

## Porównanie symulacji komputerowych i wyników pomiarowych modeli instalacji oświetlenia pośredniego z diodami świecącymi

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano analizę wpływu geometrii instalacji oświetlenia pośredniego z diodami świecącymi na sprawność oświetlenia i jego równomierność. Przykładowe instalacje oświetleniowe badano analizując wyniki symulacji komputerowych, które następnie zweryfikowano wykonując pomiary rozkładu natężenia oświetlenia w zbudowanym modelu. Wyniki pomiarowe modeli potwierdziły badania symulacyjne, wyznaczone na podstawie pomiarów sprawności oświetlenia różniły się maksymalnie o 3% od wartości obliczonych. Zmierzone i obliczone wartości równomierności oświetlenia też były zbliżone i wysokie.

**Abstract.** This article presents the analysis of the impact of the geometry of the indirect lighting with LEDs on the lighting efficiency and its uniformity. The example lighting was studied by first examining the results of computer simulations, which were then verified via measurements of the illuminance distribution within the developed model. The simulation analysis for lighting was further confirmed through measurement results, with the observed utilisation factors differing by only 3% from the calculated values. The measured and calculated lighting uniformities were also high and quite approximate. (**Comparison of computer simulation and measurement results for models of indirect lighting with light emitting diodes.**)

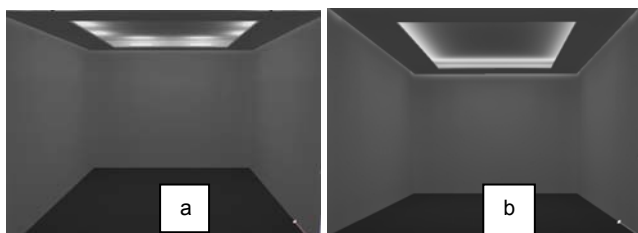
**Słowa kluczowe:** oświetlenie pośrednie, diody świecące, oświetlenie wnękowe, sprawność oświetlenia.

**Keywords:** indirect lighting, light emitting diodes, cove lighting, utilisation factor.

doi:10.12915/pe.2014.03.60

### Wstęp

Porównanie wizualizacji przykładowych instalacji oświetlenia pośredniego ze świetłówkami typu T5 (rys. 1a) oraz z LEDami (rys. 1b), wyraźnie pokazuje przewagę ostatniego rozwiązania. W przypadku świetłówek na suficie otrzymuje się zazwyczaj nierównomierne plamy świetlne. W przypadku instalacji z LEDami można otrzymać równomiernie podświetloną wnękę o założonej jasności oraz dowolnej długości i kształcie.



Rys. 1. Przykładowe instalacje oświetlenia pośredniego ze świetłówkami T5 (a) i LEDami (b) - wizualizacje otrzymane w programie Dialux

Instalacje oświetlenia pośredniego, w których obserwator nie widzi bezpośrednio źródeł światła, wydają się być idealnym rozwiązaniem, w którym LEDy powinny być stosowane. Są one typowymi punktowymi źródłami światła o bardzo dużej luminancji i z tego powodu, w innych instalacjach oświetleniowych, mogą powodować znaczące olśnienie obserwatorów. Dotychczas jednak instalacje oświetlenia pośredniego stosowane były głównie ze względów estetycznych, a nie użytkowych, gdyż charakteryzowały się niską sprawnością oświetlenia. W artykule przedstawiono analizę wpływu geometrii badanych instalacji oświetlenia pośredniego z LEDami na sprawność i równomierność oświetlenia. Przykładowa instalacja oświetleniowa była najpierw badana na podstawie wyników symulacji komputerowych. Wcześniejsze prace autorów pokazały, że wyniki symulacji otrzymywane przy wykorzystaniu dwóch najpopularniejszych w Polsce programów oświetleniowych: Dialux ([www.dial.de](http://www.dial.de)) i Relux ([www.relux.biz](http://www.relux.biz)), charakteryzują się znacznymi różnicami [1]. Z tego powodu symulacje komputerowe wykonywano wykorzystując również własne oprogramowanie, którego algorytm oparto na metodzie Monte Carlo (MC) obliczeń

