Dr hab. inż. Antoni Różowicz prof. PŚk
Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki
Politechnika Świętokrzyska

Kielce 11.08.2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Pawła Proroka
pt.: „Modelowanie parametrów spektrofotometrycznych oprawy SSL z wydzielonym luminoforem".

Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Pawła Proroka pt.: „Modelowanie parametrów spektrofotometrycznych oprawy SSL z wydzielonym luminoforem". Promotorem pracy jest prof. PB dr hab. inż. Maciej Zajkowski z Politechniki Białostockiej. Recenzja została wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Białostockiej.

Licząca 137 stron praca jest napisana jasno i podzielona na pięć rozdziałów. Zawiera ona, poprzedzoną wykazem najważniejszych pojęć i definicji, analizę stanu wiedzy (rozdział 1), badania własne (rozdziały 2-4) oraz podsumowanie i wnioski (rozdział 5). Taki układ pracy jest poprawny, pozwala na jednoznaczną ocenę własnych osiągnięć jej Autora.

Cel i zadania pracy

Największy wpływ na jakość oświetlenia mają same źródła światła. Rozwój technologii sprawia, że na rynku pojawiają się coraz wydajniejsze źródła światła, do takich niewątpliwie zalicza się diody elektroluminescencyjne. W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat rozwó technologiczny sprawił, iż zmieniły się one zarówno pod względem efektywności energetycznej, jak i jakości emitowanego światła. Parametry produkowanych diod elektroluminescencyjnych sprawiają, że są one coraz częściej stosowane w układach oświetleniowych, wypierając źródła temperaturowe oraz wyładowcze nisko lub wysokociśnieniowe w sprzęcie powszechnego użytku, jako źródła promieniowania w urządzeniach diagnostycznych i pomiarowych, w optoelektronicznych czujnikach wielkości nieelektrycznych itd.

Dynamiczny rozwój technologii wytwarzania źródeł LED w zakresie uzyskiwania coraz lepszych parametrów energetyczno-świetlnych, przynosi za sobą wiele pozytywnych efektów, które mają znaczący wpływ na różne obszary naszego życia. Rozwój technologii pozwala na produkcję diod o różnych barwach światła, w tym pełnej gamy kolorów RGB. Umożliwia to kreatywne zmiany oświetlenia w ciągu dnia zgodnie z dobowym rytmem, poprzez dynamiczną zmianę temperatury barwowej. Jak wykazują badania prowadzone w różnych

ośrodkach, taki sposób oświetlenia ma wpływa na komfort, wydajność oraz samopoczucie użytkowników. Najczęściej spotykanymi metodami dynamicznej zmiany temperatury barwowej (od ciepłej do zimnej) światła emitowanego z oprawy z diodami LED są:

- zastosowanie w oprawie diod emitujących światło białe o różnych temperaturach barwowych i regulację mocy każdej z nich,
- zastosowanie w oprawie diod, trzech podstawowych kolorów RGB i zmianę intensywności kolorów,
- zastosowanie wydzielonego luminoforu wprowadzonego w cykliczny ruch obrotowy.

Dwie pierwsze metody są stosowane w systemach oświetleniowych lamp wyładowczych i LED, natomiast obiecującym rozwiązaniem jest sprzężenie układu źródeł z wydzielonym luminoforem. Głównym wtórnym elementem aktywnym emisyjnie jest powierzchnia luminoforu. Regulacja widma wzbudzającego, pozwala wpływać na parametry kolorymetryczne luminoforu. Każda długość fali widma wymuszającego przekłada się na inne właściwości luminescencji. Luminofory, stosowane w źródłach LED, wzbudzane są przeważnie promieniowaniem niebieskim o długości fali 455 nm. Cechują się one różną strukturą oraz mogą być aktywowane różnymi pierwiastkami ziem rzadkich, głównie z grupy lantanowców, a więc mogą emitować promieniowanie niskoenergetyczne o różnych temperaturach barwowych. Mimo wielu innowacyjnych rozwiązań, żadne z dotychczasowych nie pozwoliło na uzyskanie wysokich parametrów jakościowych i ilościowych wynikowego strumienia świetlnego, przy zachowaniu stabilnego rozkładu przestrzennego widma wypromieniowanego. Ponadto wiele wątpliwości pozostawia fakt, dostępności regulowanych źródeł światła białego, o wysokiej gęstości mocy i szerokim zakresie regulacji temperatury barwowej *CCT*.

