

Oświetlenie stanowisk pracy w obiektach przemysłowych

Podczas projektowania, budowy i eksploatacji obiektów budowlanych istotna jest znajomość zasad oświetlania stanowisk pracy, zwłaszcza w obiektach przemysłowych, w których znajdują się różnorodne miejsca pracy. Wymagania wobec ich oświetlenia są bardzo wysokie ze względu na złożony charakter pracy oraz potencjalne zagrożenia.

W obiektach przemysłowych znajdują się pomieszczenia o różnym przeznaczeniu – od prostych przestrzeni magazynowych po pomieszczenia techniczne. Kluczową rolę w zapewnieniu właściwego ich użytkowania odgrywają trzy podstawowe rodzaje oświetlenia: sztuczne, naturalne oraz awaryjne.

W praktyce ocena oświetlenia opiera się najczęściej na jednym parametrze – natężeniu światła. Takie podejście jest jednak niewystarczające. Pełna analiza wymaga uwzględnienia wielu czynników, w tym: rozkładu światła na stanowisku pracy i w jego otoczeniu, poziomu oślnienia, barwy światła, modelowania, efektywności energetycznej oraz współczynnika utrzymania.



mgr inż.
Aleksander Łozowski
PBM ZREM Kompenerg

Aby zapewnić pracownikom optymalne warunki widzenia podczas długotrwałej, codziennej pracy, kluczowe są dobór i rozmieszczenie źródeł światła. Należy wziąć pod uwagę aranżację pomieszczenia zgodną z jego przeznaczeniem, kolorystykę powierzchni i wyposażenia oraz umiejscowienie stanowisk pracy, co przyczynia się zarówno do efektywności działania, jak i bezpieczeństwa pracy.

Znaczenie światła dla funkcjonowania człowieka jest nie do przecenienia. Oświetlenie otoczenia miejsca pracy i aktywno-

ści wpływa zarówno na jakość widzenia, jak i na efektywność. Dobre oświetlenie nie tylko umożliwia wydajną i precyzyjną pracę, ale także sprzyja odpoczynkowi. Ponadto może mieć właściwości relaksacyjne oraz lecznicze – działać antydepresyjnie, wspomagając, a w wielu przypadkach nawet zastępując terapię farmakologiczną.

Prawidłowa aranżacja pomieszczeń w obiektach przemysłowych: produkcyjnych, administracyjnych, socjalnych itp. w dużej mierze zależy od ich oświetlenia. W tego typu przestrzeniach stosuje się jednocześnie różne jego rodzaje:

- **ogólne** – obejmujące całe pomieszczenie;
- **stanowiskowe** – skoncentrowane na miejscu wykonywania pracy;
- **naturalne** – niezbędne i wymagane w miejscach stałej pracy;

• **awaryjne** – zapewniające bezpieczeństwo oraz umożliwiające ewakuację w przypadku awarii czy zagrożenia.

Parametry oceny każdego z nich zostały określone w normach. Na potrzeby analizy poprzedzającej projektowanie nowych czy też oceny już użytkowanych obiektów warto znać typowe wartości najczęściej stosowanych wielkości świetlnych dla **oświetlenia ogólnego i stanowiskowego**, zapewniających komfort widzenia:

- natężenie oświetlenia w miejscach pracy: $> 500 \text{ lx}$, a w całym pomieszczeniu $> 300 \text{ lx}$;
- natężenie oświetlenia o charakterze antydepresyjnym: $> 2000 \text{ lx}$;
- równomierność oświetlenia: nie mniejsza niż 20%;
- optymalny przedział długości fal świetlnych źródeł światła: 507–555 nm;
- temperatura barwowa: 3000 K;
- oddawanie barw: $R_a = 80$;
- luminancja (jaskrawość): do 4000 cd/m^2 .

