

## Analiza odbić wielokrotnych promieni elementarnych w projektowaniu komputerowym iluminacji

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki prac obejmujących ocenę wpływu odbić wielokrotnych promieni elementarnych w obrębie iluminowanego obiektu na rozkład luminancji na jego elewacjach. Analizę badawczą prowadzono z wykorzystaniem graficznej aplikacji komputerowej. Dokonano oceny uzyskiwanych wizualizacji komputerowych oraz rozkładów iluminacji dla wariantu symulacji komputerowej uwzględniającej jedynie składową bezpośrednią promieni świetlnych oraz składową odbić wielokrotnych.

**Abstract.** The article presents the results of works on the assessment of the impact of multiple elementary rays reflections within the illuminated object on the luminance distribution on its facades. The research analysis was carried out using a graphical computer application. The obtained computer visualizations and illumination distributions were evaluated for the computer simulation variant taking into account only the direct component of light rays and the component of multiple reflections (**Analysis of reflections of multiple elementary rays in computer design of floodlighting**).

**Słowa kluczowe:** iluminacje architektoniczne, wizualizacje komputerowe, odbicia wielokrotne promieni świetlnych, rozkład luminancji.

**Keywords:** architectural floodlightings, computer visualizations, multiple reflections of light rays, luminance distribution.

### Wstęp

Dynamiczny rozwój technologii półprzewodnikowej w ostatnich latach wpłynął na zdecydowanie o tok projektowania i rezultaty estetyczne iluminacji architektonicznych [1]. W obszarze projektowania, o ile nie występują ku temu wyraźne cechy formy geometrycznej danego obiektu (np. nieskomplikowana geometria elewacji), najczęściej stosuje się metodę mieszaną lub punktową [2,3]. Metody te bazują na instalowaniu w otoczeniu obiektu większej ilości sprzętu iluminacyjnego mniejszej mocy, lokowanego stosunkowo blisko elewacji na różnych wysokościach. W tym przypadku tradycyjny proces projektowy, wykorzystujący próby terenowe, w zasadzie nie ma racji bytu [4,5].

Współcześnie, w tego rodzaju pracach projektowych, wykorzystuje się z powodzeniem profesjonalne komputerowe aplikacje graficzne [6,7,8]. Dzięki zastosowaniu szeregu rozbudowanych procedur numerycznych, odwzorowujących fizyczne zjawiska świetlne, graficzne programy komputerowe pozwalają osiągnąć wysoką zgodność uzyskanych rezultatów projektowania z zrealizowaną iluminacją rzeczywistą [9]. Co więcej, zakres dostępnych funkcji modelowania komputerowego np. takich jak liniowy zanik strumienia świetlnego w funkcji odległości, czy możliwość eliminacji odbić wielokrotnych, wykraczają poza swój fizyczny wzorzec. Nie znaczy to, że z niektórych z nich się nie korzysta w toku projektowania iluminacji.

Przykładowo dla grupy obiektów budowlanych takich jak antyczne budowle obronne, obiekty architektoniczne o prostej formie, korzysta się z tych „niefizycznych” procedur modelowania. W tym wypadku, rozpatrując jedynie składową bezpośrednią elementarnych promieni świetlnych, emitowanych z baterii naświetlaczy w kierunku elewacji obiektu, uzyskuje się istotne skrócenie czasu potrzebnego na wygenerowanie przez program komputerowy wizualizacji iluminacji oraz rozkładu luminancji na ścianach budowli. To usunięcie z trybu operacji numerycznych składowej pośredniej strumienia świetlnego (analizy odbić wielokrotnych) znajduje słuszne uzasadnienie w fakcie, iż dla obiektu rzeczywistego o nieskomplikowanej formie geometrycznej praktycznie nie występują lub występują w marginalnej części odbicia wielokrotne, mogące mieć wpływ na rozkład luminancji na elewacjach.

Nieco inaczej przedstawia się sytuacja dla obiektów architektonicznych posiadających arkady, krużganki, okazałe gzymsy, wnęki, zdobienia, podpory itp. Taki charakterystyczny przypadek zilustrowano na rysunku 1.



Rys.1. Przykład iluminacji frontonu obiektu z wnękami [10]

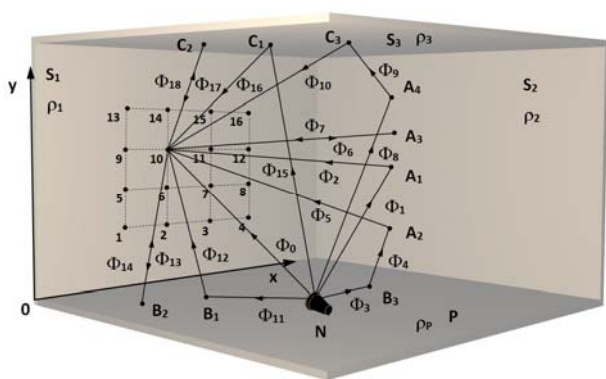
W tym wypadku dochodzić będzie do intensywniejszego oddziaływania odbić wielokrotnych w obrębie wnęk, gdzie jako wtórne promienniki światła wystąpią: ściany boczne wnęk, frontony wnęk, sufity i podłoża wnęk.

Powstaje zatem pytanie: czy mając na uwadze uzyskaną w wyniku przeprowadzonych obliczeń numerycznych wizualizację iluminacji, która poza rozkładem luminancji jest jednym z podstawowych czynników jej oceny, zarówno na poziomie projektowym jak i wykonawczym, należałoby w pewnych okolicznościach uwzględnić odbicia wielokrotne promieni elementarnych w toku prowadzonych symulacji komputerowych [11].

