



Wojskowa
Akademia
Techniczna

Instytut
Optoelektroniki 

dr hab. inż. Jacek Kwiatkowski, prof. WAT
Wojskowa Akademia Techniczna
Instytut Optoelektroniki

Warszawa, dn. 12.02.2018 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Łukasza BUDZYŃSKIEGO**

pt:

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

Rozprawa autorstwa mgr. inż. Łukasza BUDZYŃSKIEGO zrealizowana została na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej pod promotorską opieką dr. hab. inż. Macieja Zajkowskiego, prof. PB.

Bez wątpienia początek XXI wieku w technologii źródeł światła monochromatycznego oraz białego pokazał, że przyszłość należeć będzie do technologii półprzewodnikowej. Jak pokazały ostatnie lata, technologia LED przebojem wdarła się w nasze progi i jest obecnie wykorzystywana w wielu dziedzinach życia. Podstawowe zalety oświetlenia opartego na technologii LED takie jak długi okres eksploatacji dochodzący do kilkudziesięciu tysięcy godzin nieustannego świecenia oraz wysoka skuteczność świetlna rozpatrywana jako stosunek strumienia świetlnego do potrzebnej do jego uzyskania mocy, przekłada się bezpośrednio na mniejsze zapotrzebowanie na energię elektryczną, co w obecnych czasach dbania o środowisko naturalne jest parametrem bardzo pożądanym. Dodając do tego możliwość kształtowania parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych opraw oświetleniowych opartych na źródłach LED, istnieje możliwość opracowania sterowalnego lub samoadaptującego się do natężenia światła zewnętrznego uniwersalnego doświetlającego źródła światła w pomieszczeniach wewnętrznych. Opracowaniem tego typu źródła światła poświęcona jest prezentowana praca.

1. Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy (poziomu techniki) prezentowanego w literaturze światowej.

Mgr inż. Łukasz Budzyński w pierwszym rozdziale swojej pracy doktorskiej dokonał obszernego przeglądu literatury analizując problem regulacji temperatury barwowej oraz kształtowania parametrów kolorymetrycznych i fotometrycznych strumienia świetlnego emitowanego przez opracowane do tej pory oprawy oświetleniowe. Autor przedstawił rozwiązania różnych ośrodków naukowych zajmujących się tą tematyką. Analizując cytowane doniesienia można stwierdzić, że dotyczyły one prac prowadzonych od początku

15.02.2018 Łukasz Budzyński

XXI wieku, co wpisuje się w lata dynamicznego rozwoju technologii LED. Liczba przytoczonych prac [1-48] świadczy o dynamicznym rozwijaniu tej tematyki badań oraz zaangażowaniu wielu ośrodków naukowych na całym świecie. Należy ponadto zwrócić uwagę, że w głównej mierze były to rozwiązania prezentowane na różnych konferencjach naukowych, dzięki czemu były to doniesienia najbardziej aktualne w momencie swojej prezentacji. Mimo, że w niektórych przytaczanych pracach ich autorzy nie przedstawiali wad prezentowanych rozwiązań, Autor dysertacji pokusił się o zaprezentowanie swojego punktu widzenia na temat przedstawionych doniesień. Świadomy swojej wiedzy na temat prezentowanych zagadnień, odniósł się do niektórych z przedstawionych rozwiązań i wskazał jego zdaniem pewne wady i niedociągnięcia takich układów. Użył m.in. słów takich jak: „niemniej jednak można przyjąć, że z punktu widzenia poprawy jakości oświetlenia rozwiązanie to ma kilka wad. Przypuszczalnie pierwszą z nich jest niski ogólny wskaźnik oddawania barw (autorzy nie określili wartości tego parametru)” i podaje przyczyny takiego stanu rzeczy, na podstawie czego wyciąga takie wnioski (str. 20). Cytowania przeglądu literatury kończą się na pracach z roku 2016.

