

## Oddziaływanie strumienia świetlnego pośredniego na warunki oświetleniowe wąskich ciągów komunikacyjnych obiektów magazynowych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań związanych z dokładnością obliczeniową aplikacji oświetleniowych. Badania zrealizowano dla środowiska hali magazynowej wysokiego składowania, gdzie szczególnie nasila się zjawisko odbić wielokrotnych promieni świetlnych. Jako weryfikację uzyskanych wyników obliczeń symulacyjnych przyjęto pomiary w środowisku rzeczywistym. Analiza porównawcza wyników prac symulacyjnych oraz pomiarów rzeczywistych pozwoliła wyodrębnić oraz ocenić wpływ szeregu czynników na użyteczność obliczeniową zastosowanego narzędzia symulacyjnego.

**Abstract.** The article presents selected research results related to the computational accuracy of lighting applications. The research was carried out in the environment of a high-storage warehouse, where the phenomenon of multiple reflections of light rays is particularly intense. Measurements in a real environment were used as verification of the obtained results of simulation calculations. Comparative analysis of the results of simulation work and real measurements allowed to isolate and assess the impact of a number of factors on the computational usefulness of the simulation tool used. *(The impact of indirect light flux on lighting conditions of narrow communication routes of warehouse facilities)*

**Słowa kluczowe:** oświetlenie pomieszczeń przemysłowych, symulacje komputerowe, odbicia wielokrotne promieni świetlnych  
**Keywords:** lighting of industrial rooms, computer simulations, multiple reflections of light rays

### Wstęp

Środowisko świetlne magazynów wysokiego składowania podlega szczególnym uwarunkowaniom, związanym ze składowaniem wielkogabarytowych towarów na dużych wysokościach. Stałe pobieranie i uzupełnianie przez personel magazynu produktów na regałach wymaga zapewnienia dobrej widoczności zarówno na podłożu jak i na pionowych płaszczyznach stykających się do konstrukcji regałów [1]. Odpowiednie warunki widoczności uzyskiwane są dzięki wypromieniowaniu w dół półprzestrzeń z poszczególnych opraw oświetleniowych składowych bezpośrednich i odbiciowych strumienia świetlnego [2].

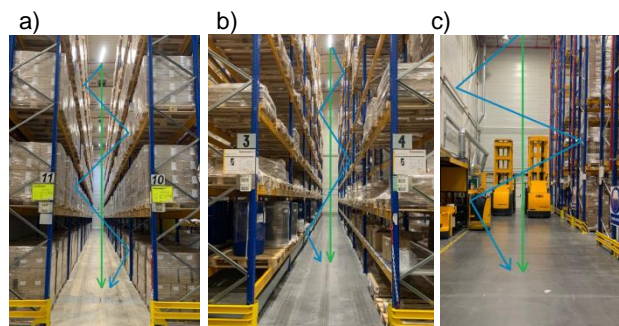
Składowa bezpośrednia strumienia dociera do podłoża bez strat odbiciowych, natomiast składowa pośrednia wchodzi w interakcję z elementami regałów bądź ścian magazynu. Poprzez wielokrotne odbicia, ulega ona częściowemu wytłumieniu i finalnie dociera do podłoża wzmacniając składową bezpośrednią. Jej udział, odpowiednio od warunków środowiska świetlnego, obejmować może przykładowo ok 1/4 - 1/3 całości wyemitowanego strumienia świetlnego z opraw oświetleniowych rozmieszczonych w magazynie.

Możliwy jest też udział składowej odbiciowej pojedynczej lub wielokrotnej w innych obszarach oświetlenia np. takich jak np. iluminacje [3]. Promienie świetlne składowej bezpośredniej tworzą podstawowy obraz nocny obiektu. Oczywiście niewielka część składowej bezpośredniej zostanie wypromieniowana poza kontur iluminowanego obiektu [4].