Funkcjonowanie oświetlenia można ocenić na podstawie analizy dwóch grup zagadnień:

- efektu prac budowlanych (rozmieszczenia lamp i okien, kolorystyki ścian, sufitów oraz podłóg, funkcjonalności instalacji elektrycznej);
- zastosowanego wyposażenia i aranżacji wnętrza (oświetlenia stanowiskowego, rodzaju maszyn i mebli, rozmieszczenia stanowisk pracy, a także określenia ich przeznaczenia).

Analiza projektowanego lub eksploatowanego oświetlenia pozwala uzyskać wymagane wartości z uwzględnieniem złożoności zagadnienia wynikającej z różnorodności i wielości parametrów wymagających oceny.

OŚWIETLÉNIE PODSTAWOWE

Analizy wielokryterialne stanowią istotne wyzwanie w pracy inżynierskiej nad tym zagadnieniem. W praktyce najczęściej pojawiają się dwa kluczowe pytania:

- Czy obserwowane przedmioty są widoczne? W tym celu należy określić wartość natężenia oświetlenia $E \text{ [lx]}$.

• Czy światło nie powoduje dyskomfortu (nie razi)? Konieczne jest określenie wartości wskaźnika oceny olśnienia UGR.

Te praktyczne sformułowania wskazują na potrzebę znalezienia prostego sposobu oceny jakości oświetlenia w codziennej pracy. Za pierwszy etap takiej oceny można uznać analizę wymienionych dwóch podstawowych wielkości.

W procesie widzenia nieustannie zachodzi adaptacja wzroku w odpowiedzi na ciągłe zmiany luminancji obserwowanych przedmiotów oraz natężenia oświetlenia. Odczucie dyskomfortu podczas widzenia może być spowodowane:

- niewłaściwym **natężeniem oświetlenia** – zbyt niskim lub zbyt wysokim;
- zjawiskiem **olśnienia przykrego**, wynikającym ze zbyt dużej lub zbyt małej wartości luminancji albo znacznych różnic luminancji między obserwowanymi przedmiotami.

Typowe wartości luminancji oraz natężenia, których kombinacja nie powoduje uciążliwości widzenia, wynoszą:

- luminancja tła $L_t \approx 200 \text{ cd/m}^2$;
- luminancja źródeł światła $L_z \approx 4000 \text{ cd/m}^2$;
- natężenie oświetlenia od otoczenia świetlnego $E_{\text{otocz}} \approx 200 \text{ lx}$;

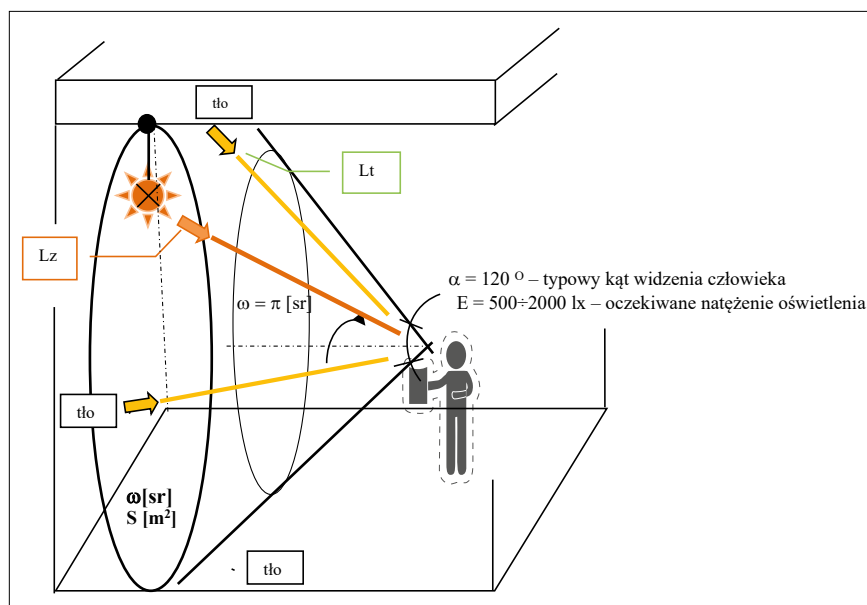
• natężenie kierunkowe oświetlenia od źródła światła $E_z \approx 3000 \text{ lx}$.

