

Antoni RÓŻOWICZ, Marcin LEŚKO

## MOŻLIWOŚCI POPRAWY ROZSYŁU STRUMIENIA ŚWIETLNEGO OPRAWY DROGOWEJ

### Streszczenie

*W artykule omówione zostały właściwości układów optycznych aktualnie stosowanych w oprawach drogowych, pod kątem uzyskiwania użytecznego strumienia świetlnego. Wskazano główne wady istniejących rozwiązań, takie jak imisja światłem i straty strumienia w otoczeniu. Przeprowadzono analizę możliwości poprawy rozsyłu światłości opraw drogowych ze źródłami LED. Podjęto próbę opracowania układu optycznego z wykorzystaniem narzędzi symulacyjnych, który umożliwi uzyskanie większego użytecznego strumienia świetlnego, niż obecnie stosowane rozwiązania.*

### WSTĘP

W warunkach nocnych oświetlenie drogowe spełnia ważną funkcję związaną z zapewnieniem bezpiecznej komunikacji użytkowników drogi oraz prawidłowego postrzegania obiektów poruszających się po drodze lub znajdujących się w jej obrębie. Aby cel ten mógł zostać zrealizowany, konieczne jest spełnienie szeregu wymagań w zakresie średnich poziomów natężenia oświetlenia lub luminancji na powierzchni drogi, jak również odpowiedniej równomierności ogólnej i wzdłużnej tych wielkości. Z punktu widzenia bezpieczeństwa istotnym czynnikiem jest niski wskaźnik olśnienia, natomiast ze względów ekonomicznych wysoka efektywność energetyczna. Spełnienie stawianych wymagań dla oświetlenia drogowego zależy w dużym stopniu od zastosowanych opraw oświetleniowych.

Oprawa oświetleniowa jako urządzenie elektryczne przetwarzające energię elektryczną w promieniowanie widzialne jest układem złożonym z wielu elementów, z których każdy decyduje o końcowym efekcie tej przemiany. W kontekście efektywnego przetwarzania energii najważniejszymi elementami są układ zasilający o wysokiej sprawności oraz źródło światła o wysokiej skuteczności świetlnej, a więc elementy decydujące o ilości energii elektrycznej przetworzonej na światło. Jednak równie istotnym elementem jest układ optyczny, który jest odpowiedzialny za formowanie rozsyłu strumienia świetlnego. Decyduje on o sposobie wypromieniowania światła z oprawy do otoczenia. W przypadku opraw drogowych ważne jest ukierunkowanie światła na powierzchnię roboczą, co również wpływa na całkowitą efektywność energetyczną.

Autorzy wskazują wady powszechnie stosowanych rozwiązań w zakresie formowania rozsyłu strumienia świetlnego i podejmują próbę opracowania rozwiązania, które ma charakteryzować się zwiększonym wykorzystaniem strumienia świetlnego oprawy na oświetlanej powierzchni roboczej.

### 1. CHARAKTERYSTYKA STOSOWANEGO SPRZĘTU OŚWIETLENIOWEGO

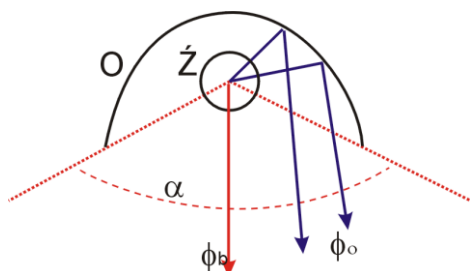
W oświetleniu drogowym stosowane są źródła światła w różnych technologiach. Wybór konkretnego typu źródła jest uwarunkowany przede wszystkim przez wymagania stawiane im w konkretnych zastosowaniach. Zwykle decydującą rolę odgrywają czynniki ekonomiczne takie, jak wysoka skuteczność świetlna, długa żywotność i relatywnie niska cena. Z tego względu najbardziej rozpowszechnione są lampy sodowe wysokoprężne [11], które charakte-