### Analiza odbić promieni elementarnych

Na potrzeby oceny oddziaływania odbić wielokrotnych na rozkład luminancji wewnątrz przykładowej wnęki została przygotowana poglądowa ilustracja (rys.2). Naświetlacz iluminacyjny  $N$  umieszczony na podłożu  $P$  o znanej wartości współczynnika odbicia światła  $\rho_P$  emituje elementarne promienie świetlne w kierunku podłoża  $P$ , frontonu wnęki  $S_1$ , ściany bocznej wnęki  $S_2$  oraz sufitu

wnęki  $S_3$ . Na ścianie frontonu wnęki wyznaczono punkty 1-16, w które trafiają niektóre promienie elementarne.



Rys.2. Bieg promieni elementarnych, emitowanych z naświetlacza N w układzie przestrzennym podłoga P, dwu ścian wnąki  $S_1$  i  $S_2$  oraz sufitu wnąki  $S_3$

Wybierając jeden przykładowy punkt analizy numer 10 można przyjąć, że dociera do niego suma składowej bezpośredniej strumienia oraz pośredniej związanej z odbiciami wielokrotnymi.

$$(1) \quad \Phi_C = \Phi_0 + \sum_{i=1}^n \Phi_i$$

gdzie:  $\Phi_C$  – całkowity strumień świetlny,  $\Phi_0$  – składowa bezpośrednia strumienia świetlnego,  $\Phi_i$  – strumienie elementarne składowej pośredniej.

Grupa przykładowo zilustrowanych promieni odbiciowych dla czytelności ilustracji zawiera jedynie pęk promieni pojedynczego i podwójnego odbicia. Strumień świetlny promienia pojedynczego odbicia, w którym uczestniczy punkt  $A_1$  ściany wnąki opisuje wzór 2.

$$(2) \quad \Phi_I = \Phi_2 = \Phi_1 \cdot \rho_2$$

gdzie:  $\Phi_I$  – strumień świetlny pierwszego odbicia,  $\Phi_1$  – strumień świetlny emitowany bezpośrednio w kierunku punktu  $A_1$  ściany wnąki,  $\Phi_2$  – strumień świetlny odbity od punktu  $A_1$ ,  $\rho_2$  - współczynnik odbicia światła od wnąki w punkcie  $A_1$ .

Z kolei elementarny strumień świetlny przykładowego podwójnego odbicia od punktów  $B_3$  i  $A_2$  można opisać zależnością 3.

$$(3) \quad \Phi_{II} = \Phi_5 = \Phi_4 \cdot \rho_2 = \Phi_3 \cdot \rho_p \cdot \rho_2$$

gdzie:  $\Phi_{II}$  – strumień świetlny drugiego odbicia,  $\Phi_3$  – strumień świetlny emitowany bezpośrednio w kierunku punktu  $B_3$  podłoga,  $\Phi_4$  – strumień świetlny odbity od punktu  $B_3$ ,  $\rho_2$  - współczynnik odbicia światła od wnąki w punkcie  $A_1$ ,  $\rho_p$  - współczynnik odbicia światła od podłoga w punkcie  $B_3$ .

Trzeba zauważyć, iż w grupie wszystkich odbić wielokrotnych występują też odbicia których źródłem są promienie emitowane ze ściany  $S_1$ , np. z punktu nr 10 w stronę punktu  $B_2$ . Promienie te kierowane są zarówno w stronę ściany bocznej wnąki jak i sufitu. Po podbiciu od przeszkody elementarne część promieni świetlnych może powtórnie trafić w punkt emisji nr 10. Taki przypadek opisuje strumień elementarny pojedynczego odbicia  $\Phi_{14}$ , wyrażony zależnością 4.

$$(4) \quad \Phi_{14} = \Phi_{13} \cdot \rho_p$$

gdzie:  $\Phi_{14}$  – strumień świetlny pierwszego odbicia,  $\Phi_{13}$  – strumień świetlny emitowany z punktu 10 bezpośrednio w

kierunku punktu  $B_2$ ,  $\rho_p$  - współczynnik odbicia światła od podłoga w punkcie  $B_2$ .

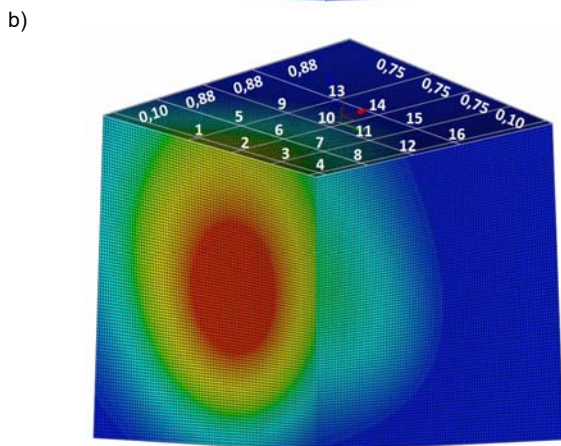
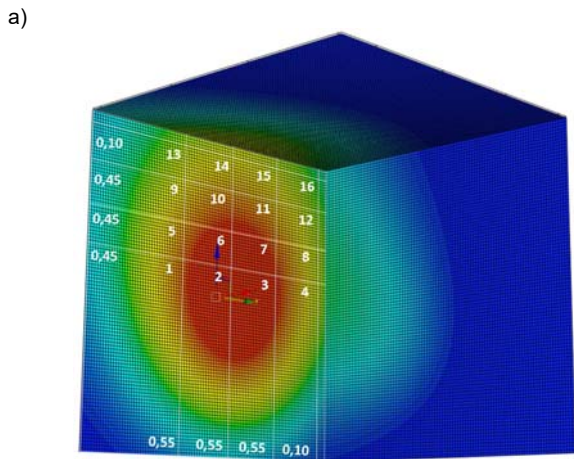
Wyodrębnienie pęku promieni elementarnych pierwszego i kolejnego odbicia pozwala stwierdzić, że duże znaczenie w tworzeniu odbić wielokrotnych będzie mieć kolorystyka elewacji oraz poziom jej zabrudzenia związane ze współczynnikiem odbicia światła. Rozpatrując postrzeganie iluminowanego obiektu głównie z poziomu obserwatora stojącego na gruncie przed obiektem można przyjąć, że szczególnie dla iluminacji strefowych, (lokowanie naświetlaczy we wnąkach okien, na gzymsach itp.) nie ma uzasadnionej potrzeby rozpatrywania oddziaływania odbić wielokrotnych w odniesieniu do podłoga. W tym przypadku strefa oddziaływania odbić będzie niewidoczna dla obserwatora.

