

Warszawa, 14.03.2018 r.

dr hab. inż. Piotr Pracki
Politechnika Warszawska
Wydział Elektryczny
Instytut Elektroenergetyki

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Łukasza Budzyńskiego

**pt. „Metoda kształtowania parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych
oprawy oświetleniowej ze źródłami LED”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest Uchwała nr 81/2017 Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej z dnia 20 grudnia 2017 r. i pismo Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej, Pana prof. nzw. dr. hab. inż. Mirosława Świercza, z dnia 21 grudnia 2017 r.

2. Tematyka, teza i cel rozprawy

Dynamiczny rozwój elektroluminescencyjnych źródeł światła w bieżącej dekadzie spowodował istotny wzrost ich wykorzystania w różnych aplikacjach oświetleniowych. Wynika to przede wszystkim z ich wysokiej skuteczności świetlnej i możliwości wytwarzania dużego strumienia świetlnego z pojedynczego elementu świecącego, dużej trwałości, przy dobrym utrzymaniu strumienia świetlnego w czasie oraz dobrej wierności oddawania barw oświetlanych obiektów. Bardzo atrakcyjnymi charakterystykami źródeł LED są także łatwość regulacji strumienia świetlnego i duża swoboda kształtowania temperatury barwowej światła. Tak wiele zalet powoduje, że oprawy oświetleniowe ze źródłami LED są już obecnie powszechnie wykorzystywane do oświetlenia wnętrz w budynkach, umożliwiając realizację wysokiej jakości otoczenia świetlnego, przy niskiej energochłonności rozwiązań.

Wprowadzanie nowej technologii do oświetlenia wnętrz wymusza poszukiwania efektywnych rozwiązań pod kątem zapewnienia wysokiej jakości oświetlenia. Ważnym elementem oświetlenia pomieszczenia jest oprawa oświetleniowa, która w dużym stopniu decyduje o potencjale rozwiązania oświetleniowego. Problematyka badania opraw oświetleniowych jest rozległa i dotyczy różnych zagadnień, m.in. świetlnych, elektrycznych, mechanicznych, eksploatacyjnych, estetycznych. Podejmowane badania w zakresie opraw oświetleniowych odnoszą się zwykle do wybranych zagadnień. Jednym z podstawowych zagadnień badawczych, pod kątem wykorzystania opraw do oświetlenia wnętrz, które podjęto w rozprawie, jest kształtowanie rozsyłu strumienia świetlnego opraw i temperatury barwowej światła. Podjęte w rozprawie zagadnienie naukowe jest jasno sformułowane. W odniesieniu

wpł. 16.03.2018

Pracki

19.03.2018 Łukasz Budzyński

do opraw LED tematyka pracy jest aktualna i ważna, zarówno od strony naukowej jak i aplikacyjnej, ze względu na poznawanie nowych możliwości kształtowania rozsyłu przestrzennego i widmowego strumienia świetlnego opraw, pod kątem ich wykorzystania do oświetlenia w różnych obszarach aplikacyjnych, w tym do oświetlenia wnętrz.

Celem pracy było „opracowanie metody modelowania rozkładu parametrów kolorymetrycznych i fotometrycznych na powierzchni oświetlanej, realizowanego przez oprawę oświetleniową o regulowanej temperaturze barwowej i wskaźniku oddawania barwy, wykorzystującej diody LED, poprzez pomiar właściwości spektrofotometrycznych powierzchni skalonym analizatorem barwy”.

Autor pracy formułuje jedną tezę: „Możliwe jest wytworzenie zamierzonego rozkładu przestrzennego strumienia świetlnego i uzyskanie zamierzonej temperatury barwowej oraz wskaźnika oddawania barwy na powierzchni odniesieniowej, poprzez modelowanie emisji światła z oprawy wykorzystującej półprzewodnikowe źródła LED i pomiar parametrów spektrofotometrycznych skalonym przetwornikiem barwy”.

Cel i teza pracy, choć bardzo rozbudowane ze względu na objaśniający charakter, są zrozumiałe i stanowią wymagające zadanie dla Autora rozprawy. Cel pracy został wyraźnie określony. Jasno sformułowano również sposób osiągnięcia założonego celu. Teza pracy została sformułowana poprawnie. Wyniki badań zawarte w rozprawie świadczą o tym, że teza została udowodniona a cel pracy osiągnięty.

