

Krzysztof Wandachowicz

Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny

Załącznik nr 2

Autoreferat

Poznań, 2016



AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko:

Krzysztof Wandachowicz

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania:

- **stopień naukowy doktora nauk technicznych** w zakresie elektrotechnika, technika świetlna, rozprawa doktorska pt. „Wyznaczanie rozkładu luminancji we wnętrzach z uwzględnieniem kierunkowo-rozproszonych charakterystyk odbiciowych materiałów”; promotor: dr hab. inż. Jacek Hauser, prof. nadzw., recenzenci: prof. dr hab. inż. Wojciech Żagan (Politechnika Warszawska), prof. dr hab. inż. Ryszard Nawrowski (Politechnika Poznańska); Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, 19.12.2000,
- **tytuł magistra inżyniera elektryka** w zakresie elektrotechniki, specjalność: przetwarzanie i użytkowanie energii elektrycznej, specjalizacja: technika świetlna, praca dyplomowa pt. „Oświetlenie pomieszczeń przy pracy z monitorami”; Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, 20.09.1990.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

Miejsce pracy:

Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań.

Historia zatrudnienia:

- 01.10.20014 – zatrudnienie na stanowisku starszego wykładowcy w Instytucie Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej,
- 01.10.2002 - mianowanie na stanowisko adiunkta w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej (obecna nazwa: Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej) Politechniki Poznańskiej,
- 01.03.1990 – mianowanie na stanowisko asystenta w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej (obecna nazwa: Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej) Politechniki Poznańskiej.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zmianami):

- a) tytuł osiągnięcia naukowego:

SYNTEZA ODBŁYŚNIKÓW OŚWIETLENIOWYCH METODĄ PROMIENI ODWROTNYCH

- b) autor, tytuł publikacji:

Krzysztof Wandachowicz, rozprawa habilitacyjna pt. „**Synteza odbłyśników oświetleniowych metodą promieni odwrotnych**” wydana w roku 2015 przez Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, seria Rozprawy nr 527, ISBN 978-83-7775-362-0, 160 stron

Praca finansowana przez MNiSW w latach 2010-2012 w ramach habilitacyjnego projektu badawczego nr N N510 535639. Koszty realizacji projektu wyniosły 109 899,51 zł (w tym 56 929,50 zł na wytworzenie aparatury badawczej).

Rozprawa została umieszczona w załączniku nr 3 wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego.

Recenzja wydawnicza rozprawy sporządzona przez profesora dr hab. inż. **Wojciecha Żagana** została umieszczona w załączniku nr 4 wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego.

- c) omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania przedstawiono na stronach od numeru 4 do numeru 25 (kolejność poszczególnych rozdziałów oznaczona cyframi rzymskimi):

I. Wstęp

I.1. Wprowadzenie

Na całym świecie podejmowane są działania zmierzające do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Jednym z nich jest zmniejszenie zużycia energii elektrycznej przez stosowanie bardziej energooszczędnych urządzeń. Parlament Europejski przyjął dyrektywę dotyczącą ekoprojektu [Dyrektywa 2009/125/WE], a Komisja WE wprowadziła odpowiednie rozporządzenia w odniesieniu do lamp do użytku domowego, lamp fluorescencyjnych, lamp dużej intensywności, stateczników i opraw oświetleniowych [Rozporządzenie Komisji WE nr 244/2009 oraz 245/2009]. Rozporządzenia te mają na celu zastąpienie produktów obecnych na rynku produktami bardziej energooszczędnymi, co ostatecznie przyczyni się do zmniejszenia zużycia energii elektrycznej przeznaczonej na oświetlenie. Zakładany efekt zostanie osiągnięty dzięki wycofaniu z rynku lamp o małej skuteczności świetlnej oraz stateczników charakteryzujących się dużymi stratami mocy.

Technika świetlna jest nauką o wytwarzaniu i stosowaniu promieniowania optycznego. Osiągnięcie jednego z celów tej nauki, jakim jest zapewnienie racjonalnego oświetlenia miejsc pracy, wymaga stosowania odpowiedniego sprzętu oświetleniowego, wyposażonego m.in. w odpowiednio skonstruowane oprawy oświetleniowe. Dyrektywa ekoprojektu wprowadza wymagania w większości dotyczące lamp. Kolejnym krokiem prowadzącym do zmniejszenia zużycia energii elektrycznej może być stosowanie opraw oświetleniowych o optymalnych właściwościach fotometrycznych, które umożliwiają osiągnięcie przyjętego celu (np. oświetlenie miejsca pracy) przy mniejszej liczbie (lub mniejszej mocy) punktów świetlnych. Metody projektowania opraw oświetleniowych powinny umożliwiać opracowywanie układów optycznych o ściśle określonych przez projektanta właściwościach.

Zadanie związane z obliczaniem parametrów opraw oświetleniowych polega zazwyczaj na wyznaczeniu bryły fotometrycznej dla przyjętego modelu oprawy [Oleszyński 1978, Dybczyński 1996, Żagan 2012]. Do zagadnienia obliczania opraw można jednak podejść w odmienny sposób. Zakładając kształt bryły fotometrycznej, można starać się znaleźć kształt odbłyśnika, który zapewni zgodność z przyjętymi założeniami. Wtedy postawione zadanie staje się zadaniem syntezy, polegającym na wyznaczeniu najlepszego rozwiązania (np. optymalnego kształtu odbłyśnika) ze względu na określone kryterium (np. zadana krzywa światłości).

I.2. Obecny stan wiedzy

W podrozdziale 1.2. rozprawy opisane zostało zagadnienie tzw. problemu odwrotnego [Kisch 2011]. Jest to takie zadanie, w którym parametry modelu są wyznaczone na podstawie obserwowanych wartości tworzonych przez ten model. Opis zagadnienia zilustrowany jest za pomocą wzorów (rozprawa, wzory 1.1, 1.2, 3.5). Znalaziono związek pomiędzy równaniami opisującymi problem odwrotny a równaniem zastosowanym w rozprawie, wykorzystywanym do obliczania luminancji elementów optycznych opraw oświetleniowych (rozprawa, wzór 3.5, tabela 1.1). Nawiązując do zagadnienia problemu odwrotnego i korzystając z prac [Arvo 1995] wprowadzono pojęcie problemu odwrotnej geometrii.

Problem odwrotnej geometrii może dotyczyć różnych obszarów techniki. Z punktu widzenia techniki świetlnej problemem odwrotnej geometrii jest obliczanie kształtów elementów optycznych opraw oświetleniowych oraz obliczanie układów optyki obrazowej (głównie soczewek). Przy obliczaniu soczewek zazwyczaj nie jest poszukiwany kształt powierzchni, który jest znany, a właściwości soczewki są jedynie modyfikowane przez zmianę takich parametrów, jak grubość soczewki czy jej ogniskowa [Kress 2000, Shannon 1997, Soifer 2002]. Istnieje w tym obszarze szereg programów komercyjnych, opartych na wykorzystaniu technik lokalnej bądź globalnej optymalizacji [Vasiljevic 1998, Oslo software].

W literaturze zagranicznej można znaleźć następujące przykłady obliczania kształtów elementów optycznych opraw oświetleniowych:

- Metody wykorzystujące ewolucyjne strategie optymalizacji. Profil odbłyśnika opisywany jest krzywą Béziera trzeciego stopnia; stosuje się następujące uproszczenia:

- metody są ograniczone do dwóch wymiarów, a co za tym idzie, dotyczą odbłyśników o symetrii obrotowej [Doyle 2001],
- model powierzchniowego źródła światła zastąpiony przez zbiór punktowych źródeł o rozsyłe lambertowskim, rozmieszczonych w stałych odstępach na powierzchni kula [Doyle 1999].
- Algorytmy wykorzystujące metodę symulowanego wyżarzania. Kształt odbłyśnika jest odwzorowywany za pomocą siatki punktów i aproksymowany z zastosowaniem krzywych B-sklejanych, które tworzą powierzchnię trójwymiarową. Nie przedstawiono weryfikacji dokładności prezentowanych metod obliczania parametrów fotometrycznych odbłyśników a sposób oceny wyników znacznie odbiega od metod stosowanych w technice świetlnej. Prezentowane wyniki nie są określane w wielkościach fotometrycznych [Patow 2005].

W polskiej literaturze można znaleźć jedynie kilka publikacji dotyczących omawianego problemu:

- W pracy [Żagan 1992] przedstawiono metodę obliczania odbłyśników samochodowych opartą na technice promieni odwrotnych. Chociaż praca ta nie dotyczy tematyki syntezy opraw oświetleniowych, można w niej znaleźć opis ciekawej metody umożliwiającej znalezienie kształtu powierzchni świecącej źródła światła, które z danym odbłyśnikiem zapewni uzyskanie określonego rozsyłu strumienia świetlnego.
- W pracy [Zaremba 2009] zaprezentowano metodę syntezy odbłyśników opartą na technice algorytmu genetycznego oraz metodę strumieniową obliczania opraw oświetleniowych. Uzyskane wyniki mocno odbiegają od założeń. Ponadto otrzymany profil odbłyśnika, składający się z linii łamanych, był bardzo nieregularny i niemonotoniczny. We wnioskach autorzy piszą: „Celem prezentowanych badań było zbadanie możliwości wykorzystania algorytmów genetycznych w procesie syntezy kształtu zwierciadlanego odbłyśnika obrotowo-symetrycznego. W wyniku przeprowadzonych badań nie potwierdzono w pełni skuteczności tej metody optymalizacyjnej w zastosowaniu do rozważanego problemu”.
- W pracy [Zaremba 2010] opisano wykorzystanie metody strumieniowej do syntezy odbłyśników o symetrii obrotowej. Zaprezentowano przykład oprawy zapewniającej uzyskanie równomiernego rozkładu natężenia oświetlenia na powierzchni roboczej.
- Praca [Wilk, Mazur 2007] dotyczy problematyki funkcji odwrotnej w odniesieniu do reflektorów samochodowych. Zaprezentowano metodę dla specyficznego układu reflektora samochodowego, opartą na technice odbić elementarnych i metodzie Monte Carlo. Zastosowana do obliczeń optymalizacyjnych metoda sieci neuronowych nie przyniosła oczekiwanych i powtarzalnych wyników. Ponadto autorzy pisali o długim czasie działania opracowanego algorytmu. Praca zawiera rozważania teoretyczne.

Z analizy literatury wynika, że synteza odbłyśników opraw oświetleniowych jest zadaniem aktualnym. Wielu autorów stosuje liczne uproszczenia. W pracach, w których przedstawia się zaawansowane metody rozwiązania problemu odwrotnego w odniesieniu do odbłyśników opraw oświetleniowych, kładzie się nacisk na część teoretyczną. Brakuje w nich weryfikacji dokładności stosowanej metody oraz przykładów potwierdzających użyteczność zastosowanych rozwiązań. Jedyne praktyczne i efektywne zastosowania dotyczą przypadków programów komercyjnych, jednak nie są znane szczegóły dokumentacji z opisem działania algorytmów. W związku z powyższym autor uważa, że potrzebne jest opracowanie efektywnej metody syntezy odbłyśników, przy czym należy przedstawić wyniki obliczeń z uwzględnieniem różnych zadań oświetleniowych.

1.3. Cel pracy

Celem autora rozprawy jest opracowanie metody umożliwiającej syntezę kształtu elementów optycznych odbłyśników opraw oświetleniowych. Cel zostanie osiągnięty z zastosowaniem metody promieni odwrotnych i strategii ewolucyjnej oraz z uwzględnieniem różnych kryteriów oceny funkcji ustalonego celu.

Naukowe znaczenie pracy zawiera się w wykorzystaniu algorytmów ewolucyjnych do poszukiwania najlepszego rozwiązania zapewniającego uzyskanie zakładanych na wstępie parametrów fotometrycznych oprawy oświetleniowej z odbłyśnikiem.

Obecnie powszechnie stosowanym podejściem do obliczania opraw oświetleniowych jest uwzględnienie ustalonego przez projektanta modelu elementów optycznych oprawy oświetleniowej. Takie podejście umożliwia poznanie właściwości fotometrycznych oprawy przed wykonaniem jej prototypu. Metoda ta nie umożliwia jednak uzyskania optymalnego rozwiązania. Proponowany w niniejszej pracy sposób postępowania przy obliczaniu opraw oświetleniowych umożliwia projektowanie opraw o założonych na wstępie parametrach fotometrycznych. Mogą wtedy powstawać konstrukcje opraw, które w lepszy sposób będą przystosowane do zadań związanych z oświetleniem miejsc pracy.

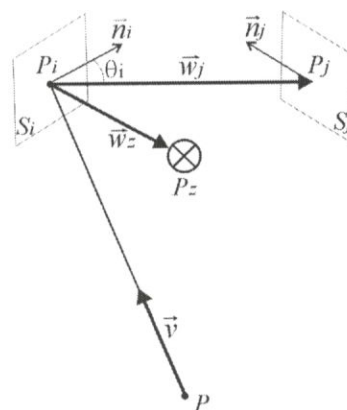
Algorytmy optymalizacji nie były do tej pory w Polsce skutecznie stosowane przy obliczaniu elementów optycznych opraw oświetleniowych. W związku z tym proponowana metoda stanowi istotny wkład w rozwój tej dziedziny nauki. Ponieważ zastosowanie metod optymalizacji w technice świetlnej jest w Polsce zagadnieniem nowym, to uzyskane wyniki oraz doświadczenia zgromadzone w trakcie wykonywania projektu mogą się przyczynić do rozwoju metod obliczeniowych stosowanych w różnych obszarach techniki świetlnej.

Opracowana przez autora rozprawy metoda optymalizacji elementów optycznych może się przyczynić do zwiększenia innowacyjności branży oświetleniowej w Polsce ze względu na jej przydatność do tworzenia narzędzi umożliwiających projektowanie nowoczesnych, oryginalnych i racjonalnie skonstruowanych opraw oświetleniowych. Obserwowany w ostatnich latach gwałtowny rozwój diod świecących wymusza stosowanie nowych rozwiązań w zakresie budowy układów optycznych. Zauważa się przy tym poszukiwania rodzimych firm w obszarze nowych, innowacyjnych konstrukcji opraw oświetleniowych z wykorzystaniem diod świecących. Przyjmuje się, że diody elektroluminescencyjne mogą w niedalekiej perspektywie mieć znaczący udział zarówno w profesjonalnych urządzeniach oświetleniowych (oświetlenie miejsc pracy we wnętrzach, oświetlenie zewnętrzne), jak i w urządzeniach przeznaczonych do użytku domowego. Wyniki niniejszej pracy mogą znaleźć zastosowanie we wszystkich wymienionych wcześniej obszarach nauki i techniki.

II. Obliczanie parametrów fotometrycznych opraw oświetleniowych metodą promieni odwrotnych

II.1. Adaptacja równania wizualizacji

Metoda promieni odwrotnych jest oparta na założeniu, że promieniowanie rozchodzi się wzdłuż liniowych ścieżek zwanych promieniami, a śledzone promienie ulegają wielokrotnym odbiciom między powierzchniami o zadanych kształtach i właściwościach fotometrycznych. Proces rozchodzenia się promieniowania jest opisywany prawami optyki geometrycznej. W metodzie śledzenia promienia odwrotnego (opracowanej na potrzeby grafiki komputerowej) promienie zaczyna się śledzić od punktu widzenia umownego obserwatora (rozprawa, rys. 3.1).