### Model analizy odbić wielokrotnych

Badania szczegółowe przeprowadzono wykorzystując profesjonalną aplikację graficzną. Opracowano model symulacyjny, złożony z trzech powierzchni odbijających promienie świetlne w sposób lambertowski (frontonu wnąki, ściany wnąki oraz sufitu wnąki), a także naświetlacza pozycjonowanego centralnie na podłoga przed frontonem i skierowanego górną strefę frontonu. Naświetlacz jest umieszczony centralnie w odległości 2.5 m przed ścianą frontową wnąki. Każda z powierzchni wnąki posiada bok o wymiarze 3 m. Zdefiniowano wartości współczynników odbicia światła od wszystkich powierzchni wnąki na poziomie 30%. Punkty analizy rozkładu luminancji rozmieszczono na frontonie wnąki zgodnie z rysunkiem 3a. Punkty 4,8,12,16,15,14 oraz 13 rozmieszczono blisko krawędzi powierzchni ściany i sufitu wnąki. Jest to odległość wynosząca 0,10 m. Punkt 1 jest zlokalizowany w rejonie, gdzie przebiega granica oddziaływania odbić wielokrotnych na rozkład luminancji na ścianie frontowej wnąki. Powierzchnię oddziaływania odbić wielokrotnych wyznaczono na podstawie serii punktowych odczytów wartości luminancji „z” oraz „bez” oddziaływania składowej odbiciowej strumienia świetlnego naświetlacza. Punkty 2,3,5,6,7,9,10 oraz 11 są równo odległe od wyznaczonych wcześniej punktów krańcowych.

W wariancie pierwszym (wariant A) analizowany był rozkład luminancji dla powierzchni frontonu dla wartości współczynników odbicia światła na poziomie 30%. W wariancie drugim (wariant B) analizowany był rozkład luminancji dla powierzchni sufitu, także dla wartości współczynników odbicia światła na poziomie 30%. Odpowiada to takim materiałom elewacyjnym jak: mocno zabrudzona cegła biała, średnio zabrudzony kamień łupany jasny, czysty kamień ciemny czy cegła czerwona czysta [3].

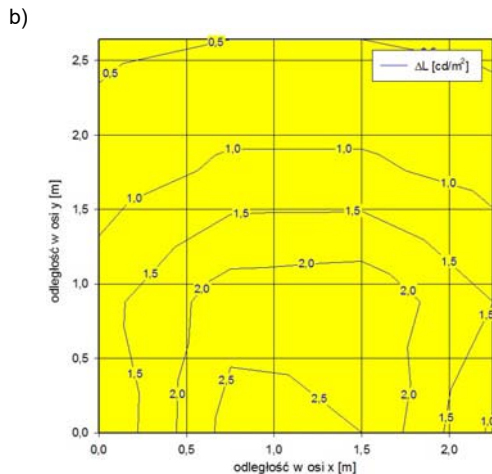
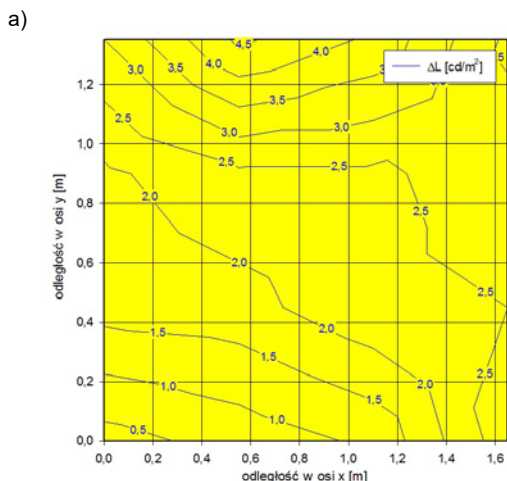
Rozsył światłości modelu naświetlacza, jego nacelowanie oraz odległość od frontonu wnąki zostały tak dobrane, aby istniała możliwość oceny skali wpływu odbić wielokrotnych na powierzchnię frontonu ze stref wnąki, gdzie składowa bezpośrednia strumienia świetlnego oddziałuje w minimalnym stopniu. Podobnie dla tego rodzaju ukierunkowania wiązki świetlnej naświetlacza była możliwa analiza oddziaływania odbić promieni świetlnych na powierzchnię sufitu oraz wnąki bez istotnego udziału składowej bezpośredniej strumienia świetlnego. Średnią wartość luminancji na całej ścianie frontowej wnąki ustalono na poziomie 12 cd/m<sup>2</sup>, co odpowiada zaleceniom projektowym obiektów zlokalizowanych w obszarach urbanizowanych, z wysoką luminancją tła [12]. Odpowiada to również jednej z zasad iluminacji – zasadzie wzmacniania głębi, gdzie postuluje się mocniejsze rozświetlenie stref obiektu bardziej oddalonych od obserwatora.