3. Ogólna ocena rozprawy

Recenzowana praca zawiera 168 stron tekstu. Składa się z wstępu, wykazu oznaczeń, ośmiu rozdziałów numerowanych, spisu literatury i streszczenia pracy w języku angielskim. W treści pracy znajduje się 171 rysunków i 43 tabele. Wykaz literatury obejmuje 102 pozycje, w tym 26 w języku polskim, 60 w języku angielskim i 16 odwołań do kart katalogowych. W wykazie znajduje się 15 pozycji literaturowych (w tym zgłoszenie patentowe), których autorem lub współautorem jest Autor rozprawy.

W pierwszej części pracy, po jednostronicowym wstępie, który stanowi w znacznym stopniu streszczenie pracy, w rozdziale 1 dokonano przeglądu literatury w zakresie podjętej tematyki, będącego podstawą do sformułowania tezy i celu pracy w rozdziale 2 rozprawy. W rozdziale 2 zawarto także zestawienie poszczególnych etapów pracy, prowadzących do udowodnienia tezy i realizacji jej celu. Przegląd literatury jest obszerny, ukazuje najważniejsze kierunki prowadzonych badań w zakresie źródeł światła i opraw oświetleniowych LED, możliwości ich sterowania i konstrukcji. W przeglądzie literatury, w mniejszym zakresie przedstawiono konstrukcje opraw i rozwiązania oświetleniowe do pomieszczeń, wykorzystujące sterowane systemy LED.

W drugiej części pracy, w rozdziale 3, przedstawiono wybrane zagadnienia z kolorymetrii, w większości wykorzystywane w dalszej części pracy. Kolejne etapy pracy służyły wytypowaniu, badaniu i selekcji diod elektroluminescencyjnych (rozdział 4) i skalonych czujników barwy (rozdział 5) do modeli opraw. Badania charakterystyk elektrycznych, fotometrycznych i kolorymetrycznych źródeł LED i skalonych czujników barwy wymagały

wykonania dużej pracy, związanej z opracowaniem i skonstruowaniem stanowisk pomiarowych, a także z wykonaniem szeregu pomiarów. Należy podkreślić ten duży nakład pracy jak i poprawne, bardzo szczegółowe zrelacjonowanie wyników badań.

W trzeciej części pracy, w rozdziale 6, opisano algorytmy modelowania realizowanych parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych modeli opraw LED. W rozdziale 7 rozprawy opisano układy sterowania modułami oświetleniowymi LED i zaprezentowano wyniki badań weryfikacyjnych modeli opraw. W pracy przedstawiono modele opraw LED bazujące na trzech i czterech barwach składowych. Opracowane algorytmy uzyskiwania wypadkowego strumienia świetlnego układu, jako rezultat addytywnego mieszania strumieni świetlnych źródeł składowych, stanowią główny element metody kształtowania analizowanych parametrów oprawy oświetleniowej. Zostały zrelacjonowane w sposób analityczny i graficzny, i stanowią ważne osiągnięcie Autora rozprawy. Sprawdzenie poprawności działania modeli opraw LED wymagało zaprojektowania i wykonania układów sterowania modułami LED i zbadania modeli opraw. Badania weryfikacyjne modeli opraw wymagały opracowania i skonstruowania stanowiska pomiarowego i wykonania szeregu pomiarów dla różnych poziomów natężenia oświetlenia i temperatury barwowej światła dziennego na powierzchni odniesieniowej. Zadanie to zrealizowano dobrze.

Całość badań podsumowano w rozdziale 8, w którym zaprezentowano szereg wniosków wynikających z poszczególnych etapów jak i całej pracy. Autor formułuje m.in. wniosek, że „wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych dowiodły słuszności postawionej tezy”, co należy odczytać, jako uznanie, że teza pracy została udowodniona. Opracowane algorytmy sterowania modułami oświetleniowymi LED stanowią kluczowy element, zweryfikowanej w pracy, metody kształtowania parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych oprawy oświetleniowej, której opracowanie było celem pracy.

Podsumowując, ogólna ocena rozprawy jest pozytywna. Rozprawa doktorska stanowi osiągnięcie naukowe o charakterze technologicznym, projektowym i konstrukcyjnym.