Rys. II.1. Geometryczna interpretacja oznaczeń w przyjętym modelu. Obserwator znajduje się w punkcie P , a źródło światła w punkcie P_z . Powierzchnie występujące w danym układzie są oznaczone jako S_i, S_j

W

W metodzie śledzenia promienia stosowanej w grafice komputerowej ostateczny wynik działania algorytmu jest obliczany za pomocą tak zwanego równania wizualizacji [Kajiya 1986]:

$$I(x, x') = g(x, x') \left[e(x, x') + \int_V \rho(x, x', x'') I(x', x'') dx'' \right] \quad (\text{II.1})$$

gdzie: $I(x, x')$ – intensywność promieniowania (użyto oryginalnego określenia stosowanego w grafice komputerowej) z kierunku x' , $g(x, x')$ – współczynnik przybierający wartość zero, gdy między punktami x oraz x' znajduje się nieprzezroczysty obiekt, lub wartość jeden, kiedy na linii łączącej te dwa punkty nie występuje żadna przeszkoda, $e(x, x')$ – wyrażenie uwzględniające emisję promieniowania przez pierwotne źródła, $\rho(x, x', x'')$ – współczynnik odbicia kierunkowego (pierwsze algorytmy metody śledzenia promienia umożliwiały wykonywanie obliczeń jedynie z uwzględnieniem odbicia kierunkowego) promieniowania $I(x', x'')$ w punkcie x' , padającego z kierunku punktu x'' , a odbitego w kierunku punktu x .

Metoda śledzenia promienia jest wykorzystywana najczęściej do sporządzania obrazów wizualizacji w grafice komputerowej [Wojdała 1992]. W pracy [Wandachowicz 2000] przeanalizowano podobieństwa między stosowaniem metody śledzenia promienia do tworzenia obrazów wizualizacji a wyznaczaniem rozkładów luminancji na powierzchniach analizowanej sceny.

Przekształcenie równania wizualizacji wykonano w następujący sposób:

- z wykorzystaniem definicji wskaźnika luminancji oraz równoważnej definicji natężenia oświetlenia E zapisano wzór na luminancję L_{S_i} powierzchni S_i (rozprawa, wzór 3.2),
- przyjmując geometrycznego modelu układu (rys. II.1) oraz wprowadzając sumy ze wszystkich powierzchni S_i całek iloczynu wskaźnika luminancji q_{S_i} i luminancji L_{S_j} równanie wizualizacji przekształcono do postaci umożliwiającej wyznaczenie rozkładu luminancji (rozprawa, wzór 3.3),
- wprowadzono modyfikację polegającą na podziale pół-sfery widzianej z punktu P_i na N obszarów, których rzuty na płaszczyznę poziomą mają takie same pola powierzchni; przez każdy obszar przechodzi jeden promień, a w granicach każdego z obszarów kierunku promieni są wybierane losowo (rozprawa, wzór 3.4, rys. 3.3) [Ward 1988],
- wprowadzono modyfikacje do metody Monte Carlo, które pozwalają na uniknięcie błędu związanego z nieuwzględnieniem udziału pierwotnych źródeł światła; połączono techniki deterministyczną i stochastyczną, a obliczenia są wykonywane w dwóch etapach [Wandachowicz 2000]:
 - składowa bezpośrednia jest obliczana w sposób deterministyczny, w kierunku środka każdego źródła światła wysyłany jest jeden promień,
 - składowa pośrednia dla odbicia kierunkowego, kierunkowo-rozproszonego i rozproszonego jest obliczana w sposób stochastyczny z użyciem promieni, których kierunki są wybierane losowo według algorytmu zapewniającego ich równomierne rozłożenie w całej półprzestrzeni,
- po powyższych modyfikacjach klasycznej metody Monte Carlo oraz po uwzględnieniu emisji promieniowania ze źródła P_z w kierunku obserwatora P równanie umożliwiające wyznaczenie rozkładu luminancji przybiera następującą postać (II.2):

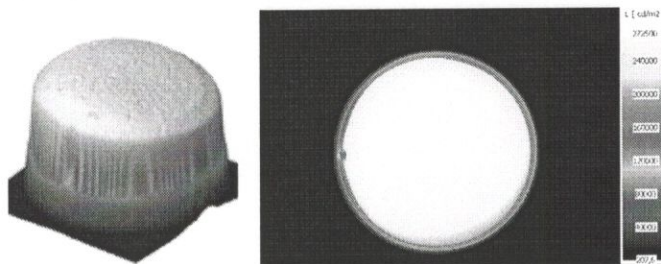
$$L_r(P_i, -\vec{v}) = \sum_z L(P_z, P) + \sum_z q(P_i, -\vec{v}, \vec{w}_z) L(P_z, -\vec{w}_z) |\cos \theta_z| \omega_z + \frac{\pi}{N} \sum_{j=0}^{N-1} q(P_i, -\vec{v}, \vec{w}_j) L(P_j, -\vec{w}_j) \quad (\text{II.2})$$

gdzie: $L(P_z, -\vec{w}_z)$ – luminancja źródła światła w kierunku $-\vec{w}_z$, ω_z – kąt bryłowy obejmujący źródło światła, o wierzchołku w punkcie P_i , $|\cos \theta_z| = |\vec{n}_i \cdot \vec{w}_z|$.

II.2. Sprawdzenie dokładności obliczeń za pomocą techniki skanowania 3D

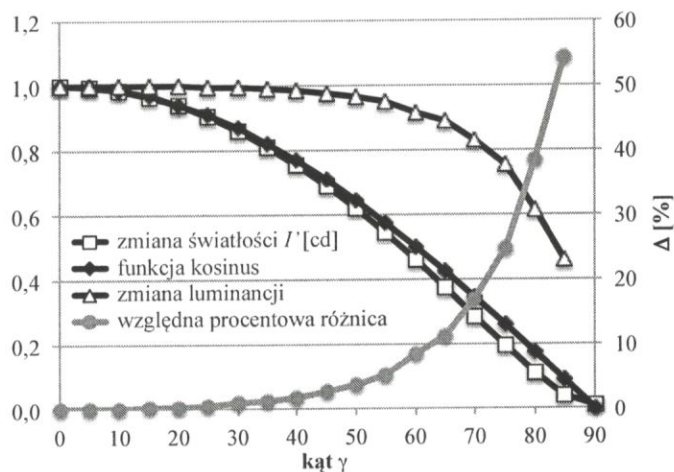
W rozdziale trzecim rozprawy przeprowadzono szereg obliczeń mających na celu sprawdzenie dokładności proponowanej metody. Autor rozprawy chciałby zwrócić uwagę na jedną z nich, w której wykorzystano technikę skanowania 3D. Wybrano dwa modele odbłyśników zwierciadlanych (ACL 5802 oraz ACL 5818), które są przeznaczone do pracy z modułem diodowym Fortimo LED DLM. Weryfikację metody obliczeniowej przeprowadzono, wykonując pomiary laboratoryjne i porównując uzyskane wyniki z wynikami przeprowadzonych symulacji.

Na rysunku II.2 przedstawiono wyniki pomiarów rozkładu luminancji na powierzchni świecącej modułu Fortimo LED DLM 2000. Można zauważyć, że rozkład luminancji nie jest równomierny ani symetryczny.



Rys. II.2. Rozkład luminancji na powierzchni świecącej modułu Fortimo LED DLM 2000; widok 3D i 2D dla kierunku $\gamma = 0^\circ$

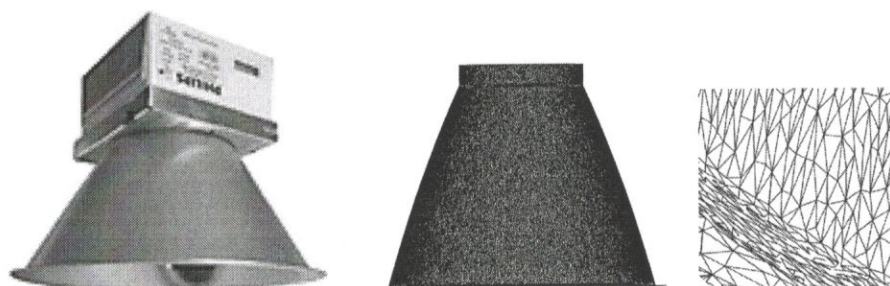
Na rysunku II.3 przedstawiono wyniki pomiarów rozsyłu strumienia świetlnego modułu Fortimo LED DLM 2000. Porównano krzywą względnych zmian światłości z przebiegiem funkcji kosinus i przedstawiono względną procentową różnicę między ich wartościami.



Rys. II.3. Zmiana światłości i zmiana luminancji powierzchni świecącej modułu Fortimo LED DLM 2000

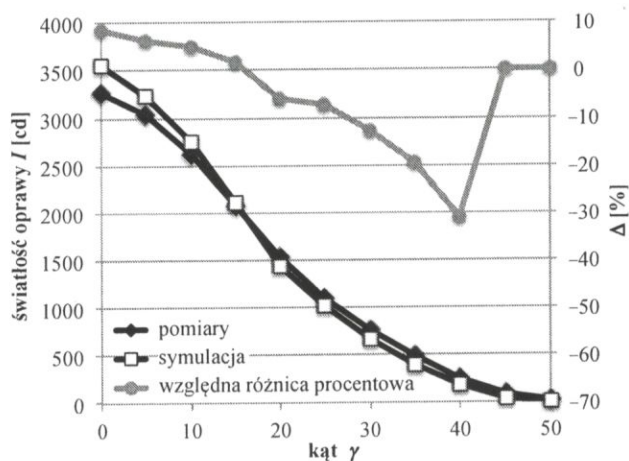
Dla źródeł spełniających kryterium prawa Lamberta przebieg zmian światłości powinien odpowiadać funkcji kosinus. Powierzchnia świecąca badanego modułu Fortimo zachowuje się prawie jak promiennik lambertowski w zakresie kątów od 0° do około 40° , a nawet do 60° . Przy większych kątach różnica między krzywą zmian światłości a przebiegiem funkcji kosinus gwałtownie rośnie. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stworzono komputerowy model źródła światła. Przyjęto, że powierzchnia świecąca modułu Fortimo nie jest promiennikiem lambertowskim. Założono, że rozkład luminancji na powierzchni modułu jest symetryczny, ale nierównomierny. Powierzchnię świecąca modułu podzielono na dziesięć pierścieni i każdemu przypisano inną wartość luminancji. Największa wartość luminancji występuje w środkowej części powierzchni świecącej modułu, a najmniejsza w skrajnej.

Skanowanie optyczne światłem strukturalnym [Kuczko 2011, Wandachowicz 2014] jest jedną z bezstykowych metod pomiarów współrzędnościowych. Metoda ta obok skanowania laserowego oraz tomografii jest jedną z najczęściej wymienianych w literaturze i stosowanych w przemyśle technik niewymagających kontaktu pomiędzy mierzonym obiektem a elementami systemu pomiarowego. Bezpośrednim wynikiem procesu skanowania jest chmura punktów. Na jej podstawie w procesie tzw. triangularyzacji uzyskuje się siatkę trójkątów (w pierwszym etapie następuje łączenie punktów odcinkami, a wynikowe odcinki są łączone w trójkąty). Oprogramowanie skanera prowadzi ten proces na bieżąco, tworząc tymczasową siatkę pomocniczą, ułatwiającą ocenę postępów procesu skanowania. Właściwa siatka trójkątów jest tworzona już po zakończeniu procesu skanowania. W opisywanych badaniach w wyniku skanowania otrzymano dwa modele odbłyśnika składające się, odpowiednio, z 62 517 oraz 51 746 powierzchni płaskich (trójkątów). Dane otrzymane w procesie skanowania przedstawiono na rysunku II.4.

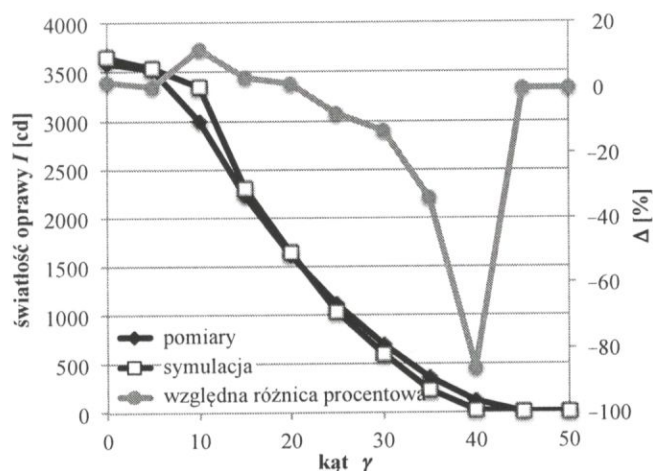


Rys. II.4. Odbłyśnik ACL z modułem Fortimo, komputerowy model odbłyśnika stworzony za pomocą skanowania 3D, powiększony fragment modelu odbłyśnika

Po otrzymaniu komputerowego modelu odbłyśnika wykonano obliczenia i uzyskano krzywe światłości dwóch odbłyśników. Na rysunkach II.5 oraz II.6 przedstawiono porównanie wyników pomiarów z wynikami symulacji dla odbłyśników ACL. Krzywe światłości uzyskane z pomiarów oraz w wyniku procesu symulacji mają bardzo podobny przebieg. Tylko lokalnie przy małych wartościach światłości względna różnica procentowa wzrasta w jednym przypadku do 30%, a w drugim do 80%. Różnica pomiędzy wartościami strumienia świetlnego zmierzonymi w laboratorium i obliczonymi metodą promieni odwrotnych wynosi, odpowiednio, 4,3% i 6,9%.



Rys. II.5. Porównanie wyników pomiarów z wynikami symulacji dla odbłyśnika ACL 5802



Rys. II.6. Porównanie wyników pomiarów z wynikami symulacji dla odbłyśnika ACL 5818

II.3. Wyniki obliczeń

Obliczenia opisane w rozdziale trzecim rozprawy wykonano za pomocą otwartego oprogramowania. Wykorzystano tu program *rtrace*, który ustala miejsca przecięcia promieni z powierzchniami danej sceny [Ward 1997]. W miejscach przecięcia algorytm zbiera dane o luminancji powierzchni, w które trafił promień, a ostateczny wynik otrzymuje się po przeliczeniu wyników cząstkowych z zastosowaniem równania (II.2). Program *rtrace* nie został opracowany w celu obliczania opraw oświetleniowych, a w niniejszej pracy przedstawiono jego jedyną skuteczną adaptację pozwalającą na wykonywanie tego typu obliczeń.

Dokładność opracowanej metody obliczania opraw oświetleniowych została przedstawiona w wielu publikacjach [Wandachowicz 2003÷2006]. W prezentowanej pracy jest ona przedmiotem rozważań w podrozdziałach 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 oraz 4.6. Z zamieszczonych tam przykładów obliczeń wynika, że:

- w przypadku opraw rozpraszających największa różnica między wartościami strumieni oprawy uzyskanymi w wyniku symulacji i w wyniku obliczeń analitycznych nie przekracza 1,4% (rozprawa, podrozdział 3.4),
- w przypadku odbłyśników kierunkowych największa różnica między wartościami strumieni oprawy uzyskanymi w wyniku symulacji i w wyniku obliczeń analitycznych nie przekracza 4,5% (rozprawa, podrozdział 3.5),
- w przypadku odbłyśników o odbiciu kierunkowo-rozproszonym największa różnica między wartościami strumieni oprawy uzyskanymi w wyniku symulacji i w wyniku pomiarów fotometrycznych nie przekracza 2% (rozprawa, podrozdział 3.6),
- w przypadku odbłyśników kierunkowych największa różnica między wartościami strumieni oprawy uzyskanymi w wyniku symulacji (z wykorzystaniem techniki skanowania 3D) i w wyniku pomiarów fotometrycznych nie przekracza 7% (rozprawa, podrozdział 3.7),
- w przypadku odbłyśników kierunkowych największa różnica między wartościami światłości oprawy (w zakresie kątów γ do 40°) uzyskanymi w wyniku symulacji i w wyniku pomiarów fotometrycznych (z wykorzystaniem techniki wydruku 3D) nie przekracza 5% (rozprawa, podrozdział 4.6).

Różnice między wartościami strumieni opraw, uzyskane w wyniku porównania wyników symulacji z wynikami pomiarów i wynoszące 4,3% i 6,9%, mieszczą się w zakresie błędu pomiarowego, na który składają się błąd skalowania wzorca, błąd związany z zamocowaniem oprawy w osi fotometru, błąd pomiaru odległości i błąd pomiaru kąta. Dokładność na poziomie 5÷10% wydaje się wystarczająca, gdyż w praktyce błędy są zazwyczaj znacznie większe [Oleśkiński 1978, Zaremba 2010].

