

METODY OKREŚLANIA PARAMETRÓW OŚWIETLENIA UZUPEŁNIAJĄCEGO DLA POTRZEB OPTYMALIZACJI WIELOKRYTERIALNEJ BUDYNKÓW MIESZKALNYCH – ENERGOCHŁONNOŚĆ OŚWIETLENIA

Dariusz HEIM^{*}, Hanna JĘDRZEJUK^{**}, Eliza SZCZEPAŃSKA^{*}

^{*} Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: dariusz.heim@p.lodz.pl, eliza.szczepanska@p.lodz.pl
^{**} Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN,
ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa, e-mail: Hanna.Jedrzejuk@ippt.gov.pl

Streszczenie: W referacie przedstawiono metody symulacyjne służące do określania zapotrzebowania na energię do sztucznego oświetlenia uzupełniającego. Opisano procedurę wyznaczania wskaźnika TDI oraz jego przykładowe wartości. Wyznaczane parametry służą do oceny energochłonności obiektów, a zatem niezbędne jest ich uwzględnienie w wielokryterialnej optymalizacji budynków mieszkalnych, jako jedne z wielu kryteriów decydujących o oddziaływaniu budynków na środowisko. Praca naukowa została częściowo sfinansowana z środków na naukę w latach 2008-11 w ramach Projektu Badawczego Nr 3989/B/T02/2008/35.

Słowa kluczowe: optymalizacja, oświetlenie uzupełniające, energochłonność, symulacje, wskaźnik TDI.

1. WPROWADZENIE

Rozważania na temat projektowania i realizacji budynków energooszczędnych coraz częściej uwzględniają energię zużywaną przez oświetlenie sztuczne [1,2]. W przypadku obliczania zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynku, urządzenia elektryczne oraz oprawy oświetlenia sztucznego są źródłem dużej ilości wewnętrznych zysków ciepła, przez co wpływają one korzystnie na końcowy bilans cieplny. Natomiast w okresie letnim, w budynkach oświetlanych światłem elektrycznym w ciągu dnia, czyli w okresie dodatkowych zysków ciepła od promieniowania słonecznego, zyski ciepła od oświetlenia zwiększają obciążenie instalacji chłodniczych. Stanowi to istotny przyczynek do racjonalizacji jednoczesnego wykorzystania światła dziennego i sztucznego [3].

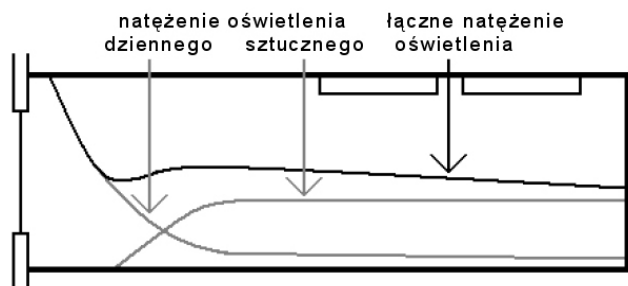
Najnowsze systemy sterowania parametrami środowiska wewnętrznego uwzględniają nie tylko parametry komfortu użytkowników, ale także obciążenie systemów energetycznych budynków. W większości wypadków maksymalne wykorzystanie światła dziennego daje pożądany efekt. Jednakże należy pamiętać, że promieniowanie słoneczne pozostaje źródłem nadmiernych zysków ciepła, w polskich warunkach klimatycznych, szczególnie w okresie lata. Teoretycznie możliwe jest, że zastosowanie energooszczędnego systemu oświetlenia elektrycznego przy zredukowaniu zysków od promieniowania słonecznego korzystnie wpłynie na bilans energetyczny budynku w okresie całego roku. Oczywiście takie działanie będzie tym bardziej efektywne, im większy udział w całkowitym zapotrzebowaniu budynku na energię mieć będzie energia chłodnicza.

Omówione w niniejszej pracy zagadnienia oświetlenia uzupełniającego scharakteryzowano pod kątem energii niezbędnej do zapewnienia odpowiednich warunków oświetleniowych we wnętrzach budynków. Wyznaczone wielkości odniesiono do opisanego w pracy [4] wskaźnika oświetlenia dziennego *TDI* rozbudowując go o dodatkowe indeksy określające moc uzupełniającego, sztucznego źródła światła *P* oraz jego skutecznością świetlną η .