Zróznicowana kolorystyka elewacji oraz strefy obiektu budowlanego sprzyjające powstawaniu odbić wielokrotnych (np. krużganki, loggie) wpływają będą dodatkowo na finalny obraz iluminacji oraz jej odbiór estetyczny [5,6,7,8]. W odniesieniu do środowiska świetlnego wnętrza składowa odbiciowa jest natomiast czynnikiem mogącym mieć istotny wpływ na poziom rozświetlenia regałów oraz aktywnie uczestniczyć w tworzeniu warunków oświetleniowych na podłożu ciągu komunikacyjnego (Rys.1).

Ciągi komunikacyjne wewnątrz przykładowej hali magazynowej obejmują zasadniczo wąskie strefy pomiędzy

regałami (S1) oraz główne odcinki dojazdowo-wyjazdowe wewnątrz hali (S2). W zdecydowanej większości rozwiązań konstrukcyjnych hal magazynowych te dwie strefy występują (oczywiście w wariantach zróżnicowanych ilością stref S1 i S2). Te dwa rodzaje obszarów hali stały się przedmiotem dalszej analizy szczegółowej, obejmującej ich specyfikę środowiska świetlnego.

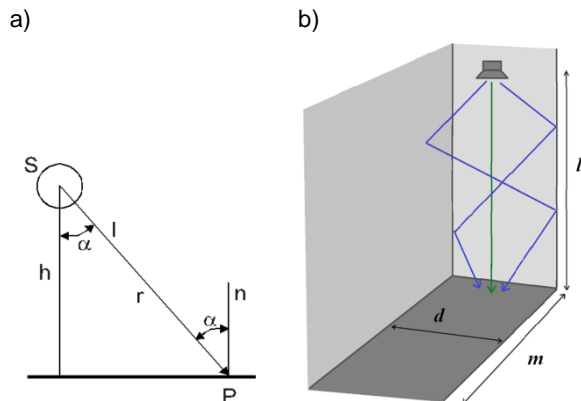


Rys.1. Wizualizacja udziału składowej odbiciowej w kształtowaniu warunków oświetleniowych a) dla strefy komunikacyjnej pomiędzy regałami ze znacznym wypełnieniem towarem (S1) b) z częściowym wypełnieniem półek towarem (S1) oraz c) głównego ciągu komunikacji hali magazynowej (S2)

Dla strefy (S1) niewielka odległość pomiędzy regałami oraz zmienny układ wypełnienia regałów towarem sprzyjać będzie dynamicznym zmianom wartości składowej odbiciowej. Dla ciągów komunikacyjnych głównych (S2) należy przyjąć większe odległości pomiędzy ścianami magazynu a regałami oraz stały charakter odbić od ścian. Oddziaływanie składowej odbiciowej strumienia świetlnego na zmianę warunków widoczności podłoża pomiędzy regałami strefy (S2) będzie mniej aktywne. Zatem istotna różnica pomiędzy środowiskami świetlnymi stref (S1) i (S2) polega na innym udziale składowej pośredniej strumienia świetlnego wypromieniowanego z opraw oświetleniowych.

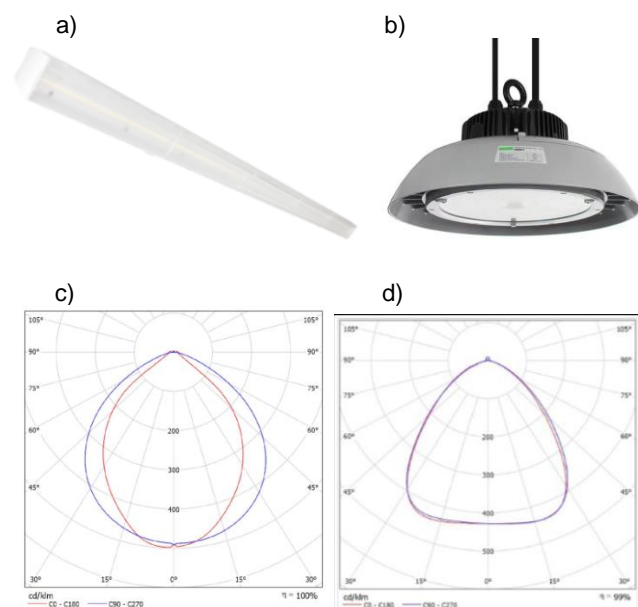
## Realizacja symulacyjna oświetlenia ciągu komunikacyjnego

Wartość składowej odbiciowej uzależniona jest od długości drogi  $r$ , po której biegają elementarne promienie świetlne, wartości  $i$  i charakteru współczynnika odbicia światła  $\rho$  powierzchni towarów wypełniających półki regałów, wysokości regałów  $l$ , szerokości ciągu komunikacyjnego  $d$  pomiędzy dwoma sąsiadującymi regałami oraz długości obu sąsiednich regałów  $m$  (Rys.2).