Jeżeli przyjmie się odpowiednią dyskretyzację powierzchni (podział na mniejsze powierzchnie elementarne), to zastosowanie prezentowanej metody nie będzie się wiązało z ograniczeniami w zakresie stopnia skomplikowania kształtu elementów optycznych odbłyśników. Ocena dokładności metody polegająca na porównaniu wyników jej zastosowania z rezultatami obliczeń analitycznych jest możliwa wyłącznie w przypadku prostych modeli, gdyż w obliczeniach analitycznych mogą być brane pod uwagę wyłącznie bardzo proste kształty elementów optycznych (rozprawa, podrozdziały 3.4 oraz 3.5). Przykłady obliczeń z uwzględnieniem bardziej skomplikowanych kształtów zostały zaprezentowane w rozprawie chociażby w podrozdziałach 3.6, 3.7 oraz 4.6.

Składowa kierunkowa odbić może być opisywana za pomocą prawie dowolnej funkcji BRDF. Natomiast składowa wynikająca z wielokrotnych odbić może być opisywana wyłącznie za pomocą złożenia idealnego odbicia kierunkowego i rozproszonego. Jest to ograniczenie zastosowania przedstawianej metody. Jednak w przypadku rzeczywistych odbłyśników należy dążyć do tego, aby już po pierwszym odbiciu strumień świetlny wysłany z powierzchni źródła w kierunku odbłyśnika wyszedł przez otwór odbłyśnika. Tylko w takim przypadku jest możliwe uzyskanie dużej wartości sprawności oprawy oświetleniowej. Biorąc powyższe pod uwagę, należy stwierdzić, że przy pierwszym odbiciu strumienia świetlnego od powierzchni odbłyśnika jego właściwości odbiciowe mogą być opisane z przyjęciem prawie dowolnego kształtu funkcji BRDF.

III. Zastosowanie strategii ewolucyjnej do obliczania odbłyśników oświetleniowych

III.1. Wprowadzenie

Obliczenia fotometryczne związane z projektowaniem opraw oświetleniowych polegają zazwyczaj na wyznaczeniu bryły fotometrycznej (krzywych światłości) lub rozkładu luminancji na powierzchni elementów optycznych przyjętego modelu oprawy [Wandachowicz 2005].

W niniejszej pracy proponuje się nowe podejście do opisanego wyżej zagadnienia. Jeżeli założy się pewną bryłę fotometryczną (krzywą światłości), można starać się znaleźć kształt odbłyśnika, który zapewni spełnienie przyjętych założeń. Wtedy postawione zadanie staje się zadaniem optymalizacji, polegającym na wyznaczeniu najlepszego rozwiązania (np. optymalnego kształtu odbłyśnika) ze względu na określone kryterium (np. zadana krzywa światłości). Obliczenia można wykonywać w wielu wariantach. Przykładowo, model lampy oraz właściwości zastosowanych materiałów mogą być zarówno dane, jak i poszukiwane.

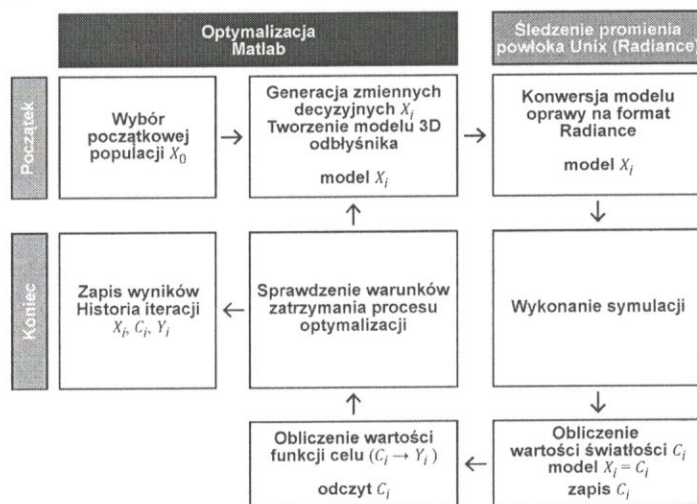
Krzywa profilowa odbłyśnika jest obliczana z wykorzystaniem numerycznych metod optymalizacji. Mechanizm działania tych metod polega na generowaniu coraz lepszych rozwiązań, będących przybliżeniami poszukiwanego minimum lub maksimum rozpatrywanej funkcji. Algorytmy numeryczne startują najczęściej z zadanego punktu X_0 i zatrzymują się po spełnieniu specyficznego warunku, zwanego warunkiem stopu. Wynikiem jest ostatni osiągnięty punkt X_K . Prawie zawsze jest on jedynie przybliżeniem rozwiązania optymalnego. Metody numeryczne stosuje się między innymi wtedy, gdy dokładny model matematyczny problemu nie jest osiągalny, a dostępne są jedynie zbiory próbek wartości funkcji celu zgromadzone w trakcie badań [Chong 2001, Goldberg 2003, Michalewicz 2003].

W kolejnych krokach proponowanej metody dla przyjętej krzywej profilowej obliczane są z wykorzystaniem techniki promieni odwrotnych parametry fotometryczne odbłyśnika (np. wartości światłości $I_{C,\gamma}$). Kształt krzywej profilowej ulega zmianie w kolejnych iteracjach procesu optymalizacji, tak aby uzyskiwane parametry fotometryczne w coraz większym stopniu zapewniały spełnienie przyjętego kryterium.

Opisywana metoda wymaga wykonania obliczeń bezpośrednich w każdej iteracji. Podejmowane są wielokrotne próby ulepszenia modelu oprawy oświetleniowej, przy czym decyzje o kontroli kierunków zmian modelu są podejmowane bez udziału projektanta. Projektant określa model wyjściowy, który poddawany jest ocenie z zastosowaniem algorytmu i następnie w kolejnych iteracjach zbliżany do rozwiązania, którego nie można już ulepszyć.

Schemat obliczeń można podzielić na dwie zasadnicze części (rys. III.1). W części pierwszej algorytm optymalizacji działa w środowisku programu Matlab:

- wybierana jest początkowa populacja X_0 ,
- tworzony jest model oprawy (kształt elementów optycznych),
- algorytm optymalizacji wybiera kolejne wartości zmiennej decyzyjnej X_i , które mają prowadzić do uzyskania minimum funkcji $F(X)$,
- model oprawy ulega zmianie dla kolejnych wartości zmiennej decyzyjnej X_i ,
- odczytywana jest wartość funkcji celu $Y_i = F(X)$,
- następuje zapis wyników dla poszczególnych iteracji,
- sprawdzany jest warunek stopu.



Rys. III.1. Schemat wykonywania obliczeń: X_i – zmienna decyzyjna, Y_i – wartość funkcji celu uzyskana w kolejnej iteracji

W części drugiej wykonuje się obliczenia (symulacje) parametrów fotometrycznych oprawy z wykorzystaniem metody promieni odwrotnych w środowisku Radiance i powłoce systemu Unix [Wandachowicz 2004, 2005]:

- model oprawy jest zapisywany w formacie systemu Radiance,
- wykonywana jest analiza rozchodzenia się promieni (program *rtrace*) oraz zbierane są cząstkowe dane potrzebne do obliczenia parametrów fotometrycznych oprawy,
- zapisywane są wyniki obliczeń, które umożliwiają obliczenie wartości funkcji celu Y_i .

Następuje wymiana danych między obiema częściami algorytmu:

- w procesie symulacji jest odczytywany zapisany w pierwszej części model elementów optycznych oprawy oświetleniowej,
- w procesie optymalizacji, w celu określenia wartości funkcji celu, są odczytywane obliczone za pomocą drugiej części (symulacja) parametry fotometryczne oprawy oświetleniowej.

III.2. Programowanie ewolucyjne

Algorytm genetyczny wykorzystuje trzy główne operacje na każdym etapie tworzenia nowej generacji z bieżącej populacji:

- selekcja (wybór rodziców spośród osobników w danej populacji),
- krzyżowanie (łączenie rodziców, którzy tworzą osobniki dla następnego pokolenia),
- mutacja (wprowadzanie losowych zmian dla wybranych rodziców).

W niniejszej pracy zastosowano następujące rozwiązania [Michalewicz 2003]:

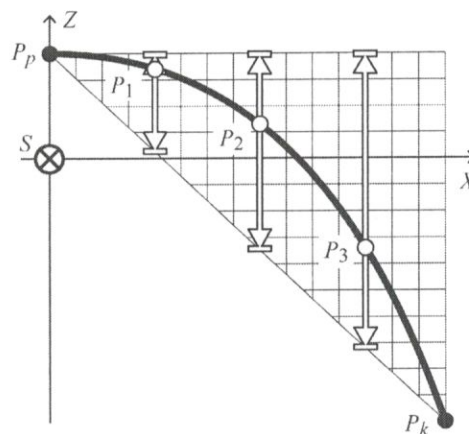
- Reprezentacja zmiennoprzecinkowa. Obszarem działania klasycznego algorytmu genetycznego jest binarna reprezentacja osobników. W metodzie opisywanej w tej pracy za-

stosowano jednak reprezentację zmiennoprzecinkową. Głównym celem takiego rozwiązania jest przybliżenie algorytmu do przestrzeni zadania. Zmiennymi w zadaniu są współrzędne węzłów interpolacji tworzące profil odbłyśnika. W reprezentacji zmiennoprzecinkowej dwa punkty usytuowane blisko siebie w przestrzeni reprezentacji będą się także znajdowały blisko siebie w przestrzeni zadania (i na odwrót). Zazwyczaj nie jest to możliwe w reprezentacji binarnej.

- Skalowanie metodą nadawania rang. Skalowanie polega na uszeregowaniu populacji według wartości funkcji celu. Liczba kopii, jaką otrzymuje dany osobnik, zależy od jego miejsca w szeregu (rangi). Najlepiej przystosowany osobnik znajduje się na początku szeregu (ranga 1). W wyniku skalowania z nadawaniem rang punktacja słabiej przystosowanych osobników ulega wyrównaniu z jednoczesnym zachowaniem dużej różnorodności populacji potrzebnej do przeszukania wystarczająco dużego obszaru.
- Selekcja liniowa przenosi do następnego pokolenia dwa najlepiej przystosowane osobniki.
- Metoda krzyżowania heurystycznego. Krzyżowanie heurystyczne prowadzi do utworzenia potomka usytuowanego na linii zawierającej dwoje rodziców, w niewielkiej odległości od rodzica lepiej przystosowanego i z dala od rodzica gorzej przystosowanego. Ten rodzaj krzyżowania jest istotnie związany z zadaniem i umożliwia dobre ukierunkowanie poszukiwań. Z symulacji wynika, że krzyżowanie heurystyczne bardziej przyspiesza przeszukiwanie zadanego obszaru niż krzyżowanie jedno- lub wielopunktowe.
- Mutacja równomierna. Wielkość mutacji, która jest proporcjonalna do odchylenia standardowego, zmniejsza się w każdym nowym pokoleniu. Dzięki kontroli wielkości mutacji można znaleźć równowagę między naporem selekcyjnym a różnorodnością populacji. Kiedy proces zatrzymuje się w lokalnym minimum, można powrócić do początkowej wielkości mutacji i ponownie zacząć przeszukiwać większy obszar zadania. Strategia zmiany różnorodności populacji, pomocna w wydostaniu się z pułapki lokalnego minimum, została zaprezentowana w rozprawie w podrozdziale 4.4.2.

III.3. Model odbłyśnika

Kształt elementów optycznych oprawy (np. profil odbłyśnika) można odwzorować za pomocą wielomianu interpolacyjnego wyższego rzędu. Zmienne decyzyjne X_i mogą być wtedy współrzędnymi punktów, przez które będzie przechodziła krzywa profilu odbłyśnika. Na rysunku III.2 przedstawiono krzywą profilu odbłyśnika o symetrii obrotowej (oś obrotu Z). Ustalono jako niezmiennie położenie dwóch punktów: początkowego P_p oraz końcowego P_k .



Rys. III.2. Rysunek profilu odbłyśnika o symetrii obrotowej: Z – oś obrotu; S – źródło światła; P_p, P_k – stałe punkty, które nie zmieniają położenia i wyznaczają początek oraz koniec profilu odbłyśnika; P_1, P_2, P_3 – węzły interpolacji (strzałki pokazują dopuszczalne zakresy zmiany współrzędnych Z), X – połowa średnicy, na której położony jest bieżący punkt profilu odbłyśnika

Punkty te określają wymiary odbłyśnika (wysokość i średnicę). Z kolei położenie współrzędnych X punktów P_1 , P_2 i P_3 jest ustalone jako niezmiennie, a położenie współrzędnych Z tych punktów może się zmieniać. Zaznaczony na rysunku dopuszczalny zakres zmian położenia punktów P_1 , P_2 i P_3 w osi Z wynika z przyjęcia założenia, że krzywa profilu odbłyśnika powinna być wypukła w górę (druga pochodna ma wartość dodatnią), tj. powinna się znaleźć w trójkącie z zaznaczonymi liniami siatki współrzędnych.

Klasyczna metoda interpolacji funkcjami sklejanymi trzeciego stopnia należy do klasy C^2 , co oznacza ciągłość drugiej pochodnej [De Boor 1978]. Dzięki temu funkcja zachowuje ciągłość krzywizny, jednak nie zachowuje monotoniczności w przedziałach pomiędzy węzłami interpolacji. W przypadku danych, które zmieniają się w sposób monotoniczny, wielomian interpolujący te dane powinien również zmieniać się w sposób monotoniczny.

Istnieją równocześnie metody interpolacji z zachowaniem monotoniczności funkcji. Funkcja sklejana nie należy w takim przypadku do klasy C^2 . Zachowana jest ciągłość pierwszej pochodnej (klasa C^1), jednak w jej przebiegu można zauważyć charakterystyczne ostre zagięcia. Metody te są czasami nazywane metodami interpolacji z ochroną kształtu.

Krzywa profilu odbłyśnika pomiędzy punktami P_p i P_k jest interpolowana za pomocą funkcji sklepanych trzeciego stopnia. Wielomian Hermite'a jest podobny do wielomianu Newtona, ponieważ w obu przypadkach do ich utworzenia wykorzystuje się iloraz różnicowy. W odróżnieniu od interpolacji wielomianem Newtona interpolacja wielomianem Hermite'a polega na wykorzystaniu zarówno wartości współrzędnych punktów (x_k, z_k) , jak i wartości pierwszej pochodnej w tych punktach $f'(x_k)$ dla $k = 1, \dots, n$.

Punkty (x_k, z_k) dla $k = 1, \dots, n$ są nazywane węzłami interpolacji. W przedziałach $x_k \leq x \leq x_{k+1}$ pomiędzy węzłami interpolacji wartości funkcji interpoluje się za pomocą wielomianów Hermite'a trzeciego stopnia. Zbiór tych wielomianów dla wszystkich przedziałów $x_k \leq x \leq x_{k+1}$ tworzy funkcję sklejaną. Jeżeli nie jest możliwe obliczenie pochodnych dla danego zestawu punktów, to należy obliczyć współczynniki kierunkowe d_k stycznych przechodzących przez te punkty. Metody interpolacji funkcjami sklejanymi różnią się sposobem wyznaczania współczynników d_k .