W trakcie zmiany miejsca aktywności człowieka czy też pozycji ciała następuje adaptacja wzroku – jest to zjawisko ciągłego dostosowywania się do intensywności oświetlenia (natężenia E) oraz do jaskrawości (luminancji L) widzianych przedmiotów i źródeł światła.

Obserwowana przez człowieka przestrzeń zawiera się w kącie przestrzennym wyznaczonym przez stożek zbudowany w wyniku obrotu wokół dwusiecznej płaskiego **kąta naturalnego widzenia człowieka wynoszącego $\alpha \approx 120^\circ$** . Odpowiada to otoczeniu zawartemu w kącie przestrzennym $\omega = \pi \text{ [sr]}$ (rys. 1).

Wyznaczenie tych wielkości jest stosunkowo proste z użyciem powszechnie dostępnych mierników, takich jak: luksomierze, nitomierze i dalmierze, oraz po wykonaniu obliczeń technicznych. Wstępna ocena oświetlenia na podstawie dwóch parametrów: natężenia (E) i luminancji (L) jest przydatna zwłaszcza podczas okresowych przeglądów budynków.

Kompleksowe rozwiązanie tego zagadnienia wymaga jednak szerszej analizy zarówno na etapie projektowania,



Rys. 1. Schemat widzenia źródła światła oraz tła; oznaczenia: E – natężenie oświetlenia w miejscu obserwacji (oczekiwane natężenie oświetlenia 500–2000 lx), L_z – jaskrawość (luminancja) źródła światła, L_t – luminancja tła, ω – widziana przestrzeń (jako kąt bryłowy) otoczenia świetlnego, $\alpha = 120^\circ$ – typowy kąt widzenia przez człowieka, S – powierzchnia widzianego tła



Fot. 1. Przykład uciążliwej jaskrawości powodowanej przez źródła światła i światło odbite od posadzki

jak i podczas szczegółowych przeglądów okresowych. Konieczne jest uwzględnienie charakteru danego pomieszczenia, jego przeznaczenia, sposobu użytkowania oraz oczekiwań użytkownika, w tym jego preferencji estetycznych.

Oświetlenie powinno zapewniać odpowiednie warunki do pracy, ale także kreować pożądaną atmosferę. Jego niewłaściwe zaprojektowanie może prowadzić do problemów, takich jak pokazano na fot. 1 – gdzie mimo zastosowania najlepszych, kosztownych materiałów, błędy oświetleniowe, np. nadmierna jaskrawość i odbicia dekontrastujące, powodują olśnienie użytkowników.

OŚWIETLENIE AWARYJNE

Gdy podczas awarii zawiedzie oświetlenie naturalne i sztuczne, konieczne jest zastosowanie oświetlenia awaryjnego. Powinno ono umożliwić ewakuację w sytuacjach kryzysowych, np. podczas pożaru. W ramach analizy oświetlenia awaryjnego rozpatruje się: drogi ewakuacyjne, strefy otwarte oraz wysokiego ryzyka. Ocenia się następujące parametry:

- natężenie oświetlenia;
- jego równomierność;
- czas osiągnięcia wymaganego natężenia oświetlenia;

- wpływ funkcjonowania obiektu na oświetlenie;
- ograniczenie olśnienia przeszkadzającego;
- wskaźnik oddawania barwy;
- minimalny czas pracy oświetlenia;
- potwierdzenie funkcjonalnej ciągłości świecenia.

Oświetlenie awaryjne w podanym zakresie powinno być badane co roku.

CHARAKTERYSTYCZNE PARAMETRY OŚWIETLENIA

Wybór nowego rozwiązania czy też przeprowadzenie oceny w trakcie okresowych przeglądów eksploatowanych budowli wymaga uwzględnienia omówionych dalej wielkości.