2. OŚWIETLENIE UZUPEŁNIAJĄCE

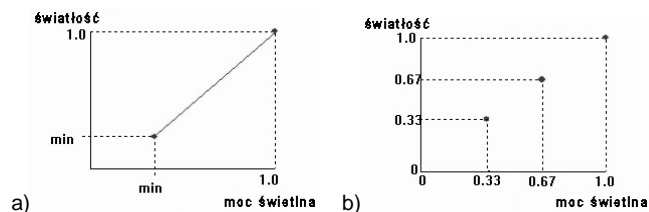
Ze względu na zmienność intensywności i składu widmowego światła w ciągu dnia, a także ze względu na spadek natężenia oświetlenia w pomieszczeniu w miarę zwiększania się odległości od okna zachodzi konieczność doświetla-

nia głębszych partii wnętrza. Celem systemów doświetlających jest zapewnienie wymaganego poziomu natężenia oświetlenia. Istnieją dwie metody uzupełnienia wymaganego strumienia świetlnego: poprzez doprowadzenie odpowiednimi przewodami światła dziennego lub poprzez doświetlenie wnętrza światłem sztucznym. Stosowanie w porze dziennej, uzupełniającego oświetlenia elektrycznego określane jest jako PSALI (*ang. Permanent Supplementary Artificial Lighting of the Interior*) i wymaga użycia systemu sterowania (włączników oraz regulatorów mocy), dzięki któremu możliwe jest dostosowanie natężenia oświetlenia sztucznego do panujących w danej chwili warunków. Schemat działania systemu PSALI przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat graficzny natężenia oświetlenia z PSALI.
Fig. 1. Graphical representation of illuminance with PSALI.

W przeciwieństwie do tradycyjnego oświetlenia sztucznego, prawidłowe zaprojektowanie oświetlenia uzupełniającego stanowi zawsze duże 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 zastosowania systemów sterowania mocą źródła światła, a tym samym strumieniem świetlnym. Dwie podstawowe strategie sterowania polegają na płynnej (*continuous dimming*), rys. 2a lub skokowej (*stepped dimming*), rys. 2b zmianie mocy świetlnej systemu. W przypadku sterowania typu płynnego konieczne jest określenie minimalnej światłości wyrażonej, jako część światłości maksymalnej z odpowiadającą obu przypadkom mocą świetlną [5].



Rys. 2. Schemat sterowania płynnego (a) i skokowego (b).
Fig. 2. Continuous (a) and stepped (b) dimming control scheme.

Możliwe jest takie ustalenie mocy świetlnej, aby uzyskać pożądaną światłość, a tym samym wymagany poziom natężenia oświetlenia. W przypadku sterowania skokowego niezbędne jest podanie ilości poziomów włączenia światła sztucznego. 1 stopień oznacza jedynie możliwość włączenia lub wyłączenia oświetlenia, 2 stopnie pozwalają włączyć oświetlenie na 50% lub 100% mocy, itd.

Zależność pomiędzy mocą świetlną a strumieniem światła emitowanym przez dane źródło nie jest jednak wielkością stałą. W przypadku sztucznych źródeł światła jest ona zależna od rodzaju źródła i jest określana, jako skuteczność świetlna źródła światła η wyrażona jako:

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (1)$$

gdzie:

ϕ – strumień świetlny emitowany przez źródło światła [lm],
 P – moc elektryczna źródła światła [W].
 Jednostką skuteczności świetlnej jest [lm/W].

Wartości skuteczności świetlnej η trzech podstawowych źródeł światła stosowanych popularnie w budynkach mieszkalnych zamieszczono w tabelicy 1. Dodatkowo porównano je ze skutecznością świetlną popularnych w ostatnim czasie diod typu LED.

Tabela 1. Skuteczności świetlne wybranych źródeł światła.
Table 1. Luminous efficacy of selected light sources.

Źródło światła	Skuteczność świetlna [lm/W]
Żarówki tradycyjne	8 ÷ 21
Żarówki halogenowe	18 ÷ 23
Świetlówki kompaktowe	50 ÷ 87
Standardowe diody LED	35 ÷ 48

Najwyższymi wartościami dla czterech porównywanych źródeł światła charakteryzują się świetlówki kompaktowe. Dobre wartości osiągają także diody LED, tym bardziej że prowadzone w ostatnim czasie prace pozwalają sądzić, iż w przyszłości będą one jeszcze wyższe. Najniższe wartości posiadają żarówki tradycyjne oraz halogenowe.

3. ZMODYFIKOWANY WSKAŹNIK TDI

Ze względu na specyfikę i czas występowania prawidłowe oszacowanie energochłonności oświetlenia uzupełniającego jest zadaniem wymagającym uwzględnienia wielu dodatkowych czynników. Różnice wynikają zarówno ze sposobu dystrybucji światła we wnętrzu, usytuowaniem względem

siebie źródeł, systemów sterowania i indywidualnych wymagań użytkowników. Dlatego do oceny energochłonności oświetlenia uzupełniającego wykorzystano metodę TDI [4]. Metoda ta, w swojej rozbudowanej formie uwzględnia dwa dodatkowe parametry związane ze źródłem światła: moc P oraz skuteczność świetlną η . Są one związane z energochłonnością oświetlenia uzupełniającego, a jednocześnie z wymaganiami dotyczącymi spełnienia warunku minimalnego natężenia oświetlenia. Ostateczną postać wskaźnika określono następująco:

$$TDI_y^x(P, \eta) \quad (2)$$

gdzie:

P – moc elektryczna źródła światła [W].

