

Politechnika Białostocka

Wydział Elektryczny

Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Światłnej

Materiały dydaktyczne do zajęć projektowych z przedmiotu

Podstawy techniki światłnej

Kierunek studiów: Elektrotechnika - studia dualne

Semestr: 1

Kod przedmiotu: E1ed1s007

Opracowała dr inż. Urszula J. Błaszczak

Białystok, 15.10.2025



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Spis treści

1. Wprowadzenie	4
1.1. Podstawowe parametry opraw oświetleniowych i źródeł światła	4
1.2. Ocena efektywności energetycznej oświetlenia elektrycznego	12
2. Metody obliczeniowe w projektowaniu oświetlenia	16
3. Przykłady obliczeń	20

Celem zajęć projektowych z przedmiotu Podstawy techniki świetlnej, prowadzonych w trakcie pierwszego semestru studiów pierwszego stopnia na kierunku Elektrotechnika studia dualne, jest utrwalenie przez studentów wiedzy przekazanej w trakcie zajęć wykładowych oraz nabycie umiejętności wykorzystania jej w praktyce. Treści ramowe zajęć projektowych obejmują:

1. Selekcję źródeł i opraw na podstawie ich charakterystyk fotometrycznych i kolorymetrycznych;
2. Prowadzenie obliczeń fotometrycznych i ich analizę;
3. Ocenę efektywności energetycznej rozwiązań oświetleniowych.

Zestaw danych do zadania projektowego obejmuje dane pomieszczenie (wymiary, współczynniki odbicia ścian, sufitu oraz podłogi) oraz jego przeznaczenie (rodzaj wykonywanej pracy wzrokowej). W ramach realizacji projektu, dla danego zadania projektowego należy:

1. Określić wymagania projektowe;
2. Z bazy opraw wybrać oprawy charakteryzujące się parametrami pozwalającymi zastosować je w danym zadaniu;
3. Przeprowadzić obliczenia i symulacje fotometryczne, na podstawie których wybrać 2 wersje projektu;
4. Dokonać oceny efektywności energetycznej obu wersji projektu;
5. Wskazać korzystniejsze rozwiązanie.

Korzystanie z poniższych materiałów wymaga znajomości podstawowych pojęć i definicji z zakresu techniki świetlnej, które są prezentowane w trakcie wykładu z przedmiotu Podstawy techniki świetlnej.

1. Wprowadzenie

Instalacje oświetleniowe podlegają normalizacji pod względem elektrycznym (wymogi techniczne dla instalacji elektrycznych) oraz świetlnym (wymogi techniczne dla oświetlenia). W ramach projektu uwzględniane są zagadnienia świetlne tzn. dotyczące wyłącznie kwestii jakości oświetlenia oraz jego efektywności energetycznej.

Projektowanie oświetlenia obejmuje następujące podstawowe etapy:

1. Zestawienie danych wyjściowych do projektu,
2. Ustalenie wymagań oświetleniowych,
3. Przyjęcie koncepcji oświetlenia i jej sprawdzenie,
4. Rozmieszczenie opraw oświetleniowych spełniające założenia,
5. Określenie systemu konserwacji oświetlenia.

W przypadku oświetlenia stanowisk pracy, wybór wymagań oświetleniowych zależy od tego jaki rodzaj pracy wzrokowej lub czynności wykonywany jest w danym pomieszczeniu. Niezbędne jest także zdefiniowanie powierzchni roboczych. Wymagania oświetleniowe można znaleźć w aktualnej normie PN-EN 12464-1 „Światło i oświetlenie - Oświetlenie miejsc pracy -- Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach”. Wymagania stawiane instalacjom oświetlenia awaryjnego i ewakuacyjnego oraz oświetlenia zewnętrznego zamieszczono w osobnych dokumentach normatywnych. Istotnym elementem zestawu wymagań projektowych jest poziom zużycia energii na potrzeby instalacji oświetlenia elektrycznego. Opis metodyki postępowania przy ocenie zużycia energii na potrzeby oświetlenia elektrycznego opisany jest w aktualnej normie PN-EN 15193.

1.1. Podstawowe parametry opraw oświetleniowych i źródeł światła

Opracowanie koncepcji oświetlenia polega na określeniu sposobu wprowadzenia światła do wnętrza czyli dokonaniu wyboru typu oprawy oświetleniowej wraz z określeniem parametrów źródła światła zainstalowanego w oprawie.

Rodzaj zastosowanego w oprawie źródła jest jednym z podstawowych wyborów dokonywanych na etapie projektowania. Wpływa to oczywiście na moc elektryczną pobieraną przez oprawę i decyduje o dostępnym strumieniu świetlnym, a zatem o strumieniu oprawy. Ze względu na wysoką skuteczność świetlną źródeł LED, współczesny rynek opraw oświetleniowych został zdominowany przez tą technologię, jednak nie zmienia to kwestii zróżnicowania parametrów dostępnych źródeł. Poza poborem

mocy i całkowitym strumieniem świetlnym, przy wyborze oprawy do danego zastosowania należy uwzględnić także inne parametry, które wynikają z cech źródła oraz budowy samej oprawy. Mowa tu o podstawowych parametrach kolorymetrycznych – temperaturze barwowej najbliższej (CCT) oraz wskaźniku oddawania barw (CRI lub Ra).

Temperatura barwowa najbliższa jest wskaźnikiem informującym o tym jak człowiek postrzega odcień światła białego. Wartości temperatury barwowej najbliższej są określane przez podobieństwo wyglądu odcienia światła białego do odcienia światła emitowanego przez źródła żarowe rozgrzane do różnych temperatur, stąd jednostką temperatury barwowej najbliższej jest kelwin. Światło białe może być o żółtym odcieniu, ciepłe (niskie wartości CCT, np. 2700 K, 3000 K), chłodniejsze, o niebieskim odcieniu (wysokie wartości CCT, np. 6000 K), lub neutralne w odbiorze (CCT = 4000 K).

Z kolei wskaźnik oddawania barw jest w zamierzeniu parametrem definiującym zdolność źródła światła do realistycznego odtwarzania barw obiektów w porównaniu do oświetlenia ich za pomocą źródła referencyjnego. Takimi źródłami są tzw. iluminanty CIE – w tym przypadku stosuje się iluminant A oraz D65. Wartość wskaźnika przyjmuje wartości z zakresu od 0 do 100, przy czym 100 oznacza najlepsze oddawanie barwy obiektów. Wartość wskaźnika oddawania barw jest jednym z podstawowych kryteriów oświetleniowych w oświetleniu miejsc pracy w pomieszczeniach.

Emisja strumienia świetlnego z opraw odbywa się w sposób wynikający z technologii wytwarzania światła i nie jest efektywna z punktu widzenia techniki oświetlania. Z tego powodu konieczne jest przestrzenne uformowanie światła ze źródła. Do tego celu służą oprawy oświetleniowe. Istnieje szereg typów opraw oświetleniowych, a ich systematyka obejmuje kilka zagadnień.

Głównym zadaniem oprawy oświetleniowej jest oświetlenie obszaru pracy wzrokowej i jego otoczenia. Podstawowym kryterium podziału opraw są ich właściwości fotometryczne. Dla dowolnej oprawy oświetleniowej o strumieniu całkowitym Φ_o , kryterium podziału jest proporcja pomiędzy strumieniem świetlnym wysyłanym przez oprawę w górną (Φ_g) i dolną (Φ_d) półprzestrzeń. Na tej podstawie definiuje się klasy opraw:

1. I - oświetlenia bezpośredniego - Φ_d stanowi co najmniej 90% całego strumienia;
2. II - oświetlenia przeważnie bezpośredniego - $60\% < \Phi_d < 90\%$;
3. III - oświetlenia mieszanego - $(40\% < \Phi_d < 60\%)$;
4. IV - oświetlenia przeważnie pośredniego - $(10\% < \Phi_d < 40\%)$;

