

Zbigniew TURLEJ

# NARZĘDZIA PROJEKTOWANIA OŚWIETLENIA DZIENNEGO W BUDYNKACH

**STRESZCZENIE** *Oświetlenie dzienne w budynkach jest zjawiskiem złożonym, przede wszystkim ze względu na swą zmienność. Aktualnie projektowanie tego oświetlenia wymaga stosowania różnorodnych narzędzi projektowych. Przedmiotem opracowania jest próba opisu części tych narzędzi, ze szczególnym uwzględnieniem fizycznych modeli budynków i symulatorów nieba. Przedstawiono również wybrane zagadnienia normalizacyjne i ekonomiczne.*

**Słowa kluczowe:** *oświetlenie dzienne w budynkach, narzędzia projektowania, zagadnienia normalizacyjne i ekonomiczne*

## 1. WSTĘP

---

Projektowanie światła dziennego w budynku jest procesem twórczym i złożonym. Aktualnie głównym celem tego procesu jest tworzenie stosownych architektonicznych i technologicznych rozwiązań, umożliwiających ograniczenie konsumpcji energii w budynkach poprzez zastąpienie światła elektrycznego dziennym. Narzędzia, które wspomagają ilościowo i jakościowo projektowanie oświetlenia dziennego, zazwyczaj obejmują:

---

**dr inż. Zbigniew TURLEJ**  
e-mail: z.turlej@iel.waw.pl

Zakład Techniki Świetlnej i Promieniowania Optycznego  
Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 256, 2012

- wizualizację otoczenia świetlnego danego projektu oświetlenia dziennego;
- przewidywanie współczynników światła dziennego w przestrzeni oświetlonej światłem dziennym;
- identyfikację potencjalnych źródeł olśnienia i ocenę wskaźników komfortu wzrokowego;
- przewidywanie możliwości oszczędzania energii poprzez stosowanie światła dziennego;
- sterowanie penetracją promieni słonecznych i wizualizację dynamiki zachowań światła słonecznego.

Poprzez dostarczanie tego rodzaju informacji, narzędzia projektowe odgrywają zasadniczą rolę w procesach podejmowania decyzji przy projektowaniu oświetlenia dziennego, od koncepcji do implementacji strategii. Ważne są również warunki techniczne dla budynków, ich usytuowanie, stan normalizacji oraz wybrane aspekty ekonomiczne.

## 2. RODZAJE NARZĘDZI PROJEKTOWANIA

---

Przy omawianiu zwrócono szczególną uwagę na rodzaje narzędzi projektowania: narzędzia uproszczone, narzędzia komputerowe oraz modele fizyczne budynków i symulatory światła dziennego.

### 2.1. Narzędzia uproszczone

---

Narzędzia uproszczone dają wskazówki, jak należy podejmować decyzje bez poświęcania nadmiernego czasu projektowi lub innym szczegółom. Zazwyczaj narzędzia te stosowane są do sprawdzania wydolności światła dziennego we wczesnym etapie projektowania i nie nadają się do modelowania strategii złożonych. Wiele tradycyjnych narzędzi wstępnych skupia się na współczynniku światła dziennego jako kryterium projektowym, stosowanym głównie w klimatach pochmurnych. Wspólnym ograniczeniem narzędzi uproszczonych jest brak precyzyjnych informacji o kluczowych parametrach projektowych, takich jak wewnętrzne współczynniki odbicia światła, wielkość i położenie okien i świetlików oraz proporcja przestrzeni budynku i zewnętrznych przesłon światła dziennego. Względnie niedawno przeprowadzono analizę uproszczonych narzędzi projektowania. Stwierdzono, że narzędzia te (tab. 1) przyjmują często inne postacie i obejmują różne zagadnienia.