ryzują się skutecznością świetlną na poziomie 120-150 lm/W i żywotnością przekraczającą 30 tys. godzin i sprawdzają się w wielu zastosowaniach, będąc najbardziej uniwersalnym źródłem światła w oświetleniu drogowym. Posiadają one jednak jedną zasadniczą wadę, jaką jest widmo emitowanego światła, w którym dominuje barwa żółta, przez co wskaźnik oddawania barw jest bardzo niski ( $R_a = 0,2 - 0,3$ ). Rzadziej stosowane są lampy sodowe niskoprężne, które posiadają jeszcze wyższą skuteczność świetlną (dochodzącą do blisko 200 lm/W) od lamp sodowych wysokoprężnych, ale emitują tylko barwę żółtą, przez co ich zastosowanie jest ograniczone tylko do dróg szybkiego ruchu, gdzie najważniejsze jest zapewnienie wysokich wartości parametrów świetlnych i możliwość montażu na wysokich słupach w celu oświetlenia dużego obszaru. Poza tym na ograniczone zastosowanie tych lamp wpływ mają także ich duże gabaryty.

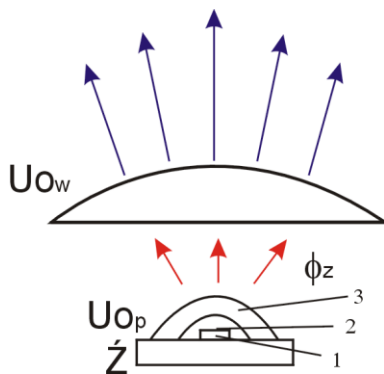
W miejscach, gdzie ważna jest nie tylko ilość światła, ale przede wszystkim jego jakość i komfort widzenia, stosuje się zwykle lampy metalohalogenkowe [11], które emitują białe światło i zapewniają wysoki wskaźnik oddawania barw (typowo  $R_a = 0,8 - 0,9$ ). Mają one nieco niższą skuteczność świetlną od lamp sodowych wysokoprężnych (ok. 70 - 120 lm/W) i mniejszą żywotność (ok. 12 do 20 tys. godzin). W związku z tym stosuje się je zwykle na drogach o niskiej prędkości ruchu, w centrach miast. Lampy metalohalogenkowe są zdecydowanie mniej popularnym źródłem w oświetleniu drogowym od lamp sodowych głównie ze względu na niską żywotność, co przekłada się na wyższe koszty eksploatacji. Dobrą alternatywą dla lamp wyładowczych jest stosowanie półprzewodnikowych źródeł LED, które łączą najlepsze cechy lamp sodowych oraz metalohalogenkowych, oferując białe światło oraz wysoki wskaźnik oddawania barw ( $R_a > 0,8$ ), wysoką skuteczność świetlną (typowo 100 - 150 lm/W) i długą żywotność (od 25 do 100 tys. godzin) [11]. Jednak nie tylko dobre parametry świetlno-energetyczne są przyczyną rosnącej popularności źródeł LED. Ważną cechą funkcjonalną jest możliwość formowania rozsyłu strumienia oprawy ze źródłami światła LED.

Nowoczesne oprawy oświetlenia drogowego projektuje się w sposób zapewniający optymalizację wykorzystania strumienia świetlnego i precyzyjnego kierowania światła na drogę. Stosowanie lamp wyładowczych stwarza w tej kwestii spore ograniczenia. Z uwagi na duże gabaryty tych źródeł kształtowanie krzywej światłości oprawy odbywa się tylko przy użyciu układów odbłyśnikowych [1], co daje kontrolę tylko nad częścią strumienia świetlnego wysyłanego w tylną część oprawy (rys. 1), natomiast duża część strumienia świetlnego jest wysyłana bezpośrednio w otoczenie w kącie  $\alpha$ ,

którego nie obejmuje odbłyśnik, co nie pozwala kontrolować kierunku jego wypromieniowania.