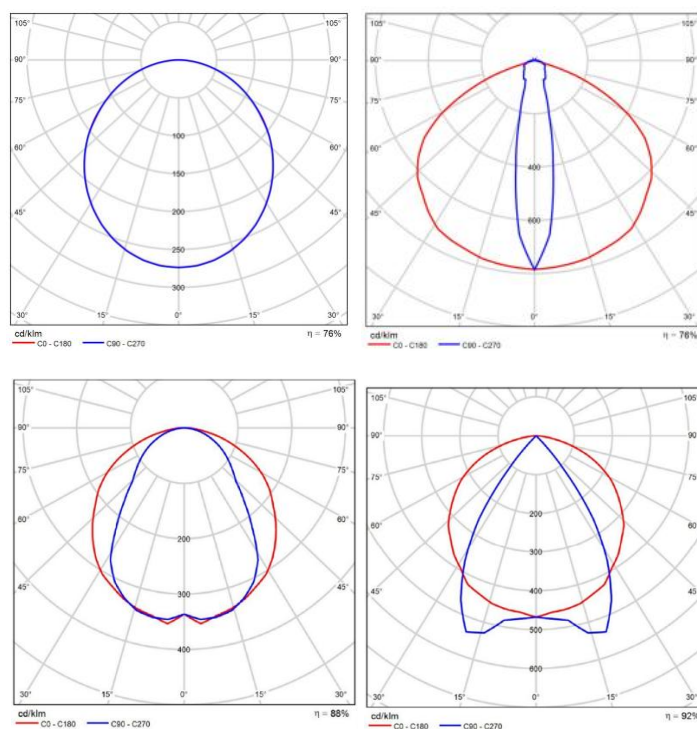
5. V - oświetlenia pośredniego - Φ_d stanowi nie więcej niż 10% całego strumienia świetlnego.

O wielkości strumienia świetlnego wysyłanego przez oprawę Φ_o decyduje ilość strumienia Φ_{zr} wysyłanego przez wszystkie źródła zainstalowane w oprawie oraz jej sprawność. Sprawność oprawy oblicza się z zależności (1):

$$\eta = \frac{\Phi_o}{\Phi_{zr}} [\%] \quad (1)$$

Ograniczona sprawność opraw jest skutkiem strat promieniowania optycznego. Straty te wynikają z właściwości materiałów zastosowanych do budowy oprawy oraz geometrii oprawy oświetleniowej (elementy konstrukcyjne oprawy np. soczewki, odbłyśniki, elementy ekranujące). W rezultacie pewna część światła wytwarzanego przez źródła zainstalowane wewnątrz oprawy nie dociera do obszaru docelowego.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe krzywe rozsyłu światłości dostępnych handlowo opraw. Wszystkie przedstawione na rysunku 1 oprawy są oprawami w klasie I czyli oprawami oświetlenia bezpośredniego.

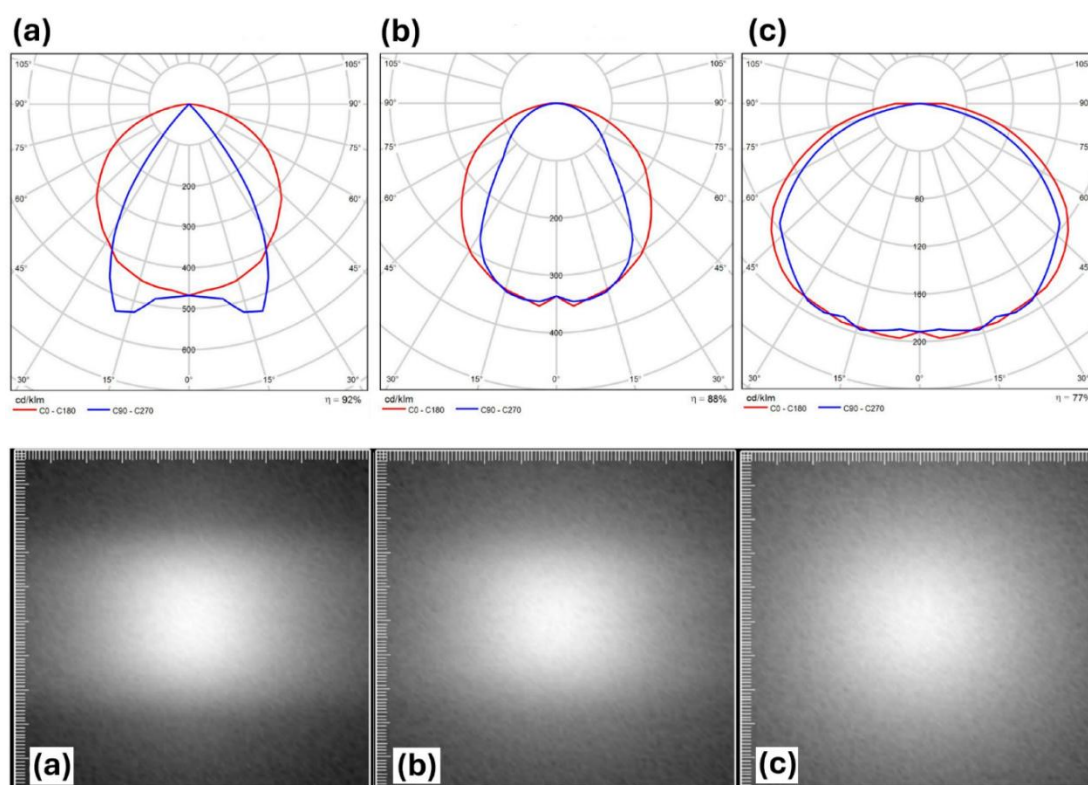


Rys. 1. Przykładowe krzywe rozsyłu światłości opraw oświetleniowych

Oprawy, których krzywe rozsyłu światłości umieszczono w górnym rzędzie, charakteryzują się taką samą sprawnością wynoszącą 76% (wartość podana w prawym dolnym rogu wykresów), mimo że oprawy różnią się zasadniczo co do sposobu rozsyłu. Oprawa, której krzywe rozsyłu widoczne są po lewej stronie,

charakteryzuje się obrotowo-symetrycznym rozsyłem typu Lambertowskiego. Z kolei oprawa po prawej stronie ma diametralnie różny sposób rozsyłu w dwóch przedstawionych przekrojach – w jednym (płaszczyzna C0-180 – krzywa czerwona) rozsył jest zbliżony do Lambertowskiego, zaś w drugim (płaszczyzna C90-270 – krzywa niebieska) jest bardzo wąski, kierunkowy. Tak różne kształty krzywych rozsyłu świadczą o tym, że w budowie opraw wykorzystano inne elementy optyczne – w pierwszym przypadku jest to element rozpraszający światło (zastosowano formę dyfuzora), zaś w drugim inny element formujący wiązkę światła, np. odbłyśnik. Mimo takiego zróżnicowania technicznego oprawy mają identyczną sprawność. Oprawy, których krzywe rozsyłu przedstawiono na rysunku 1 w dolnym rzędzie, mają zbliżone kształty krzywych rozsyłu, jednak różnią się sprawnością – w oprawie, której krzywe rozsyłu umieszczono po prawej stronie, osiągnięto najwyższą spośród przedstawionych sprawność wynoszącą 92%.

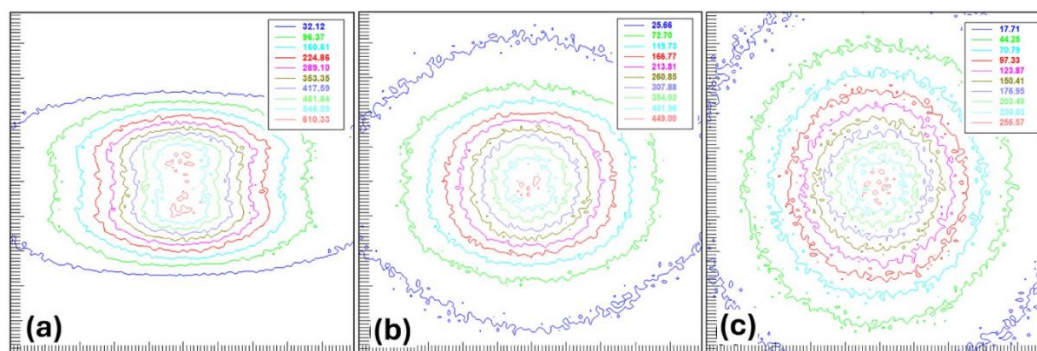
Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe krzywe rozsyłu światłości i widok plam świetlnych, jakie wytwarzają oprawy o danym rozsyśle. Pozwala to lepiej zrozumieć jak należy interpretować kształt krzywych rozsyłu światłości.