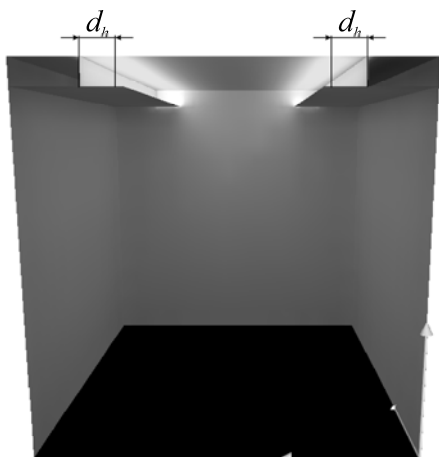
świetlnych [2]. Stosując programy komercyjne, obliczenia wykonywano w trybie wysokiej dokładności. We własnym oprogramowaniu uwzględniano do 12 odbić promienia testowego od powierzchni pomieszczenia. Obliczenia wykonywano zakładając podział płaszczyzny obliczeniowej na 48 (6 × 8) kwadratowych elementów. Przyjęta siatka obliczeniowa miała znaczący wpływ na uzyskiwane wyniki obliczeniowe, szczególnie na wartość równomierności oświetlenia w pomieszczeniu. Wyniki obliczeniowe zweryfikowano następnie empirycznie poprzez pomiary rozkładu natężenia oświetlenia w wykonanym modelu.

Przykładowa instalacja oświetlenia pośredniego znajdowała się w pomieszczeniu o wymiarach 3 m × 4 m i wysokości 3 m. Wszystkie powierzchnie pomieszczenia odbijały strumień świetlny w sposób idealnie rozproszony. Współczynniki odbicia powierzchni pomieszczenia powinny być zgodne z normą PN-EN 12464-1:2012 [3]. Zgodnie z zaleceniami współczynnik odbicia sufitu powinien zawierać się w przedziale od 0,7 do 0,9, współczynnik odbicia ścian od 0,5 do 0,8, a współczynnik odbicia podłogi: od 0,2 do 0,4. W symulacjach komputerowych założono współczynnik odbicia sufitu – 0,9 i ścian – 0,7. Wysokie wartości tych współczynników mają decydujący wpływ na sprawność instalacji oświetlenia pośredniego [4]. W symulacjach założono zerowy współczynnik odbicia podłogi. Choć wartość ta nie jest zgodna z wymaganiami to odzwierciedla fakt, że w zbudowanym modelu, ze względów pomiarowych, nie można było wykonać podłogi. Dodatkowo, wcześniejsze prace autorów pokazały, że współczynnik odbicia podłogi w niewielkim stopniu wpływa na parametry instalacji oświetlenia pośredniego [4].

### Wnękowa instalacja oświetlenia pośredniego z LEDami

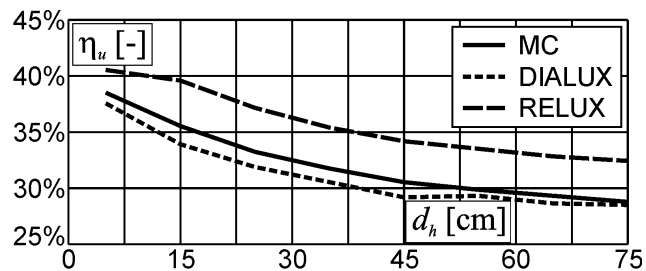
Pierwszym etapem badań było określenie wpływu geometrii wnękowej instalacji oświetlenia pośredniego na parametry instalacji oświetleniowej (rys. 2). Typową instalację, z wnęką usytuowaną dookoła pomieszczenia (rys. 1), uproszczono do dwóch wnęk biegnących wzdłuż dłuższych boków pomieszczenia (rys. 2). Pomieszczenie oświetlone było dwoma rzędami LEDów, które usytuowane były symetrycznie w odległości 75 cm od ścian i 5 cm od brzegów wnęk. Diody świeciły w kierunku sufitu, od którego były oddalone o 20 cm. Założono lambertowski rozsył strumienia świetlnego diod, co odpowiada LEDom o dużej mocy, które nie są wyposażone w dodatkowe elementy

optyczne kształtujące strumień świetlny. Wszystkie powierzchnie wnek miały współczynnik odbicia 0,9. Badano wpływ głębokości wnek  $d_h$  na parametry instalacji oświetleniowej.



