiska nagrzewania złącza półprzewodnikowego związanego bezpośrednio z mocą cieplną pojedynczej diody w panelu, konieczne jest uwzględnienie wzajemnych termicznych sprzężeń pomiędzy tworzącymi oprawę wieloma źródłami LED zainstalowanymi na wspólnym radiatorze oraz warunków środowiskowych, które w zależności od rodzaju zastosowanej oprawy i pogody mogą się zmieniać w bardzo szerokich granicach. Znane metody modelowania termicznego źródeł LED opisują stosunkowo proste konfiguracje zawierające jedno lub najwyżej kilka tego typu źródeł umieszczonych we wspólnej obudowie. Brak dokładnych danych odnośnie budowy źródeł sprawia, że do obliczeń jest przyjmowana ogólnikowo opisywana w literaturze budowa, nie odzwierciedlająca dokładnie struktury źródła. W przypadku paneli czy opraw oświetleniowych, do wiarygodnej analizy termicznej uwzględniającej wszystkie czynniki wpływające na wartość temperatury półprzewodnikowego złącza jest to niewystarczające. Tu niezbędny jest model termiczny uwzględniający konfigurację konstrukcji i wszystkie mechanizmy transportu ciepła.

Biorąc pod uwagę wyżej wymienione problemy, podjętą w rozprawie tematykę badawczą związaną z analizą czynników kształtujących temperaturę źródeł i modelowaniem termicznym paneli LED należy uznać za celową (a nawet konieczną). Uważam, że zagadnienia naukowe będące przedmiotem tej pracy są aktualne zarówno z naukowego a może nawet więcej, z praktycznego punktu widzenia.

Przedmiotem rozprawy jest rozwiązanie oryginalnego zagadnienia naukowego, polegającego na:

1. Opracowaniu modelu termicznego uwzględniającego: budowę źródeł LED, wzajemne sprzężenia termiczne pomiędzy nimi, budowę obwodu drukowanego oraz układu odprowadzania ciepła.

2. Analizie termicznej uwzględniającej wszystkie aspekty związane z przepływem ciepła na drodze złącze-obwód drukowany-radiator-otoczenie. Wyznaczenie temperatury złącza źródeł światła tworzących panel celem określenia jej wpływu na wybrane parametry świetlne - strumień świetlny, temperaturę barwową, wskaźnik oddawania barw.

3. Badaniu wpływu temperatury na parametry świetlne pojedynczego źródła oraz panelu złożonego ze źródeł LED.

4. Doświadczalnej weryfikacji wyników analizy.

5. Praktycznym wykorzystaniu wyników badań - zastosowanie opracowanego modelu do budowy oprawy oświetleniowej.

W pierwszej części recenzowanej pracy mgr inż. Krzysztof Baran w wyczerpujący sposób scharakteryzował diody elektroluminescencyjne (rozdział 2), omówił podstawy fizyczne działania tych diod, ich zalety, rodzaje i obszary zastosowań. W szczególności, wskazał na wpływ temperatury złącza  $p-n$  na strumień świetlny, temperaturę barwową oraz wskaźnik oddawania barw, co ściśle wiąże się z tematem rozprawy.

W podobny sposób, w rozdziale 3 Autor omówił zagadnienia związane z chłodzeniem półprzewodnikowych źródeł światła. W szczególności przedstawił: mechanizmy przepływu ciepła, układy chłodzenia źródeł LED oraz znane rozwiązania konstrukcyjne opraw oświetlenia drogowego.

Rozdział 4 poświęcił Autor znanym metodom modelowania termicznego i obliczeń cieplnych układów elektronicznych, wykazując ich niedoskonałości i wady. Analiza według tych modeli

uwzględnia tylko podstawowe mechanizmy wymiany ciepła i ogranicza się do przybliżonej oceny warunków temperaturowych w nieskomplikowanych układach o prostej geometrii.