Rys.2. Ilustracja a) biegu promienia elementarnego od źródła S do punktu P po drodze  $r$  oraz b) wpływu czynników geometrycznych strefy wysokiego składowania na składową odbiciową strumienia świetlnego wewnątrz oprawy magazynowej, gdzie  $l$  – wysokość strefy składowania,  $m$  – długość strefy składowania,  $d$  – szerokość strefy składowania

Oczywiście zarówno składowa bezpośrednia jak i pośrednia podlegają fizycznemu prawu zaniku wartości strumienia świetlnego w funkcji pokonywanego dystansu od źródła światła do oświetlanej powierzchni zgodnie ze znanym prawem odwrotnych kwadratów [9]. Z powyższych wielkości parametr  $\rho$  może ulec dynamicznym zmianom z uwagi na zmiany rodzaju magazynowanego towaru (zmiana kolorystyki, rodzaju i wielkości powierzchni opakowań). Problemem do rozstrzygnięcia jest więc oszacowanie skali wpływu tych zmian na ilość odbić wielokrotnych składowej pośredniej i finalnie jej wpływ na warunki oświetlenia ciągu komunikacyjnego, które powinny być zgodne ze wskazaniami normatywnymi [10].

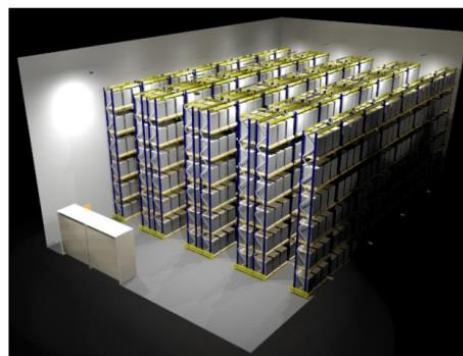


Rys.3. Oprawy ledowe dedykowane do oświetlenia hali magazynowej a) widok oraz b) ich rozsyły światłości [11,12]

Prace szczegółowe zostały zrealizowane z wykorzystaniem komputerowej aplikacji wspomagającej obliczenia oświetlenia [13]. Współcześnie metody komputerowe wspomagające prace projektowe nie tylko oświetlenia wnętrznego są uznaniem i praktykowanym wsparciem gwarantującym wysoki poziom zgodności wyników obliczeń symulacyjnych z weryfikacyjnymi pomiarami poligonalnymi [14]. W środowisku oprogramowania odwzorowano halę magazynową z rozpatrywanym odcinkiem ciągu komunikacyjnego w strefie S1 i S2 oraz system regałów wysokiego składowania. Z rodziny opraw przemysłowych wnętrznym wybrane zostały liniowe oprawy LED z rozsyłem symetrycznym w dwu wzajemnie prostopadłych płaszczyznach odniesieniowych (Rys. 3)

W komputerowym modelu hali magazynowej uwzględniono rozmieszczenie na regałach towaru o przyjętych cechach refleksyjnych. Ostatecznie w wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano rozkład natężenia oświetlenia  $E$  na zdefiniowanych powierzchniach obliczeniowych obu stref (Rys.4). W kolejnym kroku dokonano weryfikacji obliczeniowej realizując pomiary porównawcze w obiekcie rzeczywistym [15,16].

Pomiary na wyznaczonych polach analizy wykonano dokonując rejestracji natężenia oświetlenia w punktach węzłowych siatki pomiarowej. Zarówno w przypadku obliczeń komputerowych jak i rzeczywistych wystąpiła składowa odbiciowa strumienia świetlnego.