**TABELA 1**

Charakterystyka narzędzi uproszczonych

Postać	DFS	DFR	WD	RD	AD	EB	SRA	VC
1. Formuła	x	xx	x	xx				
2. Tabela	x	x	x	x				
3. Nomogram	xx	x	x	x	xx			
4. Diagram	xx	x	xx	x		x	x	x
5. Kątomierz	x	x	x	x				
6. Komputer	xx	xx	xx	xx		xxx	xxx	
7. Typologia	x	x	x	x			x	x
8. Modele	x	x	x	x	x		x	x

Oznaczenia:

- x – występuje jednokrotnie, xx – dwukrotnie, xxx – trzykrotnie,
- DFS– współczynnik światła dziennego z boku,
- DFR– współczynnik światła dziennego z dachu,
- WD – projekt okna,
- RD – projekt świetlika,
- AD – projekt atrium,
- EB – energetyczne zachowanie/autonomia światła dziennego,
- SRA– analiza cienia i odbicia/długość świecenia światła,
- VC – komfort wzrokowy.

Inną kategorią wstępnych narzędzi jest ocena wpływu przesłon zewnętrznych na dostępność światła dziennego na miejscu fasady lub konstrukcji. Narzędzia te w praktyce nie odniosły znaczącego sukcesu.

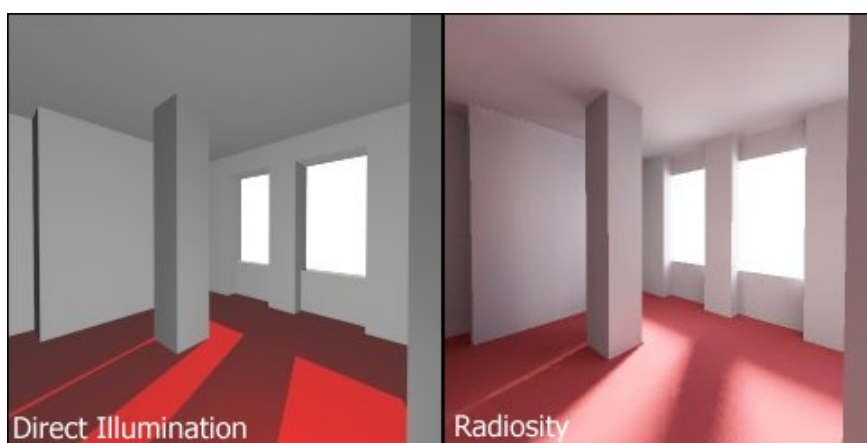
## 2.2. Narzędzia komputerowe

Wraz z rozwojem grafik technik komputerowych, złożone algorytmy obliczeń i techniki symulacji oświetleniowych stały się dostępne niemal dla wszystkich praktyków związanych z projektowaniem oświetlenia dziennego. Możemy wyróżnić dwa podstawowe narzędzia komputerowe w oparciu o metody obliczeń graficznych: metoda energetyczna oraz metoda śledzenia promieni. Generalnie narzędzia komputerowe projektowania oświetlenia dziennego nie są dostatecznie rozpowszechnionym narzędziem ze względu na komplikacje i niedoskonałości modelowania.

### Metoda energetyczna

Metoda energetyczna wykorzystywana jest w grafice komputerowej do wyznaczania rozkładu oświetlenia scen trójwymiarowych. Metoda wyznacza rozkład natężenia oświetlenia, uwzględniając pochłonięcia i odbicia światła,

jakie mają miejsce na wszystkich powierzchniach znajdujących się na scenie, czyli modeluje prawie tak samo, jak obserwujemy w rzeczywistym świecie. Metoda ta uwzględnia wyłącznie odbicia rozproszone, tj. intensywność światła odbitego, jest niezależna od kierunku – dzięki temu wyniki są niezależne od położenia obserwatora, a to pozwala na wielokrotną, dowolną wizualizację sceny bez ponawiania obliczeń. Jednakże metoda nie uwzględnia efektów świetlnych zależnych od położenia obserwatora, takich jak rozbłyski na powierzchniach metalicznych, odbicia zwierciadlane, załamanie światła itp.