We wprowadzeniu brakuje mi jednak porównania metody opracowanej przez Autora rozprawy w stosunku do prac prowadzonych obecnie. Byłoby bardzo dobrze, gdyby Autor na wstępie wskazał, dlaczego podjął się badań prezentowanych przez siebie rozwiązań, czy oprawy oświetleniowe w postaci opracowanej przez Autora były już kiedyś przez innych uczonych prezentowane i czy metoda kształtowania parametrów oprawy oświetleniowej ze źródłami LED poprzez analizę parametrów spektrofotometrycznych scalonym przetwornikiem barwy była już wcześniej przez kogoś prezentowana i analizowana.

Po wprowadzeniu czytelnika w tematykę analizowanego problemu Autor dysertacji przedstawił tezę, cel oraz zakres swojej pracy.

2. Teza, cel i zakres pracy.

Podstawowym celem rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Budzyńskiego sformułowanym na str. 23 było opracowanie metody modelowania rozkładu parametrów kolorymetrycznych i fotometrycznych na powierzchni oświetlanej, realizowanej przez oprawę oświetleniową o regulowanej temperaturze barwowej i wskaźniku oddawania barwy, wykorzystującej diody LED, poprzez pomiar właściwości spektrofotometrycznych powierzchni scalonym analizatorem barwy.

Opracowane przez Autora rozwiązanie powinno:

- zapewnić regulację natężenia oświetlenia oraz luminancji oświetlanej powierzchni referencyjnej a następnie stabilizację tych parametrów w czasie eksploatacji (w cyklu dobowym),
- umożliwić płynną regulację temperatury barwowej najbliższej emitowanego strumienia świetlnego,
- pozwolić na automatyczne zmiany temperatury barwowej najbliższej emitowanego strumienia świetlnego wraz ze zmianą temperatury barwowej światła dziennego,
- zapewnić pomiar uzyskanych na powierzchni referencyjnej warunków oświetleniowych.

Autor postawił następującą 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 scalonym przetwornikiem barwy”

W kontekście przedstawionego na wstępie przeglądu literatury oraz celu i zakresu badań przedstawionych w rozprawie, teza ta sprawia wrażenie zbyt ogólnej i oczywistej. Prawdę mówiąc, większość przytaczanych prac z rozdziału pierwszego dotyczyła podobnego zagadnienia i było to realizowane z lepszym lub gorszym skutkiem. Uważam, że bardzo dużą zaletą opracowanej przez Autora oprawy oświetleniowej LED, która nie została uwypuklona w pracy jest pokazanie możliwości opracowania zaawansowanego układu sterowania taką oprawą z zastosowaniem taniego układu sterowania opartego na ośmiobitowym mikrokontrolerze AVR Atmega8 w przeciwieństwie do opracowań bazujących na 32-bitowych mikrokontrolerach [np. 36].

3. O pracy doktorskiej, charakter rozprawy.

Praca doktorska mgr. inż. Łukasza BUDZYŃSKIEGO ma charakter eksperymentalno – konstrukcyjny. Autor wykazał się obszerną wiedzą teoretyczną a także praktyczną niezbędną do projektowania i opracowania wielu stanowisk badawczo – pomiarowych. Umiejętnie potrafił wykorzystać skomputeryzowane metody gromadzenia oraz analizy dużej ilości danych pomiarowych. Na uwagę zasługuje fakt, że badania do pracy doktorskiej były bardzo czasochłonne, prowadzone były w różnych porach roku i o różnych godzinach.

Przedstawiona rozprawa składa się z 8 rozdziałów i dwóch dodatków w postaci spisu najważniejszych oznaczeń wykorzystywanych w pracy oraz spisu literatury. Rozprawa liczy 168 stron.

Autor po zaprezentowaniu w rozdziale 1 przeglądu literatury dotyczącej aktualnego stanu wiedzy z zakresu badań nad źródłami światła oraz oprawami oświetleniowymi z diodami LED przedstawił w rozdziale 2 tezę, cel i zakres pracy niezbędny do realizacji założonego celu. W zwięzły sposób prezentuje metodykę pracy z podziałem na poszczególne etapy badawcze i w kolejnych rozdziałach pracy ściśle się podziału trzyma.