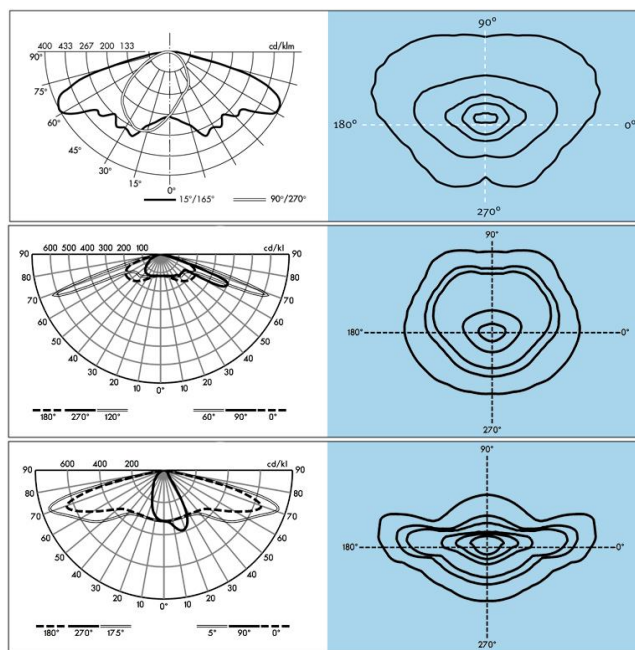


**Rys. 1.** Sposób formowania rozsyłu strumienia świetlnego oprawy ze źródłem wyładowczym i układem odbłyśnikowym. O - odbłyśnik, Ż - źródło światła,  $\alpha$  - kąt wypromieniowania strumienia bezpośredniego,  $\Phi_b$  - strumień świetlny bezpośredni,  $\Phi_o$  - strumień świetlny odbity



**Rys. 2.** Sposób formowania rozsyłu strumienia świetlnego oprawy ze źródłem LED i układem soczewkowym. Ż - źródło światła,  $U_{op}$  - układ optyczny pierwotny, 1 - optyka na poziomie chipu, 2 - optyka na poziomie obudowy diody, 3 - optyka montowana nad obudową diody,  $U_{ow}$  - układ optyczny wtórny,  $\Phi_z$  - strumień świetlny źródła,  $\Phi_{op}$  - strumień świetlny oprawy

W przypadku źródeł typu LED możliwe jest kontrolowanie całego strumienia świetlnego źródła, ponieważ ich kierunkowy charakter wypromieniowania światła pozwala na precyzyjne formowanie rozsyłu światłości i dokładne kontrolowanie kierunku wypromieniowania strumienia świetlnego ze źródła światła w kierunku oświetlanej powierzchni, co pozwala na zwiększenie efektywności energetycznej oprawy przez zwiększenie współczynnika wykorzystania strumienia świetlnego [5]. Dzięki małym gabarytom źródeł LED możliwe jest stosowanie układów soczewkowych, zarówno jako pierwotnych jak i wtórnych układów optycznych [14] (rys. 2). Układ optyczny pierwotny stanowią trzy poziomy [10], mianowicie optyka na poziomie chipu, optyka na poziomie obudowy, a więc elementy ściśle związane ze strukturą diody. Trzeci poziom obejmuje optykę montowaną bezpośrednio nad obudową diody, często z nią dostarczaną przez producentów źródeł. Z punktu widzenia projektantów i producentów oprawy oświetleniowych ważny jest czwarty poziom optyki, a więc wtórny układ optyczny instalowany na poziomie oprawy w pewnej odległości od diody, ponieważ to ten poziom decyduje o ostatecznym kształcie bryły fotometrycznej oprawy. Może być to układ soczewkowy lub odbłyśnikowy wykonany jako pojedynczy element lub zespół elementów. Kształtowanie bryły fotometrycznej oprawy LED jest możliwe zarówno przez dobór odpowiedniego układu optycznego dla całej matrycy, jak również przez indywidualne dopasowanie rozsyłów pojedynczych diod składowych [3], co jednak jest działaniem skomplikowanym i kosztownym.

