POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ACADEMIC JOURNALS
No 92 Electrical Engineering 2017

DOI 10.21008/j.1897-0737.2017.92.0022

Małgorzata GÓRCZEWSKA*
Przemysław SKRZYPCZAK*
Dariusz CZYŻEWSKI**

WSPÓŁCZYNNIK UTRZYMANIA W OŚWIETLENIU DRÓG OPRAWAMI LED

W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące zasad określania współczynnika utrzymania w projektowaniu instalacji oświetlenia drogowego z wykorzystaniem opraw LED. Dotychczas stosowane sposoby, oparte na eksperymentalnych danych sprzed wielu lat, dotyczących źródeł światła i opraw innej generacji, nie odpowiadają współcześnie stosowanym rozwiązaniom technicznym.

SŁOWA KLUCZOWE: projektowanie oświetlenia, oświetlenie drogowe, eksploatacyjne zmiany parametrów fotometrycznych, wyznaczanie współczynnika utrzymania, diody elektroluminescencyjne

1.WPROWADZENIE

Podstawę projektowania i oceny parametrów oświetlenia drogowego stanowi obecnie pięcioczęściowa norma europejska, opublikowana pod ogólną nazwą „Road Lighting" [1, 2, 3, 4, 5]. Norma ta zawiera wytyczne i procedury dotyczące doboru wymagań oświetleniowych, obliczeń i pomiarów parametrów fotometrycznych oraz wyznaczania efektywności energetycznej systemu.

Kryteria ilościowe, stosowane w oświetleniu drogowym, związane są z poziomami oświetlenia, których miarą jest wartość średniej luminancji lub średniego natężenia oświetlenia. Wymaga się, aby te parametry były zapewnione na określonym poziomie przez cały okres eksploatacji oświetlenia, którego poziom, wskutek oddziaływania wielu czynników, z upływem czasu ulega pogorszeniu. Oznacza to konieczność zastosowania początkowego przewymiarowania oświetlenia, a więc zwiększenia jego energochłonności.

Racjonalizacja projektowanych rozwiązań systemów oświetlenia, skutkująca obniżeniem kosztów eksploatacyjnych, wiąże się z koniecznością identyfikacji oraz ilościowej oceny wpływu poszczególnych czynników na obniżanie się poziomu oświetlenia. Wiąże się również z potrzebą zaplanowania procedur konserwacyjnych, które okresowo będą poprawiać jego jakość.

* Politechnika Poznańska.
** Politechnika Warszawska.

2. EKSPLOATACYJNE ZMIANY PARAMETRÓW OŚWIETLENIA DROGOWEGO

Przyczyny powodujące zmiany parametrów oświetleniowych związane są z wieloma czynnikami, takimi jak np. temperatura otoczenia, właściwości stateczników i zasilaczy, starzenie się materiałów, obniżanie się współczynników odbicia powierzchni, eksploatacyjne zmiany parametrów lamp, zabrudzanie się opraw oświetleniowych itp.

Stopień obniżenia poziomu natężenia oświetlenia lub luminancji, po określonym czasie użytkowania urządzenia oświetleniowego, odniesiony do poziomu natężenia oświetlenia lub luminancji dla nowego urządzenia, określa się mianem współczynnika utrzymania, wyznaczanego z zależności:

$$MF = \frac{E_t}{E_o} \qquad MF = \frac{L_t}{L_o} \tag{1}$$

gdzie: MF – współczynnik utrzymania (*Maintenance Factor*), E_t – poziom natężenia oświetlenia po czasie t, L_t – poziom luminancji po czasie t, E_o – początkowy poziom natężenia oświetlenia, L_o – początkowy poziom luminancji.