η – skuteczność świetlna źródła światła [lm/W].

Wskaźnik TDI można odnieść bezpośrednio do wymaganego natężenia oświetlenia y [lx] w odległości x [m] od bocznego źródła światła dziennego. Tym samym ostateczna postać wskaźnika dla danych uwarunkowań przestrzennych, materiałowych oraz źródła światła o danej skuteczności świetlnej η [lm/W] ma przykładową postać:

$$TDI_{500}^6(60, 25)$$

Tak, określona wartość wskaźnika TDI oznacza, że w celu zapewnienia natężenia oświetlenia 500 lx w odległości 6 m od bocznego źródła światła dziennego należy zastosować źródło światła o mocy 60 W oraz skuteczności świetlnej 25 lm/W. Dodatkowym parametrem, przyjętym w niniejszych rozważaniach jako stały, jest odległość źródła światła od płaszczyzny roboczej (na której dokonywany jest odczyt). W większości przypadków budynków mieszkalnych odległość oprawy oświetlenia wbudowanego od płaszczyzny roboczej wynosi od 1,5 do 2,5 m. Należy jednak nadmienić, iż w skrajnych przypadkach może być ona nieco inna.

Proponowane podejście do oceny energochłonności oświetlenia pozwala nie tylko liczbowo określić poziom natężenia oświetlenia w badanym miejscu wnętrza, lecz również daje odpowiedź, jaką ilość światła należy zapewnić poprzez odpowiednio dobrane oświetlenie uzupełniające. Cenną informacją będzie ilość dostarczonej energii, która jest pochodną rozwiązań architektonicznych, materiałowych i konstrukcyjnych oraz czasu użytkowania pomieszczenia. Należy przy tym pamiętać, że sposób rozmieszczenia opraw w systemach oświetlenia uzupełniającego określony jest zawsze poprzez: dostęp w danym punkcie światła dziennego (zależny od parametrów T i D) oraz rozsył światła sztucznego (określony poprzez parametr D bezpośrednio związany z charakterystyką emisyjną powierzchni) [4].

4. OPTIMALIZACJA ENERGOCHŁONNOŚCI OŚWIETLENIA UZUPEŁNIAJĄCEGO

Optymalizacji oświetlenia uzupełniającego jest częścią złożonego zadania optymalizacji wielokryterialnej budynków. W warunkach przyjętej geometrii zarówno pomieszczenia, jak i przegród przeszklonych oraz zadanych materiałach budowlanych o znanych właściwościach cieplnych i optycznych, a także zdefiniowanych płaszczyznach roboczych poszukiwane jest minimum zużycia energii do oświetlenia sztucznego w postaci funkcji zależnej od zmodyfikowanego wskaźnika TDI:

$$f_1(\bar{X}) = \int_0^{8760} \left(\sum_{m=1}^{x_1} \sum_{n=1}^{x_2} P [TDI_y^x(P, \eta(\tau))]_{m,n} \right) d\tau \quad (3a)$$

i minimum kosztów inwestycyjnych

$$f_2(\bar{X}) = \sum_{m=1}^{x_1} \sum_{n=1}^{x_2} K_{m,n} \quad (3b)$$

oraz minimum kosztów eksploatacyjnych:

$$f_3(\bar{X}) = \int_0^{8760} \left(\sum_{m=1}^{x_1} \sum_{n=1}^{x_2} c_{m,n} P(x_1, x_2, x_3)_{m,n} \right) d\tau \quad (3c)$$

gdzie:

$\bar{X} = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$ - wektor zmiennych decyzyjnych,

K_m – koszt zainstalowania m -tego systemu oświetleniowego,

c_m – koszty jednostkowe energii zużywanej przez m -ty rodzaj oprawy oświetleniowej w okresie bilansowym, w tym wypadku w okresie roku.

Zmiennymi decyzyjnymi są: rodzaje źródeł światła (x_1), liczba źródeł światła każdego rodzaju (x_2), sposób sterowania (x_3) oraz rozmieszczenie w przestrzeni położonej na wysokości od 1,5m do 2,5m nad płaszczyzną roboczą określone we współrzędnych w układzie kartezjańskim (x_4, x_5, x_6).

