

doi:10.15199/48.2015.08.47

## Strategia konstruowania układów odbłyśników zwierciadlanych z modułem LED

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia strategię konstruowania układów odbłyśników zwierciadlanych, wykorzystujących jako źródło światła moduły LED. Przeanalizowano dwie odmiany reflektorów, jeden realizujący funkcję oprawy typu downlight a drugi o typowo cechach typowego układu znacząco wzmacniającego światłość. Zaprezentowano metodę konstruowania opraw typu downlight w oparciu o pomysł uzupełnienia światłości w obszarze kątowym bezpośredniego wypromieniowania światła. Artykuł przedstawia przykład obliczonego profilu reflektora oraz odpowiadający mu rozsył światłości.

**Abstract.** In this paper a strategy of construction of mirror reflector systems with LED modules was presented. Two types of reflectors were analysed, one executing the function of downlight type luminaire and the second with typical characteristics of a system significantly amplifying the luminous intensity. A method of constructing downlight type luminaires, based on the idea of supplementing the luminous intensity in the area of direct light radiation, was introduced. An example of the calculated profile of the reflector and the corresponding light distribution were also presented in this paper. (The strategy of construction of mirror reflectors with LED modules).

**Słowa kluczowe:** technika świetlna, oprawy oświetleniowe, projektowanie profilu odbłyśnika, moduł LED.

**Keywords:** lighting technology, luminaires, reflector shape design, LED modules.

### Wstęp

Ekspansja technologiczna i rynkowa diod elektroluminescencyjnych powoduje, że w obszarze opraw oświetleniowych trzeba zweryfikować tradycyjne myślenie o konstrukcji układu optyczno-świetlnego. Punktem wyjścia jest fakt, że pojedyncza dioda jest niskomocowym, niskoprądowym źródłem światła (moce rzędu pojedynczych watów, strumień świetlny najwyżej rzędu kilkuset lumenów). Praktyczne układy opraw oświetleniowych wymagają znacznie większych wartości strumienia świetlnego, zatem muszą wykorzystywać albo wieloelementowe zespoły (matryce) LED-ów lub też, co bywa coraz częściej spotykane, moduły LED. Jest to powierzchniowe źródło światła (rys.1), pod którego luminoforem lub rozpraszaczem ciasno upakowany jest zespół kilku, kilkunastu a nawet kilkudziesięciu LED-ów. W ten sposób wkracza w świat techniki świetlnej nowatorskie, pod wieloma względami, źródło światła o cechach dobrego źródła projekcyjnego, o:

- dużych gabarytach (kilka, kilkanaście  $\text{cm}^2$ ),
- płasko uformowanej powierzchni wypromieniowania strumienia świetlnego,
- emisji strumienia świetlnego w obrębie jednej półprzestrzeni,
- wysokiej luminancji (rzędu  $106 \text{ cd/m}^2$ ), dość jednorodnej na całej powierzchni,
- prostokątnym lub okrągłym zarysie.

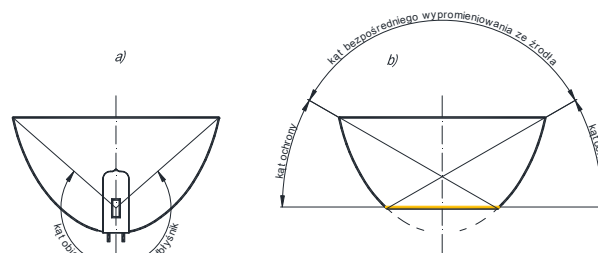


Rys. 1. Moduły LED – nowatorskie pod względem geometrycznym i fotometrycznym źródła światła zmuszają do zrewidowania dotychczasowe myślenie o konstrukcji opraw oświetleniowych, szczególnie wykorzystujących odbłyśnik zwierciadlany

Moduł LED nie może wykorzystywać klasycznej konstrukcji odbłyśnika zwierciadlanego, który przy tradycyjnym źródle światła (skrętka żarówki, jarznik lampy wyładowczej) obejmował ciało świecące w znacznym obszarze przestrzeni i odbijał przeważającą część wytwarzanego przez nie strumienia świetlnego (rys.2)

Moduł LED, jako jednostronne, powierzchniowe źródło światła, o charakterystyce emisji zbliżonej do prawa Lamberta, realizuje rozsył światłości, którego w zasadzie można by nie przetwarzać przestrzennie. Znane i stosowane są z powodzeniem w praktyce techniki oświetlenia wewnątrz układy opraw oświetleniowych, które charakteryzuje taka właśnie bryła fotometryczna, gwarantując przy tym akceptowalną i wymaganą równomierność oświetlenia i jego poziom.