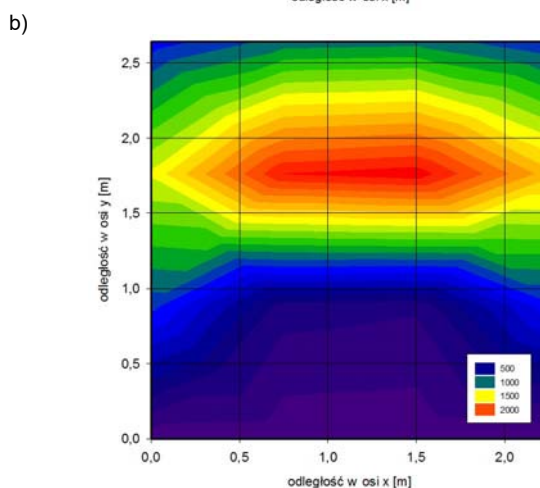
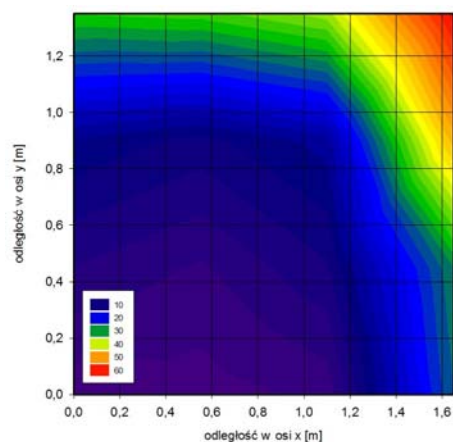
Rys.3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych analizy rozkładu luminancji w modelu wnęki, a – badanie rozkładu luminancji na frontonie wnęki z zdefiniowanym współczynnikiem odbicia światła  $\rho = 0.3$  (wariant A), b - badanie rozkładu luminancji na suficie wnęki z zdefiniowanym współczynnikiem odbicia światła  $\rho = 0.3$  (wariant B)

### Wyniki obliczeń symulacyjnych

Dla ściany frontowej oraz sufitu wnęki, w wyznaczonych punktach siatki obliczeniowej, porównano ze sobą obliczone wartości luminancji z uwzględnieniem oraz wykluczeniem odbić wielokrotnych. Różnica luminancji  $\Delta L$  została przedstawiona w postaci rozkładu powierzchniowego. Regularne rozmieszczenie punktów obliczeniowych na frontonie i suficie wnęki pozwoliło dodatkowo oszacować powierzchniowy zakres oddziaływania odbić wielokrotnych na frontonie (rys. 4a) oraz suficie (rys. 4b).



Rys.4. Rozkład różnicy luminancji  $\Delta L$  na analizowanych powierzchniach wnęki, a – badanie rozkładu różnicy luminancji  $\Delta L$  na frontonie wnęki (wariant A), b - badanie rozkładu różnicy luminancji  $\Delta L$  na suficie wnęki (wariant B)



Rys.5. Rozkład względnej, procentowej różnicy luminancji  $\Delta L\%$  w obrębie wnęki obiektu architektonicznego, a – wyniki obliczeniowe w punktach siatki obliczeniowej, zlokalizowanych na ścianie frontowej wnęki (wariant A), b - wyniki obliczeniowe w punktach siatki obliczeniowej, zlokalizowanych na suficie wnęki (wariant B),

Biorąc pod uwagę specyfikę wydolności wzrokowej, w tym widoczność uwzględniającą: odległość obserwacji, wielkość szczegółu pracy wzrokowej, poziom oświetlenia i kontrast przyjęto, iż w ocenie oddziaływania odbić wielokrotnych w obrębie wnęki obiektu architektonicznego znajdzie zastosowanie pojęcie względnej procentowej różnicy luminancji  $\Delta L\%$  [13] Zależność ta została opisana wzorem 5.



$$(5) \quad \Delta L_{\%} = \left( \frac{L_o}{L_B} - 1 \right) \cdot 100$$

gdzie:  $\Delta L_{\%}$  – względna procentowa różnica luminancji,  $L_o$  – luminancja w punkcie obliczeniowym, uwzględniająca odbicia wielokrotne,  $L_B$  – luminancja odniesieniowa w punkcie obliczeniowym, uwzględniająca jedynie składową bezpośrednią strumienia świetlnego.

Analogicznie jak w przypadku rozkładu powierzchniowego różnicy luminancji  $\Delta L$  względna procentowa różnica luminancji  $\Delta L_{\%}$  zobrazowana została w oparciu o siatkę punktów analizy, rozmieszczonych na froncie i suficie wnęki. Rozkład powierzchniowy tego parametru zilustrowano na rysunku 5.

#### Analiza uzyskanych wyników obliczeń komputerowych

Z rysunku 4 wynika, że oddziaływanie odbić wielokrotnych obejmuje znaczną powierzchnię, zarówno frontonu jak i sufitu. Przyjmując wyższy współczynnik odbicia np.  $\rho = 60\%$  można się spodziewać powiększenia tego obszaru.