Rys.2. Przykładowe krzywe rozsyłu światłości (góra) oraz kształt plamy świetlnej wytworzonej na powierzchni oświetlonej oprawą o takim rozsyśle światłości. (źródło: <https://doi.org/10.3390/buildings15111779>)

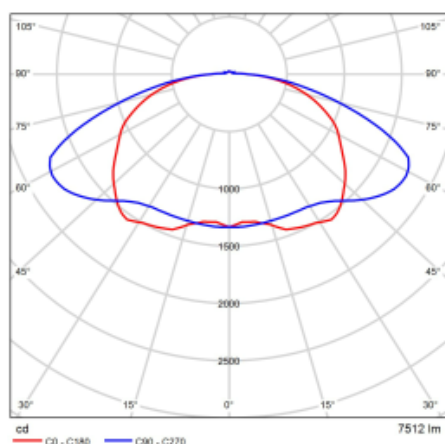
Z przedstawionych grafik wynika, że kształt rozsyłu zbliżony do Lambertowskiego (krzywe czerwone dla opraw a i b oraz obie krzywe dla oprawy c) oznacza, że na powierzchni oświetlanej pod oprawą uzyska się najwyższe natężenie oświetlenia. Będzie się ono sukcesywnie zmniejszać im dalej od punktu znajdującego się pod środkiem oprawy. Modyfikacja kształtu krzywej rozsyłu światłości polegająca na jej wydłużeniu dla większych kątów (np. krzywa niebieska dla oprawy a) pozwala osiągnąć wyższą równomierność natężenia oświetlenia na oświetlanym obszarze i ograniczyć wielkość tego obszaru tylko do wymaganego obszaru.

Na rysunku 3 pokazano krzywe izoluksów odpowiadające plamom świetlnym z rysunku 2. Taki sposób prezentacji oświetlenia powierzchni jest dużo bardziej czytelny, niż obrazy plamy świetlnej. Linie widoczne na tego typu wykresach powstają poprzez połączenie punktów, w których oprawa wytwarza taką samą wartość natężenia oświetlenia. Krzywe mogą być przedstawiane tak jak w tym przypadku z zastosowaniem skali fałszywych kolorów.



Rys. 3 Krzywe izoluksów dla opraw z rysunku 2 (źródło: <https://doi.org/10.3390/buildings15111779>)

Dodatkowego wyjaśnienia wymaga sposób obliczania rzeczywistej światłości kierunkowej oprawy na podstawie krzywych rozsyłu światłości pokazanych w danych katalogowych opraw. Na rysunku 4 przedstawiono krzywe rozsyłu przykładowej oprawy. By określić jaką rzeczywistą światłością kierunkową charakteryzuje się dana oprawa w dowolnym wybranym kierunku, należy sprawdzić jaki jest strumień świetlny tej oprawy. W tym przypadku producent podał wielkość strumienia w prawym dolnym rogu, zatem odczytane z wykresu wartości światłości kierunkowej będą rzeczywistymi jej wartościami. I tak w kierunku 0° (normalnym) światłość kierunkowa oprawy ma wartości 1300 kandeli, natomiast w kierunku – przykładowo - 45° , wartość ta będzie wynosić 1300 kandeli w przekroju C0-180 (krzywa czerwona) oraz 1700 kandeli w przekroju C90-270 (krzywa niebieska).



Rys. 4. Krzywe rozsyłu światłości oprawy wraz z podaną wartością całkowitego strumienia świetlnego oprawy (prawy dolny róg).

Często jednak jedna krzywa rozsyłu światłości odnosi się do całej rodziny opraw o różnych mocach i strumieniach świetlnych. W takiej sytuacji wykresy przedstawiające krzywe rozsyłu światłości są unormowane do 1000 lumenów strumienia świetlnego, a informacja o tym fakcie jest zamieszczona na wykresie poprzez dodanie symbolu $\text{cd}/1000$. Załóżmy, że z taką właśnie sytuacją mamy do czynienia na rysunku 4, a rzeczywisty strumień 2 modeli oprawy wynosi odpowiednio 3000 i 6000 lumenów. W takim przypadku oznacza to, że chcąc wyznaczyć światłość oprawy w kierunku normalnym należy odczytaną z wykresu wartość 1300 kandel na 1000 lumenów przemnożyć przez 3 lub 6 (3000 lub 6000 lumenów dzielone przez 1000), co da światłość w kierunku normalnym wynoszącą odpowiednio 3900 oraz 7800 kandel. Analogicznie, w celu wyznaczenia wartości światłości oprawy w obu przekrojach w kierunku 45° , odczytujemy wartości dla obu krzywych – wynoszą one 1300 kandel na 1000 lumenów dla krzywej czerwonej (przekrój C0-180) oraz 1700 kandel na 1000 lumenów dla krzywej niebieskiej (przekrój C90-270). W celu obliczenia światłości kierunkowych pod kątem 45° w obu przekrojach bryły fotometrycznej, należy przemnożyć obie wartości przez te same wartości, co wcześniej (3 i 6), co dałoby rzeczywiste wartości światłości w kierunkach 45° opraw wynoszące odpowiednio 3900 i 7800 kandel w przekroju C0-180 oraz 5100 i 10200 kandel w przekroju C90-270.

Z kształtu krzywych rozsyłu nie można wywnioskować o innych cechach opraw, np. jaki typ źródła jest zainstalowany w oprawie oraz do jakich warunków pracy są dedykowane oprawy. Te i szereg innych informacji powinno być zawarte w karcie katalogowej oprawy. Mogą one obejmować szczególne wymagania co do temperatury otoczenia, pozycji pracy, wilgotność czy poziomu zapylenia, a także odporności mechanicznej na uderzenia.

Dopuszczalną wilgotność otoczenia, w jakim może pracować urządzenie elektryczne, a zatem także oprawa oświetleniowa, podawane są za pomocą parametru IP (Ingress Protection Rating) informującego o poziomie zabezpieczenia użytkownika przed dostępem do niebezpiecznych części urządzenia oraz samego urządzenia przed wnikaniem do niego czynników zewnętrznych. Jest to zatem wskaźnik o znacznie szerszym zastosowaniu służący do oceny szczelności obudowy urządzeń elektrycznych, stąd jego powszechna nazwa. Klasa szczelności IP oznacza stopień ochrony obudowy urządzenia przed czynnikami zewnętrznymi. Zgodnie z normą IEC 60 529 (PN-EN 60 529) zapisywany jest w postaci szeregu znaków IP XX, gdzie:

1. pierwsza cyfra informuje o zabezpieczeniu przed dostępem do części niezabezpieczonych oraz odporność na przenikanie do wnętrza obudowy ciał stałych o różnej wielkości, np. pyłów;
2. druga cyfra informuje o stopniu przenikania wodny do wnętrza urządzenia.

Wyjaśnienia poszczególnych cyfr, które mogą wystąpić w pierwszym i drugim polu symbolu stopnia ochrony zestawiono w tabeli 1. W przypadku braku wymagań określający podanie stopnia ochrony, dla czynników pierwszej lub drugiej cyfry charakterystycznej, do zapisu stosuje się „X” np. IP 6X – oznacza urządzenie lub produkt pyłoodporny niewymagający podawania cech określających odporność na wodę.

Tabela 1. Wyjaśnienie znakowania klasy szczelności IP

Pierwsza cyfra	znaczenie	Druga cyfra	znaczenie
0	Zerowy stopień ochrony (IP 0X) – brak ochrony osób przed dotykiem niebezpiecznych elementów urządzenia, jak również brak ochrony urządzenia przed przedostaniem się ciała stałego– oznaczenie stosowane dla urządzeń bez obudowy.	0	Zerowa klasa szczelności (IP X0) – brak ochrony przed wodą, producent nie gwarantuje, że urządzenie będzie funkcjonowało po przedostaniu się wody do jego wnętrza.
1	Pierwszy stopień ochrony (IP 1X) – odporność przed ciałami obcymi o średnicy większej niż 50mm, stopień informujący również o ochronie ludzi przed dotykiem elementów powierzchnią częścią dłoni.	1	Pierwsza klasa szczelności (IP X1) – to odporność na pionowo kapiącą wodę, która nie ma wpływu na dalszą funkcjonalność urządzenia.
2	Drugi stopień ochrony (IP 2X) – odporność przed ciałami stałymi o średnicy większej niż 12,5mm, ochrona osób dotykających palcem niebezpiecznych części urządzenia. Zgodnie z hierarchią drugi stopień klasy szczelności IP obejmuje również pozycje wymienione w klasie poprzedzającej, a więc stanowi dodatkową ochronę również dla wierzchniej części dłoni.	2	Druga klasa szczelności oznacza (IP X2) – bezpieczeństwo przed pionowo spadającymi kroplami na obudowę elementów wychyloną o kąt nie większy niż 15°.
3	Trzeci stopień ochrony (IP 3X) – obejmuje odporność na ciała stałe o średnicy większej bądź równej 2,5mm, ale również stanowi ochronę dla człowieka, który do dotknięcia urządzenia wykorzystuje narzędzie.	3	Trzecia klasa szczelności (IP X3) – wykorzystywana jest do oznaczenia urządzeń odpornych na natrysk wodny pod kątem nie większym niż 60°.