Potrzeba umieszczenia tego źródła w układzie odbłyśnika wynika z powodu oślnienia. Źródło o tak dużej luminancji jak moduł LED musi być osłonięte w znacznym obszarze kątowym, przed oczami użytkowników. Takie myślenie może być punktem wyjścia do konstrukcji opraw wykorzystujących to źródło światła do celów ogólnooświetleniowych, przede wszystkim w oświetleniu wewnątrz.



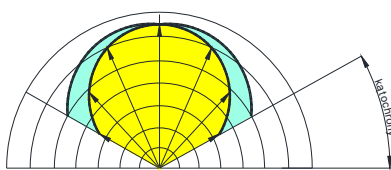
Rys.2. Porównanie geometrii klasycznego układu odbłyśnika (a) z układem optycznym wykorzystującym moduł LED (b)

Mimo, że budowa modułu LED i emisja strumienia świetlnego podpowiadają w pierwszej kolejności ich wykorzystanie w układach projekcyjnych, we współpracy z soczewką (płaska powierzchnia źródła, jednostronna emisja światła, duża luminancja), można też spojrzeć na kwestię przystosowania modułów LED do konstrukcji układów

odbłyśników skupiających, o dużych wzmocnieniach światłości. Dotyczy to w pierwszej kolejności układów reflektorów zwierciadlanych o profilu parabolicznym. W jednym i w drugim przypadku należy rozważania ograniczyć do układów symetrycznych obrotowo, w których miejsce części przywierzchołkowej klasycznej paraboloidy zajmuje, naszym zdaniem, płasko uformowany moduł LED (rys.2b). Taka konstrukcja jest uzasadniona również z punktu widzenia warunków termicznych pracy, które wykorzystywać mogą odbłyśnik jako powierzchnię oddawania ciepła [3]

### Konstruowanie oprawy oświetleniowej typu „downlight” z modulem LED

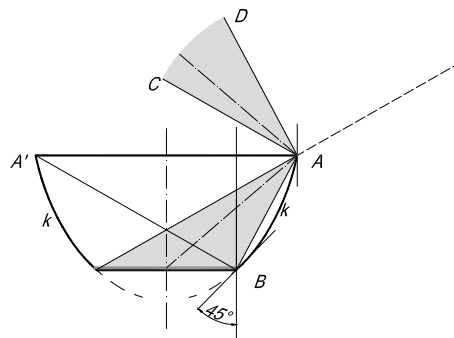
Jak już wcześniej wspomniano, rozwiązanie konstrukcyjne tego typu układu oprawy oświetleniowej limituje kwestia oślnienia. Trzeba określić kąt ochrony czyli obszar przestrzeni, w którym nie będzie widoczne źródło światła ani jego obraz (figura jasnych punktów [1]) na powierzchni odbłyśnika. Kąt ochrony zadeklarowany jako punkt wyjścia, określa jednocześnie kąt objęcia źródła światła przez odbłyśnik (rysunek 2b). Ta deklaracja, z punktu widzenia tworzonej bryły fotometrycznej oznacza, że pierwotny, lambertowski rozsył światłości samego modułu LED zostaje obcięty dla kątów powyżej strefy bezpośredniego wypromieniowania światła (rys. 3). W obszarze kąta objęcia należy zaprojektować taki kształt i wymiary odbłyśnika, które w zaplanowany sposób uzupełnią rozsył światłości samego modułu LED ograniczony kątem ochrony. Można się przy tym posłużyć następującą strategią rozwiązania tego problemu. Skoro zdefiniowano jako punkt wyjścia kąt ochrony, to tym samym z żadnego z kierunków tego chronionego obszaru nie powinna być dostrzegana ani powierzchnia modułu LED ani jej obraz utworzony na odbłyśniku (FJP). Zatem nie może być mowy o przekierowaniu wiązki odbitej w obszar poza strefą bezpośredniego wypromieniowania ze źródła. Wydaje się więc uzasadnione, aby wiązkę odbitą skierować w te rejony przestrzeni, w które świeci z najmniejszą intensywnością przesłonięty moduł LED. Dzięki takiemu postępowaniu rozsył światłości zostanie uzupełniony o dodatkową porcję strumienia w tych kierunkach, w których światłość jest najmniejsza, które limitują równomierność oświetlenia (niebieski kolor na rys. 3).



