

Poznań, 07.11.2022

dr hab. inż. Krzysztof Wandachowicz
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3a
60-965 Poznań

Recenzja rozprawy doktorskiej
Pani magister Justyny Kowalskiej
pt.

**Oddawanie barw przez źródła światła stosowane do ogólnych celów
oświetleniowych**

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja rozprawy doktorskiej została opracowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 21.06.2022 oraz umowy o dzieło zamówionej przez Pana prof. dr hab. inż. Lecha Grzesiaka, Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Na potrzeby sporządzenia recenzji dostarczono mi jeden egzemplarz rozprawy doktorskiej.

2. Tematyka, cel i zakres rozprawy

Opiniowana rozprawa Pani magister inżynier Justyny Kowalskiej pt. „Oddawanie barw przez źródła światła stosowane do ogólnych celów oświetleniowych” wydana w roku 2022 zawiera 184 strony, składa się z pięciu rozdziałów oraz spisu literatury. Literatura zawiera 134 pozycje, w tym 4 autorskie i 8 współautorskich publikacji doktorantki. Rozprawa dotyczy dyscypliny naukowej elektrotechnika, w jednej z jej specjalności jaką jest technika świetlna.

Problematyka rozprawy porusza istotne zagadnienia naukowe nurtujące środowisko techniki świetlnej. Oddawanie barw jest definiowane jako wpływ ocenianego źródła światła na wrażenie barwy przedmiotów porównywane z wrażeniem barwy tych samych przedmiotów oświetlonych iluminantem odniesienia. Obecnie używanym systemem oceny oddawania barw jest metoda wprowadzona w 1974 roku oraz opisana w publikacji CIE z 1995 roku nazwana wskaźnikiem oddawania barw Ra (ang. Colour rendering index – CRI).



Niedoskonałości obecnie stosowanego wskaźnika oddawania barw i gwałtowny rozwój rynku oświetleniowego w zakresie lamp z diodami świecącymi powoduje powstawanie nowych metryk, które umożliwiłyby ocenę jakości oddawania barwy przez badane źródło światła. Jedną z pierwszych przyjętych propozycji była metoda IES TM30-15 (obecnie w wersji z 2018 roku TM30-18), która zakłada wyznaczenie dwóch wskaźników: wierności barwy R_f (color fidelity) oraz zmiany nasycenia R_g (color gamut). W 2017 roku Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa przedstawiła raport techniczny, w którym proponuje dokonywanie oceny oddawania barw na podstawie wartości wskaźnika wierności barwy R_f . Metodologia obliczania tego wskaźnika bazuje, z pewnymi drobnymi zmianami, na metodzie TM30-15.

Autorka rozprawy, Pani magister inżynier Justyna Kowalska stwierdza, że metody te są niedoskonałe i określa, głównie na podstawie przeglądu literatury, swoje zastrzeżenia względem ich stosowania. W rozdziale drugim autorka formułuje cel i tezę pracy, w których deklaruje możliwość opracowania nowej metody oceny oddawania barw. Autorka proponuje aby w nowej metodzie uwzględnić wiek obserwatora oraz wielkość kątową pola obserwacji.

Temat, który podjęła autorka jest aktualny, ważny i ciekawy. Mam jednak wątpliwości czy Jej metoda jest na tyle uniwersalna aby choć w części została powszechnie przyjęta przez środowisko. Z nowymi metodami oceny oddawania barw jest tak, że mogą być lepsze od poprzednich ale niezbędny jest konsensus aby jedną z nich zaakceptować i przejść do stosowania. Minęło już kilka lat od wprowadzenia propozycji IES oraz CIE ale np. w najnowszej normie przedstawiającej wymagania dotyczące oświetlenia miejsc pracy (EN 12464-1:2021) nadal stosowana jest metoda wskaźnika oddawania barw R_a .

Przedstawiony zakres rozprawy obejmuje:

- wprowadzenie,
- opis metod oceny oddawania barw,
- opis obserwatorów kolorymetrycznych,
- opis autorskiej metody oceny oddawania barw wraz z analizą uzyskanych wyników,
- krótkie podsumowanie oraz obszerny spis literatury.

3. Omówienie treści rozprawy

Opiniowana rozprawa liczy pięć (a w zasadzie sześć rozdziałów, gdyż w numeracji kolejnych rozdziałów jest błąd polegający na tym, że numer 2 występuje dwa razy) rozdziałów oraz spis literatury.