Natężenie oświetlenia i strumień światła. Gęstość powierzchniowa mocy i moc świetlna

Natężenie oświetlenia E [lx] jest pojęciem energetycznym równoważnym gęstości powierzchniowej mocy p [W/m^2] – w tym przypadku świetlnej. Obie wielkości (podobnie jak inna para wielkości: strumień świetlny Φ [lm] i moc P [W], czyli szybkości przekazywania energii w postaci światła) są związane stosunkiem (liczbą) $0,0015 \text{ lm/W}$:

$$1,5\text{‰} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \frac{\text{strumień świetlny } \Phi}{\text{moc } P} \quad (1)$$

podobnie:

$$1,5\text{‰} = 1 \frac{\text{lx}}{\text{W}/\text{m}^2}$$

$$\frac{\text{natężenie oświetlenia } E}{\text{gęstość powierzchniowa mocy } p} \quad (2)$$

Znając oczekiwaną wartość natężenia oświetlenia oraz powierzchnię pomieszczenia, można obliczyć wymaganą wartość strumienia źródeł światła i tym samym ich moc energetyczną, a także określić ich ilość oraz energochłonność.

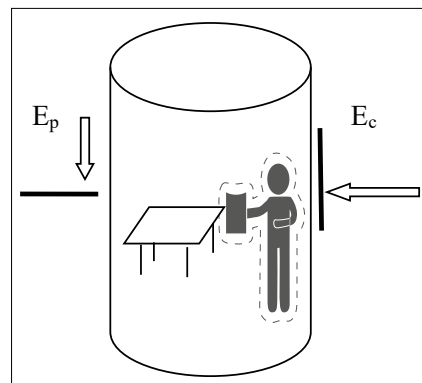
Charakterystyczne wartości natężenia E oraz równomierności oświetlenia U na obserwowanych podstawowych powierzchniach powinny wynosić:

- na stanowisku pracy: $E > 500 \text{ lx}$, $U \geq 0,5$;
- w otoczeniu świetlnym stanowiska pracy: $E > 300 \text{ lx}$, $U \geq 0,5$.

Natomiast w pomieszczeniach produkcyjnych, biurowych, edukacyjnych, komunikacyjnych, opieki zdrowotnej itp., gdzie powierzchnie powinny być jaskrawsze, wartości te powinny wynosić:

- na ścianach: $E > 75 \text{ lx}$, $U \geq 0,1$;
- na suficie: $E > 50 \text{ lx}$, $U \geq 0,1$.

Do oceny oświetlenia przedmiotów, powierzchni pracy oraz ludzi stosuje się dodatkowo **modelowanie**. Polega ono na takim ukształtowaniu rozkładu natężenia światła widzianego przez użytkownika, aby wskaźnik modelowania E_c/E_p zawierał się w przedziale $0,3\text{--}0,6$ jako stosunek E_c/E_p – cylindrycznego do poziomego natężenia oświetlenia. Cylindryczne natężenie oświetlenia jest mierzone w pionowej płaszczyźnie i powinno mieć wartość $E_c \geq 50 \text{ lx}$



Rys. 2. Modelowanie – pomiar natężeń oświetlenia cylindrycznego i poziomego

Fot. i rys. autora

przy równomierności $U_o \geq 0,1$. Pomiaru trzeba wykonać na wysokości:

- 1,2 m – w przypadku osób na stanowiskach siedzących;
- 1,5 m – dla osób stojących.

Określenie natężeń oświetlenia przy modelowaniu E_c/E_p zobrazowano na rys. 2.

Oświetlenie pola zadania oraz pól bezpośredniego i dalszego otoczenia

Podczas projektowania czy badania oświetlenia na stanowiskach pracy analizuje się całą przestrzeń świetlną wokół danego stanowiska, którą wyznaczają trzy przestrzenie przypisane do:

- pola zadania – na stanowisku pracy, w miejscu wykonywania czynności;
- pola bezpośredniego otoczenia – wokół stanowiska, w odległości ok. 1 m;
- pola dalszego otoczenia – całego pomieszczenia (przestrzeni), w którym znajduje się stanowisko pracy.