Rozdział 3 stanowi przypomnienie podstawowej wiedzy z zakresu kolorymetrii i układów kolorymetrycznych wprowadzonych przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową CIE. W rozdziale tym Autor wyjaśnił pojęcie temperatury barwowej, temperatury barwowej najbliższej oraz opisał metody służące do określenia wartości tych parametrów. Przybliżono także metodę wskaźników oddawania barw R_a , stosowaną do badania własności oddawania barw wszystkich źródeł światła achromatycznego.

W kolejnym rozdziale 4 przystępuje do opisu wyników badań eksperymentalnych. Autor przypomniał cel pracy i analizując wykres chromatyczności w układzie XYZ zaproponował trzy koncepcje modeli opraw oświetleniowych realizujących wymienione zadania. Do dalszej analizy zostały wybrane dwie z nich. W rozdziale tym przeprowadzono badania właściwości spektrometrycznych oraz fotometrycznych wyselekcjonowanych diod elektroluminescencyjnych. Na tej podstawie dokonano wyboru konkretnych modeli diod LED emitujących promieniowanie o barwie czerwonej, zielonej, niebieskiej oraz chłodnej białej pod kątem możliwości ich wykorzystania w projektowanym modelu oprawy oświetleniowej. Na pochwałę zasługuje fakt przeprowadzenia badań strumienia świetlnego wszystkich

15 diod LED (podrozdział 4.4) mimo, że we wcześniejszych badaniach współrzędnych trójkromatycznych (podrozdział 4.3) część z nich została odrzucona jako egzemplarze, które nie mogą być brane pod uwagę w dalszym etapie badań ze względu na swoje charakterystyki. W podsumowaniu tego rozdziału Autor przedstawił też, w których pracach własnych zostały opublikowane zagadnienia prezentowane z tego rozdziału. Było ich 5.

Autor w obszernym rozdziale 5 przeprowadził badania pięciu scalonych matrycowych czujników koloru. Analizie zostały poddane takie parametry jak: użyteczny zakres pracy detektora, liniowość charakterystyki sygnału wyjściowego oraz względna czułość widmowa detektora. Sprawdzone także odpowiedzi każdego z nich na oświetlenie promieniowania o znanych parametrach kolorymetrycznych. Autor na podstawie wyników pomiarów dokonał dogłębnej analizy przydatności poszczególnych egzemplarzy detektorów pod kątem ich zastosowania w analizowanej oprawie oświetleniowej.

W rozdziale 6 przedstawiono podstawy matematyczne opracowanych algorytmów addytywnego mieszania strumieni świetlnych emitowanych przez różne źródła LED. Pierwszy z nich dotyczył modelu oprawy LED z trzema barwnymi źródłami składowymi, drugi bazował na trzech źródłach barwnych oraz jednym achromatycznym. Opracowane algorytmy sterowania zaimplementowano w ośmiobitowym mikrokontrolerze AVR Atmega8, który został użyty do kontroli opracowanych modeli opraw oświetleniowych ze źródłami LED.

Wyniki badań opracowanych opraw oświetleniowych wykonanych na bazie wyselekcjonowanych w poprzednich rozdziałach elementów zostały przedstawione w rozdziale 7. Badaniu poddano fizycznie wykonane wg założeń Autora moduły opraw oświetleniowych LED bazujących na trzech oraz czterech barwach składowych. Zbadano jakość stabilizacji natężenia oświetlenia powierzchni roboczej w zależności od temperatury barwowej światła dziennego oraz wartości bazowego natężenia oświetlenia wywołanego promieniowaniem dziennym. Sprawdzone także regulację temperatury barwowej najbliższej emitowanego przez moduły LED strumienia świetlnego w zależności od temperatury barwowej światła dziennego. Stwierdzono, że oba zaproponowane przez Autora rozwiązania w zadowalającym stopniu realizują zakładane zadania.

Praca zakończona jest wnioskami końcowymi.

4. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł. Sposób sformułowania wniosków z analizy.