W rozdziale pierwszym przedstawiono, krótkie wprowadzenie. Autorka stosuje terminy i stwierdzenia, z którymi można polemizować. Ponieważ niezręcznych sformułowań jest dosyć dużo to skupię się na, moim zdaniem, najważniejszych. Sformułowanie dotyczące tego, że „w przypadku lamp wyładowczych, możliwości w projektowaniu rozkładu widmowego są mocno ograniczone” nie wydaje mi się prawdziwe. Przecież w świetłówkach istnieje możliwość zastosowania różnych luminoforów. W trakcie rozwoju tych lamp stosowano powszechnie co najmniej trzy rodzaje luminoforów z przeznaczeniem do oświetlenia miejsc pracy uzyskując różne wartości wskaźnika oddawania barw i różne wartości temperatur barwowych. W lampach metalohalogenkowych stosuje się różne wypełnienie jarzników co prowadzi do uzyskania przebogatego zbioru rozkładów widmowych. Nawet w powszechnie uważanych za ubogie w mnogości rozkładów widmowych lampy sodowe mogą być projektowane jako takie, które posiadają dobre oddawanie barw (lampy o zwiększonym ciśnieniu par sodu do około stu tysięcy paskalów).

W rozdziale drugim opisano i omówiono trzy metody oceny oddawania barw: CIE Ra, TM30-18 oraz CIE Rf. Opisy wykonano rzetelnie i ten rozdział, po wprowadzeniu drobnych poprawek, może być wykorzystywany do upowszechniania wiedzy na przedmiotowy temat. W tym rozdziale również znalazłem kilka błędów dotyczących stosowanych przez autorkę terminów. Wskaźnik Ra nazywamy ogólnym a nie generalnym. Na stronie 2 przy okazji wyjaśniania sposobu obliczania wskaźnika Rf znajdują się zdania zawierające termin „różnice w postrzeganiu barwy”. Wydaje mi się, że są to po prostu różnice barwy. Zastosowane przez autorkę sformułowanie sugeruje obecność obserwatora z jego cechami związanymi z adaptacją itd. Oczywiście obserwator jest, ale jest to obserwator kolorymetryczny z danego układu kolorymetrycznego i za jego pomocą wyznaczana jest po prostu różnica barwy w danym układzie kolorymetrycznym.

Po rozdziale drugim następuje również rozdział drugi ale domyślam się, że przez nieuwagę nie zmieniono numeracji. W tym kolejnym rozdziale przedstawiona jest teza i cel pracy. Pani magister Justyna Kowalska twierdzi, że możliwe jest opracowanie metody oceny oddawania barw, która będzie uwzględniała wiek obserwatora oraz wielkość kątową pola obserwacji. Uważam, że teza i cel pracy są poprawnie sformułowane. Moją wątpliwość budzi

zastosowanie w tezie słowa „stosowanej”. Czy autorce chodziło o metodzie „stosowanej” do ogólnych celów oświeceniowych. Czy raczej powinno się napisać o źródłach światła „stosowanych” do ogólnych celów oświeceniowych. Wracając do kwestii merytorycznych to w tezie i celu pracy nie znalazła się informacja o zastosowaniu innego sposobu na obliczania wskaźnika wierności barwy, który wyznaczany jest nie jako średnia arytmetyczna ze szczególnych wskaźników uwzględniających wszystkie próbki barwne lecz jako średnia arytmetyczna z dwudziestu procent najlepszych wskaźników i jako średnia arytmetyczna z dwudziestu procent najgorszych wskaźników. To podejście diametralnie zmienia sposób oceny oddawania barw.

Kolejny rozdział o numerze trzy zawiera informacje na temat obserwatorów kolorymetrycznych. Znajduje tutaj kilka niezręcznych sformułowań. Zalecałbym stosowanie terminu „wielkość kąтова pola obserwacji” zamiast „kąt obserwacji”. Na stronie 44 autorka pisze o obserwatorze kolorymetrycznym dodatkowym normalnym (CIE1964) i przywołuje klasyczny artykuł Stiles'a i Burch'a, w którym autorzy zamiast długościami fal posługują się, raczej już nie stosowanymi w technice świetlnej, liczbami falowymi. Autorka nie wyjaśnia czego dotyczą prezentowane liczby a ich wartości i jednostki mogą wydawać się co najmniej dziwne dla mniej wprawionego czytelnika. Autorka zmierza do przedstawienia funkcji kolorymetrycznych dla obserwatorów w wieku 20, 50 i 80 lat i przy dwóch wielkościach kątowych pól obserwacji (rysunki 3.12 i 3.13). Jest to potrzebne autorce bowiem w następnym rozdziale będzie opisywała metodę oceny oddawania barw, która ma w założeniu uwzględnianie wieku obserwatora i wielkości kątowej pola obserwacji. Analiza badań w opisywanych w rozdziale trzecim nie jest łatwa. Mam wrażenie, że nie do końca udało się autorce wyjaśnić czytelnikowi metodologię badań zmierzających do wyznaczenia krzywych zamieszczonych na rysunkach 3.12 oraz 3.13. Bez sięgnięcia do publikacji autorów składających się na uzyskanie tego finalnego osiągnięcia raczej trudno zrozumieć treści zawarte we fragmentach tego rozdziału.