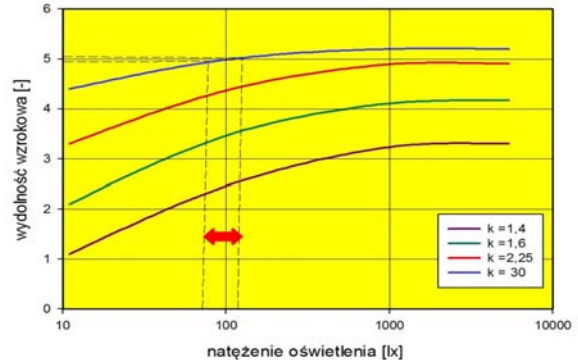
Zasadniczy wniosek z uzyskanych wyników obliczeń dotyczy porównania rozkładu powierzchniowego  $\Delta L_{\%}$  frontonu i sufitu. Tam, gdzie zdecydowanie dominuje składowa bezpośrednia strumienia świetlnego naświetlacza, względna procentowa różnica luminancji  $\Delta L_{\%}$  przyjmuje stosunkowo niższe wartości. Jedynie w strefie przysufitowej, bliskiej narożnika (tam gdzie oddziaływanie składowej odbiciowej się potęguje) lokalnie wartość tego parametru rośnie. Natomiast wpływ odbić wielokrotnych nasila się znacząco na suficie wnęki. Jak już wspomniano położenie, ukierunkowanie i dobór rozsyłu strumienia świetlnego dobrano w taki sposób, aby mieć (dla potrzeb tej analizy) możliwosć ograniczenia istotnego oddziaływania składowej bezpośredniej strumienia świetlnego naświetlacza na sufit. Zgodnie z przewidywaniami oddziaływanie odbić jest w tym wypadku zdecydowanie intensywniejsze oraz obejmuje prawie cały obszar sufitu. Wynika z tego faktu kolejny wniosek, że w przypadku np. płytkich wnęk typu wnęki okienne zakres oddziaływania odbić wielokrotnych będzie występował na mniejszej powierzchni, przez co będzie mniej dostrzegalny.

Kluczowe znaczenie w ocenie oddziaływania odbić wielokrotnych w iluminacji ma zdolności aparatu wzrokowego obserwatora do wychwytywania zmian luminancji pochodzących z pominięcia lub uwzględnienia w toku obliczeń symulacyjnych składowej pośredniej strumienia świetlnego [14,15,16,17]. Na rysunku 6, w oznaczonym paśmie wartości natężenia oświetlenia, zalecanym do stosowania w dziedzinie iluminacji, oznaczono przedziały wydolności wzrokowej odpowiadające różnym wartościom kontrastu. Już dla kontrastu  $k=30$  wydolność wzrokowa kształtuje się na poziomie ok 5. Uzyskane lokalnie w obliczeniach wyższe wartości kontrastu pozwalają wnioskować, iż zmiany luminancji mogą być bez większych trudności zauważane.

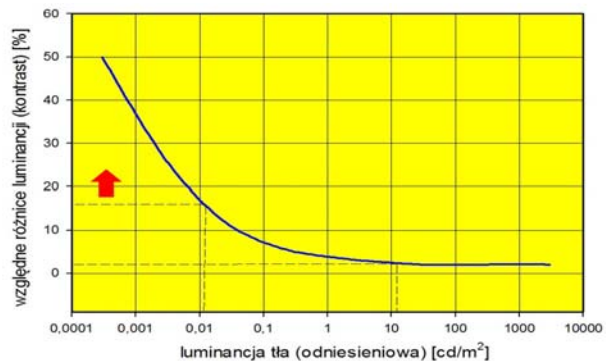
Przy znanej wartości współczynnika odbicia światła od elewacji (znanego rodzaju materiału elewacji) korzystniej jest posługiwać się względną różnicą procentową luminancji. Dla wyższych luminancji odniesieniowych zdolność reagowania na różnice jaskrawości rośnie. Zależność tę zilustrowano na rysunku 7.

Dla średniej luminancji iluminowanej ściany wynoszącej ok  $12 \text{ cd/m}^2$  obserwator będzie w stanie zauważyć względną różnicę luminancji o wartości ok 2%. Dla stref mniej doświetlonych wartość progu postrzegania różnicy luminancji będzie wyższa. Z punktu widzenia funkcjonowania aparatu wzorowego człowieka oraz gry

światłocienia (nierównomierny rozkład luminancji) na iluminowanych powierzchniach można przyjąć że odczuwalna progowa względna procentowa różnica luminancji wyniesie ok. 15-20% [18]. Zatem w rozpatrywanym przypadku wnęki, zarówno dla frontonu (fragmentarycznie), a szczególnie sufitu (całościowo), zachodzą sprzyjające warunki, umożliwiające dostrzeżenie różnicy rozkładu luminancji „z” oraz „bez” odbić wielokrotnych.

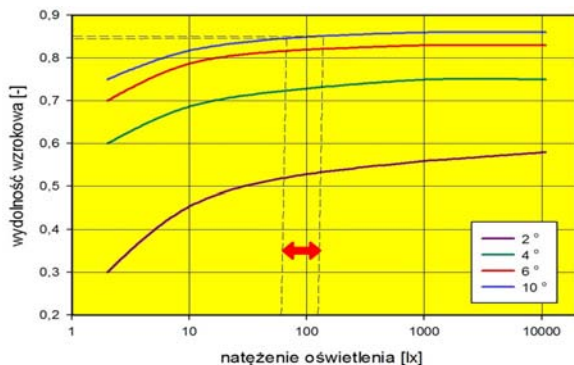


Rys.6. Wykres zależności wydolności wzrokowej od natężenia oświetlenia dla różnych poziomów kontrastu



Rys.7. Wykres zależności względnej, procentowej różnicy luminancji  $\Delta L_{\%}$  od luminancji odniesieniowej

Poza kontrastem luminancji reakcja wzrokowa obserwatora jest zależna od drugiego czynnika: wielkości szczegółu pracy wzrokowej [19,20]. W zakresie zalecanego w literaturze natężenia światlenia przy iluminowaniu obiektów architektonicznych wynoszącego średnio od ok. 50 lx do ok. 200 lx wydolność wzrokowa utrzymuje się na prawie stałym wysokim poziomie. Ma to miejsce już przy wielkości kątowej szczegółu wynoszącego  $10^\circ$  [2]. Zależność natężenia oświetlenia od wydolności wzrokowej przy różnych wielkościach kątowych przedstawiono na rysunku 8.



