

dr hab. inż. Krzysztof Tomczuk, prof. IEL
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki
ul. Mieczysława Pożaryskiego 28
04-703 Warszawa

Warszawa, 06.12.2021 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgra inż. **Marcina Leško** pt.

„Oprawa oświetleniowa o zmiennej bryle świetlnej”

Wykonanej na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej

Promotor: Dr hab. inż. Antoni Różowicz

Promotor pomocniczy: Dr inż. Henryk Wachta

Recenzję wykonano na podstawie uchwały podjętej przez Radę Naukową Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Rzeszowskiej
im. Ignacego Łukasiewicza na posiedzeniu w dniu 3 listopada 2021 roku
oraz otrzymanego pisma nr RE.530-32/2021 z dnia 9 listopada 2021.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 155 stron i składa się ze spisu treści, wykazu ważniejszych oznaczeń, dziewięciu rozdziałów, wniosków końcowych oraz spisu literatury zawierającego 158 pozycji na które składają się:

- 104 publikacje, w tym 3 artykuły współautorskie Doktoranta związane bezpośrednio z tematyką pracy doktorskiej,
- 6 norm dotyczących Techniki Oświetleniowej,
- 36 not katalogowych opraw, materiałów, źródeł światła i innych zagadnień,
- 8 adresów internetowych do stron ze specjalistycznym oprogramowaniem,
- opisów 3 patentów dotyczących rozwiązań z zakresu Techniki Oświetleniowej,
- opisu 1 zgłoszenia patentowego nr P.433977 z 14.05.2020 roku pt. "Układ świetlno-optyczny oprawy oświetleniowej" będący wynikiem realizacji prototypu powstałego w ramach niniejszej pracy.

Dodatkowo do rozprawy dołączono listę 27 publikacji Autora w większości związanych z innymi zagadnieniami technika oświetleniowej. We wszystkich artykułach Doktorant występuje jako współautor.

Przedstawione w rozprawie rozdziały to:

Rozdział 1. Wstęp

Rozdział zawiera wprowadzenie do tematyki rozprawy oraz przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie rozwiązań technicznych układów świetlno-optycznych spotykanych na rynku. Na podstawie przeglądu literatury określono aktualny stan wiedzy w tym temacie oraz wskazano zagadnienia, które warto rozpoznać. Dotyczą one układu świetlno-optycznego pozwalającego na kształtowanie zmiennej bryły fotometrycznej,

Rozdział 2. Rozwiązania konstrukcyjne układów świetlno-optycznych

W rozdziale przedstawiono funkcje opraw oświetleniowych oraz opisano obecnie stosowane możliwości regulacyjne wartości strumienia świetlnego oraz kształtu bryły fotometrycznej. Zwrócono uwagę na wybrane kwestie związane z bezpieczeństwem użytkowania opraw oraz warunkami środowiskowymi w jakich mogą być użytkowane.

Dokonano przeglądu systemów optycznych opraw oświetleniowych oraz przedstawiono zalety i wady źródeł światła stosowanych w oświetleniu wnętrz. Zaprezentowano wyniki rozkładu luminancji na powierzchni nowoczesnych wybranych opraw oświetleniowych zbudowanych z wykorzystaniem technologii LED. Zwrócono szczególną uwagę na osiągnięte wysokie wartości luminancji, które w wielu przypadkach powodują zjawisko olśnienia.

Rozdział 3. Metody obliczeniowe układów świetlnooptycznych

Rozdział przedstawia zalety i wady metod obliczeniowych stosowanych w algorytmach projektowych układów świetlnooptycznych. Zaprezentowana została strona teoretyczna zawierająca równania matematyczne. Dokonano oceny przydatności istniejących metod obliczeniowych do analizy opraw o zmiennej bryle świetlnej.

Rozdział 4. Sformułowanie tezy i celu rozprawy

Rozdział przedstawia tezę i cel pracy do których odniosę się w dalszej części recenzji.

Rozdział 5. Wymagania stawiane oprawie oświetleniowej o zmiennej bryle fotometrycznej

Rozdział przedstawia opis problemu oświetleniowego jakim jest zmiana ekspozycji sklepowej i wynikająca z niej zmiana stref oświetleniowych. W obecnej sytuacji wiąże się to z innymi rozłożeniem punktów świetlnych, co pociąga za sobą znaczące koszty inwestycyjne. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie oprawy oświetleniowej o zmiennej bryle fotometrycznej o stałym miejscu montażu umożliwiającej orientację bryły fotometrycznej we wszystkich kierunkach. Doktorant podaje cechy jakimi powinna się charakteryzować taka oprawa umożliwiająca zmianę możliwości oświetlania przestrzeni w sposób symetryczny lub asymetryczny.