4	Czwarty stopień ochrony (IP 4X) – to klasa szczelności przed ciałami stałymi o średnicy do 1mm. Oznacza ochronę osoby dotykającej urządzenie niebezpieczne materiałem przewodzącym.	4	Czwarta klasa szczelności (IP X3) oznacza odporność na natrysk pod dowolnym kątem padającym na obudowę.
5	Piąty stopień szczelności (IP 5X) – dotyczy częściowej ochrony przed pyłem. Oznacza też, bezpieczeństwo dla użytkownika posługującego się materiałem przewodzącym.	5	Piąta klasa szczelności (IP X5) to ochrona przed strumieniem wody (struga) padającym z dowolnego kierunku pod dowolny kąt.
6	Szesty stopień szczelności (IP 6X) – jest najwyższym oznaczeniem klasy szczelności. Stanowiąc pełną ochronę przed przedostaniem się pyłów do wnętrza urządzenia i jego elementów. Stopień oznacza pełne bezpieczeństwo dla ludzi i części ciała najczęściej wykorzystywanych do posługiwania się urządzeniem.	6	Szosta klasa szczelności oznacza (IP X6) – odporność na silną strugę wody.
		7	Siódma klasa szczelności (IP X7) oznacza zabezpieczenie urządzenie przed skutkami krótkotrwałego, kilkuminutowego zanurzenia na głębokości nie większej niż jeden metr.
		8	Ósma klasa szczelności (IP X8) dotyczy długotrwałego zanurzenia urządzenia lub jego elementów w cieczy, bez powodowania szkód widocznych podczas użytkowania.
		9	Dziewiąta klasa szczelności (IP X9) przeznaczona jest dla urządzeń odpornych na strumień wody o wysokim ciśnieniu.

Tabela 2. Wyjaśnienie znakowania klasy odporności mechanicznej IK

symbol	znaczenie
IK00	Brak ochrony
IK01	Ochrona przed uderzeniem 0,14J (odpowiada to uderzeniu masy 0,25kg zrzuconej z wysokości 56mm).
IK02	Ochrona przed uderzeniem 0,2J (odpowiada uderzeniu masy 0,25kg upuszczonej z wysokości 80mm).
IK03	Ochrona przed uderzeniem 0,35J (odpowiada uderzeniu masy 0,25kg upuszczonej z wysokości 140mm).
IK04	Ochrona przed uderzeniem o wartości 0,5J (odpowiada uderzeniu masy 0,25kg zrzuconej z wysokości 200mm).
IK05	Ochrona przed uderzeniem 0,7J (odpowiednik uderzenia masy 0,25 kg zrzuconej z wysokości 280 mm).
IK06	Ochrona przed uderzeniem 1J (odpowiednik uderzenia masy 0,25kg zrzuconej z wysokości 400mm).
IK07	Ochrona przed uderzeniem o wartości 2J (odpowiednik uderzenia 0,5kg masy zrzuconej z wysokości 400mm).
IK08	Ochrona przed uderzeniem 5J (odpowiednik uderzenia 1,7kg masy zrzuconej z wysokości 300mm).
IK09	Ochrona przed uderzeniem 10J (odpowiednik uderzenia 5 kg masy zrzuconej z wysokości 200mm).
IK10	Ochrona przed uderzeniem 20J (odpowiednik uderzenia 5 kg masy zrzuconej z wysokości 400mm).

1.2. Ocena efektywności energetycznej oświetlenia elektrycznego

Efektywność energetyczna to kluczowy aspekt w projektowaniu oświetlenia. Oświetlenie powinno być zaprojektowane tak, aby spełniało wymagania dla danego zadania lub przestrzeni w sposób jak najbardziej efektywny energetycznie. Przy tym aspekt energetyczny nie może wykluczać aspektu oświetleniowego tzn. instalacja oświetleniowa powinna na każdym etapie eksploatacji zapewniać spełnienie wymagań oświetleniowych.

Metody oceny efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych omówione są w normie PN-EN 15193, która dotyczy zarządzania zużyciem energii na potrzeby oświetlenia elektrycznego w budynkach. W normie opisane są trzy metody oceny efektywności energetycznej instalacji oświetlenia elektrycznego: kompleksowa, uproszczona oraz pomiarowa. Ostatnia z metod jest nieprzydatna na etapie projektowania instalacji oświetleniowej.

Obliczenie zużycia energii na oświetlenie w metodzie obliczeniowej odbywa się uwzględniając zarówno energię potrzebną do oświetlania, jak i energię zużywaną w trybie gotowości. Korzystając z tych metod niezbędna jest znajomość danych opraw oświetleniowych zastosowanych w projekcie oraz danych systemu, które oblicza się dla każdego obszaru strefy bądź budynku, określając zainstalowaną moc oświetlenia (P_n), moc w trybie awaryjnym (P_{em}) oraz moc w trybie gotowości (P_{pc}). Dodatkowo, na podstawie specyfikacji projektu określa się wartości współczynników zależności, takich jak: współczynnik obecności (F_O), współczynnik światła dziennego (F_D) oraz stały współczynnik luminancji (F_C). Wartości poszczególnych współczynników określa się na podstawie zależności przedstawionych w normie. Współczynniki te uwzględniają różne czynniki, takie jak światło dzienne, obecność użytkowników czy warunki konserwacyjne systemu oświetleniowego. Z kolei wartości poszczególnych mocy oblicza się ze wzorów przedstawionych poniżej, które biorą pod uwagę specyficzne parametry systemu oświetleniowego oraz dane techniczne dostarczone przez producenta.

Metodę kompleksową wykorzystuje się zarówno dla nowych, jak i modernizowanych instalacji oświetleniowych. W metodzie tej oblicza się wskaźnik LENI (ang. Lighting Energy Numerical Indicator) wyrażony w kilowatogodzinach (kWh) dla określonego kroku czasowego (godzinowego, miesięcznego lub rocznego) w odniesieniu do oświetlenia powierzchni użytkowej.

Do określenia wskaźnika LENI należy uwzględnić informacje o instalacji oświetleniowej, takie jak liczba oraz typ opraw, zastosowane techniki sterowania, a także współczynniki definiujące sposób eksploatacji systemu. Obliczenia wg tej metody pozwalają na ocenę efektywności energetycznej systemu oświetleniowego w odniesieniu do powierzchni użytkowej budynku.

Wskaźnik LENI wyznacza się ze wzoru:

$$LENI = W/A [kWh/m^2 \times rok] \quad (2)$$

gdzie:

W – całkowita roczna energia na oświetlenie elektryczne;

A – całkowita powierzchnia użytkowa budynku.

Całkowitą roczną energię na oświetlenie elektryczne w budynku oblicza się ze wzoru:

$$W = \sum (8760/t_s \times W_t) [kWh/t_s] \quad (3)$$

gdzie:

t_s – krok czasu;

W_t – całkowita energia na krok czasu.

Całkowita energia na krok czasu uwzględniając zarówno energię potrzebną do oświetlania, jak i energię zużywaną w trybie gotowości i określona jest wzorem:

$$W_t = W_{L,t} + W_{P,t} [kWh/t_s] \quad (4)$$

gdzie:

$W_{L,t}$ – całkowita energia na oświetlenie;

$W_{P,t}$ – całkowita energia w trybie gotowości.

