



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

Autoreferat rozprawy doktorskiej

*Analiza możliwości poprawy efektywności energetycznej,
w kontekście adaptacji oświetlenia pomieszczeń w budynku
biurowym poprzez personalizację warunków oświetlenia*

*Analysis of the possibilities to improve energy efficiency
in the context of the indoor lighting adaptation in an office building,
through a personalization of the lighting conditions*

Autor: mgr inż. Mirosław Dechnik
Promotor: dr hab. inż. Robert Stala, prof. AGH
Promotor pomocniczy: dr inż. Szczepan Moskwa

Kraków, 2021 r.

1. Wstęp

Technika świetlna jest interdyscyplinarną dziedziną, która łączy elementy techniczne pracy instalacji oświetleniowej, aspekt zdrowotny funkcjonowania użytkownika w wytwarzanych warunkach oświetleniowych, a także kwestie estetyczne. Wszystkie te elementy należy uwzględniać przy wszelkiego rodzaju rozważaniach na temat oświetlenia.

W biurach oświetlenie wewnątrz jest eksploatowane bardzo intensywnie, przez co stanowi jeden z głównych elementów ich energochłonności. Dzięki możliwościom funkcjonalnym zintegrowanych systemów sterowania i automatyzacji w budynkach typu *smart*, możliwa jest racjonalizacja zużycia energii w obszarze oświetlenia, a także poprawa warunków pracy wzrokowej ludzi. Obecnie, za sprawą wysokiej skuteczności świetlnej źródeł LED podczas pracy w stanie zredukowanego naświetlania, na znaczeniu zyskują metody energooszczędnego sterowania oświetleniem wykorzystujące ściemnianie lamp. Jedną z takich metod jest regulacja indywidualna, która umożliwi lokalne dostosowanie ustawień oświetlenia poszczególnych stanowisk pracy do osobistych upodobań i preferowanego rozkładu luminancji, a przez to uzyskanie indywidualnej wygody widzenia. Tego typu sterowanie oświetleniem jest przedmiotem badań już od ponad dwóch dekad, jednak dotychczasowe prace dotyczyły przede wszystkim biur prywatnych oraz wieloosobowych, wyposażonych w boksy. W biurach typu *open space* ta forma sterowania oświetleniem jest relatywnie młodą dziedziną badań, a w kraju tematyka ta nie była do tej pory podejmowana.

2. Teza pracy

Dzięki możliwościom funkcjonalnym zintegrowanych systemów sterowania i automatyzacji w budynkach typu *smart*, możliwe jest efektywne zarządzanie energią, a także stworzenie ergonomicznych warunków pracy wzrokowej ludzi. Warunkiem uzyskania wysokiej efektywności energetycznej w rzeczywistym obiekcie, jest akceptowalność rozwiązań, która może być uzyskana jedynie dzięki osiągnięciu satysfakcji użytkowników z działań podejmowanych przez system automatycznego sterowania. W tym celu konieczna jest realizacja funkcji sterowania zapewniających możliwość personalizacji warunków oświetlenia, a dzięki temu stałą i wysoką ergonomię warunków oświetlenia dostosowanych dla potrzeb poszczególnych użytkowników. Dlatego też, tezę pracy autor formułuje w stwierdzeniu: **Możliwa jest poprawa efektywności energetycznej pracy instalacji oświetleniowej, poprzez adaptację oświetlenia pomieszczeń w budynku biurowym typu *smart*, do realizacji nadrzędnej funkcji sterowania mającej na celu wytworzenie spersonalizowanych warunków oświetlenia dostosowanych do potrzeb poszczególnych użytkowników. Obniżenie zużycia energii będzie następstwem nie tylko zróżnicowania warunków oświetleniowych w pomieszczeniu na skutek sterowania, ale także akceptacji użytkowników dla podejmowanych automatycznie działań.**

W celu zweryfikowania tezy, zrealizowane zostały następujące zadania, stanowiące cele pracy:

- Analiza wierności odwzorowania rzeczywistego otoczenia świetlnego w oprogramowaniu symulacyjnym i identyfikacja czynników mających istotny wpływ na uzyskiwane wyniki.
- Analiza możliwości poprawy efektywności energetycznej pracy instalacji oświetleniowej, z wykorzystaniem nowoczesnej instalacji elektrycznej stosowanej w budownictwie typu *smart*.
- Identyfikacja parametrów otoczenia świetlnego i zjawisk towarzyszących pracy instalacji oświetleniowej, które mogą mieć wpływ na ocenę oświetlenia i sposobu jego sterowania przez użytkowników.
- Propozycja rozwiązania, symulacje, opracowanie prototypu systemu.
- Weryfikacja działania w środowisku rzeczywistym, analiza porównawcza efektywności energetycznej pracy instalacji oświetleniowej w przestrzeni biurowej przy różnych wariantach sterowania, konfiguracjach nastaw i warunków zewnętrznych, analiza efektywności energetycznej działania systemu z uwzględnieniem akceptacji użytkowników dla podejmowanych automatycznie działań, ocena rozwiązania.
- Opracowanie wytycznych do ustawień oświetlenia w budynku biurowym, z wykorzystaniem nowoczesnych instalacji elektrycznych stosowanych w budynkach biurowych typu *smart*, realizującego cele:
 - funkcję oświetlania, wytworzenie ergonomicznych warunków pracy wzrokowej,
 - uwzględnienie indywidualnych potrzeb użytkowników, poprzez dostosowanie warunków oświetleniowych do ich preferencji,
 - reagowanie na zachowania użytkowników, poprzez dostosowanie warunków oświetleniowych do ich obecności lub rodzaju wykonywanego zadania wzrokowego,
 - intuicyjną obsługę i komunikację, również dla nieobytych z techniką użytkowników.

Opracowane wytyczne będą uwzględniały liczne czynniki:

- liczbę użytkowników i ich rozmieszczenie w pomieszczeniu,
- metodę identyfikacji użytkownika,
- metodę komunikacji z użytkownikiem,
- rodzaj i specyfikę użytkownika przestrzeni biurowej,
- stopień niezależności sterowania opraw,
- sprawność układu zasilającego pracującego ze zmiennym obciążeniem,
- starzenie źródeł światła i opraw oświetleniowych, możliwość kompensowania uszkodzonych lub słabiej świecących lamp,
- wpływ warunków termicznych w pomieszczeniu na zmienność parametrów jakościowych emitowanego światła,

- wpływ warunków zasilania na zmienność parametrów jakościowych emitowanego światła,
- efekt energetyczny proponowanego rozwiązania oraz stopień możliwych do osiągnięcia oszczędności.
- Analiza możliwości jednoczesnej realizacji pozostałych celów sterowania, stawianych przed systemem oświetleniowym typu *smart*.