Niech h_k (III.1) oznacza długość k -tego przedziału pomiędzy węzłami interpolacji. Iloraz różnicowy dla tego przedziału jest oznaczony jako δ_k (III.2), a współczynnik kierunkowy stycznej w punkcie x_k jako d_k (III.3).

$$h_k = x_{k+1} - x_k \quad (III.1)$$

$$\delta_k = \frac{z_{k+1} - z_k}{h_k} \quad (III.2)$$

$$d_k = P'(x_k) \quad (III.3)$$

Wielomian interpolacyjny Hermite'a spełnia cztery warunki interpolacji, dwa dla wartości funkcji (III.4) i dwa dla ewentualnie nieznanymi wartości pochodnych (III.5):

$$P(x_k) = z_k \quad (III.4)$$

$$P(x_{k+1}) = z_{k+1}$$

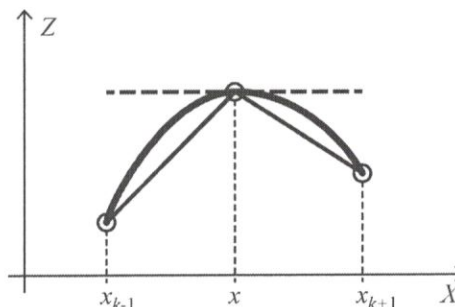
$$P'(x_k) = d_k \quad (III.5)$$

$$P'(x_{k+1}) = d_{k+1}$$

Jeśli nie są znane pochodne, to należy obliczyć współczynniki kierunkowe stycznych d_k . Metoda Fritscha i Carlsona umożliwia obliczanie współczynników kierunkowych, które pozwalają zachować tzw. ochronę kształtu interpolowanego wielomianu [Fritsch 1980]. W niniejszej pracy obliczenia wykonano z zastosowaniem funkcji *pchip* (akronim pochodzący od angielskiej nazwy metody: *piecewise cubic hermite interpolation*) z programu Matlab [Moler 2004, Wandachowicz 2010].

Założeniem metody jest uzyskanie takich wartości współczynników d_k , dla których, przynajmniej lokalnie, wartości interpolowanego wielomianu będą równe wartościom interpolowanych danych. Jeśli δ_k i δ_{k-1} mają przeciwne znaki lub jeśli są równe zero, to punkt x_k tworzy lokalne minimum lub maksimum i wartość współczynnika kierunkowego stycznej d_k jest ustawiona jako zero. Ten przypadek zilustrowano na rysunku III.3.

Dwa proste odcinki przedstawiają interpolację liniową. Współczynniki kierunkowe prostych przechodzących przez te odcinki mają różne znaki. Krzywa zaznaczona grubszą linią przedstawia wielomian interpolacyjny utworzony z dwóch wielomianów trzeciego stopnia. Wielomiany te łączą się w punkcie x_k , a ich pochodne w tym punkcie są równe zero. Linia kreskowa przedstawia styczną w punkcie x_k do krzywej opisanej wielomianem interpolacyjnym. Współczynnik kierunkowy tej stycznej ma wartość zero, zachowana jest ciągłość pierwszej pochodnej, jednak druga pochodna nie zachowuje ciągłości.

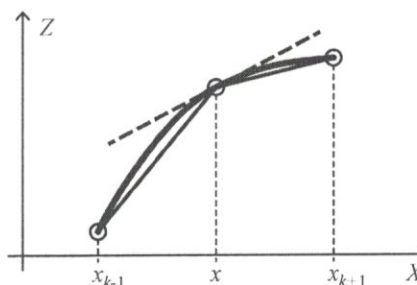


Rys. III.3. Obliczanie współczynnika nachylenia stycznej w punkcie x_k , przypadek pierwszy

Jeżeli δ_k i δ_{k-1} mają takie same znaki oraz przedziały h_k i h_{k-1} mają taką samą długość, to współczynnik kierunkowy stycznej w punkcie x_k jest obliczany jako średnia harmoniczna ilorazów różnicowych sąsiednich przedziałów [Fritsch 1980, Moler 2004]:

$$\frac{1}{d_k} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\delta_{k-1}} + \frac{1}{\delta_k} \right) \quad (\text{III.6})$$

Linia kreskowa przedstawia styczną w punkcie x_k do krzywej opisanej wielomianem interpolacyjnym (rys. III.4). Odwrotność współczynnika kierunkowego tej stycznej jest średnią arytmetyczną odwrotności współczynników kierunkowych prostych przechodzących przez odcinki tworzące interpolację liniową w sąsiednich przedziałach. Ponownie zachowana jest ciągłość pierwszej pochodnej, jednak druga pochodna nie zachowuje ciągłości.



Rys. III.4. Obliczanie współczynnika nachylenia stycznej w punkcie x_k , przypadek drugi

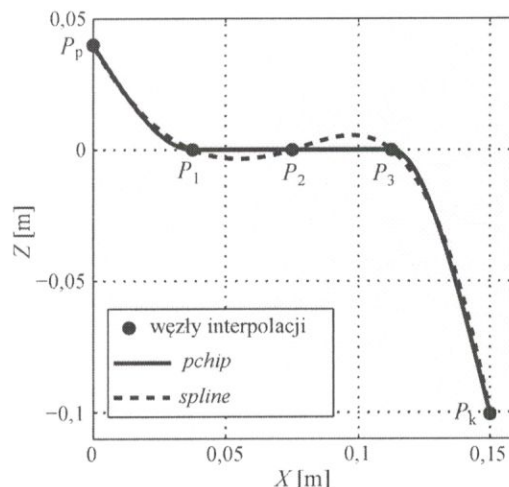
Jeżeli δ_k i δ_{k-1} mają takie same znaki, ale przedziały h_k i h_{k-1} mają różną długość, to współczynnik kierunkowy stycznej w punkcie x_k jest obliczany jako ważona średnia harmoniczna ilorazów różnicowych sąsiednich przedziałów:

$$\frac{w_1 + w_2}{d_k} = \frac{w_1}{\delta_{k-1}} + \frac{w_2}{\delta_k} \quad (\text{III.7})$$

$$w_1 = 2h_k + h_{k-1} \quad (\text{III.8})$$

$$w_2 = h_k + 2h_{k-1}$$

Na rysunku III.5 przedstawiono porównanie interpolacji profilu odbłyśnika wykonanych za pomocą funkcji *pchip* oraz funkcji *spline* (interpolacja funkcjami sklejanymi trzeciego stopnia należącymi do klasy C^2). W przedziałach wyznaczonych przez trzy środkowe punkty ($P_1 \div P_3$) funkcja *spline*, interpolująca profil odbłyśnika, nie jest monotoniczna, chociaż dane (punkty $P_1 \div P_3$) układają się wzdłuż linii prostej. Ze względu na konieczność ochrony kształtu do interpolacji profilu odbłyśnika zastosowano funkcję *pchip*.



Rys. III.5. Interpolacja profilu odbłyśnika za pomocą funkcji *pchip* oraz *spline*

III.4. Dyskretyzacja powierzchni odbłyśnika

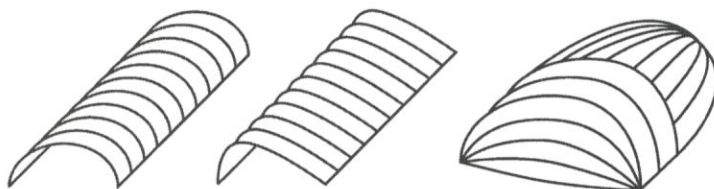
Model 3D odbłyśnika o symetrii obrotowej jest tworzony poprzez obrót dookoła osi pionowej krzywej profilowej uzyskanej za pomocą interpolacji wielomianem Hermite'a. Powierzchnia odbłyśnika poddawana jest dyskretyzacji według podziału promieniowo-kątowego i składa się z trójkątów i czworokątów. Działanie algorytmu jest oparte na wykorzystaniu dwóch zmiennych, które decydują o wielkości tworzonych powierzchni elementarnych. Jako dane wejściowe ustalane są współrzędne x punktów stanowiących węzły interpolacji (punkty P_1, P_2, P_3 na rysunku III.2). Interpolacja wielomianem Hermite'a umożliwia obliczenie współrzędnych punktów tworzących interpolowaną krzywą profilu odbłyśnika poza węzłami interpolacji. Interpretację geometryczną zilustrowano w rozprawie za pomocą rysunku 4.8. Wzory pozwalające na obliczanie współrzędnych wierzchołków elementarnych powierzchni czworokąta są obliczane z zależności (4.13)–(4.17).

Stworzenie modelu 3D powierzchni odbłyśnika, który nie będzie się cechował symetrią obrotową, polega na dokonaniu podziału na strefy kątowe α (rozprawa, rys. 4.9), w wyniku czego otwór wyjściowy odbłyśnika będzie miał kształt prostokąta lub kwadratu. Współrzędne wierzchołków elementarnych powierzchni czworokąta, dla kolejnych stref są obliczane z zależności (4.18)–(4.25).

W podrozdziałach 4.4.5, 4.4.6, 4.4.7 oraz 4.5 przedstawiono przykłady obliczeń, w których obliczany w kolejnych iteracjach profil odbłyśnika zmienia nie tylko swój kształt ale również wysokość i szerokość.

Zaproponowana metoda umożliwia tworzenie wielu innych kształtów odbłyśników na podstawie krzywej profilowej tworzonej z wykorzystaniem interpolacji wielomianem Hermite'a. Na rysunku III.6 przedstawiono przykładowe formy odbłyśników:

- odbłyśnik walcowy symetryczny,
- odbłyśnik walcowy niesymetryczny,
- odbłyśnik o jednej płaszczyźnie symetrii, w którym można wyróżnić dwie części modelowane za pomocą dwóch krzywych profilowych.



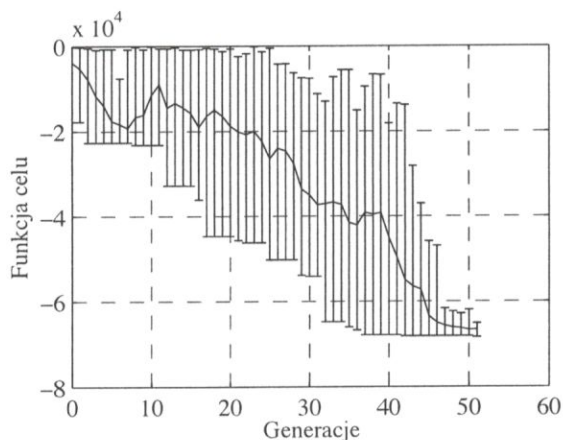
Rys. III.6. Przykładowe kształty modeli odbłyśników; pokazano krzywe profilowe

III.5. Obliczanie profilu odbłyśnika

Pierwszy przykład pozwalający na ocenę działania proponowanej metody dotyczy prostego zadania, w którym należy obliczyć profil odbłyśnika, który przy zadanych wymiarach zapewni jak największą wartość światłości w osi. Funkcją celu jest wartość światłości oprawy w osi odbłyśnika $I_{\gamma=0}$ a postawiony problem można streścić następująco:

- zmienna: współrzędne w osi Z punktów P_1, P_2 i P_3 ,
- ograniczenia: $(-0,9375 x + 0,04) < P_1, P_2, P_3 < 0,04$,
- funkcja celu: $I_{\gamma=0}$ (światłość w kącie $\gamma = 0$).

Na rysunku III.7 przedstawiono zmianę funkcji celu w kolejnych iteracjach działania algorytmu genetycznego. Im mniejsza jest wartość funkcji celu, tym większa wartość światłości w osi odbłyśnika. Pionowe kreski oznaczają zakres wartości funkcji celu dla całej populacji. W końcowej fazie obliczeń zauważa się zmniejszenie liczby mutacji oraz różnorodności populacji. Różnorodność populacji w początkowej fazie obliczeń jest niezbędna do znalezienia minimum globalnego. W zastosowanych metodach obliczeniowych wykorzystuje się liczby generowane losowo, co powoduje, że za każdym razem uzyskiwane jest nieco inne rozwiązanie. Z tego powodu, aby otrzymać wartości średnie, umożliwiające statystyczną analizę wyników, wykonano dziesięć serii obliczeń.



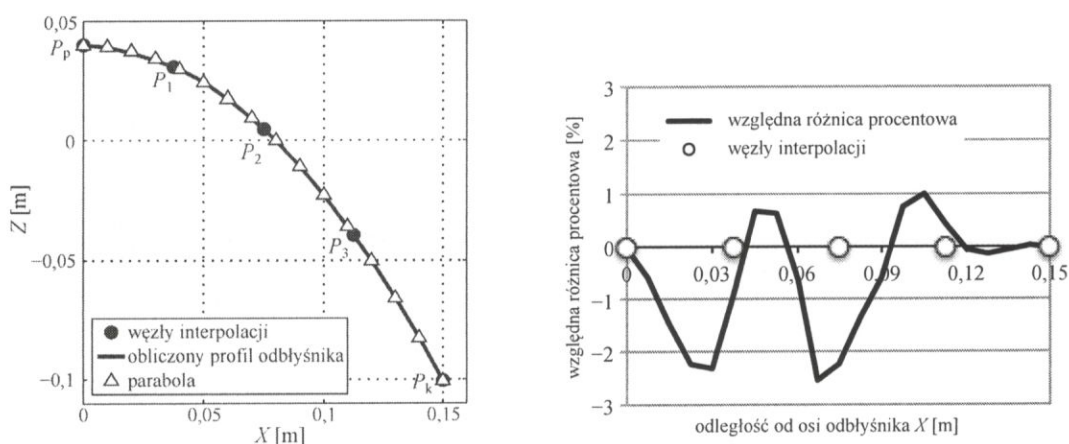
Rys. III.7. Ilustracja procesu optymalizacji w jednej serii obliczeń. Wartości funkcji celu (odpowiadające wartościom światłości w osi $I_{\gamma=0}$ ze znakiem minus) zmieniające się w kolejnych iteracjach procesu optymalizacji kształtu profilu odbłyśnika

Prezentowany przykład służy do oceny skuteczności proponowanej metody bowiem rozwiązanie postawionego zadania jest znane [Oleszyński 1978]. Maksymalną światłość w osi można uzyskać z użyciem odbłyśnika paraboloidalnego. Światłość oprawy oświetleniowej z takim odbłyśnikiem można obliczyć ze wzoru 4.27 zaprezentowanego w rozprawie. W tabeli III.1 przedstawiono podsumowanie wyników. Względna procentowa różnica pomiędzy wartościami światłości wynosi 0,9%.

Na rysunku III.8 przedstawiono porównanie kształtu profilu odbłyśnika uzyskanego w wyniku działania algorytmu optymalizacji z krzywą paraboli. Kształt obliczonego profilu odbłyśnika jest podobny do kształtu paraboli. Z przebiegu zmian względnej procentowej różnicy między współrzędnymi w osi Z obliczonego profilu oraz profilu paraboli wynika, że różnica między współrzędnymi nie przekracza trzech procent. Na podstawie analizy wyników można stwierdzić, że algorytm optymalizacji doprowadził do uzyskania wyniku zbliżonego do optymalnego.

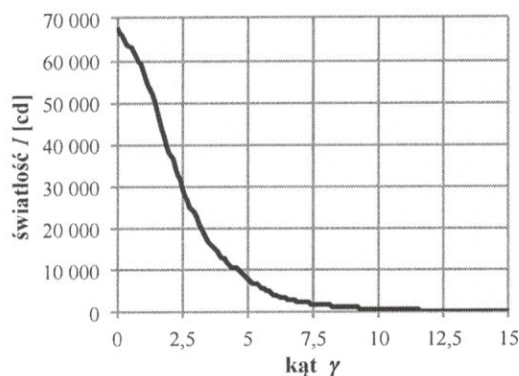
Tabela III.1. Podsumowanie wyników obliczeń dla kryterium maksymalnej wartości światłości

Nazwa	Algorytm genetyczny	Obliczenia analityczne
Światłość $I_{\gamma=0}$	68 359 cd	67 775 cd
Najlepsze rozwiązanie (współrzędne w osi Z)		
P_1	0,030926 m	0,031211 m
P_2	0,004735 m	0,004844 m
P_3	-0,039275 m	-0,039102 m
Liczba iteracji	1040	-
Liczba iteracji do czasu wykonania obliczeń [s] (Intel Core Duo T2450 2,0 GHz)	1040 / 2425 s = 0,43	-
Procentowa liczba uzyskanych wyników w granicach 100±95% najlepszej teoretycznej wartości	174 / 1024 = 17%	-



Rys. III.8. Porównanie profilu odbłyśnika obliczonego w procesie optymalizacji z krzywą paraboliczną; względna procentowa różnica między współrzędnymi w osi Z profilu (zaznaczono położenie węzłów interpolacji)

Na rysunku III.9 przedstawiono krzywą światłości odbłyśnika, którego kształt obliczono z zastosowaniem opisanej metody optymalizacji.