Zmienne decyzyjne (x_1, x_2, x_3) są dyskretne i nałożone zostały na nie pewne ograniczenia:

- zainstalowany jest co najmniej jeden rodzaj oświetlenia sztucznego, posiadający określoną charakterystykę oświetleniową:

$$x_1 \geq 1 \quad (4a)$$

- istnieje co najmniej jedno źródło światła sztucznego:

$$x_2 \geq 1 \quad (4b)$$

- sposób sterowania jest jednoznacznie określony:

$$x_3 \in \{1, 2\} \quad (4b)$$

przy czym przyjęto, że:

- 1 – sterowanie płynne,
- 2 – sterowanie skokowe.

Natomiast zmienne (x_4, x_5, x_6) są ciągłe i należą do zadanego obszaru nad wybranymi płaszczyznami roboczymi \mathbf{V} , czyli:

$$(x_4, x_5, x_6) \in \mathbf{V}. \quad (4d)$$

Ponadto warunki ograniczające wynikają z konieczności zapewnienia komfortu wewnętrznego i przyjmują postać:

$$E_v(E_{v,art}, E_{v,0}) \geq E_{v,req} \quad (4e)$$

$$\frac{E_{v,min}}{E_{v,m}} \geq d_{gr} \quad (4f)$$

Co oznacza, że poszukiwane rozwiązanie musi zapewniać wymagane natężenie oświetlenia (E_v) zależne od dostępnego oświetlenia naturalnego ($E_{v,0}$) oraz uzupełniającego ($E_{v,art}$) na zdefiniowanych płaszczyznach roboczych (rów.4b) oraz odpowiednią jego równomierność (rów.4c), tj. nie mniejszą od przyjętej wartości minimalnej (d_{gr}).

Parametrami zadania są: wymiary geometryczne pomieszczenia, wymiary i rodzaj przegród przeszklonych, właściwości optyczne zastosowanych materiałów i komponentów oraz położenie i wymiary płaszczyzn roboczych.

W podanym sformułowaniu nie uwzględniono okresowej ochrony przed nadmiernym promieniowaniem słonecznym.

Przy jego formułowaniu należy zastrzec, że końcowa ocena energetyczna musi dotyczyć całego systemu, czyli powinna jednocześnie uwzględniać sprzężone ze sobą procesy: ogrzewania, chłodzenia oraz sztucznego oświetlenia.

5. PODSUMOWANIE

W pracy sformułowano zadanie optymalizacji wykorzystania uzupełniającego światła sztucznego do oświetlenia pomieszczeń. Prezentowane podejście wykorzystuje sposób oceny jakości i energochłonności oświetlenia wnętrza na

podstawie określenia zmodyfikowanego współczynnika TDI. Dla zadanych parametrów opisujących pomieszczenie i system oświetlenia dziennego oraz zakładając ograniczenia techniczne możliwe jest znalezienie optymalnego rozwiązania systemu oświetlenia uzupełniającego. Przedstawiony model posiada istotne znaczenie aplikacyjne w tworzeniu symulacyjnych procedur obliczeniowych dla potrzeb projektowania budownictwa o zrównoważonych systemach energetycznych.

DETERMINATION OF PSALI PERFORMANCE FOR BUILDING OPTIMISATION – ENERGY EFFICIENCY

Summary: The energy performance of supplementary lighting is discussed in a paper. For the purpose of multicriterion optimisation refined TDI index was proposed as an indicator of illuminance level and energy requirements. Additionally, different luminous efficacy of artificial lighting source was presented and discussed. Finally, some criteria of supplementary lighting efficiency was formulated.

Literatura

- [1] Baker N., Steemers K., Daylight Design of Buildings: A Handbook for Architects and Engineers. James & James /Earthscan, 2002.
- [2] Praca zbiorowa, Daylight in Buildings. A source book of daylighting system and components. A report of IEA SHC Task 21/ECBCS Annex 29, July 2000.
- [3] Klemm P., *Światło w pomieszczeniach*. Budownictwo ogólne – Fizyka Budowli, tom 2, rozdział 7. s. 481-507. Arkady, Warszawa 2005.
- [4] Heim D. (red.): Komputerowa analiza oświetlenia dziennego i ocena parametrów komfortu wizualnego w pomieszczeniach, Łódź 2007.
- [5] Heim D., Romanowska A., Szczepańska E.: *Energochłonność oświetlenia uzupełniającego w kontekście wykorzystania światła dziennego*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce 2007, Tom 2 s. 101-104, 2007.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2008-2011, jako projekt badawczy nr 3989/B/T02/2008/35 „Wielokryterialna optymalizacja budynków mieszkalnych z uwzględnieniem kryteriów: ekonomicznych, ochrony środowiska oraz komfortu w okresie całego roku”.