W czwartym rozdziale Pani magister Justyna Kowalska przedstawia swoją autorską metodę oceny oddawania barw. W pierwszym akapicie trafiam na informacje, że metoda bazuje na modelu CIE PO06. Jeżeli tak jest to model ten powinien być jednoznacznie i dokładnie opisany. W tekście pracy ani w załączonej do niej literaturze nie znajduję żadnej informacji o tym modelu. Najprawdopodobniej chodzi o model opracowany w ramach działalności komitetu technicznego CIE TC 1-36. Komitet ten opracował m.in. dwa raporty *CIE 170-1 Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 1: Definition of CIE 2006 Cone Fundamentals* oraz *CIE 170-2 Fundamental Chromaticity Diagram With Physiological Axes – Part 2: Spectral Luminous Efficiency Functions And*

Chromaticity Diagrams. W rozdziale trzecim autorka przytacza wyniki prac tego komitetu. (Dopiero po dotarciu na stronę nr 95 znajduję informację, że model CIEPO06 opisany jest w literaturze o numerze 92).

Doktorantka informuje, że w jej metodzie będzie można dokonać oceny oddawania barw na własnym zestawie próbek barwnych. Nie jest to nic nowego bo wszystkie opisywane metody opierają się na jakichś zestawach próbek barwnych i zawsze (jeżeli dysponuje się odpowiednimi danymi) można te zestawy zmieniać. Jednak trudno mi sobie wyobrazić aby dla typowych miejsc pracy wzrokowej istniała potrzeba dokonywania tak skomplikowanych zabiegów.

Moim zdaniem najbardziej istotną zmianą w stosunku do istniejących metod jest propozycja aby ogólny wskaźnik (w tym przypadku wskaźnik wierności barwy R_f) nie był obliczany jako średnia arytmetyczna ze szczególnych wskaźników uwzględniających wszystkie próbki barwne. Pani magister Justyna Kowalska proponuje obliczanie dwóch wskaźników. Pierwszy wskaźnik $R_{f(BF)}$ można chyba nazwać ogólnym wskaźnikiem ze zbioru dwudziestu procent próbek barwnych, które uzyskały największe wartości wskaźnika wierności barwy. Drugi wskaźnik $R_{f(WF)}$ można nazwać ogólnym wskaźnikiem ze zbioru dwudziestu procent próbek barwnych, które uzyskały najmniejsze wartości wskaźnika wierności barwy. Wydaje mi się, że doktorantka nie pokusiła się o jednoznaczne nazwanie tych wskaźników i nie znalazłem ich w „spisie oznaczeń” zamieszczonym na stronie numer dziewięć, a należą one do najważniejszych symboli zamieszczonych w ocenianej rozprawie.

W rozdziale 4.1 autorka przedstawia sposób postępowania zmierzający do wyznaczenia układu XYZ dla obserwatora w danym wieku i dla danego kąтового pola obserwacji. Przedstawiane są wykresy, tabele i macierze. Doktorantka powołuje się na literaturę a mnie jest trudno ocenić ile w jej metodzie jest wkładu własnego a ile osiągnięć innych autorów. Nie ma nic złego w korzystaniu z osiągnięć innych badaczy w celu dokonania syntezy lub rozwinięcia ich pomysłów. Chciałbym aby doktorantka podczas obrony przedstawiła, które fragmenty są Jej autorstwa, a które pochodzą z cytowanej literatury.

Doktorantka opisuje metodę wyznaczania temperatury barwowej najbliższej badanego rozkładu widmowego. Na stronie nr 90 przedstawia cztery założenia. Chciałbym poznać bardziej szczegółowe uzasadnienie przyjęcia założenia nr 2 i nr 3.

Na stronach od 97 do 152 prezentowane są wyniki obliczeń wybranych przez doktorantkę źródeł światła. Dla każdego źródła zaprezentowano wyniki obliczeń dla obserwatora 2-stopniowego oraz 10-cio stopniowego. Niestety wyniki prezentowane są na oddzielnych stronach zaczynając od strony nieparzystej co powoduje, że nie można jednocześnie przeglądać wyników dla tych dwóch

obserwatorów. W polu prezentującym wyniki autorskiej metody, na dwóch pierwszych stronach przedstawiono wartości parametru R_f bez wyjaśnienia jak on jest wyznaczony.