Każda z tych przestrzeni wymaga analizy wielkości zgodnie z wymaganiami normy [1].

Rozkład luminancji

Rozkład jasności (luminancji) mierzy się nitomierzem. Parametr ten pozwala na określenie możliwości adaptacji wzroku oraz wpływa na wygodę widzenia. Zawiera się w przedziale od 0 do 10^5 cd/m². Natomiast rozkład luminancji na powierzchniach widzianych jest oceniany pośrednio, na podstawie współczynników odbicia światła głównych powierzchni we wnętrzach: ścian, sufitu, podłogi oraz płaszczyzny pracy. Współczynniki te powinny się zawierać w zakresie 0,2–0,9.

Oddawanie barw

Producenci źródeł światła dążą do uzyskania światła optymalnego do danego zastosowania w obrębie długości fal 507–555 nm. Podają przy tym dwa podstawowe parametry, które określają zdolność wiernego i efektywnego oddawania barw obserwowanych przedmiotów:

- **wygląd barwy:** ciepła (temperatura barwowa $T_{CP} < 3300$ K; w pomieszczeniach, w których praca jest wykonywana w spo-

sób ciągły, takich jak biura, np. księgowe, projektowe, czy pomieszczenie, w którym odbywa się obróbka mechaniczna), naturalna ($3300 \leq T_{CP} \leq 5300$ K – ogólnego stosowania) albo chłodna ($T_{CP} > 5300$ K – stosowana np. w magazynach ze względu na dużą jasność powodującą zwiększenie kontrastu świetlnego powierzchni szukanych wśród składowanych przedmiotów);

- **wskaźnik oddawania barw** przez źródła światła R_a (wymagana wartość powyżej 80).

Otoczenie świetlne

Otoczenie świetlne obejmuje wszystko, co jest widziane z danego stanowiska pracy. Jest to przestrzeń widziana w kącie bryłowym $\omega = \pi$ [sr] (rys. 1). Składa się z nakładających się na siebie źródeł światła:

- emitowanego przez sztuczne źródła;
- odbitego od ścian, sufitów i podłóg;
- odbitego od wyposażenia, w tym maszyn i mebli;
- naturalnego, dostarczanego przez okna, świetliki itp.

Otoczenie świetlne powinno gwarantować odpowiednią ilość światła zarówno sztucznego, jak i naturalnego w miejscach przeznaczonych na stały pobyt ludzi. Oznacza to konieczność zapewnienia wystarczającej powierzchni otworów okiennych oraz eliminację ich zasłaniania, np. przez sąsiednie budynki.

Ujednolicona ocena oślnienia

Oślnienie to zjawisko, które wynika z uciążliwego oddziaływania kombinacji natężenia oświetlenia i luminancji zarówno źródeł światła, jak i otoczenia świetlnego w obszarze obserwacji. Wywołuje ono uczucie dyskomfortu oraz obniża zdolność do wykonywania pracy. Do oceny oślnienia stosowany jest UGR, czyli ujednolicony wskaźnik oślnienia. Na podstawie podanych parametrów można obliczyć wartość tego wskaźnika dla pojedynczego źródła światła:

$$UGR = 8 \lg [0,25 \frac{L_z \times E_{z \text{ kier}}}{L_t \times E_{ot \text{ kier}}}] \quad (3)$$

Przykładowe obliczenia dla typowych wartości:

- L_z – luminancja widzianego źródła światła: 27 670 cd/m² (pomiar w hali obsługi robotów);
- L_t – luminancja widzianego tła: 96 cd/m²;
- $E_{z \text{ kier}}$ – natężenie kierunkowe źródła światła: $E_{z \text{ kier}} = L_z \times \omega_z$, pomiar: $L_z = 27 670$ cd/m², $\omega_z = 0,01$ sr, $E_{z \text{ kier}} = 277$ lx;
- $E_{ot \text{ kier}}$ – natężenie kierunkowe oświetlenia od pełnego otoczenia świetlnego (współczynnik Gutta – p^2): 780 lx.