Rys. III.9. Obliczona krzywa światłości odbłyśnika

III.6. Strategia zmiany różnorodności populacji

Jedną z przyczyn niemożności znalezienia optymalnego rozwiązania jest przedwczesna zbieżność obliczeń. Wtedy algorytm prowadzi do uzyskania rozwiązania w postaci jedynie optimum lokalnego, a nie globalnego. Jeżeli zbieżność zachodzi zbyt szybko, to traci się informacje o potencjalnie korzystnie rozwijającej się populacji. W strategii ewolucyjnej występują

dwa istotne czynniki, które konkurują ze sobą w procesie optymalizacji: różnorodność populacji oraz napór selekcyjny. Za stan różnorodności populacji odpowiadają operatory mutacji i krzyżowania, podczas gdy napór selekcyjny jest związany z utrzymaniem najlepszych osobników [Słowik 2007].

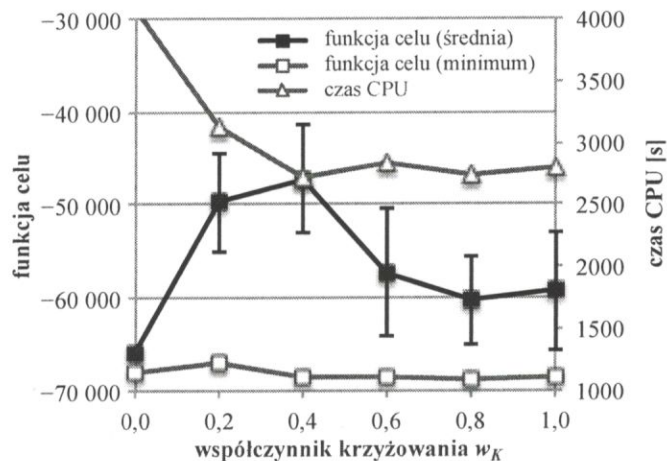
Do nowo tworzonego pokolenia algorytm przenosi pewną liczbę osobników elitarnych N_E (osobniki najlepiej przystosowane). Wartość współczynnika krzyżowania w_K decyduje o liczbie osobników poddanych procesowi krzyżowania N_K i procesowi mutacji N_M . Proporcje między tymi operatorami wpływają na różnorodność populacji i na napór selekcyjny powodujący zbieżność procesu optymalizacji:

$$N_P = N_E + N_K + N_M \quad (\text{III.9})$$

$$N_K = w_K(N_P - N_E) \quad (\text{III.10})$$

gdzie N_P – liczba osobników w populacji.

Obliczenia wykonano zgodnie z opisem zamieszczonym w poprzednim podrozdziale, zmieniając wartość współczynnika krzyżowania w_K od 0 do 1 ze skokiem wynoszącym 0,2. Celem zastosowania algorytmu jest znalezienie kształtu profilu odbłyśnika, który zapewni uzyskanie jak największej wartości światłości w osi odbłyśnika. W rozprawie na rysunkach 4.15÷4.23 przedstawiono zmianę wartości funkcji celu, zmianę średniego odstępów pomiędzy osobnikami oraz wartości uzyskane przez osobniki w ostatniej generacji dla współczynnika krzyżowania w_K o wartościach 0, 0,4 i 1. Dla każdej z przyjętych wartości współczynnika w_K wykonano po dwadzieścia serii obliczeń. Na rysunku III.10 przedstawiono zmianę średniej wartości funkcji celu wraz z odchyleniem standardowym, najmniejszą wartość funkcji celu spośród uzyskanych w dwudziestu seriach oraz średni czas obliczeń. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem operatora krzyżowania heurystycznego.



Rys. III.10. Zmiana wartości funkcji celu i czasu obliczeń dla operatora krzyżowania heurystycznego

Najlepszą skuteczność uzyskano przy braku operacji krzyżowania ($w_K = 0$). Wtedy oprócz dwóch elitarnych osobników w nowym pokoleniu występują wyłącznie osobniki poddane mutacji. Zmniejsza się napór selekcyjny i algorytm może przeszukać większy obszar zadania. Jest to istotne w przypadku funkcji nieciągłych z wieloma lokalnymi optimumami. Przeszukiwanie większego obszaru zadania jest jednak kosztowne, gdyż czas obliczeń jest wtedy najdłuższy. Tylko nieco gorszą skuteczność uzyskano, gdy wartość współczynnika krzyżowania mieściła się w przedziale 0,6÷0,8. Wtedy czas wykonania obliczeń był o ok. 25% krótszy.

Ponieważ wykonanie nawet kilku serii obliczeń nie zapewnia uzyskania wyniku zbliżonego do optimum globalnego, proponuje się zmodyfikowanie strategii przeszukiwania obszaru zadania. Strategia nazwana strategią zmiany różnorodności populacji ma prowadzić do uzyskania

WA

spodziewanego rozwiązania w jednym zaprogramowanym procesie i w czasie krótszym od czasu potrzebnego do wykonania wielu serii przy każdorazowym starcie z losowo wybranej populacji początkowej.

Strategia zmiany różnorodności populacji jest realizowana w czterech etapach:

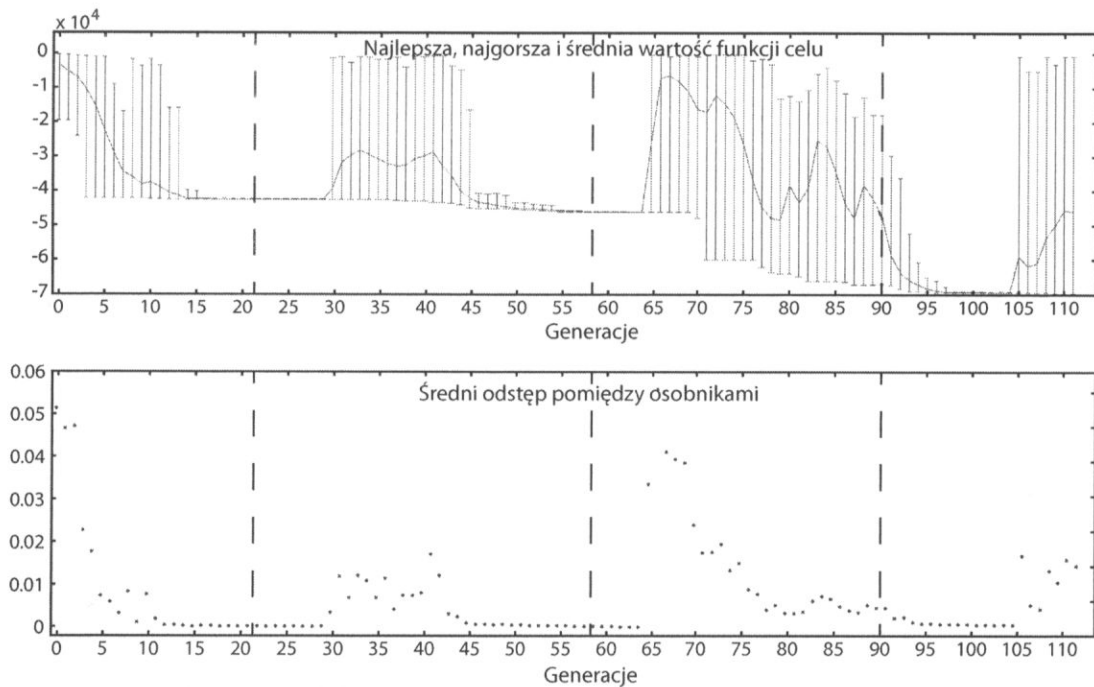
- 1) obliczenia rozpoczyna się z wartością współczynnika krzyżowania równą 0,8;
- 2) jeżeli średnia odległość między osobnikami w populacji dx_{sr} (III.11) będzie równa zakładanemu odstępowi dx_p lub mniejsza, to algorytm będzie działał tak, aby zwiększyć różnorodność populacji przez przywrócenie początkowej wartości odchylenia standardowego (rozprawa, wzór 4.2), które decyduje o średniej wielkości mutacji;
- 3) jeżeli średnia odległość między osobnikami w populacji będzie równa dx_p lub mniejsza, to algorytm będzie działał tak, aby zwiększyć różnorodność populacji przez przywrócenie początkowej wartości odchylenia standardowego (rozprawa, wzór 4.2) oraz zmianę wartości współczynnika krzyżowania na zero; wtedy jedynym operatorem, od którego zależą zmiany w populacji, jest operator mutacji;
- 4) jeżeli nastąpiła poprawa wartości funkcji celu co najmniej o 10%, to rozpoczyna się ostatni etap obliczeń, w którym przywraca się początkową wartość współczynnika krzyżowania 0,8.

We wszystkich etapach obliczeń do nowego pokolenia przenoszone są dwa elitarne osobniki najlepiej przystosowane. Również we wszystkich etapach wprowadzony jest limit liczby generacji, resetowany przy rozpoczęciu kolejnego etapu. Dodatkowo w czwartym etapie wprowadzony jest limit liczby bezproduktywnych generacji. Usunięcie z trzeciego etapu operacji krzyżowania i pozostawienie jedynie operatora mutacji powoduje, że algorytm przeszuka większy obszar zadania, aby sprawdzić, czy bieżące optimum jest optimum globalnym. W trzech z czterech etapów w obliczeniach jest uwzględniana wartość współczynnika krzyżowania 0,8. Wybór takiej wartości spowodowany jest tym, że, jak wykazano wcześniej (rys. III.10), algorytm charakteryzuje się wtedy stosunkowo dużą skutecznością przy krótkim czasie obliczeń. Strategia zmiany różnorodności populacji umożliwia wydostanie się z pułapki lokalnego minimum.

$$dx_{sr} = \frac{1}{n m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\bar{x}_i - x_j) \quad (\text{III.11})$$

gdzie: \bar{x}_i – średnia wartość zmiennej x_i w danej populacji, m – liczba osobników w populacji, n – liczba zmiennych.

Na rysunku III.11 przedstawiono zmianę wartości funkcji celu oraz zmianę średniego odstepu między osobnikami w kolejnych generacjach. Pionowymi liniami kreskowymi zaznaczono granice między etapami obliczeń. W pierwszym etapie osiągnięto optimum lokalne, a kiedy średni odstęp między osobnikami zrównał się z zakładanym odstępem dx_p , wówczas algorytm przeszedł do drugiego etapu i zwiększył średnią wielkość mutacji. Po kilku generacjach algorytm zaczął przeszukiwać większy obszar zadania i znalazł lepiej przystosowane osobniki. Poprawa nie była jednak znacząca i w kolejnym, trzecim etapie zrezygnowano z operatora krzyżowania. Algorytm zaczął przeszukiwać jeszcze większy obszar zadania i zwiększyła się średnia odległość między osobnikami. Znalaziono osobniki znacznie lepiej przystosowane. W ostatnim etapie pomimo przeszukiwania dosyć dużego obszaru zadania nie nastąpiła poprawa wartości funkcji celu i algorytm zakończył obliczenia.



Rys. III.11. Zmiana wartości funkcji celu oraz średniego odstepu między osobnikami w kolejnych generacjach (pionowymi liniami kreskowymi zaznaczono granice między etapami obliczeń)

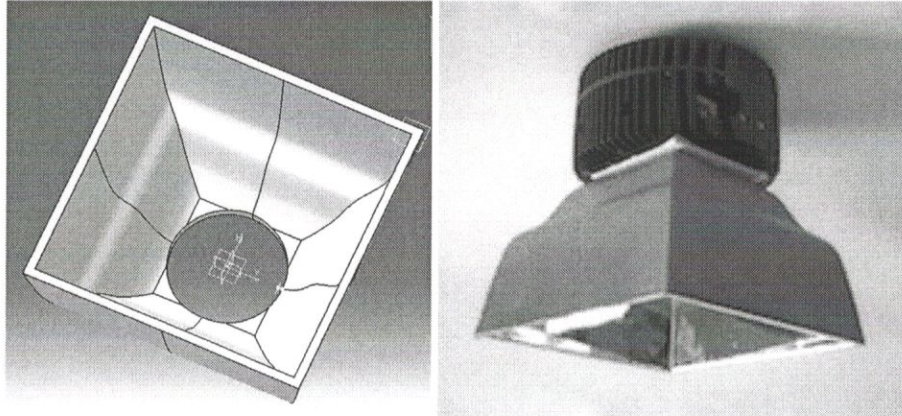
III.7. Funkcja celu

Wykonano szereg obliczeń, w których sprawdzono skuteczność działania proponowanej metody z następującymi postaciami funkcji celu:

- Funkcja celu z funkcją kary zastosowana w zadaniu polegającym na znalezieniu takiej krzywej profilowej (odbłyśnik o symetrii obrotowej), która zapewni maksymalną wartość światłości odbłyśnika w osi oraz użyteczny kąt rozwarcia 10° , 20° lub 40° (rozprawa, podrozdział 4.4.3, wzory 4.31 oraz 4.32).
- Funkcja celu z funkcją kary zastosowana w zadaniu polegającym na znalezieniu takiego kształtu odbłyśnika, który zapewni uzyskanie jak największej wartości średniego natężenia oświetlenia z zachowaniem odpowiedniej równomierności oświetlenia na oświetlanej powierzchni. Odbłyśnik oświetla powierzchnię w kształcie kwadratu. Model odbłyśnika nie ma w tym przypadku symetrii obrotowej, jego dolny i górny otwór mają kształt kwadratu. Źródło światła (moduł LED) ma duże rozmiary w stosunku do rozmiaru odbłyśnika (rozprawa, podrozdział 4.4.4, wzory 4.33 oraz 4.34).
- Funkcja celu z funkcją kary w zadaniu, w którym zastosowano kryterium natężenia oświetlenia dla źródła o niewielkich rozmiarach (rozprawa, podrozdział 4.4.5).
- Funkcja celu w postaci ważonej sumy kwadratów różnic między wartościami obliczoną i oczekiwaną (rozprawa, podrozdział 4.4.6, wzór 4.37).
- W podrozdziale 4.4.7 przedstawiono metodę umożliwiającą wykonywanie obliczeń z ograniczeniami powodującymi, że krzywa profilowa odbłyśnika jest monotoniczna. Zaproponowano funkcję przystosowania (rozprawa, wzór 4.44), w której nie ma potrzeby obliczania wartości funkcji celu na potrzeby sprawdzania naruszania ograniczeń. Jest to szczególnie istotne ze względu na to, że około 90% czasu działania algorytmu przeznaczone jest na procesy związane z obliczeniem wartości funkcji celu.
- W podrozdziale 4.5 przedstawiono implementację metody programowania wielokryterialnego. Przykładowe obliczenia wykonano stosując metodę selekcji elitarną z zastosowaniem niszczenia oraz metodę turnieju ograniczeń co prowadzi do uzyskania niezdominowanego frontu Pareta, na którym punkty tworzące rozwiązania są rozłożone bardziej równomiernie.

III.8. Prototyp odbłyśnika

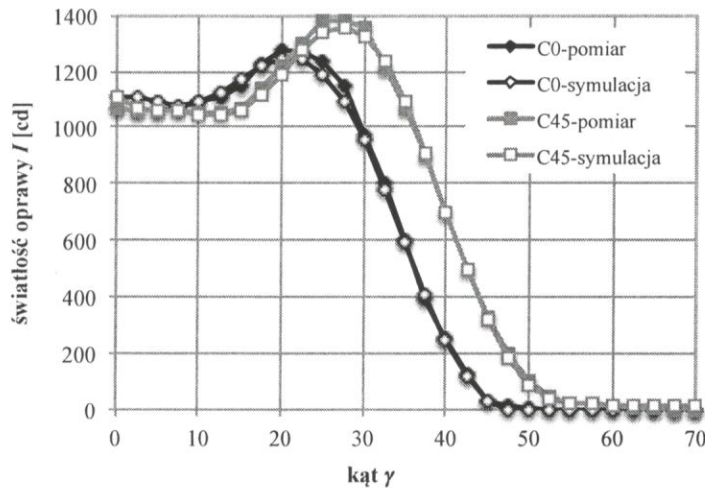
W celu dodatkowego sprawdzenia proponowanej metody obliczania odbłyśników oświetleniowych wykonano prototypowy odbłyśnik za pomocą wydruku 3D. Wybrano model odbłyśnika uzyskany w wyniku działania algorytmu optymalizacji, który został opisany w rozprawie w podrozdziale 4.4.5. Jest to odbłyśnik trójkrzywiznowy, w którym można wyróżnić trzy części, opisane za pomocą różnych krzywych (rys. III.12). Na rysunku III.12 przedstawiono komputerowy model odbłyśnika oraz wydrukowany prototyp odbłyśnika z zainstalowanym modulem diodowym.