Rys.4. Wizualizacja komputerowa warunków oświetleniowych w hali magazynowej wysokiego składowania

Wstępnie w środowisku komputerowym odwzorowane zostały warunki oświetleniowe obejmujące ten sam poziom i rodzaj wypełnienia półek towarem co w warunkach rzeczywistych (obliczenia symulacji 1). Na tym etapie możliwa była ocena zgodności wyników obliczeniowych z rzeczywistymi – błąd pomiarowy 1. W kolejnym kroku prac symulacyjnych rozpatrywano inny poziom wypełnienia półek towarem. Przyjęto nieco inne współczynniki odbicia światła od powierzchni składowanego towaru niż dla wersji pomiarów rzeczywistych oraz pierwszego wariantu symulacji. Ten krok pozwolił na ocenę wpływu poziomu pochłaniania promieni elementarnych w kolejnych odbiciach składowej pośredniej oraz finalnie skalę błędu prac symulacyjnych związanych innym definiowaniem poziomu wypełnienia półek towarem (niezgodność co do ilości i rodzaju towaru). Ten błąd szacowano na etapie prac symulacji 2.

### Rezultaty obliczeń numerycznych

Uzyskane wyniki porównawcze analizy symulacyjnej oraz rzeczywistej wartości natężenia oświetlenia  $E$  w punktach pomiarowych odcinków stref komunikacyjnych S1 i S2 zostały zestawione na rysunku 5 oraz rysunku 6.

Dodatkowo dla każdej ze stref obliczony został względny błąd pomiarowy [17]. Błąd ten wyznaczony został w oparciu o poniższe zależności:

$$(1) \quad \Delta X = |X_s - X_m|$$

gdzie:  $\Delta X$  - błąd bezwzględny,  $X_s$  - wartość parametru uzyskana na drodze symulacyjnej,  $X_m$  - wartość parametru uzyskana na drodze pomiaru,