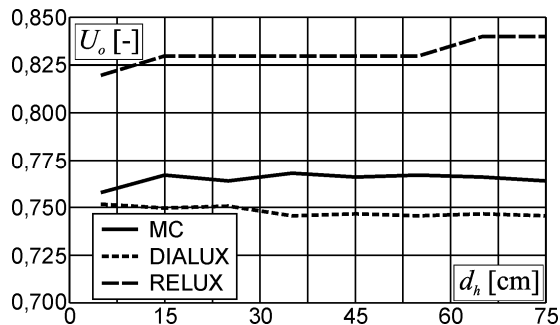
Rys. 2. Badana instalacja oświetlenia pośredniego LED z wnkami o głębokości  $d_h$  równej 20 cm – wizualizacja otrzymana w programie Dialux

Na rysunku 3 przedstawiono zależność sprawności oświetlenia  $\eta_u$  badanej instalacji (liczoną dla powierzchni podłogi) od głębokości  $d_h$  wnek. Obliczone z wykorzystaniem własnego oprogramowania wartości sprawności  $\eta_u$  spadały monotonicznie wraz ze wzrostem głębokości  $d_h$  wnek (rys. 3 – MC). Charakterystyki otrzymane w programach Dialux i Relux mają czasami załamania, których występowanie nie powinno mieć miejsca. Własne wyniki obliczeniowe były zbliżone do otrzymanych w programie Dialux, gdyż maksymalne różnice wynosiły tylko 1,5%. Wartości obliczone w programie Relux były zawsze większe o ok. 5%, co jest znaczącą różnicą, szczególnie przy większych głębokościach  $d_h$  wnek.



Rys. 3. Wyniki obliczeniowe sprawności oświetlenia  $\eta_u$  instalacji oświetlenia pośredniego LED z wnkami o głębokości  $d_h$

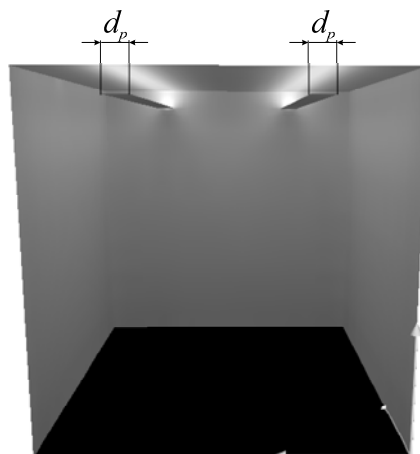
Na rysunku 4 przedstawiono wyniki obliczeniowe równomierności oświetlenia  $U_o$  (liczonej jako iloraz wartości minimalnej i średniej natężenia oświetlenia) w zależności od głębokości  $d_h$  wnek. We wszystkich programach wyniki obliczeniowe równomierność oświetlenia  $U_o$  praktycznie nie zależą od głębokości  $d_h$  wnek. Wszystkie obliczone wartości równomierności  $U_o$  były większe od wymaganej wartości 0,7 [3]. Jednak o ile wyniki otrzymane z wykorzystaniem własnego oprogramowania i w programie Dialux są zbliżone, to otrzymane w programie Relux są znacząco wyższe.



Rys. 4. Wyniki obliczeniowe równomierności oświetlenia  $U_o$  instalacji oświetlenia pośredniego LED z wnkami o głębokości  $d_h$

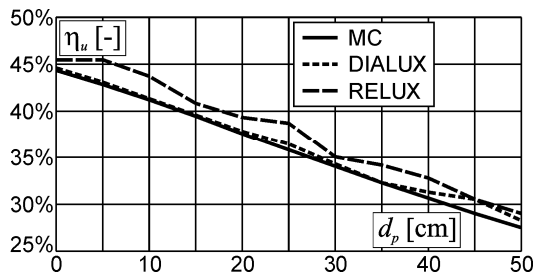
### Instalacja oświetlenia pośredniego LEDami i przesłonami

W drugim etapie badań instalację wnekową uproszczono umieszczając symetrycznie pod rzędami LEDów przesłony o szerokości  $d_p$  (rys. 5). Wcześniejsze prace autorów pokazały, że instalacje tego typu również mogą spełnić normatywne wymagania oświetleniowe [2, 4]. Badano wpływ szerokości  $d_p$  przesłon na parametry instalacji oświetleniowej.