Powyższe jest wynikiem wnikliwej analizy aktualnego stanu wiedzy przeprowadzonej w oparciu o obszerną literaturę, obejmującą 129 pozycji (w tym 9, to współautorskie publikacje Autora), głównie najnowszej literatury światowej, co pozwala twierdzić, że Autor dysponuje głęboką wiedzą przedmiotu.

Na podstawie tej analizy mgr inż. Krzysztof Baran (w rozdziale 5) sformułował tezę:

*„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”*,

oraz cel pracy:

*„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”*.

Autor pracy w celu zdefiniowania wiarygodnego modelu termicznego źródeł LED przeprowadził badania związane z wyznaczeniem rzeczywistej wewnętrznej rezystancji termicznej badanych źródeł światła (rozdział 6). Wyznaczona wartość była podstawą modelu termicznego, zaimplementowanego następnie w oprogramowaniu FloEFD 16.2 firmy Mentor Graphics. Pozwoliło to na przeprowadzenie szczegółowych obliczeń temperaturowych dla złożonej geometrii panelu i oprawy oświetleniowej. Autor szczegółowo przeanalizował i uzasadnił dlaczego do szczegółowych badań termicznych zastosował model temperaturowy, bazujący na wartości rezystancji termicznej pomiędzy złączem a obudową ( $R_{th_{j-c}}$ ). Słusznie - zastosowanie modelu termicznego źródła opartego na rzeczywistej wartości termicznej rezystancji pomiędzy złączem a obudową źródła LED oraz szczegółowe uwzględnienie czynników wpływających na rozkład temperatury panelu (podłoże, układ radiacyjny, warunki środowiskowe) umożliwiło wyznaczenie temperatury złącza poszczególnych źródeł światła.

W związku z powyższym, rozdział 7 został poświęcony szczegółowym badaniom tej rezystancji dla trzech różnych źródeł LED (Tabela 7.1) umieszczonych na sterowanym temperaturowo module Peltiera. Zastosowano tu metodę pomiarową wykorzystującą zależność zmiany napięcia przewodzenia diody w funkcji temperatury złącza. Przyjęcie w eksperymentach małej wartości prądu przewodzenia (5 mA) pozwoliło założyć, że temperatura złącza odpowiada zadanej temperaturze modułu Peltiera. Wyznaczono rezystancje termiczne  $R_{th_{j-c}}$  badanych źródeł światła (tabela 7.4) umożliwiające określenie temperatury złącza  $p-n$  ( $T_j$ ). Autor szczegółowo wyjaśnił przyczyny rozbieżności pomiędzy uzyskanymi wynikami badań a danymi katalogowymi źródeł LED.

Na bazie już posiadanych wyników badań mgr inż. Krzysztof Baran przystąpił do analizy wieloźródłowego układu oświetleniowego – panelu LED (rozdział 8). W pierwszym etapie dokonał symulacyjnej analizy temperaturowej panelu z uwzględnieniem wszystkich czynników mogących mieć wpływ na temperaturę tej konstrukcji (sprężenia termiczne pomiędzy źródłami LED, konstrukcja radiatora, połączenia drukowane, środowisko). Badanie symulacyjne dało podstawę opracowania modelu termicznego panelu LED ograniczającego temperaturę złącza użytych źródeł światła i budowę prototypowego panelu pozwalającego na dokonanie doświadczalnej weryfikacji wyników symulacji. Z porównania wyników

rzeczywistych oraz symulacyjnych (Tabela 8.5) widać zgodność modelu termicznego ze zbudowanym prototypem (błąd względny poniżej 5%).