W odniesieniu do projektowania systemów oświetlenia zewnętrznego, zasady wyznaczania współczynnika utrzymania zawarte są w Raporcie Technicznym CIE 154:2003 [6]. Można wyróżnić dwie grupy czynników wpływających na pogorszenie oświetlenia:

- pierwsza grupa obejmuje czynniki takie jak starzenie się elementów opraw, na których negatywne oddziaływanie zabiegi konserwacyjne praktycznie nie mają wpływu. Starzeniowe obniżanie się strumienia świetlnego opraw ma charakter nieodwracalny i zachodzi pod wpływem warunków środowiskowych, w jakich są eksploatowane oprawy a intensywność zmian zależy od ich konstrukcji oraz od jakości materiałów, z jakich wykonane są optycznie czynne powierzchnie.
- druga grupa obejmuje czynniki, których wpływ można ograniczyć przez dobór odpowiedniego sprzętu oraz w wyniku prowadzenia planowych, okresowych zabiegów eksploatacyjnych. W ogólnym ujęciu, dotyczą one wymiany przepalonych źródeł światła i uszkodzonych elementów osprzętu, czyszczenia lamp i opraw oświetleniowych oraz odnawiania ścian powierzchni, od których odbicie światła wpływa na poziom oświetlenia.

W oświetleniu drogowym przyjmuje się, że wyznaczanie współczynnika utrzymania MF wiąże się z uwzględnieniem głównie dwóch czynników:

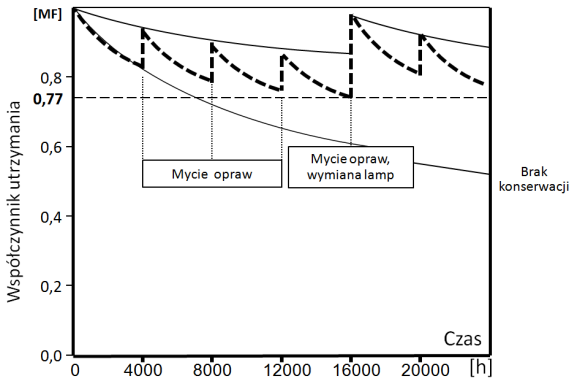
- obniżania się strumienia świetlnego lamp – LLMF (*Lamp Lumen Maintenance Factor*),
- zabrudzania się opraw – LMF (*Luminaire Maintenance Factor*).

Pozostałe czynniki pomija się, ponieważ uszkodzone lampy wymieniane są indywidualnie, a wpływ zabrudzania się powierzchni uwzględnia się w projektowaniu oświetlenia wnętrz.

Wartość współczynnika utrzymania można wyznaczyć z zależności:

$$MF = LLMF \; x \; LMF \tag{2}$$

Prowadzenie zbiegów konserwacyjnych, polegających na myciu opraw i grupowej wymianie lamp, po zakończeniu okresu ich użytkowej trwałości, minimalizuje stopień początkowego przewymiarowania oświetlenia. Częstotliwość wykonywania tych prac jest uzależniona od jakości źródeł światła, zanieczyszczenia środowiska, stopnia szczelności opraw oraz przyjętego współczynnika utrzymania. Zmiany tego współczynnika, odpowiadające zmianom poziomu oświetlenia, związanym z prowadzeniem okresowych zabiegów eksploatacyjnych, przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Wpływ zabiegów konserwacyjnych na poziom oświetlenia, wyrażony przez współczynnik utrzymania

Jak wynika z rysunku 1, projektowanie oświetlenia oznacza nie tylko dobór właściwych poziomów oświetlenia, zgodnych z normami, ale wiąże się również z opracowaniem harmonogramów prowadzenia czynności konserwacyjnych. Ich brak prowadziłby do znaczącego pogorszenia jakości oświetlenia.

Określenie współczynnika utrzymania, powiązanego z procedurami eksploatacyjnymi, wymaga znajomości zmian w czasie strumienia świetlnego źródeł światła oraz opraw. Informacje, dotyczące tych danych zawarto w Raporcie CIE 154 [6]. Przykładowe wartości cząstkowych współczynników utrzymania dla strumienia świetlnego – LLMF przedstawiono w tabeli 1.

W Raporcie CIE podano również wartości cząstkowych współczynników utrzymania dla opraw – LMF, przedstawione w tabeli 2. Straty strumienia świetlnego zależą w tym przypadku głównie od stężenia zanieczyszczeń w środowisku oraz od konstrukcji opraw, opisanej przez stopnie ochrony IP.

