

Analiza zapotrzebowania na energię do oświetlenia drogowego przy zmiennym natężeniu ruchu

Streszczenie. W artykule rozważano możliwości dostosowania oświetlenia do warunków panujących na ulicy i w jej otoczeniu. Na podstawie wyników obliczeń dla przykładowej drogi analizowano korzyści wynikające z mniejszego zapotrzebowania na energię do oświetlenia w następstwie obniżania poziomu luminancji nawierzchni jezdni w porze niskiego natężenia ruchu. Z przedstawionego przykładu wynika, że możliwa jest redukcja rocznego zapotrzebowania na energię do oświetlenia drogowego na poziomie 38%.

Abstract. In this paper the opportunities of lighting adaptation to existing conditions on roads were considered. For a selected road, on the ground of the calculations, the benefits resulting from the lighting energy reduction as a result of road surface luminance level reduction at low traffic volume were analysed. The analysed case shows that the energy reduction per year on road lighting purposes reached 38% level. **(The analysis of energy demand for road lighting at adapted traffic volume)**

Słowa kluczowe: oświetlenie dróg, efektywność energetyczna, redukcja luminancji
Keywords: road lighting, energy efficiency, luminance reduction

doi:10.12915/pe.2014.04.23

Wstęp

Oświetlenie stacjonarne ulic i ich bezpośredniego otoczenia powinno zapewniać bezpieczeństwo i wygodę widzenia wszystkim uczestnikom ruchu drogowego. Tematyka oświetlenia drogowego jest szeroko komentowana w literaturze przedmiotowej, np. [1, 2, 3], a wymagania i zalecenia związane z tworzeniem pożądanego otoczenia świetlnego oraz metody obliczeniowe i pomiarowe oświetlenia drogowego zawarte są w opracowaniach CIE, np. [4, 5, 6] i normach, np. [7, 8, 9, 10].

Oświetlenie drogi zależy od jej funkcji komunikacyjnej, z którą związana jest klasa oświetlenia drogi. W normie [7] zdefiniowano różne klasy oświetlenia dróg: ME/MEW, CE, S, A, ES i EV. Klasy ME/MEW są przewidziane do stosowania na drogach z dominującym ruchem motorowym, a parametry oświetleniowe dla tych klas oparte są na luminancji nawierzchni jezdni. W niniejszym artykule rozważania prowadzono dla dróg o suchej nawierzchni jezdni klasy ME.

Eksploatacja oświetlenia drogowego związana jest ze zużyciem energii elektrycznej, którego poziom szacuje się na 114 TWh. Stanowi to 4,3% światowego zużycia energii elektrycznej na potrzeby oświetlenia [11]. Pomimo niezbyt dużego udziału oświetlenia drogowego w światowym zużyciu energii elektrycznej dostrzeżono potrzebę opracowania sposobu oceny efektywności energetycznej oświetlenia drogowego [12]. W ostatnich latach w Zakładzie Techniki Świetlnej Politechniki Warszawskiej prowadzono badania, których jednym z rezultatów było opracowanie systemu oceny efektywności energetycznej oświetlenia drogowego [13, 14, 15]. System ten jest wykorzystywany w praktyce, np. [16, 17] i może stanowić podstawę oceny efektywności energetycznej oświetlenia drogowego. Także Unia Europejska zamierza wprowadzić nową normę zawierającą sposób oceny efektywności energetycznej oświetlenia drogowego. Prace są bardzo zaawansowane. Można uznać, że efektywność energetyczna oświetlenia stała się istotnym kryterium projektowania nowych i oceny funkcjonujących systemów oświetlenia drogowego, a w oparciu o profesjonalny system oceny możliwa jest rzetelna analiza strategii i rozwiązań oświetleniowych pod kątem efektywności energetycznej oświetlenia drogowego.