W rozdziale 4.6 zamieszczono analizę uzyskanych wyników. Autorka zauważa, że tylko cztery źródła światła (spośród przebadanych dwudziestu ośmiu) można zaliczyć do źródeł, które dobrze oddają barwy. Do dokonania tej oceny przyjmuje założenie, że oba zdefiniowane dla tej metody parametry ($R_{F(BF)}$ oraz $R_{F(WF)}$) powinny mieć wartości równe lub większe od 80. Jednocześnie stwierdza, że według metody CIE R_a oraz CIE R_f liczba tych źródeł będzie o wiele większa. Ta różnica jest oczywista. Poprzez przejście innego sposobu wyznaczania wartości ogólnych wskaźników wierności barwy autorka diametralnie zmieniła sposób dokonywania oceny. Chciałbym w tym miejscu zobaczyć porównanie, którego autorka jednak nie zamieściła. Jak by wyglądało zestawienie uzyskanych wyników gdyby porównać metodę doktorantki oraz metodę CIE R_f , w której wskaźnik wierności barwy byłby obliczany tak samo jak w metodzie doktorantki (dwie wartości R_f – najlepsza i najgorsza). Spodziewałbym się małych różnic.

W dalszej części podsumowania wyników obliczeń autorka prezentuje kilka przykładów, w których znajduje różnice w wartościach uzyskiwanych przez trzy oceniane metody (CIE R_a , CIE R_f i metoda własna) oraz różnice dla obserwatora w wieku 80 lat i 20 lat.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie, w którym autorka wymienia, jej zdaniem najważniejsze, osiągnięcia swojej pracy.

4. Ocena rozprawy

Uważam, że cel i teza rozprawy zostały właściwie sformułowane z jednym zastrzeżeniem co do słuszności zastosowania słowa „stosowanej” lub „stosowanych”.

Na wyróżnienie zasługuje szeroki przegląd literatury, zarówno pozycji mówiących o podstawach prezentowanych zagadnień jak i pozycji bardzo aktualnych. W spisie literatury znajdują się 134 pozycje, w tym 12 pozycji, w których doktorantka jest autorką lub współautorką.

Autorka rozwiązała postawione zagadnienie i cel pracy został osiągnięty. W wyniku realizacji celu pracy opracowana została oryginalna metoda oceny oddawania barw przez źródła światła.

Oryginalność rozprawy polega na:

- a) zastosowaniu dwóch wskaźników do oceny oddawania barw $R_{F(BF)}$ oraz $R_{F(WF)}$,
- b) uwzględnieniu cech obserwatorów różniących się wiekiem,

- c) opracowaniu autorskiej metody wyznaczenia macierzy przeliczeń oraz wyznaczania temperatury barwowej najbliższej.

Temat podjęty przez doktorantkę jest jak najbardziej aktualny. Co prawda od czasu zauważenia przez przemysł oświetleniowy, że metoda CIE Ra nie sprawdza się w przypadku nowych lamp LED, wprowadzono, za pośrednictwem publikacji CIE, nową metodę opartą o wyznaczanie wskaźnika wierności barwy Rf. Może się wydawać, że temat jest na razie zamknięty. Wszelką dostępną wiedzę wykorzystano do opracowania metody CIE Rf. Jednak metoda ta na razie nie znalazła swojego miejsca w normach przedmiotowych. Do oceny oddawania barw nadal zalecane jest stosowanie metod CIE Ra. Praca doktorantki wpisuje się w prowadzoną cały czas dyskusję dotyczącą problematyki oceny oddawania barw przez źródła światła.

Szkoda, że doktorantka nie opublikowała wyników swojej pracy w renomowanych czasopismach, również w tych, które znajdują się w sporządzonym przez nią spisie literatury. Byłaby wtedy możliwość skonfrontowania uzyskanych wyników z pracami autorów, których cytuje.

Przydatność rozprawy dla techniki świetlnej i nauk inżyniersko-technicznych oceniam wysoko. Od dawna na polskim rynku nie było pracy, która by poruszała w tak dogłębny sposób zagadnienia kolorymetryczne. Niestety autorka nie ustrzegła się błędów. Największe zastrzeżenia mam do poprawności redakcyjnej rozprawy. Mam tutaj na myśli nie tylko błędy redakcyjne ale również niedociągnięcia w zakresie rzetelnego opisu treści zawartych niektórych rozdziałach. Uważam również, że doktorantka nie wskazała jednoznacznie w treści pracy, które osiągnięcia są jej autorstwa.