Rys. III.12. Komputerowy model odbłyśnika przeznaczony do wydruku oraz wydrukowany prototyp

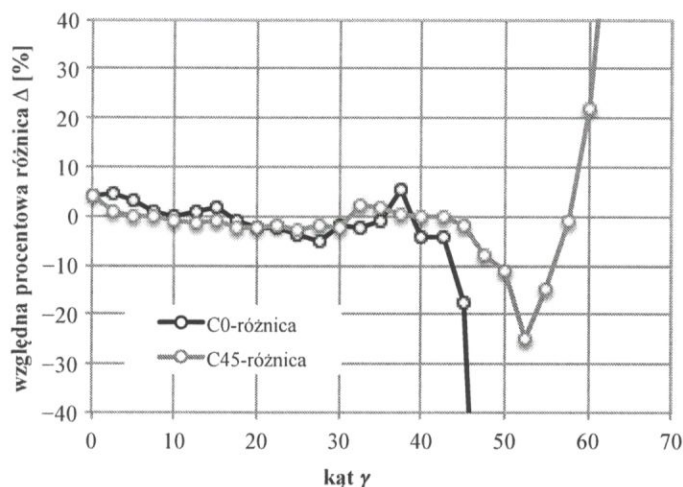
Na powierzchnię odbłyśnika napyłono warstwę aluminium w komorze próżniowej. Pomiar współczynnika odbicia strumienia świetlnego wykonano dla płaskiej powierzchni, na którą napyłono aluminium w tym samym procesie.

Na rysunkach III.13 i III.14 przedstawiono porównanie wyników pomiarów z wynikami symulacji.



Rys. III.13. Porównanie wyników pomiarów światłości z wynikami symulacji dla dwóch płaszczyzn (C0 i C45)

Krzywe światłości uzyskane na podstawie pomiarów oraz w wyniku procesu symulacji mają bardzo podobny przebieg. W przedziale do 40° względna różnica procentowa nie przekracza 5%. Powyżej 50° błąd jest już większy, ale dotyczy on punktów o bardzo małych wartościach światłości i wynika głównie z błędów metody pomiarowej.



Rys. III.14. Przebieg względnej procentowej różnicy Δ pomiędzy wartościami światłości uzyskanymi w wyniku symulacji metodą promieni odwrotnych i w wyniku pomiarów (dla płaszczyzn C0 i C45)

Weryfikacja metody obliczeniowej z zastosowaniem technik skanowania i wydruku 3D potwierdza przydatność opracowanych metod obliczania i optymalizacji kształtu odbłyśników opraw oświetleniowych.

IV. Zakończenie

Stosowane dotychczas metody obliczania opraw oświetleniowych polegały głównie na wyznaczaniu parametrów fotometrycznych przyjętego modelu elementów optycznych oprawy. Prezentowane w pracy odmienne podejście do tego zadania polega na wyznaczaniu takich kształtów elementów optycznych oprawy oświetleniowej, które będą umożliwiały uzyskanie zakładanych jako dane wejściowe parametrów fotometrycznych. Takie działanie można nazwać syntezą. Chociaż podejmuje się udane próby syntezy, to albo wymagają one przyjmowania szeregu ograniczeń [Zaremba 2010], albo dokonywane są przez podmioty komercyjne, które nie udostępniają szczegółów działania opracowanych algorytmów [Cassarly 2002, Davenport 2004, Zumtobel 1992].

Autor rozprawy jako cel pracy określił opracowanie metody umożliwiającej syntezę kształtu elementów optycznych odbłyśników opraw oświetleniowych. Osiągnięcie celu wymagało stworzenia dwóch metod obliczeniowych.

Pierwszą z nich jest metoda obliczania parametrów fotometrycznych odbłyśników opraw oświetleniowych. Zastosowano w tym celu metodę promieni odwrotnych. Wybór tej odmiany metody promieniowej był podyktowany koniecznością wykonania obliczeń w jak najkrótszym czasie. Wysyłając promienie przeciwnie do ich naturalnego biegu, uzyskuje się większą kontrolę nad ich liczbą. Jeżeli promienie wysyła się w kierunkach, w jakich naturalnie się rozchodzą, niektóre z nich są analizowane niepotrzebnie, gdyż nie mają wpływu na ostateczny wynik. Na potrzeby obliczeń zaadaptowano równanie wizualizacji stosowane w grafice komputerowej. Opracowano procedurę obliczeń dla odbłyśników charakteryzujących się odbiciem kierunkowym, kierunkowo-rozproszonym i rozproszonym. Porównano wyniki symulacji wykonanych dla prostych modeli odbłyśników z wynikami obliczeń wykonanych za pomocą metod analitycznych. Ponadto z użyciem techniki skanowania 3D opracowano komputerowy model rzeczywistego odbłyśnika i porównano wyniki symulacji przeprowadzonych dla tego modelu z wynikami pomiarów wykonanych w laboratorium fotometrycznym. Na tej podstawie wykazano, że opracowana metoda obliczania parametrów fotometrycznych odbłyśników zapewnia uzyskanie zadowalających wyników.

Opracowana metoda może być stosowana bez ograniczeń w zakresie stopnia skomplikowania kształtów elementów optycznych, w tym kształtów i przestrzennych rozsyłów strumieni źródeł

Woj

światła. Powierzchnie uwzględniane w obliczeniach są poddawane dyskretyzacji, która polega na zastąpieniu rzeczywistej powierzchni zbiorem elementów dyskretnych (wielu małych powierzchni płaskich).

Proces analizy promieni jest oparty na zastosowaniu programu *rtrace* (z systemu Radiance [Ward 1997]). Po ustaleniu miejsc przecięcia promieni z powierzchniami danej sceny zbierane są dane o luminancji powierzchni, na które trafiają promienie, a ostateczny wynik otrzymuje się po przeliczeniu wyników cząstkowych z zastosowaniem równania (rozprawa, wzór 3.5).

Druga metoda opracowana na potrzeby tej rozprawy polega na wykorzystaniu strategii ewolucyjnych do obliczania kształtu odbłyśników opraw oświetleniowych. Założeniem zastosowanych algorytmów optymalizacji funkcji celu jest konieczność wykonywania obliczeń w wielu iteracjach. Obliczenie funkcji celu w odniesieniu do optymalizacji opraw oświetleniowych wiąże się z koniecznością wykonania symulacji na zmieniającym się w kolejnych krokach modelu elementów optycznych oprawy. Symulacje są wykonywane z zastosowaniem metody promieni odwrotnych i w zależności od stopnia skomplikowania modelu czas ich wykonania może wynosić od ułamków sekundy aż do kilkudziesięciu minut. W związku z tym łączny czas poszukiwania optymalnego rozwiązania może być bardzo długi. Z tego powodu korzystne było ograniczenie czasu wykonania pojedynczej symulacji oraz zastosowanie odpowiedniego do przyjętego problemu algorytmu, który prowadzi do uzyskania wyniku w możliwie najmniejszej liczbie iteracji.

Istotna z punktu widzenia zagadnienia optymalizacji jest możliwość uzyskania rozwiązania bliskiego ekstremum globalnemu, a nie lokalnemu. Na potrzeby poprawy efektywności algorytmu i skrócenia czasu obliczeń opracowano strategię zmiany różnorodności populacji. Strategia ta przeciwdziała przedwczesnej zbieżności obliczeń przez aktywną zmianę różnorodności populacji w całym procesie obliczeń i umożliwia wydostanie się z pułapki lokalnego ekstremum.

Skuteczność optymalizacji zależy przede wszystkim od połączenia zmiennych decyzyjnych z modelem odbłyśnika. Krzywa profilu odbłyśnika między punktami stanowiącymi zmienne decyzyjne jest interpolowana za pomocą funkcji sklepanych trzeciego stopnia. Zastosowano interpolację wielomianem Hermite'a z tzw. ochroną kształtu. Funkcja sklejana należy wtedy do klasy C^1 . Założeniem metody jest uzyskanie takich wartości współczynników kierunkowych stycznych w węzłach interpolacji, dla których przynajmniej lokalnie wartości interpolowanego wielomianu będą równe wartościom interpolowanych danych, a funkcja zachowa monotoniczność pomiędzy dwoma kolejnymi węzłami.

Opracowana procedura optymalizacji umożliwia wykonywanie obliczeń dla pewnych klas krzywych światłości. Przedstawiono przykładowe obliczenia dla krzywych światłości charakteryzujących się rozsyłem skoncentrowanym oraz rozsyłem uwydatnionym. Ponadto oprócz kryterium krzywej światłości wprowadzono kryterium uzyskania jak największej wartości średniego natężenia oświetlenia na oświetlanej powierzchni przy założonej równomierności oświetlenia.

Przedstawione w pracy przykłady optymalizacji dotyczą odbłyśników zwierciadlanych. Zastosowanie opracowanej metody nie jest ograniczone wyłącznie do odbicia kierunkowego, jednak przy próbach wprowadzania innych modeli odbicia należy się liczyć ze znacznym wydłużeniem czasu obliczeń.

Podano procedurę wykonywania obliczeń z uwzględnieniem ograniczeń liniowych, które powodują uzyskanie profilu odbłyśnika o przebiegu monotonicznym. Zastosowano metodę selekcji turniejowej zamiast metody z funkcją kary. Umożliwiło to skrócenie czasu obliczeń przez wyeliminowanie konieczności obliczania funkcji celu dla rozwiązań nieosiągalnych.

Oprócz programowania jednokryterialnego podano również sposób wykonywania obliczeń dla programowania wielokryterialnego, w którym zastosowano metodę niezdominowanego frontu Pareta. W programowaniu wielokryterialnym w celu poprawy efektywności algorytmu zastosowano selekcję elitarną z zastosowaniem niszczenia.

Algorytm optymalizacji działa w środowisku programu Matlab. Wykorzystano dostępny język programowania oraz funkcje i procedury programu głównego, a także dodatkowych narzędzi przeznaczonych do optymalizacji.

Dokładność metody optymalizacji oceniono, wykonując prototypowy odbłyśnik, którego profil obliczono z wykorzystaniem strategii ewolucyjnej. Prototyp wytworzono w procesie wydruku 3D. Powierzchnię odbłyśnika pokryto warstwą aluminium w procesie napyłania próżniowego. Uzyskano gładką powierzchnię charakteryzującą się odbiciem kierunkowym. Wyniki symulacji wykonane dla modelu odbłyśnika porównano z wynikami pomiarów wykonanych na fotometrze ramiennym. Uzyskano zadowalającą zbieżność wyników pomiarów z wynikami symulacji.

Do oryginalnych wyników rozprawy należy zaliczyć:

- adaptację równania wizualizacji na potrzeby obliczania wielkości fotometrycznych opraw oświetleniowych;
- opracowanie metody obliczania w zasadzie dowolnie skomplikowanych kształtów odbłyśników opraw oświetleniowych za pomocą metody promieni odwrotnych;
- sformułowanie algorytmu optymalizacji odbłyśników opraw oświetleniowych opartego na strategii ewolucyjnej;
- rozwiązanie problemu powiązania zmiennych decyzyjnych z modelem odbłyśnika przez wprowadzenie węzłów interpolacji oraz interpolowanie krzywej opisującej profil odbłyśnika funkcjami sklejanymi za pomocą wielomianu Hermite'a z ochroną kształtu z wykorzystaniem metody Fritcha-Carlsona;
- opracowanie strategii zmiany różnorodności populacji, która przeciwdziała przedwczesnej zbieżności obliczeń przez aktywną zmianę różnorodności populacji i umożliwia wydostanie się z pułapki lokalnego ekstremum;
- wprowadzenie i przetestowanie różnych postaci funkcji celu;
- wprowadzenie dotychczas w zasadzie nieznanych w obszarze środowiska techniki świetlnej algorytmów optymalizacji opartych na wykorzystaniu strategii ewolucyjnych, co może się przyczynić do rozwoju tej dziedziny nauki.

Na podstawie cząstkowych wyników prezentowanych w poszczególnych rozdziałach można sformułować wniosek, że cel pracy został osiągnięty.

5. Pozostała działalność naukowa

Moja pozostała działalność naukowa związana jest ściśle z techniką świetlną głównie w zakresie metod obliczeniowych jak i badań subiektywnych. Poniżej przedstawiono charakterystykę najważniejszych prac badawczych, w której oznaczenie literatury dotyczy prac przedstawionych w załączniku nr 5 wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego.

Jestem inicjatorem i jednym z głównych wykonawców prac badawczych prowadzonych w obszarze określenia **wplywu wielkopowierzchniowych reklam z diodami świecącymi na warunki widzenia kierowców w ruchu drogowym** [A5, E1, E7, E11, E14, E15, E19, E20, E38, E40, E56, E58, E59, E61]. **Najistotniejszym wynikiem prac naukowych w tym obszarze jest ustalenie maksymalnej, dopuszczalnej wartości luminancji powierzchni reklam elektronicznych, przy której nie będą one stanowiły zagrożenia dla kierowców. Ważnym osiągnięciem jest również przedstawienie szeregu innych wymagań, które stosowanie zapewnia zniesienie wpływu reklam na rozpraszanie uwagi kierowców.** Do najważniejszych osiągnięć uzyskanych w trakcie realizowania powyższego tematu badawczego zaliczam:

- **Projekt badawczy nr N N510 666140 finansowany przez Narodowe Centrum Nauki (2011-2013):** Badanie wpływu wielkopowierzchniowych reklam z diodami świecącymi na warunki widzenia kierowców w ruchu drogowym. Inicjator podjęcia tematu badawczego i główny wykonawca. Kwota przyznanego finansowania: 512 000,- zł.
- **Projekt badawczy nr RoM. III/3420-50/10 finansowany przez Miasto Poznań (2010):** Ocena zagrożeń występujących w ruchu drogowym powodowana przez wielkopowierzchniowe reklamy z diodami świecącymi. Inicjator podjęcia tematu badawczego i główny wykonawca. Kwota przyznanego finansowania: 37 310,- zł.
- Wyniki prac badawczych, które uzyskano w wyniku realizacji wyżej wymienionych grantów zostały wykorzystane przez Ministerstwo Infrastruktury przy opracowywaniu projektu ustawy regulującej m.in. problem wielkopowierzchniowych reklam elektronicznych. Świadczy o tym m.in. pismo Ministra Infrastruktury do Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 17 sierpnia 2011 roku, w którym **ministerstwo informuje, że w ustawie znajdują się wytyczne dotyczące parametrów eksploatacyjnych reklam opracowane przez zespół Politechniki Poznańskiej.** Innym świadectwem wykorzystania wyników prac badawczych jest list Pana Filipa Kaczmarka posła do Parlamentu Europejskiego skierowany do Komisji Europejskiej oraz do Ministra Infrastruktury w sprawie problemu jakie stwarzają reklamy elektroniczne. Pan poseł powołuje się na wyniki prac zespołu Politechniki Poznańskiej.
- Ministerstwo Infrastruktury zwróciło się do zespołu Politechniki Poznańskiej z prośbą o współpracę w zakresie sformułowania i uzasadnienia przepisów regulujących obecność reklam elektronicznych w pobliżu dróg, które mają być uwzględnione w Ustawie o zmianie ustawy Kodeks wykroczeń (kwiecień 2011). **Jestem współautorem propozycji zmian treści w Ustawie o zmianie ustawy Kodeks wykroczeń w zakresie dotyczącym urządzeń emitujących światło, które mogą być źródłem oślnienia uczestników ruchu drogowego.**
- Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju zwróciło się do Politechniki Poznańskiej w sprawie sporządzenia opinii na temat projektu rozporządzenia ministra w sprawie maksymalnej luminancji powierzchni informacji wizualnej umieszczonej na reklamie (wrzesień 2015). W uzasadnieniu do projektu rozporządzenia ministerstwo powołuje się na wyniki badań zespołu Politechniki Poznańskiej. **Jestem współautorem opinii dotyczącej projektu rozporządzenia Ministerstwa Infrastruktury i Rozwoju w sprawie maksymalnej luminancji powierzchni informacji wizualnej umieszczonej na reklamie, w której proponuje się wprowadzenie zmian w treści dwóch paragrafów.**

- Jestem współorganizatorem i współopiekunem **Laboratorium Nowoczesnych Technik Badawczych**, w którym prowadzone są badania z zastosowaniem symulatora jazdy samochodem.