Rys. 3. Rozsył światłości oprawy zwierciadlanej z modulem LED jako superpozycja ograniczonego kątowno rozsyłu lambertowskiego (żółty kolor) oraz strumienia świetlnego odbitego od odbłyśnika (niebieski kolor)

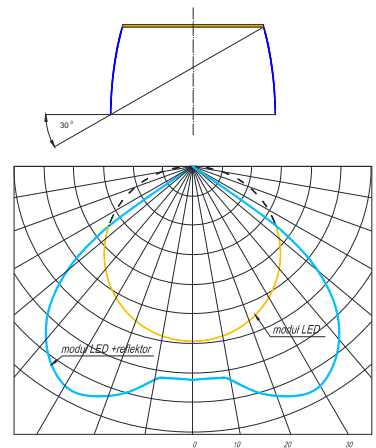
Pozostaje kwestia wyznaczenia krzywej profilowej  $k$  (rys. 4). Powinna zaczynać się na prostej określającej kąt ochrony (punkt A, rys. 4) i kończyć na brzegu tarczy modułu (punkt B). Jeśli nachylenie linii profilowej w punkcie A będzie odpowiadać kierunkowi osiowemu, to wiązka odbita mieścić się będzie w obszarze kątownym wypromieniowania bezpośredniego a jej skrajny promień AC przyjmie kierunek równoległy do linii określającej kąt graniczny (odcinek A'B). W drugim końcu krzywej profilowej, w punkcie B, kąt nachylenia stycznej do profilu powinien wynosić  $45^\circ$  co zagwarantuje minimalne odbijanie w kierunku osi optycznej. Dobór kształtu krzywej profilowej  $k$  na odcinku AB będzie miał wpływ na kształt dodawanej, do

lambertowskiego przebiegu, krzywej światłości oprawy (obszar niebieski na rys. 3).



Rys.4. Zarządzanie kierunkiem odbicia elementarnego jako strategia konstruowania oprawy downlight z modulem LED

Postępując zgodnie z opisana strategią postępowania wykonano projekt układu odbłyśnika zwierciadlanego z modulem LED. Założono kąt ochrony  $30^\circ$ . Obliczenia wykonano wykorzystując program Photopia. Krzywa profilowa układu reflektora oraz obliczony wykres światłości pokazano na rysunku 5. Przy takiej strategii projektowania, uzyskuje się dość smukłą krzywą profilową reflektora, która w wydaniu 3D tworzy głębokie, prawie cylindryczne lustro [4].



Rys. 5. Profil reflektora downlight oraz odpowiadający mu wykres światłości wyznaczony wg zaproponowanej strategii konstruowania

### Konstrukcja reflektora skupiającego z modulem LED

Rozważania odnosząc się będą do klasycznej formy geometrycznej układu reflektora paraboloidalnego [5]. Jeśli przyjąć założenie, że moduł LED umieszczony jest w ognisku i swym brzegiem opiera się o powierzchnię lustra paraboloidalnego (dobre odprowadzanie ciepła), to wymiar średnicy modułu  $d_{LED}$  jednoznacznie wyznacza ogniskową  $f$  profilu (wzór 1).

$$(1) \quad f = \frac{d_{LED}^2}{4}$$

Dalsza decyzja dotycząca średnicy lustra  $D$  (ze względu na oczekiwane wzmocnienie- światłość maksymalną) skutkuje ustaleniem głębokości lustra  $H$  (wzór 2).

$$(2) \quad H = \frac{D^2}{4d_{LED}} - \frac{d_{LED}}{4} = \frac{D^2 - d_{LED}^2}{4d_{LED}}$$

Bieżąca rozbieżność  $\delta$  wiązki świetlnej odbitej od reflektora, zależna jest od miejsca odbicia na linii paraboli. Wyraża ją wzór 3 [2].

$$(3) \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{2d_{LED}(d_{LED} - 2r)}{4r^2 - d_{LED}^2}$$

gdzie  $r$ - odległość środka optycznego modułu LED od bieżącego punktu linii odbłyśnika

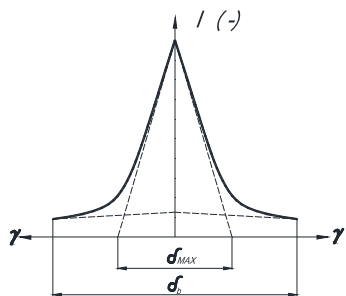
Rozbieżność minimalna będzie następstwem odbicia tarczy modułu od punktu, w którym dotyka ona do linii paraboli i wynosi ona  $\delta_{min} = 0^\circ$ . Rozbieżność maksymalna wiązki odbitej, przy założonej średnicy krążka modułu LED, zależy od głębokości i średnicy lustra. Jeżeli głębokość ta jest większa niż trzykrotny wymiar ogniskowej, to wartość ta jest stała i wynosi  $33,7^\circ$ .

$$(4) \quad \operatorname{tg} \delta_{max} = \frac{2}{3} \rightarrow \delta_{max} = 33,7^\circ$$