Znane są różne sposoby redukcji zużycia energii elektrycznej na potrzeby oświetlenia, związane tak z minimalizowaniem mocy instalowanej oświetlenia jak i ograniczaniem czasu wykorzystania tej mocy [18]. Niezależnie od stosowanych technik minimalizowania zużycia energii na potrzeby oświetlenia, moc instalowana

oświetlenia jest podstawowym czynnikiem warunkującym ograniczenie zużycia energii [18]. Sposoby minimalizowania mocy instalowanej oświetlenia są dobrze poznane i często wykorzystywane w praktyce oświetlenia drogowego. Z drugiej strony, wciąż dostrzega się i rozwija nowe możliwości redukcji zużycia energii elektrycznej na oświetlenie drogowe, np. [6, 19].

W niniejszym artykule przedstawiono potencjalne korzyści jakie mogą wynikać z redukcji mocy instalowanej oświetlenia drogowego w następstwie dostosowania poziomu luminancji jezdni do warunków panujących na drodze i w jej sąsiedztwie.

Kryteria projektowania i oceny oświetlenia drogowego

Zapewnienie bezpieczeństwa i wygody ruchu drogowego związane jest z wytworzeniem odpowiednich warunków oświetleniowych na ulicy i w jej bezpośrednim otoczeniu. Warunki oświetleniowe na drodze opisywane są poprzez szereg parametrów oświetleniowych, a wystąpienie pożądanego warunków oświetleniowych związane jest z zapewnieniem wartości kryterialnych tych parametrów.

Podstawowe parametry opisujące ilościowe i jakościowe cechy oświetlenia dróg to [1, 2, 3, 8]:

- średnia luminancja nawierzchni jezdni L_{sr} ,
- równomierność całkowita luminancji jezdni U_O ,
- równomierność wzdłużna luminancji jezdni U_L ,
- względny przyrost progowy TI ,
- wskaźnik oświetlenia pobocza SR .

Wartości kryterialne parametrów oświetleniowych dla dróg klas ME zestawiono w tabeli 1.

Tradycyjne podejście do projektowania i eksploatacji oświetlenia drogowego zakłada, że na drodze o określonej klasie, w każdej chwili, w ciągu całego okresu użytkowania oświetlenia zapewnione będą warunki normalne, czyli wartości średniej luminancji nawierzchni jezdni, równomierności całkowitej i wzdłużnej luminancji nawierzchni jezdni i wskaźnika oświetlenia pobocza nie będą niższe od wartości wymaganych, a dla wskaźnika określającego względny przyrost progowy nie będą wyższe od wartości dopuszczanej dla danej klasy drogi.

Podejście takie praktycznie oznacza, że w ciągu całego okresu eksploatacji oświetlenia drogowego wykorzystywana jest pełna moc oświetlenia, gdyż w porze nocnej (najczęściej od zachodu do wschodu Słońca) jest nieprzerwanie realizowany stały, wymagany poziom luminancji nawierzchni jezdni (uzyskiwane są także wymagane, jakościowe cechy oświetlenia na drodze).

Tabela 1. Kryterialne wartości parametrów oświetleniowych dla dróg klas ME [8].

Klasa	L_{sr} [cd/m ²]	U_O [-]	U_L [-]	TI [%]	SR [-]
ME1	2	0,4	0,7	10	0,5
ME2	1,5				
ME3a	1				
ME3b				0,6	
ME3c				0,5	
ME4a				0,6	
ME4b	0,75	0,35	0,4	15	
ME5	0,5				
ME6	0,3				-

Określanie podstawowej klasy oświetlenia drogi

Pomysł redukowania poziomu luminancji (obniżania klasy ME) w warunkach natężenia ruchu odbiegających od normalnych był już dawno znany, jednak dopiero w ostatnich latach opracowano praktyczną propozycję postępowania, polegającą na dostosowaniu wymaganego poziomu luminancji nawierzchni jezdni do sytuacji aktualnie panującej na drodze i w jej sąsiedztwie [6]. Należy oczekiwać, że podejście zaproponowane przez CIE może znaleźć odzwierciedlenie także w normach europejskich, których uaktualnienie jest przygotowywane, a następnie w normach krajowych.