W rozdziale 9 Autor przedstawił wyniki badań wpływu temperatury na parametry świetlne źródeł LED. Wykonał pomiary parametrów świetlnych czterech typów źródeł LED dużej mocy (Tabela 9.1) pojedynczo zainstalowanych na powierzchni modułu Peltiera, dla zadanych temperatur tego modułu: 25°C, 45°C, 65°C, 85°C i prądach przewodzenia 350 mA, 700 mA i 1050 mA – wielkości te są zbliżone do najczęściej występujących w oświetleniowych konstrukcjach z użyciem źródeł LED. Autor dokonał konwersji temperatury modułu Peltiera na temperaturę złącza *p-n* z uwzględnieniem termicznej rezystancji podłoża oraz rezystancji termicznej pomiędzy złączem a obudową LED. Wyznaczono wartości: strumienia świetlnego  $\Phi$ , temperatury barwowej  $T_B$ , współczynnika oddawania barw  $Ra$  oraz sprawności optycznej badanych źródeł. Następnie scharakteryzował panel, który zbudował z wcześniej zbadanych źródeł LED (typ A- Tab. 9.1) dla temperatury otoczenia 0°C, 24°C i 50°C (Rozdział 10). Wyznaczone zostały: strumień świetlny, temperatura barwowa oraz współczynnik oddawania barw dla prądów przewodzenia 350 mA, 700 mA i 1050 mA dla temperatury otoczenia 24°C, rozkład widmowy oraz moc promieniowania  $P_o$ . Deklarowana niepewność pomiaru wielkości fotometrycznych nie przekraczała wartości 4%, a w przypadku pomiarów radiometrycznych niepewność była mniejsza niż 3%. To osiągnięcia godne uznania.

Potwierdzeniem poprawności i podsumowaniem procesu badawczego jest opracowana na bazie wyników badań, przedstawiona w rozdziale 11 konstrukcja oprawy oświetlenia ulicznego, w której Autor zastosował dwa panele LED umieszczone w oprawie zapewniającej swobodny, wielokierunkowy przepływ powietrza pomiędzy powierzchnią radiatorów a otoczeniem celem efektywnego chłodzenia źródeł LED. Jest ona przedmiotem zastrzeżenia patentowego nr P.421711.

Postawione zadanie mgr inż. Krzysztof Baran rozwiązał w sposób oryginalny, wykazując tym samym bardzo dobre przygotowanie do samodzielnego rozwiązywania zagadnień zarówno teoretycznych, jak też związanych z praktyczną realizacją eksperymentu.

Potwierdził to poprzez działania mające na celu udowodnienie postawionej tezy - w szczególności:

- analizę metod termicznego modelowania źródeł LED i na tej podstawie wybór temperaturowego modelu wykorzystującego rzeczywistą wartość termicznej rezystancji pomiędzy złączem a obudową. Słusznie, ponieważ to ten parametr decyduje o temperaturze złącza i ilości ciepła wyprowadzonego poza to złącze.

- analizę termiczną układu wieloźródłowego (panelu) z uwzględnieniem termicznych sprzężeń pomiędzy poszczególnymi źródłami promieniowania (układy od 6x1 LED do 6x6 LED) umieszczonych na wspólnym radiatorze,

- termiczne modelowanie radiatora oraz jego wpływ na rozkład temperatury panelu (jego konstrukcja, materiał),

- termiczne modelowanie obwodów drukowanych,

- określenie wpływu środowiska zewnętrznego na rozkład temperatury panelu LED,

- opracowanie i budowę prototypowego panelu LED pozwalającego na praktyczną weryfikację zrealizowanych badań (błąd względny poniżej 5%).

- badania wpływu temperatury na parametry świetlne pojedynczego źródła a następnie panelu LED,

- projekt oprawy oświetlenia drogowego – zgłoszenie patentowe P 421711.

Do oryginalnych osiągnięć zaliczam tu:

1. Wyznaczenie rzeczywistej wewnętrznej rezystancji termicznej dla półprzewodnikowych źródeł światła.

2. Określenie czynników wpływających na temperaturę złącza oraz rozkład temperatury panelu LED.

3. Opracowanie modelu i wyznaczenie temperatury złącza termicznie sprzężonych ze sobą źródeł panelu LED.

4. Wyznaczenie wpływu temperatury złącza na wybrane parametry świetlne (strumień świetlny  $\Phi$ , temperatura barwowa  $T_B$ , współczynnik oddawania barw  $Ra$ ) dla wybranych źródeł dużej mocy.