Jestem inicjatorem i współautorem prac badawczych dotyczących **właściwości pasów luminescencyjnych stosowanych na statkach pasażerskich do oznaczania dróg ewakuacji** [A6, E8, E10, E24, E25, E27, E44, E52, E66, E68]. Pasy te stanowią składnik systemu LLL, który na mocy przepisów dopuszczających statki do eksploatacji musi być stosowany na drogach ewakuacyjnych. Wymagania dotyczące stosowania systemu zawarte są w normie ISO 15370:2010. **Do najważniejszych wyników prac badawczych należy ustalenie wpływu rozkładu widmowego, czasu naświetlania oraz natężenia oświetlenia na krzywą spadku luminancji po czasie wzbudzenia pasów wytworzonych z różnych materiałów luminescencyjnych.** Do najważniejszych osiągnięć uzyskanych w trakcie realizowania powyższego tematu badawczego zaliczam:

- **Opracowanie oryginalnej procedury wykonywania badań terenowych.** Ocena spełnienia wymagań normy ISO jest dokonywana na podstawie badań laboratoryjnych oraz badań terenowych. Wdrożona procedura pomiarowa umożliwia sprawna i jednoznaczna ocenę spełnienia zasad bezpieczeństwa na drogach ewakuacji pasażerów statków.
- **Uzyskanie uznania towarzystwa klasyfikacyjnego Det Norske Veritas.** Uznanie międzynarodowego towarzystwa klasyfikacyjnego umożliwia wykonywanie pomiarów systemu LLL na statkach będących w posiadaniu praktycznie wszystkich armatorów na świecie. Politechnika Poznańska jest obecnie jedynym podmiotem w Polsce, który po spełnieniu szeregu wymagań formalnych i przeprowadzeniu audytu otrzymał wspomniane uznanie.
- **Propozycja zmiany procedury badań systemu LLL.** Norma ISO 15370 wymaga aby ocena systemu LLL była wykonywana na podstawie badań laboratoryjnych oraz badań terenowych. Po przeanalizowaniu zapisów normy stwierdzono, że w badaniach laboratoryjnych brak jest procedury pozwalającej na ocenę badanych materiałów. Ponadto stwierdzono, że badania laboratoryjne wykonywane są z jednym typem lampy co powoduje, że wyniki badań dotyczą tylko jednego rozkładu widmowego. Jest to niewystarczające do oceny właściwości pasów, gdyż w typowych warunkach eksploatacyjnych są one naświetlane wieloma różnymi lampami. W związku z tym zaproponowano zmianę procedury badań laboratoryjnych oraz wyłączenie ich z procesu oceny systemu LLL.

Jestem inicjatorem i współautorem prac badawczych dotyczących **wpływu temperatury złącza p-n na właściwości elektryczne, fotometryczne i kolorymetryczne diod świecących** [A7, A8, E5, E65]. **Do najważniejszych wyników prac badawczych należy ustalenie wpływu temperatury na wartość napięcia przewodzenia, strumienia świetlnego, rozkładu widmowego i współrzędnych chromatyczności w złączach p-n wykonanych z różnych materiałów.** Do najważniejszych osiągnięć uzyskanych w trakcie realizowania powyższego tematu badawczego zaliczam:

- **Zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego umożliwiającego wymuszenie zmiany temperatury złącza p-n.** Stanowisko umożliwia pomiar podstawowych parametrów kolorymetrycznych i fotometrycznych diod świecących. **Jednym z osiągnięć jest zastosowanie metody wzorcowania, w której nie ma konieczności stosowania wzorców strumienia świetlnego.** Obliczenie strumienia wzorcowego odbywa się w sposób pośredni na podstawie pomiaru natężenia oświetlenia. To rozwiązanie umożliwia wykonywanie pomiarów strumienia świetlnego diod świecących w sytuacji braku diodowych wzorców strumienia rekomendowanych przez CIE.
- Prowadzone badania i uzyskane wyniki stanowiły podstawę do wszczęcia przewodu doktorskiego pt. „Analiza układów chłodzenia diod elektroluminescencyjnych dużej mocy z wykorzystaniem ogniw Peltiera” i w konsekwencji do uzyskania stopnia doktora przez dr inż. Przemysława Skrzypczaka.

Jestem autorem badań dotyczących **cyrkadialnych wielkości promienistych** [E21, E28, E55, E56, E78, E79]. Prace zostały podjęte niedługo po opublikowaniu wyników badań dotyczących odkrycia komórek ipRGCs zawierających światłoczuły barwnik melanopsynę. Do najważniejszych wyników prac badawczych należy opracowanie metody obliczania rozkładów cyrkadiálnego natężenia napromienienia we wnętrzach z uwzględnieniem wielokrotnych odbić od materiałów selektywnych.

Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora prowadziłem badania dotyczące **obliczania rozkładów luminancji we wnętrzach z uwzględnieniem kierunkowo-rozproszonych charakterystyk odbiciowych materiałów** [A1, E6, E33, E79, E80, E81, E82, E83, E85, E87, E88, E89, E90, E91]. Badania te doprowadziły do opublikowania pracy zatytułowanej „*Wyznaczanie rozkładu luminancji we wnętrzach z uwzględnieniem kierunkowo-rozproszonych charakterystyk odbiciowych materiałów*”, która stała się podstawą do uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w specjalności technika świetlna. Do najważniejszych osiągnięć zaliczam:

- Opracowanie iteracyjnej postaci równania wizualizacji oraz modyfikacja algorytmu metody śledzenia promieni odwrotnych na potrzeby wykonywania obliczeń wielkości fotometrycznych.
- Uwzględnienie w obliczeniach zaawansowanych modeli charakteryzujących właściwości odbiciowe materiałów w tym modelu J-J. Embrechts'a.
- Wykonanie przykładowych obliczeń i porównanie ich z wynikami pomiarów w celu potwierdzenia skuteczności i dokładności proponowanej metody.
- Wprowadzenie możliwości wykonywania obliczeń dla materiałów selektywnych.

Po obronie pracy doktorskiej opublikowałem łącznie 89 prac naukowych. Baza **Web of Science Core Collection** indeksuje **8 publikacji** z czego **3 publikacje** są cytowane **7 razy** (w tym wszystkie cytowanie obce). **12 publikacji** nieindeksowanych w bazie Web of Science jest cytowanych **14 razy** (w tym **4 cytowania** obce). **Sumarycznie** wynikiem przeszukania bazy **Web of Science Core Collection** jest **21 cytowań** (w tym 11 cytowań obcych) **15 publikacji**. **Indeks Hirscha** wynosi **1**. **Sumaryczny współczynnik IF** dla moich publikacji wynosi obecnie **1,154**. Wyniki analizy bibliograficznej sporządzonej przez Pracownię Biblioteki Elektronicznej Politechniki Poznańskiej zamieszczono w załączniku 6 wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego. Sumaryczna **liczba punktów MNiSW** wynosi **230**.

Poniżej zamieszczono zestawienie najważniejszych prac opublikowanych po uzyskaniu stopnia naukowego doktora z zaznaczeniem publikacji indeksowanych w bazie JCR oraz Web of Science.

a. publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports

1. Wandachowicz K., Domke K.: *Using BRDF for radiance and luminance calculation*. Simulation Modeling Practice and Theory, vol.14 (2006), pp. 641-648 IF(2006)=0,474. Punkty MNiSW(2006)=10
2. Wandachowicz K.: *Obliczanie krzywej profilowej odbłyśnika zapewniającego uzyskanie zadanych parametrów fotometrycznych*. Przegląd Elektrotechniczny, 2009, nr 11, s. 266–271, IF(2009)=0,196 Punkty MNiSW(2009)=6
3. Wandachowicz K.: *Optymalizacja kształtu odbłyśnika zapewniającego uzyskanie zakładanego poziomu równomierności oświetlenia*. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, nr 5a, s. 181-183, Punkty MNiSW=15
4. Wandachowicz K., Antonutto G.: *Optimization of rotationally symmetrical mirror reflector profile*. Przegląd Elektrotechniczny, 2010, nr 10, s. 252–256 IF(2010)=0,242 Punkty MNiSW=9

5. Wandachowicz K., Zalesińska M., Domke K., Mroczkowska S., Skrzypczak P.: *Wielkopowierzchniowe reklamy z diodami świecącymi a bezpieczeństwo ruchu drogowego*. Przegląd Elektrotechniczny, 2011, nr 4, s. 73–77 IF(2011)=0,244 Punkty MNiSW=15
6. Domke K., Wandachowicz K.: *Thermal investigation of light emitting diodes*. Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer. Wessex Institute of Technology, UK. WIT Press, 2008, Vol. 61, s. 159-168.
7. Wandachowicz K., Zalesińska M.: *Analysis of the excitation parameters of photoluminescent low-location lighting materials*. Przegląd Elektrotechniczny 2008, nr 8, s. 118–121. Punkty MNiSW=10
8. Wandachowicz K., Domke K.: *Measurements of the temperature-dependent changes of the photometrical and electrical parameters of LEDs*. Przegląd Elektrotechniczny 2008, nr 8, s.114–117. Punkty MNiSW=10

b. rozdziały w monografiach zagranicznych i krajowych

9. Domke K., Wandachowicz K., Zalesińska M., Mroczkowska S., Skrzypczak P.: *Digital billboards and road safety*. Light in Engineering, Architecture and the Environment, ed. Domke K., Brebbia C.A., WIT PRESS, 2011, s. 119–131. Punkty MNiSW(2011)=5
10. Wandachowicz K.: *Reflector shape design for small light sources using merit function*. Computer Applications in Electrical Engineering vol. 12. Poznan University of Technology, Institute of Electrical Engineering and Electronics under the auspices of Electrical Engineering Committee of Polish Academy of Sciences and IEEE Poland Section. Poznań, 2014, s. 551–559.
11. Wandachowicz K.: *Calculation of rotationally symmetrical mirror reflector profile*. Computer Application in Electrical Engineering, Post-conference Monograph ZKwE'2009, Institute of Electrical Engineering and Electronics, Poznań University of Technology 2009, s. 293–305. Punkty MNiSW(2009)=7

c. publikacje w czasopismach zagranicznych i krajowych

12. Domke K., Wandachowicz K., Zalesińska M., Mroczkowska S., Skrzypczak P.: *Large-sized digital billboards hazard*. International Journal of Design & Nature and Ecodynamics, 2012, Vol. 7, No. 4, s. 367–380.
13. Domke K., Zalesińska M., Wandachowicz K., Skrzypczak P., Mroczkowska S.: *Wielkoformatowe elektroniczne reklamy a bezpieczeństwo użytkowników ruchu drogowego*. Logistyka 2014, nr 3, s. 1351–1361. Punkty MNiSW(2014)=10
14. Wandachowicz K., Kuczko W.: *Weryfikacja metody obliczania odbłyśników opraw oświetleniowych*. Przegląd Elektrotechniczny, 2014, nr 1, s. 281–284. Punkty MNiSW (2014)=10
15. Wandachowicz K.: *An optimisation of the reflector shape subject to the linear inequalities*. Przegląd Elektrotechniczny, 2013, nr 7, s. 218–222. Punkty MNiSW(2013)=10
16. Wandachowicz K., Zalesińska M.: *Badanie własności pasów fotoluminescencyjnych*. Przegląd Elektrotechniczny, 2007, nr 1, s. 59–62. Punkty MNiSW(2007)=6
17. Wandachowicz K., Hauser J.: *Obliczanie rozkładów luminancji*. Przegląd Elektrotechniczny, 2002, nr 6, s. 168–174. Punkty KBN(2002) zespół T10=4

d. materiały konferencji międzynarodowych

18. Wandachowicz K.: *Objective function for optimization of reflector's shape*, w: V. Konferencja oświetleniowa krajów Grupy Wyszehradzkiej LUMEN V4, 8-10.10.2014, Wyszehrad, Węgry, s. 198–202.

19. Wandachowicz K.: *Optimization of Reflector Profile with Strategy of Alteration of Population Diversity*, w: 12th European Lighting Conference, Lux Europa, 17-19.09.2013, Kraków, s. 743–748.
20. Wandachowicz K., *Optimisation of the reflector shape with the use of constraints*, w: LUMEN V4 IV Lighting Conference of the Visegrad Countries, 26-28. 09.12, Bratysława, Słowacja, s. 40–49.
21. Wandachowicz K.: *Reflector calculation, validation and optimisation using Radiance*, w: 11th International Radiance Workshop, 12-14.09.2012, Royal Danish Academy of Fine Arts Schools of Architecture, Design and Conservation, Kopenhaga, Dania. Dokument elektroniczny.
22. Wandachowicz K., Antonutto G.: *Reflector profile optimisation using Radiance*, w: 9th International Radiance Workshop, 20-21.09.2010, Fraunhofer ISE, Freiburg, Niemcy. Dokument elektroniczny.
23. Wandachowicz K., Antonutto G.: *Optimization of Rotationally Symmetrical Mirror Reflector Profile*, w: IIIrd Conference of the Visegrad Countries on Lighting, 23-25.06.2010, Brno, Czechy, materiały konferencyjne na CD.
24. Wandachowicz K.: *Calculation of the circadian illuminance distribution with Radiance*, w: 5th International Radiance Scientific Workshop 13-14 September 2006, De Montfort University, Leicester, Anglia, dokument elektroniczny.
25. Wandachowicz K.: *Calculation of the circadian illuminance*, w: Konferencja oświetleniowa krajów Grupy Wyszehradzkiej Lumen V4. 27-29.09.2006, Balatonfüred, Węgry, materiały konferencyjne na CD.
26. Wandachowicz K., Gawroński M.: *Calculation of specular and semi-specular luminaires using backward ray-tracing method*, w: Lux junior 2005, 7. Forum für den lichttechnischen Nachwuchs 23-25.9.2005 Dörfeld/Ilmenau, Niemcy, materiały konferencyjne na CD.
27. Wandachowicz K.: *Calculation of Luminaires Using Radiance*, w: 3-rd International Radiance Workshop, Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, 11-12.10.2004, Fribourg, Szwajcaria. Dokument elektroniczny.
28. Wandachowicz K.: *Calculation of Diffuse Luminaires Using Radiance System and Backward Ray Tracing Method*, w: Lux junior 2003, 6. Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, 19-21.09.2003, Arnstadt, Niemcy, s. 89–96.
29. Wandachowicz K., Rybakowski A.: *Calculation of luminance distribution in interiors illuminated by means of daylight and artificial light*, w: Lux junior 1999, 4. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, 24–26.09.1999, Ilmenau, Niemcy, s. 123–128.
30. Wandachowicz K.: *Illumination of office rooms by the utilisation of daylight*, w: 3.Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, 26-28.09.1997, Ilmenau, Niemcy, s. 245–249.

Jako autor i współautor publikacji w aktywny sposób uczestniczyłem w wielu konferencjach krajowych i międzynarodowych, na których prezentowałem prace ze wszystkich obszarów mojej działalności naukowej. W okresie po uzyskaniu stopnia doktora **uczestniczyłem w 15 konferencjach międzynarodowych oraz 34 konferencjach krajowych.**

Sporządziłem **recenzji referatów** naukowych w następujących czasopismach:

- Przegląd Elektrotechniczny (recenzje 8. artykułów latach 2012-2016),
- Computer Application in Electrical Engineering, Post-conference Monograph (recenzje 6. artykułów w latach 2011-2015),

- Konferencja Naukowa Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice (recenzje 9. artykułów w latach 2006-2015).

