

Andrzej PAWLAK  
Krzysztof ZAREMBA

## ROZKŁAD BŁĘDÓW PRZY PROJEKTOWANIU POŚREDNIEGO OŚWIETLENIA ELEKTRYCZNEGO ZA POMOCĄ OPRAW KWADRATOWYCH

**STRESZCZENIE** *W wielkopowierzchniowych instalacjach oświetlenia pośredniego często występują oprawy kwadratowe/prostokątne świecące w sposób lambertowski. W celu zbadania poprawności działania najbardziej rozpowszechnionych w Polsce międzynarodowych programów oświetleniowych Dialux i Relux symulowano kwadratowe źródło tak, aby w badanym pomieszczeniu można było osiągnąć względne wysokości większe niż graniczna odległość fotometryczna. W celu oceny dokładności obliczeń instalacji oświetleniowej z kwadratowym źródłem światła porównano maksymalne natężenie oświetlenia  $E_{max}$  obliczone za pomocą programów w osi głównej źródła, czyli pod oprawą. Następnie wyznaczono rozkład rzeczywistego natężenia oświetlenia  $E_{p,rz}$  na powierzchni podłogi, który porównano z rozkładem wyznaczonym zgodnie z prawem odwrotności kwadratów. Na tej podstawie dokonano analizy występujących błędów pomiędzy wynikami uzyskanymi z programów, a wynikami rzeczywistego natężenia oświetlenia. Wszystkie symulacje przeprowadzono zmieniając wysokość zawieszenia oprawy nad podłogą od 0,25 m do 3,0 m.*

**Słowa kluczowe:** oświetlenie pośrednie, oprawy wielkopowierzchniowe, programy do projektowania oświetlenia Dialux i Relux

---

**mgr inż. Andrzej PAWLAK**  
e-mail: anpaw@ciop.pl

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
Prochownia Promieniowania Optycznego

**dr hab. inż. Krzysztof ZAREMBA**  
e-mail: k.zaremba@pb.edu.pl

Politechnika Białostocka  
Wydział Elektryczny

## 1. WSTĘP

---

W wielkopowierzchniowych instalacjach oświetleniowych często występują oprawy kwadratowe/prostokątne świecące w sposób lambertowski. Taki kształt mają też często elementy architektoniczne, które stają się w instalacjach oświetlenia pośredniego wtórnymi źródłami światła. Prostokątne źródło światła o strumieniu świetlnym  $\Phi_z$ , charakteryzuje się maksymalną światłością

$$I_{z,max} = \frac{\Phi_z}{\pi} \quad (1)$$

i wytwarza maksymalne natężenie oświetlenia  $E_{max,pr}$  liczone zgodnie z prawem odwrotności kwadratów

$$E_{max,pr} = \frac{I_{z,max}}{h^2} \quad (2)$$

na powierzchni równoległej do powierzchni źródła światła, w punkcie leżącym w osi źródła światła i oddalonym o  $h$ . Wzór (2) może być stosowany tylko wtedy, gdy wysokość  $h$  jest odpowiednio większa niż długość boku  $a_z$  kwadratowego źródła światła.

## 2. OBLICZENIA MAKSYMALNEGO NATĘŻENIA OŚWIETLENIA OD KWADRATOWEGO ŹRÓDŁA ŚWIATŁA

---

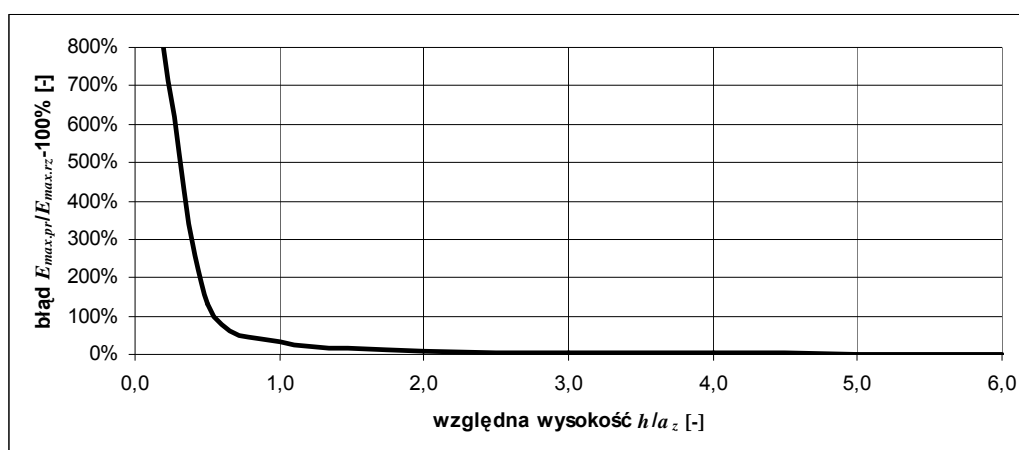
Rzeczywistą maksymalną wartość natężenia oświetlenia  $E_{max,rz}$  wytwarzanego przez kwadratowe źródło światła należy wyznaczać na podstawie wzoru [3]

$$E_{max,rz} = 4L_z \cdot \frac{a_z}{\sqrt{4h^2 + a_z^2}} \cdot \arctg \frac{a_z}{\sqrt{4h^2 + a_z^2}}, \quad (3)$$