4. Uwagi dyskusyjne i komentarze

4.1. Redakcyjne

Praca napisana jest starannie pod względem redakcyjnym i bogato ilustrowana. Autorowi nie udało się jednak uniknąć błędów stylistycznych i literówek. Uwagi recenzenta w tym zakresie zostały przekazane bezpośrednio Autorowi pracy. W recenzji zwrócono uwagę na następujące braki i usterki:

- W monografii brak jest streszczenia pracy w języku polskim i tytułu pracy w języku angielskim;
- Strona 14, rys. 1.7 – w schemacie blokowym powinno być „LED 2700 K” a nie „LED 3000 K”;
- Rozdział 3 – brak odniesień literaturowych do wielu równań podanych w tym rozdziale;

- Strona 29 – we wzorach 3.2 i 3.4 podano błędne czynniki normalizacyjne, w równaniach opisujących składowe tróchromatyczne X_{10° , Y_{10° , Z_{10° ;
- Strony 34, 35 i 36 – należało podać odwołania do prac McCamy’ego i Robertsona – pozycje [80] i [81] w spisie literatury – zamiast odwołań do pozycji [76][77] i [78];
- Strona 110 – błędne odwołanie do rysunku 4.56, który nie występuje w pracy;
- Strona 113 – błędne odwołanie w tekście do zależności 5.9 (powinno być 3.12), 5.13 (powinno być 5.12) i 5.14 (powinno być 5.13);
- Strona 125 – wartość współczynnika kierunkowego w równaniu 6.6 powinna być dodatnia;
- Strona 127 – w zdaniu przed równaniem 6.18 zapowiadano obliczenie modułów barw czerwonej i zielonej, podając mylnie symbol h_B dla barwy czerwonej;
- Podrozdział 6.3 – pomyłki w zaokrągleniu wartości h_F na stronie 135 i h'_{W-FRG} na stronie 136;
- Strona 146, tabela 7.1 – błędna wartość natężenia oświetlenia dla bazowego natężenia oświetlenia 150 lx i temperatury barwowej światła dziennego 6443 K;
- W streszczeniu angielskim pracy zwrócono uwagę na niepoprawne użycie niektórych słów: „strumień świetlny” – powinno być „luminous flux”; „natężenie oświetlenia” – powinno być „illuminance”; „współrzędne tróchromatyczne” – powinno być „chromaticity coordinates”; „krzywa barw widmowych” – powinno być „spectrum locus”; „punkt odpowiadający barwie achromatycznej” – powinno być „equal energy point”.

4.2. Merytoryczne

W pracy analizowano możliwość realizacji oświetlenia powierzchni odniesieniowej oprawą oświetleniową, m.in. pod kątem uzyskania wysokiej wartości ogólnego wskaźnika oddawania barw R_a , co wynikało z wymagań dotyczących oświetlenia wnętrz przeznaczonych do stałego pobytu ludzi. Uzyskane wyniki przekonują, że zrealizowano i zweryfikowano model oprawy LED, realizujący założenia przyjęte w pracy.

Według recenzenta, w pracy zabrakło podania charakterystyk fotometrycznych modeli opracowanych opraw, które umożliwiłyby pełniejszą ich ocenę pod kątem realizowania funkcji przekształcenia przestrzennego strumienia świetlnego źródeł i wykorzystania do oświetlenia wnętrz. Szkoda, że w pracy nie zaprezentowano bryły fotometrycznej oprawy i wynikających z niej charakterystyk, takich jak kod strumieniowy oprawy (w tym sprawność i klasa oprawy), luminancje oprawy dla wybranych kierunków przestrzennych i tabela UGR.

W pracy zaprezentowano wyniki i analizy dotyczące sumarycznego a nie przestrzennego strumienia świetlnego i temperatury barwowej najbliższej światła modeli opraw. Według recenzenta, w pracy zabrakło wyników, lub choćby komentarzy, dotyczących uzyskiwanych rozkładów analizowanych parametrów przez modele opraw. W przypadku strumienia świetlnego można było przedstawić bryły fotometryczne modeli opraw lub zaprezentować przykładowe wyniki (pomiarów lub obliczeń) rozkładu natężenia oświetlenia na płaszczyźnie odniesieniowej pod każdym modelem oprawy.