Tabela.1. Współczynniki utrzymania strumienia świetlnego lampy (LLMF)

Typ lampy	LLMF				
	Czas pracy [tys. godzin]				
	4	6	8	10	12
Wysokoprężna sodowa	0,98	0,96	0,94	0,92	0,89
Wysokoprężna metalohalogenkowa	0,98	0,97	0,94	0,92	0,88

Tabela 2. Współczynniki utrzymania oprawy (LMF)

IP oprawy	Środowisko	LMF				
		Czas pracy [lata]				
		1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
IP2X	Czyste	0,90	0,82	0,79	0,78	0,75
	Przeciętne	0,62	0,58	0,56	0,53	0,52
	Brudne	0,53	0,48	0,45	0,42	0,41
IP5X	Czyste	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88
	Przeciętne	0,90	0,88	0,86	0,84	0,82
	Brudne	0,89	0,87	0,84	0,80	0,76
IP6X	Czyste	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89
	Przeciętne	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
	Brudne	0,91	0,90	0,88	0,86	0,83

Charakterystyka środowisk pracy opraw, opisanych w tabeli 2 jako:

- „czyste" – brak znaczącego zapylenia i zadymienia, umiarkowany ruch samochodów – przedmieścia, obszary wiejskie,
- „przeciętne" – umiarkowane zapylenie i zadymienie, umiarkowany ruch – osiedla mieszkaniowe, przemysł lekki,
- „brudne" – okresowe zapylenie i zadymienie, znaczny ruch – centra miast, obszary przemysłowe.

Na podstawie danych, zawartych w tabelach 1 i 2, można dla wybranej częstotliwości prowadzenia zabiegów konserwacyjnych, wyznaczyć współczynnik utrzymania, zapewniający uzyskanie parametrów oświetlenia na poziomie wymaganym w normie.

Należy podkreślić, że w ostatnim okresie następuje szybki rozwój źródeł światła, stąd dane zawarte w tabeli 1, stanowiące uśrednione dane dla lamp wielu producentów, mogą się istotnie różnić od rzeczywistych parametrów wybranego źródła światła. Dla wyeliminowania takich rozbieżności, zgodnie z Rozporządzeniem Komisji (WE) Nr 245/2009 [7], podawanie informacji, odnoszących

się do utrzymania strumienia świetlnego lamp jest obecnie obowiązkiem producentów. Dane takie są dostępne na stronach internetowych, w katalogach, kartach produktów, itp.

W odniesieniu do współczynników LLMF, zawartych w tabeli 2, istnieją wątpliwości, ponieważ przy jej sporządzaniu, oparto się na wynikach badań sprzed wielu lat. Konstrukcja współczesnych opraw ulega stałemu udoskonalaniu, inne są również źródła światła, stąd w literaturze często przytaczane są wyniki bardziej aktualnych badań [8], przedstawione w tabeli 3, mogące zastąpić te przyjęte w tabeli 2.

Tabela 3. Współczynniki utrzymania LMF, związane z zabrudzaniem się opraw

Strefy E, wysokości montażu h	Współczynnik utrzymania LMF			
	Miesiące pracy opraw			
	12	24	36	48
E1/E2 h≤6m	0,98	0,96	0,95	0,94
E1/E2 h>7m	0,98	0,96	0,95	0,94
E3/E4 h≤6m	0,94	0,92	0,90	0,89
E3/E4 h>7m	0,97	0,96	0,95	0,94

Charakterystyka środowisk pracy opraw, opisanych w tabeli 3 jako:
E1 – środowisko czyste np. obszary leśne o niewielkim natężeniu ruchu,
E2 – środowisko wiejskie, obszary podmiejskie o niewielkim natężeniu ruchu,
E3 – centra małych miast, obszary podmiejskie o średnim natężeniu ruchu,
E4 – centra dużych miast, obszary o dużym natężeniu ruchu.

Można przyjąć, że wartości LMF, podane w tabeli 3 są szczególnie przydatne do wykorzystania w projektowaniu oświetlenia drogowego z wykorzystaniem opraw LED, które charakteryzują się niższą temperaturą pracy źródeł światła oraz znacznie niższą mocą.