Rozbieżność maksymalna wiązki odbitej nie określa, w przypadku tego typu układów optycznych, rzeczywistej szerokości wiązki wypromieniowanej z układu oprawy. Trzeba pamiętać, że ze względu na duży wymiar średnicy modułu LED, nie można zaniedbać faktu wypromieniowania bezpośredniego ze źródła. Zatem rzeczywista rozbieżność maksymalna wiązki określona jest przez kąt wypromieniowania bezpośredniego  $\delta_b$ . Określa ją zależność (5).

$$(5) \quad \operatorname{tg} \frac{\delta_b}{2} = \operatorname{tg} \frac{\delta_{max}}{2} = \frac{2d_{LED}}{D-d}$$

Kształt rozsyłu światłości reflektora paraboloidalnego z modułem LED (rys.6), w zasadzie niewiele odbiega od analogicznych krzywych charakteryzujących klasyczne rozwiązania układów optycznych (rys.2a). Zauważalna różnica to zerowa rozbieżność minimalna wiązki świetlnej, znacząco szersza wiązka odbita od reflektora ( $\delta_{MAX}$ ) oraz niepomijana wartość światłości będąca następstwem strumienia wypromieniowanego bezpośrednio z modułu LED.



Rys. 6. Typowa krzywa światłości reflektora paraboloidalnego z modułem LED

Ta ostatnia cecha nabiera istotnego znaczenia wobec powszechnej praktyki wykorzystywania reflektorów zwierciadlanych do oświetlenia akcentowego w iluminacji, np. do oświetlenia pilastrów, kolumn itp. W przypadku wykorzystania do tego celu reflektora z modułem LED, powiększy się znacząco obszar i luminancja charakterystycznego „wypalenia” bezpośrednio nad

reflektorem. Przy prostopadłym skierowaniu wiązki światła z reflektora z modułem LED na płaszczyznę, powiększy się luminancja otoczenia głównej plamy światła pochodzącego od odbicia. Zatem zmniejszy się względny udział strumienia odbitego do całkowitego strumienia wypromieniowanego z reflektora. Następstwem tego faktu jest konieczność odejścia od powszechnej praktyki zasłaniania klasycznych źródeł światła przed promieniowaniem bezpośrednim.

Ponadto wydaje się, że tego typu układy reflektorów nie są w stanie realizować tak dużych wzmocnień światłości, jak to miało miejsce w przypadku rozwiązań z klasycznymi źródłami. Powodem jest osiągnięcie przez moduł LED nieporównywalnie większych wymiarów niż klasyczne źródła o promieniowaniu całościowym.

#### Podsumowanie i wnioski

Artykuł przedstawia rozważania teoretyczne poświęcone konstruowaniu układów optycznych opraw oświetleniowych wykorzystujących jako źródło światła moduł LED.

Pojawienie się tego źródła, z powodu dwóch jego niespotykanych dotychczas cech: płaskiej formy o dużych wymiarach i półprzestrzennej, lambertowskiej bryły fotometrycznej, uzasadnia konieczność poszukiwania nowej strategii konstruowania tego typu układów odbłyśników zwierciadlanych. W artykule pokazano dwa typy układów optycznych wykorzystujących moduły LED- układ odbłyśnika typu downlight oraz układ reflektora paraboloidalnego. Dokonano także porównania spodziewanych efektów fotometrycznych nowych rozwiązań opraw z modułem LED w stosunku do klasycznych konstrukcji wykorzystujących odbicie zwierciadlane.

#### LITERATURA

- [1] Żagan W., Oprawy oświetleniowe. Kształtowanie rozsyłu światłości i rozkładu luminancji, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2012
- [2] Oleszyński T., Elektryczne oprawy oświetleniowe, *Wydawnictwo Naukowo-techniczne*, Warszawa 1978
- [3] Shailesh K.R., Kurian C.P., and Kini S.G.; Measurement of junction temperature of light-emitting diodes in a luminaire, *Lighting Research and Technology*, 1477153514548696, first published on September 1, 2014
- [4] F Liu, L Chen, B Tang, Y Hu, Q Lin, and L Lei; A discontinuous surface reflector for high-power integrated LEDs, *Lighting Research and Technology*, October 2014; vol. 46, 5: pp. 567-575., first published on December 2, 2013

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Wojciech Żagan, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [Wojciech.Zagan@ien.pw.edu.pl](mailto:Wojciech.Zagan@ien.pw.edu.pl); dr inż. Sławomir Zalewski, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [Slawomir.Zalewski@ien.pw.edu.pl](mailto:Slawomir.Zalewski@ien.pw.edu.pl).