gdzie  $L_z$  jest luminancją kwadratowego źródła światła

$$L_z = \frac{\Phi_z}{\pi \cdot a_z^2}. \quad (4)$$

Wartości  $E_{max.pr}$  i  $E_{max.rz}$  różnią się tym bardziej im mniejsza jest wysokość  $h$  względem długości boku  $a_z$  kwadratowego źródła światła. Na rysunku 1 przedstawiono błędy jakie popełnia się używając do wyznaczania natężenia oświetlenia prawa odwrotności kwadratów (2), a nie dokładnego wzoru (3). Wartości błędów są zawsze dodatnie i zależą od względnej wysokości  $h/a_z$ . Graniczna odległość fotometrowania, tzn. wysokość  $h$ , powyżej której błąd jest nie większy niż 1%, wynosi prawie sześć (5,8) długości boku  $a_z$  kwadratowego źródła światła. Przykładowo, gdy kwadratowe źródło światła o boku 1,0 m znajduje się w odległość 0,20 m od oświetlanej powierzchni to zastosowanie niewłaściwego wzoru spowoduje powstanie błędu o wartości aż 800%. Wartość błędu rośnie asymptotycznie do nieskończoności, gdy wysokość  $h$  dąży do 0.

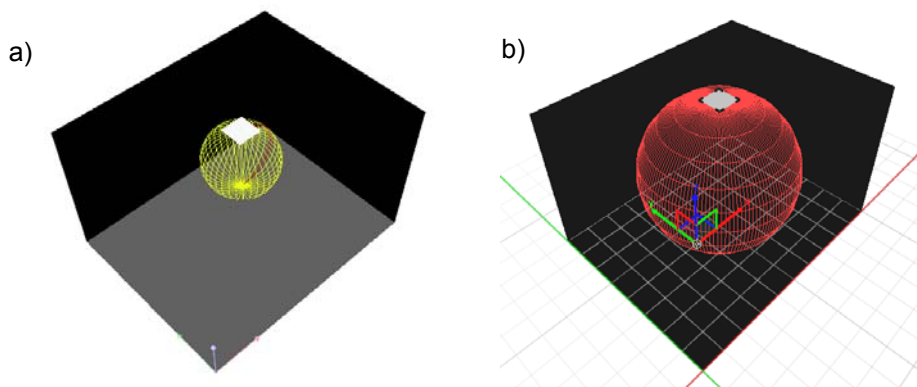


**Rys. 1.** Błędy wyznaczania maksymalnego natężenia oświetlenia  $E_{max.pr}$  za pomocą prawa odwrotności kwadratów w zależności od względnej wysokości  $h/a_z$  umieszczenia kwadratowego źródła światła

W celu zbadania poprawności działania najbardziej rozpowszechnionych w Polsce międzynarodowych programów oświetleniowych Dialux i Relux opracowano plik z danymi kwadratowego źródła światła o strumieniu świetlnym wynoszącym 1 000 lm. Symulowano źródło światła o długości boku  $a_z$  wynoszącej 0,5 m tak, aby w badanym pomieszczeniu można było osiągnąć względne wysokości większe niż graniczna odległość fotometrowania. Założono pomijalną wysokość kwadratowego źródła światła (0,1 mm). W opracowanym pliku, dane kwadratowego źródła światła wprowadzono dużo dokładniej niż wymaga tego norma [4], gdyż kąty  $\gamma$  i  $C$  zmieniano co  $2,5^\circ$ . W każdej płaszczyźnie  $C$  wprowadzono tą samą lambertowską krzywą światłości. Widok pomieszczenia, źródła światła i jego bryły fotometrycznej w programie Dialux przedstawiono na rysunku 2a, a w programie Relux na rysunku 2b.

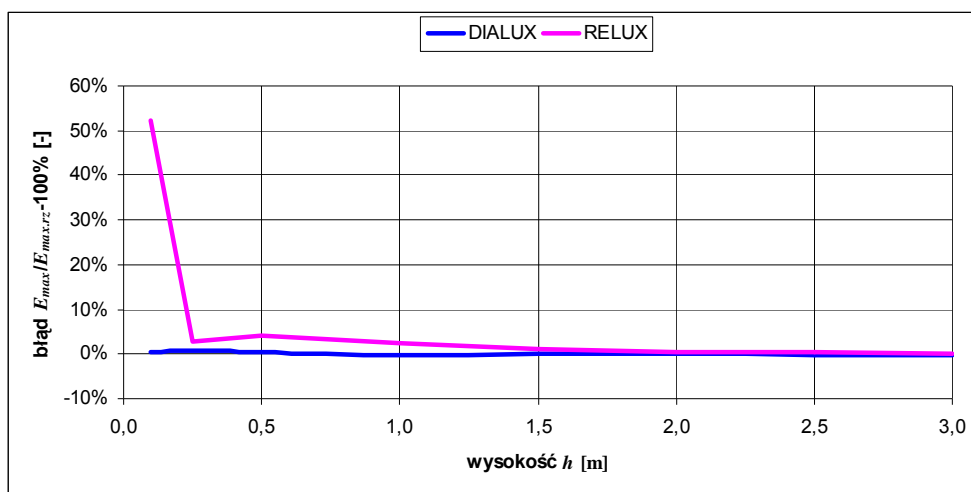
W celu oceny dokładności obliczeń instalacji z kwadratowym źródłem światła porównano maksymalne natężenie oświetlenia  $E_{max}$  obliczone za pomocą

programów w osi głównej źródła, czyli pod oprawą. Wysokość  $h$  zmieniano ustalając w programach odpowiednią długość zwieszaka.