Na podstawie tych wartości obliczono ujednolicony wskaźnik oślnienia $UGR = 4,8$, co spełnia wymaganie:

$$UGR \leq UGR_{wymag} = 23.$$

Prawidłowa wartość UGR powinna być niższa od dopuszczalnej w normie [1].

Oślnienie przykre w miejscach pracy występuje, gdy jasność (luminancja) obserwowanego źródła światła L_z znacznie różni się od jasności otaczającego go tła L_t . Aby ograniczyć oślnienie, należy:

- stosować dostępne osłony przeciw-oślepieniowe;
- minimalizować odbicia dekontrastujące oraz oślnienia odbiciowe;
- odpowiednio aranżować położenie stanowisk pracy względem źródeł światła;
- ograniczać luminancję źródeł światła;
- stosować jasne kolory ścian i sufitów oraz matowe wykończenia powierzchni.

Do oceny komfortu widzenia przedmiotów można też posłużyć się pojęciem kontrastu. Opisuje on stosunek luminancji źródła światła L_z do luminancji tła L_t w strefie widzenia:

$$K = \frac{L_z}{L_t} - \text{wartość w zakresie } 35-150 \quad (4)$$

dla zakresów luminancji:

$$L_z = 7000-3000 \text{ cd/m}^2;$$

$$L_t = 200-20 \text{ cd/m}^2.$$

Wyznaczenie współczynnika utrzymania i czasu użytkowania

Do oceny kondycji oświetlenia stosuje się **współczynnik utrzymania MF** określony zależnością:

$$MF = LLMF \times LSF \times LMF \times RSMF \quad (5)$$



gdzie (wielkości z przykładowymi wartościami):

LLMF = 0,95 – współczynnik stabilności strumienia świetlnego;

LSF = 0,91 – współczynnik trwałości lamp;

LMF = 0,89 – współczynnik konserwacji opraw;

RSMF = 0,80 – współczynnik utrzymania powierzchni tła.

Dla podanych wartości **MF = 0,62**.

Po wyznaczeniu współczynnika MF można określić czas użytkowania **T** (lata) gwarantujący zachowanie parametrów użytkowych oświetlenia, a tym samym wyznaczyć termin następnego przeglądu okresowego:

$$T = \frac{(t_1 - t_2) \times W_{\text{prac}} \times MF}{t_3 \times D} \quad (6)$$

gdzie:

t_1 – trwałość źródeł światła: 60 000 h;

t_2 – czas dotychczasowego użytkowania: 1000 h;

W_{prac} – wskaźnik wieku pracowników: 0,85;

MF – wskaźnik utrzymania: 0,62;

t_3 – dzienny czas użytkowania: 16 h;

D – liczba dni pracy w roku: 250.

Po podstawieniu podanych wartości otrzymujemy: $T = 7$ lat.

Jeżeli $T \leq 5$ lat, należy zastosować takie rozwiązania techniczne i organizacyjne, aby czas T wyliczony ze wzoru (6) spełniał warunek $T \geq 5$ lat (art. 62 Prawa budowlanego [9]). Oczywiście, jeżeli ten czas jest krótszy niż 5 lat, to okres pomiędzy przeglądami też powinien być odpowiednio krótszy.

W przypadku otrzymanych wartości przyjmujemy czas $T = 5$ lat. Przy wyznaczaniu wartości t_1 , oprócz trwałości (żywotności) czasowej źródeł światła, należy uwzględnić także wpływ parametru „załłącz/wyłącz” (on/off) określającego trwałość ze względu na liczbę uruchomień źródła światła.