3. Struktura pracy

Praca składa się z sześciu zasadniczych rozdziałów, w których zawarto opisy analiz, badań symulacyjnych, ankietowych i doświadczalnych prowadzonych z wykorzystaniem infrastruktury Małopolskiego Laboratorium Budownictwa Energooszczędnego (MLBE) Politechniki Krakowskiej, w zakresie możliwości poprawy efektywności energetycznej oświetlenia, przy użyciu nowoczesnej instalacji elektrycznej stosowanej w budownictwie biurowym typu *smart*. Spis cytowanej literatury obejmuje 391 pozycji.

4. Charakterystyka pracy oraz przyjęte metody badawcze

We wstępie pracy przedstawiono rolę światła w życiu człowieka, rozwój techniki świetlnej, scharakteryzowano proces projektowania instalacji elektrycznej oświetleniowej i zwrócono uwagę na przyczyny występowania nieoptymalnych warunków oświetleniowych w biurach. Następnie zdefiniowano pojęcie efektywności energetycznej oraz jej poprawy w kontekście instalacji oświetleniowej budynku. Zwrócono uwagę na problematykę efektywności energetycznej budynków we współczesnym świecie, a także oddziaływanie instalacji oświetleniowej na profil energetyczny budynku – szczególnie silne w budynkach biurowych. Wskazano również ogólne sposoby obniżania zapotrzebowania na energię przez oświetlenie oraz zwrócono uwagę na łatwość implementacji nowoczesnych rozwiązań z zakresu energooszczędnych systemów automatycznego sterowania oświetleniem w budynkach typu *smart*. Poczynając od opisu tradycyjnych i nowoczesnych instalacji elektrycznych, przedstawiono ideę budownictwa typu *smart*, a także zdefiniowano pojęcie budynku tego typu. Następnie przedstawiono zestaw cech instalacji oświetleniowej typu *smart*, które określają obecne cele rozwoju tego typu systemów. Na podstawie tych rozważań sformułowano tezę oraz wyznaczono zadania stanowiące cele pracy. Następnie w kolejnych rozdziałach rozprawy realizowano założone cele.

Na początku **rozdziału 2**, na podstawie analizy dostępnej literatury, autor pokazał znaczący udział budynków w światowym zużyciu energii, a także wykazał, że oświetlenie jest obszarem o istotnym wpływie na bilans energetyczny całego budynku, zwłaszcza biurowego (w budynkach tego typu odpowiada ono za 14–40% zużywanej energii ogółem oraz 20–60%

zużywanej energii elektrycznej). Tego typu zestawienie danych, oparte na tak licznych źródłach nie było prezentowane w znanej autorowi literaturze.

Następnie przedstawiono czynniki decydujące o energochłonności oświetlenia wewnątrz oraz scharakteryzowano nowoczesne źródła światła LED, ze szczególnym uwzględnieniem cech predestynujących je do zastosowania w energooszczędnych systemach sterowania oświetleniem. Opisano również zintegrowany system sterowania i automatyzacji budynku typu *smart* oraz przedstawiono jego obszary funkcjonalne, zwracając szczególną uwagę na podsystemy funkcjonalne wpływające na efektywność energetyczną budynku. Zwrócono także uwagę na aspekt akceptacji przez ludzi systemów automatycznego sterowania, który bywa zaniedbywany, a jest często kluczowy dla osiągnięcia rzeczywistej, wysokiej efektywności energetycznej istniejących budynków. Wskazano główne czynniki prowadzące do braku akceptacji oraz podano cechy systemu automatycznego sterowania oświetleniem w biurze, które sprzyjają jego akceptacji przez użytkowników.

W następnej kolejności opisano biura na planie otwartym (typu *open space*), których oświetlenie będzie rozważane w dalszej części pracy. Biura te charakteryzują się brakiem przegród między stanowiskami (w przeciwieństwie do organizacji przestrzeni w formie boksów), przez co natężenie oświetlenia na danym stanowisku wynika z oddziaływania wszystkich lamp zamontowanych w pomieszczeniu. Zwrócono także uwagę na różne schematy zajętości stanowisk pracy w przestrzeniach biurowych.

W dalszej części rozdziału zaprezentowano energooszczędne funkcje systemu sterowania i automatyzacji budynku typu *smart* w obszarze sterowania oświetleniem. Przedstawiono zagadnienie rozmiaru niezależnie sterowanych stref oświetleniowych, podkreślając znaczenie sterowania na poziomie lokalnym (poszczególnych stanowisk pracy) dla optymalizacji zużycia energii oraz warunków oświetleniowych w wielkopowierzchniowych przestrzeniach biurowych. Scharakteryzowano metody ręcznego i automatycznego sterowania oświetleniem (w zależności od zajętości lub czynnika światła dziennego), regulację instytucjonalną oraz indywidualną, funkcję scen świetlnych, a także ich kombinacje w jednym systemie.

W oparciu o analizę dostępnej literatury międzynarodowej, autor przedstawił wyniki 82 badań symulacyjnych i doświadczalnych, dotyczących potencjału energooszczędności wybranych metod sterowania oświetleniem przestrzeni biurowych. Na podstawie przeprowadzonej metaanalizy raportowanych oszczędności energii, autor określił średnie oszczędności energii na oświetlenie w biurach uzyskiwane dzięki wybranym metodom sterowania¹:

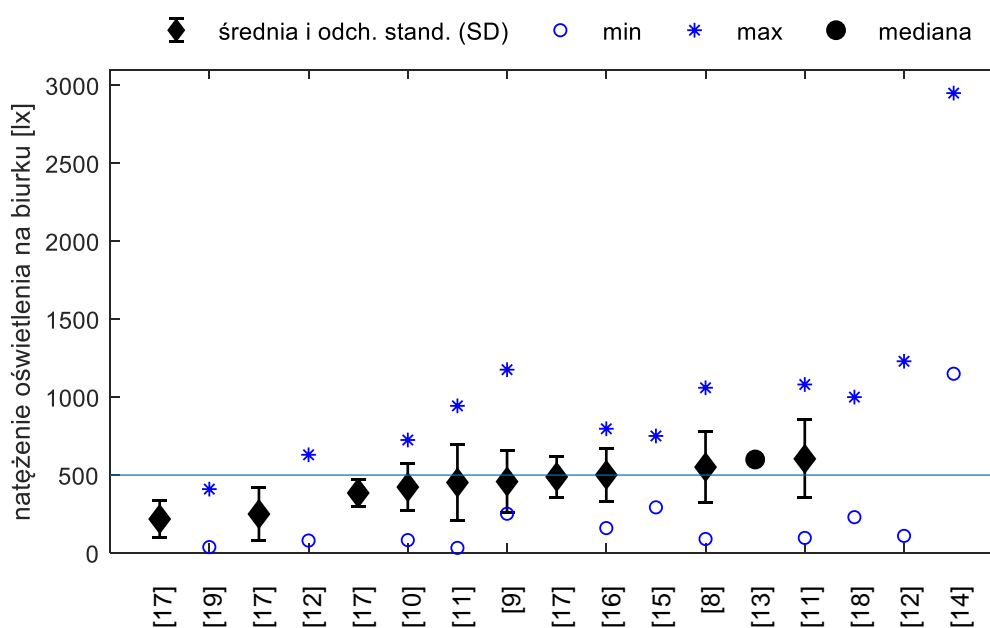
- 25% dla automatycznego sterowania od zajętości zgodnie z harmonogramem czasowym,
- 33% dla automatycznego sterowania od zajętości z wykrywaniem,
- 33% dla automatycznego sterowania z uwzględnieniem czynnika światła dziennego,

¹ Ze względu na przeszacowanie obserwowane w wynikach badań symulacyjnych, wzięto pod uwagę jedynie prace doświadczalne – w pracach tych monitorowano przypadek testowy oraz odniesienia lub monitorowano przypadek testowy, a obliczano przypadek odniesienia.

- 44% dla kombinacji różnych metod sterowania,
- 18% dla regulacji indywidualnej.

Uzasadnieniem podjęcia badań własnych w tym zakresie, była konieczność uaktualnienia stanu wiedzy (opublikowane w 2012 r. wyniki metaanalizy przeprowadzonej przez Williams, Atkinson, Garbesi, Page'a oraz Rubinsteina [1] nie uwzględniają najnowszych opracowań). W kontekście regulacji indywidualnej autor podkreślił, że biura typu *open space* były do tej pory przedmiotem badań potencjału energooszczędności jedynie o charakterze symulacyjnym, w których zakładano ponadto, że wszyscy użytkownicy preferują tę samą wartość natężenia oświetlenia.

W **rozdziale 3** przedstawiono obecne rekomendacje dotyczące oświetlenia biurowych stanowisk pracy, a następnie na podstawie analizy wyników badań pochodzących z 17 źródeł literaturowych pokazano, że indywidualne preferencje oświetleniowe ludzi są zróżnicowane, a w środowiskach biurowych znacząca liczba osób preferuje natężenie oświetlenia niższe niż rekomendowane (rysunek 1). Podkreślono także, że natężenie oświetlenia stanowi najistotniejszy czynnik oceny otoczenia świetlnego.

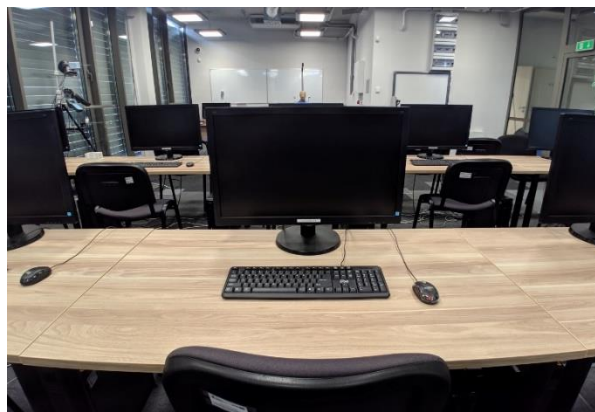


Rysunek 1. Porównanie preferowanych natężeń oświetlenia na stanowisku pracy biurowej (średnia wraz odchyleniem standardowym lub mediana – w zależności od podanych w materiale źródłowym) względem natężenia oświetlenia 500 lx zalecanego przez normę PN-EN 12464-1:2012 [2] (pozioma linia na wykresie).

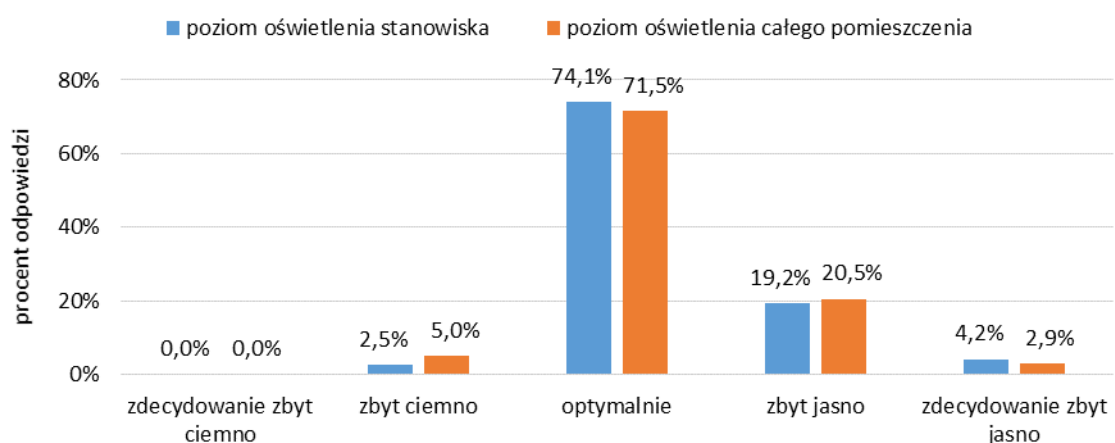
Następnie przedstawiono charakterystykę pomieszczeń budynku MLBE, które wybrano na potrzeby doświadczalnych badań własnych opisywanych w dalszej części rozprawy. Uzupełnieniem opisu są zaprezentowane wyniki pomiarów wybranych parametrów charakteryzujących jakość oświetlenia w rozważanych pomieszczeniach.