**Rys. 2. Widok 3D badanego pomieszczenia z wprowadzonym kwadratowym źródłem światła i jego obrotowo-symetryczną bryłą fotometryczną a) w programie Dialux b) w programie Relux**

W celu wyeliminowania błędów związanych z algorytmami obliczeń odbić wielokrotnych, założono zerowy współczynnik odbicia powierzchni sufitu i ścian. Porównanie wartości błędów obliczeniowych popełnianych przez programy Dialux i Relux przedstawiono na rysunku 3. Błędy obliczeniowe w programie Dialux, przy wszystkich wysokościach, były pomijalne ( $< \pm 1\%$ ). Wyniki otrzymane w programie Relux obarczone są znacznie większymi błędami (rys. 3). Błąd większy niż 1% występuje już przy wysokości 1,5 m. Przy wysokości 0,5 m błąd wynosi 4,0%. Wartość błędu gwałtownie rośnie dopiero przy bardzo małych wysokościach (52% przy wysokości 0,1 m).



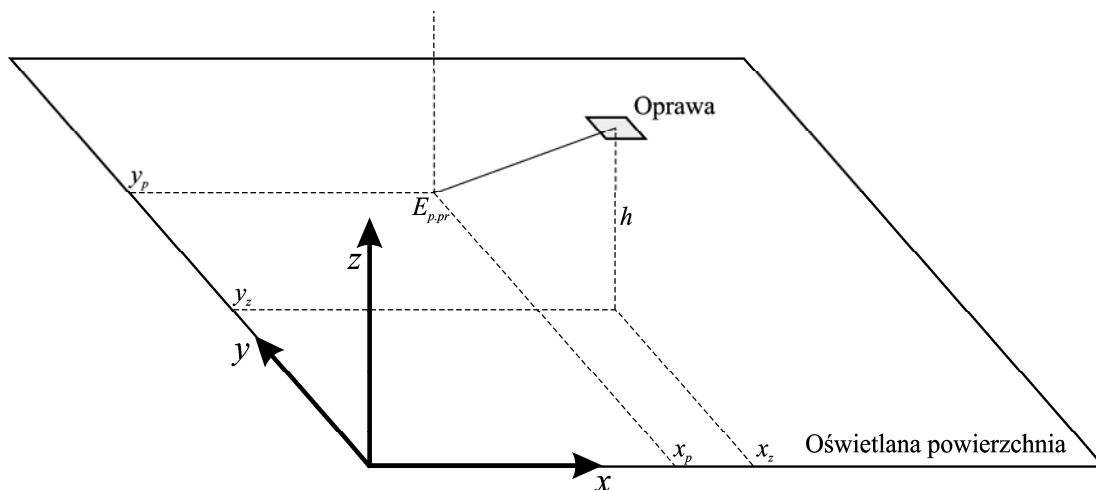
**Rys. 3. Błędy maksymalnego natężenia oświetlenia  $E_{max}$  w osi kwadratowej oprawy o boku 0,5 m w zależności od wysokości  $h$  od powierzchni oświetlanej wyznaczone za pomocą programów Dialux i Relux**

### 3. OBLICZENIA ROZKŁADU NATĘŻENIA OŚWIETLENIA OD KWADRATOWEGO ŹRÓDŁA ŚWIATŁA

W przypadku dużej względnej odległości oprawy oświetleniowej od powierzchni oświetlanej wartość natężenia oświetlenia  $E_{p,pr}$  w dowolnym punkcie powierzchni może zostać wyznaczona za pomocą prawa odwrotności kwadratów (rys. 4) [1]

$$E_{p,pr} = I_{z,max} \cdot \frac{h^2}{\left( (x_p - x_z)^2 + (y_p - y_z)^2 + h^2 \right)^2} \quad (5)$$

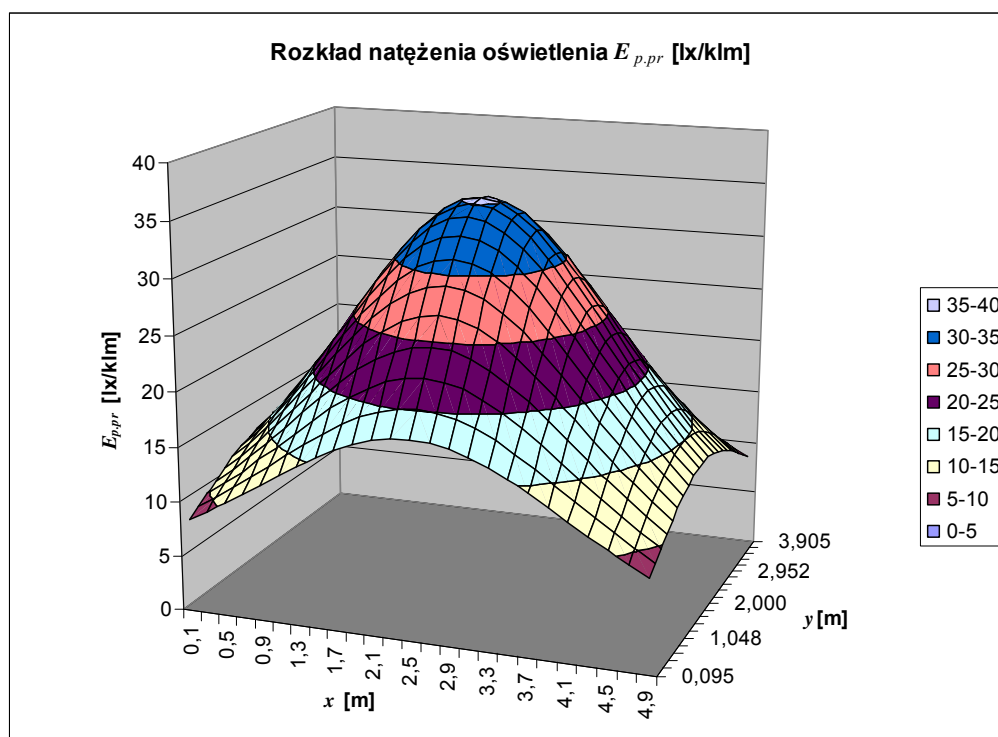
W przypadku źródła światła o odpowiednio małych wymiarach podstawą do wyznaczenia wartości natężenia oświetlenia  $E_{p,pr}$  jest znajomość wartości maksymalnej światłości  $I_{z,max}$  (wzór 1). We wzorze 5 uwzględniono też lambertowski (cosinusowy) rozsył strumienia świetlnego powierzchni oprawy.