Biorąc pod uwagę wyżej wymienione problemy, podjętą w rozprawie tematykę badawczą związaną z modelowania rozkładu najbliższej CCT oprawy *SSL z* wydzielonym luminoforem, należy uznać za celową. Uważam, że zagadnienia naukowe będące przedmiotem tej pracy są aktualne zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia.

Przedmiotem pracy jest opracowanie metody modelowania parametrów sapektrofotometrycznych opraw SSL z wydzielonym luminoforem, polegającej na:

1. ocenie stanu istniejącej wiedzy na temat luminoforów stosowanych w źródłach światła,
2. ocena właściwości luminoforów,
3. opracowanie modułu zasilającego oprawę *SSL* oraz układu sterowania z wykorzystaniem mikrokontrolera,
4. przeprowadzenie badań laboratoryjnych prototypu oprawy źródła *SSL* z wydzielonym luminoforem według opracowanych algorytmów obliczeniowych i regulacyjnych

Omówienie treści pracy

W rozdziale pierwszym rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusz Paweł Prorok dokonał przeglądu stanu wiedzy w zakresie modulacji emisji światła białego półprzewodnikowych

źródeł LED sprzężonych z luminoforem bezpośrednio lub pośrednio. Luminofory stosowane w LED o barwie białej, wymuszane są z reguły wąskim widmem promieniowania elekromagnetycznego, najczęściej o długości fali 455 nm. Przeprowadzona przez Autora analiza wskazuje, że w przypadku bezpośredniego sprzężenia źródła wymuszającego z luminoforem, skuteczność świetlna układu zależy w znacznym stopniu od temperatury emitowanej przez chip LED. Natomiast w przypadku pośredniego sprzężenia LED z luminoforem, brak jest wpływu zmian temperatury od chipu LED na sprawność konwersji luminoforu. Jednak źródło wymuszające w tym układzie powinno charakteryzować się wąskim kątem emisji, gdyż cała moc promienista emitera, powinna być transmitowana na powierzchnię luminoforu. Źródłem wymuszającym w tym przypadku są z reguły diody laserowe. W przypadku ich stosowania, należy dodatkowo stosować konwerter o wąskim spektrum emisyjnym. Skuteczność świetlna takiego rozwiązania, jest z reguły niższa niż 80 lm/W. W dalsze części Doktorant przeprowadził wnikliwą analizę luminoforów stosowanych w źródłach półprzewodnikowych i możliwości formowania charakterystyk spektralnych poprzez domieszkowanie pierwiastkami ziem rzadkich, tzn. luminoforów domieszkowanych: kropkami kwantowymi, luminoforów aktywowanych głównie terbem, europem, cerem, manganem, oraz wpływu ich parametrów na wielkości spektrofotometryczne. Poprzez domieszkowanie, czyli wprowadzanie luminoforów z różnymi aktywatorami, możliwe jest osiągniecie przestrajalności statycznej, w której ustalony skład wewnętrzny luminoforu, w celu uzyskania określonego punktu chromatycznego *CIE* $F(x,y)$, nie może być ponownie modyfikowany. W konsekwencji, prefabrykowany luminofor zostanie ustalony na określone, stałe parametry wytwarzanego światła białego i temperatury barwowej *CCT*. Po scharakteryzowaniu właściwości luminoforów stosowanych w technologii LED, przeprowadził analizę możliwości zmiany temperatury barwowej światła emitowanego z tego rodzaju źródeł wskazując, że zmianę temperatury barwowej można dokonać poprzez:

- zmianę grubości luminoforu,
- skład podłoża luminoforu,
- wykorzystanie wydzielonego luminoforu wprowadzonego w ruch obrotowy,
- zastosowanie przestrajalnych filtrów ciekłokrystalicznych
- zastosowanie LED z przestrajalną barwą.