Określenie klasy oświetlenia drogi wynika z analizy czynników charakteryzujących panujące warunki. Podstawowymi parametrami, na których oparto określenie klasy drogi są [6, 7]:

- prędkość ruchu;
- natężenie ruchu;
- uczestnicy ruchu;
- rozdzielanie jezdni;
- odstęp pomiędzy skrzyżowaniami;
- zaparkowane pojazdy;
- luminancja otoczenia;
- prowadzenie wzrokowe i sygnalizacja.

Określenie wpływu poszczególnych parametrów na klasę drogi ilustruje tabela 2.

Na podstawie określonych stopni poszczególnych parametrów i odpowiadających im wartości liczbowych, należy obliczyć sumę poszczególnych udziałów V_{ws} . Wynikową klasę oświetlenia drogi oblicza się z zależności:

$$(1) \quad ME = 6 - V_{ws}$$

Sposób dojścia do klasy oświetlenia drogi jest stosunkowo prosty, ale ustalenie stopnia wpływu poszczególnych parametrów może w praktyce napotykać na trudności. Należy jednak oczekiwać, że projektanci i osoby oceniające oświetlenie drogi dokonają rzetelnego szacowania, opartego na dostępnych danych oraz wiedzy i własnych doświadczeniach.

Tak więc obecnie w praktyce projektowania i eksploatacji oświetlenia drogowego, dla danej drogi określana jest podstawowa klasa oświetlenia drogi na podstawie krytycznego poziomu natężenia ruchu i takie warunki traktuje się jako normalne. Krytyczny poziom natężenia ruchu traktowany jest jako średnie dzienne natężenie ruchu dla danej ulicy lub jej odcinka.

W tradycyjnym podejściu do projektowania oświetlenia, określona w ten sposób podstawowa klasa oświetlenia drogi jest odniesieniem do przyjęcia wymagań oświetleniowych dla danej drogi. Projektując oświetlenie zakłada się, że wymagania oświetleniowe muszą być spełnione dla tak określonej, podstawowej klasy oświetlenia drogi niezależnie od pory wykorzystania oświetlenia.

Tabela 2. Zestawienie parametrów i ich wpływu na klasę oświetlenia drogi [6].

Parametr	Stopień	Wartość
Prędkość ruchu	Bardzo duża	1
	Duża	0,5
	Umiarkowana	0
Natężenie ruchu	Bardzo duże	1
	Duże	0,5
	Umiarkowane	0
	Małe	-0,5
	Bardzo małe	-1
Uczestnicy ruchu	Mieszani (duży udział rowerzystów i pieszych)	2
	Mieszani	1
	Tylko pojazdy motorowe	0
Rozdzielenie jezdni	Tak	0
	Nie	1
Odstęp pomiędzy skrzyżowaniami	Duży	1
	Umiarkowany	0
Zaparkowane pojazdy	Tak	0,5
	Nie	0
Luminancja otoczenia	Wysoka	1
	Umiarkowana	0
	Niska	-1
Prowadzenie wzrokowe i sygnalizacja	Słabe	0,5
	Dobre	0

Określanie zmiennej w czasie klasy oświetlenia drogi

Natężenie ruchu jest parametrem silnie związanym z porą dnia oraz dniem tygodnia. Uwzględnienie zmienności ruchu w ciągu dnia stanowi podstawę do zmiany klasy oświetlenia drogi, a w konsekwencji do zmiany wymagań oświetleniowych.

Jak już wspomniano, choć pomysł redukowania luminancji nawierzchni jezdni w zależności od panującej sytuacji nie jest nowy, to nie był on stosowany w praktyce, przede wszystkim ze względu na ograniczenia możliwości jego realizacji. Sterowanie stosowanymi powszechnie w oświetleniu drogowym lampami sodowymi i metalohalogenkowymi napotykało na istotne problemy techniczne i było kosztowne. Sytuacja ta ulega obecnie zmianie, a dodatkowo w oświetleniu drogowym znajdują już zastosowanie, choć na razie w bardzo ograniczonym zakresie, nowe źródła elektroluminescencyjne, których strumień świetlny można łatwo regulować, w pełnym jego zakresie. Zaistniała więc sytuacja, w której możliwa staje się praktyczna i powszechna realizacja zasady dostosowania oświetlenia drogowego do warunków panujących na ulicy i w jej sąsiedztwie.