5. Budowa prototypu oprawy oświetleniowej z efektywnym układem odprowadzania ciepła, ograniczającym wpływ temperatury na wybrane parametry świetlne - zgłoszenie patentowe „Oprawa oświetleniowa z półprzewodnikowymi źródłami światła”, P.421711 z 26 maja 2017 r.

W tym miejscu należy wskazać na wyjątkowo staranną i szczegółową realizację pomiarów, analizę uzyskanych wyników oraz ocenę niepewności pomiarów.

Wszystko to stanowi wartościowy dorobek Autora i czyni rozprawę znaczącą w zakresie badań, projektowania i wytwarzania półprzewodnikowych źródeł promieniowania optycznego. Wyróżnia się ona oryginalnymi walorami poznawczymi, użytkowymi i wdrożeniowymi, przez co będzie przydatną pracownikom naukowym jak również praktykom projektującym i stosującym źródła LED w różnych dziedzinach życia (także poza techniką świetlną).

Przyjęte w rozprawie założenia są uzasadnione, właściwy dobór metod badawczych i pomiarowych oraz wnioski wynikające z wykonanej pracy pozwalają stwierdzić, że postawione Autorowi zadanie zostało rozwiązane poprawnie, a cel rozprawy osiągnięty.

Uwagi wynikające z lektury rozprawy:

1. Autor powinien już na początku pracy podać jakie to „wybrane parametry świetlne” będą przedmiotem badań. Oczywiście, są one wybrane poprawnie i podane w pracy, lecz dla jasności powinny być wyspecyfikowane już we wstępie rozprawy.
2. W pracy (rozdz.6) przeprowadzono badania morfologiczno-fizyczne na podstawie których wyznaczono cechy fizyczne diod LED - grubości poszczególnych warstw oraz ich skład materiałowy. Czy znając cechy struktury i materiałów możliwe jest określenie rezystancji termicznej i czy uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w dalszych badaniach Autora np. do wyznaczenia sprawności elektronowej, efektywności konwersji ?

Powyższe uwagi podnoszę z racji obowiązku recenzenta, głównie dla rozważenia przez Doktoranta kierunków dalszych badań nad tematem podjętym w tej pracy. Nie wpływają na wartość recenzowanej rozprawy doktorskiej, którą oceniam bardzo wysoko.

Pan mgr inż. Krzysztof Baran samodzielnie rozwiązał trudny problem naukowo-badawczy, co wymagało zarówno wysokiego zasobu wiedzy teoretycznej jak też zawansowanych umiejętności eksperymentalnych. Na podkreślenie zasługuje też to, że Autor

rozwiązał postawione zadanie w sposób kompleksowy – od analizy stanu wiedzy poprzez własne badania i doświadczalną weryfikację ich wyników, kończąc na przykładzie praktycznego wykorzystania wyników badań - propozycji konstrukcji ulicznej oprawy oświetleniowej. Rozprawa jest wzorcowym przykładem realizacji zadania badawczego w wyższej uczelni technicznej. Godne uwagi jest też to, że Autor zdaje sobie sprawę, że uzyskane wyniki badań nie wyczerpują tematyki związanej z kształtowaniem temperatury w źródłach LED i widzi nowe możliwości badań nad odprowadzaniem ciepła z półprzewodnikowych źródeł światła z wykorzystaniem najnowszych osiągnięć inżynierii materiałowej, a podjętą w tej rozprawie tematykę chce kontynuować i rozwijać.

**Osiągnięcia poznawcze zaprezentowane w pracy mgr inż. Krzysztofa Barana pozwalają mi stwierdzić, że spełnia on wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Nadto, wnioskuję o jej wyróżnienie.**

Białystok, 24.07.2019 r.