W tym rozdziale pracy zaprezentowano także wyniki ankietowych badań własnych, przeprowadzonych w pomieszczeniu doświadczalnym (rysunek 2). W oparciu o dostępną literaturę autor opracował kwestionariusz komputerowy, a następnie przeprowadził

doświadczenie z udziałem 239 osób, które oceniały warunki oświetleniowe w pomieszczeniu wzorowanym na nowoczesne biuro (z oświetleniem i monitorami typu LED), wytworzone zgodnie z obowiązującymi rekomendacjami². Ponieważ znaczący odsetek osób (ponad 23% – rysunek 3) preferował niższe natężenie oświetlenia, uzyskano potwierdzenie, że udostępnienie użytkownikom możliwości regulacji indywidualnej, będzie zapewniało dodatkowe oszczędności energii podczas ich obecności. Ponadto w wyniku przeprowadzonego badania wykazano, że jeżeli natężenie oświetlenia na stanowisku pracy odpowiada preferencjom ludzi, oceniają oni warunki oświetleniowe panujące w pomieszczeniu jako bardziej przyjemne, a także wykazują większą chęć do pracy, niż w przypadku gdy oświetlenie jest dla nich zbyt ciemne lub zbyt jasne. Osoby te częściej określają oświetlenie jako uspokajające lub relaksujące oraz najrzadziej odczuwają objawy zmęczenia oczu. Uzasadnieniem dla przeprowadzenia badania własnego była konieczność uaktualnienia stanu wiedzy, z uwagi na zmiany jakie zaszły w przestrzeniach biurowych w ostatnich latach.



Rysunek 2. Wygląd przykładowego stanowiska pracy biurowej podczas eksperymentu.

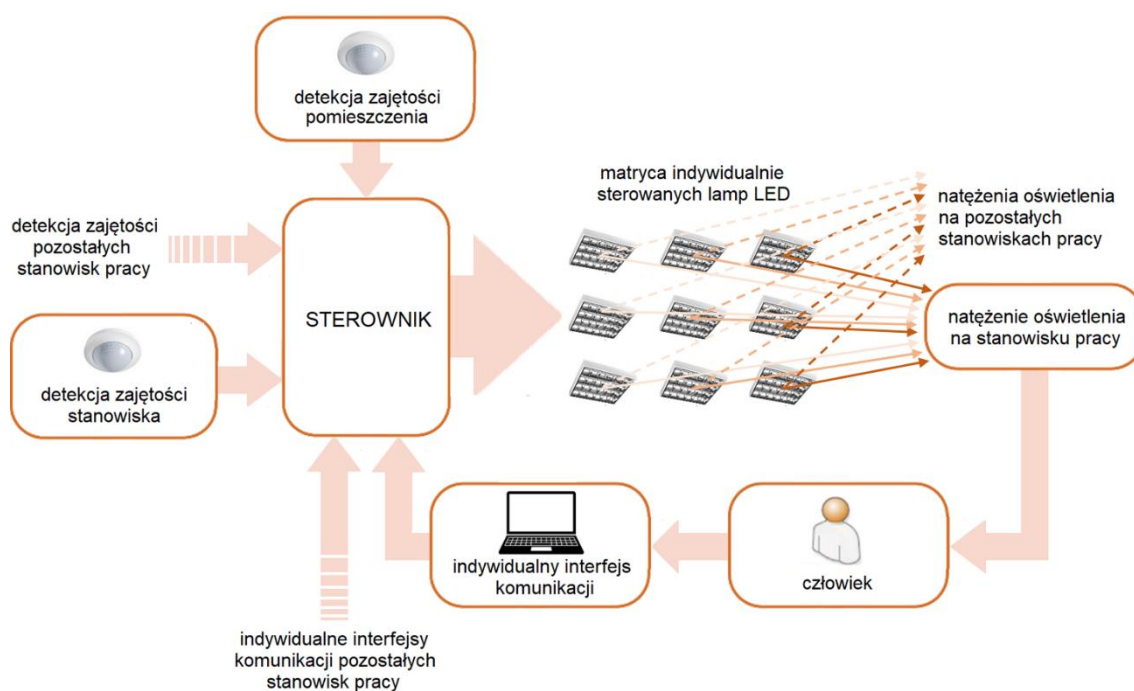


Rysunek 3. Ocena poziomów oświetlenia stanowiska oraz całego pomieszczenia.

² Istotne ograniczenie stosowanej metody, polega na tym, że uczestnicy badania mogą odpowiadać tak, jak myślą, że się od nich oczekuje. Dlatego, aby zminimalizować ten czynnik, uczestnicy zostali poinformowani jedynie o ogólnej idei badania dotyczącej oceny ergonomii stanowiska pracy, nie byli natomiast informowani o zgodności wytwarzanych warunków oświetleniowych z normą.

W kolejnej części pracy, w **rozdziale 4** uzasadniono potrzebę udostępnienia użytkownikom biur wieloosobowych możliwości sterowania oświetleniem własnego stanowiska (regulacji indywidualnej), ze szczególnym uwzględnieniem znaczenia i korzyści wynikających z takiego działania dla człowieka oraz poprawy jego komfortu. Zwrócono także uwagę na znaczenie koordynacji tego typu systemów osobistej kontroli środowiska z infrastrukturą budynku typu *smart* dla poprawy jego efektywności energetycznej.

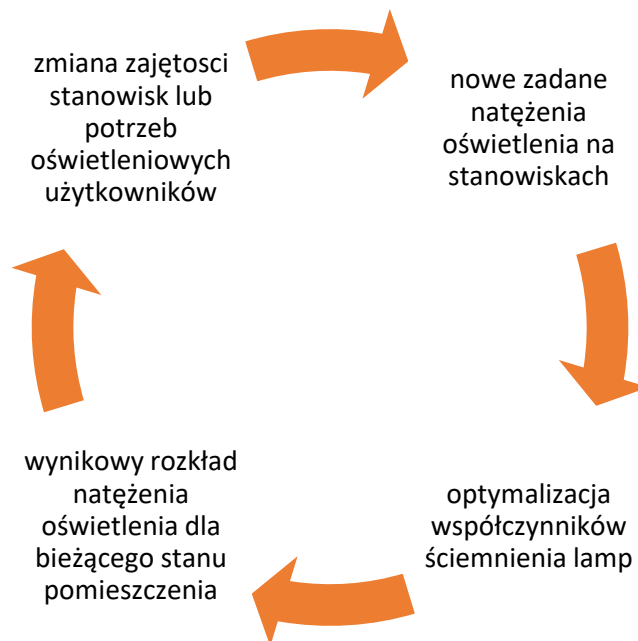
W oparciu o dotychczasowe rozważania, autor zaproponował koncepcję metody spersonalizowanego, lokalnego sterowania oświetleniem ogólnym w tego typu biurze, która łączy regulację indywidualną i sterowanie od zajętości poszczególnych stanowisk pracy (rysunek 4). Następnie opisał problematykę tego rodzaju sterowania w biurach typu *open space* oraz zaproponował schemat ideowy proponowanej metody sterowania (rysunek 5). Zwrócił również uwagę na ryzyko powstawania dyskomfortu wywołanego dynamiką zmian w oświetleniu, na skutek lokalnego sterowania w otwartych przestrzeniach biurowych i zaproponował rozwiązania mające na celu jego ograniczenie.