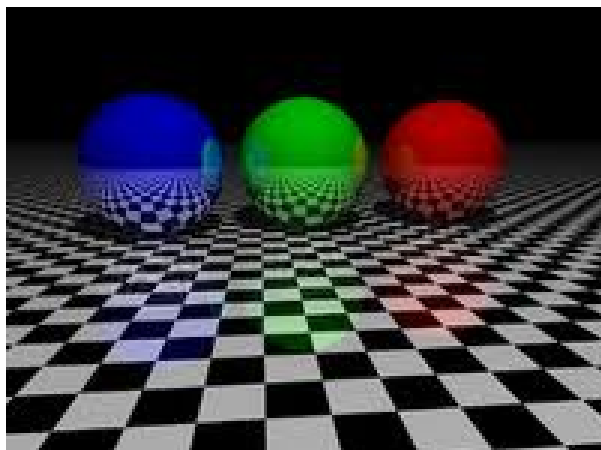
**Rys. 1.** Po lewej – oświetlenie bezpośrednie, po prawej – przy użyciu metody energetycznej; światło odbite od czerwonej podłogi nadaje czerwone zabarwienie całemu pomieszczeniu, w narożnikach można dostrzec subtelne cienie (*Wikipedia, radiosity*)

Dobre efekty finalne uzyskuje się po połączeniu metody energetycznej z metodą śledzenia promieni, modelującej zjawiska, które metoda energetyczna pomija.

### Śledzenie promieni

Jest to technika generowania fotorealistycznych obrazów scen trójwymiarowych. Opiera się na analizowaniu tylko tych promieni światła, które trafiają bezpośrednio do obserwatora. W rekursywnym śledzeniu promieni bada się dodatkowo promienie odbite zwierciadlane oraz załamane. Śledzenie promieni, mimo swoich zalet, nie jest idealnym sposobem tworzenia fotorealistycznych obrazów.

Przede wszystkim w ogóle nie uwzględnia się światła rozproszonego; ponadto, ponieważ operuje się na pojedynczych promieniach, nie można prawidłowo modelować dyfrakcji, rozczepienia światła, np. na pryzmacie, interferencji fal świetlnych i innych zjawisk falowych. Połączenie obu metod usuwa wiele niedogodności.



**Rys. 2. Scena wygenerowana metodą śledzenia promieni, w której wszystkie obiekty jednakowo odbijają światło (Wikipedia, raytracing)**

### 2.3. Modele fizyczne budynków

Modele fizyczne budynków w skali są stosowane na całym świecie podczas projektowania światła dziennego. Podstawowe powody skłaniające do zainteresowania tymi metodami, w porównaniu z innymi, są następujące:

- architekci stosują modele w skali jako narzędzie projektowe do studiowania różnych aspektów projektowanego budynku i konstrukcji;
- gdy są właściwie skonstruowane, to modele te w skali portretują rozkład światła dziennego wewnątrz modelu, niemal tak samo dokładnie, jak w pełnowymiarowym wnętrzu.

Te wszystkie cechy są wynikiem ekstremalnie małych wymiarów długości fal światła (380-780 nm) w porównaniu z rzeczywistymi wymiarami modeli. Innymi słowy, nawet najmniejsza skala modelu może dawać dokładne wyniki. Konstrukcja modelu musi być poprzedzona wyborem odpowiedniej skali, która powinna być związana z celem danego projektu. Rozważane są skale od 1:500 do 1:1 (tab. 2), a:

- ściany modelu muszą być szczelne i połączenia powinny być światłoodporne;
- części modelu powinny być ruchome lub zastępowalne, aby umożliwić porównanie konfiguracji i pozwolić na rozmieszczenie sensorów i kabli;
- optyczne właściwości wewnętrznych (ściany, sufit, podłoga) i zewnętrznych powierzchni powinny być maksymalnie zbliżone do tych, które są przewidziane w projektowanym budynku;
- materiały szklące modelowe, np. cienkie kawałki szkła lub przezroczystego plastiku powinny być zastosowane w otworach, gdy kąty padania i przepuszczania światła są oczekiwane jako ważne dla rozkładu światła dziennego w wewnętrznej przestrzeni;

- geometria i wymiary powinny być dokładne, gdy jest konieczne rozważenie pytań projektowych;
- ogólne wymiary i waga modelu powinna być takie, aby był podtrzymywany (np. na heliodonie) lub przesuwany (np. ruchoma makieta wnętrza);
- wymiar modelu musi być uzasadniony ze względu na odległość do modelowego źródła światła dziennego (np. 0,6 m wysoki przy 5 m odległości od źródła);
- umocowanie części modelu powinno być dostatecznie silne, aby pozwolić na różne ruchy i nawet w pozycji pionowej;
- dostęp od wnętrza modelu poprzez otwory lub usuwalne części powinien być możliwy w celu umieszczenia czujników światła lub urządzeń obrazowych.