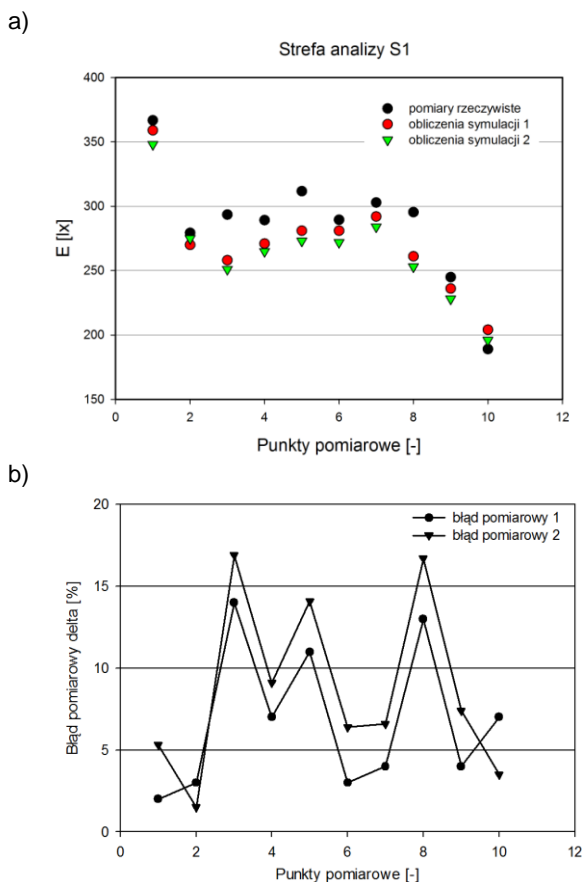
$$(2) \quad \delta = \Delta X / X_s$$

gdzie:  $\delta$  - błąd względny,

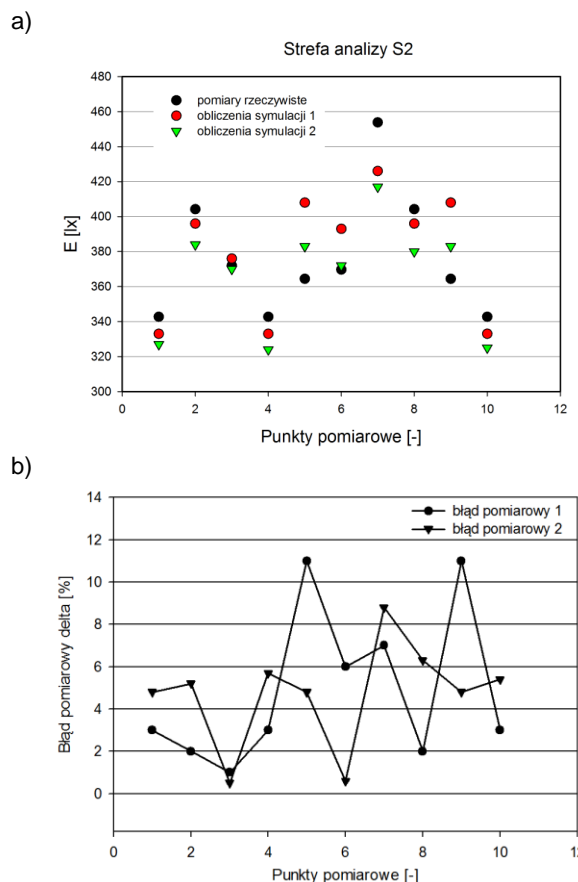
$$(3) \quad \delta\% = (\Delta X / X_s) \cdot 100\%$$

gdzie:  $\delta\%$  - względny błąd procentowy.

Dla strefy S1, gdzie występuje wąski ciąg komunikacyjny rozbieżność wyników obliczeniowych i pomiarowych jest większa [18-20]. Wynika to z większej liczby odbić wielokrotnych, a tym samym większej skali tłumienia promieni świetlnych składowej pośredniej. Dla wszystkich analizowanych punktów pomiarowych błąd względny lokalnie nie przekracza 15%. Z kolei dla strefy S2 z szerszym ciągiem komunikacyjnym oraz pojedynczym regałem składowania towaru błąd względny przekroczył lokalnie nieznacznie 10%. Potwierdza ten wynik przypuszczenie, że oddziaływanie tłumiące ściany magazynu będzie mniej aktywne niż to ma miejsce w przypadku regału.



Rys. 5. Porównanie wartości natężenia oświetlenia E uzyskanych na zdefiniowanej powierzchni komunikacyjnej w warunkach rzeczywistych i symulacyjnych dla strefy S1 a) oraz odniesieniowy błąd względny b)



Rys. 6. Porównanie wartości natężenia oświetlenia E uzyskanych na zdefiniowanej powierzchni komunikacyjnej w warunkach rzeczywistych i symulacyjnych dla strefy S1 a) oraz odniesieniowy błąd względny b)

## Podsumowanie

Główne wnioski końcowe można zestawić w postaci czterech wątków tematycznych. Można spodziewać się pogłębienia skali błędu względnego dla towarów opakowywanych ciemniejszymi materiałami (np. foliowanych ciemną folią). Sugeruje się, aby szczególnie dla długich i wąskich ciągów komunikacyjnych z wysokimi regałami, na etapie projektowania symulacyjnego i doboru opraw oświetleniowych, nieco zwiększyć współczynnik konserwacji, uwzględniający okresowe pogorszenie warunków odbicia strumienia świetlnego od powierzchni składowanych towarów.

Główne ciągi komunikacyjne są mniej narażone na oddziaływanie składowej pośredniej strumienia świetlnego opraw oświetleniowych, mimo to korzystnym byłoby malowanie wewnętrznych powierzchni hal jasnymi farbami. O ile nie ma w tym zakresie innych przeciwwskazań korzystne jest stosowanie do oświetlenia wąskich ciągów komunikacyjnych oprawami o skoncentrowanych rozsyłach strumienia świetlnego w jednej z płaszczyzn odniesieniowych, prostopadłych do osi ciągu komunikacyjnego.