Proszę o odpowiedź na pytanie, w jakim stopniu opracowane modele opraw z źródłami LED, przedstawione i zweryfikowane w pracy, wymagają udoskonalenia, pod kątem wykorzystania do oświetlenia wnętrz? W jakim zakresie przewidywane jest ich wykorzystanie do oświetlenia wnętrz (rodzaj oświetlenia, typy pomieszczeń i realizowane poziomy natężenia oświetlenia)?

Wykorzystanie opraw oświetleniowych do oświetlenia wnętrz, w praktyce zawsze wiąże się z sytuacjami, w których konieczne jest pełne wykorzystanie ich potencjału (przy braku światła dziennego). Szkoda, że w rozdziale 7 pracy nie zaprezentowano realizowanych poziomów natężenia oświetlenia na powierzchni odniesieniowej dla analizowanych temperatur barwowych, przy zerowym bazowym natężeniu oświetlenia (brak światła dziennego).

Proszę o odpowiedź na pytanie, jakie poziomy strumienia świetlnego, mocy i skuteczności świetlnej modelu oprawy z modulem RGBW uzyskuje się bez udziału światła dziennego, dla analizowanych temperatur barwowych światła? Jaki jest stopień wykorzystania mocy tego modelu oprawy, w stosunku do mocy wynikającej z zsumowania mocy nominalnych poszczególnych źródeł składowych, przy jego pracy bez udziału światła dziennego?

Szkoda, że w pracy odstępiono od badania układów LED dla większej liczby źródeł składowych barwnych. Jakie były przyczyny podjęcia takiej decyzji i w jakim stopniu ogranicza to uniwersalność opracowanej przez Autora metody?

Wiadomo (np. Raport Techniczny CIE 224:2017 CIE 2017 Colour Fidelity Index for accurate scientific use), że ogólny wskaźnik oddawania barw R_a , nie jest wystarczającą miarą do oceny wierności oddawania barw systemów LED. Czy Autor rozprawy oceniał wierność oddawania barw realizowaną przez model opracowanej oprawy z modulem RGBW na podstawie innych kryteriów, a zwłaszcza przyjętego już powszechnie do oceny wskaźnika R_f ?

Przedstawione uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i nie mają wpływu na moją pozytywną ocenę rozprawy.

5. Podsumowanie

W recenzowanej rozprawie doktorskiej przedstawiono oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, o czym świadczy:

- dobór i wykorzystanie metod do analizy źródeł LED i scalonych czujników barwy;
- przeprowadzenie analizy parametrów elektrycznych, fotometrycznych i kolorymetrycznych źródeł LED i scalonych czujników barwy;
- przeprowadzenie analizy addytywnego mieszania strumieni świetlnych trzech i czterech źródeł składowych;
- dobór i wykorzystanie metod do badań weryfikacyjnych modeli opraw z źródłami LED.

Za dorobek naukowy Autora należy uznać:

- opracowanie algorytmów sterowania modułami oświetleniowymi LED;
- opracowanie i wykonanie modeli opraw z źródłami LED, w tym układów sterowania modułami oświetleniowymi LED;
- opracowanie i realizację stanowisk pomiarowych do wyznaczania elektrycznych, fotometrycznych i kolorymetrycznych charakterystyk źródeł LED i scalonych czujników barwy;
- opracowanie i realizację stanowiska pomiarowego do badania modeli opraw oświetleniowych z źródłami LED.

Wyniki uzyskane przez Doktoranta mają duże znaczenie dla nauk technicznych w zakresie wykorzystania opracowanej metody kształtowania parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych systemów LED, pod kątem optymalizowania jakości oświetlenia w różnych obszarach aplikacyjnych.

Sposób przygotowania rozprawy, opis metod, badań i wyników, wykonanie stanowisk pomiarowych i modeli opraw, prowadzone analizy i wnioskowanie świadczą o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta.

Usystematyzowany sposób prowadzenia rozważań w pracy, sposób interpretacji zjawisk i zachodzących współzależności, a także zakres podjętych badań świadczą o dużej wiedzy teoretycznej i praktycznej Doktoranta w zakresie Elektrotechniki, także Elektroniki, w tym Techniki Świetlnej.

6. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa mgr. inż. Łukasza Budzyńskiego, pt. „Metoda kształtowania parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych oprawy oświetleniowej ze źródłami LED”, spełnia wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim (Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. – Dz. U. z 2003 r. nr 65, poz. 595 ze zm.) i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