Rys. 4. Geometria układu do wyznaczenia natężenia oświetlenia  $E_{p,pr}$  na powierzchni roboczej oświetlanej oprawą o pomijalnych rozmiarach

Rozkład natężenia oświetlenia zależy oczywiście od wysokości umieszczenia oprawy oświetleniowej nad oświetlaną powierzchnią. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy rozkład natężenia oświetlenia od kwadratowej oprawy o boku 0,5 m zawieszanej na wysokości 3 m nad podłogą. Zmniejszenie wysokości zawieszenia oprawy wpływa na wzrost wartości maksymalnej i nierównomierności oświetlenia powierzchni [2].

W przypadku rozciągniętego prostokątnego źródła światła podstawą do wyznaczenia rzeczywistej wartości natężenia oświetlenia  $E_{p,rz}$  jest znajomość luminancji  $L_z$  oprawy o lambertowskim rozsyśle strumienia świetlnego.



**Rys. 5.** Rozkład natężenia oświetlenia  $E_{p,pr}$  na powierzchni podłogi pomieszczenia o wymiarach 4 × 5 m oświetlanego kwadratową oprawą o długości boku 0,5 m zawieszoną na wysokości 3,0 m

Podstawowy wzór stosowany do wyznaczania rzeczywistej wartości natężenia oświetlenia  $E_w$  pod jednym z wierzchołków prostokątnej oprawy o wymiarach  $a \times b$  ma postać

$$E_w(a,b) = \frac{L_z}{2} \cdot \left( \frac{a}{\sqrt{h^2 + b^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{h^2 + a^2}} + \frac{b}{\sqrt{h^2 + a^2}} \arctg \frac{a}{\sqrt{h^2 + b^2}} \right). \quad (6)$$

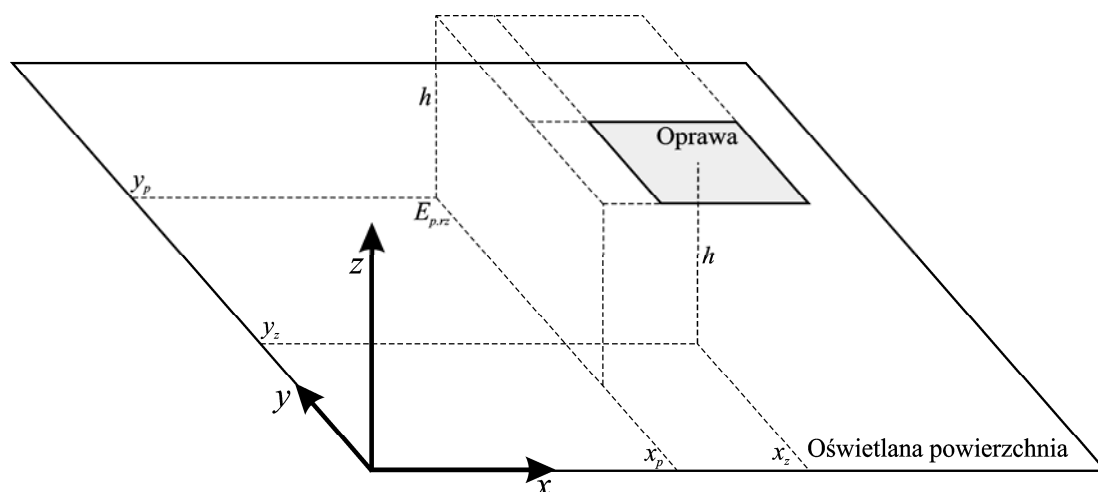
W przypadku, gdy rzeczywistą wartość natężenia oświetlenia  $E_{p,rz}$  wyznacza się w dowolnym punkcie powierzchni, który nie leży pod wierzchołkiem oprawy, wzór 6 należy zastosować czterokrotnie (rys. 6) [1]

$$E_{p,rz} = E_w \left( x_p - x_z + \frac{l_z}{2}, y_p - y_z + \frac{d_z}{2} \right) + E_w \left( x_p - x_z - \frac{l_z}{2}, y_p - y_z - \frac{d_z}{2} \right) -$$

$$- E_w \left( x_p - x_z - \frac{l_z}{2}, y_p - y_z + \frac{d_z}{2} \right) - E_w \left( x_p - x_z + \frac{l_z}{2}, y_p - y_z - \frac{d_z}{2} \right) \quad (7)$$

gdzie:

- $x_p, y_p$  – współrzędne położenia oświetlanego punktu,
- $x_z, y_z$  – współrzędne położenia środka oprawy oświetleniowej,
- $l_z$  – długość oprawy (mierzona wzdłuż osi  $x$ ),
- $d_z$  – szerokość oprawy (mierzona wzdłuż osi  $y$ ).