Prowadziłem sesje na następujących konferencjach:

- Lux Junior, Imenau, Niemcy (2005 rok),
- Krajowa Konferencja Oświetleniowa Technika Świetlna, Warszawa (2012 i 2014 rok).

W roku akademickim 2010/2011 otrzymałem **Nagrodę Rektora Politechniki Poznańskiej za osiągnięcia naukowe**. W roku 2005 otrzymałem **Nagrodę Rektora za wybitne osiągnięcia naukowe i dydaktyczne**.

Jestem członkiem **Polskiego Komitetu Oświetleniowego**.

6. Współpraca z przemysłem

Od wielu lat aktywnie działałem w zakresie współpracy z przemysłem. Jestem autorem prac naukowo-badawczych, opinii, ekspertyz i wdrożeń. Moja współpraca z przedsiębiorcami dotyczy głównie:

- optymalizacji elementów optycznych opraw oświetleniowych,
- badania sprzętu oświetleniowego w tym przeważnie lamp i opraw z diodami świecącymi,
- badania systemów LLL na statkach pasażerskich,
- badania oświetlenia dróg i autostrad,
- ekspertyz dotyczących różnych obszarów techniki świetlnej.

W załączniku 5 (w części III.M) zamieściłem wykaz 54 prac wykonanych dla różnych podmiotów. Wszystkie pozycje dotyczą okresu po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych. W zdecydowanej większości przedstawionych prac jestem ich kierownikiem lub jedynym wykonawcą.

W pracach dotyczących reklam z diodami świecącymi oraz **opinii na temat światła przeszkadzającego** wykonanych dla **Centrum Handlowego M1** w Poznaniu i Krakowie wykorzystane zostały doświadczenia zebrane w trakcie realizacji **projektu badawczego nr N N510 666140 finansowany przez Narodowe Centrum Nauki (2011-2013): Badanie wpływu wielkopowierzchniowych reklam z diodami świecącymi na warunki widzenia kierowców w ruchu drogowym**. Kolejnym efektem realizacji projektu badawczego nr N N510 666140 finansowany przez Narodowe Centrum Nauki (2011-2013) było **przygotowanie opinii** dotyczących:

- propozycji zmian treści w **Ustawie o zmianie ustawy Kodeks wykroczeń** w zakresie dotyczącym urządzeń emitujących światło, które mogą być źródłem olśnienia uczestników ruchu drogowego,
- projektu rozporządzenia **Ministerstwa Infrastruktury i Rozwoju** w sprawie maksymalnej luminancji powierzchni informacji wizualnej umieszczonej na reklamie, w której proponuję wprowadzenie zmian w treści dwóch paragrafów.

Uzyskanie uznania **towarzystwa klasyfikacyjnego Det Norske Veritas** spowodowało otrzymaniem 19 zleceń na przeprowadzenie badań systemu LLL na statkach pasażerskich armatorów wykonujących rejsy morskie z polskich baz promowych: **Polferries Polska Żegluga Bałtycka, Euroafrica, Unity Line**.

Prace prowadzone w zakresie zaprojektowania i wykonania stanowiska badawczego umożliwiającego wymuszanie zmiany temperatury złącza p-n i zastosowanie metody wzorcowania, w której nie ma konieczności stosowania wzorców strumienia świetlnego spowodowało otrzymaniem szeregu zleceń na badanie lamp i opraw oświetleniowych z diodami świecącymi.

W roku 2005 zostałem **powołany na biegłego przez Sąd Okręgowy w Częstochowie V Wydział Gospodarczy** i sporządziłem opinię celem ustalenia jakie były przyczyny powstawania wad w funkcjonowaniu oświetlenia (rur neonowych) na stacjach PKN Orlen, udzielenie odpo-

wiedzi, czy wady były w wykonaniu neonów, czy też przyczyną były inne okoliczności oraz określenia jaka była wartość wadliwie wykonanych rur neonowych, o ile takie były.

W 2015 roku podjąłem się kierowania pracą zespołu realizującego zlecenie z firmy Topmet w programie *Wsparcia w ramach Dużego Bonu Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości* w kwocie netto 63 125,00 zł.

W trakcie wielu lat współpracy byłem konsultantem naukowym w firmach: **Philips Lighting, Lena Lighting, BDLux, Ecolighting, Neonica**.

W roku 2010 brałem udział w **Finale Lokalnym QIC 2010 Philips Lighting Quality Improvement Competition** uzupełniając skład zespołu tworzonego przez pracowników Philips Lighting w Pile.

7. Działalność dydaktyczna

Moja działalność dydaktyczna związana jest ściśle z techniką świetlną. Znaczną część mojego obciążenia dydaktycznego stanowią zajęcia prowadzone na pierwszym i drugim stopniu studiów na specjalności technika świetlna prowadzonej na kierunku Elektrotechnika na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Prowadzę również zajęcia na studiach podyplomowych Technika Świetlna - Teoria, Pomiary i Zastosowania.

Szczegółowy program prowadzonych obecnie przeze mnie zajęć dydaktycznych przedstawia się następująco:

- studia I-go stopnia (stacjonarne i niestacjonarne): **Sprzęt oświetleniowy** (wykład, laboratorium, projekt), **Kolorymetria** (wykład, laboratorium), **Projekt oświetlenia** (projekt), **Komputeryzacja projektowania** (projekt), **Seminarium dyplomowe** (projekt), **Podstawy techniki świetlnej i promieniowania optycznego** (laboratorium),
- studia II-go stopnia (stacjonarne i niestacjonarne): **Sprzęt oświetleniowy** (wykład, laboratorium, projekt), **Komputeryzacja projektowania** (projekt), **Seminarium dyplomowe** (projekt),
- studia podyplomowe: **Sprzęt oświetleniowy** (wykład, laboratorium), **Komputeryzacja projektowania w technice świetlnej** (wykład, laboratorium), **Wizualizacja komputerowa w technice świetlnej** (wykład, laboratorium), **Seminarium dyplomowe** (projekt).

W minionych latach prowadziłem również następujące zajęcia:

- **Podstawy inżynierii barwy i technik chłodzenia w sprzęcie komputerowym** (wykład, laboratorium) na kierunku Informatyka prowadzonym na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej (studia stacjonarne i niestacjonarne),
- **Technika oświetlania** (wykład, laboratorium) na specjalności Układy elektryczne i informatyczne w przemyśle i pojazdach, kierunek Elektrotechnika na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej,
- **Podstawy elektrotermii i techniki świetlnej** – (laboratorium) na kierunku Elektrotechnika,
- **Contemporary problems of lighting, Design laboratory, Project of lighting** – program Sokrates Erasmus (wykład, projekt i laboratorium w języku angielskim),

Jestem autorem następujących materiałów dydaktycznych udostępnianych studentom poprzez stronę internetową Zakładu techniki Świetlnej i Elektrotermii:

- **Sprzęt oświetleniowy**: program i opis dziewięciu ćwiczeń laboratoryjnych, program i opis wykładów (łącznie ponad 250 stron materiałów),
- **Kolorymetria**: program i opis trzech ćwiczeń laboratoryjnych, program i opis wykładów (łącznie ponad 60 stron materiałów),
- **Projekt oświetlenia**: program i opis ćwiczeń projektowych (łącznie ponad 40 stron materiałów),

- **Pracownia problemowa** (projekt oprawy oświetleniowej): program i opis ćwiczeń projektowych (łącznie ponad 50 stron materiałów),
- **Komputeryzacja projektowania** (przewodnik Desktop Radiance): program i opis ćwiczeń projektowych (łącznie 25 stron materiałów),
- **Podstawy techniki świetlnej i promieniowania optycznego**: program i opis sześciu ćwiczeń laboratoryjnych (współautorstwo),
- **Podstawy inżynierii barwy i technik chłodzenia w sprzęcie komputerowym**: program i opis dwóch ćwiczeń laboratoryjnych, program i opis wykładów z części dotyczącej podstaw inżynierii barwy (łącznie ponad 100 stron materiałów),

W ramach projektu współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków **Europejskiego Funduszu Społecznego** (projekt nr POKL.04.01.01.-00-213/10 Kształcenie dla gospodarki opartej na wiedzy, 2011-2012) współuczestniczyłem w **merytorycznym przygotowaniu programu Studiów Podyplomowych „Technika świetlna – teoria i praktyka”** SP-177, opracowałem również program i przygotowałem materiały do zajęć z przedmiotów Sprzęt oświetleniowy oraz Komputeryzacja projektowania w technice świetlnej. W ramach tego samego projektu prowadziłem kursy z podstaw techniki świetlnej oraz ze sprzętu oświetleniowego.

Jestem organizatorem i opiekunem Laboratorium Komputerowego w Zakładzie Techniki Świetlnej i Elektrotermii. W laboratorium prowadzone są zajęcia projektowe z różnych przedmiotów związanych z technikami informatycznymi w technice świetlnej.

Jestem **promotorem 110 prac dyplomowych** magisterskich, inżynierskich oraz prac przygotowanych w ramach studiów podyplomowych.

Wraz z moimi dyplomantami opublikowałem kilka wspólnych referatów aktywizując ich w ten sposób do pogłębiania wiedzy i podejmowania wyzwań związanych z pracą naukową.

Uzyskałem następujące wyróżnienia i nagrody:

- Tytuł **Najlepszego wykładowcy 2005** przyznany przez Radę Samorządu Studentów Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej za wysoką kulturę osobistą, przygotowanie i sposób prowadzenia zajęć, inspirowanie studentów do samodzielnego myślenia oraz zaangażowanie w rozwiązywanie problemów studentów.
- **Nagroda Rektora** za wybitne osiągnięcia dydaktyczne w roku 2005 oraz w roku akademickim 2006/2007.
- Praca dyplomowa *Projekt latarki podwodnej*, której byłem promotorem, wykonana przez Pawła Czaińskiego oraz Krzysztofa Szymczaka uzyskała **I Nagrodę w ogólnopolskim konkursie na wyróżniającą się pracę dyplomową studentów polskich uczelni wyższych o profilu technicznym** w dziedzinie elektrotechniki organizowanym przez Oddział Poznańskiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich w 2014 roku.

8. Działalność organizacyjna

W zakresie działalności organizacyjnej mój udział w rozwoju i promocji Uczelni związany jest z pracą na rzecz Zakładu Techniki Świetlnej i Elektrotermii oraz Dziekanatu Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej w następujący sposób:

- udział w budowie infrastruktury laboratoryjnej Zakładu,
- stworzenie i zarządzanie stroną internetową Zakładu (<http://lumen.iee.put.poznan.pl>),
- udział w Drzwiach Otwartych Wydziału Elektrycznego,
- opieka nad kołem naukowym Techniki Świetlnej,
- organizacja i udział w wyjazdach naukowo-dydaktycznych studentów specjalności Technika Świetlna,
- wieloletnia opieka nad praktykami ogólnotechnicznymi i przeddyplomowymi na kierunku Elektrotechnika,

- opieka nad studentami biorącymi udział w projekcie *Era inżyniera. Rozbudowa potencjału rozwojowego Politechniki Poznańskiej. Zadanie 11 – współpraca uczelni z pracodawcami w zakresie wzmocnienia praktycznych elementów nauczania – staże i praktyki studenckie* w latach 2010 i 2011,
- pomysł, opracowanie koncepcji, przygotowanie, organizacja i prowadzenie Pierwszego Zjazdu Absolwentów Specjalności Technika Świetlna, Poznań 25.09.2010.

Od 2002 roku byłem powoływany przez trzech Dziekanów i do chwili obecnej **pełnię funkcję pełnomocnika Dziekana Wydziału Elektrycznego ds. praktyk studenckich**. Polska Komisja Akredytacyjna po przeprowadzeniu oceny kierunku Elektrotechnika w 2006 roku wyróżniła Wydział Elektryczny za proces organizacji praktyk studenckich podkreślając sprawną organizację i wdrożenie odpowiednich procedur zapewniających możliwość realizacji programów praktyk zgodnych z kierunkiem studiów i wymaganiami przedsiębiorców.

Rektor Politechniki Poznańskiej przyznawał mi nagrody za osiągnięcia organizacyjne w następujących latach: 2008/2009, 2009/2010, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 oraz 2014/2015.

9. Podsumowanie dorobku naukowego po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych

1. Publikacje w czasopismach zagranicznych:

Ogółem: 2

Czasopisma:

- Simulation Modeling Practice and Theory
- International Journal of Design & Nature and Ecodynamics

2. Publikacje w czasopismach krajowych o zasięgu ogólnopolskim:

Ogółem: 19

Czasopisma:

- Przegląd Elektrotechniczny
- Logistyka
- Wiadomości Elektrotechniczne
- Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska
- Elektro Info

3. Publikacje w czasopismach krajowych o zasięgu lokalnym:

Ogółem: 12

Czasopisma:

- Poznan University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering
- Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Elektryka
- Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie

4. Publikacje w monografiach zagranicznych:

Ogółem: 2

Monografie:

- Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer
- Light in Engineering, Architecture and the Environment

5. Publikacje w monografiach krajowych:

Ogółem: 5

Monografie:

- Computer Applications in Electrical Engineering

6. Publikacje w materiałach konferencji zagranicznych:

Ogółem: 15

Konferencje:

- LUMEN V4, Konferencja oświetleniowa krajów Grupy Wyszehradzkiej
- Lux Europa, European Lighting Conference
- International Radiance Scientific Workshop
- Lux junior, Internationales Forum fur den lichttechnischen Nachwuchs
- CIE Session

7. Publikacje w materiałach konferencji i sympozjów krajowych:

Ogółem: 33

Konferencje:

- Krajowa Konferencja Oświetleniowa Technika Świetlna
- Konferencji Naukowo-Technicznej Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice
- Promieniowanie Optyczne Oddziaływanie Metrologia Technologie (POOMT)
- Konferencja Naukowo-Techniczna Ergooszczędność w oświetleniu
- Konferencja Współczesne Problemy Techniki Świetlnej

8. Projekty badawcze:

Ogółem: 3

Projekty:

- *Optymalizacja profilu odbłyśnika oprawy oświetleniowej*. Habilitacyjny projekt badawczy nr N N510 535639 finansowany przez MNiSW w latach 2010-2012. Koszty realizacji projektu wyniosły 109 899,51 zł (w tym 56 929,50 zł na wytworzenie aparatury ba-dawczej). Kierownik projektu i wykonawca.
- *Badanie wpływu wielkopowierzchniowych reklam z diodami świecącymi na warunki widzenia kierowców w ruchu drogowym*. Projekt badawczy nr N N510 666140 finansowany przez Narodowe Centrum Nauki (2011-2013). Kwota przyznanego finansowania: 512 000,- zł. Inicjator podjęcia tematu badawczego i główny wykonawca.
- *Ocena zagrożeń występujących w ruchu drogowym powodowana przez wielkopowierzchniowe reklamy z diodami świecącymi*. Projekt badawczy nr RoM. III/3420-50/10 finansowany przez Miasto Poznań (2010). Kwota przyznanego finansowania: 37 310,- zł. Inicjator podjęcia tematu badawczego i główny wykonawca.

9. Uczestnictwo w programach europejskich:

Ogółem: 1

Projekty:

- *Technika świetlna – teoria i praktyka SP-177*. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego (projekt nr POKL.04.01.01.-00-213/10 Kształcenie dla gospodarki opartej na wiedzy, 2011-2012). Merytoryczne przygotowanie programu studiów podyplomowych, opracowanie i przygotowanie materiałów do zajęć z dwóch przedmiotów. Prowadzenie kursów specjalistycznych i kursów podstawowych dla przedsiębiorstw.

10. Wygłoszone referaty na konferencjach zagranicznych:

Ogółem: 9

11. Wygłoszone referaty na konferencjach krajowych:

Ogółem: 14

12. Wykonane ekspertyzy i inne opracowania na zamówienie podmiotów gospodar-czych:

Ogółem: 54



.....
podpis