Rozdział 6. Koncepcja układu świetlnooptycznego oprawy oświetleniowej o zmiennej bryle fotometrycznej

W rozdziale zaprezentowano układy soczewkowe oraz odbłyśnikowe stosowane do formowania rozsyłu strumienia świetlnego emitowanego przez źródła LED. Przedstawiono wady i zalety obydwu układów w szczególności pod kątem formowania rozsyłu świetlnego umożliwiającego wykorzystanie składowej bezpośredniej i pośredniej.

Przeanalizowano sześć form geometrycznych potencjalnych odbłyśników pod kątem możliwości rozpraszania strumienia świetlnego. Przeprowadzono szereg analiz teoretycznych

w oprogramowaniu komputerowym *Photopia* umożliwiającym zapoznanie się emitowaną bryłą świetlną poszczególnych form geometrycznych odbłyśników. Po analizie otrzymanych wyników do dalszych analiz zaproponowano formę torusa parabolicznego otwartego jako kształtu odbłyśnika przyszłej oprawy oświetleniowej.

W dalszej części rozdziału analizowano rozkład bryły fotometrycznej docelowej oprawy przy podziale odbłyśnika na 1, 2, 4 oraz 8 sekcji umożliwiających bardziej dokładne kształtowanie emitowanego strumienia świetlnego. Analizie poddano także różną liczbę matryc ze źródłami LED w różnej konfiguracji rozmieszczenia, umiejscowionych pionowo przed poszczególnymi sekcjami odbłyśnika. Ostatecznie w związku z potrzebą zapewnienia największego ruchu kąтового odbłyśnika zdecydowano o zastosowaniu matryc LED konfiguracji diod 8 x 2 (pionowo / poziomo). Jako źródła światła zaproponowano diody firmy Cree, typ: XP-G3 o maksymalnej mocy wynoszącej 6 W.

Rozdział 7. Modelowanie systemu świetlno-optycznego oprawy o zmiennej bryle fotometrycznej

Rozpoczęcie procesu modelowania lub projektowania wiąże się z przyjęciem określonych założeń konstrukcyjnych. Autor rozprawy przyjął poniższe kryteria, którymi posługiwał się w dalszej realizacji pracy:

- maksymalna średnica oprawy wyznaczona przez okrąg opisany na ośmiokącie foremnym wynosi 65 cm,
- wysokość oprawy oraz minimalna długość boku wynoszą 20 cm,
- przestrzeń wewnętrzna jest ograniczona wysokością 17 cm oraz ośmiokątem foremnym opisanym na okręgu o średnicy 50 cm,
- minimalny zakres zmian kąta rozsyłu powinien obejmować przedział 80-120°.

W rozdziale przedstawiono sposób projektowania kształtu odbłyśnika docelowej oprawy oświetleniowej umożliwiającej zmianę kształtu bryły świetlnej. Zdefiniowano sposób matematycznego opisu kształtu odbłyśnika, który był przedmiotem analiz geometrycznych i materiałowych. Weryfikację przyjętych założeń dotyczących projektowanej oprawy oświetleniowej dokonano wykorzystując metodę Monte Carlo. Umożliwia ona przeprowadzenie analizy przebiegu promieni świetlnych emitowanych przez źródło światła w celu wyznaczenia krzywej światłości układu optyczno - świetlnego.

We wstępnym etapie przyjęto założenie, że profil będzie jednokrzywiznowym profilem skupiającym z powierzchnią umożliwiającą kierunkowe odbicie światła. Następnie

w programie *Photopia* analizowany był odbłyśnik z powierzchnią o kierunkowo-rozproszonym charakterze odbicia światła.

Kolejnym ciekawym zagadnieniem podjętym przez Doktoranta są analizy termiczne sposobu odprowadzania ciepła z półprzewodnikowych źródeł światła LED przeprowadzone w programie *SolidWorks*. Maksymalna moc zastosowanych źródeł światła jak wspomniano wynosi 6 W, natomiast punkt pracy elementów dobrany został dla mocy wynoszącej 3 W.

Układ zasilania oprawy oświetleniowej posiada 4 moduły świecące zawierające po 2 niezależne sekcje źródeł światła. W sumie dla całej oprawy jest to 8 sekcji świecących, które uzupełnione zostały w soczewki stanowiące układ optyczny. Rozwiązanie takie umożliwia lepsze możliwości kształtowania rozsyłu strumienia świetlnego.