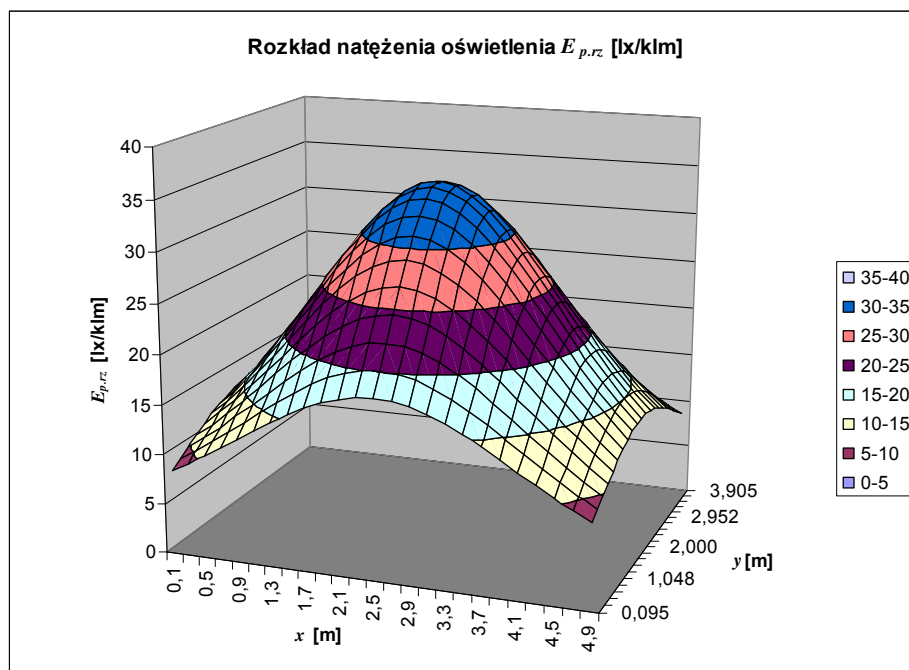


Rys. 6. Geometria układu do wyznaczenia rzeczywistej wartości natężenia oświetlenia  $E_{p,rz}$  wytwarzanego przez oprawę o wymiarach  $d_z \times l_z$

Rozkład rzeczywistego natężenia oświetlenia  $E_{p,rz}$  na powierzchni podłogi pomieszczenia o wymiarach  $4 \times 5$  m oświetlanego kwadratową oprawą o długości boku 0,5 m zawieszoną na wysokości 3,0 m nad podłogą przedstawiony na rysunku 7, praktycznie nie różni się od rozkładu wyznaczonego zgodnie z prawem odwrotności kwadratów (rys. 5). Potwierdzeniem tego jest rozkład błędów obliczeniowych pomiędzy tymi wykresami. Największa wartość błędu występuje pod oprawą i jest zgodna z wykresem przedstawionym na rysunku 3. W żadnym miejscu wartość błędu nie przekracza  $\pm 1\%$ .

Zupełnie inna sytuacja ma miejsce przy małych wysokościach. Rozkład rzeczywistego natężenia oświetlenia  $E_{p,rz}$  tej samej oprawy zawieszonej na wysokości 0,25 m różni się on zarówno co do kształtu jak i wartości od rozkładu wyznaczonego zgodnie z prawem odwrotności kwadratów. Potwierdzeniem tego jest rozkład błędów obliczeniowych pomiędzy tymi wykresami. Wprawdzie największa

wartość błędu występuje pod oprawą i jest dodatnia (wynosi 130%), to bardzo szybko przechodzi do wartości ujemnych. Oznacza to, że wyniki otrzymane zgodnie z prawem odwrotności kwadratów są mniejsze niż rzeczywiste. Największe ujemne błędy występują w pobliżu rzutu oprawy na powierzchnię podłogi i wynoszą minus 32% [2].