W artykule rozpatrzono teoretyczny przykład drogi znajdującej się w dużym mieście, dla której zilustrowany zostanie sposób określenia zmiennej w czasie klasy oświetlenia. Przyjęto następujące założenia dla drogi, jej otoczenia i prowadzonego ruchu:

- prędkość ruchu: bardzo duża;
- uczestnicy ruchu: mieszani;
- rozdzielanie jezdni: występuje;
- odstęp pomiędzy skrzyżowaniami: duży;
- zaparkowane pojazdy: brak;
- luminancja otoczenia: wysoka;
- prowadzenie wzrokowe i sygnalizacja: dobre.

Założenia dotyczące okresów natężenia ruchu w porze nocnej są następujące:

- do godziny 22 (Δt_1) panuje bardzo duże natężenie ruchu;
- w godzinach 22-0 (Δt_2) panuje umiarkowane natężenie ruchu;
- w godzinach 0-6 (Δt_3) panuje bardzo małe natężenie ruchu;
- od godziny 6 (Δt_4) panuje bardzo duże natężenie ruchu.

Uwzględniając powyższe założenia można przeanalizować wynikowe klasy oświetlenia analizowanej drogi w zależności od pory dnia. Wyniki wyznaczeń przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wynikowe klasy oświetlenia analizowanej drogi w zależności od pory dnia.

Parametr	Stopień	Okresy w porze nocnej			
		Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4
		Wartość			
Prędkość ruchu	Bardzo duża	1	1	1	1
Natężenie ruchu	Bardzo duże Duże Umiarkow. Małe Bardzo małe	1	0	-1	1
Uczestnicy ruchu	Mieszani	1	1	1	1
Rozdzielenie jezdni	Występuje	0	0	0	0
Odstęp pomiędzy skrzyżow.	Duży	1	1	1	1
Zaparkowane pojazdy	Brak	0	0	0	0
Luminancja otoczenia	Wysoka	1	1	1	1
Prowadzenie wzrokowe i sygnalizacja	Dobre	0	0	0	0
Suma wartości		5	4	3	5
Klasa oświetlenia drogi		ME1	ME2	ME3	ME1

Jak można zaobserwować na podstawie wyników z tabeli 3, podstawową klasą oświetlenia drogi w analizowanym przypadku jest klasa ME1. Oznacza to, że oświetlenie stacjonarne dla tej drogi powinno być projektowane dla poziomu średniej eksploatacyjnej luminancji nawierzchni jezdni wynoszącej 2 cd/m^2 i wymagań jakościowych określonych dla klasy ME1. W okresach od zachodu Słońca do godziny 22 i od godziny 6 do wschodu Słońca (w tych dniach w roku, gdy Słońce wschodzi przed godziną 6) powinna być wykorzystywana pełna moc urządzenia oświetleniowego. Pomiędzy godziną 22 a 6, ze względu na obniżenie natężenia ruchu zachodzi możliwość obniżenia poziomu luminancji nawierzchni jezdni, a w konsekwencji wykorzystywania jedynie części mocy instalowanej urządzenia oświetleniowego.

Zapotrzebowanie na energię do oświetlenia drogi

Dla zilustrowania sposobu analizowania zapotrzebowania na energię do oświetlenia w praktyce, zaprezentowano przykład obliczeniowy dla drogi o parametrach określonych w poprzednim punkcie artykułu.

Pozostałe parametry rozpatrywanej drogi są następujące:

- droga dwujezdniowa z jezdniami rozdzielonymi;
- szerokość każdej jezdni 10,5 m;
- szerokość pasa środkowego 1 m;
- nawierzchnia jezdni: sucha R3.

Podstawową klasą oświetlenia tej drogi, jak to wynika z wcześniejszych ustaleń, jest klasa ME1. Zaproponowano oświetlenie drogi respektujące wymagania dla tej klasy.

Koncepcja oświetlenia drogi jest następująca:

- układ rozmieszczenia opraw: naprzeciwległy (jednostronny dla każdej jezdni);
- oprawy z kloszem płaskim;
- wysokoprężne lampy sodowe.