Wartości poszczególnych składowych całkowitej energii dla danej strefy budynku oblicza się na podstawie poniższych wzorów:

$$W_{L,t} = \sum \frac{\{(P_n \times F_C) \times F_O [(t_D \times F_D) + t_N]\}}{1000} [kWh/t_s] \quad (5)$$

gdzie:

$W_{L,t}$ – całkowita energia na oświetlenie;

P_n – całkowita zainstalowana moc opraw oświetleniowych;

F_C – stały współczynnik oświetlenia;

F_O – współczynnik zależności od obecności;

t_D – czas dostępu do światła dziennego;

F_D – współczynnik zależności od światła dziennego;

t_N – czas braku dostępu do światła dziennego;

t_s – krok czasu.

$$W_{P,t} = \sum \frac{\{(P_{pc} \times t_s) + (P_{em} \times t_e)\}}{1000} [kWh/t_s] \quad (6)$$

gdzie:

$W_{P,t}$ – całkowita energia w trybie gotowości;

P_{pc} – całkowita moc w trybie gotowości;

t_s – krok czasu;

P_{em} – całkowita zainstalowana moc ładowania akumulatorów w oprawach awaryjnych;

t_e – czas ładowania baterii.

Moce występujące w zależności wylicza się z następujących wzorów:

- całkowita moc zainstalowana:

$$P_n = \sum_{i=1}^{i=n} P_i [W] \quad (7)$$

gdzie: P_i – moc pojedynczej oprawy oświetleniowej; n – liczba zastosowanych opraw oświetleniowych.

- całkowita zainstalowana moc ładowania akumulatorów w oprawach awaryjnych:

$$P_{em} = \sum_{i=1}^{i=n} P_{ei} [W]; \quad (8)$$

gdzie: P_{ei} – moc ładowania dla każdej oprawy; n – liczba zastosowanych opraw.

- całkowita moc w trybie gotowości:

$$P_{pc} = \sum_{i=1}^{i=n} P_{ci} [W]; \quad (9)$$

gdzie:

P_{ci} – moc w trybie gotowości dla każdej z opraw;

n – liczba pojedynczych opraw w projekcie systemu.

Metoda uproszczona wykorzystuje wstępne oszacowanie zapotrzebowania na energię na potrzeby instalacji oświetleniowej. Metoda uwzględnia przybliżone wartości, takie jak oczekiwana gęstość mocy zainstalowanej oraz współczynniki zależności od światła dziennego, obecności oraz stałego natężenia oświetlenia. Stanowi ona uproszczenie metody kompleksowej.

Rozporządzenie MI z 06.11.2008 roku w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku wskazuje w paragrafie 180a, że w budynku użyteczności publicznej, wartość mocy jednostkowej oświetlenia nie może przekraczać określonych wielkości dopuszczalnych zależnie od przyjętych kryteriów (patrz tabela 3).

Typ budynku	Maksymalna wartość mocy jednostkowej [W/m ²]		
	Klasa kryteriów ^{*)}		
	A	B	C
Biura	15	20	25
Szkoły	15	20	25
Szpitala	15	25	35
Restauracje	10	25	35
Sportowo-rekreacyjne	10	20	30
Handlowo-usługowe	15	25	35
^{*)} Ustala się następujące klasy kryteriów: A - spełnianie kryteriów oświetlenia w stopniu podstawowym B - spełnianie kryteriów oświetlenia w stopniu rozszerzonym C - spełnienie kryteriów oświetlenia w stopniu pełnym z uwzględnieniem komunikacji wizualnej.			

2. Metody obliczeniowe w projektowaniu oświetlenia

Współcześnie do projektowania oświetlenia wykorzystuje się dedykowane oprogramowanie. Techniki komputerowe są stale rozwijane, podejmowane są próby wykorzystania do tego celu sztucznej inteligencji. Niezależnie od tego jakie oprogramowanie jest stosowane, zwykle bazuje ono na wykonywaniu obliczeń w pomieszczeniu punkt po punkcie dla danego układu wybranych opraw. Jest to metoda najdokładniejsza, wymagająca wielu operacji. Mimo to jest możliwa do zrealizowania także bez zastosowania narzędzi informatycznych. Znane są jednak inne, uproszczone metody obliczania oświetlenia.

Metoda mocy jednostkowej jest metodą stosowaną do obliczania rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniach ogólnych o znacznej powierzchni, gdy oprawy są rozłożone równomiernie. Polega ona na określeniu mocy opraw oświetlenia ogólnego na podstawie wartości mocy jednostkowej wyrażonej w Watach na jednostkę powierzchni (m^2) pomieszczenia dla danego natężenia oświetlenia danym typem oprawy. W metodzie tej korzysta się z tabel przeliczeniowych. Podobnie jest z metodą strumienia jednostkowego, która jest stosowana na etapie założeń techniczno-ekonomicznych. Na podstawie strumienia przypadającego na $1m^2$ powierzchni oraz wielkości tej powierzchni, metoda pozwala określić łączny strumień potrzebny do uzyskania średniego natężenia oświetlenia $E_{sr}=100$ lx. W przypadku, gdy natężenie oświetlenia pomieszczenia jest różne od 100 lx, to proporcjonalnie zmienia się wartość strumienia jednostkowego przypadającego na m^2 powierzchni i wylicza wymaganą liczbę opraw.

Metodą przydatną na etapie koncepcyjnym jest metoda sprawności. Nazwa metody pochodzi od sprawności oświetlenia pomieszczenia, które zależy od rodzaju (klasy) zastosowanych opraw oświetleniowych, wymiarów pomieszczenia i wysokości zawieszenia opraw nad powierzchnią roboczą, a także współczynników odbicia ścian, sufitu i podłogi. Pozwala ona obliczyć całkowity strumień świetlny, jaki powinny wytworzyć źródła światła (oprawy) w celu osiągnięcia wymaganego natężenia oświetlenia, przy czym stosuje się ją do pomieszczeń jasnych tzn. charakteryzujących się wysokimi wartościami współczynników odbicia powierzchni. Na podstawie wymaganego natężenia oświetlenia oraz parametrów pomieszczenia, z tablic w katalogach opraw odczytuje się wartość sprawności oświetlenia, a następnie oblicza wymaganą liczbę źródeł światła. Podstawą tej metody jest przyjęcie, że tylko część strumienia Φ_o wytworzonego przez wszystkie oprawy efektywnie trafi na oświetlaną powierzchnię – część tą nazywa się strumieniem użytecznym Φ_u i wyznacza się go z zależności:

$$\Phi_u = \Phi_o \cdot \eta_{os} \quad (10)$$

gdzie η_{os} oznacza sprawność oświetlenia.

Strumień użyteczny wylicza się z zależności:

$$\Phi_u = E_{sr} \cdot S \quad (11)$$

Gdzie E_{sr} jest wartością średniego eksploatacyjnego natężenia oświetlenia (w luksach) wynikającą z wymagań oświetleniowych dla danego pomieszczenia; S – pole powierzchni oświetlanej.

Całkowity strumień świetlny Φ_o , jaki powinny wytworzyć oprawy, można obliczyć ze wzoru:

$$\Phi_o = \frac{E_{sr} \cdot S \cdot K}{\eta_{os}} \quad (12)$$

gdzie K jest współczynnikiem zapasu wynikający ze zmian warunków pracy opraw (starzenie źródeł, osadzanie kurzu na oprawach i w pomieszczeniu itp.) i jest związany z harmonogramem konserwacji instalacji, dlatego nazywany też jest współczynnikiem konserwacji MF (ang. maintenance factor).

Występująca w zależnościach sprawność oświetlenia pomieszczenia, zależy od rodzaju opraw oświetleniowych, wymiarów pomieszczenia i wysokości opraw i płaszczyzny roboczej. Do wyznaczenia sprawności pomieszczenia niezbędna jest znajomość wskaźnika pomieszczenia w , którego wartość wyznacza się z zależności:

$$w = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} \quad (13)$$

gdzie a , b i h to odpowiednio długość, szerokość i wysokość zwieszenia lampy nad powierzchnią roboczą.