Większość z przedstawionych metod, zmiany temperatury barwowej emitowanego światła, dotyczy etapu produkcji źródeł. Jedynie metody zmiany temperatury barwowej przy wykorzystaniu wydzielonego luminoforu wprowadzonego w ruch obrotowy oraz zastosowanie LED z przestrajalną barwą, umożliwiają dynamiczną zmianę temperatury barwowej w czasie. W LED z przestrajalną barwą światło białe o dowolnej najbliższej temperaturze barwowej najczęściej jest wytwarzane przez dwustopniową prądową modulację impulsów zasilających spolaryzowane złącze *LED*. Najbardziej nowatorską metodą zmiany temperatury barwowej emitowanego światła, jest metoda z zastosowaniem luminoforów wydzielonych. Zastosowanie opraw LED SSL z wydzielonymi luminoforami pozwala miedzy innymi na optymalizowanie spektrum emisji, parametrów fotometrycznych itd. czyli

dostosowania do potrzeb rozwiązań oświetleniowych. Istnieje szereg wdrożonych rozwiązań, bazujących na wykorzystaniu wydzielonego luminoforu wprowadzonego w cykliczny ruch obrotowy. Przykładem jest konstrukcja *LumiWheel*™ opierająca swoje działanie na czasowym sekwencyjnym podziale światła, celem fotoobrazownia (z wykorzystaniem układów mikro luster) oraz projekcji filmowej. Wyniki analizy istniejących metod, skłoniły Autora do zaproponowania nowego rozwiązania konstrukcji oprawy *SSL* z wydzielonym luminoforem, które umożliwia zmianę temperatury barwowej w czasie. Dokonany przez Doktoranta przegląd literatury oraz przeprowadzona analiza stanu zagadnienia pozwoliły na sformułowanie tezy pracy:

Możliwe jest uzyskanie rozkładu widmowego promieniowania o regulowanej temperaturze barwowej CCT i wysokim wskaźniku oddawania barw, poprzez wykorzystanie półprzewodnikowego monochromatycznego źródła światła współpracującego z konfiguracją wydzielonych luminoforów.

W drugim rozdziale Doktorant przedstawił wyniki badań i analiz cech i właściwości luminoforów. Wykazał, że obecnie istnieją dwa rodzaje konstrukcji *LED*, różniące się długością fali dominującej źródła wymuszającego, co umożliwia modelowanie widma wyjściowego poprzez dobór luminoforu i aktywatora. Oznacza to, że nie wszystkie luminofory są kompatybilne z danym emiterem wymuszającym. Przykładem jest, położenie chromatyczne widma fotoluminescencji w zakresie barwy żółtej, nie jest możliwe do uzyskania przy zastosowaniu emitera nadfioletowego o długości fali 390 nm do 410 nm. To znaczy, że parametry jakościowe światła białego (CRI i CCT). Dlatego przy stosowaniu luminoforów jednoskładnikowych nie uzyska się widma o wysokich parametrach jakościowych. Uzyskanie dowolnej temperatury barwowej przy zachowaniu wysokiej sprawności konwersji, możliwe jest jedynie w przypadku stosowania mieszaniny luminoforów (RGB) z emiterem UV lub przy zastosowaniu wieloemiterowych źródeł. Autor oszacował wpływ temperatury złącza półprzewodnikowego na wybrane parametry świetlne, w tym: strumień świetlny, temperaturę barwową oraz wskaźnik oddawania barw. Wraz ze wzrostem temperatury luminoforu pasmo wzbronione zawęża się, powodując zmniejszenie poziomu energii przejścia promienistego fotonu, w efekcie następuje przesunięcie widma w kierunku „R" oraz zmniejszanie intensywności fotoluminescencji. Ograniczenie wpływu wysokiej temperatury na intensywność fotoluminescencji można dokonać poprzez; oddalenie luminoforu od emitera wzbudzającego, bądź zwiększenie pozorne powierzchni poprzez ruch obrotowy luminoforu. Natomiast uzyskanie odpowiedniego rozkładu spektralnego jest możliwe przy wymuszeniu transferu energii pomiędzy poszczególnymi składowymi luminoforu. Polega on na wzajemnej korelacji pomiędzy pasmem absorbcji i emisji kilku składników luminoforu tak, aby promieniowanie pochodzące z emisji było również wymuszeniem pozostałych składowych luminoforu. Istnieją rozwiązania bazujące na łączeniu kilku pośrednich transferów energii, np. luminofor o niskiej temperaturze barwowej dodatkowo domieszkuje się Eu, aby spowodować wzmocnienie w zakresie „R". Doktorant przeanalizował także wpływ czasu eksplantacji układu emiter wzbudzający - luminofor na

parametry świetlne. Wyniki badań wskazują, że wraz ze wzrostem czasu eksploatacji takiego układu zwiększają się straty termiczne, powoduje to zmniejszenie strumienia świetlnego oraz amplitudy rozkładu spektralnego fotoluminescencji. Należy uznać, że informacje zawarte w tym rozdziale porządkują i systematyzują wiedzę czytelnika.