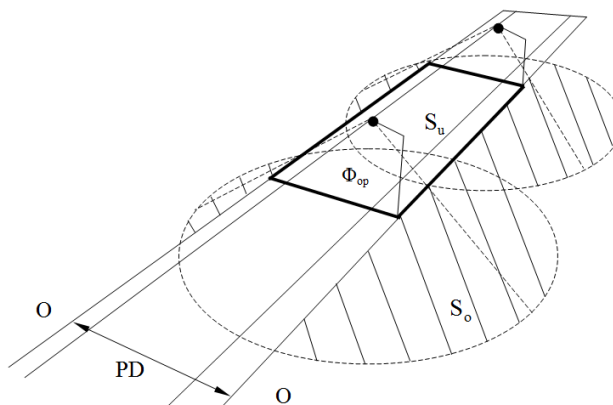


**Rys. 3.** Typowe krzywe światłości opraw drogowych [9]

Typowe krzywe światłości opraw drogowych przedstawiono na rysunku 3. Oprawy drogowe charakteryzują się szerokim rozsyłem w osi podłużnej i wąskim oraz asymetrycznym rozsyłem w osi poprzecznej, dzięki czemu możliwe jest rozmieszczenie opraw w relatywnie dużych odstępach od siebie. Jednak pomimo tego otrzymywana plama świetlna ma kształt zbliżony do elipsy lub figury złożonej z kilku elips. Dla maksymalnego wykorzystania strumienia świetlnego oprawy pożądane byłoby dokładne dopasowanie kształtu plamy świetlnej do kształtu oświetlanej powierzchni. W przypadku powszechnie dostępnych opraw drogowych kształt otrzymywanej plamy świetlnej przyczynia się do powstawania zjawiska imisji światłem.

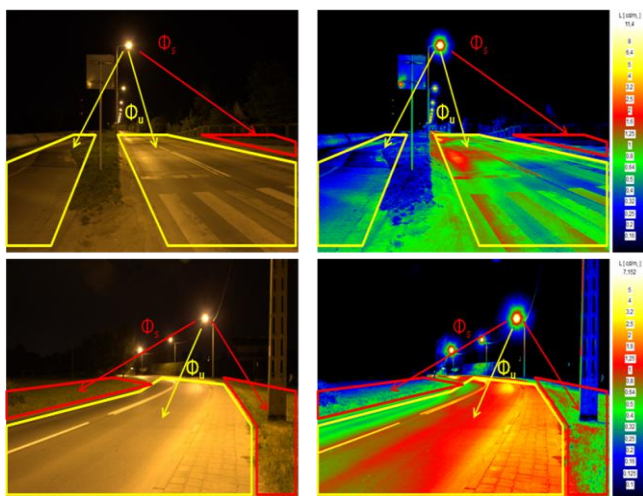
## 2. IMISJA ŚWIATŁEM

Imisja światłem [4] wiąże się z zanieczyszczeniem otoczenia światłem, które nie jest w nim pożądane. Zjawisko to pojawia się w wyniku niedopasowania kształtu plamy świetlnej do kształtu oświetlanej powierzchni, np. drogi, w wyniku czego tylko część strumienia świetlnego trafia na powierzchnię roboczą, jak pokazano na rysunku 4, a pozostała część trafia do otoczenia.



**Rys. 4.** Ilustracja obrazująca zależność między oświetlaną powierzchnią  $S_o$  (droga i otoczenie) i powierzchnią użytkową  $S_u$  (droga),  $\Phi_{op}$  - strumień świetlny oprawy, PD - pas drogowy, O - otoczenie