Ostateczne analizy kształtowania strumienia świetlnego oprawy oświetleniowej przeprowadzono dla odbłyśnika posiadającego dwie krzywizny oznaczone literami A i B. Rozwiązanie takie umożliwia kształtowanie bryły fotometrycznej w szerszym zakresie, a przede wszystkim umożliwia spełnienie postawionych założeń projektowych.

Górna krzywa profilowa oznaczona literą A umożliwia odbicie promieni świetlnych w całym zakresie kątów $0^{\circ} \div 60^{\circ}$. Dolna krzywa profilowa oznaczona literą B odbija promienie świetlne dla przedziału $50^{\circ} \div 60^{\circ}$, co umożliwia wzmocnienie światłości osiowej w szczególności w rozsyle skupionym.

Rozdział 8. Budowa i weryfikacja zgodności prototypu z modelem.

W tej części rozprawy Doktorant opisał proces budowy prototypu na podstawie opracowanego projektu. Dokonano pewnych zmian technologicznych upraszczających konstrukcję oprawy przy zachowaniu pierwotnych wymiarów oprawy.

Przedstawiony został układ zasilania modułów LED składający się z zasilacza sieciowego, końcówki mocy, sterownika głównego oraz portów komunikacyjnych.

Odbłyśniki wykonane zostały metodą druku 3D, a następnie na jego powierzchnię napyłona została warstwa metaliczna umożliwiająca odpowiednie kształtowanie strumienia świetlnego.

Sterowanie pochylaniem odbłyśników wykonane zostało za pomocą serwomechanizmów zasilanych ze sterownika głównego.

Następnie wykonano prototyp oprawy. Po jego uruchomieniu przeprowadzono pomiary fotometryczne krzywych rozsyłu światłości oprawy i porównano z wynikami otrzymanymi w sposób symulacyjny. W tabeli 8.1 zestawiono otrzymane wyniki. Wskazują one na niewielkie rozbieżności w wartościach mocy oprawy, uzyskiwanego strumienia świetlnego

oraz sprawności oprawy. Największą rozbieżność wynoszącą 7.67 % uzyskano w wartości uzyskanej światłości I_0 dla wariantu R9.

Ostatnim badaniem było sprawdzenie możliwości odprowadzania ciepła. Wykonano model symulacyjny w programie *SolidWorks* umożliwiający wykonanie takiej analizy. Następnie porównano wyniki z modelu symulacyjnego z wynikami pomiarów wykonanych na prototypie oprawy. Uzyskane wartości temperatury maksymalnej prototypu wyniosły niewiele poniżej 70 °C, a różnica pomiędzy wynikami modelu nie przekroczyła 5 %, co można uznać za bardzo dobry wynik.

Rozdział 9. Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przypomniano cel realizacji pracy oraz metodologię przeprowadzonych badań. Następnie Doktorant przedstawił swoje główne osiągnięcia, którymi są:

- opracowanie metody kształtowania zmiennej bryły fotometrycznej,
- opracowanie modelu układu świetlno-optycznego o zmiennej bryle świetlnej spełniającego określone założenia,
- wyznaczenie wpływu elementów układu świetlno-optycznego na możliwość kształtowania zmiennej bryły fotometrycznej,
- określenie wpływu właściwości odbiciowych materiałów na kształtowanie zmiennego rozsyłu strumienia świetlnego,
- budowę prototypu oprawy oświetleniowej z układem świetlno-optycznym umożliwiającym kształtowanie zmiennej bryły fotometrycznej,
- na podstawie opracowanego prototypu złożono w Urzędzie Patentowym RP zgłoszenie patentowe nr P.433977, pt. "*Układ świetlno-optyczny oprawy oświetleniowej LED*" z dnia 14.05.2020 roku.
- cykl autorskich publikacji [44-46] obejmujących cząstkowe wyniki badań.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

2.1. Motywy podjęcia tematu

Doktorant dokonał obszernego przeglądu literatury, a następnie wysnuł wnioski co do braku powszechnie stosowanych rozwiązań systemów oświetleniowych umożliwiających kształtowanie bryły świetlnej zapewniający wysoki poziom sprawności optycznej.

Jest to główny motyw podjęcia przez Doktoranta tematu rozprawy co przedstawione zostało w rozdziale 2.

Uważam, że podjęty temat rozprawy dotyczący możliwości kształtowania zmiennej bryły świetlnej jest bardzo interesujący i może spotkać się z zainteresowaniem firm produkujących systemy oświetleniowe. Spory zakres tematyczny rozprawy oraz motywacja do podjęcia tematu zasługuje na duże uznanie.