Znając powyższe dane, odczytuje się wartość sprawności oświetlenia i współczynnika rezerwy z tabel na podstawie zadeklarowanej klasy oświetlenia, wybranego typu oprawy, współczynników odbicia sufitu i ścian oraz wartości sprawności oprawy η_{tab} maksymalnie zbliżonej do rzeczywistej η_r (według danych producenta). Na tej podstawie oblicza się wymaganą liczbę opraw:

$$n = \frac{\Phi_o}{\Phi_n} = \frac{E_{sr} \cdot S \cdot K}{\Phi_{op} \cdot \eta_{os}} \cdot \frac{\eta_{tab}}{\eta_r} \quad (14)$$

W tabeli poniżej (fragment) znajdują się dane niezbędne do przeprowadzenia obliczeń metodą sprawności (kompletne dane dostępne w podręczniku J. Bąk „Obliczanie oświetlenia ogólnego wnętrz” lub „Uproszczone obliczanie oświetlenia ogólnego wnętrz” tego samego autorstwa).

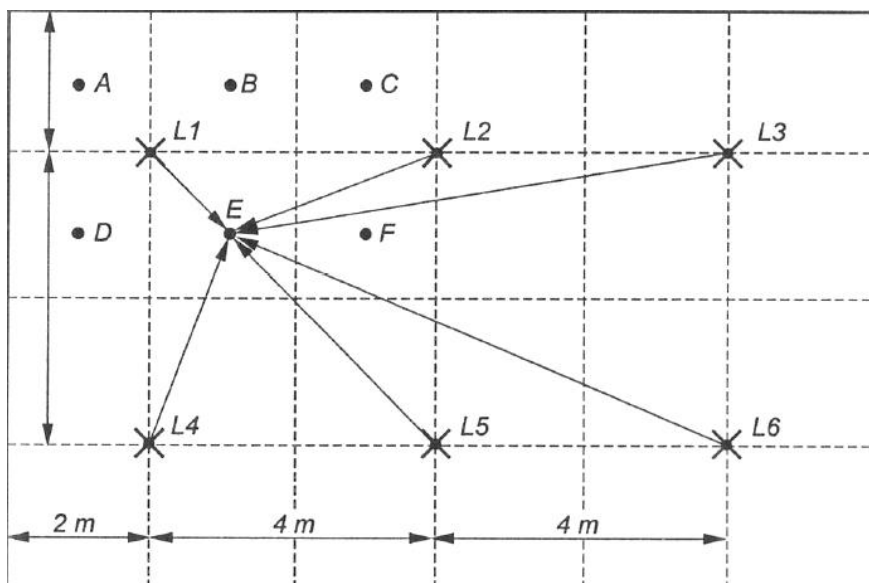
Klasa oświetlenia	Strumień góra/dół	Sprawność oprawy η_{opr}	Wskaźnik pomieszczenia w	Współczynnik sprawności oświetlenia przy współczynniku odbicia sufitu ρ_{suf} i współczynniku odbicia ścian $\rho_{śc}$									Współczynnik rezerwy K
				$\rho_{suf} = 0,7$			$\rho_{suf} = 0,5$			$\rho_{suf} = 0,3$			
—	1 m/lm	—	—	$\rho_{śc} = 0,5$	$\rho_{śc} = 0,3$	$\rho_{śc} = 0,1$	$\rho_{śc} = 0,5$	$\rho_{śc} = 0,3$	$\rho_{śc} = 0,1$	$\rho_{śc} = 0,5$	$\rho_{śc} = 0,3$	$\rho_{śc} = 0,1$	
I	0/75	0,75	1,0	0,275	0,225	0,185	0,270	0,220	0,185	0,265	0,220	0,185	1,3
			1,2	0,310	0,265	0,225	0,350	0,260	0,225	0,300	0,260	0,225	1,3
			1,5	0,365	0,315	0,275	0,355	0,305	0,275	0,345	0,305	0,275	1,3
			2,0	0,435	0,385	0,345	0,420	0,375	0,340	0,415	0,375	0,340	1,3
			2,5	0,485	0,435	0,400	0,475	0,430	0,395	0,470	0,425	0,395	1,25
			3	0,520	0,475	0,440	0,505	0,470	0,440	0,500	0,465	0,440	1,25
			4	0,575	0,535	0,505	0,565	0,535	0,505	0,560	0,530	0,505	1,25
			5	0,610	0,580	0,550	0,605	0,575	0,550	0,595	0,570	0,550	1,25
			6	0,635	0,610	0,585	0,630	0,605	0,585	0,620	0,600	0,585	1,25
			8	0,670	0,650	0,630	0,665	0,645	0,630	0,660	0,645	0,630	1,25
10	0,695	0,680	0,665	0,690	0,675	0,665	0,685	0,675	0,665	1,25			
III	39/41	0,8	1,0	0,215	0,165	0,125	0,185	0,140	0,110	0,155	0,115	0,090	1,61
			1,2	0,250	0,195	0,155	0,215	0,165	0,135	0,180	0,140	0,115	1,56
			1,5	0,300	0,240	0,200	0,255	0,205	0,175	0,215	0,175	0,145	1,56
			2,0	0,360	0,300	0,255	0,300	0,255	0,220	0,250	0,215	0,185	1,49
			2	0,395	0,345	0,295	0,335	0,290	0,255	0,280	0,240	0,210	1,49
			3	0,430	0,375	0,330	0,365	0,320	0,285	0,305	0,265	0,240	1,49
			4	0,480	0,430	0,390	0,410	0,370	0,335	0,340	0,310	0,280	1,49
			5	0,510	0,470	0,430	0,440	0,400	0,370	0,370	0,340	0,315	1,45
			6	0,535	0,495	0,460	0,460	0,425	0,395	0,385	0,360	0,335	1,45
			8	0,565	0,535	0,505	0,490	0,460	0,440	0,415	0,395	0,375	1,45
10	0,590	0,560	0,535	0,510	0,485	0,465	0,435	0,415	0,395	1,45			
V	80/0	0,8	1,0	0,190	0,150	0,125	0,135	0,105	0,088	0,078	0,063	0,052	1,61
			1,2	0,230	0,185	0,155	0,150	0,125	0,110	0,093	0,075	0,064	1,61
			1,5	0,270	0,225	0,195	0,180	0,155	0,135	0,110	0,093	0,080	1,61
			2,0	0,315	0,275	0,245	0,220	0,195	0,175	0,130	0,115	0,105	1,61
			2,5	0,350	0,315	0,285	0,250	0,225	0,205	0,145	0,130	0,120	1,61
			3	0,380	0,345	0,320	0,270	0,245	0,225	0,160	0,145	0,135	1,61
			4	0,420	0,390	0,365	0,295	0,275	0,260	0,175	0,165	0,155	1,61
			5	0,450	0,425	0,400	0,315	0,300	0,285	0,185	0,180	0,170	1,61
			6	0,460	0,440	0,420	0,325	0,310	0,300	0,195	0,185	0,180	1,56
			8	0,485	0,465	0,450	0,340	0,330	0,320	0,205	0,195	0,190	1,56
10	0,500	0,485	0,470	0,355	0,345	0,335	0,210	0,205	0,200	1,56			

Najdokładniejszą metodą obliczania rozkładu natężenia oświetlenia jest metoda punktowa (krok po kroku). Pozwala ona obliczyć także równomierność rozkładu natężenia oświetlenia. W metodzie tej wykorzystuje się superpozycję oddziaływania każdej z opraw. Metoda bazuje na wykorzystaniu prawa odwrotności kwadratów odległości:

$$E = \frac{I_{\alpha}}{l^2} \cdot \cos \alpha \quad (15)$$

gdzie I_{α} to światłość oprawy w kierunku punktu, w którym oblicza się natężenie oświetlenia, α - kąt padania światła na powierzchnię w punkcie, l – odległość między środkiem oprawy a punktem, w którym oblicza się natężenie oświetlenia.

Na rysunku 5 pokazano rzut przykładowego pomieszczenia z 6 oprawami (L1-L6). Natężenie oświetlenia w punkcie E jest sumą natężeń oświetlenia pochodzących od każdej z tych opraw. W celu obliczenia ich wartości należy określić odległość punktu E od każdej z opraw oraz kąty, jakie tworzą promienie biegnące ze środka każdej oprawy do punktu E z normalną do powierzchni poziomej w punkcie E. Kąty te będą określały kąt padania światła i jednocześnie określały kąt w przekroju oprawy, który należy wybrać do odczytu światłości kierunkowej z wykresu krzywych światłości.



Natężenie oświetlenia E stanowi sumę natężeń oświetlenia pochodzących od opraw L1-L6. Obliczone w taki sposób natężenie oświetlenia będzie wyłącznie składową bezpośrednią. Przyjęcie tej wartości jest jednoznaczne z założeniem, że wszystkie współczynniki odbicia powierzchni w pomieszczeniu wynoszą zero. Rzeczywiste natężenie oświetlenia będzie wyższe.

