

## ENERGOCHŁONNOŚĆ OŚWIETLENIA UZUPEŁNIAJĄCEGO W KONTEKŚCIE WYKORZYSTANIA ŚWIATŁA DZIENNEGO

Dariusz HEIM<sup>\*</sup>, Anna ROMANOWSKA<sup>\*</sup>, Eliza SZCZEPAŃSKA<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: [dariusz.heim@p.lodz.pl](mailto:dariusz.heim@p.lodz.pl), [annaroma@mnc.pl](mailto:annaroma@mnc.pl), [eliza.szczepanska@gmail.com](mailto:eliza.szczepanska@gmail.com)

**Streszczenie:** W pracy zamieszczono wyniki analiz oraz opis metody obliczeniowej zapotrzebowania na energię do oświetlenia uzupełniającego. Obliczenia przeprowadzono metodą Podziału Strumienia dla warunków dziennego oświetlenia zewnętrznego wg danych klimatycznych Typowego Roku Meteorologicznego dla Warszawy (TMY). Do analizy wybrano pomieszczenie o proporcjach 1×3, gdzie większy wymiar oznacza głębokość. Wysokość pomieszczenia przyjęto równą szerokości. Przeanalizowano 10 charakterystyk optycznych przeszklenia  $T$  (transmisję światła dziennego przez przezroczyste elementy obudowy) oraz właściwości emisyjne powierzchni wewnętrznych  $D$  (dystrybucję światła w pomieszczeniu). Wartości  $T$  i  $D$  przyjęto zgodnie z zaproponowaną w pracy [1] metodologią oceny oświetlenia wewnątrz światłem dziennym opartą na Całkowitym Wskaźniku Oświetlenia Dziennego  $TDI$ .

**Słowa kluczowe:** energooszczędność, oświetlenie uzupełniające, wskaźnik oświetlenia dziennego.

### 1. WPROWADZENIE

Rozważania na temat projektowania i realizacji budynków energooszczędnych coraz częściej wychodzą poza obszar tradycyjnej ochrony cieplnej. Wiele nowych aktów prawnych, czego najlepszym przykładem jest dyrektywa EPBD (Energy Performance Building Directive) poszerzają zakres dotychczasowych zagadnień m.in. o aspekt oszczędności energii elektrycznej. W tradycyjnym (dotychczasowym) podejściu do obliczania np. zapotrzebowania na ciepło budynku, urządzenia elektryczne oraz żarówki wytwarzające dużą ilość, wewnętrznych zysków ciepła wpływały zawsze korzystnie na końcowy bilans cieplny. Problemy zaczęły pojawiać się dopiero w budynkach wyposażonych w systemy chłodzące, szczególnie tych oświetlanych światłem sztucznym w ciągu dnia, czyli w okresie dodatkowych zysków ciepła od promieniowania słonecznego. Wtedy właśnie po raz pierwszy poja-

wiła się potrzeba energooszczędnego wykorzystania światła dziennego [2].

### 2. PROCEDURA OBLICZENIOWA

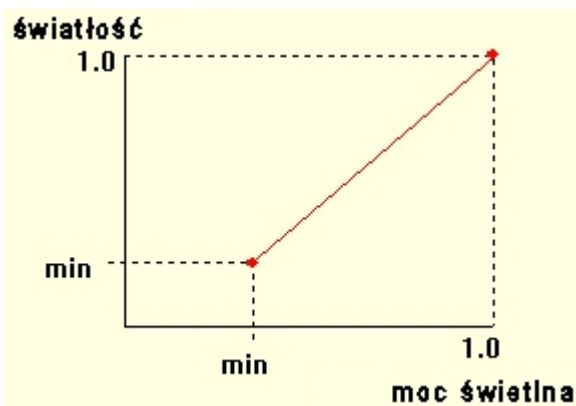
Obliczanie oświetlenia dziennego jest procedurą dwuetapową. Na początku wyznaczane są współczynniki oświetlenia dziennego dla teoretycznych warunków nieboskłonu jednorodnie zachmurzonego oraz bezchmurnego dla punktów pomiarowych zlokalizowanych na powierzchniach doświetlających (oknach). Uwzględniany jest model nieba równomiernie pokrytego chmurami oraz 20 możliwych pozycji słońca na czystym nieboskłonie. W drugim etapie obliczany jest rozkład natężenia oświetlenia, osobno dla każdej godziny oraz każdej strefy oświetleniowej wykorzystując dane pogodowe zamieszczone w pliku klimatycznym, zgodnie z procedurą opisaną w pracy [3]. W metodzie Podziału Strumienia, charakterystyki emisyjne powierzchni wewnętrznych uwzględniane są jako uśrednione współczynniki odbicia dla elementów górnych (sufit, górne powierzchnie ścian) oraz dolnych (podłoga, dolne powierzchnie ścian).