2.2. Cel i teza pracy

W rozdziale 4 przedstawiony został cel i teza pracy, który Doktorant określił następująco:

Cel:

Celem pracy jest opracowanie na podstawie badań modelowych oprawy oświetleniowej umożliwiającej kształtowanie różnych brył fotometrycznych, dokonanie analizy właściwości elementów układu oraz ocena ich wpływu na wybrane parametry świetlne.

Teza:

Metodą modelowania układu świetlno-optycznego możliwe jest opracowanie rozwiązania pozwalającego na szerokie możliwości regulacji rozsyłu strumienia świetlnego.

Cel i teza pracy postawione zostały właściwie i nie mam co do tego żadnych zastrzeżeń.

3. Uwagi dotyczące pracy

3.1. Uwagi ogólne

Formalna strona pracy oraz jej układ nie budzą zarzutu. Zawartość rozprawy przedstawiona jest w sposób systematyczny, zaś kolejność opisywanych zagadnień właściwa i logiczna. Rozdziały są ze sobą powiązane, a każdy następny rozdział wynika z poprzedniego. Warto zwrócić uwagę, że rozprawa napisana jest jasnym i zrozumiałym językiem, co dowodzi, że Doktorant nabył istotną cechę związłego przedstawiania skomplikowanych merytorycznych treści będących przedmiotem rozprawy. Przedstawione badania i analizy poparto kluczowymi i istotnymi tabelami, wykresami, ilustracjami graficznymi zwiększającymi czytelność otrzymanych wyników.

Uważam, że podczas realizacji niniejszej pracy osiągnięto kilka dodatkowych celów, których w rozprawie właściwie nie wyartykułowano. Związane są one ze zdobytymi umiejętnościami praktycznymi, technicznymi oraz inżynierskimi Doktoranta takimi jak:

- obsługa oprogramowania *SolidWorks* umożliwiającego mechaniczne modelowanie konstrukcji w 3D oraz przeprowadzanie analiz odprowadzania ciepła,
- obsługa oprogramowania *Photopia* umożliwiającego modelowanie układów świetlno-optycznych,
- umiejętność realizacji wydruków na drukarkach 3D,
- umiejętność projektowania i wykonywania układów zasilania systemów oświetleniowych oraz sterowania nimi przez system komunikacji bezprzewodowej,

Biorąc pod uwagę wszystkie zagadnienia związane z powstaniem pracy można śmiało stwierdzić, że zaangażowanie i wnikliwość Pana mgr inż. Marcina Leśko w realizację recenzowanej pracy są bardzo duże. Wnioski końcowe podsumowujące otrzymane wyniki badań i analiz określone są poprawnie czym potwierdzają postawiony cel i tezę pracy. Zawarty spis literatury wskazuje na obszernie rozeznanie Doktoranta w zagadnieniach związanych z projektowaniem opraw oświetleniowych.

Poniżej przedstawiono szereg uwag, które nasunęły się podczas recenzowania niniejszej rozprawy doktorskiej.

- A. Na rys. 2.1. str. 11 w opisie wkraśl się błąd. Powinno być: 1 - układ optyczny, 2 - źródło światła. Na rysunku jest odwrotnie.
- B. Doktorant w spisie literatury powołał się na 158 pozycji, z czego w tekście zacytowane zostało 105 pozycji. Powinny być zacytowane wszystkie pozycje.
- C. Doktorant zaczyna cytowanie od pozycji [128,129], [35, 80], natomiast numerowanie cytowania w tekście powinno się rozpoczynać od pozycji nr [1], [2], [3], itd, co jest dobrą praktyką edytorską. Wymaga to odpowiedniego ustawienia pozycji w spisie literatury.
- D. Na str. 62 w akapicie 2 wspomniano, że przeprowadzono badania układu świetlno-optycznego złożonego z 16 sekcji, natomiast w rozprawie nie zamieszczono wyników badań. Proszę ich przedstawienie.
- E. Zastosowane w projekcie diody Cree XP-G3 to cała rodzina źródeł LED emitujących światło białe, niebieskie i czerwone - rozumiem, że zastosowano diody emitujące światło białe. W nocie katalogowej tego elementu podano że jest możliwość wyboru źródeł o temperaturze barwowej wynoszącej od 2200 K do 7000 K w wykonaniu *Standard* oraz od 3500 K do 6500 K w wykonaniu *S Line*. Które konkretnie diody zastosowano w prototypie i dlaczego wybrano akurat ten model diody i tego producenta ?