W rozdziale trzecim Doktorant dokonał szczegółowej analizy spektralno-fotometryczną promieniowania po konwersji luminoforu (badany luminofor jest dopasowany do promieniowania ze źródła półprzewodnikowego *LED* o długości fali dominującej 455 nm) wymuszanego promieniowaniem:

- laserowym o długości fali 405 nm, 455nm lub 405 nm i 455 nm jednocześnie,
- diod LED o długości fali 405 nm, 455 nm 472 nm lub kombinacjami tych wielkości.

Źródło promieniowania laserowego emituje całą moc optyczną (o dużej gęstości) na jednej długości fali. W punkcie napromieniowania luminoforu wiązką laserową mogą powstać ekstremalne wzrosty temperatury, co prowadzi do powstania smug świetlnych. Dla zapewnienia lepszych warunków termicznych Doktorant opracował metodę wprowadzenia luminoforu w ruch obrotowy, celem zwiększania pozornej powierzchni czynnej.

Badania wykazały, że przy wzbudzeniu luminoforu laserem 405 nm występuje brak promieniowania pasma barwy zielonej, natomiast fotoluminescencja występuje dopiero dla zakresu długości fali od 590 nm do 720 nm. Luminofory o barwie ciepłobiałej nie wzbudzają się przy zastosowaniu niededykowanej przez producenta długości fali źródła. W przypadku luminoforów o barwach zimnobiałych, podbicie charakterystyki spektralnej w zakresie barwy czerwonej przy wymuszeniu 405 nm nie występuje. Dlatego takie rozwiązanie (z emiterem laser 405 nm) jest całkowicie nieprzydatne do realnego zastosowania w oświetleniu wnętrz z regulacja *CCT*. Natomiast wzbudzenie luminoforu promieniowaniem wiązką laserową 455 nm o idealne dopasowanej gęstości mocy powoduje emisję oczekiwanego widma. Modelowanie temperatury CCT oprawy SSL wymaga ciągłej regulacji mocy optycznej. W układzie gdzie luminofor jest wzbudzany laserem regulacja ciągła intensywności mocy optycznej nie jest możliwa z powodu konieczności zachowania prądu progowego akcji laserowej. Następnie Doktorant przeprowadził wieloaspektową analizę możliwości wykorzystania LED o różnych długościach promieniowania oraz uzyskiwanych w każdym przypadku parametrów spektrofotometrycznych. Luminofor (dopasowany do promieniowania LED o długości fali dominującej 455 nm) wzbudzano promieniowaniem o długości 472 nm. Przeprowadzone badania możliwości wzbudzenia luminoforu emiterami typu LED wykazały, że przy długościach fali wymuszającej większej od 520 nm nie występuje fotoluminescencja. Zmiana długości fali źródła w kierunku mniejszych energii fotonu, powoduje istotne zakłócenia formy rozkładów spektralnych luminoforu. Efektem tego jest znaczne odchylenie kolorymetryczne oraz zmiana CCT światła VIS. W przypadku zastosowania jako emitera LED o długości fali dominującej 405 nm badania wykazały także, że zmiana długości fali źródła w kierunku większych energii fotonu powoduje istotne zakłócenia formy rozkładów spektralnych luminoforu. Efektem tego są także znaczne odchylenie kolorymetryczne oraz zmiana CCT światła VIS. W kolejnym etapie Doktorant przeprowadził badanie możliwości

zastosowania hybrydowych emiterów wymuszających konwersje luminoforu oraz efektów spektrofotometrycznych światła VIS. Uzyskane przez Autora wyniki wskazują, że dodawanie do emitera podstawowego o długości fali 455 nm emiterów dodatkowych o długościach fali 405 nm i 472 nm skutkuje obniżeniem lub zwiększeniem CCT. Jednak praca układu z trzema emiterami (jednocześnie) jest niewskazana, z powodu przeciwstawnego działania na wynikowy strumień światła białego. Najbardziej efektywny sposób wyboru pracy emiterów to np.455 nm i 405 nm lub 455 nm i 472 nm z odpowiednim sterowaniem pracy podwójnych emiterów. Uzyskane wyniki badań wskazują, że przesunięcie położenia barwnego rozkładu temperaturowego *CCT* jest korzystne jedynie na krótkim określonym odcinku: (przy zastosowanych dwóch emiterach 455 nm i 472 nm) powodując zmiany około 500 K. Przeprowadzone przez Doktoranta badania wykazały, że szeroki zakres zmiany temperatury barwowej światła VIS możliwy jest jedynie stosując nowe konstrukcje opraw.