Imisja światłem wiąże się z powstawaniem strat strumienia świetlnego, a co za tym idzie strat energii potrzebnej do jego wytworzenia. W przypadku, gdy w bezpośrednim sąsiedztwie drogi nie znajdują się zabudowania (rys. 5), światło jest tracone w otoczeniu, w którym nie jest potrzebne. Jeśli natomiast w sąsiedztwie drogi znajdują się budynki (na przykład w centrach miast), to powoduje to niepożądane rozświetlenie elewacji, nie mające nic wspólnego z iluminacją. Może nawet przyczyniać się do rozświetlenia mieszkań, ponieważ część światła przedostaje się do wnętrza przez okna, co jest efektem uciążliwym dla mieszkańców i powodować zaburzenia snu. Dzieje się tak zarówno w przypadku, gdy oprawa znajduje się w bliskim sąsiedztwie elewacji (rys. 6), jak również w większej odległości po przeciwnej stronie ulicy (rys. 7). W obu przypadkach można zauważyć rozświetlenie nie tylko najniższych kondygnacji budynków, ale też i wyższych partii.



Rys. 5. Ilustracja obrazująca rozdział strumienia świetlnego oprawy na strumień użyteczny  $\Phi_u$  i strumień strat  $\Phi_s$ , droga bez sąsiadujących zabudowań



Rys. 6. Ilustracja obrazująca rozdział strumienia świetlnego oprawy na strumień użyteczny  $\Phi_u$  i strumień strat  $\Phi_s$ , droga z sąsiadującymi zabudowaniami, oprawa w bliskim sąsiedztwie elewacji



Rys. 7. Ilustracja obrazująca rozdział strumienia świetlnego oprawy na strumień użyteczny  $\Phi_u$  i strumień strat  $\Phi_s$ , droga z sąsiadującymi zabudowaniami, oprawa oddalona od elewacji

Ograniczanie zjawiska imisji światłem staje się konieczne nie tylko ze względu na jego możliwe uciążliwe oddziaływanie na mieszkańców, ale także ze względu na ograniczanie konsumpcji energii elektrycznej przez eliminowanie strat, co przyczynia się do poprawy efektywności energetycznej oświetlenia.

### 3. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA OŚWIETLENIA

Efektywność energetyczna oświetlenia określa sprawność przetwarzania energii elektrycznej na postać końcową, a więc strumień świetlny. Do oceny efektywności można stosować różne kryteria [7], zarówno potencjału i dynamiki oświetlenia, związane z mocą instalowaną oświetlenia (1) oraz rocznym zapotrzebowaniem na energię (2).

Moc instalowana oświetlenia drogowego:

$$P_D = n_{op}P = \frac{LA}{q\eta\eta_{os}u} \quad (1)$$

oraz energia elektryczna oświetlenia drogowego:

$$W_D = \frac{P_D t_u}{1000} = \frac{LA t_u}{1000q\eta\eta_{os}u} \quad (2)$$

gdzie:

- $n_{op}$  – liczba opraw oświetleniowych,
- $L$  – eksploatacyjna luminancja nawierzchni jezdni [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]
- $A$  – pole powierzchni płaszczyzny roboczej [ $\text{m}^2$ ]
- $\eta$  – skuteczność świetlna źródeł światła z uwzględnieniem strat mocy w obwodzie [ $\text{lm}/\text{W}$ ]
- $\eta_{os}$  – sprawność oświetlenia
- $u$  – całkowity współczynnik utrzymania
- $q$  – wskaźnik luminancji nawierzchni jezdni [ $\text{sr}^{-1}$ ]
- $t_u$  – roczny czas użytkowania urządzenia [ $\text{h}/\text{r}$ ]

Niezależnie od stosowanego kryterium istotnym czynnikiem, od którego zależy efektywność energetyczna oświetlenia, jest sprawność oświetlenia:

$$\eta_{os} = \eta_{op}\eta_{dr} \quad (3)$$

gdzie:

- $\eta_{os}$  – sprawność oświetlenia
- $\eta_{op}$  – sprawność oprawy
- $\eta_{dr}$  – sprawność drogi

Sprawność oprawy jest związana ze stratami strumienia świetlnego w układzie optycznym. W dostępnych oprawach współczynnik ten jest stosunkowo wysoki i możliwości jego poprawy są mocno ograniczone. Z kolei sprawność drogi dotyczy strat strumienia w otoczeniu, a więc określa, jaka część strumienia świetlnego oprawy trafia na powierzchnię użytkową:

$$\eta_{dr} = \frac{\Phi_u}{\Phi} = \frac{\Phi_u}{\Phi_u + \Phi_s} \quad (4)$$

gdzie:

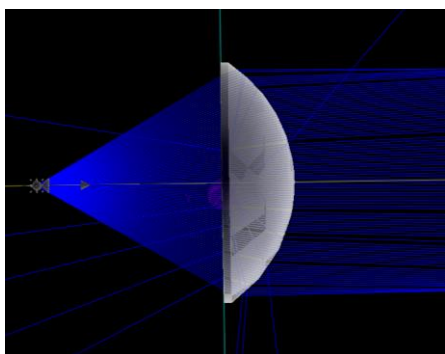
- $\Phi_u$  – strumień użyteczny
- $\Phi$  – strumień oprawy
- $\Phi_s$  – strumień strat

W obecnie stosowanym sprzęcie ten współczynnik jest stosunkowo niski i możliwa jest jego poprawa w znacznym stopniu. Konieczne jest takie zaprojektowanie układu optycznego formującego rozsył strumienia świetlnego, aby w jak największym stopniu dopasować otrzymywaną plamę świetlną do kształtu powierzchni użytkowej.

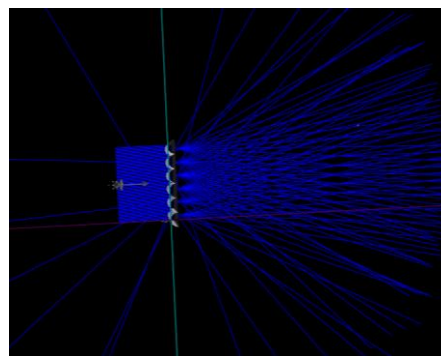
## 4. BADANIA SYMULACYJNE UKŁADU OPTYCZNEGO

Formowanie rozsyłu strumienia świetlnego ma istotny wpływ na sprawność oświetlenia, a ponieważ stosowane rozwiązania w zakresie układów optycznych zapewniają ogólnie niskie wykorzystanie strumienia świetlnego, a co za tym idzie niską sprawność oświetlenia drogowego, podjęto próbę zaprojektowania układu optycznego, który umożliwiłby poprawę tego stanu. Przyjęto założenie, że w rozważaniach uwzględniany jest prosty odcinek drogi o szerokości użytkowej 8 m (jezdnia 7 m i chodnik 1 m), tak więc idealnie dopasowana plama świetlna powinna mieć kształt prostokąta.

Układ formujący liniową plamę świetlną został opracowany jako układ soczewkowy, złożony z dwóch elementów, umieszczonych ponad diodą: soczewki 1 płasko wypukłej sferycznej oraz soczewki 2 w postaci zespołu soczewek walcowych płasko wypukłych. Zadaniem soczewki 1 jest skupienie wiązki świetlnej wytwarzanej przez źródło światła LED, sposób jej działania pokazano na rysunku 8. Soczewka 2 z kolei jest elementem rozciągającym światło w jednej z jej osi symetrii, co obrazuje rysunek 9.

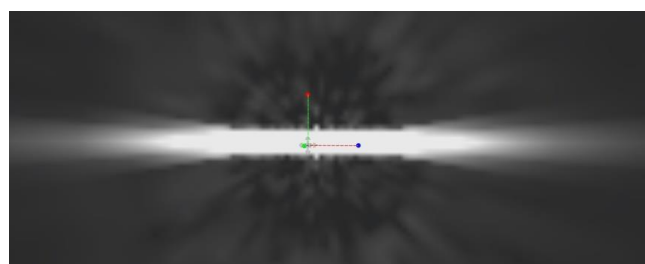


Rys. 8. Ilustracja działania soczewki 1 w układzie optycznym



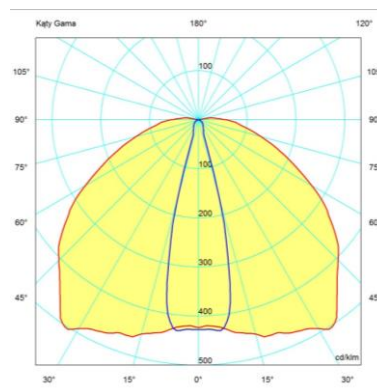
Rys. 9. Ilustracja działania soczewki 2 w układzie optycznym