- F. Jaka jest wartość przewodności cieplnej płytek aluminiowych z podłożem aluminiowym na których zamontowano źródła LED ? Jest to dość istotny parametr warunkujący zdolność odprowadzania ciepła ze złącz diod półprzewodnikowych i powinien być podany.
- G. Dlaczego przy tak zaawansowanym projekcie nie zdecydowano się na regulację temperatury barwowej emitowanego światła ? Byłoby to ciekawym uzupełnieniem oprawy przy niewielkiej zmianie konstrukcyjnej.
- H. Na rys. 8.2 przedstawiony jest schemat układu zasilającego oprawę. Mam uwagę do określenia "końcówka mocy". W tym przypadku mówimy o przekształtniku energoelektronicznym, zaś "końcówka mocy" to nazwa potoczna.
- I. W zależności od zastosowanego przekształtnika energoelektronicznego możliwe jest zasilanie źródeł LED umożliwiające wytwarzanie ciągłego lub pulsującego strumienia świetlnego zgodnie z sygnałem PWM. Jaki był przebieg czasowy strumienia świetlnego ? oraz jaki był sposób regulacji natężenia oświetlenia, który zastosowano w projekcie ?
- J. Doktorant zadeklarował, że zamierza kontynuować badania w ramach podjętej tematyki. Proszę o przedstawienie zagadnień dalszych badań ?

4. Wniosek końcowy

Zamieszczone uwagi w niniejszej recenzji nie umniejszają wysokiemu poziomowi merytorycznemu pracy, którą oceniam pozytywnie. Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marcina Leško pt: "*Oprawa oświetleniowa o zmiennej bryle świetlnej*" stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza umiejętność realizacji prac naukowych. Stwierdzam, że rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez:

- Ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65, poz. 595),
- Rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 roku.
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261).

W związku z tym, przedkładam Radzie Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Rzeszowskiej wniosek o przyjęcie i dopuszczenie recenzowanej pracy do publicznej obrony.

Po zapoznaniu się z zawartością rozprawy doktorskiej oraz zasadami wyróżniania rozpraw doktorskich przez Radę Naukową Dyscypliny Automatyka Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie, składam wniosek o jej wyróżnienie.



.....

Krzysztof Tomczuk

dr hab. inż. Krzysztof Tomczuk, prof. IEL

Warszawa, 06.12.2021 r.

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki

ul. Mieczysława Pożaryskiego 28

04-703 Warszawa

Wniosek

do Rady Naukowej Dyscypliny

Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

Politechniki Rzeszowskiej

Biorąc pod uwagę wszystkie zagadnienia związane z opracowaniem i przygotowaniem rozprawy doktorskiej autorstwa Pana mgr inż. Marcina Leśko pt.: „*Oprawa oświetleniowa o zmiennej bryle świetlnej*”, z którą zapoznałem się podczas jej recenzowania, składam wniosek o jej wyróżnienie.

Uzasadnienie:

W mojej ocenie szczególne uznanie w recenzowanej rozprawie zasługują:

- Dokonanie obszernego przeglądu literatury w zakresie kształtowania brył fotometrycznych światłości opraw oświetleniowych i sformułowanie wniosków dotyczących projektowania opraw wyposażonych w układy świetlno-optyczne umożliwiające formowanie zmiennego rozsyłu o różnej charakterystyce kierunkowo-kątowej, symetrycznej lub asymetrycznej zapewniającej wysoki poziom sprawności optycznej.
- Opracowanie metody modelowania układu świetlno-optycznego umożliwiającego realizację zmiennej bryły fotometrycznej spełniającego postawione założenia.
- Wyznaczenie wpływu elementów układu świetlno-optycznego na możliwość kształtowania zmiennej bryły fotometrycznej z uwzględnieniem wpływu właściwości różnego typu materiałów odbiciowych.

- Opracowanie zgłoszenia patentowego nr P.433977, pt. "*Układ świetlno-optyczny oprawy oświetleniowej LED*" z dnia 14.05.2020 roku, które jest wynikiem realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej.
- Publikacja w Czasopiśmie *Energies* za 140 pkt. MEiN artykułu opracowanego przez zespół autorów: Leśko M., Różowicz A., Wachta H., Różowicz S. "*Adaptive Luminaire with Variable Luminous Intensity Distribution*" 2020, 13, 721.
- Starannie wypracowane umiejętności techniczne, które Autor wykorzystał podczas realizacji rozprawy. W szczególności są to: posługiwanie się specjalistycznym oprogramowaniem takim jak: *Photopia* oraz *SolidWorks*, umiejętność realizacji wydruków na drukarkach 3D, umiejętność projektowania i wykonywania układów zasilania systemów oświetleniowych oraz sterowania nimi przez system komunikacji bezprzewodowej, a przede wszystkim zdolność do analitycznego myślenia i wyciągania właściwych wniosków.



Krzysztof Tomczuk