Rys.8. Wykres zależności wydolności wzrokowej od natężenia oświetlenia dla różnych wielkości kątowych obiektów (płam świetlnych)

Widoczność plam świetlnych na elewacji iluminowanego obiektu będzie zależać wprost od obranego kierunku i odległości obserwacji. Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki symulacji komputerowej poziomy kontrastów na frontonie i suficie wnęki poddano szerszej ocenie widoczność sufitu przez obserwatora z różnych odległości. I tak dla rozpatrywanej wnęki o głębokości i szerokości wynoszącej 2,5 m, sufit zlokalizowany na wysokości 3 m od poziomu gruntu (np. sufit parterowych krużganków) utworzy powierzchnię pozorną o wielkości kątowej  $10^\circ$  już z odległości ok 7,5 m i kierunku prostopadłego do frontonu wnęki. Podniesienie sufitu na wysokość 6 m przesunie tę granicę na odległość ok 8,5 m. Kolejna zmiana położenia sufitu na wysokość 9 m przemieści granicę widoczności powierzchni pozornej sufitu wnęki na odległość ok 9,5 m.

Na etapie wyboru głównych kierunków i odległości obserwacji projektowanej iluminacji, mając na uwadze widoczność całego konturu obiektu, zazwyczaj przyjmuje się większe odległości. Zatem wielkość kątowa plam świetlnych będzie mniejsza – a to bez wątpienia wpłynie na obniżenie zdolności rozróżnienia przyrostu luminancji w warunkach uwzględnienia oraz wykluczenia odbić wielokrotnych.

Oczywiście mogą zachodzić przypadki szczególne w których wnęka obiektu architektonicznego będzie głęboka, ukierunkowanie naświetlaczy iluminacyjnych będzie w stronę frontonu wnęki, powierzchnia odbijająca sufitu będzie jasnej kolorystyki a obserwator będzie usytuowany stosunkowo blisko obiektu. Taką sytuację w postaci krużganków, zlokalizowanych na piętrze dziedzińca zamkowego zobrazowano na wizualizacji komputerowej (rys.9).

a)



b)



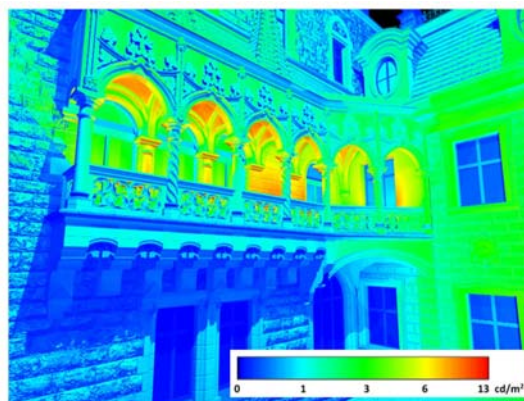
Rys.9. Komputerowa wizualizacja iluminacji wnętrza krużganków obiektu architektonicznego, a – wariant z uwzględnieniem wyłącznie składowej bezpośredniej strumienia świetlnego baterii naświetlaczy, b – wariant z uwzględnieniem odbić wielokrotnych strumienia świetlnego baterii naświetlaczy

Wzorcem rzeczywistym dla zobrazowania skali zjawiska był w tym przypadku zamek w Mosznej, a ściślej jego

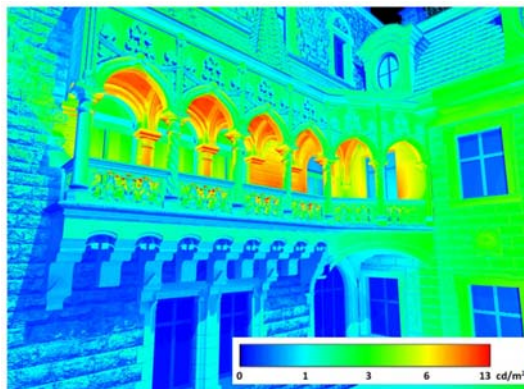
krużganki [internetowy link do zamku]. Proces obliczeń symulacyjnych przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszej kolejności uwzględniono wyłącznie składową bezpośrednią strumienia świetlnego baterii naświetlaczy rozmieszczonych wzdłuż wewnętrznej strony balustrady i skierowanych ku ścianie. Na wizualizacji iluminacji widoczna jest część ściany krużganków oraz sufit formą zbliżony do stylu gotyckiego (rys.9). W drugim kroku w toku symulacji komputerowych, dla tego samego modelu geometrycznego obiektu, uwzględniono odbicia wielokrotne.