Szczegółowe obliczenia oświetleniowe doprowadziły do wyboru lamp sodowych o mocy 250 W i następującego rozmieszczenia opraw:

- wysokość zawieszenia opraw: 12 m;
- moduł: 45 m;
- wysunięcie opraw: 0;
- kąt nachylenia opraw: 0.

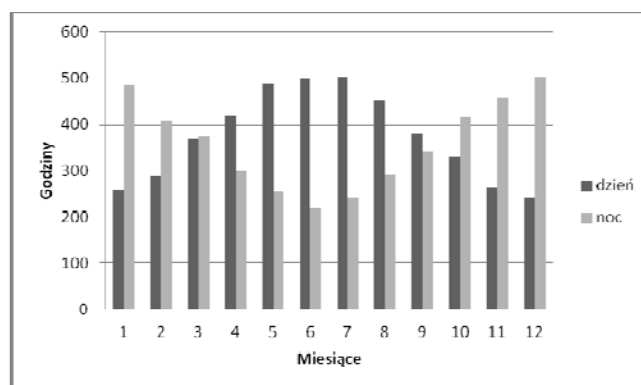
Uzyskano poziom średniej eksploatacyjnej luminancji nawierzchni jezdni równy 2 cd/m^2 i spełnienie wszystkich wymagań dotyczących jakościowych cech oświetlenia.

Moce oświetlenia drogowego dla jednego modułu rozpatrywanej sytuacji przedstawiają się następująco:

- moc instalowana: 552 W;
- moc jednostkowa: $0,58 \text{ W/m}^2$;
- moc skorygowana: $0,29 \text{ W/m}^2 | \text{cd/m}^2$.

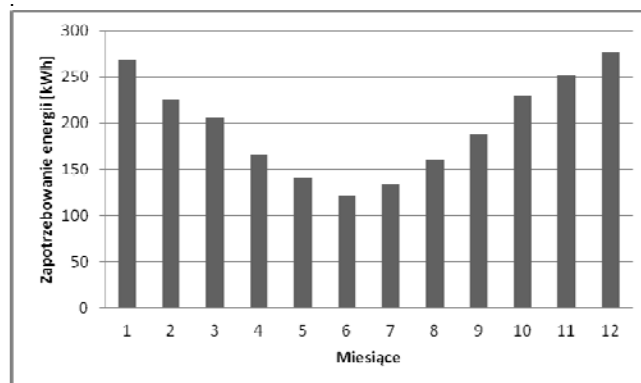
Potencjał energetyczny takiego rozwiązania oświetleniowego jest bardzo dobry. Oceniając efektywność energetyczną na podstawie mocy jednostkowej lub skorygowanej oświetlenia, analizowane rozwiązanie oświetleniowe realizuje klasę efektywności energetycznej B według systemu oceny [15].

Przeprowadzono także analizę dynamiki energetycznej oświetlenia – zapotrzebowania na energię do oświetlenia rozpatrywanej drogi. Wykonano ją dla lokalizacji drogi w Warszawie, uwzględniając strukturę dnia/nocy dla roku 2012. Rok ten był rokiem przestępnym i trwał 8784 h (pora nocna – od zachodu do wschodu Słońca – trwała 4293 h). Strukturę dnia/nocy w Warszawie w roku 2012 zilustrowano na rysunku 1.



Rys. 1. Miesięczny rozkład godzin dziennych i nocnych w Warszawie w roku 2012.