Efektom działania układu jest rozciąganie wiązki świetlnej w osi podłużnej i skupianie w osi poprzecznej, co przekłada się na uzyskanie niemal liniowej plamy świetlnej na oświetlonej powierzchni, przy zastosowaniu pojedynczego źródła LED, co pokazano na rysunku 10.

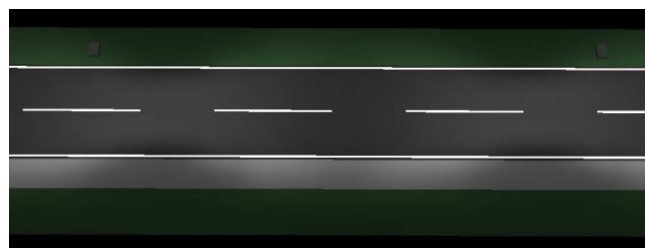


Rys. 10. Wizualizacja liniowej plamy świetlnej

Następnie wykonano model panelu LED złożonego z 54 źródeł i wyznaczono jego krzywą światłości (rys. 11).

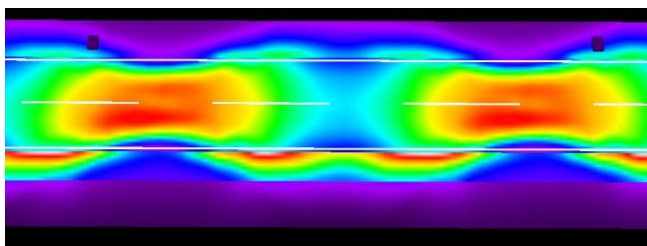


Rys. 11. Krzywa światłości badanego układu



Rys. 12. Wizualizacja oświetlenia drogi

Przeprowadzono obliczenia dla drogi z jezdnią o szerokości 7 m i chodnikiem o szerokości 1 m, oprawy rozmieszczono jednostronnie z odstępem pomiędzy słupami 25 m i zawieszono na wysokości 10 m. W analizowanym przykładzie przyjęto klasę oświetleniową ME4 [6]. Na rysunku 12 pokazano wizualizację oświetlenia drogi, natomiast na rysunku 13 rozkład luminancji.



Rys. 13. Rozkład luminancji na powierzchni oświetlonej drogi

Obliczono współczynnik wykorzystania strumienia świetlnego (sprawność drogi), który w analizowanym przykładzie wyniósł 62 %, co jest wynikiem znacząco lepszym, niż w przypadku obecnych rozwiązań, gdzie dla analizowanych opraw LED z różnymi wariantami układów optycznych [5] w tych samych warunkach drogowych uzyskano wyniki od 17 do 39 %. Poprawa jest znacząca, jednak potencjał do wykorzystania jest jeszcze duży, tak więc konieczne jest prowadzenie dalszych prac nad układem.

## PODSUMOWANIE

Omówiony układ optyczny został opracowany w celu ograniczenia zjawiska imisji światłem oraz poprawy efektywności energetycznej oświetlenia drogowego, przez zwiększenie sprawności wykorzystania strumienia świetlnego. Zadaniem układu jest formowanie bryły fotometrycznej w sposób umożliwiający dopasowanie kształtu plamy świetlnej do kształtu powierzchni użytkowej, jaką jest droga. Przedstawiony układ pozwala na zwiększenie wykorzystania strumienia świetlnego o połowę w stosunku do tradycyjnych układów. Jednocześnie na obecnym etapie układ nie jest jeszcze doskonały. Problemem pojawiającym się przy dodawaniu elementów soczewkowych na drodze strumienia świetlnego jest zwiększanie strat w samym układzie optycznym, co powoduje ograniczenie strumienia wysyłanego do otoczenia. Konieczne są dalsze prace rozwojowe w celu optymalizacji parametrów układu oraz zwiększenia jego sprawności. Kolejnym etapem prac będzie badanie możliwości uzyskania podobnego efektu z wykorzystaniem układu odbłyśnikowego lub hybrydowego, co wydaje się być rozwiązaniem korzystniejszym z punktu widzenia ograniczania strat w układzie optycznym.