Interesujące jest porównanie obu wizualizacji. Generalnie rozkład luminancji na suficie i ścianie zostaje w obu przykładach zachowany, jednak bez trudności można zauważyć różnicę wartości luminancji. Z pewnością gdyby ściana czołowa dziedzińca zamku była mocniej rozświetlona, ta różnica nie byłaby aż tak widoczna. Warto zauważyć, że w warunkach występowania wewnątrz krużganków elementów architektury cechujących się odbiciem kierunkowym lub bliskim do kierunkowego (np. szyby okienne), w sprzyjających okolicznościach nacelowania naświetlaczy, dodatkowo wzmocniona zostanie składowa odbiciowa. Oczywiście poza wydłużonym czasem procesu obliczeniowego aplikacji graficznej uwzględniającej odbicia wielokrotne projektant iluminacji otrzymuje do dyspozycji pseudokolorystyczną wizualizację rozkładu luminancji. Analogicznie jak powyżej zestawiono na rysunku 10 dwa rozpatrywane warianty obliczeniowe.

a)



b)



Rys.10. Ilustracja rozkładu luminancji wewnątrz krużganków, a – wariant z uwzględnieniem wyłącznie składowej bezpośredniej strumienia świetlnego baterii naświetlaczy, b – wariant z uwzględnieniem odbić wielokrotnych strumienia świetlnego baterii naświetlaczy

Możliwość dysponowania w programie symulacyjnym paletą barw przypisanych do poszczególnych poziomów



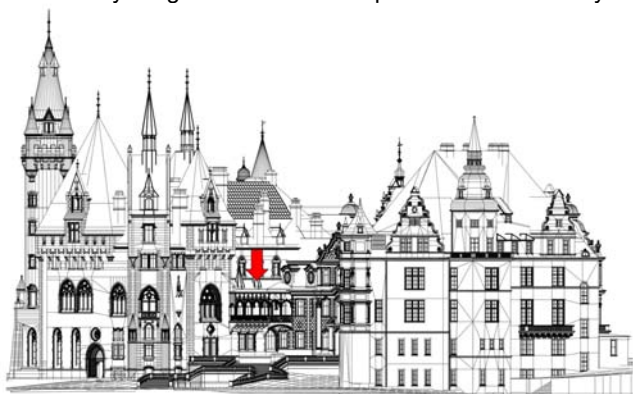
luminancji pozwala z jeszcze innej perspektywy porównać oba ujęcia krużganków. Dla wariantu uwzględniającego odbicia wielokrotne widać dla strefy sufitu przypisany bardziej wyrazisty odcień barwy pomarańczowej.

### Podsumowanie

Przeprowadzona analiza oddziaływania odbić wielokrotnych na wizualizację iluminacji oraz ilustracji rozkładu luminancji koncentrowała się na nieskomplikowanym geometrycznie modelu wnętrza oraz krużgankach zamkowych. Dla pełniejszego obrazu złożoności omawianego zagadnienia należałoby tematykę odbić wielokrotnych odnieść do kompletnych modeli zamków, pałaców, obiektów historycznych czy sakralnych. Wówczas poza lokalnymi strefami ewidentnego oddziaływania odbić wielokrotnych na rozkład luminancji w obrębie danej strefy, należałoby uwzględnić pozostałe elementy wystroju architektonicznego takie jak: gzymsy, przypory pilastry, strefy styku ścian itp.

Wówczas, uwzględniając odbicia wielokrotne, należy liczyć się z faktem znacznego wydłużenia czasu potrzebnego na wygenerowanie wizualizacji. Biorąc pod uwagę potrzebę wielokrotnych, powtarzalnych prób doboru modeli naświetlaczy w ramach przyjętej koncepcji iluminacji, decyzja o wyeliminowaniu z toku obliczeniowego odbić może mieć istotne znaczenie w kontekście skrócenia czasu potrzebnego na dobór sprzętu iluminacyjnego.

Taki tryb oceny oddziaływania odbić wielokrotnych został zaprezentowany dla przykładowego projektu pełnej iluminacji zamku w Mosznej. Model geometryczny obiektu zilustrowano na rysunku 11, a krużganki dziedzińca wewnętrznego oznaczono strzałką. Obiekt posiada bogatą ornamentykę zdobień, zarówno w obszarze elewacji, hełmów wież jak i poszycia dachowego, która może uczestniczyć w generowaniu odbić promieni elementarnych.



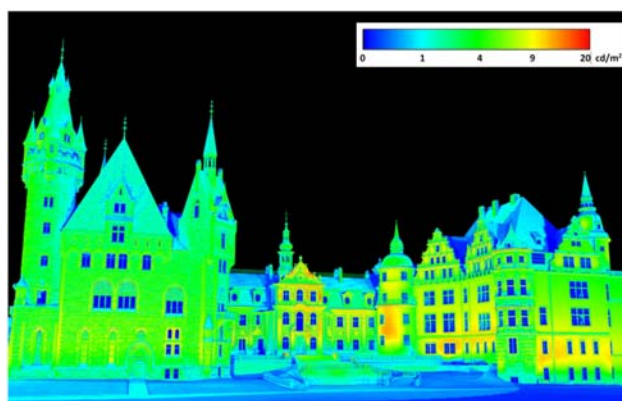
Rys.11. Ilustracja komputerowego modelu krawędziowego zamku w Mosznej, Województwo Opolskie

Zaproponowana, znaczna odległości obserwacji (konieczna objęcia widokiem całego konturu obiektu) sprzyja zanikowi możliwości obserwacji większych powierzchni pozornych stref elewacji, mogących uczestniczyć w procesie generowania odbić wielokrotnych. Dotyczy to w przeważającej większości gzymsów i wnęk okiennych. Sufit krużganków jest praktycznie z tej odległości niewidoczny. Nie wystąpią zatem istotne przesłanki uzasadniające konieczność uwzględnienia w procesie obliczeniowym odbić promieni elementarnych.

Wizualizację proponowanej iluminacji z zastosowaniem metody zalewowej zaprezentowano na rysunku 12. Jako uzupełniający element projektu iluminacji na rysunku 13 został przedstawiony rozkład luminancji na elewacjach i poszyciu dachowym zamku z obranego kierunku obserwacji.