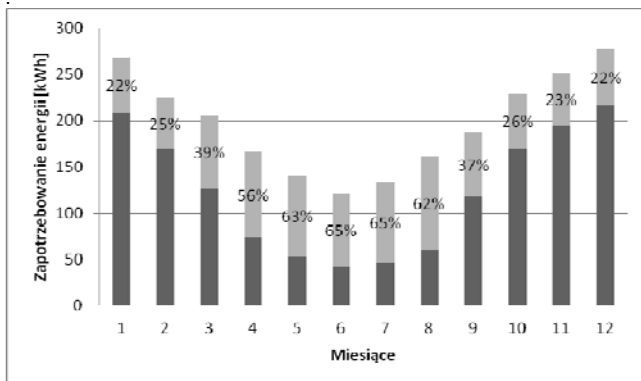
Gdyby oświetlenie stacjonarne rozpatrywanej drogi było eksploatowane pełną mocą w porze nocnej, to roczne zapotrzebowanie energii dla jednego modułu wyniosłoby 2370 kWh/r. Miesięczny rozkład zapotrzebowania energii na oświetlenie drogi przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Miesięczne zapotrzebowanie na energię do oświetlenia analizowanej drogi w Warszawie w roku 2012, przy pełnym wykorzystaniu mocy instalowanej w porze nocnej

Eksploracja oświetlenia według schematu z tabeli 3 prowadzi do istotnej redukcji energii na skutek obniżenia poziomu luminancji nawierzchni jezdni w okresach obniżonego natężenia ruchu. Roczne zapotrzebowanie energii wyniosłoby w tym przypadku 1477 kWh/r, co oznacza redukcję zapotrzebowania energii na poziomie 38%. Miesięczny rozkład zapotrzebowania energii na oświetlenie rozpatrywanej drogi, przy redukowaniu poziomu luminancji jezdni w porze obniżonego natężenia ruchu, i poziom redukcji energii w stosunku do zapotrzebowania wynikającego z wykorzystania pełnej mocy oświetlenia drogowego przedstawiono na rysunku 3.

W miesiącach zimowych redukcja zapotrzebowania energii kształtuje się na poziomie ok. 20% (ok. 60 kWh miesięcznie) a w miesiącach letnich kształtuje się na poziomie ok. 65% (ok. 90 kWh miesięcznie).



Rys. 3. Poziom redukcji (jasne kolumny) i miesięczne zapotrzebowanie na energię do oświetlenia analizowanej drogi w Warszawie w roku 2012 (ciemne kolumny), przy częściowym wykorzystaniu mocy instalowanej w porze nocnej

Zaprezentowany przykład bazuje na wielu założeniach i realne poziomy redukcji zapotrzebowania na energię mogą różnić się od tych wynikających z przedstawionych obliczeń. Wydaje się jednak, że uzyskany w zaprezentowanym przykładzie poziom oszczędności jest możliwy do osiągnięcia w praktyce.

Bardzo ważnymi kwestiami przy omawianiu tego tematu, wymagającymi osobnych rozważań, są regulacje prawne, a więc formalne dopuszczenie możliwości obniżania luminancji nawierzchni jezdni w porach obniżonego natężenia ruchu oraz akceptacja niższych poziomów luminancji przez uczestników ruchu. Wydaje się, że redukowanie poziomu luminancji w porze najmniejszego natężenia ruchu nawet do poziomu $0,3 \text{ cd/m}^2$, wynikającego z wymagań klasy ME6, powinno być akceptowane. Oświetlenie będzie cały czas czynne, a więc będzie zapewniać prowadzenie wzrokowe kierowcom i poczucie bezpieczeństwa osobom przebywającym w porze nocnej w pobliżu drogi. Wykorzystywany system sterowania oświetleniem drogowym oprócz redukowania poziomu luminancji jezdni do panującego natężenia ruchu, powinien w każdej chwili umożliwiać realizowanie maksymalnego poziomu luminancji jezdni w sytuacjach wyjątkowych, np. istotnego pogorszenia się warunków atmosferycznych lub specjalnych wydarzeń odbywających się w okolicy tak oświetlanej drogi.

Podsumowanie

Rozwój technologiczny i obniżanie kosztu inwestycyjnego drogowego sprzętu oświetleniowego powodują, że możliwe staje się powszechne stosowanie sterowania oświetleniem drogowym w praktyce. Uwzględnienie korzyści wynikających z obniżenia kosztu eksploatacyjnego oświetlenia drogowego, jako rezultat

zastosowania systemów sterowania, powinno być dodatkową zachętą do bardziej powszechnego stosowania tych systemów.