Jeżeli obliczenia wartości natężenia oświetlenia w danym pomieszczeniu zostaną przeprowadzone w punktach wynikających z zalecanej w normie 12464-1 siatki pomiarowej, na podstawie uzyskanych wyników można obliczyć równomierność oświetlenia wg wzoru:

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_{\bar{sr}}} \quad (16)$$

Gdzie E_{min} i $E_{\bar{sr}}$ oznaczają odpowiednio minimalną i średnią wartość natężenia oświetlenia.

3. Przykłady obliczeń

Przykład 1

Stosując metodę sprawności należy dobrać liczbę opraw dla sali lekcyjnej o wymiarach długość 14 m, szerokość 8 m, wysokość 3,25 m. Kolorystyka sufitu i ścian: sufit jasny ($\rho=0,7$), ściany średnio jasne ($\rho=0,5$). Przyjąć wartości średniego eksploatacyjnego natężenia oświetlenia bez modyfikacji.

Wymagania oświetleniowe zawarte są w tablicach w normie 12464-1. W budynkach edukacyjnych istnieje szereg typów pomieszczeń. W salach lekcyjnych norma określa kilka typów pracy wzrokowej i wynikających z nich wymagań oświetleniowych. W przykładzie skupmy się na czynnościach ogólnych, dla których wymagania przedstawiono w tabeli poniżej.

$\bar{E}_m$ lx		U_o	R_a	R_{UGL}	$\bar{E}_{m,z}$ lx	$\bar{E}_{m,wall}$ lx	$\bar{E}_{m,ceiling}$ lx
wymagane	zmodyfikowane				$U_o \geq 0,10$		
500	1 000	0,60	80	19	150	150	100

Metoda sprawności nie pozwala na obliczenie równomierności oświetlenia, oświetlenia ścian, sufitu, czy wyznaczenie wskaźnika UGR. Zadanie ogranicza się zatem do analizy średniego eksploatacyjnego natężenia oświetlenia.

Wymagania te wskazują na konieczność wyboru oprawy, dla której producent gwarantuje wartość wskaźnika oddawania barw nie gorszą niż 80. Z tabeli wynika, że dobrane oprawy powinny zapewnić średnie eksploatacyjne natężenie oświetlenia o wartości 500 luksów. Jest to pomieszczenie edukacyjne, zatem powierzchnia obliczeniowa to powierzchnia blatów – założono, że znajduje się ona na wysokości 0,85 m nad powierzchnią podłogi.

Do obliczenia całkowitego wymaganego strumienia świetlnego, jaki powinny dostarczyć oprawy, należy skorzystać ze wzoru 12:

$$\Phi_o = \frac{E_{sr} \cdot S \cdot K}{\eta_{os}}$$

w którym znane są wartości natężenia oświetlenia E_{sr} – jest to 500 luksów, oraz S – jest to powierzchnia pomieszczenia, w tym przypadku 112 m².

Do obliczenia strumienia świetlnego brakuje 2 wartości: sprawności oświetlenia oraz współczynnika zapasu. Zgodnie z opisaną wcześniej metodyką, wartości te można określić na podstawie danych pomieszczenia. Z uwagi na jego typ, nie należy w nim oczekiwać szybkiego i istotnego ubytku strumienia świetlnego wynikającego np. z wysokiego zapylenia. Wymagane wartości natężenia oświetlenia dla każdego zadania są podane w normie jako natężenia oświetlenia eksploatacyjne czyli takie, które należy spełnić na każdym etapie eksploatacji instalacji. Wartość początkowa natężenia oświetlenia $\bar{E}_i$ może być obliczona z $\bar{E}_m$ jako: $\bar{E}_i = \frac{\bar{E}_m}{f_m}$, gdzie f_m jest współczynnikiem utrzymania, który definiuje konieczny

zapas strumienia świetlnego, natomiast współczynnik K jest jego odwrotnością.

Do wyznaczenia sprawności oświetlenia, konieczne jest skorzystanie z tabel. Wcześniej jednak należy wyznaczyć wskaźnik pomieszczenia oraz dokonać wyboru oprawy w celu ustalenia jej klasy. Wskaźnik pomieszczenia wylicza się ze wzoru 13 – w tej zależności należy podać wysokość zawieszenia oprawy nad powierzchnią roboczą h . Jeżeli oprawa będzie wbudowana w sufit, wartość ta wyniesie:

$$3,25 \text{ m} - 0,85 \text{ m} = 2,4 \text{ m},$$

natomiast w przypadku oprawy zwieszanej na wysokości 40 cm poniżej sufitu:

$$2,4 \text{ m} - 0,4 \text{ m} = 2,0 \text{ m}.$$

Wynika z tego, że przed obliczeniem wskaźnika pomieszczenia należy wstępnie wybrać typ oprawy, ponieważ sposób jej montażu będzie wpływał na wartość wskaźnika. W powyższym przykładzie będzie on wynosił około 2,1 dla oprawy wbudowanej w sufit lub 2,5 dla oprawy zwieszanej. Zakładając oprawę w klasie I, w pierwszym przypadku wskaźnik pomieszczenia wyniesie 0,835, natomiast w drugim 0,866. Wartości sprawności oświetlenia odczytane z tabel dla warunków zadania wynoszą odpowiednio 0,69 i 0,7 – z uwagi na niewielką różnicę, w obliczeniach zostanie przyjęta wartość 0,7. Ostatnią niewiadomą jest współczynnik konserwacji. Zasady doboru tego współczynnika są opisane w osobnej normie. Z uwagi na typ pomieszczenia można przyjąć współczynnik utrzymania jako 0,8, więc współczynnik $K=1,25$.

Na podstawie powyższych informacji można obliczyć wymagany strumień świetlny wszystkich opraw:

$$\Phi_o = \frac{E_{\text{sr}} \cdot S \cdot K}{\eta_{os}} = \frac{500 \cdot 112 \cdot 1,25}{0,7} = 100\,000 \text{ lm}$$

Przyjmując, że do realizacji oświetlenia wybrana zostanie panel LED o strumieniu 4000 lumenów i sprawności identycznej z wartością sprawności, dla której dokonano odczytów z tabel, do oświetlenia

pomieszczenia niezbędne jest zastosowanie co najmniej 25 takich opraw. Oprawy zwykle rozmieszcza się w pomieszczeniu w sposób równomierny.

Wybierając oprawę w tej samej klasie, ale o połowę mniejszym strumieniu, w pomieszczeniu należałoby zainstalować 50 takich opraw.

Przykład 2

Dla pomieszczenia z przykładu 1 należy obliczyć wskaźnik LENI zakładając, że wybrana oprawa o strumieniu 4000 lm pobiera moc 40 W. W pomieszczeniu we wszystkie dni robocze odbywają się zajęcia w godzinach 8-15:30. Pomieszczenie nie jest wyposażone w system sterowania oświetleniem i ma ekspozycję północną.

Wskaźnik LENI należy obliczyć z zależności:

$$LENI = \frac{\text{całkowita energia na oświetlenie}}{\text{powierzchnia pomieszczenia} = 112m^2}$$

Całkowita energia na oświetlenie zależy w tym przypadku od zużycia energii zużywanej przez instalację oświetlenia ogólnego oraz instalację oświetlenia ewakuacyjnego i awaryjnego. Z uwagi na zakres tematyczny projektu, uwzględniona zostanie wyłącznie instalacja oświetlenia ogólnego, która składa się z opraw oświetlenia ogólnego (wzór 5).