### 3. OŚWIETLENIE UZUPEŁNIAJĄCE

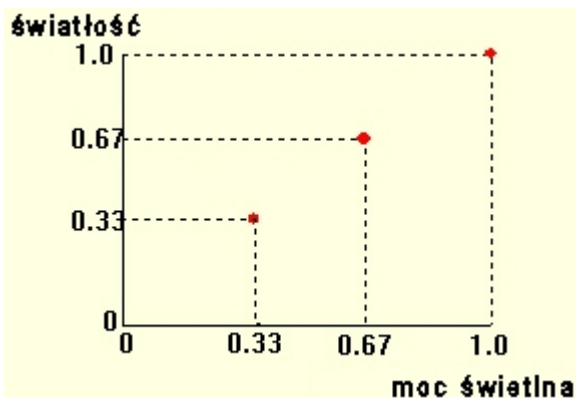
W przeciwieństwie do tradycyjnego oświetlenia sztucznego, prawidłowe zaprojektowanie oświetlenia uzupełnianego światłem dziennym stanowi zawsze wyzwanie. Podstawowa różnica polega na konieczności uwzględnienia silnie zmiennego i najczęściej występującego w płaszczyźnie prostopadłej (do płaszczyzny świecenia opraw), bocznego światła dziennego. Ponadto powierzchnie będące w ciągu dnia źródłem światła dziennego, w porze nocnej stają się płaszczyznami, przez które tracona jest energia świetlna. Energooszczędne oświetlenie uzupełniające w przeciwieństwie do podstawowego wymaga także za-

stosowania systemów sterowania mocą a tym samym światłością. Najczęściej więc światło podstawowe i uzupełniające posiada odrębne strategie projektowe a tym samym ich systemy należy traktować rozdzielnie.

Dwa podstawowe rodzaje strategii sterowania polegają na ciągłej (*continuous dimming*), rys. 1 lub skokowej (*stepped dimming*), rys. 2 zmianie mocy świetlnej systemu. W przypadku sterowania typu ciągłego konieczne jest określenie minimalnej światłości wyrażonej jako część światłości maksymalnej z odpowiadającą obu przypadkom mocą świetlną. Możliwe jest takie ustawienie mocy świetlnej aby uzyskać pożądaną światłość a tym samym wymagany poziom natężenia oświetlenia. W przypadku sterowania skokowego niezbędne jest podanie ilości stopni włączenia światła sztucznego. 1 stopień oznacza jedynie możliwość włączenia lub wyłączenia oświetlenia, 2 stopnie pozwalają włączyć oświetlenie na 50% mocy lub całkowicie na 100%, itd. Jednocześnie konieczne jest określenie maksymalnego strumienia światła [ $W/m^2$ ] dla oświetlenia uzupełniającego oraz umiejscowienia sensora mierzącego natężenie oświetlenia.



Rys. 1. Sterowanie ciągłe.  
Fig. 1. Continuous dimming.



Rys. 2. Sterowanie skokowe (przykład z 3 stopniami).  
Fig. 2. Stepped dimming (example with step 3).

#### 4. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

W celu rzeczywistego oszacowania korzyści energetycznych wynikających z maksymalnego wykorzystania światła dziennego do oświetlenia pomieszczeń przeprowadzono analizę w której zmiennymi były:

- optyczne własności przegród zewnętrznych – współczynniki przepuszczania światła dziennego,
- emisyjne własności powierzchni wewnętrznych – współczynniki pochłaniania i odbicia światła.