Rys.12. Komputerowa wizualizacja iluminacji zamku w Mosznej z zaproponowaną metodą zalewowej iluminacji



Rys.13. Ilustracja rozkładu luminancji na powierzchniach elewacji i połaci dachowych zamku w Mosznej bez uwzględnienia składowej odbiciowej promieni elementarnych – obrana znaczna odległość obserwacji

W końcowym podsumowaniu zrealizowanych prac można hasłowo ująć kilka zasadniczych wniosków o charakterze praktycznym. W odniesieniu do obiektów posiadających elewacje jasne i czyste, charakteryzujących się dużymi współczynnikami odbicia światła, oddziaływanie odbić wielokrotnych na rozkład luminancji będzie intensywniejsze. Istnienie dużych okien w sprzyjających okolicznościach może przyczynić się do wzmocnienia składowej odbiciowej, głównie w rejonach sufitowych wnęk. Rozpatrywanie odbić wielokrotnych w toku obliczeń symulacyjnych warto brać pod uwagę szczególnie w odniesieniu do wnęk głębszych. Dla bliskich odległości obserwacji iluminowanego obiektu, gdzie powierzchnia pozorną sufitu wnętrza będzie dobrze widoczna, należałoby brać pod uwagę analizę odbić wielokrotnych. Dla dalszych odległości obserwacji z kierunkami bliskimi do prostopadłych uwzględnienie odbić wielokrotnych nie znajduje uzasadnienia. Zastosowanie metody zalewowej iluminacji będzie sprzyjać tłumieniu oddziaływania odbić wielokrotnych na rozkład luminancji na elewacjach obiektu.

**Adnotacja:** Artykuł powstał w ramach stażu naukowego dr inż. Henryka Wachty oraz dr hab. inż. Sebastiana Różowicza, prof. PŚk realizowanego na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Uniwersytetu Technicznego w Koszycach od 01.07.2022 r. do 30.09.2022 r. Tematyka stażu naukowego: modelowanie iluminacyjne złożonych geometrii obiektów architektonicznych z uwzględnieniem charakterystyk przepuszczalności i odbicia materiałów elewacyjnych.

**Autorzy:** dr inż. Henryk Wachta, Politechnika Rzeszowska, Katedra Ergo-elektroniki i Elektroenergetyki, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, E-mail: [hwachta@prz.edu.pl](mailto:hwachta@prz.edu.pl);  
dr hab. inż. Sebastian Różowicz, prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: [s.rozowicz@tu.kielce.pl](mailto:s.rozowicz@tu.kielce.pl);  
dr hab. inż. Lubomir Bena, Uniwersytet Techniczny w Koszycach, Katedra Elektroenergetyki, ul. Letnia 9, 042-00 Koszyce, Słowacja, E-mail: [lubomir.bena@tuke.sk](mailto:lubomir.bena@tuke.sk).

#### LITERATURA

- [1] Żagan W. (red. nauk.), *LED-y w technice świetlnej*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2020
- [2] Żagan W., Krupiński R., *Teoria i praktyka iluminacji obiektów*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016
- [3] Ratajczak J., *Oświetlenie iluminacyjne obiektów architektonicznych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009
- [4] Yee R., *Lighting spaces*, The Art. & Science of Architectural Lighting, Visual Reference Publications Inc., New York 2007.
- [5] Egan D., Olgay V., *Architectural Lighting*, McGraw-Hill, 2002
- [6] Wachta H., Leśko M., Baran K., *The meaning of qualitative reflective features of the facade in the design of illumination of architectural objects*, Computational Technologies in Engineering (TKI'2018), AIP Conference Proceedings, (2019), Volume 2078, Issue 1, 020102
- [7] Krupiński R., Scherzer W., Pracki P., Wiśniewski A., Skarżyński K., *A smart Floodlighting Design System Based on Raster Images*, Energies 16(10), 4028, 2023
- [8] Krupiński R., *Modelowanie 3D dla potrzeb iluminacji obiektów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011.
- [9] Krupiński R., *Evaluation of Lighting Design Based on Computer Simulation*, 2018, VII Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen V4)
- [10] Dokumentacja fotograficzna autorów
- [11] Bewszko T., Wachta H., *Multi-criteria decision aid for planning lighting technology of architectural objects*, Przegląd Elektrotechniczny, 87 (2011), nr 8, 21-25
- [12] CIE Technical Report No. 94, *Guide for Floodlighting*
- [13] Tatarczak A., *Statystyka*, T9, Wydawnictwo Naukowe Wyższej Szkoły Ekonomii i Innowacji, Lublin 2021
- [14] Mączyńska – Frydrysek A., Jaskólska – Klaus M., Maruszewski T., *Psychofizjologia widzenia*, Wydawnictwo ASP, Poznań 2001
- [15] Wolska A., *Psychofizjologia widzenia*, Technik Świetlna '98, Poradnik Informator, T1, Warszawa 1998.
- [16] Falk D., Brill D., Stork D., *Seeing the light, Optics in nature, Photography, Color, Vision and Holography*, Echo Point Books & Media, New York 2019
- [17] Waldman G., *Introduction to Light: The Physics of Light, Vision and Color*, Dover Publications, 2002.
- [18] Bąk J.: *Technika oświetlania*, PWN, Warszawa, 1981
- [19] Mark S. Rea, *Illuminating Engineering Society of North America, The IESNA Lighting Handbook Reference & Application*, Illuminating Engineering Society of North America, 2000
- [20] North R.V. *Work and the Eye*, Oxford University Press, New York, 1993