**TABELA 2**

Skala modelu jako funkcja celu projektu światła dziennego

Skale	Cel
1:200 – 1:500	Wstępne projektowanie i rozwój koncepcji, aby stworzyć ogólny sens masy projektu, aby studiować cień stworzony przez przyszły budynek lub z sąsiednich budynków
1:200 – 1:50	Studiowanie bezpośredniej słonecznej penetracji w budynku (np. skuteczność ochrony przeciwsłonecznej), studiowanie rozproszonego światła dziennego w bardzo dużych przestrzeniach (np. w atrium)
1:100 – 1:10	Rozważanie detali przestrzennych komponentów, tworzenie szczegółowych detalicznych widoków (np. video lub zdjęcia), dokładne studia penetracji światła dziennego rozproszonego i kierunkowego
1:10 – 1:1	Integrowanie krytycznych komponentów przemysłowych, rozważanie urządzeń światła dziennego, które nie mogą być zredukowane w skali, przeprowadzanie końcowej oceny zawansowanych systemów oświetlenia dziennego poprzez monitorowanie i oceny użytkowników

Część tych kwantyfikowalnych wielkości nie może być oceniana lub mierzona w skalowanych modelach, ponieważ sami ludzie oraz pewne obiekty nie mogą mieć zredukowanych wymiarów (dokumenty, widoki itp.). W tej sytuacji należy używać pełnowymiarowego wnętrza testowego w warunkach zewnętrznych. Wówczas warunki oświetlenia zależą od zmiennego rozkładu luminancji sklepienia nieba. Wnętrza testowe powinny być tak skonstruowane, aby jedno było używane jako wnętrze referencyjne, wyposażone w konwencjonalne fasady (np. podwójne szklenie), a drugie jako wnętrze testowe do badania innowacyjności systemów oświetlenia dziennego.

## 2.5. Symulatory nieba jako narzędzia projektowe

Współcześnie światło dzienne staje się kluczowym elementem projektu architektonicznego budynku. Świadomość emocjonalnej roli światła w architekturze jest już dobrze rozpoznana.



**Rys. 3. Pokój Lustrzany**  
(CERES, Ball State University)

Jednakże dla większości architektów oświetlenie dzienne pozostaje teoretyczną koncepcją bez możliwości studiowania i eksperymentowania. Obecnie, dla wielu wydziałów architektury i budownictwa w Europie, stworzenie możliwości studiowania światła dziennego staje się wyzwaniem na XXI wiek. Uznano, że obecnie najlepszą metodą studiowania światła dziennego jest stosowanie modeli budynków w skali, badanych pod różnymi symulatorami nieba.

Tutaj przykładowo przedstawiono dwa symulatory nieba: Pokój Lustrzany (rys. 3) i Heliodon (rys. 4). Budynek w skali umieszcza się na okrągłej ruchomej podstawie. Modelowym źródłem rozproszonego światła dziennego są lustrzane ściany i matowy prześwitujący sufit. Jest to miejsce, gdzie badane są współczynniki oświetlenia dziennego. Współczynnik oświetlenia dziennego wyrażany w procentach jest miarą względną natężenia oświetlenia dziennego w danym punkcie wnętrza budynku do równocześnie występującego natężenia oświetlenia na otwartej przestrzeni, pochodzącego od nieboskłonu, wyłączeniem bezpośredniego światła słonecznego. Heliodon jest to urządzenie, które symuluje układy światła i cienia, jakie zdarzają się w różnych miejscach i w różnym czasie na powierzchni ziemi. Architekt, oglądając model budynku na heliodonie, może weryfikować i korygować wiele decyzji projektowych, dotyczących roli światła i cienia na budynku.