Niestety, słaby poziom projektowania oświetlenia w praktyce polskiej oraz niska świadomość inwestorów i użytkowników oświetlenia co do panującej praktyki, ale także niska świadomość znaczenia oświetlenia dla ludzi i rzeczywistych możliwości projektowych i sprzętowych, powodują, że bardzo często inwestorzy inwestują w źle zaprojektowane i zrealizowane oświetlenie a użytkownicy korzystają ze złego oświetlenia.

Przedstawiony w niniejszym artykule przykład ilustruje potencjalne korzyści jakie mogą wynikać jedynie z dostosowania poziomu luminancji jezdni do aktualnie panujących warunków na ulicy i w jej sąsiedztwie. Jednoczesne zastosowanie różnych technik minimalizowania zużycia energii na oświetlenie powinno prowadzić do większej redukcji zużycia energii na potrzeby oświetlenia drogowego. Wykorzystywanie tych technik w praktyce z dobrymi skutkami wymaga profesjonalnego podejścia do projektowania, realizowania i eksploataowania oświetlenia.

LITERATURA

- [1] Bommel W.J.M., Boer J.B., Oświetlenie dróg, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1984.
- [2] Boyce P.R., Lighting for driving.: Road, vehicles, signs and signals. CRC Press Taylor&Francis Group, London, 2009.
- [3] Golik W., Oświetlenie dróg i tuneli drogowych. Technika świetlna '09, tom 2, Poradnik Polskiego Komitetu Oświetleniowego SEP, Letter Quality, Warszawa, 2013.
- [4] Publikacja CIE 132-1999, Design methods for lighting of roads, CIE, Vienna, 1999.
- [5] Publikacja CIE 140-2000, Road lighting calculations, CIE, Vienna, 2000.
- [6] Publikacja CIE 115-2010, Lighting of roads for motor and pedestrian traffic, CIE, Vienna, 2010.
- [7] PKN-CEN/TR 13201-1:2007, Oświetlenie dróg – Część 1: Wybór klas oświetlenia, PKN, Warszawa 2007.
- [8] PN-EN 13201-2:2007, Oświetlenie dróg – Część 2: Wymagania oświetleniowe, PKN, Warszawa 2007.
- [9] PN-EN 13201-3:2007, Oświetlenie dróg – Część 3: Obliczenia parametrów oświetleniowych, PKN, Warszawa 2007.
- [10] PN-EN 13201-4:2007, Oświetlenie dróg – Część 4: Metody pomiarów parametrów oświetlenia, PKN, Warszawa 2007.
- [11] Publikacja IEA, Light's Labour's Lost, Policies for Energy – efficient Lighting, Actis, Paris, 2006.
- [12] Boyce P.R., Fotios S., Richards M., Road lighting and energy saving, *Lighting Research & Technology*, 3/2009, 245-260.
- [13] Pracki P., Unified system of lighting energy efficiency evaluation in public places, Proceedings of CIE 2010 „Lighting Quality and Energy Efficiency”, Vienna, 2010, 317-321.
- [14] Pracki P., A proposal to classify road lighting energy efficiency, *Lighting Research & Technology*, 3/2011, 271-280.
- [15] Pracki P., System oceny efektywności energetycznej oświetlenia wewnątrz i dróg. Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka z. 143, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2012.
- [16] Pracki P., Jägerbrand A., Application of road lighting energy efficiency evaluation system in practice, CIE Centenary Conference, Paris, 2013, 1038-1043.
- [17] Wasserfurth-Grzybowski N., Ciupak M., Rychlik K., Westermann O., Eine Stadt von Natur aus intelligent - Lighting Design Masterplan für Gliwice, 12th European Lighting Conference Lux Europa 2013, Kraków, 2013, 222-227.
- [18] Bąk J., Wydajne energetycznie oświetlenie wewnątrz. Wybrane zagadnienia, SEP-COSIW, Warszawa, 2009.
- [19] Zalewski S., Pracki P., The concept of LED road lighting concurrent with vehicles, *Przegląd Elektrotechniczny*, 5a/2012, 169-172.

Autor: dr inż. Piotr Pracki, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Techniki Świetlnej; ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: piotr.pracki@ien.pw.edu.pl