Schemat użytkowania pomieszczenia przyjęto jak dla budynku biurowego, tj. w godzinach 8<sup>00</sup>-16<sup>00</sup>. Obliczenia wykonano dla 2 czujników poziomu natężenia światła położonych odpowiednio: w geometrycznym środku przyokiennej połowy pomieszczenia oraz w części głębszej. Założono dwa poziomy wymagane natężenia oświetlenia (100 lx oraz 500 lx) oraz dwie strategie sterowania maksymalną mocą świetlną (ciągłe i skokowe). Wartości wymaganej, maksymalnej mocy świetlnej przyjęto równe: 10, 50 i 100W/m<sup>2</sup>.

#### 5. WYNIKI ANALIZ

##### 5.1. Maksymalna moc oświetlenia

Analizę przeprowadzono przy strategii oświetlenia sterowanego w sposób ciągły (*continuous dimming*) dla trzech wartości maksymalnej mocy świetlnej źródła. Dla potrzeb analiz pomieszczenie podzielono na połowę reprezentującą część przyokienne (do głębokości 4,5m od okna) oraz część wewnętrzną (od 4,5 do 9,0m głębokości). Założono wymagany poziom wewnętrznego natężenia oświetlenia w przyjętym geometrycznym środku danego obszaru na poziomie 100 i 500lx. Wyniki obliczeń wskaźnika zapotrzebowania na energię dla oświetlenia uzupełniającego zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki obliczeń dla różnych mocy świetlnych.  
Table 1. Results for different desired lighting intensity.

| Wymagana moc świetlna<br>[W/m <sup>2</sup> ] | E <sub>os</sub> [kWh/m <sup>2</sup> a]<br>0÷4,5m |        | E <sub>os</sub> [kWh/m <sup>2</sup> a]<br>4,5÷9m |        |
|--|--|--------|--|--------|
|  | 100 lx   | 500 lx | 100 lx   | 500 lx |
| 10   | 22,7   | 26,1   | 29,9   | 42,8   |
| 50   | 56,1   | 72,1   | 91,7   | 156,9  |
| 100  | 97,3   | 129,8  | 168,8  | 299,2  |

Tabela 2. Energia elektryczna zaoszczędzona dzięki wykorzystaniu światła dziennego.

Table 2. Energy saved by daylighting.

| Wymagana moc świetlna<br>[W/m <sup>2</sup> ] | Energia [kWh/a]<br>0÷4,5m |        | Energia [kWh/a]<br>4,5÷9m |        |
|--|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
|  | 100 lx                    | 500 lx | 100 lx                    | 500 lx |
| 10   | 658                       | 571    | 466                       | 114    |
| 50   | 3 290                     | 2 853  | 2 328                     | 570    |
| 100  | 6 581                     | 5 706  | 4 657                     | 1 139  |

W obliczeniach uwzględniono jedynie rozproszone światło słoneczne nieboskłonu (nie uwzględniono światła bezpośredniego od tarczy słonecznej). Płaszczyzna oświetlająca światłem dziennym stanowiła 100% przegrody zewnętrznej oraz 33% pola powierzchni podłogi.

Analiza wyników rocznego zapotrzebowania na energię elektryczną do oświetlenia (tabl. 1) oraz potencjał wykorzystania światła dziennego (tabl. 2) pozwala na wstępne porównanie wybranych przypadków dla płynnego sterowania mocą świetlną. Pięciokrotne zwiększenie poziomu natężenia oświetlenia w danym punkcie płaszczyzny roboczej powoduje zwiększenie zapotrzebowania na energię o 15÷30% w zależności od maksymalnej mocy świetlnej. W przypadku głębszych partii pomieszczenia różnice te dochodzą nawet do 50%. Jednocześnie wykorzystanie światła dziennego zapewnia najlepsze rezultaty przy wysokich mocach zainstalowanego oświetlenia sztucznego ale niewielkich wymaganiach dotyczących natężenia oświetlenia na płaszczyźnie roboczej.