Załączony wykaz cytowanej literatury obejmuje 102 pozycje (16 z nich stanowią odsyłacze do kart katalogowych elementów elektronicznych, które były wykorzystywane w pracy). Autor rozprawy jest współautorem 14 pozycji (pozycje literaturowe [65-78], 7 – artykułów w Proc. SPIE, 5 – w Przeglądzie Elektrotechnicznym, 1 artykuł w czasopiśmie Pomiary, Automatyka, Kontrola, 1 artykuł w czasopiśmie Challenges of Modern Technology (lista B)) oraz 1 zgłoszenia patentowego [79]. W 9-ciu z nich jest pierwszym autorem, z czego w dwóch pozycjach jest samodzielnym autorem. Należy stwierdzić, że zdecydowana większość publikacji Autora dotyczy ściśle zakresu tematycznego rozprawy i obejmuje ostatnie lata działalności naukowej (2015 – 2017). Można się pokusić o stwierdzenie, że w spisie publikacji Autor rozprawy zaprezentował swój cały dotychczasowy dorobek naukowy (w bazie Scopus widnieje 12 pozycji, w bazie Web of Science – 8 pozycji).

Analizę stanu wiedzy Autor zawarł w rozdziale 1. Analizę cytowanych źródeł należy uznać za przeprowadzoną w sposób prawidłowy i świadczy ona o biegłości oraz kompetencjach Doktoranta w tematyce prezentowanej w rozprawie. Jej znajomość pozwoliła

mu na trafne sformułowanie celu rozprawy oraz zaproponowania odpowiedniej metodyki pracy. Cytowana bibliografia jest reprezentatywna dla rozważanego zakresu pracy.

Autor demonstruje solidne przygotowanie ogólne i szeroką wiedzę teoretyczną z zakresu matematyki, miernictwa oraz obróbki i analizy sygnałów elektrycznych. Wykazał się ponadto praktyczną wiedzą w takich dziedzinach jak elektronika cyfrowa czy programowanie mikrokontrolerów.

5. Rozwiązanie postawionego zadania, właściwość przyjętych metod i założeń.

Sformułowany do rozwiązania w rozprawie cel został zrealizowany z zachowaniem metod stosowanych podczas realizacji pracy naukowej. Przyjęte do realizacji pracy zadania badawcze Doktorant konsekwentnie realizował od rozdziału 4 i materiał ten stanowi zdecydowaną większość pracy obejmując około 70% jej zawartości. Autor rzetelnie przeprowadził i udokumentował badania naukowe na każdym etapie swojej pracy wyciągając na koniec każdego z nich stosowne wnioski, co do dalszego wyboru elementów składowych opracowywanej oprawy oświetleniowej i dalszej procedury badawczej. Jednocześnie eliminował z dalszego etapu badań te elementy, które wg jego zdania nie spełniały zakładanych wymogów i nie nadawały się do dalszych prac. Autor dokładnie opisał stanowiska pomiarowe, wszystkie etapy selekcji oraz badań diod elektroluminescencyjnych oraz scalonych przetworników barwy z uwzględnieniem procedur kalibracyjnych, działania wymaganych algorytmów oraz metod mieszania strumieni świetlnych w docelowej oprawie LED. Wyniki badań przedstawione w ostatnim rozdziale 7 dotyczące opracowanych modeli opraw świetlnych w pełni potwierdzają, że na bazie wyselekcjonowanych źródeł LED, matrycowego detektora barw, z zastosowaniem odpowiednich elementów elektronicznych oraz wiedzy, istnieje możliwość opracowania modelu adaptacyjnej oprawy oświetleniowej mającej zastosowanie do doświetlania pomieszczeń, które wstępnie zostały oświetlone światłem dziennym. W związku z tym postawione na wstępie pracy zadanie badawcze zostało w pełni zrealizowane udowadniając postawioną tezę.