Rysunek 4. Koncepcja metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym w biurze typu *open space*, na przykładzie jednego ze stanowisk pracy. Oddziaływania z pozostałymi stanowiskami są analogiczne, dlatego zostały przedstawione zbiorczo, w sposób uproszczony.

Następnie autor przedstawił proces doboru modelu pomieszczenia doświadczalnego, zaaranżowanego jako biuro typu *open space*, opracowywanego z wykorzystaniem oprogramowania DIALux, na potrzeby symulacji różnych wariantów pracy systemu spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym. Z uwagi na ograniczenia metody, model był poddawany okresowej ocenie zbieżności rezultatów symulacji rozkładu natężenia oświetlenia z danymi empirycznymi, której dokonywano na podstawie analizy regresji, przy wykorzystaniu 1425-oczkowej siatki oświetleniowej. Ponieważ proste modele nie dawały zadowalających rezultatów, sporządzono szczegółowy model uwzględniający liczne elementy

pomieszczenia i jego wyposażenia. Następnie w celu skrócenia czasu obliczeń, uzyskany model poddano uproszczeniom o znikomym wpływie na wyniki symulacji rozkładu natężenia oświetlenia. W efekcie uzyskano bardzo dobre dopasowanie do danych empirycznych, przy akceptowalnym czasie kalkulacji pojedynczej sceny świetlnej, wynoszącym około 4 minut.



Rysunek 5. Schemat ideowy metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym w otwartej przestrzeni biurowej.

W kolejnej części pracy, autor podał szczegółowe wytyczne dla osiągnięcia docelowych warunków oświetleniowych w pomieszczeniach, w wyniku działania proponowanej metody sterowania. Zaproponował także oryginalne podejście do określania natężeń oświetlenia na przylegających, lecz niezajętych stanowiskach pracy w obrębie danej grupy biur (traktowanych jako obszar bezpośredniego otoczenia) dla zapewnienia równomiernego rozkładu luminancji w polu widzenia. Na potrzeby sterowania w układzie otwartym zaproponowano również, aby wyznaczanie natężeń oświetlenia na stanowiskach odbywało się na podstawie średniej z ich trzech charakterystycznych punktów.

W następnej kolejności, w celu określenia mapy zależności między współczynnikami ściemnienia lamp, a natężeniami oświetlenia wytwarzanymi na poszczególnych stanowiskach, na przykładzie pomieszczenia doświadczalnego autor opracował dwa modele matematyczne systemu oświetlenia: liniowy oraz nieliniowy, korzystając z metod modelowania odpowiednio: analitycznego oraz przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych (ANN). Oceny zbieżności wartości wyjściowych nauczonej sieci neuronowej z danymi wzorcowymi dokonano na podstawie analizy regresji oraz błędów popełnianych przez sieć.

W kolejnym etapie pracy problem lokalnego sterowania oświetleniem w otwartej przestrzeni biurowej sformułowano jako zadania programowania liniowego oraz optymalizacji nieliniowej z ograniczeniami. Autor, korzystając z programu Matlab

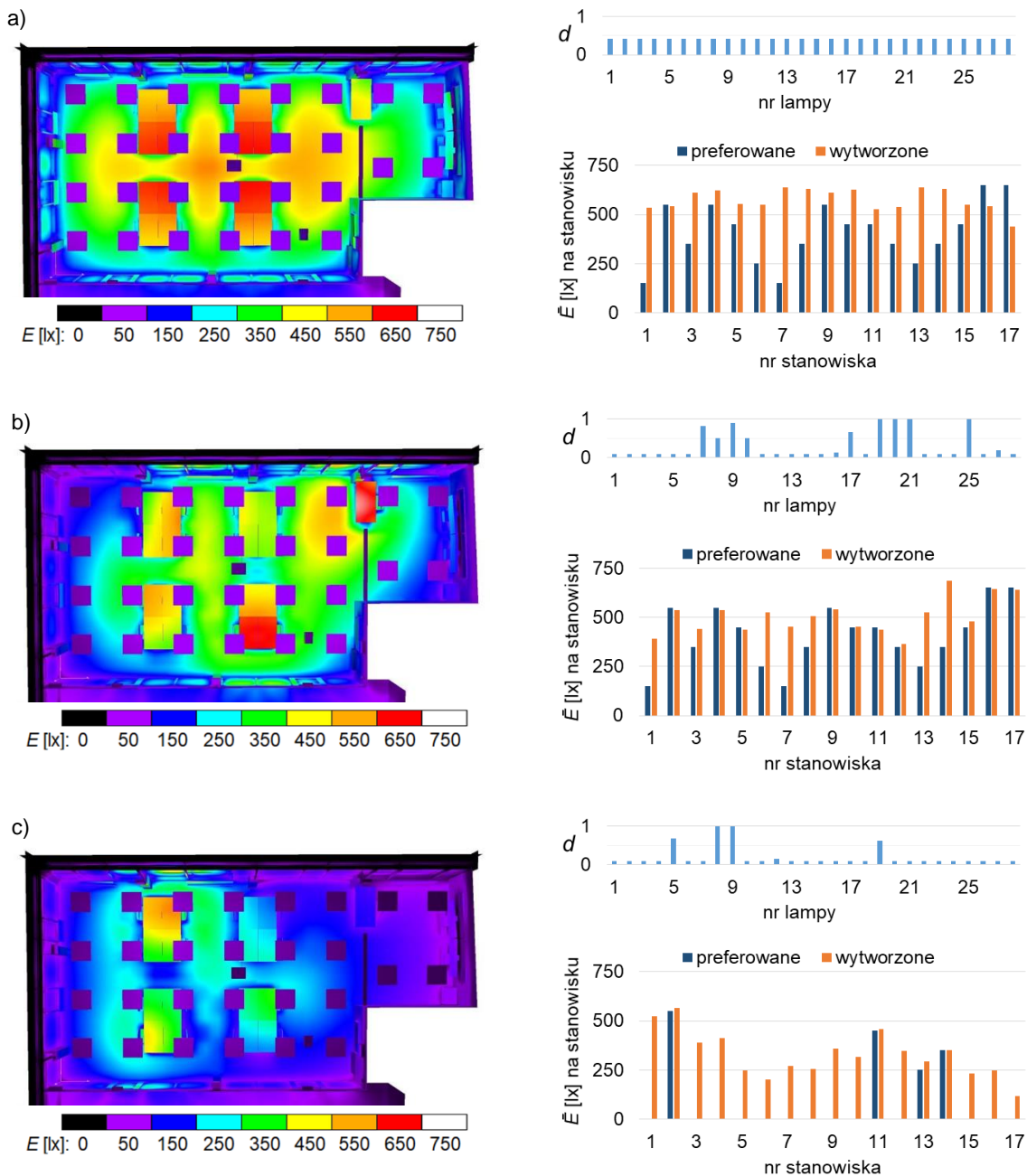
zapropował oryginalne algorytmy optymalizacji sterowania, wykorzystujące opracowane modele matematyczne systemu oświetleniowego³. W wyniku ich działania otrzymuje się zestaw współczynników ściemnienia poszczególnych lamp, zapewniający wytworzenie zadanego rozkładu natężenia oświetlenia w przestrzeni pomieszczenia, przy minimalnym zużyciu energii. Rozkład ten, wynika z potrzeby zaspokojenia indywidualnych potrzeb oświetleniowych na stanowiskach obecnych użytkowników (wytworzenie przynajmniej preferowanego natężenia oświetlenia), a także oświetlenia pozostałych obszarów i przestrzeni wnętrza. Jest on modyfikowany w odpowiedzi na zmieniające się potrzeby oświetleniowe użytkowników lub stan zajętości stanowisk pracy.