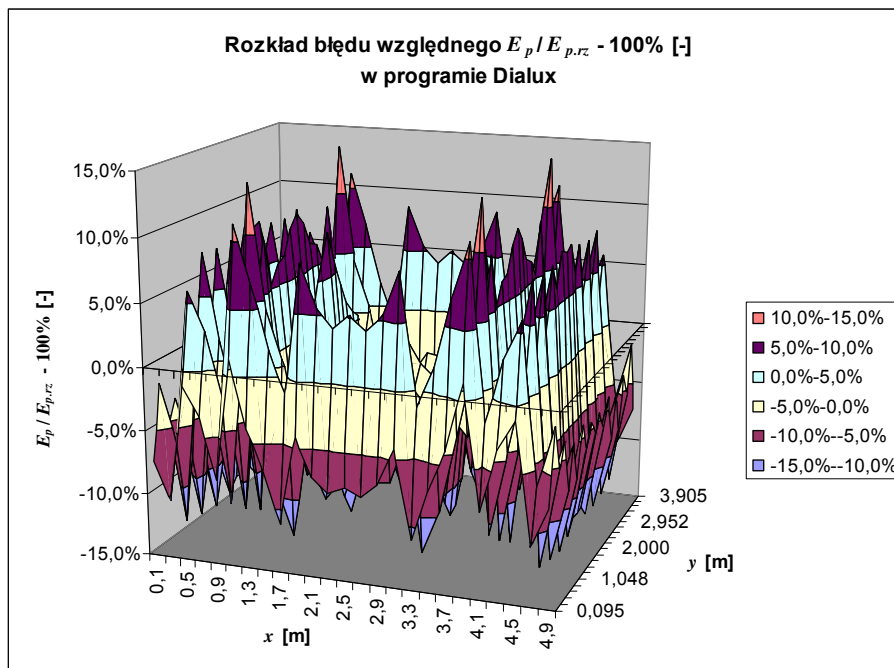


**Rys. 7.** Rozkład rzeczywistego natężenia oświetlenia  $E_{p,rz}$  na powierzchni podłogi pomieszczenia o wymiarach  $4 \times 5$  m oświetlanego kwadratową oprawą o długości boku  $0,5$  m zawieszoną na wysokości  $3,0$  m

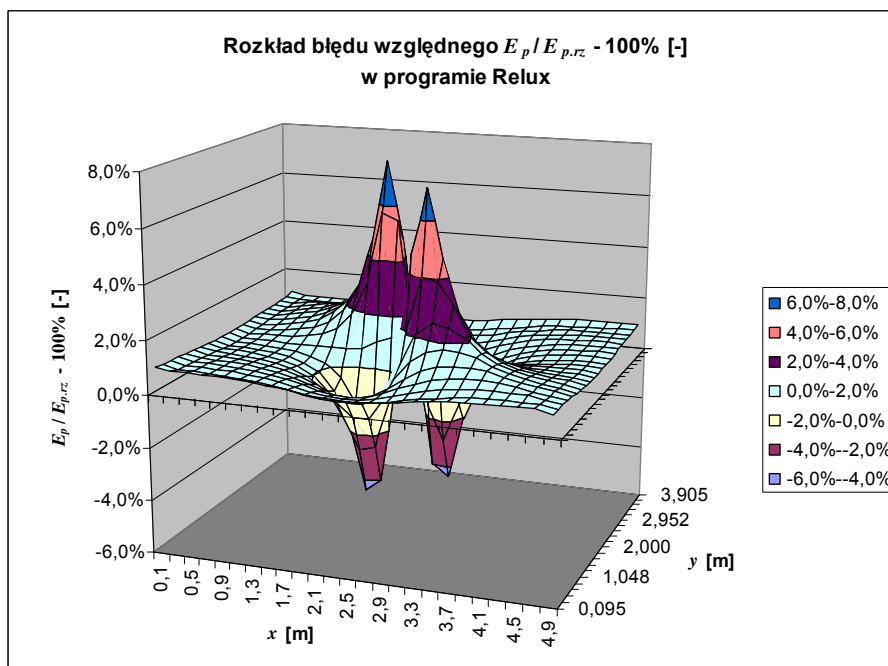
Przy wysokości zawieszenia oprawy wynoszącej  $0,25$  m nad podłogą wykonano obliczenia rozkładów natężenia oświetlenia  $E_p$  za pomocą programów Dialux i Relux. Celem badań było określenie, czy rozkład natężenia oświetlenia  $E_p$  na całej powierzchni wyznaczony jest z podobnym błędem co wartości maksymalne natężenia oświetlenia  $E_{max}$  analizowanej w poprzednim rozdziale. Przy założonej wysokości  $0,25$  m błędy wyznaczania wartości  $E_{max}$  w programach Dialux i Relux wynosiły odpowiednio:  $0,65\%$  i  $2,86\%$ , czyli były niewielkie. Dużo większe wartości błędów dotyczą rozkładów natężenia oświetlenia.

W programie Dialux (rys. 8) wartości błędów wahają się od  $-13,5\%$  do  $+13,9\%$  i są rozłożone nierównomiernie na powierzchni podłogi. W programie Relux otrzymany rozkład błędów posiada dwa minima ( $-4,4\%$ ) i dwa maksima ( $+7,6\%$ ), które występują w pobliżu rzutu oprawy na powierzchnię podłogi (rys. 9). Znamienne jest, że wyniki otrzymane w programie Relux są środkowo symetryczne, pomimo że rozpatrywane pomieszczenie ma dwie osie symetrii.