W trakcie pracy nad doktoratem bez wątpienia mgr inż. Łukasz Budzyński bardzo dobrze opanował warsztat doświadczalny badań i wiedzę w zakresie metod kształtowania parametrów fotometrycznych i kolorymetrycznych sterowalnych opraw oświetleniowych ze źródłami LED. Wykazał się przy tym dużą biegłością w procesie opracowania dokumentacji pracy naukowej. Pomijając błędy edycyjne, o których wspomnę nieco później, zaprezentowana rozprawa stanowi zwartą, zamkniętą całość w zakresie celu, sposobu analizy problemu i formułowanych w niej wniosków.

6. Oryginalność rozprawy, samodzielny dorobek autora.

Wśród oryginalnych wyników rozprawy należy wskazać przede wszystkim właściwy dobór elementów składowych, opracowanie, zbudowanie oraz przetestowanie w różnych warunkach dwóch opraw oświetleniowych ze źródłami LED zapewniającymi stabilizację natężenia oświetlenia oraz uzyskanie zamierzonej temperatury barwowej najbliższej na powierzchni referencyjnej. W rozprawie przedstawione są wyniki własnych prac teoretycznych i doświadczalnych autora dotyczące tej tematyki prowadzone w ciągu ostatnich kilku lat. Niektóre z tych prac zostały poddane weryfikacji przez publikacje w czasopiśmie naukowych oraz wystąpieniach konferencyjnych. Dodatkowym potwierdzeniem

oryginalności wyników przedstawionych w rozprawie jest zgłoszenie patentowe będące wynikiem realizacji pracy.

Moim zdaniem na oryginalność rozprawy oraz dorobek Autora składają się:

- opracowanie stanowisk pomiarowych do wyznaczania właściwości spektrofotometrycznych półprzewodnikowych źródeł promieniowania oraz scalonych czujników koloru,
- opracowanie algorytmów sterowania modułami oświetleniowymi LED bazującymi na trzech oraz czterech źródłach składowych,
- zweryfikowanie poprawności działania opracowanych algorytmów na rzeczywistych modelach opraw oświetleniowych.

7. Poprawność przedstawienia uzyskanych wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy).

Rozprawa doktorska odnośnie układu logicznego prezentowanych zagadnień, podziału na poszczególne rozdziały została zredagowana w sposób przejrzysty, napisana poprawnym językiem naukowym i technicznym z dbałością o układ graficzny. Wyniki badań eksperymentalnych prezentowane w pracy są zredagowane w sposób przejrzysty i zrozumiale zinterpretowane. Analiza danych pomiarowych często prezentowana jest zarówno w formie stabelaryzowanej jak i graficznej. Niestety strona redakcyjna rozprawy odnośnie prezentacji pozycji literaturowych, odnośników do cytowanych prac, sposobu zredagowania odnośników literaturowych oraz inne błędy wynikające głównie z pośpiechu redakcyjnego nieco burzą mój pozytywny odbiór pracy jako całości.

Poniżej wskazuję najistotniejsze moim zdaniem błędy, które znalazłem w pracy:

- a) (str. 161) sposób prezentacji literatury. W wielu przypadkach cytowane są materiały konferencyjne. W niektórych przypadkach cytowania prac ograniczają się do podania autorów, tytułu, nazwy konferencji oraz roku prezentacji. W wielu jednak przypadkach materiały te są publikowane w materiałach pokonferencyjnych i mają swój tom czy numerację stron. Ułatwiłoby to do dotarcia do tych materiałów,
- b) (str. 12, 15, 18) cytowanie ciągu wielu prac w oddzielnych przypisach zamiast prezentacji po myślniku jak to ma miejsce np. na str. 16 lub w postaci [xx-xx],
- c) zaburzona chronologia cytowania przypisów literaturowych. Str. 16 - cytowanie pracy nr [49] tuż po [34], str. 17 - cytowanie pracy nr [36] po [37], str. 26 - cytowanie pracy nr [57] po [48], następne cytowania prac [52], [56], [53], [58], [76], [77], potem na str. 36 powrót do pozycji [50]. Niestety jest tego nieco więcej,
- d) (str. 34) błędne odnośniki do pozycji literaturowych [76] oraz [77]. Wskazują inne pozycje literaturowe. Powinno być [80] i [81]. (str. 34) błędny odnośnik do pozycji [78]. (str. 46) błędny odnośnik do pozycji [82], [93],
- e) (str. 88) błędne odnośniki do rysunków 4.38 – 4.40. Powinno być 5.38 – 5.40. (str. 98) błędne odnośniki do rysunków 4.47 – 4.48. Powinno być 5.47 – 5.48, (str. 110) błędny odnośnik do rysunku 4.56. Powinien być do 5.55.
- f) (str. 111, 112, 115) błędne odnośniki do wzorów: 4.3, 4.5, 4.8, 4.11, 5.12, 5.17. Powinny być odpowiednio do wzorów: 5.3, 5.5, 5.8, 5.10, 5.11, 5.16, (str. 128) błędne odnośniki do wzorów: 5.20 – 5.22. Powinny być odpowiednio do wzorów: 6.20 – 6.22,
- g) brak w wykazie oznaczeń na str. 6 symboli zawartych na str. 29 odnośnie składowych tróchromatycznych CIE 1964,
- h) brak konsekwencji w wywodach:

- (str. 10) w opisie „przezroczysty pręt wykonany z PMMA”. Na rysunku 1.2 „światłowód PMMA”,
 - (str. 13) w opisie mamy odnośnik do pracy [16], a rysunki z tej pracy przedstawione są na rys. 1.6. Błędny odnośnik [14] przy rysunku 1.6,
 - (str. 36) błędnie zapisane symbole współrzędnych tróchromatycznych analizowanego źródła światła. Na końcu strony 36 widnieją jako u_x oraz v_x podczas gdy na odpowiadającym rysunku 3.10 mają symbol u_{cp} oraz v_{cp} . W literaturze [50] symbole te widnieją jako u_x oraz v_x . Na stronie 37 (na końcu) także wartości temperatury barwowej źródła o współrzędnych u_x oraz v_x ,
 - (str. 85) dane na rys. 5.31 nie odpowiadają danym zawartym w tabeli 5.3 dla diody Photo Red,
 - (str. 106) błędna interpretacja wyników pomiarów z tab. 5.10. Napięcie u_B (powinno być u_z) nie osiągnęło najwyższej wartości przy oświetleniu promieniowaniem o barwie niebieskiej. Wyższą wartość posiadało napięcie u_Y dla diody niebieskiej (Cree XP-C XPCBLU – Blue) i było ono wyższe o 0,19 V niż dla u_z .
- i) błędy językowe / literówki:
- (str. 15) „inne podejście to tematu”,
 - (str. 19) „strumień świetlny o różnych bazowała na trzech”,
 - (str. 21) „sprawia to, że widmie promieniowania”,
 - (str. 22) „barwa promieniowania nie będzie podbierana przez obserwatora jako biała”,
 - (str. 29) „wyznaczone prze pomnożenie”,
 - (str. 37) „źródła a współrzędnych”,
 - (str. 36) Autor pisze „na początku XXI wieku zaproponowano inne podejście do rozwiązania problemu określenia temperatury barwowej najbliższej”, a wskazuje na pozycje literaturową z roku 2014. Można by było polemizować, czy rzeczywiście rok 2014 należy do początku XXI wieku,
 - (str. 90, rys. 5.40b) „charakterystyka pod odjęciu”,
- j) (str. 131) na pierwszy rzut oka widać, że na rysunku 6.10 ze strony 132 proste przechodzące przez punkt F oraz krawędzie boków trójkąta RGB nie są do tych boków prostopadłe, a powinny być zgodnie z procedurą przedstawioną na stronie 131,
- k) nie znalazłem w tekście odnośników literaturowych do pozycji [55], [62], [63], [72-75], [82] zawartych w spisie literatury na stronie 161.