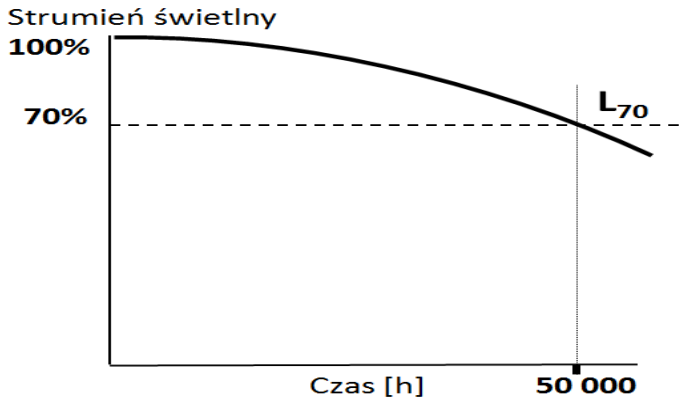
3. WSPÓŁCZYNNIK UTRZYMANIA DLA OŚWIETLENIA DROGOWEGO Z OPRAWAMI LED

Diody elektroluminescencyjne charakteryzują się zasadniczo odmiennymi cechami eksploatacyjnymi niż dotychczas powszechnie stosowane źródła światła. W wyznaczaniu współczynnika utrzymania, w odniesieniu do tradycyjnych lamp, uwzględnia się spadek strumienia świetlnego oraz trwałość średnią, wyznaczaną jako czas, w którym ulegnie przepaleniu 50% testowanych egzemplarzy. Lampy LED mogą pracować ponad 100 tys. godzin i dalej będą emitowały ciągle obniżający się strumień świetlny. Stąd wynika potrzeba opracowania nowych metod pomiaru i oceny lub szacowania ich trwałości.

Badania parametrów eksploatacyjnych dla lamp i opraw LED są przedmiotem wielu publikacji i raportów. Do najważniejszych należą normy opracowane przez Illuminating Engineering Society of North America, tj. LM–79 [9], LM–80 [10] oraz TM–21[11].

W publikacji LM–79 podano metody oceny podstawowych parametrów fotometrycznych, elektrycznych i kolorymetrycznych lamp LED. W publikacji LM–80 przedstawiono metodę oceny zmian strumienia świetlnego zestawów i modułów LED na podstawie pomiarów przeprowadzanych co 1000 godzin w okresie 6000 i 10 000 godzin. Metodę oceny trwałości lamp i opraw LED zawiera publikacja TM–21.

Okresowo wykonywane pomiary strumienia świetlnego umożliwiają prognozowanie trwałości użytkowej, przy założeniu określonego poziomu do którego może obniżyć się strumień, zwykle wyrażanego w procentach wartości początkowych. Najczęściej jest to poziom 70% – rysunek 2.



Rys. 2. Określanie trwałości użytkowej lamp i opraw LED na podstawie zmian strumienia świetlnego

W określaniu współczynnika utrzymania, na podstawie wyników badań wykonanych w warunkach odniesieniowych (zwykle jest to temperatura otoczenia 25°C), dla lamp i opraw LED pracujących w warunkach rzeczywistych, należy uwzględnić wpływ temperatury zarówno na poziom jak i na szybkość zmian strumienia świetlnego. Ten właśnie czynnik znacząco utrudnia przeprowadzanie i ocenę wyników poligonowych pomiarów parametrów systemów oświetlenia drogowego z wykorzystaniem opraw LED, czego potwierdzenie mogą stanowić badania oświetlenia ulicy Żelaznej w Warszawie, na której zostały zainstalowane oprawy TECEO 1 o mocy 78W, pokazane na rysunku 3. Oprawy te charakteryzują się wysoką szczelnością – IP66, a deklarowana trwałość L_{90} wynosi 100 000 godzin.

Rys. 3. Oprawa TECEO 1 [12]

Ocenę tej instalacji, na podstawie pomiarów natężenia oświetlenia, przeprowadzono w latach 2013 – 2014. W tabeli 4 zestawiono wyniki obliczeń wartości średniej i równomierności natężenia oświetlenia.