## 5.2. Rodzaj sterowania

Kolejnym etapem analiza było porównanie różnych strategii sterowania oświetleniem sztucznym. Przeanalizowano 2 przypadki przedstawione graficznie na rysunkach 1 i 2, odpowiednio sterowanie ciągłe oraz skokowe z trójstopniowym systemem włączania opraw oświetleniowych. Wyniki obliczeń potencjału wykorzystania energii światła dziennego dla obu wariantów zestawiono w tablicy 3. Na uwagę zasługuje niekorzystny i energochłonny system sterowania skokowego dla głębszej części pomieszczenia. Jest on ponad siedmiokrotnie mniej efektywny od systemu sterowania ciągłego. Natomiast różnice zaobserwowane w części przyokiennej są praktycznie pomijalne.

Tabela 3. Energia elektryczna zaoszczędzona dzięki wykorzystaniu światła dziennego dla 500lx.

Table 3. Energy saved by daylighting for 500lx.

| Moc maksymalna<br>[W/m <sup>2</sup> ] | Energia [kWh/a]<br>0÷4,5m |         | Energia [kWh/a]<br>4,5÷9m |         |
|---------------------------------------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|
|                                       | conti.                    | stepped | conti.                    | stepped |
| 10                                    | 571                       | 536     | 114                       | 15      |
| 50                                    | 2 853                     | 2 678   | 570                       | 76      |
| 100                                   | 5 706                     | 5 387   | 1 139                     | 152     |

Dodatkowe obliczenia przeprowadzone dla trybu sterowania on/off (z jednym stopniem załączania oświetlenia sztucznego) pokazują brak jakiegokolwiek możliwości wykorzystania światła dziennego w głębszej części analizowanej strefy. Oznacza to praktycznie ciągłe wykorzystanie oświetlenia sztucznego pomimo dobrych charakterystyk optycznych przeszkleń (transmisyjność dla światła 0,9). Pięciokrotne obniżenie wymaganego poziomu natężenia oświetlenia (do wartości 100lx) istotnie zmniejsza obserwowane różnice w sposobie sterowania światłem, szczególnie w głębszych częściach pomieszczenia. Nadal jednak stopniowe regulowanie mocy oświetlenia sztucznego pozwala na najbardziej energooszczędne wykorzystanie światła dziennego. Z dodatkowych obliczeń wynika, że różnice pomiędzy oświetleniem sterowanym w sposób ciągły a sterowanym skokowo są pomijalne powyżej 9 poziomów skokowej regulacji mocy.

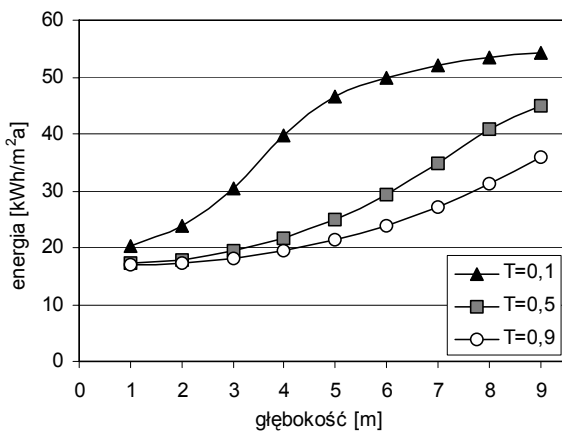
Tabela 4. Energia elektryczna zaoszczędzona dzięki wykorzystaniu światła dziennego dla 100lx.

Table 4. Energy saved by daylighting for 100lx.

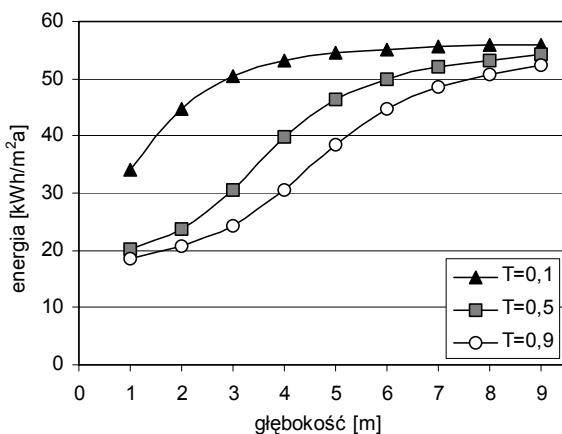
| Moc maksymalna<br>[W/m <sup>2</sup> ] | Energia [kWh/a]<br>0÷4,5m |         | Energia [kWh/a]<br>4,5÷9m |         |
|---------------------------------------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|
|                                       | conti.                    | stepped | conti.                    | stepped |
| 10                                    | 658                       | 651     | 466                       | 404     |
| 50                                    | 3 290                     | 3 256   | 2 328                     | 2 018   |
| 100                                   | 6 581                     | 6 513   | 4 657                     | 4 035   |