Założmy, że na drodze symulacji w oprogramowaniu do obliczania oświetlenia ustalono, że w przypadku wybranego typu oprawy wykorzystanie 25 opraw oświetleniowych nie zapewnia wymaganej dla pomieszczenia edukacyjnego równomierności oświetlenia. Wymagany próg osiągnięto dopiero stosując $n=28$ opraw. Stąd całkowita moc zainstalowana w pomieszczeniu wynosi:

$$P_n = \sum_{i=1}^{i=28} P_i = 28 \cdot 40 W = 1120 W$$

Sala jest wykorzystywana w okresie od 1 września do końca czerwca z wyłączeniem sobót i niedziel oraz dni wolnych od zajęć dydaktycznych, co daje 30 tygodni. W każdym tygodniu według danych oświetlenie jest wykorzystywane przez 7,5 godziny przez 5 dni w tygodniu. Dla precyzyjnych obliczeń należałoby ustalić dostępność światła dziennego, jednak z uwagi na północną ekspozycję okien oraz

wyteżoną pracę wzrokową, przyjęto, że instalacja pracuje nieprzerwanie ($t_D = 0$). Zatem czas pracy instalacji w ciągu roku wynosi:

$$t_N = 7,5h \cdot 5 \cdot 30 = 1125 h.$$

Całkowitą energię na oświetlenie można zatem policzyć z zależności (5):

$$W_{L,t} = \sum \frac{\{(P_n \times F_C) \times F_O[(t_D \times F_D) + t_N]\}}{1000} [kWh/t_s] = \frac{1120 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (0 + 1125h)}{1000} = 1260 kWh/rok.$$

Zatem wskaźnik LENI dla oświetlenia ogólnego w pomieszczeniu wynosi:

$$LENI = \frac{1260}{112} = 11,26 \frac{kWh}{m^2} /rok$$

Na podstawie posiadanych danych można określić jaka jest moc jednostkowa instalacji oświetleniowej w pomieszczeniu:

$$P_{m2} = \frac{1120 W}{112 m^2} = 10 \frac{W}{m^2}$$

Oznacza to, że zgodnie z tabelą z rozporządzenia Ministra Infrastruktury, moc jednostkowa jest znacznie poniżej wymagań dla każdej z klas kryteriów. Wartość graniczna nie powinna zostać przekroczona po uwzględnieniu w obliczeniach instalacji oświetlenia awaryjnego.

Przykład 3

W pomieszczeniu z przykładu 1 oprawy rozmieszczono równomiernie w odległościach 2,4 m pomiędzy ich środkami. Zakładając, że oprawy charakteryzują się obrotowo-symetrycznym rozsyłem Lambertowskim, należy obliczyć wartość natężenia oświetlenia na blacie biurka w punkcie znajdującym się w centralnym punkcie pomiędzy 4 sąsiadującymi oprawami.

Światłość osiowa oprawy o strumieniu 4000 lm i rozsyłe Lambertowskim wynosi:

$$I_0 = \frac{4000 lm}{\pi sr} = 1273 cd$$

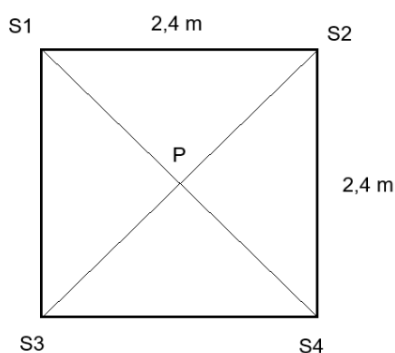
Rozsyła Lambertowski charakteryzuje się rozsyłem opisanym funkcją cosinus, tzn. dla dowolnego kąta α względem normalnej do powierzchni oprawy można obliczyć światłość kierunkową na podstawie zależności:

$$I_\alpha = I_0 \cdot \cos \alpha$$

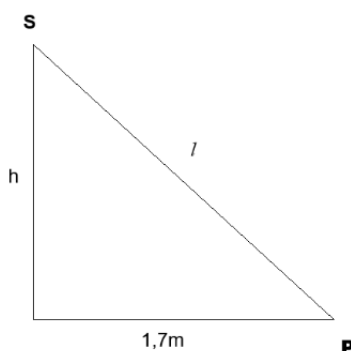
W tym przypadku rozsył światłości oprawy, niezależnie od rozpatrywanego kierunku, jest opisany wzorem:

$$I_{\alpha} = 1273 \cos \alpha .$$

Do obliczenia natężenia oświetlenia w punkcie, niezbędna jest znajomość zależności geometrycznych pomiędzy środkami opraw i punktem, w którym dokonuje się obliczeń. Z danych wynika, że oprawy są rozmieszczone równomiernie w odległościach 2,4 m pomiędzy ich środkami. Zatem punkt pomiarowy stanowi środek (punkt przecięcia przekątnych) kwadratu o boku długości 2,4 m jak zaznaczono na schemacie poglądowym poniżej. Punkty S1-S4 to środki opraw, natężenie oświetlenia obliczamy w punkcie P.



Oznacza to, że odległość w płaszczyźnie poziomej do środka każdej oprawy wynosi $1,2\sqrt{2}$ m, co daje odległość 1,7 m. Jednak oprawy są zawieszone na wysokości innej niż wysokość płaszczyzny blatu. Z danych w zadaniu wynika, że wysokość pomieszczenia wynosi 3,25 m, a obliczona w przykładzie 1 wysokość zawieszenia oprawy h zależy od sposobu jej montażu. Zatem do wyznaczenia odległości l punktu P od środka S każdej z opraw, wykorzystać można poniższy schemat pomocniczy.



Odległość ta wynosi $l = \sqrt{h^2 + (1,7)^2}$.

Skorzystanie z prawa odwrotności kwadratów odległości wymaga określenia światłości każdej z opraw w kierunku punktu P. Do tego celu należy wyznaczyć kąt względem normalnej do powierzchni oprawy wyznaczający kierunek do punktu P. Kąt ten tworzą odcinki o długościach h i l więc łatwo go policzyć z zależności trygonometrycznych w trójkącie prostokątnym:

$$\cos \alpha = \frac{h}{l}.$$

Po określeniu wymaganych wielkości geometrycznych, korzystając z zasady superpozycji, można obliczyć wartość natężenia oświetlenia w punkcie P na płaszczyźnie roboczej:

$$E_P = 4 \cdot \frac{I_\alpha}{l^2} \cdot \cos \alpha$$

Po podstawieniu wcześniej zapisanych zależności, natężenie oświetlenia w punkcie P wynosi:

$$E_P = \frac{5092 \cdot h^2}{(h^2 + (1,7)^2)^2}$$

Wyniki obliczeń, w tym cząstkowych dla obu wersji zawieszenia opraw zestawiono w tabeli:

Wersja oprawy	1	2
Sposób montażu oprawy	montaż w suficie	montaż zwieszony 0,4 m poniżej sufitu
Wysokość zawieszenia oprawy nad powierzchnią roboczą (h)	2,4 m	2,0 m
Odległość między punktem P a środkiem każdej z opraw (l)	2,94 m	2,63 m
Natężenie oświetlenia w punkcie P	392 lx	429 lx

Jak wynika z powyższej tabeli, wartości natężenia oświetlenia w punkcie P liczona metodą bezpośrednią w obu przypadkach jest poniżej zakładanej wartości. We wprowadzeniu znajduje się wyjaśnienie tego faktu. Taki wynik nie oznacza, że dobrane oświetlenie nie spełnia kryteriów normy w danym pomieszczeniu. Podana w normie wartość eksploatacyjnego natężenia oświetlenia jest wartością średnią i możliwe jest, że dla innego położenia punktu P wartość ta będzie wyższa.

W rzeczywistości wartości natężenia oświetlenia na płaszczyźnie roboczej będą wyższe niż wyliczone powyższą metodą, ponieważ na wartość natężenia oświetlenia w punkcie ma wpływ nie tylko składowa bezpośrednia, lecz także składowa pośrednia. Jej wielkość wynika z wielokrotnych odbić światła w pomieszczeniu i jest tym wyższa im wyższe są współczynniki odbicia ścian i sufitu. Im jaśniejsze pomieszczenie tym wyższy udział składowej bezpośredniej i większa rozbieżność między obliczeniami

metodą punktową a rzeczywistymi wartościami. Jedyną metodą weryfikacji spełnienia kryteriów projektowych jest przeprowadzenie symulacji w programie do projektowania oświetlenia, w którym takie odbicia są uwzględniane.

Materiały przygotowane w ramach projektu „PB 5.0 – dostosowanie oferty dydaktycznej Politechniki Białostockiej do potrzeb nowoczesnej gospodarki oraz zielonej i cyfrowej transformacji” (nr umowy FERS.01.05-IP.08-0327/23-00) w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus.

Publikacja jest udostępniona na licencji Creative Commons - Uznanie autorstwa 4.0 (CC BY 4.0).

Pełna treść licencji dostępna na stronie creativecommons.org.