Tabela 4. Poziom i równomierność natężenia oświetlenia na ul. Żelaznej

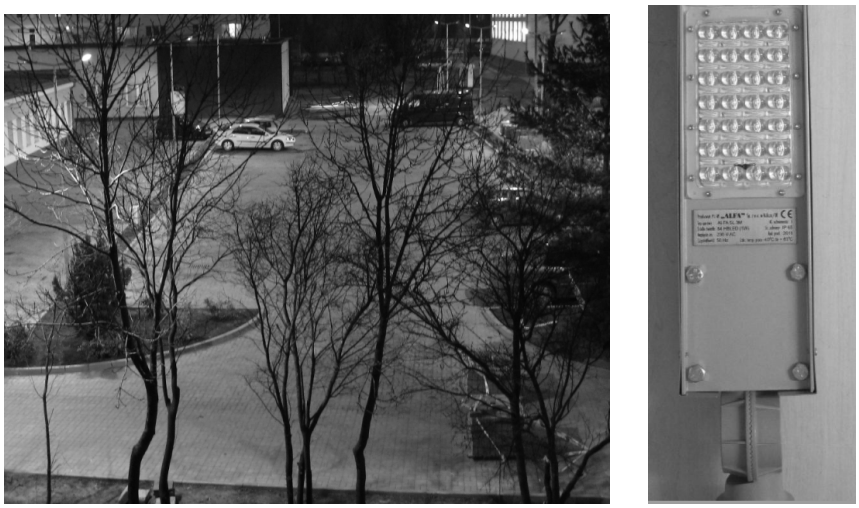
Data wykonania pomiarów	Natężenie oświetlenia	
	$E_{śr}$	$\delta_E = E_{min}/E_{śr}$
	[lx]	[–]
04.2013	19,7	0,56
11.2013	20,2	0,57
01.2014	19,7	0,57
06.2014	18,8	0,57
11.2014	19,8	0,58

Na podstawie wyników, przedstawionych w tabeli 4, trudno wnioskować o eksploatacyjnych zmianach strumienia świetlnego badanych opraw, ponieważ zmiany poziomu natężenia oświetlenia wyraźnie związane są ze zmianami temperatury otoczenia.

Przykład ten pokazuje, że procedury szacowania współczynników utrzymania dla opraw LED, na podstawie pomiarów co 1000 godzin, w warunkach rzeczywistych są praktycznie niemożliwe do wykonania. Należy się raczej kierować kryterium jednakowej temperatury otoczenia. Pomiary takie, począwszy od 2011 roku, wykonano dla instalacji oświetlenia parkingu przy Politechnice Poznańskiej, w której wykorzystano oprawy ALFA SL 1M (IV) z modułami 28 HB LED o mocy 36 W i stopniu ochrony IP65. Deklarowana przez producenta trwałość źródeł światła wynosiła 100 000 godzin [13]. Widok oświetlonego parkingu i zastosowanych opraw przedstawiono na rys. 4.

Ocenę zmian współczynnika utrzymania MF zainstalowanych opraw, uwzględniającego łącznie cząstkowe współczynniki utrzymania LLMF oraz LMF, przeprowadzono w oparciu o pomiary natężenia oświetlenia wykonane w ściśle dobranych miejscach – tj. w 20 punktach, leżących na linii krawężnika

wzdłuż parkingu, co eliminowało ewentualne błędy w geometrii pomiaru. Usytuowanie punktów pomiarowych w płaszczyźnie prostopadłej do osi opraw umożliwiało również ocenę zmiany krzywej światłości opraw.



Rys. 4. Parking przy Politechnice Poznańskiej oświetlony oprawami ALFA SL 1M (IV)

Badania wykonywano wieczorem, w dniach w których temperatura otoczenia wynosiła 6°C – 7°C, po ustaleniu się parametrów elektrycznych i fotometrycznych opraw.