Dla przyjętych preferencji oświetleniowych użytkowników⁴ i wybranych stanów zajętości stanowisk autor przedstawił przykłady optymalnych rozwiązań, uzyskane przy zastosowaniu obu zaproponowanych metod optymalizacji. Na rysunku nr 6 zaprezentowano dwa przykładowe stany pracy systemu oświetleniowego sterowanego według zaproponowanej metody, w odniesieniu do działania tradycyjnej, nieprzewymiarowanej instalacji oświetleniowej⁵, w postaci: symulacji rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu doświadczalnym, współczynników ściemnienia lamp oraz średnich natężeń oświetlenia wytwarzanych na stanowiskach, w odniesieniu do wartości preferowanych przez użytkowników. Słupki preferowanych natężeń oświetlenia wskazują, które stanowiska pozostają zajęte. Na rysunku można zauważyć, że w procesie sterowania brane są pod uwagę indywidualne upodobania oświetleniowe użytkowników – w przeciwieństwie do klasycznej instalacji oświetleniowej, natężenia oświetlenia wytwarzane na poszczególnych stanowiskach są różnicowane według preferencji ich użytkowników. Ponadto, gdy część osób jest nieobecnych, intensywność oświetlenia nieużytkowanych stref zostaje zmniejszona, aby ograniczyć zużycie energii. Ze względu na komfort użytkowników, lampy nie pozostają jednak całkowicie wyłączone, lecz pracują przy przyjętym minimalnym współczynniku ściemnienia, oświetlając obszar bezpośredniego otoczenia, tła, a także pozostałe powierzchnie i przestrzeń wnętrza. Uzyskiwane średnie wartości bezwzględnych różnic procentowych między wytwarzanym, a preferowanym natężeniem oświetlenia na zajętych stanowiskach, przy różnym obciążeniu pomieszczenia, są znacząco niższe niż te, występujące dla tradycyjnej instalacji oświetleniowej (rysunek 7). Niższe obciążenie pomieszczenia, ze względu na mniejszą liczbę ograniczeń przy optymalizacji, sprzyja dokładniejszemu odwzorowaniu osobistych preferencji użytkowników.

³ Ograniczeniem obu podejść optymalizacyjnych jest założenie o liniowości poboru energii w funkcji współczynnika ściemnienia lamp. W przypadku modelu liniowego przyjęto ponadto uproszczenie w postaci liniowej zależności współczynnika ściemnienia i emitowanego strumienia świetlnego. Uproszczenia te jednak dobrze sprawdzają się w przypadku lamp LED, ze względu na ich niemal liniowe charakterystyki.

⁴ Ponieważ przyjęte preferencje w bezpośredni sposób rzutowały na uzyskiwane oszczędności energii, zdecydowano się przyjąć zróżnicowane potrzeby oświetleniowe na stanowiskach w oparciu o wyniki badania przeprowadzonego z udziałem 94 osób w biurach wyposażonych w boksy [3]. Dane te przełożono w sposób możliwie zbliżony na 17 użytkowników rozważanego pomieszczenia, których następnie przyporządkowano losowo do stanowisk.

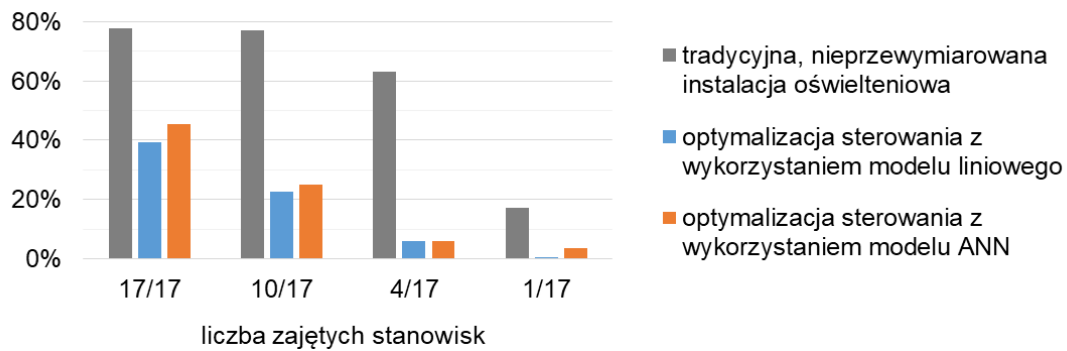
⁵ Tradycyjna, nieprzewymiarowana instalacja oświetleniowa rozumiana jest jako instalacja, w której wszystkie lampy wysterowane są wspólnie, wytwarzając średnie natężenie oświetlenia $\bar{E} \approx 500$ lx na obszarze zadania obejmującym całe pomieszczenie, z wyłączeniem pasa o szerokości 0,5 m wzdłuż ścian.