8. Słabe strony rozprawy, jej główne wady

Moim zdaniem Autor uniknął poważniejszych błędów merytorycznych. Trudno mi wskazać główne wady rozprawy doktorskiej. Niewątpliwie najsłabszą stroną tej pracy jest jej ostateczna postać redakcyjna zawierająca wiele błędów. Z pewnością udało się tego uniknąć wykorzystując niektóre funkcje pomocne w edycji tekstu takie jak automatyczne numerowanie odnośników, stosowanie odsyłaczy do odpowiednich pozycji w tekście, zawartych w wielu edytorach tekstu. Odnoszę wrażenie, że w trakcie wielokrotnych zmian w tekście, które bez wątpienia miały miejsce oraz samodzielnej numeracji wielu odnośników do pozycji literaturowych, wzorów czy rysunków, Autor niestety nie był w stanie zapanować nad tym procesem. Ponadto, po przeczytaniu rozprawy, zauważyłem w opisach kilka nieścisłości lub brak odpowiedniej interpretacji, co do przeprowadzonej analizy. Dodatkowy komentarz autora w tym miejscu byłby wskazany. Dla mnie interesujące byłoby wyjaśnienie w pracy kilku problemów:

- Dlaczego podczas analizy scalonych czujników barwy (str. 79) wykorzystywano mniejsze strumienie świetlne niż wynikało to z pomiarów strumienia świetlnego diod LED (str. 61)? Dla przykładu, maksymalny strumień świetlny diody Photo Red na rys. 5.21 wynosił 36 lm podczas gdy jego maksymalny strumień dla prądu 500 mA wynosił około 43 lm (rys. 4.49).
- (str. 109) Dlaczego wartości zmierzonych napięć wyjściowych z tab. 5.10 nie są przeniesione w prosty sposób do macierzy L? Wartości te są pomniejszone o stałą wartość dla każdego kanału ($R = 0,0502$, $G = 0,0497$, $B = 0,049$). Tabela 5.10 zawiera wartości już pomniejszone o wartość prądu ciemnego dla każdego kanału. Do macierzy T dane z tab. 5.10 są przeniesione w stosunku 1:1.
- (str. 132) Dlaczego linie proste wyznaczające granice nowego galutu barw są prostymi równoległymi oddalonymi o wartość $d_R = 0.05$ od pierwotnych boków trójkąta RGB? Z czego to wynika?

9. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych, przemysłu, obronności kraju itp.

Moim zdaniem uzyskane podczas realizacji pracy wyniki mogą stanowić wkład w rozwój źródeł światła opartych na diodach LED, poszerzają stan wiedzy w tym obszarze i potwierdzają przydatność rozprawy dla nauk technicznych. Opracowane przez Autora rozprawy moduły opraw oświetleniowych mogą być podstawą do opracowania bardziej zaawansowanych układów oraz lamp świetlnych, które mogą znaleźć zastosowania w doborze właściwego systemu doświetlającego stanowiska pracy dla ludzi.

Autor jest świadomy pewnych ułomności opracowanych konstrukcji i w dalszym ciągu planuje kontynuować prace nad konstrukcjami oraz algorytmami sterowania oprawami oświetlającymi bazującymi na wielu źródłach składowych emitujących promieniowanie barwne oraz achromatyczne. Mając na uwadze ciągły postęp w tej dziedzinie, należy mieć nadzieję, że w niedalekiej przyszłości zostaną opracowane nowe, lepsze detektory światła oraz źródła promieniowania LED, co pozwoli na opracowanie jeszcze lepszej konstrukcji oprawy świetlnej wolnej od wad występujących w obecnych rozwiązaniach. Autor tej rozprawy ma nadzieję włączyć się w ten kierunek badań.

10. Zaliczenie rozprawy do jednej z następujących kategorii:

- a. Nie spełnia wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
- b. Wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c. Spełniająca wymagania,
- d. Spełniająca wymagania z nadmiarem,
- e. Wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Podsumowując stwierdzam, że praca **Pana mgr. inż. Łukasza Budzyńskiego** w pełni spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych i stawiam wniosek o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Kwiatkowski

dr hab. inż. Jacek Kwiatkowski, prof. WAT