**Rys. 4. Heliodon**  
(CERES, Ball State University)

### 3. WYBRANE ZAGADNIENIA NORMALIZACYJNE I EKONOMICZNE

---

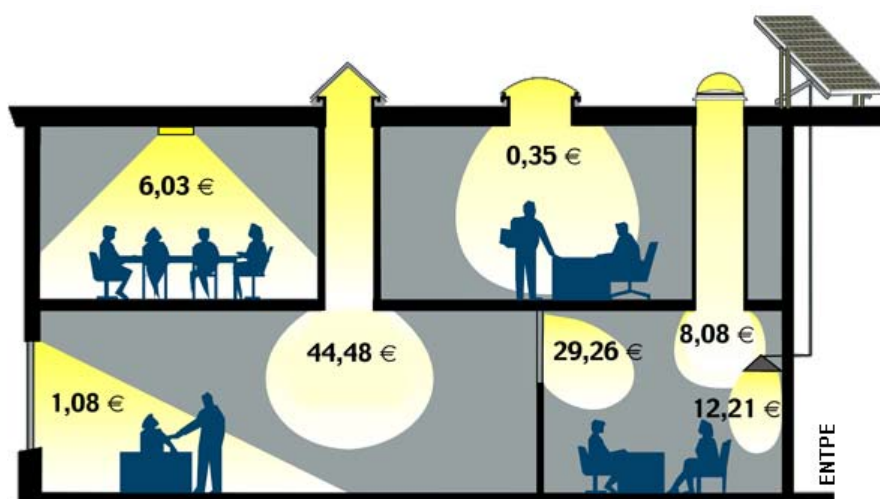
Aktualnie nie funkcjonuje norma oświetlenia dziennego. Jedyna polska norma, PN-71/B-02380 *Oświetlenie wewnątrz światłem dziennym. Warunki ogólne*, została wycofana bez zastąpienia w dniu 24.10.2005 r. Znajdowała się ona w obszarze działalności Komitetu Technicznego 179 ds. Ochrony Ciepłej Budynków w Polskim Komitecie Normalizacyjnym. Przedmiotem normy były warunki ogólne dotyczące wymagań, jakim powinno odpowiadać oświetlenie światłem dziennym wewnątrz budynków oraz zasady obliczeń i przyjęte standardowe wartości współczynników oświetlenia dziennego. Istotą standaryzacji współczynnika oświetlenia dziennego jest podstawowa zasada ergonomicznego i racjonalnego oświetlania wewnątrz – rosnącym stopniem trudności zadań wzrokowych we wnętrzu przyporządkowane są rosnące wartości współczynnika oświetlenia dziennego.

Maksymalny udział oświetlenia dziennego w budynku ma często decydujące znaczenie dla efektywności energetycznej oświetlenia. Nowa dyrektywa 2010/31/UE w sprawie charakterystyki energetycznej budynków mówi jednoznacznie, że przy obliczaniu tej charakterystyki powinno być uwzględniane światło naturalne (dienne). To stało się przesłanką do powołania europejskiej grupy roboczej w Europejskim Komitecie Normalizacyjnym CEN TC 169 WG 11 *Oświetlenieienne w budownictwie*, w celu opracowania standardu europejskiego. Grupa ta liczy 22 aktywnych członków z dziesięciu krajów europejskich: Austrii, Belgii, Danii, Francji, Holandii, Niemiec, Słowenii, Wielkiej Brytanii i Włoch. Pracuje pod kierunkiem Petera Raynham'a (Przewodniczący Stowarzyszenia Światło i Oświetlenie, Zjednoczone Królestwo). Podstawowe zagadnienia, które są uwzględniane w normie, to rola widoku na świat zewnętrzny, analiza dostępności i efektywności oświetlenia dziennego oraz jego wpływ na zdrowie człowieka [5, 6]. Rozważane są również związki między opracowywaną normą i normami związanymi PN/EN 12464-1 *Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach* oraz PN/EN 15193 *Charakterystyka energetyczna budynków. Wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia*. Aktualnie obserwujemy, że następuje intensywny i dynamiczny rozwój strategii i technologii efektywnego oświetlenia dziennego w budownictwie. Wysiłki te m.in. wynikają z konieczności ochrony klimatu na świecie. Jednym z wyrazów tego rozwoju są wspomniane wyżej prace nad europejską normą oświetlenia dziennego w budownictwie, które zostaną zakończone i przyjęte przez CEN w roku 2013. Instytut Elektrotechniki jako jedyny w Polsce



posiada bogate tradycje badań współczynnika oświetlenia dziennego, sięgające lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku. Laboratorium Oświetlenia Dziennego istniało na terenie Instytutu do roku 1978.