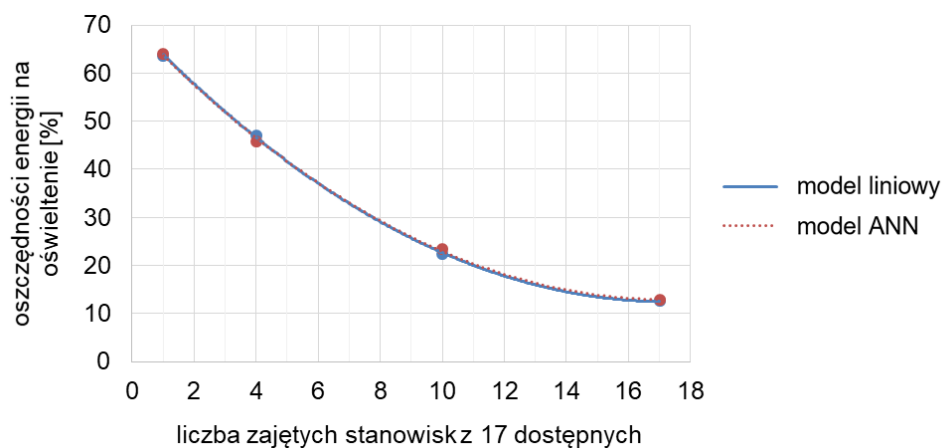
Rysunek 6. Przykładowe symulacje rozkładów natężenia oświetlenia w pomieszczeniu doświadczalnym, współczynników ściemnienia lamp (d) oraz średnich natężeń oświetlenia \bar{E} wytwarzanych na stanowiskach w odniesieniu do preferowanych wartości; a) tradycyjna instalacja oświetleniowa; przykłady optymalnych rozwiązań z wykorzystaniem modelu ANN dla: b) wszystkie 17 stanowisk zajętych, c) 4 z 17 stanowisk zajętych. Stanowiska pracy w pomieszczeniu ustawione są w grupach po 4, natomiast jedno pozostaje niezależne.

Następnie, na potrzeby badań doświadczalnych, wykorzystując infrastrukturę systemu sterowania i automatyzacji budynku MLBE autor dokonał implementacji prototypu systemu sterowania w pomieszczeniu doświadczalnym. Na podstawie pomiarów przeprowadzonych w wybranych stanach pracy systemu dla obu zaproponowanych metod optymalizacji, dokonano analizy wpływu metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym na obniżenie zużycia energii na oświetlenie w otwartej przestrzeni

biurowej, wykazując jej potencjał energooszczędności na poziomie 12,6 – 64% w zależności od obciążenia pomieszczenia, w stosunku do tradycyjnej instalacji oświetleniowej (rysunek 8). Tym samym, na przykładzie wybranego pomieszczenia doświadczalnego autor wykazał skuteczność proponowanej metody w poprawie efektywności energetycznej pracy instalacji oświetleniowej.



Rysunek 7. Średnie wartości bezwzględnych różnic procentowych między wytwarzanym, a preferowanym natężeniem oświetlenia na zajętych stanowiskach, przy różnym obciążeniu pomieszczenia.



Rysunek 8. Oszczędności energii uzyskane w wyniku spersonalizowanego sterowania oświetleniem ogólnym biura typu open space w zależności od jego obciążenia, dla optymalizacji bazującej na modelu liniowym i modelu ANN.

Opracowanie poszerza obecny stan wiedzy, ponieważ w znanych autorowi źródłach, brak jest informacji o wyznaczonych doświadczalnie oszczędnościach energii na oświetlenie w biurach typu *open space*, możliwych do uzyskania dzięki regulacji indywidualnej przy zróżnicowanych preferencjach oświetleniowych użytkowników. Autor wykazał również, że wytwarzane w wyniku spersonalizowanego sterowania natężenia oświetlenia na zajętych stanowiskach są bliższe osobistym preferencjom ich użytkowników, niż w przypadku tradycyjnej instalacji oświetleniowej. Na podstawie przeprowadzonych rozważań uzasadnił też wpływ proponowanej metody sterowania, na poprawę satysfakcji i komfortu użytkowników, zarówno w kontekście wytwarzanych warunków oświetleniowych jak i samego udostępnienia możliwości regulacji oświetlenia stanowiska. Tym samym uzasadnił

jej akceptowalność. Autor wskazał również ograniczenia proponowanej metody i przeprowadzonych badań, a także podkreślił istotne różnice między analizą energooszczędności przedstawioną w pracy, a znanymi autorowi, zbliżonymi tematycznie publikacjami.

W **rozdziale 5** zawarto założenia i wytyczne do ustawień oświetlenia w otwartej przestrzeni biurowej, z wykorzystaniem nowoczesnych instalacji elektrycznych stosowanych w budynkach biurowych typu *smart*. Wytyczne te, przedstawiono w kontekście celów realizowanych w ramach metody spersonalizowanego sterowania oświetleniem. Ponadto, przeprowadzono analizę możliwości jednoczesnej realizacji pozostałych celów sterowania, stawianych przed systemem oświetleniowym typu *smart*.

W **rozdziale 6** podsumowano rozważania przeprowadzone w rozprawie. Biorąc pod uwagę rezultaty przedstawionych badań stwierdzono, że wszystkie cele pracy zostały osiągnięte, a postawiona teza została udowodniona. Uzasadniono także znacznie przeprowadzonych badań, a także wskazano kierunki dalszych prac badawczych.