5. Uwagi

Oceniając pozytywnie osiągnięcia, które autorka przedstawiła w rozprawie, przedstawiam uwagi dotyczące redakcji pracy oraz uwagi merytoryczne, na które autorka powinien odpowiedzieć w czasie obrony.

Uwagi redakcyjne:

- a) Rozdział numer dwa występuje w pracy dwa razy.
- b) Po tytule rozdziału na stronie czternastej wpisywana jest od razu treść bez wprowadzenia numeru i nazwy podrozdziału.
- c) W niektórych miejscach autorka pisze o generalnym wskaźniku podczas gdy powinniśmy używać terminu ogólny wskaźnik (np. strona 19).

- d) Mam spore zastrzeżenia do jakości wielu rysunków. Stosowane przez autorką kolorowe znaczniki (kwadraty i koła) są trudne do identyfikacji na rysunkach (np. 2.12).
- e) Rysunek 2.12 ma linie siatki na osi Y co 5 jednostek a na osi X co 10 jednostek co utrudnia ocenę prezentowanych wyników.
- f) We wzorze 3.2 brak jest opisu symbolu A.
- g) Na rysunku 3.2 brakuje opisów osi.
- h) W wielu miejscach autorka używa terminu „kąt obserwacji” co może sugerować, że ma na myśli kąt pomiędzy normalną do powierzchni a kierunkiem obserwacji. Poprawny termin to „wielkość kątowa pola obserwacji”.
- i) Rysunki 3.7 i 3.8 powinny mieć linie siatki przedstawione przy tych samych wartościach długości fal, a na rysunku 3.8 pomyłono położenia punktów oznaczonych jako λ_1 i λ_2 .
- j) Na rysunkach 3.12 oraz 3.13 osie X opisano jako „podstawy widzenia czopkowego”. Co to znaczy?
- k) Na rysunku 4.3 opis legendy jest w nieintuicyjnej kolejności. Czytałem tę legendę z góry do dołu a autorka chciała abym ją czytał od lewej do prawej.
- l) Rysunek 4.17 nie posiada opisanych osi. Ponadto podpis pod rysunkiem wprowadza w błąd czytelnika. Na rysunku nie zamieszczono rozkładów widmowych światła dziennego a rozkłady, za pomocą których wyznacza się rozkłady widmowe światła dziennego. Gdyby na rysunku faktycznie zamieszczono rozkłady widmowe światła dziennego to jak można wytłumaczyć to, że wartości rzędnych są ujemne?
- m) Na stronie 92 autorka pisze, że dane próbek barwnych określone są za pomocą widmowych wartości współczynników odbicia (współczynników odbicia czego? strumienia świetlnego?). Próbki barwne przyjęte we wszystkich metodach oceny oddawania barw charakteryzowane są poprzez widmowe współczynniki luminancji energetycznej (spectral radiance factors).

Proszę aby podczas obrony doktorantka ustosunkowała się do następujących zagadnień:


- a) jaki jest wkład własny doktorantki w opracowanie autorskiej metody wyznaczenia macierzy przeliczeń oraz wyznaczania temperatury barwowej najbliższej.

- b) jakie słowo powinno się znaleźć w tezie pracy „stosowanej” czy „stosowanych”.
- c) jak autorka chce nazwać zdefiniowane przez siebie wskaźniki $R_{F(BF)}$ oraz $R_{F(WF)}$.
- d) jakie są szczegółowe uzasadnienia przyjęcia założenia nr 2 i nr 3 w metodzie wyznaczania temperatury barwowej najbliższej opisanej na stronie nr 90.
- e) jak wyznaczono wartość parametru R_f przedstawionego w polu prezentującym wyniki autorskiej metody na stronach nr 97 i 98.

6. Uwagi końcowe

Stwierdzam, że wybór tematyki rozprawy jest właściwy i nie budzi zastrzeżeń. Treść rozprawy stanowi logiczną całość. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w dyscyplinie elektrotechnika. Doktorantka wykazała samodzielność w zaplanowaniu i rozwiązaniu problemu naukowego.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pani magister inżynier Justyny Kowalskiej pt. „Oddawanie barw przez źródła światła stosowane do ogólnych celów oświetleniowych” spełnia wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim (art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki Dz. U. z dnia 21.06.2016r., poz. 882) w odniesieniu do dyscypliny elektrotechnika.



dr hab. inż. Krzysztof Wandachowicz