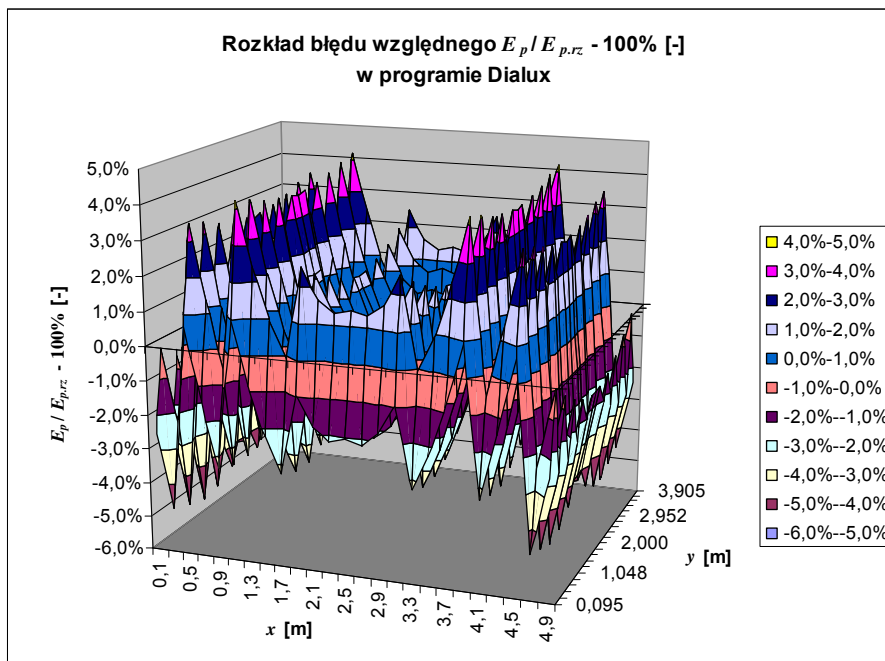




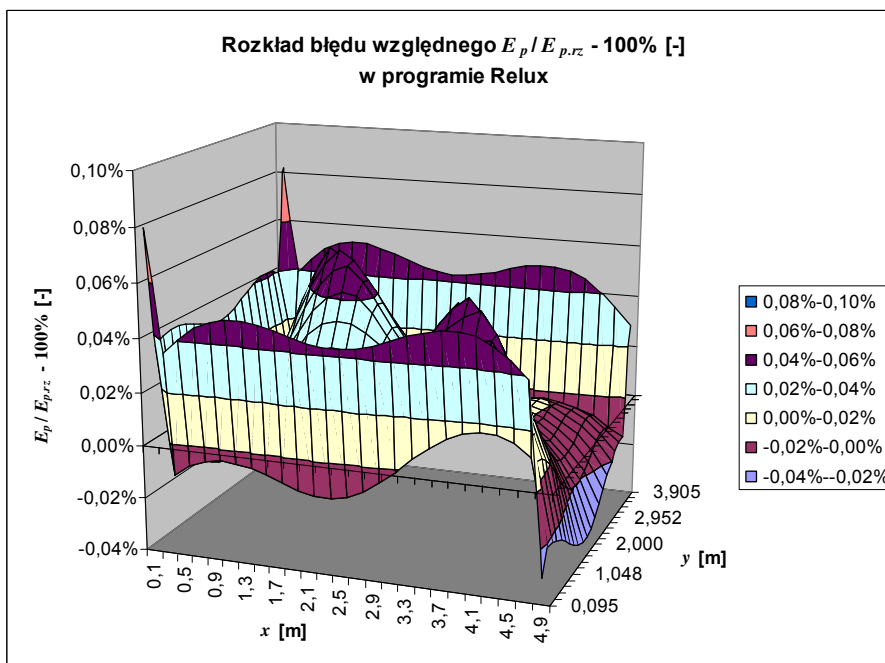
**Rys. 8.** Rozkład błędów obliczeniowych natężenia oświetlenia  $E_p$  obliczonego za pomocą programu Dialux i rzeczywistego  $E_{p,rz}$  na powierzchni podłogi pomieszczenia o wymiarach  $4 \times 5$  m oświetlanego kwadratową oprawą o długości boku 0,5 m zawieszoną na wysokości 0,25 m



**Rys. 9.** Rozkład błędów obliczeniowych natężenia oświetlenia  $E_p$  obliczonego za pomocą programu Relux i rzeczywistego  $E_{p,rz}$  na powierzchni podłogi pomieszczenia o wymiarach  $4 \times 5$  m oświetlanego kwadratową oprawą o długości boku 0,5 m zawieszoną na wysokości 0,25 m



**Rys. 10.** Rozkład błędów obliczeniowych natężenia oświetlenia  $E_p$  obliczonego za pomocą programu Dialux i rzeczywistego  $E_{p,rz}$  na powierzchni podłogi pomieszczenia o wymiarach  $4 \times 5$  m oświetlanego kwadratową oprawą o długości boku 0,5 m zawieszoną na wysokości 3,0 m



**Rys. 11.** Rozkład błędów obliczeniowych natężenia oświetlenia  $E_p$  obliczonego za pomocą programu Relux i rzeczywistego  $E_{p,rz}$  na powierzchni podłogi pomieszczenia o wymiarach  $4 \times 5$  oświetlanego kwadratową oprawą o długości boku 0,5 m zawieszoną na wysokości 3,0 m

Otrzymane duże wartości błędów obliczeniowych przy założonej wysokości 0,25 m skłoniły do sprawdzenia rozkładu błędów przy wysokości 3,0 m, przy której wartości  $E_{max}$  w programach Dialux i Relux były liczone praktycznie bezbłędnie. W programie Dialux, nawet przy tak dużej wysokości zawieszenia, wartości błędów pozostają znaczne, gdyż wahają się od -5,1% do +4,2% (rys. 10). Błędy te rozłożone są nierównomiernie na powierzchni całej podłogi. W programie Relux, przy wysokości zawieszenia wynoszącej 3,0 m, otrzymano praktycznie bezbłędne wyniki na całej powierzchni podłogi, o czym świadczy ich rozkład błędów przedstawiony na rysunku 11.