Aktualnie rozwiązania technologii oświetlenia dziennego są bardzo rozbudowane i zróżnicowane. Na rysunku 5 przedstawiono wybrane przykłady rozwiązań, które ukazują, że koszty oświetlenia świetlikowego dziennego (0,35 euro) i bocznego okiennego (1,08) odniesione do Mlmh/rok (megalumenogodziny na rok) są znacznie niższe od innych technologii [3].



Rys. 5. Koszty dostarczenia światła na płaszczyznę pracy za pomocą różnych technologii. Koszt ten obejmuje montaż urządzenia oraz koszty eksploatacji i konserwacji w okresie oczekiwanego życia budynku przeliczony na okres jednego roku

## 4. WNIOSKI

Przedstawione powyżej argumenty dowodzą, że odbudowa pierwszego w Polsce Laboratorium Oświetlenia Dziennego jest pilną koniecznością, aby oszczędzać energię elektryczną poprzez zwiększanie udziału światła dziennego w budownictwie, tworzyć środowisko prozdrowotne we wnętrzach, edukować i jak najszybciej dołączyć do innych krajów europejskich, gdzie stopień wykorzystania światła dziennego w budownictwie jest znacznie wyższy. Obecnie w wielu krajach dostępne są różne typy narzędzi projektowania oświetlenia dziennego, które dostarczają ilościowych i jakościowych informacji; oto one:

- narzędzia uproszczone, które są najbardziej odpowiednie we wczesnych etapach projektowania i są najlepiej przystosowane do podstawowych problemów projektowych;
- symulatory nieba;

- narzędzia oparte na technikach komputerowych;
- modele fizyczne domów, które są dobrze znane i stosowane przez architektów i innych profesjonalistów.

Doświadczenie i praktyka wskazują na to, że nie istnieją narzędzia, którymi można skutecznie zastąpić projektanta w procesie podejmowania decyzji przy projektowaniu oświetlenia dziennego w budynku.

## LITERATURA

1. Boyce P.R.J.: Human factors in lighting, Taylor & Francis, 2003.
2. Bouberaki M.: Daylighting, Architecture and Health, Building Design Strategies, Elsevier, 2008, 111-126.
3. Fontoynt M.: Long term assessment of the cost associated with lighting and daylighting techniques, 3<sup>th</sup> Velux Daylight Symposium in Rotterdam, 13-14 May 2009.
4. Raynham P.: European Daylight Standard, 4<sup>th</sup> Velux Daylight Symposium in Lausanne, 4-5 May 2011.
5. Turlej Z.: Prozdrowotne środowisko świetlne we wnętrzu, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, nr 4/2010, s. 541-548.
6. Turlej Z.: Problemy światła i oświetlenia w architekturze. IV Konferencja Naukowa ARCHBUD 2011, s. 375-380.
7. Turlej Z.: Strategie i technologie oświetlenia dziennego, XX Krajowa Konferencja Oświetleniowa Technika Świetlna 2011, s. 30-32.
8. Turlej Z.: Elements of the daily and artificial lighting in an interior. Prace Instytutu Elektrotechniki, nr 251/2011, s. 181-196.

*Rękopis dostarczono dnia 26.04.2012 r.*

## DESIGN TOOLS FOR THE DAYLIGHT IN BUILDINGS

Zbigniew TURLEJ

**ABSTRACT** *The daylight in buildings is a complex phenomenon, primary because of its volatility. Currently the design of lighting needs of the various design tools. The study is an attempt to describe some of this tools with particular emphasis on physical models of buildings and sky simulators. It also presents standards and economic issues.*

**Keywords:** *daylight in buildings, design tools, standards and economic issues*