Oszacowany czas pracy oświetlenia (w Polsce ok. 4000 godzin rocznie), wyniki pomiarów, dotyczące średniego natężenia oświetlenia i jego równomierności oraz obliczone na podstawie pomiarów współczynniki utrzymania MF, przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Poziom i równomierność natężenia oświetlenia na parkingu PP

Czas pracy instalacji oświetlenia	Parametry oświetlenia		
	MF	$E_{śr}$	$\delta_E = E_{min}/E_{śr}$
[h]		[lx]	[–]
0	**1,00**	26,2	0,76
1600	**0,95**	24,8	0,75
3800	**0,90**	23,7	0,75
6000	**0,84**	22,1	0,74
7800	**0,80**	21,0	0,74
11350	**0,76**	19,9	0,73
12000	**0,75**	19,7	0,73

Uzyskane wyniki pomiarów wskazują na znaczące obniżenie się poziomu oświetlenia, przy nieznacznie tylko zmienionej równomierności. Można wyprowadzić wniosek, że istotnym czynnikiem decydującym o pogorszeniu się parametrów oświetlenia jest spadek strumienia świetlnego źródeł LED w oprawie. Deklarowane przez producenta dane, dotyczące szacowanej trwałości na poziomie 100 tys. godzin, nie znajdują pokrycia w rzeczywistych pomiarach. Przyczyn tej rozbieżności można szukać w niedoskonałości metod prognozowania trwałości opraw LED (Publikacja TM–21 ukazała się dopiero w 2011 roku), które opierano na trwałości samych źródeł światła. Można również przypuszczać, że oprawa została niewłaściwie skonstruowana i nie zapewnia dostatecznie dobrego odprowadzania i rozpraszania ciepła, co ma znaczący wpływ na obniżanie się strumienia świetlnego.

4. PODSUMOWANIE

Diody elektroluminescencyjne i oprawy z ich zastosowaniem są coraz częściej wykorzystywane w oświetleniu drogowym. Przesądzają o tym parametry eksploatacyjne, takie jak wysoka energooszczędność i trwałość.

Dotychczas stosowane, tradycyjne źródła światła i oprawy, były rozwijane przez wiele lat, co umożliwiło dopracowanie metod ich badań, oceny i zasad wykorzystania w projektowaniu systemów oświetleniowych.

Instalacje oświetlenia drogowego z oprawami LED są dopiero na początkowym etapie wdrożeń, stąd tak niewiele dostępnych wyników badań w rzeczywistych warunkach środowiskowych. Należy uznać, że ich prowadzenie jest konieczne, ponieważ zaprojektowany system oświetlenia musi zachować odpowiednie parametry fotometryczne przez cały okres przewidywanej eksploatacji, a to wymaga znajomości szacowanych zmian parametrów opraw z źródłami LED. Stosowane obecnie metody prognozowania trwałości powinny zostać zweryfikowane w praktyce.

LITERATURA

[1] CEN/TR 13201–1:2016–02 Oświetlenie dróg – Część 1: Wytyczne dotyczące wyboru klas oświetlenia.
[2] PN–EN 13201–2:2016–03 Oświetlenie dróg Część 2: Wymagania eksploatacyjne.
[3] PN–EN 13201–3:2016–03 Oświetlenie dróg – Część 3: Obliczenia parametrów oświetleniowych.
[4] PN–EN 13201–4:2016–03 Oświetlenie dróg – Część 4: Metody pomiaru efektywności oświetlenia.
[5] PN–EN 13201–5:2016–03 Oświetlenie dróg – Część 5: Wskaźniki efektywności energetycznej.

[6] CIE 154:2003 Technical Report. The maintenance of outdoor lighting systems.
[7] Rozporządzenie Komisji (WE) NR 245/2009 z dnia 18 marca 2009 r. w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu.
[8] Cronjé M., Schréder B. LED street lighting: the effect of maintenance factor on carbon footprint. http://www.ee.co.za/article/
[9] IESNA LM–79–08: IESNA Approved Method for the Electrical and Photometric Measurements of Solid–State Lighting.
[10] IESNA LM–80–08: IESNA Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Lighting Sources.
[11] IESNA TM–21–11: Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED light Sources.
[12] www.schreder.com/products/teceo/teceo–polish–brochure–v4.pdf
[13] karta katalogowa: ALFA–SL–M–(IV).pdf

SOLID–STATE ROAD LIGHTING CALCULATING MAINTENANCE FACTOR

Maintenance factors are an important consideration in the planning of lighting installations, which gradually reduce the amount of light, due to lumen depreciation. For LED lighting solutions there are few studies for determination of the correct value of MF factor. The paper shows the measurements results of illumination changes in outdoor LED lighting installations.

(Received: 13. 02. 2017, revised: 28. 02. 2017)