Sprawność funkcjonalna oświetlenia

W tym zakresie ocenia się sprawność:

- instalacji elektrycznej (opraw oświetleniowych, przewodów, łączników, aparatów sterujących, ochrony przeciwporażeniowej) – stan izolacji oraz zapewnienie skutecznego wyłączenia przy uszkodzeniach przez zabezpieczenia nadmiarowoprądowe i różnicowoprądowe;

- oświetlenia naturalnego – odpowiednią powierzchnię i czystość okien oraz świetlików, a także brak obiektów je przysłaniających;

- oświetlenia awaryjnego – gotowości do podjęcia pracy w sytuacji awaryjnej przez oprawy z akumulatorami, podświetlane piktogramy oraz piktogramy odbijające;

- dostawy energii elektrycznej – jej parametry, zwłaszcza napięcia w przedziale wartości 207–253 V, oraz niepowodowanie zwiększonego poboru energii przez wzrost napięcia.

Luminancja opraw świetlnych

Aby jasność źródeł światła była znośna dla użytkowników, oprawy, w których osadzone są lampy, wyposaża się w rastry i mleczne klosze oraz umieszcza na zwiększonej wysokości. Przy kącie ochrony 15° luminancja nie powinna być większa niż 50 kcd/m².

ŚWIATŁO DZIENNE

Intensywność oświetlenia wnętr światłem dziennym wynika ze stosunku sumarycznej

powierzchni okien, świetlików i przeszkolonych drzwi do powierzchni podłóg. Uznaje się, że właściwy udział światła dziennego jest wtedy, gdy stosunek np. powierzchni okien do powierzchni podłogi wynosi:

- 1 : 8 – dla pomieszczeń, w których ludzie przybywają przez cały czas pracy;
- 1 : 12 – dla pomieszczeń przeznaczonych do pracy dorywczej oraz komunikacji.

Brak naturalnego oświetlenia występuje w pomieszczeniach pozbawionych okien i świetlików, np. magazynach. Osoby przebywające w takich miejscach często odczuwają ulgę po wyjściu na zewnątrz (to uczucie przypomina moment, gdy po zimie po raz pierwszy spaceruje się w ciepłych, wiosennych promieniach słońca). Warto pamiętać, że natężenie światła dziennego jest znacznie wyższe niż sztucznego. Dla porównania, w słoneczny dzień natężenie oświetlenia w cieniu wynosi ok. 5000 lx, podczas gdy w pomieszczeniach oświetlonych sztucznie osiąga jedynie 300–500 lx.

WZGLĘDY ENERGETYCZNE

Maksymalna gęstość powierzchniowa mocy oświetlenia nie powinna przekraczać:

- 35 W/m² – przy pracach produkcyjnych,
- 25 W/m² – przy pracach biurowych.

Na etapie planowania oświetlenia pomieszczeń należy uwzględnić skuteczność świetlną źródeł światła [lm/W] oraz gęstość powierzchniową mocy instalacji oświetleniowej [W/m²]. Pojawienie się nowych, bardziej wydajnych i ekonomicznych źródeł światła pozwala na jego intensywniejsze wykorzystanie. Zastosowanie źródeł światła o dużej skuteczności świetlnej rzędu 150 lm/W obniża gęstość powierzchniową mocy z 50 do 8 W/m² przy natężeniu oświetlenia 300 lx w całym pomieszczeniu.

Typowa skuteczność świetlna źródeł LED wynosi od 95 do 115 lm/W. Oświetlenie LED, powszechnie stosowane w obiektach przemysłowych, pobiera energię elektryczną z ujemnym współczynnikiem mocy ($\text{tg}\varphi < 0$), co znajduje odzwierciedlenie na fakturach rozliczeniowych dystry-

bucji energii. Średnia wartość tego współczynnika dla oświetlenia LED wynosi $\text{tg}\varphi = -0,3$, co prowadzi do wzrostu kosztów i wymaga kompensacji energii biernej.

Aby lepiej zobrazować to zagadnienie, warto uwzględnić trzy podstawowe rodzaje kosztów związanych ze sprzedażą i dystrybucją energii. Ich typowe jednostkowe wartości netto wynosiły (stan na luty 2025 r.):

- energii czynnej: 0,83 zł/kWh (koszt wytworzenia energii czynnej);
- dystrybucji energii czynnej: 0,43 zł/kWh;
- energii biernej: 2,27 zł/kVAh.