### 5.3. Charakterystyka energetyczna TDI

Ostatni etap analizy energetycznej polegał na oszacowaniu możliwości wykorzystania światła dziennego przy różnych charakterystykach optycznych przeszkleń. Założono dziewięć przepuszczalności dla światła widzialnego zmieniających się skokowo od 0,1 do 0,9. Energię potrzebną do oświetlenia wyznaczono przy założeniu różnej odległości punktu pomiarowego od płaszczyzny okna. Wysokość punktu przyjęto na poziomie 1m od podłogi. Obliczenia wykonano dla dwóch poziomów natężenia oświetlenia, sterowania ciągłego (*continuous*) oraz maksymalnej mocy oświetlenia sztucznego 50 W/m<sup>2</sup>. Wyniki w formie graficznej dla trzech wybranych przepuszczalności 0,1; 0,5 i 0,9 przedstawiono na rysunkach 3 (dla 100lx) oraz 4 (dla 500lx), dla których największe różnice zaobserwowano w środkowej części pomieszczenia.



Rys. 3. Wskaźnik zapotrzebowanie na energię dla 100lx.  
Fig. 3. Energy requirements index for 100lx.



Rys. 4. Wskaźnik zapotrzebowanie na energię dla 500lx.  
Fig. 4. Energy requirements index for 500lx.

W przypadku konieczności zapewnienia natężenia oświetlenia na poziomie 100lx, charakterystyka optyczna szyb okazała się istotna i miała wpływ na konieczność wykorzystania światła sztucznego nawet dla najgłębszych partii pomieszczenia. Największe różnice (ponad dwukrotne) w zapotrzebowaniu na energię zaobserwowano w strefie środkowej pomieszczenia, w których dostęp światła dziennego jest wyraźnie ograniczony dla szyb o niewielkich współczynnikach przepuszczania światła. W przypadku oświetlenia na poziomie 500 lx wpływ różnych przepuszczalności zanika w głębszych partiach pomieszczenia, już powyżej 6m. Natomiast, największe różnice pomiędzy szybą o największej a najmniejszej przepuszczalności widoczne są w części przyokiennej.

## 6. PODSUMOWANIE

Zamieszczone, przykładowe wyniki analiz dla oświetlenia uzupełniającego pokazują skalę możliwości ograniczenia zapotrzebowania na energię elektryczną w budynkach użytkowanych w ciągu dnia (np. biura, szkoły, usługi). Dostępne obecnie narzędzia dają praktycznie nieograniczone możliwości w odwzorowaniu najbardziej złożonych systemów sterowania poziomem natężenia oświetlenia przez co stają się powoli niezbędnym narzędziem każdego projektanta.

### ENERGY CONSUMPTION OF SUPPLEMENTARY LIGHTING INCLUDING DAYLIGHT

**Summary:** In selected types of the non-residential building such a offices, people spends a majority of time during the day. Therefore, it is necessary to achieve high internal comfort parameters e.g. lighting quality. The visual comfort is determined by required illuminance level at working plan. In the most of the office buildings required illuminance at level of 500 lx-750 lx required additional, supplementary electric lighting. Well designed daylight system lead to create the healthy and friendly environment.

### Literatura

- [1] Heim D., Klemm P., Szczepańska E. *Całkowity Wskaźnik Oświetlenia Dziennego – część 1 – metodologia*. Budownictwo Łądowe nr 58, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej 601. 52 Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB – Krynica 2006, tom II, s. 45-52.
- [2] Heim D., Matusiak B. *Projektowanie energooszczędnych systemów oświetlenia dziennego – półki świetlne*. Energia i Budynek 3 (2007).
- [3] Romanowska A., Heim D.: *Metoda podziału strumienia do wyznaczania oświetlenia dziennego*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce 2005 nr 1 s.290-295

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005-2007, jako projekt badawczy nr 4 T07E 033 28.