### 3. WNIOSKI

---

Najbardziej rozpowszechnione w Polsce międzynarodowe programy oświetleniowe Dialux i Relux mogą służyć jedynie do wizualizacji instalacji oświetlenia pośredniego. Nie można natomiast na podstawie otrzymywanych przy ich pomocy wyników obliczeniowych ocenić parametrów oświetleniowych takich instalacji.

W programie Relux, przy małej odległości oprawy od powierzchni oświetlanej, wyniki obliczeniowe bezpośredniego natężenia oświetlenia obarczone są błędem (zawyżone) od kilkudziesięciu procent w przypadku oprawy kwadratowej, do kilku tysięcy procent w przypadku oprawy kołowej. O błędach w algorytmach obliczeniowych programu Relux ewidentnie świadczą fakty, że wyniki symetrycznej instalacji oświetleniowej są niesymetryczne i nierównomierne, a ściany o zerowych współczynnikach mają niezerowe luminancje.

Przedstawione znaczące różnice w wynikach obliczeniowych pokazują, że mimo możliwości wykonania w programach Dialux i Relux symulacji instalacji oświetlenia pośredniego, nie wiadomo jaka jest ich jakość. Projektant nie jest w stanie stwierdzić, który z analizowanych programów oświetleniowych daje wyniki bardziej zbliżone do rzeczywistości. Przeprowadzone obliczeniowe badania teoretyczne również nie dały odpowiedzi na to pytanie. Oba programy generują bowiem błędne wyniki w różnych układach teoretycznych i przy różnym sposobie wprowadzania danych fotometrycznych opraw.

We wszystkich przypadkach, w których bezpośrednia obserwacja źródeł światła jest uniemożliwiona przez przesłony program Dialux nie wyznacza wartości wskaźnika UGR, a program Relux przypisuje mu wartość 0. Badane programy oświetleniowe nie oceniają olśnienia od powierzchni sufitu i innych elementów architektonicznych, których fragmenty, jak można zobaczyć na wizualizacjach, są wtórnymi źródłami światła o dużej luminancji.

---

*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. Bąk J., Pabjańczyk W.: Podstawy techniki świetlnej, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1994.
2. Pawlak A. Analiza dostępnych programów obliczeniowych do projektowania oświetlenia elektrycznego pod względem możliwości przeprowadzenia symulacji systemów oświetlenia pośredniego oraz wykonanie ich dla przykładowego obiektu. Zadanie nr II.B.13 realizowane w ramach programu wieloletniego pn: „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” etap II. CIOP-PIB, Warszawa 2011 [praca niepublikowana].
3. Żagan W. Podstawy techniki świetlnej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
4. PN-EN 13032-1: 2010 Światło i oświetlenie. Pomiar i prezentacja danych fotometrycznych lamp i opraw oświetleniowych. Część 1: Pomiar i format pliku.

*Rękopis dostarczono dnia 26.03.2012 r.*

### THE DISTRIBUTION OF ERRORS IN THE DESIGN OF INDIRECT LIGHTING WITH SQUARE LUMINAIRES

Andrzej PAWLAK, Krzysztof ZAREMBA

**ABSTRACT** *Square / rectangular luminaires lighting in a lambert way are usually used in large installations of indirect lighting. In order to investigate the operation of the most popular in Poland international programs Relux and Dialux, square luminaire was simulated. Achieving a relative height greater than the threshold distance of photometry in the test room was the main target of the simulation. In order to assess the accuracy of the calculation of lighting system with a square luminaire, researchers compared the maximum illuminance  $E_{max}$  calculated by using the programs in the main axis of the source, ie under the luminaire. Then they calculated, the real illuminance distribution  $E_{p,rz}$  at the surface of the floor, which was compared to the schedule prescribed under the law of inverse squares. On this basis, they made analysis of errors occurring between the results obtained from the programs and the results of the real illuminance. All simulations were performed by changing the height of suspended luminaire above the floor from 0.25 m to 3.0 m.*

**Keywords:** *indirect lighting, large luminaires, lighting design software Dialux and Relux*

**Mgr inż. Andrzej PAWLAK** – absolwent Politechniki Warszawskiej – Wydział Elektryczny – specjalizacja – Technika Świetlna. Obecnie asystent w Pracowni Promieniowania Optycznego CIOP-PIB. Działalność zawodowa to prace badawcze oraz ekspertyzy z zakresu oświetlenia elektrycznego oraz promieniowania optycznego. Wykonuje prace badawcze z zakresu oświetlenia elektrycznego oraz nielaserowego promieniowania optycznego. Jest certyfikowanym specjalistą w zakresie pomiarów parametrów warunków pracy w zakresie oświetlenia elektrycznego i dziennego oraz certyfikowanym wykładowcą bezpieczeństwa i higieny pracy w zakresie oświetlenia pomieszczeń i stanowisk pracy.



**Dr hab. inż. Krzysztof ZAREMBA** – adiunkt na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej. Specjalizuje się w opracowywaniu metod obliczeń świetlnych i projektowaniu opraw oświetleniowych oraz wykonywaniu pomiarów fotometrycznych.