Z podręcznikowej zależności $Q = P \times \text{tg}\varphi$ wynika, że na każdy 1 kWh energii czynnej przekształcaną na światło pobierane jest średnio 0,3 kVAh energii biernej pojemnościowej. Na podstawie tych danych można obliczyć roczne koszty eksploatacyjne dla typowej instalacji oświetleniowej składającej się ze 100 opraw o mocy 2×16 W, pracujących przez 200 h miesięcznie:

- moc całkowita instalacji:
 $100 \text{ szt.} \times 32 \text{ W} = 3,2 \text{ kW};$
- koszt energii czynnej:
 $3,2 \text{ kW} \times 200 \text{ h/mies.} \times 0,83 \text{ zł/kWh} \times 12 \text{ mies.} = 6374,40 \text{ zł/rok};$
- koszt dystrybucji energii czynnej:
 $3,2 \text{ kW} \times 200 \text{ h/mies.} \times 0,43 \text{ zł/kWh} \times 12 \text{ mies.} = 3302,40 \text{ zł/rok};$
- koszt poboru ponadumownego energii biernej pojemnościowej:
 $3,2 \text{ kW} \times 0,3 \text{ kVAh/kW} \times 200 \text{ h/mies.} \times 2,27 \text{ zł/kVAh} \times 12 \text{ mies.} = 5230,08 \text{ zł/rok}.$

Te obliczenia pokazują, że niekontrolowany pobór energii biernej pojemnościowej może znacząco zwiększać koszty eksploatacyjne. Optymalizacja i kompensacja energii biernej są więc kluczowe dla poprawy efektywności energetycznej instalacji oświetleniowych w obiektach przemysłowych.

Faktura za energię elektryczną w skali roku wzrosła o 5230,08 zł, co stanowi 31%. Pobór energii biernej pojemnościowej można jednak skompensować, by obniżyć koszty.

Koszt ponadumownego poboru energii biernej może przekroczyć koszt dystrybucji energii czynnej, co potwierdza

codzienna praktyka. Skutecznym rozwiązaniem tego problemu jest kompensacja mocy biernej. Skala zjawiska zależy od cen energii elektrycznej oraz regulacji zawartych w taryfach.

W instalacjach z **ujemnym współczynnikiem mocy** dochodzi również do podwyższenia napięcia w całej instalacji. Jest to wynikiem dobrze znanej zasady – gdy odbiorniki pobierają energię bierną pojemnościową w instalacji o charakterze indukcyjnym, następuje wzrost napięcia odbiorczego, co przekłada się na wyższe koszty.

Zjawisko to można zaobserwować na powszechnie stosowanych licznikach energii elektrycznej. Jeśli na wyświetlaczu wektor mocy biernej jest skierowany w dół i oznaczony symbolem (-Q), to wskazuje na konieczność modernizacji instalacji oświetleniowej oraz sposobu zasilania ze względu na wysoką energochłonność.

Aby instalacja oświetleniowa w obiekcie przemysłowym była zarówno funkcjonalna, jak i energooszczędna, konieczna jest wielokryteriowa analiza uwzględniająca sprawność techniczną oraz efektywność ekonomiczną. ■

Literatura

1. PN-EN 12464-1:2012 – wersja polska – Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy – Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach.
2. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (t.j. Dz.U. z 2003 r. nr 169 poz. 1650 ze zm.).
3. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (t.j. Dz.U. z 2022 r. poz. 1225 ze zm.).
4. CIE-97-2005 Konserwacja wewnętrznych systemów oświetlenia elektrycznego.
5. CIE 117-1995 Dyskomfort powodowany oświeceniem oświetlenia wnętrza.
6. PN-EN 15193:2010 Charakterystyka energetyczna budynków. Wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia.
7. PN-EN 1838:2013-11 Zastosowania oświetlenia. Oświetlenie awaryjne.
8. PN-EN 1838:2005 Zastosowania oświetlenia. Oświetlenie awaryjne.
9. Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 725 ze zm.).