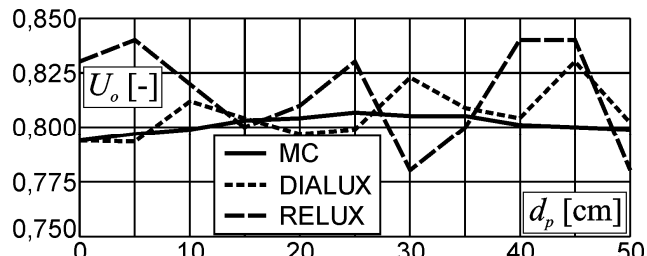
Rys. 5. Badana instalacja oświetlenia pośredniego LED z przesłonami o szerokości  $d_p$  równej 20 cm – wizualizacja otrzymana w programie Dialux

Na rysunku 6 przedstawiono zależność sprawności oświetlenia  $\eta_u$  badanej instalacji od szerokości  $d_p$  przesłon. Uproszczenie instalacji oświetleniowej spowodowało wzrost jej sprawność przy przesłonach o szerokościach  $d_p$  nie większych niż 15 cm. Dodatkowo, zmniejszyły się różnice obliczeniowe, szczególnie uzyskiwane z wykorzystaniem własnego oprogramowania i programu Dialux.



Rys. 6. Wyniki obliczeniowe sprawności oświetlenia  $\eta_u$  instalacji oświetlenia pośredniego LED z przesłonami o szerokości  $d_p$

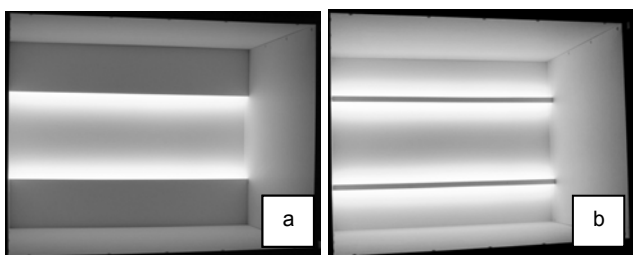
Jednocześnie ze wzrostem sprawności nie nastąpiło pogorszenie równomierności  $U_o$ , której wartości obliczone z wykorzystaniem własnego oprogramowania nawet wzrosły. O ile jednak wartości równomierności  $U_o$  obliczone z wykorzystaniem własnego oprogramowania są praktycznie stałe, to wyniki uzyskane w handlowych programach charakteryzują się znaczną nierównomiernością (rys. 7).



Rys. 7. Wyniki obliczeniowe równomierności oświetlenia  $U_o$  instalacji oświetlenia pośredniego LED z przesłonami o szerokości  $d_p$

### Weryfikacja pomiarowa parametrów instalacji oświetlenia pośredniego z LEDami

Weryfikację pomiarową wyników symulacji komputerowych przeprowadzono wykonując pomiary modeli instalacji oświetlenia pośredniego (fot. 1). Wykonany w skali 1:5 model pomieszczenia miał wymiary wewnętrzne:  $0,6 \times 0,8 \times 0,6$  m. Powierzchnie sufitu i przesłone pomalowane były białą akrylową farbą rozpraszającą o współczynniku odbicia 0,88. Powierzchnie ścian pomalowane były jasną pastelową akrylową farbą rozpraszającą o współczynniku odbicia 0,72. Wykonany model nie zawierał podłogi i był umieszczony 26 mm ponad czarną powierzchnią ciemni, w której wykonywano pomiary. Rozwiązanie takie zastosowano, chcąc uniknąć błędów wynikających z wykorzystania do pomiarów rozkładu natężenia oświetlenia czarnej głowicy fotometrycznej o wysokości 26 mm i średnicy 45 mm. Pomiary te przeprowadzono w modelu pomieszczenia na środkach 48 pól pomiarowych o wymiarach  $0,1 \times 0,1$  m. W przypadku instalacji wnękowej, pomiary wykonano dla trzech głębokości  $d_h$  wnęk: 5 cm, 15 cm i 75 cm. Model instalacji z przesłonami zmierzono dla szerokości  $d_p$  przesłony wynoszącej 10 cm.