5. Podsumowanie

W niniejszej pracy autor zaproponował metodę lokalnego, spersonalizowanego sterowania oświetleniem biura typu *open space*, która wykorzystując matrycę niezależnie sterowanych lamp LED oświetlenia ogólnego, umożliwia użytkownikom dostosowanie natężenia oświetlenia na stanowisku pracy, w celu zaspokojenia specyficznych, indywidualnych potrzeb oświetleniowych. Oświetlenie pozostałych, niezajętych stanowisk jest przyciemniane. Proponowana metoda łączy zatem regulację indywidualną oraz sterowanie od zajętości stanowiska, a dzięki precyzyjnemu kierowaniu energii według zapotrzebowania, umożliwia ograniczenie jej zużycia na cele oświetleniowe, przy jednoczesnej poprawie komfortu i satysfakcji użytkowników.

Częściowe efekty pracy nad niniejszą rozprawą zostały już opublikowane w literaturze krajowej i międzynarodowej, bądź zaprezentowane na konferencjach międzynarodowych [3, 4, 5, 6, 7].

Indywidualne sterowanie lampami oświetlenia ogólnego otwiera nowe, imponujące możliwości kształtowania otoczenia świetlnego w pomieszczeniach oraz optymalizacji zużycia energii, niedostępne dotychczas dla instalacji oświetleniowej, sterowanej na poziomie całego pomieszczenia lub jego stref. Sterowanie oświetleniem na poziomie poszczególnych stanowisk pracy w otwartej przestrzeni biurowej wprowadza nową jakość, umożliwiając dostosowanie warunków oświetleniowych do indywidualnych preferencji ludzi, a także obniżenie zapotrzebowania na energię do oświetlania w odniesieniu do tradycyjnej instalacji oświetleniowej.

Kierunki dalszych badań

W ramach kontynuacji prac badawczych związanych z tematyką poruszaną w niniejszej pracy, autor planuje:

- przeprowadzenie badań ankietowych mających na celu weryfikację satysfakcji użytkowników z warunków oświetleniowych, wytwarzanych w wyniku działania proponowanej metody sterowania,
- przeprowadzenie badań nad akceptacją użytkowników dla dynamiki zmian w oświetleniu, na skutek jego lokalnego sterowania w otwartych przestrzeniach biurowych,
- implementację rozwiązania do zastosowań praktycznych,
- rozwój metody sterowania m.in. w kierunku uwzględnienia oddziaływania czynnika światła dziennego,
- przeprowadzenie badań nad aspektem równowagi między cylindrycznym natężeniem oświetlenia, a możliwością regulacji w dół natężenia oświetlenia na stanowiskach, wraz z oceną preferencji użytkowników w tym zakresie.

6. Literatura cytowana w autoreferacie

- [1] Williams A., Atkinson B., Garbesi K., Page E. i Rubinstein F., „Lighting controls in commercial buildings”, *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society*, tom 8, nr 3, s. 161-180, 2012.
- [2] PN-EN 12464-1:2012 Światło i oświetlenie - Oświetlenie miejsc pracy - Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach.
- [3] Dechnik M. i Moskwa S., „Smart House - inteligentny budynek - idea przyszłości”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 9, s. 1-10, 2017.
- [4] Dechnik M. i Grzywocz K., „Efektywność energetyczna sterowania oświetleniem wewnątrz”, *Napędy i Sterowanie*, nr 12, s. 64-69, 2017.
- [5] Dudzik M., Dechnik M. i Furtak M., „Application of neural networks to lighting systems”, *4th Central European Symposium on Building Physics (CESBP), Praga, MATEC Web of Conferences, vol. 282*, 2019.
- [6] Romanska-Zapala A., Bomberg M., Fedorczyk-Cisak M., Furtak M., Yarbrough D. i Dechnik M., „Buildings with environmental quality management (EQM) Part 2: Integration of hydronic heating/cooling with thermal mass”, *Journal of Building Physics*, tom 41, nr 5, p. 397–417, 2018.
- [7] Fedorczyk-Cisak M., Furtak M., Szmelter A. i Dechnik M., „The Influence of Air Heating and Lighting on the Comfort Conditions in NZEB Buildings' Rooms”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, tom 603, 2019.
- [8] Newsham G., Aries M. B. C., Mancini S. i Faye G., „Individual control of electric lighting in a daylight space”, *Lighting Research & Technology*, tom 40, nr 1, s. 25-41, 2008.

- [9] Boyce P. R., Veitch J. A., Newsham G. R., Jones C. C., Heerwagen J., Myer M. i Hunter C. M., „Occupant use of switching and dimming controls in offices”, *Lighting Research & Technology*, tom 38, nr 4, p. 358–376, 2006.
- [10] Veitch J. A. i Newsham G. R., „Preferred luminous conditions in open-plan offices: Research and practice recommendations”, *Lighting Research and Technology*, tom 32, s. 199-212, 2000.
- [11] Newsham G., Veitch J., Arsenault C. i Duval C. , „Effect of dimming control on office worker satisfaction and performance”, *IESNA Annual Conference Proceedings, Tampa, Florida, July 25-28, 2004*, s. 19-41 , 2004.
- [12] Boyce P. R., Eklund N. H. i Simpson N. S., „Individual Lighting Control: Task Performance, Mood, and Illuminance”, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, tom 29, nr 1, s. 131-142, 2000.
- [13] Galasiu A. i Newsham G., „Energy savings due to occupancy sensors and personal controls: A pilot field study”, *Lux Europa 2009, 11th European Lighting Conference, Istanbul*, s. 745-752, 2009.
- [14] Begemann S. H. A., van den Beld G. J. i Tenner A. D., „Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses”, *International Journal of Industrial Ergonomics*, tom 20, nr 3, s. 231-239, 1997.
- [15] Chraibi S., Crommentuijn L., van Loenen E. i Rosemann A., „Influence of wall luminance and uniformity on preferred task illuminance”, *Building and Environment*, tom 117, s. 24-35, 2017.
- [16] Newsham G., Arsenault C., Veitch J., Tosco A. M. i Duval C., „Task Lighting Effects on Office Worker Satisfaction and Performance, and Energy Efficiency”, *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society* , tom 1, nr 4, s. 7-26, 2005.
- [17] Uttley J., Fotios S. i Cheal C., „Satisfaction and illuminances set with user-controlled lighting”, *Architectural Science Review*, tom 56, nr 4, s. 306-314, 2013.
- [18] Laurentin C., Berrutto V., Fontoynt M. i Girault P., „Manual control of artificial lighting in a daylight space”, *3rd International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings, Lyon, France*, p. 175–180, 1998.
- [19] Reinhart C. i Voss K., „Monitoring manual control of electric lighting and blinds”, *Lighting Research & Technology*, tom 35, nr 3, p. 243–258, 2003.