Niewątpliwą korzyścią z zastosowania takiego typu układu będzie możliwość oświetlenia wymaganego obszaru przy użyciu opraw o mniejszej mocy, co pozwoli na ograniczenie zużycia energii na cele oświetleniowe. Rozwój układów optycznych ukierunkowujących światło jest z punktu widzenia efektywności energetycznej równie istotny, jak rozwój technologii źródeł poprawiający ich skuteczność świetlną. Projektując układy optyczne do precyzyjnego ukierunkowania światła należy mieć na uwadze zachowanie niskiego poziomu strat światła w układzie.

## BIBLIOGRAFIA

1. Dybczyński W.: Oleszyński T., Skonieczna M.: "Projektowanie opraw oświetleniowych". Rozprawy naukowe, nr 39, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1996.
2. Górczewska M.: "Oświetlenie drogowe. Poprawa efektywności." Energia Elektryczna, nr5/2005.
3. Kelm P.: "Kształtowanie przestrzennego rozsyłu strumienia świetlnego przez matrycowe oprawy oświetleniowe ze źródłami elektroluminescencyjnymi." Rozprawa doktorska, Łódź 2012.
4. Leszczyńska H.: "Zanieczyszczenie - imisja światłem." Technika świetlna '09, Warszawa 2013.
5. Leško M., Różowicz A.: "Analiza efektywności energetycznej opraw oświetlenia drogowego." Logistyka 6/2014.
6. PN-EN 13201:2007, "Oświetlenie dróg. Część 2: Wymagania oświetleniowe." PKN, Warszawa 2007.
7. Pracki P.: "System oceny efektywności energetycznej oświetlenia wnętrza i dróg." Prace naukowe, Elektryka z. 143, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
8. Rea M. S.: "The IESNA Lighting Handbook. Reference & Application," IESNA, New York 2000.
9. Schreder, Katalog produktów. 2015.
10. Wilanowski A.: "LED Know-How-Część 6. Układ optyczny diody LED." dostęp 9.09.2015: www.instalacjebudowlane.pl
11. Wiśniewski A.: "Źródła światła." Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
12. Zalewski S.: "Projektowanie wtórnych układów optycznych LED-ów." Przegląd Elektrotechniczny, nr 5, 2007.
13. Zaremba K.: "Analiza i synteza właściwości świetlnych odbłyśników obrotowo-symetrycznych metodą uporządkowanego śledzenia strumieni elementarnych." Rozprawy naukowe, nr 190, Oficyna wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2010.
14. Żagan W.: "Oprawy oświetleniowe." Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012.
15. Żagan W.: "Podstawy techniki świetlnej." Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.

## THE POSSIBILITY OF IMPROVEMENT OF STREET LIGHTING LUMINAIRE'S LIGHT DISTRIBUTION

### Abstract

*In the paper there was discussed characteristics of optical systems currently used in the street lighting luminaires, in terms of obtaining usable luminous flux. It was identified the main drawbacks of existing solutions, such as light imission and luminous flux losses in environment. There was performed an analysis possibility of improvement of street lighting luminaire's light distribution with LED sources. An attempt was made to develop the optical system using simulation tools, which allows to obtain greater usable light output than currently used solutions.*

Autorzy:

dr hab. inż. **Antoni Różowicz**, prof. PŚk– Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Informatyki i Automatyki, rozowicz@tu.kielce.pl

mgr inż. **Marcin Leško** – Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, mlesko@prz.edu.pl