Fot. 1. Widok wnętrza modeli instalacji oświetlenia pośredniego LED: wnękowej (a), z przesłonami (b)

Wyniki pomiarowe modelowych instalacji przedstawiono w tabeli 1. Wartości sprawności oświetlenia  $\eta_u$  zmierzone w modelu i obliczone w symulacjach komputerowych różniły się tylko o 3% względem wyników obliczeniowych. Różnice te należy uznać za nieznaczne, biorąc pod uwagę przedstawione wcześniej różnice wyników obliczeniowych uzyskanych w różnych programach. Jednocześnie należy zauważyć, że zmierzone wartości sprawności były wyższe niż uzyskane w symulacjach komputerowych. Wyznaczona

na podstawie pomiarów sprawność oświetlenia modelowej instalacji z przesłonami przekraczała 48%, co należy uznać za satysfakcjonujący rezultat, który można zastosować w praktyce. Zmierzone i obliczone wartości równomierności oświetlenia też były zbliżone i wysokie.

Tabela 1. Wyniki pomiarowe modeli instalacji oświetlenia pośredniego LED

Typ instalacji	Szerokość wnęki $d_h$ lub przesłony $d_p$	Sprawność oświetlenia $\eta_u$ [-]	Równomierność oświetlenia $U_o$ [-]
wnękowa	$d_h = 5$ cm	42,9%	0,792
wnękowa	$d_h = 15$ cm	40,0%	0,803
wnękowa	$d_h = 75$ cm	34,6%	0,798
z przesłonami	$d_p = 10$ cm	48,3%	0,836

### Wnioski

Przedmiotem badań była najpierw typowa wnękowa instalacja oświetlenia pośredniego oświetlająca pomieszczenie dwoma rzędami LEDów. Następnie instalację oświetleniową uproszczono, zastępując wnęki symetrycznie umieszczonymi LEDami z przesłonami. Wyniki obliczeniowe pokazały, że typowa wnękowa instalacja oświetlenia pośredniego może osiągnąć sprawność wynoszącą prawie 40%, gdy sufit i ściany pomieszczenia charakteryzują się wysokim współczynnikami odbicia. W uproszczonej instalacji oświetleniowej z przesłonami sprawność sięga nawet 45%, przy małej szerokości przesłony. Wszystkie instalacje charakteryzowały się wysoką równomiernością oświetlenia.

Weryfikację pomiarową wyników symulacji komputerowych przeprowadzono wykonując pomiary modeli instalacji oświetlenia pośredniego zbudowanych w skali 1:5. Wyniki pomiarowe potwierdziły badania symulacyjne, gdyż wyznaczone na podstawie pomiarów i obliczeń wartości sprawności oświetlenia różniły się maksymalnie o 3%, a równomierności oświetlenia też były zbliżone.

*Publikacja opracowana na podstawie wyników uzyskanych w ramach II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” dofinansowywanego w latach 2011-2013 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*

### LITERATURA

- [1] Pawlak A., Zaremba K., Tolerances in computer simulations of indirect lighting systems. *CIE 2012: Lighting Quality and Energy Efficiency*, Hangzhou, China, September 19-21, 2012, 608-613
- [2] Pawlak A., Zaremba K., A Monte-Carlo simulation of an indirect lighting installation using light emitting diodes (LEDs). *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 7, 215-217
- [3] PN-EN 12464-1: 2012 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy - Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach
- [4] Pawlak A., Zaremba K., Influence of technical parameters of LED indirect lighting installations on illumination parameters. *CIE'2013, Towards a new century of light - CIE Centenary Conference*, Paris, April 15-16, 2013, 720-726

**Autorzy:** mgr inż. Andrzej Pawlak, Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy, 00-701 Warszawa, ul. Czerniakowska 16, e-mail: [anpaw@ciop.pl](mailto:anpaw@ciop.pl); dr hab. inż. Krzysztof Zaremba, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, e-mail: [k.zaremba@pb.edu.pl](mailto:k.zaremba@pb.edu.pl)