W rozdziale czwartym uzyskane przez Doktoranta wyniki badań i analiz (rozdział 2 i 3), zostały wykorzystane do opracowania i wykonania prototypu układu świetlno-optycznego z wykorzystaniem prowadnicy asymetrycznej sprzężonej z wydzielonym luminoforem z możliwością regulacji temperatury barwowej w zakresie 2700K do 5000 K. Układ składa się z trzech głównych elementów: emitera niebieskiego o długości fali 455 nm, prowadnicy (falowodu) oraz tarczy zamontowanej na osi silnika krokowego, z umieszczonymi na niej wydzielonymi luminoforami (cztery sekcje). Ruch obrotowy silnika krokowego jest synchronizowany ze źródłem sygnału emitera, dzięki temu możliwe jest pobudzanie wybranych obszarów poprzez regulację jedynie współczynnikiem wypełnienia *PWM*. Pełne wysterowanie pozwala na uzyskanie quasi-pośredniej temperatury barwowej *CCT*, na podstawie założenia względnych rozkładów spektralnych, naprzemiennej emisji następujących po sobie sekcji luminoforów. Przy częstotliwości powyżej zanikowej oka, następuje uśrednienie wartości temperatury barwowej *CCT*, odbieranej mimo braku jej spektralnego fizycznego zmieszania. Ruch obrotowy wirnika luminoforów, realizowany poprzez układ elektromechaniczny, ma za zadanie utrzymanie jedynie stałej prędkości kątowej. Natomiast realizacje modulacji promieniowania, poprzez cykliczną zmianę widma promieniowania światła białego, Doktorant wykonał poprzez układ sterowania na bazie 8-bitowego mikrokontrolera. Dzięki temu, sterowanie układem elektromechanicznym oraz źródłem wymuszającym jest ściśle powiązane z następowaniem po sobie odpowiednich sekcji luminoforów. Uzyskanie zadanego punktu chromatyczności jest wynikiem regulacji odpowiednich wartości zmieszanych składowych elementarnych strumieni świetlnych. Źródło promieniowania wzbudza wybrane sekcje luminoforów w zależności od stopnia wysterowania sygnałem *PWM*. Opracowany układ, umożliwia wybieranie obliczonych wcześniej nastaw wprowadzonych do pamięci, jako zbiór stałych. Autor opracował algorytmy pracy wirnika luminoforów sektorowych, do zmiany temperatury barwowej wraz z nastawami regulacyjnymi. Uzyskane wyniki pomiarów prototypu potwierdzają, że położenia punktów barwnych widm spektralnych, uzyskanych przez konwersję luminoforu, wymuszoną źródłem

półprzewodnikowym o dedykowanej długości fali, znajdują się w bliskim sąsiedztwie krzywej Plancka.

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

Uwagi wynikające z lektury rozprawy:

1. W pracy na stronie 57 wskazano, że „istnieją rozwiązania bazujące na łączeniu kilku pośrednich transferów energii w konfiguracji Ce – Tb – Eu" . Nasuwa się pytanie jaki jest to luminofor z takim transferem energii, proszę o komentarz.
2. W rozdziale 3 przeprowadzono analizę wpływu różnych długości promieniowania emiterów na rozkład widmowy promieniowania VIS. Mam pytanie czy przy promieniowaniu wymuszającym LD i LED o długości fali 405 nm, 455 nm, 472 nm badania prowadzono na tych samych luminoforach (dedykowane do jakiego wymuszenia).
3. W opracowanym modelu zastosowano (w czterech sekcjach, rozdz. 4) luminofory wzbudzane promieniowaniem niebieskim o długości fali 455 nm, emitujące światło o barwie 2700 K i 5000 K, proszę o podanie parametrów tych luminoforów.
4. W pracy są odwołania do luminoforów tzw fosforowych str. 6, 43, luminofory takie są materiałami polikrystalicznymi o różnej granulacji w których część kationów zastąpiona jest przez iluminujący jon czyli aktywator. Mam pytanie jak granulacja tych luminoforów wpływa na parametry konwersji.
5. Jak należy rozumieć akapit str. 54 „W celu znacznej poprawy parametrów jakościowych, szczególnie w zakresie barwy czerwonej, dodawany jest azotowy luminofor czerwony (*XR6436- to jest oznaczenie handlowe)*), którego zakres absorpcji jest szeroki i zaczyna się od 200 nm do nawet 610 nm. Ten składnik luminoforu bazuje prawdopodobnie na transferze energii pomiędzy pierwiastkami ziem rzadkich, takich jak: Ce, Tb, Eu.". Skąd takie przypuszczenie, proszę o wyjaśnienie.
6. Na str.78 podana jest wielkość strat sprzężenia wynosząca około 12%, skąd taka wartość.
7. W pracy w wielu miejscach używane jest określenie ciało doskonale czarne (str.8, 25, 28, 52, 55, 66, 101, 107, 109, 110, 113, natomiast także w wielu miejscach np. str. 109, 110, 111, 115 używane jest określenie ciało czarne, a na str. 106 jest jeszcze inne określenie ciało idealnie czarne. Proszę o definicje każdego z pojęć, oraz które określenie jest stosowane w technice świetlnej.
8. Na str. 16 jest „ dla mocy optycznej wymuszającej 405 nm" , Jak moc optyczna to chyba nie w nm.
9. Na str.17 jest określenie " charakteryzuje się wówczas dużo wyższym jakościowym wskaźnikiem oddawania barw *CRI"*. Proszę o wyjaśnienie co to jest wyższy jakościowy wskaźnik oddawania barw.

10. Na stronie 18 jest „W przypadku umieszczenia chipów *LED*-owych na wspólnej matrycy, temperatura złączy emiterów jest jednakowa i zależna od całkowitej mocy cieplnej oddawanej przez całą strukturę półprzewodnikową". Czy to stwierdzenie jest prawdziwe w każdym przypadku, proszę o komentarz.
11. W pracy występują stwierdzenia miedzy innymi na str.50 „Określono, że całkowity współczynnik absorpcji α_B jest sumą strat cieplnych oraz emisji promieniowania na innym zakresie fali niż źródło wymuszające. Czy wsp. absorbcji tylko od tego zależy, proszę o komentarz
12. W pracy wprowadza się określenia typu: str.54 - azotowy luminofor czerwony, str. 22, 17 luminofor cerowy - to są obiegowe nazwy handlowe a nie nazewnictwo naukowe.
13. Na stronie 56 na rys.3.7 jest „....wymuszanego promieniowaniem laserowym 445 nm" a czy nie powinno być „.. wymuszanego promieniowaniem laserowym 455 nm".
14. Podpisy pod rysunkami 3.12, 3.13 są „ Bezwzględna charakterystyka udziału emitera..." na rysunkach przedstawione są rozkłady widmowe przy ...
15. Na stronie 76 jest „ W związku z występowaniem pewnej pasożytniczej przewodności cieplnej, zwiększenie mocy wydzielanej przez emiter półprzewodnikowy zwiększa gradient temperatur pomiędzy punktem odniesienia, a fizyczną wewnętrzną w złączu źródła promieniowania (ΔT = 1°C/W)". czegoś tu brakuje.
16. Na str. 77 jest „W teorii zaobserwowano, że promieniowanie nie jest....". Jak można w teorii zaobserwować.
17. Pozostałe niewielkie uwagi dotyczące stosowanej terminologii i redakcji przekazano poza recenzją.

Ogólna ocena rozprawy

Oceniania rozprawa doktorska dotyczy ciekawego i aktualnego zagadnienia badawczego. Stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o znaczeniu praktycznym, z udokumentowanym aspektem nowości. Stwierdzam, że mimo pewnych usterek przedstawionych w uwagach krytycznych, przedstawiona do oceny rozprawa stanowi samodzielne rozwiązanie postawionych zadań przy użyciu właściwych do tego celu metod. Przedstawione w recenzji mało znaczące uwagi podnoszę z racji obowiązku recenzenta. Nie wpływają one na wartość recenzowanej rozprawy doktorskiej. Praca wnosi oryginalne przyczynki do zagadnień modelowania parametrów spektrofotometrycznych opraw SSL z wydzielonymi luminoforami, poprzez opracowanie nowych algorytmów sterowania wirnika z luminoforami sektorowymi dla określonej CCT.

Osiągnięcia poznawcze zaprezentowane w pracy mgr inż. Mateusza Pawła Proroka pozwalają na stwierdzenie, że spełnia ona wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznej w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.