**Autorzy:** dr hab. inż. Sebastian Różowicz, prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, Ul. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, e-mail: s.rozowicz@tu.kielce.pl; dr hab. inż. Henryk Wachta, prof. PRZ, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: hwachta@prz.edu.pl; dr inż. Krzysztof Baran, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: kbaran@prz.edu.pl; dr inż. Marcin Leśko, Politechnika

#### LITERATURA

- [1] Żagan W., Podstawy Techniki Świetlnej, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, (2022)
- [2] Żagan W., Oprawy oświetleniowe, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, (2012)
- [3] Różowicz S., Use of the mathematical model of the ignition system to analyze the spark discharge, including the destruction of spark plug electrodes, *Open Physics.*, vol. 16, pp. 57-62 (2018), doi: 10.1515/phys-2018-0011.
- [4] Skarżyński K., Rutkowska A., The Interplay between Parameters of Light Pollution and Energy Efficiency for Outdoor Amenity Lighting, *Energies* (2023), 16(8)
- [5] Różowicz A.; Wachta H., Baran, K., Leśko M.; Różowicz S.; Arrangement of LEDs and Their Impact on Thermal Operating Conditions in High-Power Luminaires; *ENERGIES* nov 2022; Volume 15; Issue 21; doi 10.3390/en15218142.
- [6] Różowicz, S. The effect of different ignition cables on spark plug durability. (in Polish) *Przegląd Elektrotechniczny* 2018, 94, 191–195; doi:10.15199/48.2018.04.43.
- [7] Bewszko T, Wachta H., Multi-criteria decision aid for planning lighting technology of architectural objects, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2022), Nr 8, 21-25, ISSN: 0033-2097
- [8] Pracki P., Projektowanie oświetlenia wnętrz, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, (2011)
- [9] PN-EN 12464-1 Oświetlenie miejsc pracy – Miejsca pracy we wnętrzach
- [10] [https://ledolux.pl/wp-content/uploads/2023/11/Karta\\_katalogowa\\_Ledolux\\_Poland\\_ORBIT.pdf](https://ledolux.pl/wp-content/uploads/2023/11/Karta_katalogowa_Ledolux_Poland_ORBIT.pdf) (dostęp: luty 2024 r)
- [11] [https://ledolux.pl/wp-content/uploads/2023/07/Karta\\_katalogowa\\_Ledolux\\_Poland\\_HD\\_LINE-1.pdf](https://ledolux.pl/wp-content/uploads/2023/07/Karta_katalogowa_Ledolux_Poland_HD_LINE-1.pdf) (dostęp: luty 2024 r)
- [12] Różowicz, S. Voltage modelling in ignition coil using magnetic coupling of fractional order. *Archives of Electrical Engineering* 2019, 68, 227–235. doi 10.24425/ae.2019.128264
- [13] <https://www.dialux.com/en-GB/dialux-pro> (dostęp: luty 2024 r)
- [14] Krupiński R., Simulation and Analysis of Floodlighting Based on 3D Computer Graphics, *Energies* 2021, 14(4), 1042
- [15] <https://www.konicaminolta.pl/pl-pl/urządzenia/urządzenia-pomiarowe/pomiarswiatla-i-wyswietlaczy/mierniki-natezenia-oswietlenia/cl-200a> (dostęp: luty 2024 r)
- [16] Kotulski Z., Szczepiński W., *Rachunek błędów dla inżynierów, Wydawnictwo Naukowe PWN*, (2018)
- [17] Różowicz, S.; Zawadzki, A. Experimental verification of signal propagation in automotive ignition cables modelled with distributed parameter circuit. *Archives of Electrical Engineering*. 2019, 68, 667–675; doi:10.24425/ae.2019.129349.
- [18] Kadali B.R., Vedagiri P., Evaluation of pedestrian crossing speed change patterns at unprotected mid-block crosswalks in India. *J. Traffic Transp. Eng. (Engl. Ed.)* 7, 832–842, 2020. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.10.010
- [19] Malin F., Luoma J., Effects of speed display signs on driving speed at pedestrian crossings on collector streets. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, 74, 433–438, 2020. DOI: 10.1016/j.trf.2020.09.004
- [20] Bommel W., *Road Lighting. Fundamentals, Technology and Application*, Springer, 2015.